

V1.5 „Multimaterialrecycling“ - Abschlussbericht

ROBERT KRAFT

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

WIR! – WIRreFa

V1.5 „Multimaterialrecycling“; TP4: Bewehrungsentwicklung

Förderkennzeichen: 03WIR6007D

Zuwendungsempfänger: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Wirtschaftswissenschaft und
Wirtschaftsingenieurwesen
Karl-Liebknecht-Str. 132
04277 Leipzig

Teilprojektleitung: Prof. Dr. Klaus Holschemacher

Projektlaufzeit: 01.05.2023 - 30.04.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
Fassung vom 26. September 2025

Inhaltsverzeichnis

Teil I: Kurzbericht	3
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen	5
Teil II: Eingehende Darstellung	7
5 Ausführliche Darstellung der Arbeiten und Ergebnisse	7
5.1 AP 1 Prozesskettenanalyse	7
5.1.1 AP 1.4 Prozesskettenanalyse zur Herstellung von Bewehrungen	7
5.1.2 AP 1.5 Zusammenfassung Prozesskettenvisualisierung und Schnittstellenorganisation	9
5.1.3 AP 2.4 Prüfkonzepte, Festlegung zu Schnittstellen und Dokumentation	10
5.1.4 AP 2.5 Materialprüfungen und Verbesserungsmaßnahmen	12
5.1.5 AP 2.6 Erarbeitung Prozessmodell für abgestimmte Wertschöpfungskette	16
5.2 AP 3 Entwicklung R-Beton	18
5.2.1 AP 3.5 Materialprüfungen, Bewertung und Ableitung einer Vorzugslösung	18
5.3 AP 4 Entwicklung von R-Bewehrung	21
5.3.1 AP 4.1 Anforderungen für R-Bewehrung	21
5.3.2 AP 4.2 Weiterentwicklung der Garnablage und Materialprüfungen	22
5.3.3 AP 4.3 Ergebnisanalyse und Ableitung einer Vorzugslösung	25
5.3.4 AP 4.4 Materialfertigung für Funktionsmuster und Demonstratorbau für R-Verbundbauteil	27
5.4 AP 5 Entwicklung von R-Verbundbauteilen	28
5.4.1 AP 5.3 Verbundkennwertermittlung und Ergebnisbewertung	28
5.4.2 AP 5.6 Validierung Prozessmodell für aufeinander abgestimmter Prozessketten	29
5.4.3 AP 6.1 Ökologische Nachhaltigkeitsbetrachtung	30

TEIL I: KURZBERICHT

1 AUFGABENSTELLUNG

Die stoffliche Verwertung produktionsbedingter faserhaltiger Abfälle stellt eine wirtschaftlich und ökologisch unerlässliche Voraussetzung zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen dar. Der Werterhalt der recycelten Carbonfasern (rCF) spielt dabei eine entscheidende Rolle. Derzeit erfolgt die Verarbeitung von rCF hauptsächlich zu Füllstoffen z. B. für Spritzgussanwendungen oder Vliesstoffen. Aufgrund der dabei relativ schlechten erzielbaren mechanischen Eigenschaften sind diese Ansätze nur bedingt für den erneuten Einsatz im Strukturleichtbau geeignet.

Ähnlich zu den faserhaltigen Abfällen verhält es sich mit den Materialien, die beim Abbruch von Gebäuden und Infrastruktur anfallen. Gerade einmal 1 % der mineralischen Abfälle finden eine Wiederverwendung im Betonhochbau. Der Rest wird im Tiefbau als z. B. Tragschicht verbaut. Dieses Downcycling der wertvollen Gesteinskörnung entspricht jedoch nicht den Zielen der Bundesregierung zur ressourceneffizienten Verwendung von Materialien und zum Umweltschutz.

Vor den genannten Hintergründen wurde das Bündnis WIR! Wir recyceln Fasern initiiert mit dem Ziel insbesondere faserhaltige Abfälle, aber auch mineralische Abfälle zu hochwertigen Sekundärbaustoffen aufzuarbeiten und somit den Stoffkreislauf von Faserverbundbauteilen zu ergänzen.

Im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeiten des IfB und seiner Kooperationspartner werden die Voraussetzungen für den Einsatz von rCF und recycelten Gesteinskörnungen im Carbonbetonbau geschaffen. Dabei stehen die Nutzung der bisherigen Abfallströme und die Reduzierung, im besten Fall die Vermeidung, der Entnahme natürlicher Ressourcen im Vordergrund. Die übergeordneten Ziele sind: 1. die Entwicklung und die Herstellung verschnittfreier Bewehrungsstrukturen aus rCF-Garnen, 2. einer Betonmatrix mit erhöhtem Anteil an recycelten Gesteinskörnungen (R-Beton) mit dem Schwerpunkt die bisher ungenutzten Feinanteile (≤ 2 mm) zu verwenden und 3. die Fertigung von Carbonbetonbauteilen.

Für die Verarbeitung von rCF-Garnen mit der robotergestützten Garnablagetechnik bedarf es der konstruktiv-technologischen Anpassung der Anlagenkomponenten, um damit im Carbonbetonbau einsetzbare Bewehrungsstrukturen fertigen zu können. Diese ist insbesondere durch die Materialcharakteristik der rCF-Garne begründet. Die besonders schonende Verarbeitung der rCF-Garne steht bei den Entwicklungsarbeiten im Vordergrund. Bezüglich der Verwendung der feinen Gesteinskörnungen im angestrebten R-Beton sind die Aufbereitungsmethoden, die Betonmischung an sich und die Prüfmethoden Forschungsschwerpunkte.

2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Die stoffliche Verwertung produktionsbedingter Carbonfaserabfälle stellt eine wirtschaftlich und ökologisch unerlässliche Voraussetzung zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) dar. Der Werterhalt der recycelten Carbonfasern spielt dabei eine entscheidende Rolle. Derzeit erfolgt hauptsächlich die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern zu Füllstoffen z. B. für Spritzgussanwendungen oder zu Vliesstoffen. Aufgrund der geringen erzielbaren mechanischen Eigenschaften sind diese Ansätze nur bedingt für den erneuten Einsatz im Strukturleichtbau geeignet.

Ähnlich zu den Carbonfaserabfällen verhält es sich mit den Materialien, die beim Abbruch von Gebäude und Infrastruktur im Bauwesen anfallen. Sie werden aufgrund nicht ausreichend festgelegter Regeln zur Verwendung der anfallenden Gesteinskörner z. B. im Unterbau von Straßen verwendet. Dieses sog. Downcycling der wertvollen Gesteinskörner entspricht nicht den übergeordneten Zielen der Bundesregierung zur ressourceneffizienten Verwendung von Materialien und zum Schutz der Umwelt.

3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das Verbundvorhaben wurde gemeinsam unter der Leitung des Betonwerk Oschatz, dem Institut für Betonbau an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK), Caruso Umweltservice und BCS-Natur- und Spezialbaustoffe GmbH bearbeitet. Der Ablauf des Vorhabens war in 6 Arbeitspakete mit verschiedenen Arbeitsschritten unterteilt.

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden die Defizite im Austausch relevanter Daten und Informationen identifiziert, die für aufeinander abgestimmte Prozessketten in der textil- und betonbasierten Bauindustrie erforderlich sind. Dabei konnten zentrale Schnittstellen zwischen den Prozessstufen definiert, strukturiert und in eine übergeordnete Systematik überführt werden. Zu diesem Zweck erfolgte zunächst eine umfassende Analyse der bestehenden Prozessketten in den Bereichen Bewehrungsherstellung, Beton- und Verbundbauteilfertigung, Materialprüfung sowie Gebäude- und Infrastrukturabbruch. Der Fokus lag hierbei auf der bestehenden Informations- und Materialaustauschlogistik sowie auf der Identifikation von Inkonsistenzen, Medienbrüchen und unzureichender Datenverfügbarkeit. Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung mit dem Verbundvorhaben WIR-V1.1 durchgeführt. Durch den koordinierten Datenabgleich konnten insbesondere belastbare Datensätze zur Sammlung und Sortierung von faserhaltigen Abfällen generiert werden. Diese wurden mit den Prozessketten der Verbundbauteilfertigung abgeglichen und integriert. Für bisher nicht erfasste Schnittstellen wurden praxistaugliche Lösungen zur Datenerfassung und -weitergabe entwickelt. Auf Grundlage der gesammelten Daten konnten neue, verbesserte Prozessketten modelliert werden, die einen durchgängigen Informations- und Materialfluss ermöglichen. Die entwickelten Strukturen wurden pro Prozessbereich aufbereitet und hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz bewertet. Die daraus resultierende Systematik bildet die Grundlage für künftige softwaregestützte Schnittstellenlösungen. Zusammenfassend liegen nun prozesskettenübergreifend abgestimmte Abläufe mit optimierter Informations- und Materiallogistik vor. Diese ermöglichen eine signifikante Steigerung der Ressourceneffizienz und stellen die Basis für skalierbare digitale Lösungen im Kontext der zirkulären Bauwirtschaft dar.

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurden die Voraussetzungen für den gezielten und hochwertigen Einsatz von recycelten Gesteinskörnungen im Bauwesen geschaffen. Ziel war es, beim Rückbau anfallende mineralische Abbruchmaterialien systematisch zu erfassen, zu klassifizieren und einer Wiederverwendung im Sinne eines Upcyclings zuzuführen. Hierzu wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, Gesteinskörnungen nach baurelevanten Qualitätskriterien in standardisierte Klassen einzuordnen und potenziellen Herstellern als qualitätsgesicherter Sekundärrohstoff zur Verfügung zu stellen. Zur Erreichung dieses Ziels wurden bestehende analytische Verfahren (u. a. chemische Analytik zur Schadstoffbewertung) durch neu konzipierte, anwendungsnahe Prüfmethode ergänzt. Diese ermöglichen eine schnelle und zuverlässige Bewertung der Materialqualität bereits während des Rückbauprozesses. So konnte eine Grundlage geschaffen werden, um Abbruchmaterialien direkt vor Ort nach verwertbaren Fraktionen zu trennen. Ein besonderer Fokus lag auf der Entwicklung von Lösungen für den selektiven Rückbau. Auf Basis der im Projekt generierten Datengrundlagen wurden Verfahren und Abläufe definiert, die eine

gezielte und sortenreine Trennung der Baustoffe im Rückbauprozess erlauben. Dies trägt maßgeblich zur Ressourcenschonung und zur wirtschaftlichen Wiederverwertung bei. Abschließend wurde eine Prozesskette für die erweiterte Klassifizierung von Abbruchmaterialien aufgebaut. Diese bildet die Grundlage für eine systematische Integration recycelter Gesteinskörnungen in die Materialkreisläufe des Hochbaus – sowohl technologisch als auch wirtschaftlich.

Im Rahmen von AP3 konnte der Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen in zwei neu entwickelten R-Betonen signifikant gesteigert werden. Ziel war es, einen Anteil von mindestens 60% RC-Gesteinskörnungen zu erreichen, bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit im Verbund mit Carbonbewehrung. Dieses Ziel wurde mit mehreren Rezepturvarianten erfolgreich realisiert. In Versuchsserien konnte eine Druckfestigkeit von mindestens 85% im Vergleich zu Referenzbetonen mit Primärrohstoffen erzielt werden, womit die Anforderungen an Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt wurden.

Im Rahmen von AP4 wurde das Ziel erreicht, verschnittfreie Textilbewehrungen aus recycelten Endlosfasergarnen (R-Fasergarnen) simulationsgestützt zu entwickeln und herzustellen. Hierfür wurde die bestehende Fertigungstechnologie sowohl im Labormaßstab (HTWK) als auch im industriellen Umfeld erfolgreich an die besonderen Eigenschaften der R-Fasergarne angepasst. Insbesondere die Zuführung, Tränkung und Ablage der recycelten Endlosgarne konnten prozesssicher umgesetzt werden, wobei der Fokus auf einer schonenden Verarbeitung zur Erhaltung der Faserintegrität lag.

Im Rahmen des Arbeitspaket 5 wurde ein Ansatz entwickelt, um zukünftig kostenintensive Analysen bei der Klassifizierung von Abbruchmaterialien signifikant zu reduzieren. Ziel war es, bereits im Fertigungsprozess von Bauteilen Methoden zu integrieren, die eine nachhaltige und rückverfolgbare Dokumentation der eingesetzten Materialien ermöglichen. Hierdurch wird eine zuverlässige und nachvollziehbare Datengrundlage geschaffen, die den Wieder- und Weiterverwendungspfad von Materialien über den gesamten Lebenszyklus hinweg begleitet. Zentrales Ergebnis ist ein validiertes Prozessmodell, das den lückenlosen Informationsfluss über verwendete Rohstoffe, Rezepturen und Herstellungsparameter digital abbildet. Damit können relevante Materialkennwerte – insbesondere der R-Verbundbauteile – standardisiert erfasst und archiviert werden. Dies ermöglicht im Rückbauprozess eine gezielte Bewertung und Einstufung, ohne aufwendige Einzelanalysen vornehmen zu müssen. Ergänzend wurde ein Konzept zur Erfassung und Bewertung von Umwelteinflüssen erarbeitet. Es erlaubt, potenzielle Veränderungen der Materialeigenschaften im Laufe der Nutzung – z. B. durch Feuchte, Temperaturwechsel oder chemische Belastung – in die Bewertung der Wiederverwendbarkeit einzubeziehen. Hierzu wurden Parameter definiert, die als Bewertungsgrundlage für etwaige Re-Klassifizierungen herangezogen werden können.

Im Rahmen von Arbeitspaket 6 wurden die ökologischen und ökonomischen Potenziale von Bauteilen aus R-Carbonbeton (Carbonbeton mit rezyklierten Komponenten) umfassend untersucht. Die zugrunde liegende These, dass R-Carbonbetonbauteile signifikant geringere Treibhausgasemissionen (gemessen in CO₂-Äquivalenten) aufweisen als vergleichbare Bauteile aus Primär-Carbonbeton oder konventionellem Stahlbeton, konnte durch die durchgeführte Analyse bestätigt werden.

4 WESENTLICHE ERGEBNISSE UND ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

Im Rahmen des Vorhabens konnten fünf zentrale Ergebnisse erzielt werden: Erstens wurde eine prozessuale und logistische Analyse der gesamten Herstellungskette von R-Carbonbetonbauteilen durchgeführt. Dabei wurden Schnittstellen identifiziert, abgestimmt und zu einer optimierten, modellhaft

abbildbaren Prozesskette zusammengeführt. Zweitens wurde ein Lastenheft zur Klassifizierung rezyklierter Gesteinskörnungen erstellt, das sämtliche normativen und umweltrelevanten Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt. Aufbauend darauf wurde ein zweistufiges Konzept zur qualitätsgesicherten Gewinnung rezyklierter Gesteinskörnung entwickelt und exemplarisch umgesetzt. Drittens wurden neue Betonrezepturen mit einem Rezyklatanteil von bis zu 75% erarbeitet und im Labormaßstab umfassend geprüft. Die Ergebnisse belegen die Erfüllung der geforderten Festbeeigenschaften sowie das Substitutionspotenzial von Zement durch Brechsand und Ziegelmehl. Viertens wurde ein Lastenheft für R-Carbonbewehrung erstellt und erste manuelle Funktionsmuster gefertigt. Die Untersuchungen zeigen, dass durch geeignete Umwindungstechnologien die Verarbeitbarkeit der R-Garne deutlich verbessert werden kann. Fünftens wurden zwei Anwendungsszenarien (innen- und außenliegende Bauteile) hinsichtlich technischer Anforderungen spezifiziert und ein erstes Fassadenelement mit 60% rezyklierter Gesteinskörnung sowie R-Bewehrung erfolgreich im Labormaßstab hergestellt und auf der BAU 2025 öffentlich präsentiert.

Teil II: Eingehende Darstellung

5 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER ARBEITEN UND ERGEBNISSE

Das Ziel dieses Teilvorhabens im Rahmen des C³-Projekts bestand darin, ein Konzept für den Aufbau von selbsttragende Strukturen zu entwickeln, die einen systematischen Austausch von Grundlagenforschungsergebnissen und Entwicklung im Bereich des Carbonbetons ermöglichen und den Aufbau eines bauspezifischen Innovationsmanagements zur fortwährenden Verarbeitung neuer Erkenntnisse und Neukombination vorhandenen Wissens unterstützen. Dabei wurden verschiedene Fragestellungen bearbeitet, wie die Nutzung bestehender Strukturen im Wissens- und Technologietransfer, die räumlich konzentrierte Wissensverarbeitung zur Beschleunigung und Skalierung von Anwendungen, die Voraussetzungen für eine Skalierung und Kostenreduktion, die Ergänzung etablierter Indikatorensysteme und die Entwicklung eines Innovationsmanagements für die weitere Forschung an Carbonbeton und ihre Anwendung.

5.1 AP 1 Prozesskettenanalyse

5.1.1 AP 1.4 Prozesskettenanalyse zur Herstellung von Bewehrungen

Ziel: Ziel von AS 4.4 ist die theoretische Abbildung, Analyse und Weiterentwicklung der Prozesskette zur Bewehrungsherstellung mittels direkter Garnablage. Unter Berücksichtigung angrenzender Prozessschritte – insbesondere der Herstellung und Lieferung von R-Carbonfasergarnen sowie der Fertigung von Verbundbauteilen im Werk – sollen bestehende Abläufe bewertet, notwendige Anpassungen identifiziert und neue Teilprozesse wie Spannrahmenaufbau, Garnablage, Tränkung und Aushärtung konzipiert werden. Ergänzend werden eine Iststandanalyse, die Erfassung relevanter Schnittstellen sowie die Entwicklung einer Funktionsstruktur zur Datendokumentation und Materialverfolgung durchgeführt, mit dem Ziel einer ganzheitlich abgestimmten und durchgängigen Wertschöpfungskette.

Im Berichtszeitraum wurde die Aktivität A 1.4 Prozesskettenanalyse zur Herstellung von Bewehrungen mittels direkter Garnablage erfolgreich abgeschlossen. Dafür wurden die notwendigen Prozessschritte der Bewehrungsherstellung vom Garn bis zur fertigen Bewehrungsmatte dokumentiert und in eine Flussdiagramm nach DIN 66001 visualisiert [Abbildung 1]. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den Teilprozessen der Formgebungsstruktur durch die Umlenkpunkte, der Garnablage mit gleichzeitiger Tränkung sowie der Aushärtung der harzgetränkten Textilstruktur P1-P3. Aufbauend auf der erstellten Prozesskette wurden im weiteren Verlauf des Projektes die einzelnen Prozessschritte iterativ an das Recyclinggarn angepasst, da sich doch erhebliche Unterschiede in der Verarbeitung des R-Garns gegenüber des Primärgarns aufzeigten.

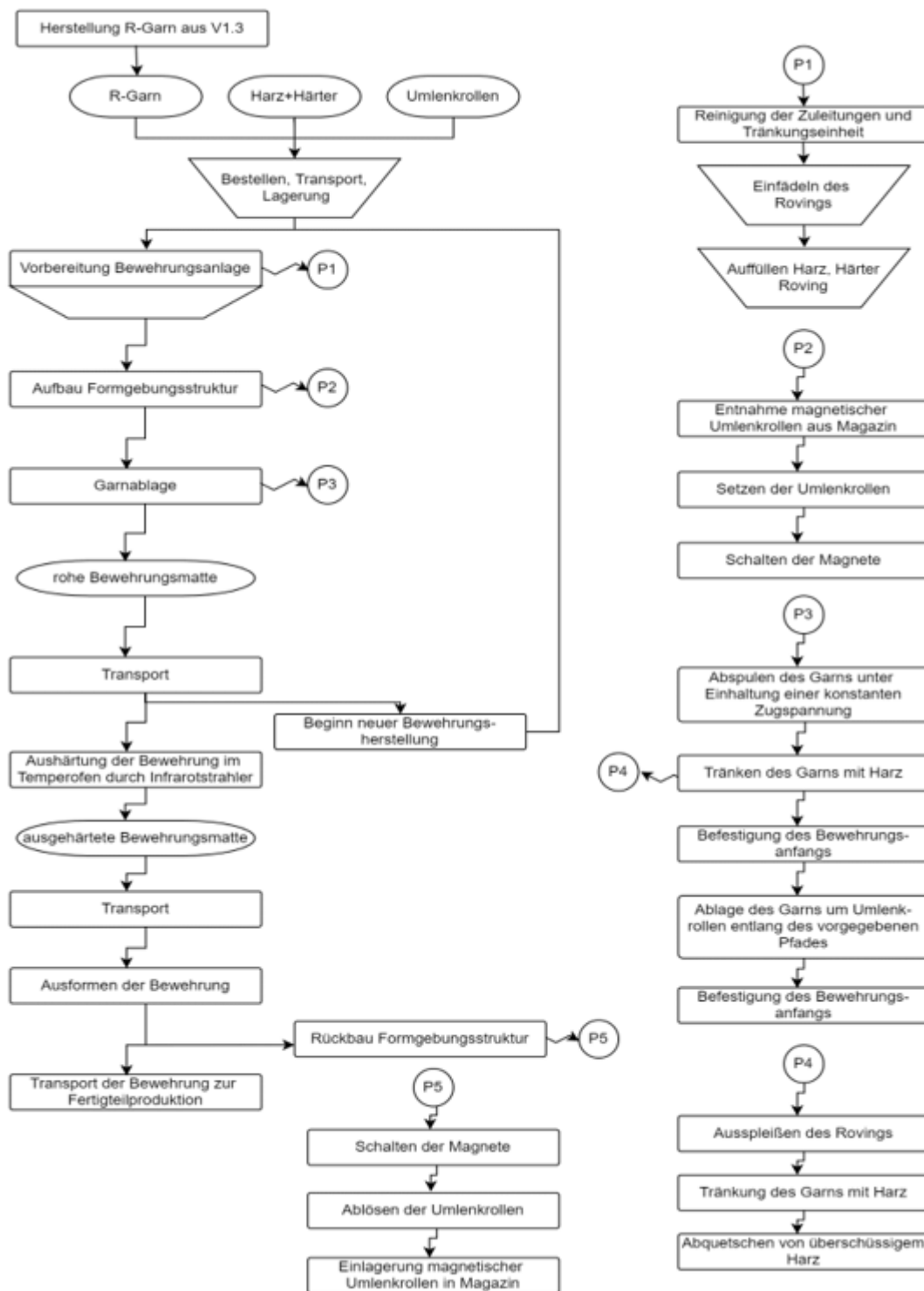


Abbildung 1: Darstellung der Prozesskette der Bewehrungsherstellung (Primärfaser) mittels direkter Garnablage

Des Weiteren wurde die Schnittstellen zu den anderen Prozessketten, wie Verbundbauteilherstellung (BWO) und R-Carbonfasergarn (WIR-V1.3), analysiert und angepasst.

Zudem wurde anhand der Randbedingungen die Bewehrungsablage auf eine Bewehrungsebene bei einem hohen Automatisierungsgrad im Herstellungsprozess gemeinsam mit dem Projektpartner BWO das Anwendungsgebiet bzw. das Carbonbetonverbundbauteil Fassadenelement mit hohen Anforderungen und eine tragende Innenwand (Doppelwand) mit geringeren Anforderungen festgelegt.

5.1.2 AP 1.5 Zusammenfassung Prozesskettenvisualisierung und Schnittstellenorganisation

Ziel: Ziel von AS 1.5 ist die Zusammenführung und Visualisierung der weiterentwickelten Prozessketten aus AS 1.1, 2.1, 3.1 und 4.1 durch die HTWK in Kooperation mit den Projektpartnern sowie den Verbundvorhaben V1.1 und V1.3. Dabei werden die Schnittstellen zur Datenübertragung und -speicherung für die Dokumentation der Dienstleistungs- und Produktprozesse definiert und iterativ mit den Arbeitspaketen 2 bis 5 abgestimmt.

Im AS1.5 wurden die erstellten Prozessketten und weiterentwickelten Lösungen aus den AS1.1, AS1.2, AS1.3 und AS1.4 in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und den kollaborierenden Verbundvorhaben V1.1 und V1.3 zusammengefasst und visualisiert [Abbildung2]. Es wurden die Schnittstellen zur Datenübertragung und -speicherung für die Prozesskettenabläufe (Dienstleistungen und Produkte)

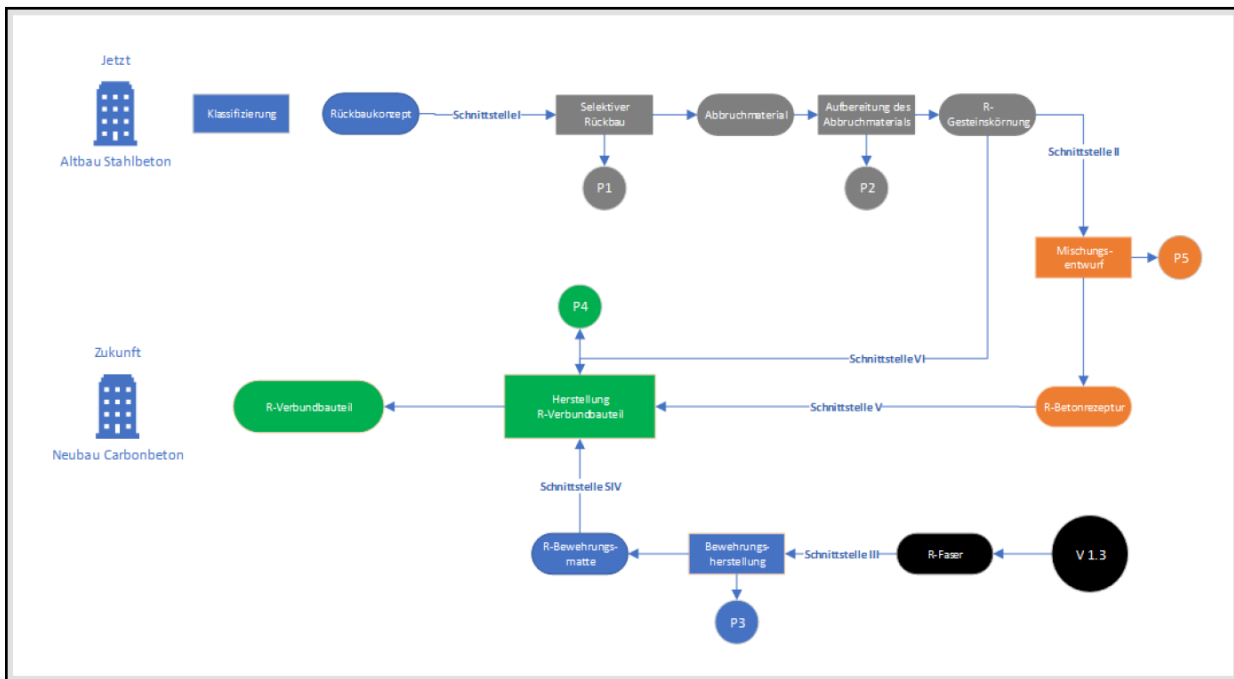


Abbildung 2: Prozesskettenübersicht und Schnittstellendefinition aller Projektpartner

Im Ergebnis steht ein Anforderungsprofil für einen ressourcen- und kosteneffizienten Materialeinsatz für R-Mattenbewehrungen, R-Gesteinskörnungen sowie für R-Carbonbetonverbundbauteile. Für das Anforderungsprofil wurden zwei Anwendungsfälle definiert: innenliegendes Deckenelement und außenliegendes Fassadenelement. Das Anforderungsprofil bezieht sich einerseits auf aktuelle Normen und Vorschriften und andererseits auf herstellungsbedingte Parameter, welche eingehalten werden müssen, um einen reibungslosen Prozessablauf sowie eine qualitätsgerechte Fertigung zu lassen. Dafür wurden die Prozessketten (Abbruch/Aufbereitung Gesteinskörnung – Herstellung R-Beton- Herstellung R-Bewehrung – Herstellung R-Carbonbetonbauteil) der einzelnen Partner untersucht und existierende Informations- und Materialaustauschlogistik analysiert. Die Prozessketten der Partner wurden visualisiert, die Schnittstellen zwischen den Partner für einen reibungslosen Ablauf festgelegt und angepasst. Als

Ergebnis liegt eine optimierte Prozesskette vor, welche als Grundlage für die folgenden AP dient und fortlaufend optimiert wird.

5.1.3 AP 2.4 Prüfkonzepte, Festlegung zu Schnittstellen und Dokumentation

Ziel: Ziel ist die Bewertung der Qualität der Aufbereitung rezyklierter Gesteinskörnungen anhand definierter Untersuchungsverfahren, darunter chemische Analysen, die Bestimmung des Wasseranspruchs sowie der Kornform. Die Prüfungen orientieren sich an geltenden Normen und der DAfStb-Richtlinie. Die gewonnenen Ergebnisse dienen der Beurteilung des Konzepts zum selektiven Rückbau und werden über festgelegte Schnittstellen mit den Projektpartnern abgestimmt.

Im Arbeitsschritt AS 2.4 wurde ein erweitertes Prüfkonzept zur technischen Klassifizierung von Abbruchmaterialien mit dem Ziel erarbeitet, rezyklierte Gesteinskörnungen gezielt für hochwertige Anwendungen im Hochbau verfügbar zu machen. Ausgangspunkt war die Feststellung, dass bislang eingesetzte Prüfverfahren – insbesondere rein chemisch orientierte Analysen – nicht ausreichen, um die bautechnische Eignung der Materialien umfassend zu bewerten. Eine verwertungsorientierte, normnahe Einordnung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften war daher zwingend erforderlich.

Das entwickelte Prüfkonzept basiert auf einer Kombination aus chemischer, physikalischer und geometrischer Bewertung, orientiert sich an bestehenden technischen Regelwerken und ist darauf ausgelegt, qualitätsrelevante Kennwerte frühzeitig im Rückbauprozess zu erfassen. Die folgenden Untersuchungsschritte wurden als zentrale Bausteine des Konzepts definiert:

Chemische Analyse gemäß LAGA PN 98 und DepV

Zur Bestimmung möglicher Schadstoffbelastungen wurden chemische Untersuchungen gemäß der "LAGA-Mitteilung 20" (PN 98) und der Deponieverordnung (DepV) durchgeführt. Diese ermöglichen eine sichere Einordnung in Verwertungs- oder Entsorgungspfade. Relevante Parameter wie Schwermetalle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Asbest wurden berücksichtigt. Diese Analysen sind notwendig, um die Umweltverträglichkeit der Stoffe sicherzustellen und die Nutzung als Bauprodukt rechtssicher zu ermöglichen.

Wasseranspruch gemäß DIN EN 1097-6

Die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens von rezyklierten Gesteinskörnungen wurde nach DIN EN 1097-6:2001-11 „Bestimmung der Masse durch hydrostatisches Wiegen“ durchgeführt. Der Wasseranspruch beeinflusst unmittelbar die Mischungsberechnung im Frischbeton und ist insbesondere bei der Verarbeitung von R-Beton für die Steuerung des Wasserzementwerts entscheidend. Ein erhöhter Wasseranspruch weist auf poröse oder unregelmäßige Gesteinskörnungen hin, die die Verarbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigen können.

Kornformanalyse nach DIN EN 933-3

Die geometrische Charakterisierung der Gesteinskörnung erfolgte gemäß DIN EN 933-3:2012-12 „Bestimmung der Kornform – Flakigkeitskennzahl“, um die Kornform als entscheidenden Parameter für Packungsdichte, Mischbarkeit und mechanische Eigenschaften zu bewerten. Ziel war es, Fraktionen mit möglichst kubischer Kornform zu identifizieren, da diese eine günstigere Verdichtung und bessere Festigkeitseigenschaften im Endprodukt ermöglichen.

Anwendung technischer Kriterien gemäß DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen“

Die technische Bewertung der Materialqualität erfolgte in Anlehnung an die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zur Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, die praxisnahe Empfehlungen zur maximalen Substitutionsrate, zu Eigenschaften der rezyklierten Körnung sowie zu erforderlichen Prüfverfahren gibt. Diese Richtlinie erlaubt es, die Ergebnisse normkonform zu interpretieren und auf ihre Tauglichkeit im Tragwerksbau zu bewerten.

Prozessuale Integration und Schnittstellenmanagement

Die Prüfergebnisse wurden über ein standardisiertes Erfassungs- und Dokumentationssystem aufbereitet. In enger Abstimmung mit Projektpartnern wurden digitale Schnittstellen definiert, über die Prüfdaten direkt an Planungs-, Rückbau- und Herstellungsprozesse übergeben werden können. Diese systematische Verzahnung wurde über regelmäßige Partnermeetings (Präsenz/Online) begleitet und erlaubt eine adaptive Steuerung des selektiven Rückbaus auf Grundlage objektiver Prüfwerte.

Das entwickelte Prüfkonzept ermöglicht somit nicht nur eine verlässliche bautechnische Bewertung von rezyklierten Gesteinskörnungen, sondern unterstützt auch die strategische Steuerung des Rückbauprozesses. Es schafft die Grundlage dafür, rezyklierte Materialien nicht pauschal dem Downcycling zuzuführen, sondern gezielt und qualitätsgesichert einem hochwertigen Upcycling zuzuführen. Durch die normnahe Ausrichtung besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die entwickelten Verfahren mittel- bis langfristig in Regelwerke zu überführen und damit die Verwertungsquote hochwertiger RC-Baustoffe deutlich zu erhöhen.

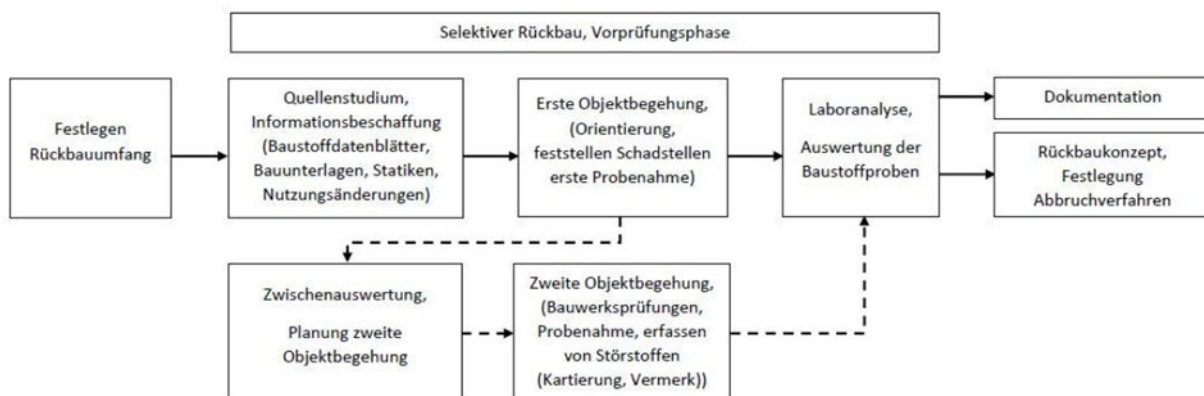


Abbildung 3: Optimierte Prozesskette selektiver Rückbau, Vorprüfungsphase

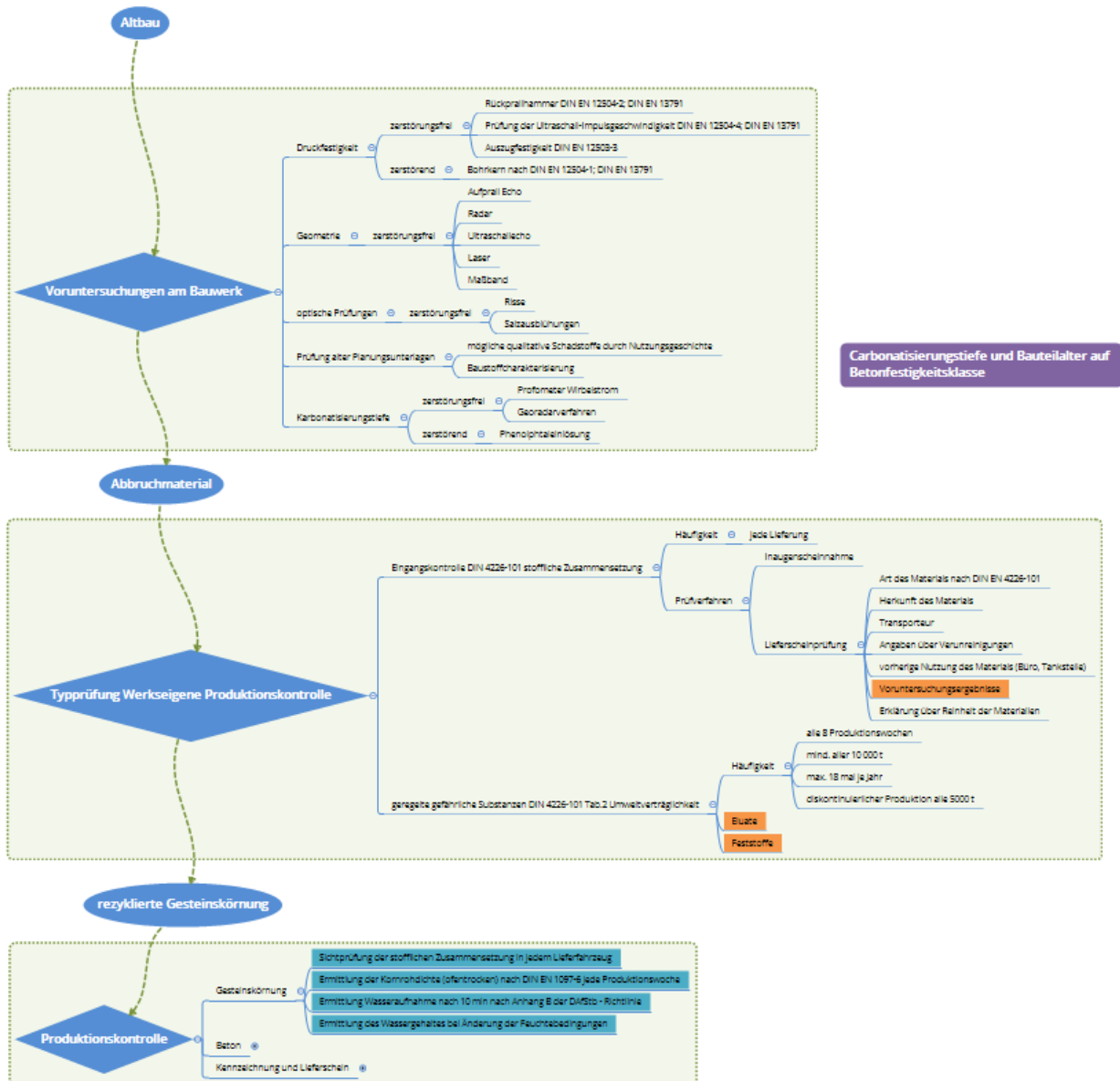


Abbildung 4: Prüfübersicht alle betonrelevanten Prüfungen vom Altbau bis zur R-Gesteinskörnung

5.1.4 AP 2.5 Materialprüfungen und Verbesserungsmaßnahmen

Ziel: Ziel dieses Arbeitsschritts ist die umfassende Prüfung der Eignung der gewonnenen RC-Körnung für den Einsatz im R-Beton. Dazu werden chemische Analysen auf wasser- und säurelösliche Salze, Dichtebestimmungen sowie Wasseraufnahmeversuche im Pycnometer durchgeführt. Ergänzend erfolgt die Auswertung der Kornform mit dem Ziel, eine möglichst kubische Kornstruktur zu erreichen, sowie die Durchführung von Siebanalysen. Die Ergebnisse werden dokumentiert und fließen in die Weiterentwicklung geeigneter R-Betonrezepturen ein. Die finale Bewertung der RC-Körnung erfolgt durch vergleichende Untersuchungen mit einem Referenzbeton, bei dem der Rezyklatanteil schrittweise ersetzt wird, um den Verbund im Beton gezielt beurteilen zu können.

Im Rahmen der werkstofflichen Charakterisierung des verwendeten rezyklierten Gesteinskorns wurden zunächst umfassende Laboranalysen durchgeführt, um die Eignung des Materials für den Einsatz in Carbonbeton zu prüfen. Dabei lag der Fokus auf der Bewertung zentraler Eigenschaften wie der

Korngrößenverteilung, dem Gehalt an Verunreinigungen, der Rohdichte, der Wasseraufnahmefähigkeit, dem Zementsteingehalt, dem Salzgehalt sowie der Kornform.

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde eine Siebanalyse an der Lieferkörnung 8/16 mm durchgeführt. Diese lieferte grundlegende Informationen über die Zusammensetzung des Haufwerks und diente als Referenzwert zur Bewertung des Effekts der nachfolgenden Aufbereitungsmaßnahmen. Die Ergebnisse zeigten eine inhomogene Verteilung mit erhöhtem Feinkornanteil. Parallel dazu wurde der Gehalt an Verunreinigungen mittels Sichtkontrolle und Wiegung bestimmt. Dabei wurden alle nicht-mineralischen Bestandteile wie Holzreste, Metalle oder Kunststoffe erfasst. Der Gesamtanteil blieb im Grenzbereich der DIN EN 12620 für Typ-1-Zuschläge, wobei vereinzelte Proben mit einem erhöhten Anteil an Fremdstoffen auffielen, was auf die Heterogenität des Ausgangsmaterials hinweist.

Tabelle 1: Messwerte für den Siebrückstand und Rechenwerte für den Siebdurchgang der rezyklierten Gesteinskörnung in der Korngruppe KG8/16 im Lieferzustand

Sieblochweite [mm]	0	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5	63,0
Siebrückstand Ri [g] (gemessener Wert)	97,5	45,1	29,6	18,7	29,1	332,8	11949,4	1088,2	0,0	0,0
Siebdurchgang Di [Vol.-%] (berechneter, kumulierter Wert)	0,0	0,72	1,05	1,27	1,40	1,62	4,07	91,99	100	100

Die Rohdichte wurde gemäß DIN EN 1097-6 im Pyknometerverfahren ermittelt. Die Messungen ergaben Werte, die innerhalb der zulässigen Bandbreiten für mineralische Gesteinskörnungen liegen, allerdings mit deutlicher Streuung je nach Fraktion. Dieser Aspekt wurde bei der späteren Betonrezeptur berücksichtigt, insbesondere im Hinblick auf das Mischungsverhältnis und den resultierenden Wassermenge. Im Anschluss daran wurde die Wasseraufnahme durch normierte Kurzzeitlagerung (10, 20 und 30 Minuten) ermittelt. Die Analysen ergaben, dass insbesondere die feineren Fraktionen ein erhöhtes Saugverhalten aufwiesen, jedoch alle untersuchten Fraktionen die in der DAfStb-Richtlinie formulierten Grenzwerte von maximal 10 Masseprozent einhielten.



Abbildung 5: Pycnometer-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung

Der Zementsteingehalt der Proben wurde durch chemische Auflösung mit Amidosulfonsäure bestimmt. Diese Methode ermöglicht eine Differenzierung zwischen ursprünglichem Zuschlagsmaterial und gebundenem Zementstein, welcher als porös gilt und maßgeblich zur erhöhten Wasseraufnahme beiträgt. Die Auswertungen zeigten, dass ein nennenswerter Anteil insbesondere in der Feinkornfraktion vorhanden war, was für das Wasserbindevermögen und die mögliche latente Reaktivität im Beton von Bedeutung ist.



Abbildung 6: Bestimmung des Zementsteingehaltes an Proben eingelegt in Lösung aus Amidosulfonsäure und Wasser

Ein kritischer Punkt stellte der Salzgehalt dar. Die Prüfung auf lösliche Chloride und Sulfate erfolgte mittels Teststreifen. Während die Chloridwerte unauffällig blieben, zeigten sich bei den Sulfaten alarmierend hohe Werte zwischen 6 und 8 Masseprozent. Dieser Wert überschreitet die in der DIN 1045-2 zulässige Obergrenze von 0,2 Masseprozent signifikant und kann unter ungünstigen Bedingungen zu Ettringit- oder Thaumasitbildung führen, was die Dauerhaftigkeit der Betonbauteile erheblich beeinträchtigen würde. Diese Problematik wurde für die weitere Projektbearbeitung gesondert dokumentiert und führte zu einer Einschränkung der Anwendungsbereiche.

Die Kornform wurde anhand des Shape-Index bewertet. Die untersuchten Körnungen wiesen insgesamt eine günstige geometrische Form auf (SI15), was sich positiv auf die Packungsdichte und damit auf die Verarbeitbarkeit und den notwendigen Zementleimanteil auswirkt. Insbesondere im Vergleich zu typischen Brechkörnungen aus Beton- oder Ziegelbruch zeigte das hier verwendete Material eine verhältnismäßig kompakte, wenig plattige Struktur.



Abbildung 7: Prüfung der Kornform im Labor zur Bestimmung des Shape Index SI

Für die rezyklierte Körnungen kleiner 8 mm wurde im nächsten Schritt eine gezielte Aufbereitung des Rezyklats vorgenommen. Hierzu wurde das gelieferte Ausgangsmaterial mit einem Backenbrecher (Modell Retsch BB250) mechanisch zerkleinert. Dabei wurden drei verschiedene Brecheinstellungen (1,25 cm, 1,00 cm, 0,75 cm) getestet. Die Einstellung 0,75 cm führte zu den besten Ergebnissen hinsichtlich der Zielkorngrößenverteilung. Anschließend wurde das Material in vier Fraktionen gesiebt: <0,25 mm, 0/2 mm, 2/8 mm und >8 mm. Die extrem feinen sowie die zu groben Anteile wurden verworfen. Die Fraktionen 0/2 mm und 2/8 mm wurden für die weitere Verarbeitung verwendet.



Abbildung 8: Rezyklat sortiert in KG < 0,25, KG 0/2, KG 2/8 und KG > 8

Für diese aufbereiteten Fraktionen wurden erneut zentrale Kennwerte ermittelt. Die Sieblinien zeigten gute Übereinstimmungen mit denen natürlicher Zuschläge vergleichbarer Körnung, was eine Mischungsanpassung mit geringem Mehraufwand ermöglichte. Die Rohdichten lagen bei $2,55 \text{ kg/dm}^3$ (0/2 mm) und $2,61 \text{ kg/dm}^3$ (2/8 mm), die Wasseraufnahmen bei 4,92 M.-% bzw. 1,74 M.-%. Auch die Kornform blieb mit Shape-Index-Werten von SI20 bzw. SI15 im günstigen Bereich. Diese Ergebnisse bestätigten die grundsätzliche Eignung der so aufbereiteten RC-Körnungen für den Einsatz im Carbonbeton unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und Verarbeitbarkeit.

5.1.5 AP 2.6 Erarbeitung Prozessmodell für abgestimmte Wertschöpfungskette

Ziel: Ziel ist die Entwicklung und Integration einer durchgängigen Prozesskette zur Herstellung von R-Verbundbauteilen aus R-Garn und R-Beton. Hierfür werden bestehende Schnittstellen erweitert und neu definiert, um eine abgestimmte, ressourceneffiziente Wertschöpfungskette zu ermöglichen. Im Fokus steht die Vermeidung von Downcycling durch frühzeitige Abstimmung zwischen Abbruch, Prüfung, Materialaufbereitung und Fertigung. Das in AS 2.4 entwickelte Prüfkonzept wird integriert, technische und wirtschaftliche Lösungsvarianten werden bewertet und ein Vorzugskonzept zur Umsetzung eines „cradle-to-cradle“-Ansatzes vorbereitet.

Im Arbeitsschritt AS 2.6 wurde ein prozessübergreifendes Modell zur Abbildung einer geschlossenen, ressourceneffizienten Wertschöpfungskette für die Herstellung von R-Verbundbauteilen entwickelt. Diese Bauteile bestehen aus rezykliertem Beton (R-Beton) und rezyklierten Bewehrungskomponenten (R-Garn). Ziel war es, alle relevanten Prozessbeteiligten, Materialien und Schnittstellen systematisch zu verknüpfen, um ein vollumfängliches und praxisgerechtes „cradle-to-cradle“-System für den Hochbau zu konzipieren.

Das Prozessmodell betrachtet das R-Verbundbauteil als integrales Ergebnis aus Material, Verfahren und digital hinterlegten Datenstrukturen. Grundlage der Modellbildung bildeten die in AS 1.5 erhobenen Prozessdaten. Aufbauend darauf wurden in AS 2.6 die bislang fehlenden Schnittstellen zwischen den Prozessbeteiligten definiert, konkretisiert und strukturell erweitert. Zentrale Bedeutung kommt der Verzahnung zwischen Abbruchunternehmen und Prüfanstalt zu. Das in AS 2.4 entwickelte Prüfkonzept wurde hierfür gezielt in die Prozesskette eingebunden.

Im Ergebnis liegt ein modular aufgebautes Prozessmodell vor, das sämtliche Phasen des Rückbau- und Neubauprozesses miteinander verknüpft. Die wichtigsten Elemente des Modells umfassen:

- Ausgangsdefinition des neuen Bauteils unter Berücksichtigung geplanter Nutzung und Expositionsklassen (z. B. XC/XD-Klassen nach DIN EN 206/DIN 1045-2),
- Bauwerksdiagnose des Rückbauobjekts inkl. Rückprallhammerprüfung zur Abschätzung der Betondruckfestigkeit sowie chemischer Analysen gemäß LAGA PN 98/DepV,
- Erstellung einer rohstoffbezogenen Potenzialkarte (basierend auf AS 2.2) zur Abschätzung der Qualität der rückgewinnbaren Materialien,
- Konzeption und Umsetzung eines selektiven Rückbaus, abgestimmt mit nachfolgenden Aufbereitungsprozessen,
- Kommunikations- und Übergabeschnittstellen zur Beton- und Bewehrungsentwicklung inkl. Festlegung von Druckfestigkeitsklassen, Bewehrungsgraden und konstruktiven Anforderungen durch den Planer,
- Herstellung der R-Verbundbauteile im Fertigteilwerk, inklusive Zusammenführung von R-Gesteinskörnungen und R-Garnen auf Basis abgestimmter Mischungsentwürfe.

Zur Auswahl geeigneter Realisierungsstrategien wurden verschiedene Prozessvarianten konzipiert, unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen und eine Vorzugsvariante abgeleitet. Diese wird im nachfolgenden AS 2.7 im Rahmen einer Parameterstudie unter Realbedingungen evaluiert. Ein besonderes Augenmerk lag auf der systemischen Integration von Daten- und Materialflüssen über alle beteiligten Akteure hinweg. Hierzu wurden die jeweiligen Informationsbedarfe der Akteure

(Rückbau, Prüfung, Betonproduktion, Statik, Fertigung) analysiert und in ein zukunftsfähiges digitales Schnittstellenkonzept überführt. Damit entsteht eine durchgängige Prozesslogik, die sowohl technische Materialflüsse als auch begleitende Informationen integriert und transparent verfügbar macht.

Zusammenfassend ermöglicht das entwickelte Prozessmodell:

- die praktische Umsetzung einer abgestimmten und kreislauforientierten Wertschöpfungskette für rezyklierte Baustoffe,
- die Vermeidung von Downcycling durch qualitätsgesicherte Kopplung von Rückbau, Prüfung und Fertigung,
- sowie die Schaffung einer Informationsplattform, die bauwerksrelevante Daten dokumentiert, rückführbar speichert und zur weiteren Nutzung bereitstellt.

Im Ergebnis stellt das Modell einen übertragbaren Demonstrator dar, der auf andere Bauteiltypen, Regionen und Materialsysteme adaptierbar ist. Damit leistet AS 2.6 einen wesentlichen Beitrag zur praktischen Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Prinzipien im Bauwesen und unterstreicht die strategische Bedeutung einer intelligenten Prozessvernetzung für die Transformation zu einem nachhaltigen Bauen.

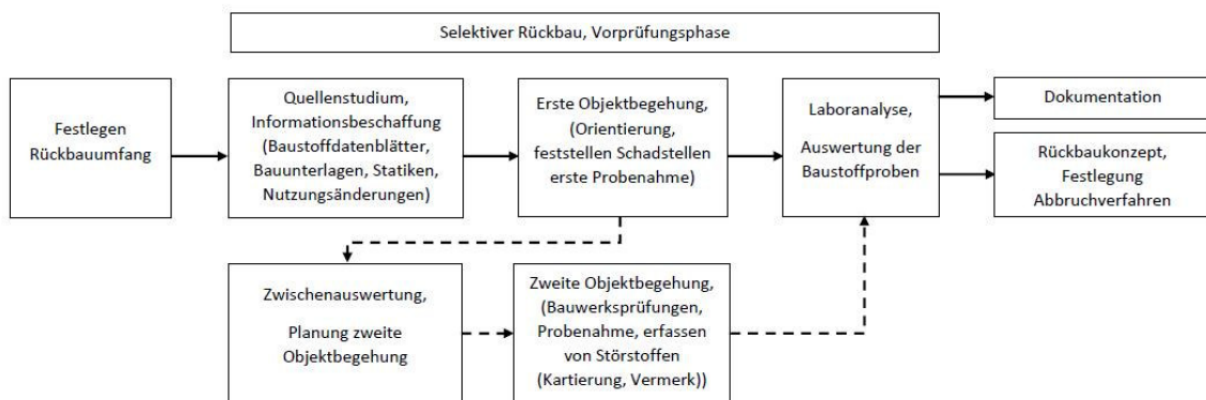


Abbildung 9: Optimierte Prozesskette selektiver Rückbau, Vorprüfungsphase

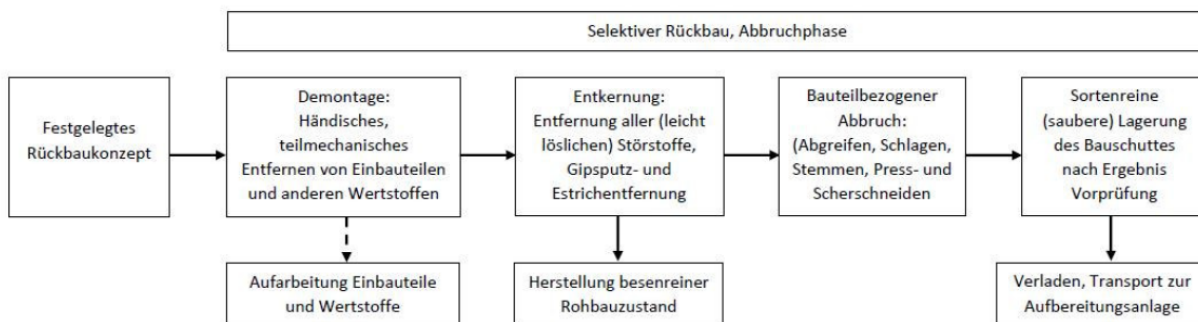


Abbildung 10: Optimierte Prozesskette selektiver Rückbau, Abbruchphase

5.2 AP 3 Entwicklung R-Beton

5.2.1 AP 3.5 Materialprüfungen, Bewertung und Ableitung einer Vorzugslösung

Ziel: Ziel dieses Arbeitsschritts ist die Bewertung des Verbundverhaltens zwischen R-Garn und Beton mittels Verbundprüfungen nach Schneider an Einzelgarnen. Ergänzend wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten R-Betonrezepturen anhand von Probekörpern geprüft. Eine systematische Bewertungsmatrix ermöglicht die Ableitung anwendungsspezifischer Vorzugslösungen (z. B. für Fassade, Decke, Wand). Die Arbeiten erfolgen in enger Abstimmung mit AS 4.3, in dem ergänzend Verbundprüfungen an Bauteilen durchgeführt werden.

Ergebnisse:

Als erstes Ergebnis steht eine neue Betonrezeptur für Carbonbetonfassadenelemente bei der die Erhöhung des Anteils auf max. 75% an grober rezyklierte Gesteinskörnung im Vordergrund stand. Für diese Anwendung wurde ein Lastenheft mit den Anforderungen an den Beton und dessen Frisch- und Festbetoneigenschaften erstellt. Mit einer quantitativen, empirischen Forschungsmethodik wurde eine möglichst große Anzahl an Daten über Laborversuche gesammelt und ausgewertet. Insgesamt wurde 120 Probekörper aus 4 verschiedenen Betonmischungen mit verschiedenen Anteilen an rezyklierte Gesteinskörnung hergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Proben die geforderte Mindestdruckfestigkeit eingehalten haben. Generell wurde keine Proportionalität von Festigkeitsverlusten bei einem steigenden Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton festgestellt.

Im Besonderen Interesse dieser Arbeit stehen die Festbetoneigenschaften der zehn verschiedenen Mischungen M1 bis M10. Hierfür wird zu Beginn auf die Lagerung und Bearbeitung der Probekörper eingegangen und im Weiteren die Untersuchungen am Festbeton zur Bestimmung der Festbetonrohddichte, des E-Moduls, der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit beschrieben.

Die Herstellung und Lagerung der Betonprobekörper erfolgt gemäß DIN EN 12390-2. Die Probekörper im Frischbetonzustand werden mit einer Folie zum Schutz gegen das Entweichen von Wasser bedeckt und für 24 Stunden (± 2 h) bei 20 °C (± 2 °C) in einem geschlossenen Raum gelagert. Nach der Lagerung werden die Probekörper entformt und im Referenzverfahren bis zum Prüftermin im Wasserbad gelagert. Nach etwa 14 Tagen werden die Betonzylinder aus dem Wasserbad entnommen und an der Probenschleifmaschine mit Diamantschleifscheibe planparallel geschliffen. Dieser Schritt erfolgt für alle 30 Zylinder, um beidseitig glatte Oberflächen zu erhalten, die parallel zueinanderstehen. Dies ist notwendig, um ein aussagekräftiges Ergebnis bei den Versuchen zu den Festbetoneigenschaften zu erhalten.

Für die Bestimmung der Festbetonrohddichte werden alle Prüfkörper aller Betonmischungen M1 bis M10 gewogen und vermessen. Über die Masse und über das Volumen wird die Dichte nach Formel (3.1) bestimmt. Die Festbetonrohddichte gibt neben der Rohddichte des Frischbetons (siehe Kapitel 3.2.4.2) einen ersten Anhaltspunkt über die Festigkeitsunterschiede zwischen den Mischungen, da eine höhere Dichte in der Regel auch eine höhere Festigkeit zur Folge hat.

Tabelle 2: Festbetonrohddichte [kg/dm³] der Mischungen M1 bis M10

Mischung	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Festbetonrohddichte $\left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}\right]$	2,36	2,37	2,31	2,31	2,34	2,34	2,36	2,33	2,37	2,32
Standardabweichung	0,02	0,06	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03

Insgesamt werden 30 Versuche zum Elastizitätsmodul (E-Modul) durchgeführt. Je Mischung werden drei Probekörper in Zylinderform mit einer Höhe von 20,00 cm und einem Durchmesser von 10,00 cm gemäß DIN EN 12390-13 im Verfahren B geprüft. Das E-Modul gibt, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, den Widerstand des Betons gegenüber einer elastischen Verformung an. Zum Einsatz kam eine rechnergesteuerte Prüfmaschine mit hydraulischem Antrieb und elektronischer Regeleinrichtung, siehe Abbildung 12. Wie erwartet, zeigt das Elastizitätsmodul eine größere Beeinträchtigung durch die Erhöhung des Rezyklatan-teils als die Druck- und Biegezugfestigkeiten. Bei der Mischung M10 ergab sich ein sehr schlechtes Ergebnis von 27626 N/mm² im Vergleich zur Referenzmischung M1 von 34431 N/mm². Die Mischungen M2 und M9 lieferten sogar höhere Werte als die Referenzmischung. Bei allen weiteren Mischungen ergaben sich in etwa einheitliche Werte, die leicht unter dem Referenzwert lagen.

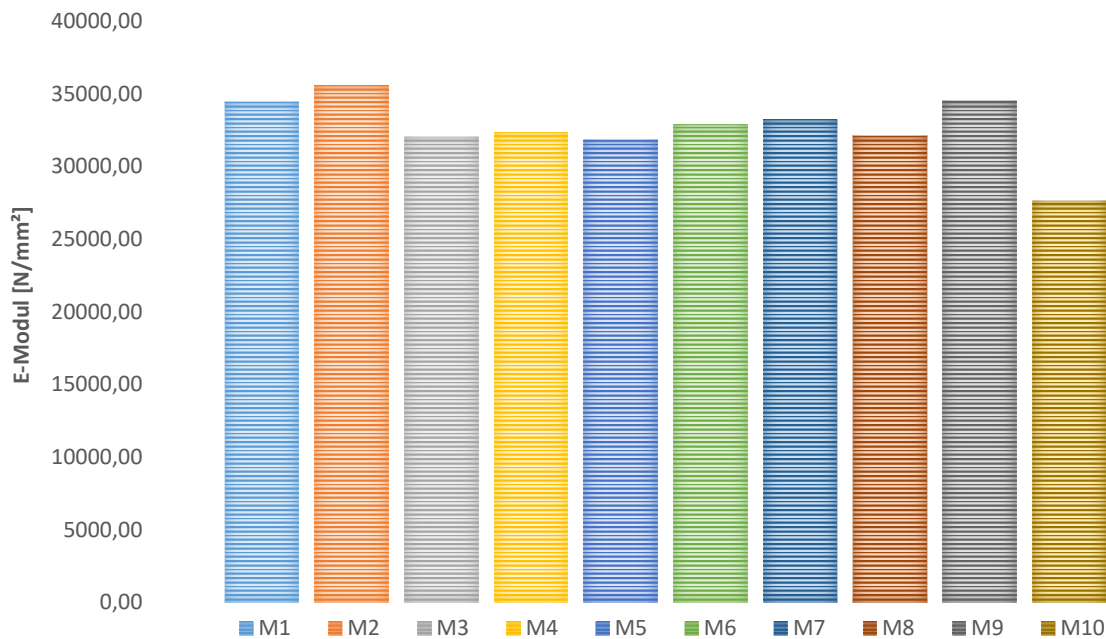


Abbildung 11: Vergleich des E-Moduls der Mischungen M1 bis M10

Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit werden insgesamt 90 Betonprismen mit den Abmessungen 16,00 cm x 4,00 cm x 4,00 cm hergestellt. Je Mischung werden 9 Probekörper mit einem Biegezugprüfgerät (Michaelis-Gerät, siehe Abbildung 3.24) gemäß DIN EN 196-1 untersucht. Aufgrund des kleinen Größtkorns im Beton von 8 mm und den kleineren zu erwartenden Abmessungen eines Carbonbetonbauteils,

wird die DIN-Norm zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Zementmörtel herangezogen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse zur Biegezugfestigkeit, lassen sich die beiden oben beschriebenen Hypothesen ebenso wenig halten, wie bei der Druckfestigkeit. Besonders auffällig ist hier, dass die Mischungen M9 und M10 die besten Ergebnisse liefern, wo-hingegen die Referenzmischung M1 an dritt-letzter Stelle steht, siehe Abbildung 13. Bei der RC-Korngruppe KG 2/8 ist sogar mit größer werdenden Anteilen eine steigende Tendenz der Biegezugfestigkeit zu beobachten.

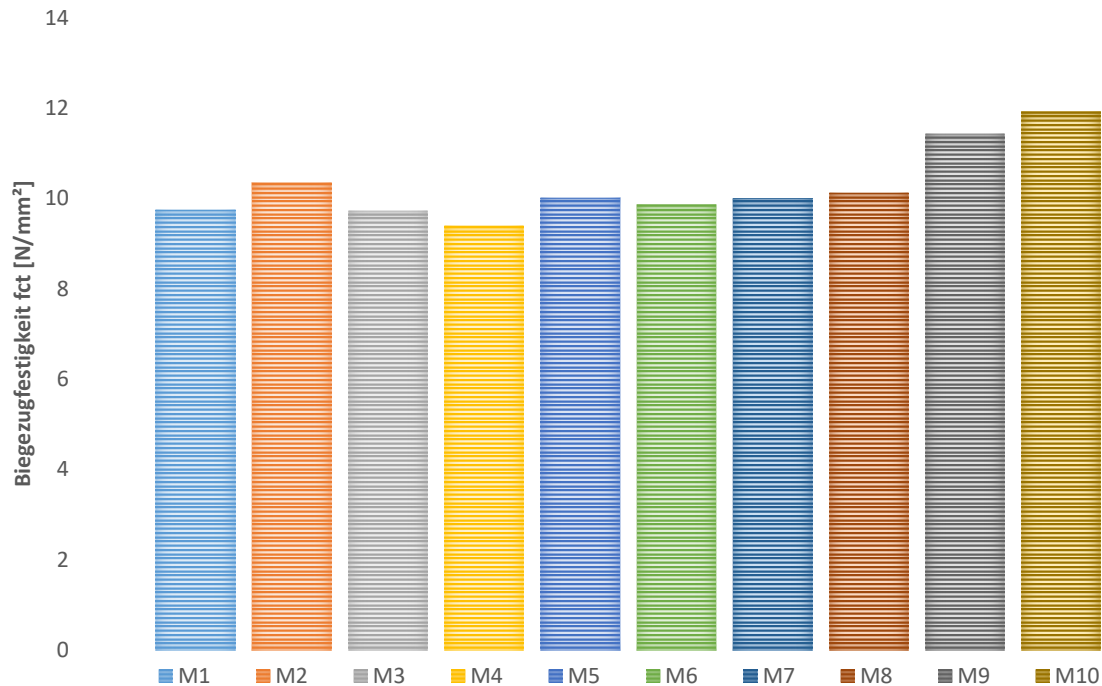


Abbildung 12: Vergleich der Biegezugfestigkeiten der Mischungen M1 bis M10

Die beiden Hälften der Probekörper in Prismenformen (Abmessung: 16,00 cm x 4,00 cm x 4,00 cm), die durch die Biegezugversuche mittig brechen, werden nun wieder für die Druckfestigkeitsprüfung herangezogen. Insgesamt werden somit etwa 110 Druckfestigkeitsprüfungen an den 10 Mischungen durchgeführt. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 12390-3 (Druckfestigkeitsprüfung für Beton) und nach DIN EN 196-1 (Druckfestigkeitsprüfung für Zementmörtel).

Für die gewählte Druckfestigkeitsklasse C45/55 liegt der berechnete Zielwert der Druckfestigkeit bei 63 N/mm² (inklusive Vorhaltemaß: 8 N/mm²), siehe Kapitel 3.2.3.2. Der charakteristische Wert der Mindestdruckfestigkeit eines Prüfwürfels (Kantenlänge: 150 mm) nach 28 Tagen Wasserlagerung im Referenzverfahren liegt bei 55 N/mm². Da sich alle errechneten arithmetischen Mittelwerte der Druckfestigkeit auf die Hälfte eines Prüfkörpers in Prismenform (Abmessungen: 40 mm x 40 mm x 160 mm) beziehen, sind die korrigierten Werte (Korrekturfaktor: 0,87) für den Abgleich mit der Mindestdruckfestigkeit eines genormten Prüfwürfels heranzuziehen. Die Ergebnisse aller 10 Mischungen erfüllen die Mindestanforderung an einen Beton C45/55, siehe Tabelle 3.30. Der geringste Mittelwert der errechneten Würfeldruckfestigkeit lag bei 56,6 N/mm² für die Mischung M8. Den höchsten Wert der berechneten Würfeldruckfestigkeit erreichte die Mischung M2 mit 65 N/mm². Die Referenzmischung M1 kam auf einen berechneten Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit von 61,9 N/mm². Für die Einhaltung der Mindestdruckfestigkeit müssen die niedrigeren Korrekturwerte angesetzt werden, jedoch sollte man die ursprünglich deutlich höheren Untersuchungsergebnisse für die Prismen bei der Bewertung schmaler Carbonbetonbauteile als realistischer einstufen. Hier lagen die Ergebnisse zwischen 65,0 N/mm² ± 4,7 N/mm² (M8) und 75,3

$\text{N/mm}^2 \pm 2,2 \text{ N/mm}^2$ (M2). Geht man von einem generellen Abfall der Festigkeit bei einem höheren Einsatz von Rezyklaten aus, so müsste die Druckfestigkeit der Mischung M10 (Austausch von 100 % der Korn-gruppen KG 0/2 und KG 2/8 mit Rezyklat) am niedrigsten sein und die der Referenzmischung M1 am höchsten. Diese Erstvermutung bewahrheitet sich nicht. Geht man von einem generell größeren Festigkeitsverlust bei dem Einsatz von Rezyklaten der Korn-gruppe KG 0/2 im Vergleich zur Korngruppe KG 2/8 aus, so bestätigt sich diese Erwartung ebenso nicht. In beiden Fällen ist keine direkte Proportionalität aus den Ergebnissen abzulesen. Zu beobachten ist bei der Mischung M10 jedoch eine relativ hohe Standardabweichung von $6,3 \text{ N/mm}^2$.

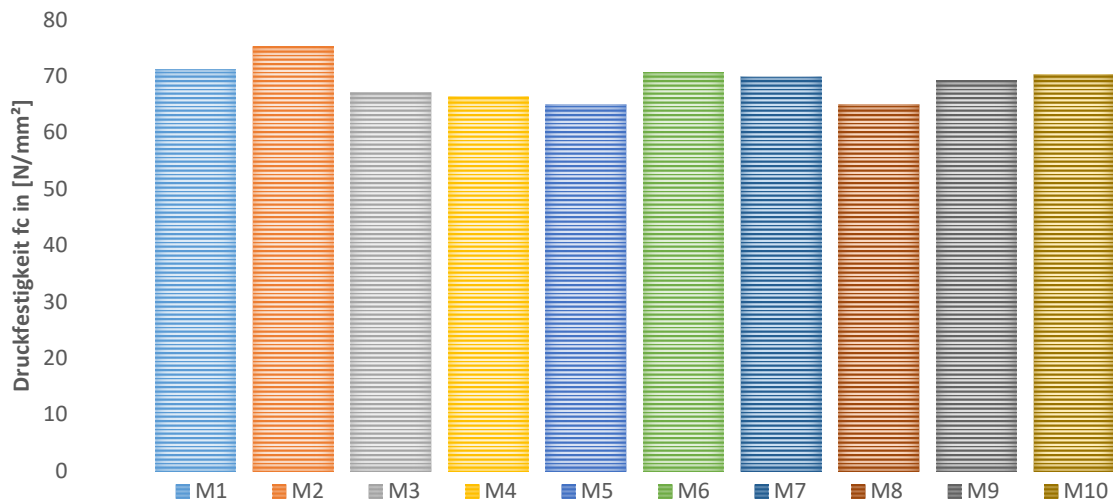


Abbildung 13: Vergleich der Druckfestigkeiten der Mischungen M1 bis M10

5.3 AP 4 Entwicklung von R-Bewehrung

5.3.1 AP 4.1 Anforderungen für R-Bewehrung

Ziel: Ziel von AS 4.1 ist die Ermittlung und Definition der anwendungsspezifischen Anforderungen an recycelte Carbonfasergarne (R-Garne) und die daraus herzustellende Textilbewehrung für den Einsatz in Hochbauelementen wie Fassaden, Decken oder Wänden. Grundlage sind mechanische Kenngrößen wie Kraft-Dehnungsverhalten, Garnquerschnitt, Gittergeometrie und Verschiebestabilität. Ergänzend wird ein in AS 5.1 entwickeltes Strukturmodell genutzt, um die erforderlichen Materialeigenschaften der Bewehrung rechnergestützt zu identifizieren. Die Ergebnisse dienen der gezielten Weiterentwicklung geeigneter Bewehrungsvarianten (AS 4.2).

Ergebnisse:

Im AS4.1 wurden einerseits die spezifischen Anforderungen an die recycelten Carbonfasergarne und die daraus folgende flächige Carbonbewehrung aus Anwendungssicht für Fassadenelement und innenliegende Doppelwand sowie aus der Prozessanalyse aus 1.4 ermittelten Prozesse herausgearbeitet. Hier wurde erkannt, dass durch die Verarbeitung der R-Garne zu textilen Bewehrungen evtl. neue Prozesse bzw. Anlagenmodule integriert werden müssen. Auf Basis von anstehenden Vorversuchen soll dieser Erkenntnis überprüft werden. Innerhalb der der Anforderungsanalyse wurden folgende relevanten Prozessparameter herausgearbeitet. Im Rahmen des Projekts wurden die einzelnen Arbeitsschritte entlang der gesamten Prozesskette der Bewehrungsherstellung – beginnend beim Garn bis hin zur fertigen

Bewehrungsmatte – systematisch analysiert und dokumentiert. Dabei erfolgte eine strukturierte Erfassung der relevanten Prozessschritte für jeden Hauptprozess (Abbildung1). In Abhängigkeit von den im Projekt vorgesehenen Versuchsreihen mit Rezyklat-Garn (R-Garn) ist eine bedarfsorientierte Erweiterung der erhobenen Prozessparameter vorgesehen, um eine fundierte Bewertung und Optimierung der Herstellprozesse zu ermöglichen.

Tabelle 3: Anforderungsparameter der zu entwickelnden R-Bewehrung

Parameterkategorie	Parameter
Fasermaterial	Faserstoff, Garnbreite, Spulenmasse, Homogenität der Faser, Faserfeinheit, Filamentdurchmesser, Oberflächenrauigkeit
Tränkungsmaterial	Mischungsverhältnis, Viskosität, Temperatur
Anlagentechnik	<p>Fixe Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radius der Tränkungsrollen und Umlenkrollen für das Garn • Zuführung des Tränkungsmediums • Anzahl der Tränkungsrollen <p>flexible Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Umlenkrollen, • Trocknungsdauer der getränkten Bewehrung • Trocknungsart
Umgebungsbedingungen	Temperatur, Luftfeuchte
Vorgaben aus Sicht des Bauteilherstellers	Zykluszeiten im Umlaufprozess, Ablagegeschwindigkeit, Bewehrungsquerschnitt

5.3.2 AP 4.2 Weiterentwicklung der Garnablage und Materialprüfungen

Ziel: Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist aufbauend auf den Ergebnissen aus AS 4.1 und den dort getroffenen Festlegungen, die konstruktiv-technologische Weiterentwicklung des Garnablagensystems mit den einzelnen modularen Prozessschritten. Dazu werden zunächst die Einzelmodule des Garnablagensystems bzgl. der Anforderungen an die Verarbeitung der R-Carbonfasergarne analysiert und bewertet. Die Ergebnisse werden modular zusammengefügt und daraus die konstruktiv-technologische Lösung für ein angepasstes Garnablagensystem zur schonenden Verarbeitung der R-Garne entwickelt.

Ergebnisse:

Aufbauend auf den Ergebnissen und Festlegungen aus Arbeitsschritt 4.1 wurde die konstruktiv-technologische Weiterentwicklung des Garnablagensystems zur Verarbeitung von Rezyklat-Carbonfasergarnen (R-Garnen) gezielt vorangetrieben.

Ein zentrales Ergebnis der Vorversuche mit manueller Ablage war die Feststellung, dass der Faserflug bei der Verarbeitung von R-Garnen deutlich stärker ausfällt als bei Primärfasern. Dies erschwert eine gleichmäßige und vollständige Tränkung der Fasern erheblich. Durch die unregelmäßige Querschnittsfläche und dem losen Verbund der Stapelfaser kommt es zu einem erhöhten Faserabrieb, welche den Verarbeitungsprozess der Tränkung (Verstopfung der Abquetschdüse) stark beeinflusst. Eine thermische Fixierung der Faserlagen durch Aufschmelzen des thermoplastischen Anteils zeigte nur begrenzte Wirksamkeit, da die erforderlichen Schmelztemperaturen unter den gegebenen Randbedingungen im Carbonbetontechnikum nicht erreicht werden konnten. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen R-Faserarten sind daher erforderlich.



Abbildung 14: Bewehrungsfertigung der ersten Bewehrungsstrukturen mit hohem Faserabrieb und hoher Faserstaubbelastung (HTWK)

Als Reaktion auf diese Herausforderungen wurde die Prozesskette der R-Bewehrungsherstellung um einen zusätzlichen, neuen Verfahrensschritt der Faservorbereitung erweitert: die Umwindung der R-Fasern. In Abstimmung mit dem Verbundvorhaben WIR-V1.3 wurden verschiedene Umwindungsvarianten mit Fadenstärken zwischen 1 mm und 4 mm erprobt. Die Ergebnisse belegen, dass durch die Umwindung in allen untersuchten Varianten eine signifikante Verbesserung der Verarbeitbarkeit erreicht werden konnte. Der Umwindungsprozess trägt dazu bei, die Bündelstabilität der Fasern zu erhöhen, den Faserflug zu reduzieren und die Handhabbarkeit während der Ablage und Tränkung entscheidend zu verbessern.

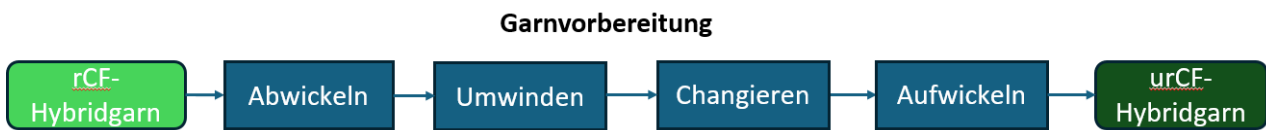


Abbildung 15: entwickelte Abfolge des Umwindungsprozesses zur Weiterverarbeitung von R-Garnen

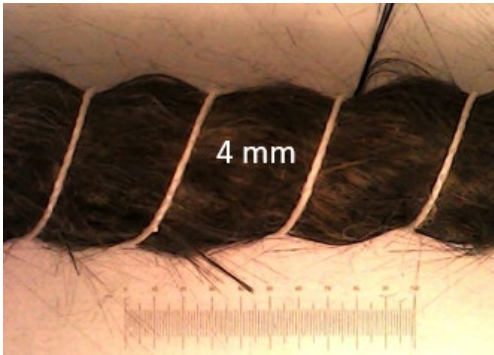


Abbildung 16: entwickelter Umwindungsprozess zur Stabilisierung der R-Garne

Im weiteren Verlauf wurden die Einzelmodule des Garnablagensystems – bestehend aus der Spulenabrollrichtung mit geregelter Antrieb, den Fadenführungen, der prozessintegrierten Gartränkungseinheit, der Garndüse- und Führungseinheit mit Robotersystem sowie dem Spannrahmen – systematisch auf ihre Eignung zur R-Garnverarbeitung hin bewertet und konstruktiv überarbeitet. Besondere Beachtung fanden hierbei Aspekte wie Fadenzugkraftregelung, Umlenkradien, Oberflächenrauigkeit sowie die Entformbarkeit der abgelegten Faserlagen.

Die neu entwickelten Module wurden im Labormaßstab gefertigt, in die bestehende Anlagentechnik integriert und mit R-Garnen aus dem Verbundvorhaben WIR-V1.3 erprobt. Neben einer schonenden Faserverarbeitung lag der Fokus insbesondere auf der Prozessstabilität, -sicherheit und -effektivität.

Zur Bewertung des entwickelten Systems wurden Laborproben hergestellt und mit Proben aus Primärfasern verglichen. Es erfolgten mechanische Prüfungen vor und nach dem Prozessschritt, u. a. Zugversuche an R-Garnen, Untersuchungen der Spannkraften in den Fadenlagen, der Tränkungsmittelgehalte sowie der resultierenden strukturmechanischen Eigenschaften. Die Proben wurden dabei gezielt ohne Tränkung gefertigt, um die Einflüsse des Ablageprozesses isoliert zu analysieren. Basierend auf diesen Untersuchungen konnten Bandbreiten für die relevanten Prozessparameter definiert und Einsatzgrenzen des Verfahrens abgeschätzt werden.

Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts liegt ein modular aufgebautes, angepasstes Garnablagensystem vor, das die Anforderungen an eine werkstoffgerechte Verarbeitung von R-Garnen erfüllt. Gleichzeitig wurde mit der Faservorbereitung (Umwindung) ein neuer, zentraler Prozessschritt identifiziert und in die Prozesskette der R-Bewehrung integriert, der wesentlich zur Verbesserung der Gesamtverarbeitbarkeit beiträgt. Darüber hinaus konnten erste Erkenntnisse zur In-situ-Tränkung der R-Garne unter spezifischen Prozessbedingungen gewonnen werden.

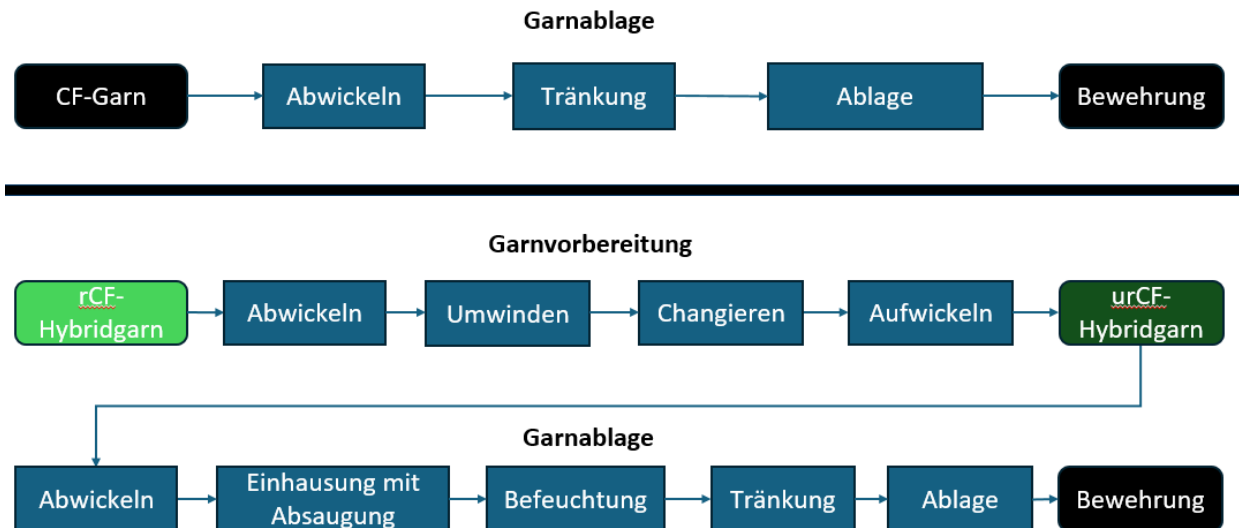


Abbildung 17: Überblick modular aufgebautes und an die R-Garne angepasstes Garnablagensystem

5.3.3 AP 4.3 Ergebnisanalyse und Ableitung einer Vorzugslösung

Ziel: Ziel von AS 4.3 ist die Analyse und Bewertung der in AS 4.2 entwickelten R-Textilbewehrungen. Dabei werden die erzielten Kennwerte systematisch mit den zuvor definierten Anforderungen abgeglichen und Verbesserungspotenziale auf Grundlage einer detaillierten Datenanalyse identifiziert. In Zusammenarbeit mit AS 3.5 werden Verbundprobekörper gefertigt und geprüft, deren Ergebnisse in AS 4.3 ausgewertet werden. Auf Basis dieser Bewertung wird eine Vorzugslösung der R-Textilbewehrung festgelegt, die als Grundlage für die Weiterverarbeitung in AS 4.4 dient.

Ergebnisse:

Im Rahmen der Mattenfertigung mit Recycling-Carbonfasergarnen (rCF) wurden am 27.05.2025 erste Versuche mit den vom ITM der TU Dresden bereitgestellten Hybridgarnen durchgeführt. Dabei standen zwei Garnvarianten zur Verfügung:

- Variante V1: Hybridgarn aus 50 % rCF und 50 % Thermoplastfasern. Vorteil ist die Möglichkeit, ohne zusätzliche Harztränkung eine Fixierung durch Aufschmelzen des Thermoplastanteils zu erreichen. Einschränkend wirkt die unzureichende Schmelztemperatur im CBT-Ofen (max. ca. 140 °C, erforderlich wären ~270 °C). Zudem zeigte V1 ein deutlich reduziertes Zugtragverhalten.
- Variante V2: Hybridgarn aus 90 % rCF und 10 % Thermoplastfasern. Diese Variante weist eine bessere mechanische Leistungsfähigkeit auf, erfordert jedoch eine konventionelle Tränkung (z. B. mit Epoxidharz).

Beobachtungen der Mattenfertigung

- Die Fertigungsversuche verdeutlichten mehrere prozesstechnische Probleme, die aktuell eine stabile Mattenherstellung mit rCF-Garnen verhindern:
- Ungleichmäßige Fadenmittenabstände in der oberen Lage, was zu variierenden Gitterweiten führte (Soll: 50 mm).

- Bogige Ablage der oberen Längsfäden zwischen den Umlenkelementen (UE), anstelle einer geradlinigen Spannung.
- Instabilität der Knotenpunkte: Nach Aushärtung und Entnahme aus dem Ofen lösten sich nahezu alle Verbindungen zwischen oberer und unterer Lage.
- Fadenverdrehungen: rCF-Fäden zeigten eine unerwünschte Torsion in eine Richtung.
- Keine funktionsfähige Matte: Im Ergebnis stand keine stabile Bewehrungsmatte zur Verfügung, sondern nur einzelne Stranglagen.

Ein Vergleich mit Primärfasergarn (vCF) verdeutlichte den Hintergrund: Während vCF durch seinen rechteckigen Querschnitt und das Ablegeverhalten gleichmäßige Abstände und eine stabile Matte erzeugt, besitzt das rCF-Garn aufgrund seiner rotationssymmetrischen Form (\emptyset ca. 4,5 mm) andere Ablagecharakteristika. Durch das Umwindegarn bleibt der Durchmesser konstant, wodurch ungleichmäßige Fadenabstände und Gitterweiten resultieren.

Lösungsansätze aus den Projektdiskussionen

Aus den Ergebnissen wurden mehrere Anpassungsstrategien entwickelt, die im weiteren Projektverlauf untersucht werden sollen:

Anpassung der Roboterroutine:

- Optimierung des Roboterlegepfads, um bogige Ablagen zu vermeiden.
- Abstimmung mit den zuständigen Projektpartnern (Gespräch mit Erik K. vorgesehen).
- Segmentierung und Verschiebung der Umlenkelemente (UE):
- Zunächst Ablage der unteren Lage.
- Anschließend verschiebbare Ablage der gesamten oberen Lage auf die untere Lage. Hierfür müssen die Umlenkelemente segmentiert und in der Höhe anpassbar ausgeführt werden.

Modifikation der Garnabzugsrichtung:

- Statt horizontalem Abzug erfolgt ein Abziehen des rCF-Garns in Z-Richtung nach oben und in Richtung der UE.
- Nach Erreichen des UE verfährt der Roboter nach unten, um das Garn auf der unteren Lage abzulegen.
- Erforderlich ist hierzu eine Anpassung der Abwickleinheit und die Implementierung eines Servomotors zum Rückführen des überschüssigen Garns.

Die durchgeführten Fertigungsversuche zeigen deutlich, dass eine direkte Übertragung der Verarbeitungsroutinen aus dem vCF-Bereich auf rCF-Garne nicht möglich ist. Insbesondere die geometrische Charakteristik der rCF-Garne sowie die mechanischen Unterschiede erfordern angepasste Prozessstrategien. Die identifizierten Lösungsansätze bieten dafür konkrete Ansatzpunkte. Damit leistet dieser Arbeitsschritt einen entscheidenden Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung der rCF-Mattenfertigung. Auch wenn die erste Versuchsmatte nicht funktionsfähig hergestellt werden konnte, sind die gewonnenen Erkenntnisse essenziell, um Prozessketten, Maschinenroutinen und

Materialvorbereitungen so zu optimieren, dass künftig tragfähige Bewehrungsmatten aus Recyclinggarnen entstehen können.

5.3.4 AP 4.4 Materialfertigung für Funktionsmuster und Demonstratorbau für R-Verbundbauteil

Ziel: Ziel von AS 4.4 ist die Fertigung der in AS 4.3 definierten Vorzugslösung der R-Textilbewehrung unter Berücksichtigung festgelegter Geometrie- und Fertigungsparameter (z. B. Produktionsgeschwindigkeit, Tränkungsgrad, Fadenzugkraft). Dabei soll die Eignung der weiterentwickelten Anlagentechnik für eine flexibel und effizient einstellbare Bewehrungsfertigung demonstriert werden. Zusätzlich werden die benötigten R-Textilbewehrungen für den Bau des festgelegten Demonstratorbauteils hergestellt.

Ergebnisse:

Die Umsetzung erfolgte auf Basis festgelegter Geometrie- und Fertigungsparameter, wobei insbesondere die Produktionsgeschwindigkeit, der Tränkungsgrad sowie die Fadenzugkraftregelung als zentrale Stellgrößen berücksichtigt wurden. Der vollständig automatisierte Herstellungsprozess wurde erfolgreich realisiert und durchläuft mehrere optimierte Prozessschritte, wie in Abbildung 19 dargestellt.

Zunächst erfolgte die Umwindung der R-Garne (Abb. 19a), die bereits im Rahmen der vorherigen Arbeitsschritte als entscheidender Faktor zur Verbesserung der Faserstabilität und Verarbeitbarkeit identifiziert wurde. Diese mechanische Garnvorbereitung gewährleistete eine stabile Formgebung der R-Garne und trug wesentlich zur Reduktion des Faserflugs und zur Verbesserung der Tränkungsqualität bei.

Im nächsten Schritt wurden die R-Garne über definierte Umlenkpunkte (Abb. 19b) in die automatisierte Ablageeinheit eingespeist. Die präzise Positionierung und Steuerung dieser Umlenkungselemente erwies sich als essentiell für eine gleichmäßige Spannung der Fäden während des Ablageprozesses und verhinderte ungewollte Torsionen oder Materialverwerfungen.

Der zentrale Fertigungsschritt bestand in der robotergestützten Garnablage, die mit einer prozessintegrierten Tränkungseinheit kombiniert wurde (Abb. 19c). Dadurch konnte eine kontinuierliche und gleichmäßige Durchtränkung der R-Garne sichergestellt werden – ein kritischer Schritt zur Erzielung homogener struktureller Eigenschaften der Bewehrungselemente. Die Parametrierung der Tränkungsmenge sowie die synchronisierte Bewegung der Roboterkomponenten trugen dabei wesentlich zur Prozessstabilität bei.

Im Ergebnis konnten funktionsfähige R-Bewehrungsmatten (Abb. 19d) in reproduzierbarer Qualität hergestellt werden. Diese wurden sowohl für die werkstofftechnischen Prüfungen als auch für den Einbau in das Demonstratorbauteil vorgesehen. Die gefertigten Bewehrungselemente erfüllten dabei die definierten Anforderungen hinsichtlich Maßhaltigkeit, Materialkontinuität, Tränkungsqualität und mechanischer Stabilität.

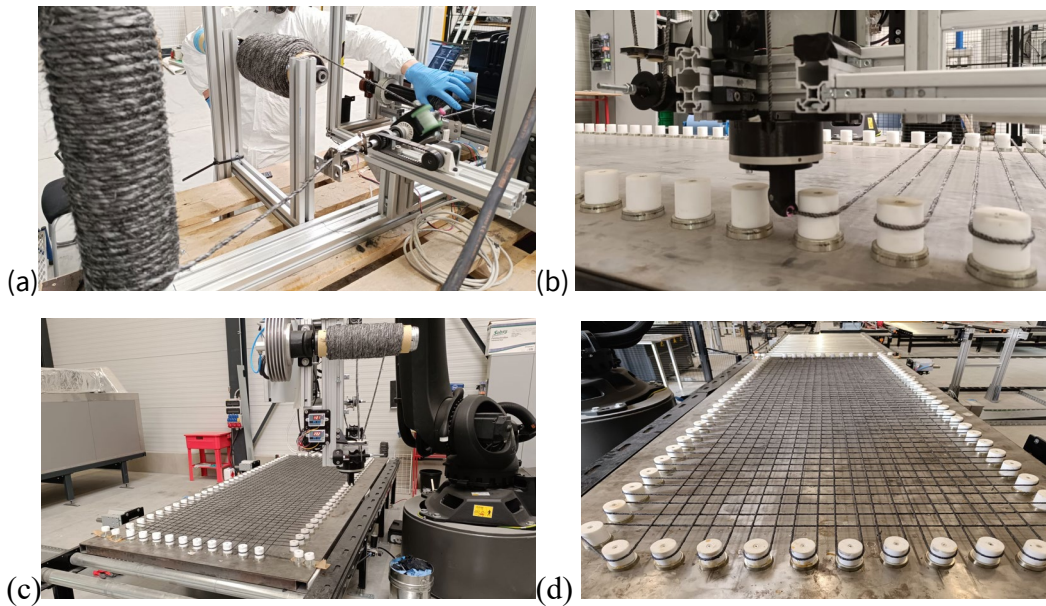


Abbildung 18: automatisierter Herstellungsprozess der R-carbonbewehrungselemente für Funktionsmuster und Demonstrator, (a) Umwindungsprozess zur Formgebung der R-Garne, (b) Umlenkpunkte im Ablageprozess, (c) robotergestützte Ablage mit Tränkungseinheit während der Herstellung, (d) fertig hergestellte R-Bewehrungsmatte

5.4 AP 5 Entwicklung von R-Verbundbauteilen

5.4.1 AP 5.3 Verbundkennwertermittlung und Ergebnisbewertung

Ziel: Ziel von AS 5.3 ist die Ermittlung und Bewertung der Verbundkennwerte der hergestellten R-Verbundbauteile auf Basis der in AS 5.1 definierten Anforderungen. Dabei erfolgt eine erste systematische Einordnung des Leistungsvermögens der neuartigen R-Garne hinsichtlich Zug- und Auszugskennwerten im Vergleich zu etablierten Werten aus dem Carbonbetonbereich. Ergänzend werden die in AS 5.4 und 5.5 gefertigten Probekörper und Bauteile geprüft.

Ergebnisse:

Im Rahmen von Arbeitsschritt 5.3 wurden die auf Basis der in AS 5.1 definierten Anforderungen gefertigten Probekörper einer systematischen Untersuchung unterzogen. Ziel war die Bestimmung und Bewertung der Verbundkennwerte, um sowohl das Leistungsvermögen der eingesetzten R-Garne als auch das Verhalten der daraus hergestellten R-Verbundbauteile einzuordnen. Die Bewertungskriterien orientierten sich an etablierten Referenzen aus dem Carbonbetonsektor. Hierzu zählen insbesondere Zulassungswerte marktführender Unternehmen sowie einschlägige Forschungsergebnisse, die u. a. für Zugfestigkeitskennwerte und Auszugskennwerte vorliegen. Auf diese Weise konnte ein erster Vergleichsmaßstab geschaffen werden, der die Einordnung der neuartigen R-Textilbewehrungen ermöglicht. Die Prüfungen zeigten, dass die aus recycelten Fasern hergestellten Garne im Verbund mit der Betonmatrix ein differenziertes Verhalten aufweisen. Während die Zugfestigkeit einzelner R-Garne tendenziell unter den etablierten Primärfasern liegt, konnte insbesondere bei der Verbundhaftung eine gute Leistungsfähigkeit festgestellt werden. Die Auszugsversuche belegten, dass durch geeignete Vorbehandlungs- und Prozessschritte (z. B. Garnumwindung, Tränkungsoptimierung) eine signifikante Verbesserung der Haftung zwischen R-Garn und Matrix erreichbar ist. Dies deutet auf ein hohes Potenzial für die weitere

technologische Entwicklung hin. Die Ergebnisse erlauben eine erste systematische Einordnung der R-Garne hinsichtlich ihres Leistungsvermögens im Verbund. Dabei zeigte sich, dass bestimmte Garnvarianten in Bezug auf die mechanischen Kennwerte bereits in Bereiche vordringen, die für den Einsatz in nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen technisch vertretbar erscheinen. Andere Varianten erfordern dagegen noch deutliche Anpassungen hinsichtlich Faserbehandlung und Prozessführung. Darüber hinaus wurden in diesem Arbeitsschritt auch die in AS 5.4 und 5.5 gefertigten Probekörper und Bauteile überprüft (Abbildung 19). Diese Untersuchungen bestätigten die zuvor erzielten Tendenzen und gaben wichtige Hinweise für die Rückkopplung in die Material- und Prozessentwicklung. Die Ergebnisse flossen iterativ in die AS 3.4 (Betonentwicklung) sowie AS 5.2 (Prozessentwicklung) ein, wodurch eine kontinuierliche Optimierung der Verbundsysteme erreicht werden konnte.

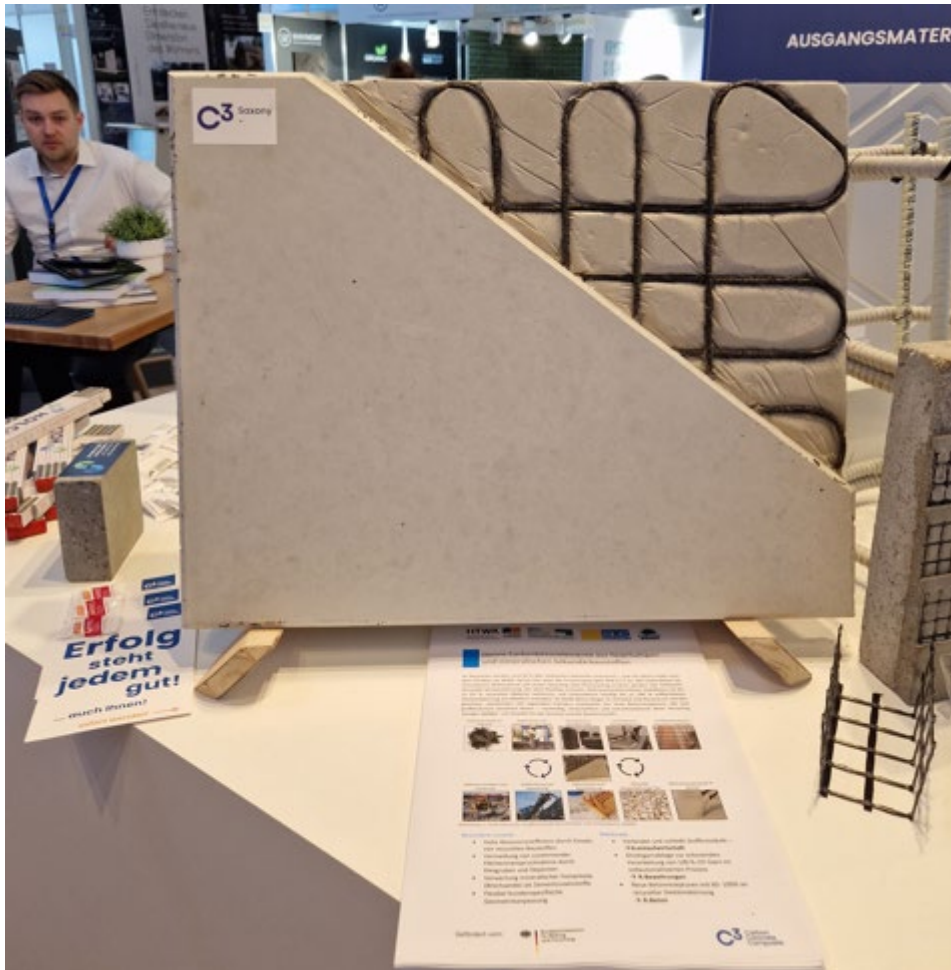


Abbildung 19: Ausstellung des Demonstrators Fassadenelement mit 60% Betonrezyklat und R-Carbonbewehrungsmatte auf der BAUMA 2025 in München

5.4.2 AP 5.6 Validierung Prozessmodell für aufeinander abgestimmter Prozessketten

Ziel: Ziel von AS 5.2 ist die Validierung des in AS 1.5 und 2.6 entwickelten, ganzheitlich abgestimmten Prozessmodells zur nachhaltigen Baustoffverwertung. Durch die experimentelle Untersuchung aller relevanten Prozessschritte – von Abbruch, Zerkleinerung und Aufbereitung bis hin zur Herstellung von Beton, Bewehrung und Verbundbauteilen – wird geprüft, ob das angestrebte Upcycling bislang downgecyclelter Materialien (Gesteinskörnungen, Faserstoffe) im Gesamtprozess realisierbar ist. Die Validierung

erfolgt anhand eines definierten Demonstratorbauteils in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere aus den Vorhaben WIR-V1.1 und V1.3.

Ergebnisse:

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes stand die Validierung des in den Arbeitsschritten 1.5 und 2.6 erarbeiteten Prozessmodells im Mittelpunkt. Ziel war es, die im Projekt entwickelte, durchgängig abgestimmte Prozesskette – beginnend beim Abbruch und der Zerkleinerung über die Aufbereitung und Betonherstellung bis hin zur Bewehrungsintegration und Fertigung von Verbundbauteilen – auf ihre technische Funktionsfähigkeit und Praxistauglichkeit zu überprüfen. Hierzu wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein definiertes Referenzbauteil ausgewählt, an dem die einzelnen Prozessschritte experimentell nachvollzogen und überprüft werden konnten. Diese Vorgehensweise erlaubte es, sowohl die Schnittstellen zwischen den Prozessstufen als auch die Konsistenz der Gesamtprozesskette systematisch zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Validierung belegen, dass das Prozessmodell in seiner Gesamtheit tragfähig ist und die wesentlichen Anforderungen einer nachhaltigen Wertschöpfungskette erfüllt. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass das Ziel des Upcyclings – also die Nutzung bislang überwiegend downgecyclter Materialien wie rezyklierte Gesteinskörnungen und Faserstoffe – technisch umsetzbar ist. Gleichzeitig wurden Schwachstellen und Optimierungspotenziale identifiziert, die in einer iterativen Anpassung des Modells berücksichtigt wurden. Dazu zählen insbesondere die präzisere Abstimmung der Materialaufbereitungsschritte auf die spezifischen Anforderungen des Beton- und Bewehrungsprozesses sowie die Verbesserung der Dokumentationsflüsse zwischen den Schnittstellen.

Die enge Zusammenarbeit mit den Teilvorhaben WIR-V1.3 (R-Carbongarnbereitstellung) und WIR-V1.1 (Dokumentation) erwies sich hierbei als entscheidend. Während durch V1.3 eine praxisgerechte Einbindung der neuartigen Bewehrungsmaterialien sichergestellt werden konnte, trug V1.1 maßgeblich dazu bei, die Prozesskette nachvollziehbar und prüfsicher zu dokumentieren.

5.4.3 AP 6.1 Ökologische Nachhaltigkeitsbetrachtung

Ziel: Ziel von AS 6.1 ist die ökologische Bewertung der im Vorhaben entwickelten R-Bewehrungen, R-Betone und R-Verbundbauteile hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Treibhauspotenzial. Hierzu werden der Energieaufwand sowie der Materialverbrauch für Aufbereitung und Herstellung den Einsparungen gegenübergestellt, die durch den Verzicht auf Primärrohstoffe erzielt werden. Bewertet werden insbesondere die Leistungsfähigkeit der R-Materialien, der Ressourcenbedarf und der ökologische Nutzen. Zudem werden verbleibende technologische Herausforderungen identifiziert, die die Nachhaltigkeit beeinflussen und weiteren Entwicklungsbedarf aufzeigen.

Ergebnisse:

Für die Herstellung von qualitätsgerechtem Feinbeton im Carbonbeton, der durch die Verwendung von RC-Feinteilen ergänzt wird, sind beim Aufbereiter zusätzliche Prozessschritte erforderlich. Dazu zählen insbesondere erneutes Brechen, Klassieren und das gezielte Abtrennen feiner Korngrößenfraktionen, was mit einem zusätzlichen Stromverbrauch verbunden ist. Während diese Schritte auch bei der Herstellung primärer Feinkörnungen notwendig sind, können sie bei RC-Materialien zu einer leicht erhöhten ökologischen Belastung führen. Dieser potenzielle Nachteil wird jedoch durch den Nutzen einer stofflichen Verwertung bislang ungenutzter Feinfraktionen und durch die Einsparung von Primärrohstoffen mehr als ausgeglichen.

Die Einbindung der Feinteile in den Feinbeton für Carbonbeton stellt gegenüber einer sonstigen Downcycling-Anwendung (z. B. als Verfüllmaterial oder im Erdbau) ein hochwertiges Recycling dar. Dadurch wird ein Beitrag zur Zielerreichung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) geleistet. Aus Sicht der Bauschuttzubereitung sind die damit verbundenen ökologischen Mehrbelastungen gerechtfertigt, da eine Kreislaufführung der Feinfraktionen realisiert wird.

Die Ökobilanz von Carbonbeton – gleich ob mit Primär- oder RC-Feinteilen – wird jedoch nach wie vor maßgeblich durch die Herstellung des Zements bestimmt. Insbesondere die geogenen Kohlendioxidemissionen aus der Klinkerproduktion prägen den Treibhauseffekt. Im Unterschied zu konventionellem Beton ist im Carbonbeton-Feinbeton eine höhere Zementmenge erforderlich, um die geforderten mechanischen Eigenschaften sowie die Anbindung an die Carbonbewehrung sicherzustellen. Damit erhöht sich der Zementanteil pro Kubikmeter Beton und somit auch der ökologische Fußabdruck in den Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung und terrestrische Eutrophierung.

Gleichzeitig ergeben sich durch die Substitution primärer Gesteinskörnungen mit RC-Feinteilen deutliche Vorteile in weiteren Umweltindikatoren. Insbesondere im kumulierten mineralischen Rohstoffaufwand und in der Flächeninanspruchnahme zeigt sich ein klarer Ressourcenvorteil, da keine neuen Rohstoffe abgebaut werden müssen und auf den energie- und flächenintensiven Sprengprozess im Steinbruch verzichtet werden kann. Auch beim Transport ergeben sich Vorteile, da RC-Materialien in der Regel über kürzere Distanzen zur Betonproduktion verfügbar sind.

Im Vergleich zwischen Carbonbeton mit Primärfeinteilen und R-Carbonbeton mit RC-Feinteilen ergeben sich somit gegenläufige Tendenzen:

- Nachteile durch den erhöhten Zementgehalt im Feinbeton, der die Emissionen aus der Bindemittelherstellung verstärkt.
- Vorteile durch die Verwertung bislang ungenutzter Feinfraktionen, die Ressourceneinsparung, die Reduktion von Transportdistanzen und die Vermeidung von Primärabbauprozessen.

Insgesamt überwiegen bei einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse die ökologischen Vorteile der Ressourcenschonung. Trotz der höheren Zementintensität ist der Einsatz von RC-Feinteilen in Carbonbeton aus Sicht der Ressourceneffizienz und Rohstoffbilanz klar positiv zu bewerten.

Die Herstellung von Carbonbewehrungen auf Basis primärer Carbonfasern ist durch einen sehr hohen Energieeinsatz in der Faserproduktion gekennzeichnet. Insbesondere die Umwandlung von Polyacrylnitril (PAN) zu Carbonfasern in energieintensiven Hochtemperaturprozessen trägt maßgeblich zum Treibhauspotenzial, zum kumulierten fossilen Energieaufwand sowie zu weiteren Wirkungskategorien wie Versauerung und Eutrophierung bei. Dieser ökologische Fußabdruck stellt bislang eine wesentliche Einschränkung für die breite Anwendung von Carbonbeton dar.

Die Nutzung rezyklierter Carbonfasern (rCF) für die Herstellung von R-Carbonbewehrungen eröffnet hier deutliche ökologische Vorteile. Da bei der Wiederverwertung bestehender Carbonfasern aus End-of-Life-Bauteilen oder Produktionsabfällen die energieintensive Primärfaserproduktion entfällt, reduzieren sich die Treibhausgasemissionen und der fossile kumulierte Energieaufwand signifikant. Stattdessen treten Aufwendungen für die Rückgewinnungsprozesse auf, die mechanisch, thermisch oder chemisch erfolgen können. Diese Verfahren sind zwar mit zusätzlichem Strom- bzw. Wärmebedarf verbunden, bleiben jedoch deutlich unterhalb der Belastungen der Primärfaserherstellung.

Ökobilanziell zeigen sich folgende wesentliche Aspekte:

- Treibhauspotenzial (GWP):

Der Einsatz von R-Carbonbewehrung verringert die Emissionen im Vergleich zu Primärcarbonfasern erheblich. Je nach Recyclingverfahren können Einsparungen zwischen 30 und 70 % der CO₂-Äquivalente erreicht werden.

- Kumulierter fossiler Energieaufwand:

Durch den Wegfall der PAN-Herstellung und der Hochtemperaturprozesse sinkt der Energiebedarf deutlich. Der zusätzliche Strombedarf für Zerkleinerung, Pyrolyse oder Solvolyse ist im Vergleich dazu gering.

Rohstoffaufwand (ADP_{mineral}/ADP_{fossil}):

Die Ressourcenschonung ist besonders ausgeprägt, da keine neuen Vorprodukte (Erdöl für PAN) benötigt werden. Dadurch ergibt sich ein erheblicher Vorteil im mineralischen und fossilen Rohstoffaufwand.

- Weitere Wirkungskategorien (Versauerung, Eutrophierung, Feinstaub):

Vorteile entstehen vor allem durch den Wegfall emissionsintensiver Vorprozesse. Allerdings können je nach Recyclingroute (z. B. thermisch) zusätzliche Emissionen aus der Energiebereitstellung auftreten.

- Transport und Regionalität:

Ein weiterer ökologischer Vorteil ergibt sich aus der Möglichkeit, Recyclingprozesse regional durchzuführen. Damit verkürzen sich Transportdistanzen für Carbonfasern, die im Primärprozess häufig global verteilt produziert werden.

Die technische Gleichwertigkeit von R-Carbonbewehrungen mit Primärbewehrungen ist durch laufende Forschung abzusichern. Unter der Annahme vergleichbarer Lebensdauer und Funktionalität beschränken sich die ökologischen Unterschiede somit auf die Herstellungsphase. Bau-, Nutzungs- und Rückbauphase sind funktional äquivalent. Insgesamt zeigt sich, dass die Integration rezyklierter Carbonfasern in die Bewehrung von Carbonbeton einen substantiellen Beitrag zur Reduktion der ökologischen Gesamtwirkung leisten kann. Während die Matrix des Carbonbetons nach wie vor durch den Zement dominiert wird, ermöglicht der Ersatz von Primärfasern durch R-Carbonbewehrungen eine signifikante Verbesserung der Rohstoff- und Energieeffizienz sowie eine deutliche Senkung der Treibhausgasemissionen.