



ENDBERICHT: **FaBeR** – FKZ 033R253A

Faser- und **Beton-Recycling** von Carbon- und Textilbeton

unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Störstoffen

auf etablierte mineralische Rohstoffkreisläufe

Selina Vaculik, Katrin Schumacher, Kaleb Yared, Kerstin Anselmino,
Devrim Gürsel, Anna Luthin, Vanessa Overhage, Lia Weiler,
Thomas Gries, Marzia Traverso, Tobias Vraetz, Anya Vollpracht



Verbundkoordinator:

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac)

Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

+49 241 8095-116

vollpracht@ibac.rwth-aachen.de

Tabellarische Übersicht der geförderten Verbundpartner:

Name der Einrichtung:	Art der Einrichtung
Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (MCAM)	GU
Holcim (Deutschland) GmbH	GU
RWTH Aachen University: <ul style="list-style-type: none">• Institut für Textiltechnik (ITA)• Institut für Baustoffforschung (ibac)• Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INaB)• Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR)	Hochschule



Berichtszeitraum 01.05.2021 – 30.04.2024

Laufzeit: 01.05.2021 – 30.04.2024

Inhalt

Ziel und Inhalt des Vorhabens.....	5
Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse:.....	5
1. AP 1.1 – Herstellung der Textilbetonrezyklate (AMR)	5
1.1. Mikroskopieuntersuchungen des Carbonfaserbetonbruchs.....	7
1.2. Zerkleinerung und Klassierung des Carbonfaserbetonbruchs.....	8
1.3. Glasfasertbetonplatten.....	11
1.4. Aufbereitung CPC-Beton (Holcim)	14
2. AP 1.2 – Charakterisierung Betonbruch (ibac)	16
2.1. Umweltverträglichkeit von Recycling Gesteinskörnung	20
2.2. Bestandteile des Glasfaserbetonbruchs.....	22
3. AP 1.3 – Aufbereitung des Faseranteils (MCAM).....	24
4. AP 2.1 –Verwertung Faserfraktion im Beton (ITA)	27
4.1. Auswahl und Untersuchung des Fasermaterials	28
4.2. Auswahl Matrixmaterial.....	28
4.3. Auswahl Einbettungstiefe und des Versuchsumfang.....	29
4.4. Versuchsaufbau und –durchführung: Pull-Out Prüfung	29
4.5. Erstellung der Prüfkörper	31
4.6. Auswertung Pull-Out Prüfung.....	32
4.7. REM Aufnahmen	33
4.8. Prüfung der Faserlängenverteilung.....	37
4.8.1. Pure	38
4.8.2. NP5R	39
4.8.3. Resized	40
4.9. Einfluss des Knickwinkels	41
5. AP 2.2 Verwertung der Beton-/Faserfraktion in Beton (ibac).....	43
5.1. Untersuchung der Wirksamkeit von rezyklierten Fasern im Mörtelmaßstab	44
5.2. Schrumpfrissreduzierung im Betonmaßstab	47
5.3. Zusammenfassung	51
6. AP 2.3 – Verwertung der Beton-Feinfraktion in Zement (Holcim)	51

6.1.	Untersuchungen Im Labormaßstab.....	51
6.1.1.	Charakterisierung der Ausgangsstoffe	51
6.1.2.	Mahlung der Feinfraktion.....	53
6.1.3.	Herstellung und Charakterisierung der Recyclingzemente	54
6.2.	Untersuchungen im Technikumsmaßstab	59
6.2.1.	Mahlung der Feinfraktion.....	59
6.2.2.	Herstellung und Charakterisierung der Recyclingzemente	60
6.2.3.	Prüfung von Betonen mit R-Zementen	61
6.2.4.	Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit.....	62
6.2.5.	Karbonatisierungswiderstand	63
6.2.6.	Chlorideindringwiderstand.....	64
6.2.7.	Zusammenfassung.....	65
7.	AP 2.4/AP 3.1 - Verarbeitungsprozess und Demonstrator Industriefußboden (ibac)	66
7.1.	Demonstrator aus Gehwegplatten	66
7.2.	Demonstrator Betonkanu	71
7.3.	AP 3.2 Demonstrator RC-Zement - Untersuchungen im Produktionsmaßstab (Holcim) 73	
7.3.1.	Vorversuche.....	73
7.3.2.	Mahlung	75
7.3.3.	R-Zement.....	75
7.3.4.	Betone mit R-Zementen	77
7.3.5.	Zusammenfassung.....	79
8.	AP 4.1 – Kreislauffähigkeit (ibac)	79
8.1.	Betonbruch und Fasern (ibac).....	79
8.2.	Kreislauffähigkeit CPC-Elemente (holcim)	81
9.	AP 4.2 - Arbeits- und Gesundheitsschutz (ibac).....	82
9.1.	Versuchsstand zur Untersuchung der Faserfreisetzung.....	82
9.2.	Luftprobennahme im Faserstand	84
9.3.	Ergebnisse und Auswertung	86
9.4.	Bruchverhalten der Fasern	88
9.5.	Zusammenfassung und Ausblick	89

10.	AP 4.3/AP 4.4 – Nachhaltigkeitsbewertung LCA und Soziologische Analyse (INaB).....	90
10.1.	Industriefußboden: Erläuterung der Vorgehensweise	90
10.2.	Ökobilanz.....	91
10.3.	Lebenszykluskostenrechnung Industriefußboden	99
10.4.	RC-Zement: Erläuterung der Vorgehensweise.....	103
10.5.	Ökobilanz RC-Zement	103
10.6.	Lebenszykluskostenrechnung RC-Zement.....	110
10.7.	Schlussfolgerung	113
11.	AP 5 – Erstellung eines Anforderungsprofils an Textilbetonrezyklat (ITA)	114
11.1.	Gesetzlicher Rahmen nach der Abfallhierarchie der Europäischen Union	114
11.2.	Trennbarkeit	117

Ziel und Inhalt des Vorhabens

Im Projekt „FaBeR“ wurde eine stofflich hochwertige, unschädliche Nutzbarmachung der Mineralik- und Faserfraktionen von zu recycelnden Textilbetonbauteilen zum Wiedereinsatz in der Produktion von mineralischen Hochleistungswerkstoffen entwickelt. Der Wiedereinsatz in Textil-/Faserbetonen soll den übrigen Baustoffstrom faserfrei halten.

Dazu wurde ein Kreislaufkonzept für kurze, recycelte Fasern und Brechsande in Faser- & Textilbetonen mit Recyclinganteil (rF-Beton) und in Recyclingzementen entwickelt, sowie die Unbedenklichkeit von Faserresten im Bauschutt in Hinblick auf dessen schadlose Verwertung geprüft. Eine Übersicht der hierfür angelegten Arbeitspakete und der jeweils beteiligten Projektpartner zeigt Bild 1.

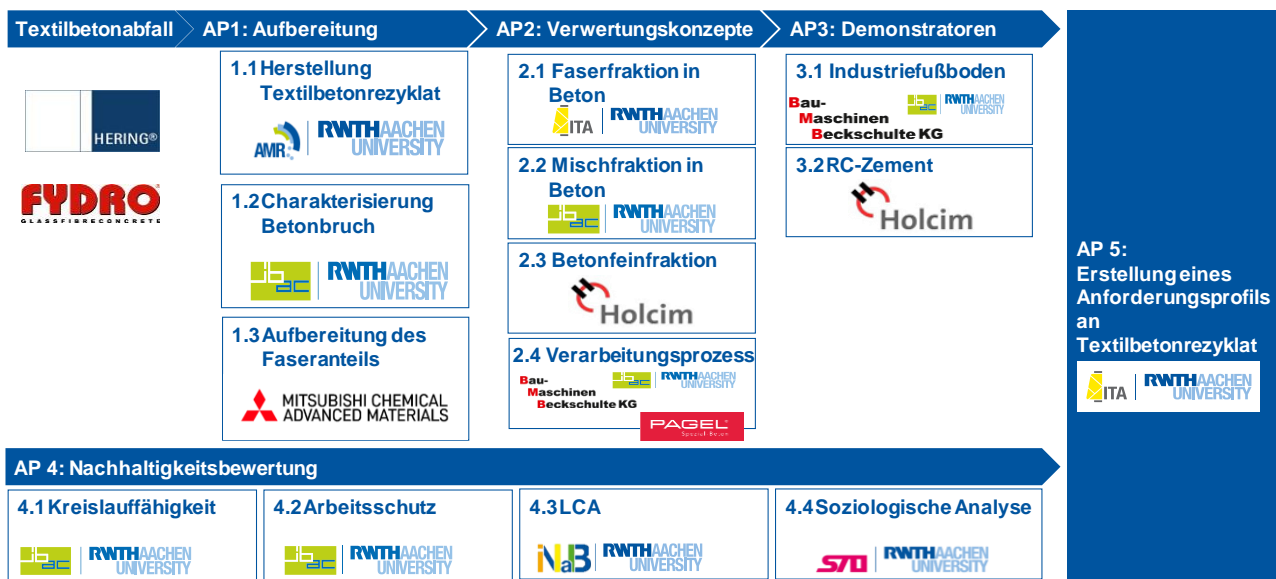


Bild 1: Arbeitsplan des Projekts „FaBeR“

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse:

1. AP 1.1 – Herstellung der Textilbetonrezyklate (AMR)

Für die Herstellung der unterschiedlichen Textilbetonrezyklate wurden im Technikum des AMR Betonprobenarten mit zwei verschiedenen Armierungsmaterialien (Carbon & Glas) verwendet. Vom den assoziierten Partner Fydro B.V. und HeringBau wurden Produktionsabfälle und Restposten zur Verfügung gestellt.

Die Proben, die zur Verfahrensentwicklung herangezogen wurden, sind in Bild 2 dargestellt. Zwei Betonproben wiesen eine Carbontextilbewehrung und drei Proben eine Glastextilbewehrung, sowie Einzelglasfasern auf

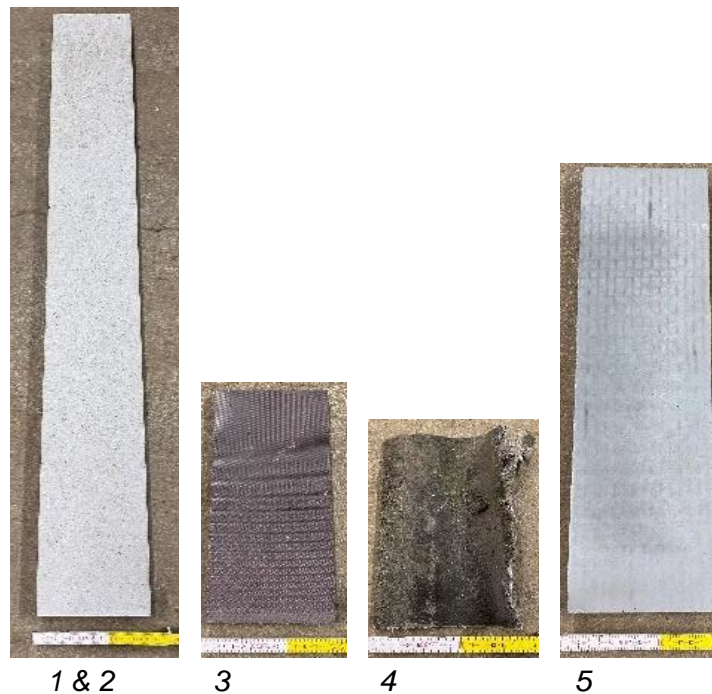


Bild 2: Betonproben für die Verfahrensentwicklung im Rohzustand – 1&2: Carbonbeton; 3-5: Glasfaserbeton (Textil + Einzelfasern)

Das Ziel der Aufbereitung dieser Proben war es, durch eine selektive Zerkleinerung mit anschließender Klassierung eine Trennung von Betonbruch und Fasern in den jeweiligen Proben zu erreichen. Die beschichtete Armierung sollte dabei möglichst wenig zerkleinert bzw. beansprucht werden und frei von Betonbruchstücken sein. Folglich wurde besonderes Augenmerk auf die Vermeidung einer zu starken Zerkleinerung der Proben und damit des Faseranteils gerichtet.

Für die Proben mit Carbontextil wurde zur Untersuchung der selektiven Zerkleinerung eine 3-stufige Zerkleinerung (2x Backenbrecher und 1x Walzenmühle) mit anschließender Klassierung und Siebanalyse bei 2 mm; 4 mm; und 8 mm durchgeführt. Für die Projektpartner wurden für weiterführende Arbeitsschritte die Fraktionen 0-2 mm und 2-4 mm hergestellt. Für die Proben mit Glastextilbewehrung wurde nach Absprache mit den Projektpartnern nach der Zerkleinerung lediglich bei 2 mm und 4 mm klassiert und das Material für weitere Arbeitsschritte bereitgestellt, da die Glasfasern schwierig abgetrennt werden können.

Die durch Zerkleinerung erzeugten und klassierten Fraktionen der Carbonbetonproben zeigen Bild 3 und Bild 4. In Bild 3 ist links das Ergebnis der ersten Zerkleinerungsstufe mittels Backenbrecher zu

erkennen, die nächsten vier Bilder zeigen das Ergebnis der anschließenden Klassierung. Die oberen beiden Bilder der Klassierung zeigen klar die Carbongelege (>>4 mm), welche noch relativ intakt sind und noch Anhaftungen von Betonbruchstücken aufweisen. Die unteren beiden Bilder der Klassierung zeigen die Fraktionen 0-2 mm und 2-4 mm, die nach optischer Beurteilung hauptsächlich aus Betonbruch bestehen, allerdings auch kurze Carbonfaserstücke enthalten.

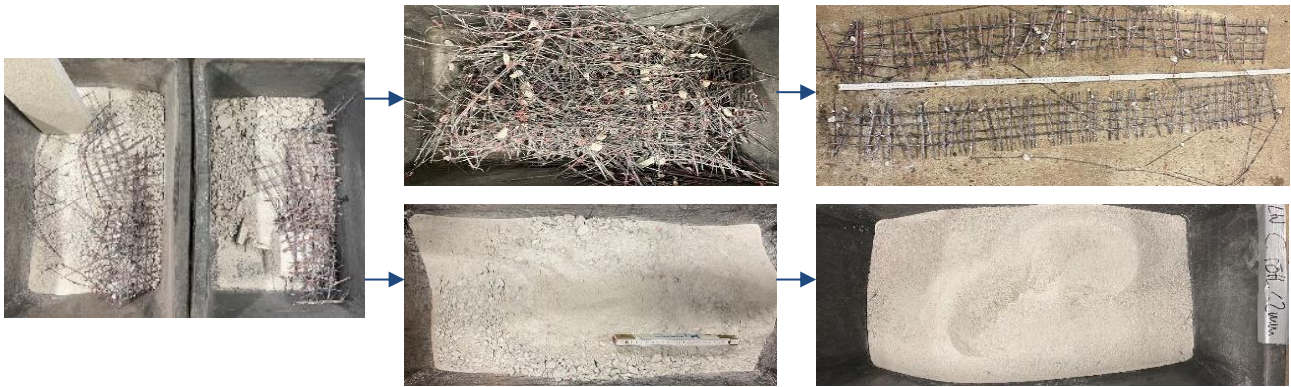


Bild 3: Fotos der Zerkleinerung und Klassierung von Carbonfaserbeton der Probe 1

Die Carbonbetonprobe 2 in Bild 4 zeigt ein ähnliches Ergebnis. Erneut konnte das Carbonfasertextil nach der Zerkleinerung und Klassierung teilweise erhalten und größtenteils von Beton getrennt werden, jedoch befinden sich auch hier Verunreinigungen der jeweils anderen Fraktionen in den Produkten.

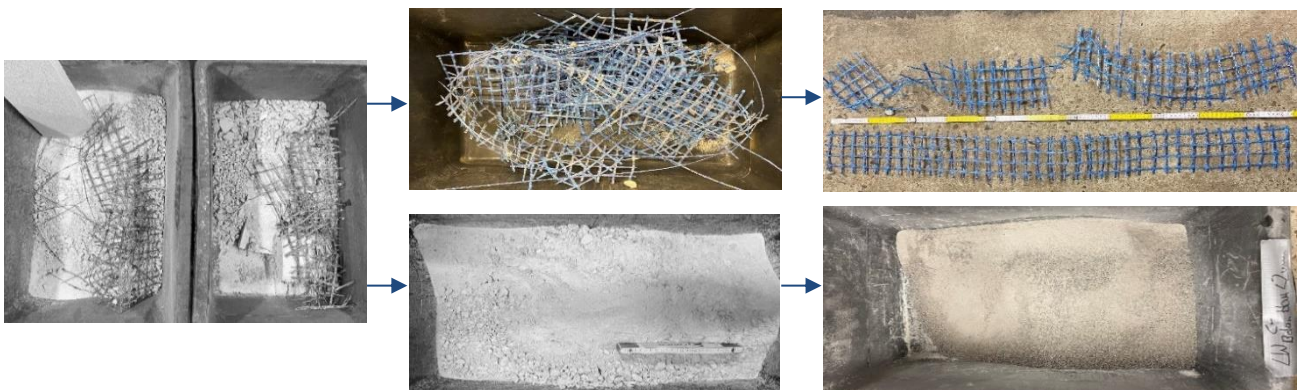


Bild 4: Fotos der Zerkleinerung und Klassierung von Carbonfaserbeton der Probe 2

1.1. Mikroskopieuntersuchungen des Carbonfaserbetonbruchs

Zur genaueren Untersuchung des Einflusses der Aufbereitung auf das Material wurde eine Teilprobe der zerkleinerten Carbonfaserbetonprobe 1 für eine mikroskopische Untersuchung in die Siebschnitte <125 µm; 125 – 250 µm; 250 – 500 µm; 500 – 1000 µm; 1 - 2 mm und > 2 mm klassiert. Das Ergebnis zeigt Bild 5. Die Bilder der Siebschnitte zeigen deutlich, dass die Partikel des Betonbruchs (<4 mm) aufgeschlossen sind und keine Anhaftungen von Fasern aufweisen. Allerdings sind

im Siebschnitt +250 μm und +500 μm lose Fasern zu erkennen, die deutlich größer als die Partikel sind, aber dennoch durch die Sieböffnungen des Analysensieves durchfallen konnten. Derselbe Effekt ist für eine industriell ausgelegte Klassierung zu erwarten. Die Mikroskopiebilder in Bild 5 (oben rechts und unten links) zeigen den Einfluss der Scher- und Druckbeanspruchung durch den Backenbrecher auf die Carbonfaser bzw. die Wirkfäden, mit denen die Längs- und Querrovinge verbunden sind. Zwar ist die grundlegende Struktur des Carbonfasergeleges weitestgehend intakt; aber dennoch beschädigt.

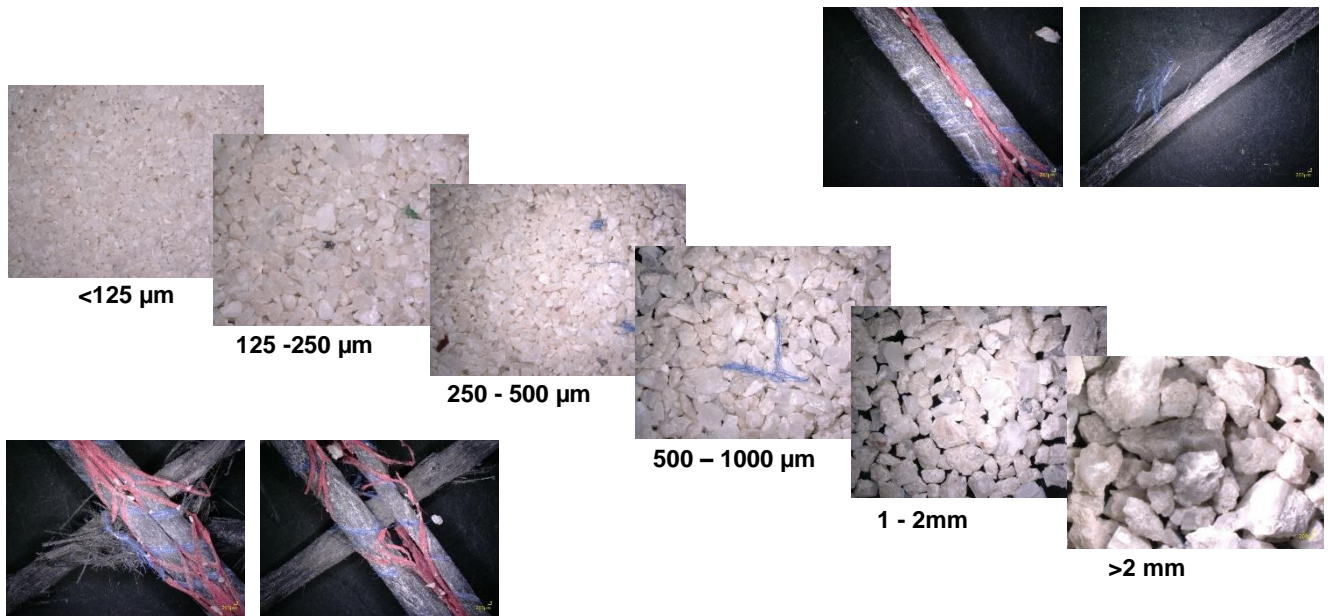


Bild 5: Mikroskopische Untersuchung der Carbonfaserbetonprobe 1

1.2. **Zerkleinerung und Klassierung des Carbonfaserbetonbruchs**

Nach den Carbonbetonproben wurden die Glastextilbetonproben aufbereitet bzw. zerkleinert und bei 2 mm und 4 mm klassiert. Das Ergebnis zeigt Bild 6. Auch hier wurde ein Backenbrecher verwendet. Zerkleinerungsversuche mit einer Walzenmühle und einer Stabmühle führten nicht zur gewünschten selektiven Zerkleinerung. Im Gegensatz zu den Carbonbetonproben konnte hier keine vergleichbare Trennung von Beton und Fasern erreicht werden. Zum einen sind grobe Betonpartikel nach der Aufbereitung noch mit Glasfasern verbunden und demnach nicht voneinander getrennt, und zum anderen hat hier eine starke Zerkleinerung der Glasgelege stattgefunden. Dadurch sind nicht nur im Grobanteil, sondern auch im Feinanteil des klassierten Materials Fasern enthalten. Eine weitere Zerkleinerungsstufe führte lediglich dazu, dass Faser und Beton gleichermaßen weiter zerkleinert wurden. Eine selektive Zerkleinerung fand dabei nicht statt. Das Ergebnis war eine Mischfraktion aus Beton und Fasern. Aus diesem Grund wurde nach Absprache mit den Projektpartnern jeweils eine 0-2 mm und eine 2-4 mm Mischfraktion des Glasfaserbetons für die weiteren Arbeitsschritte hergestellt.

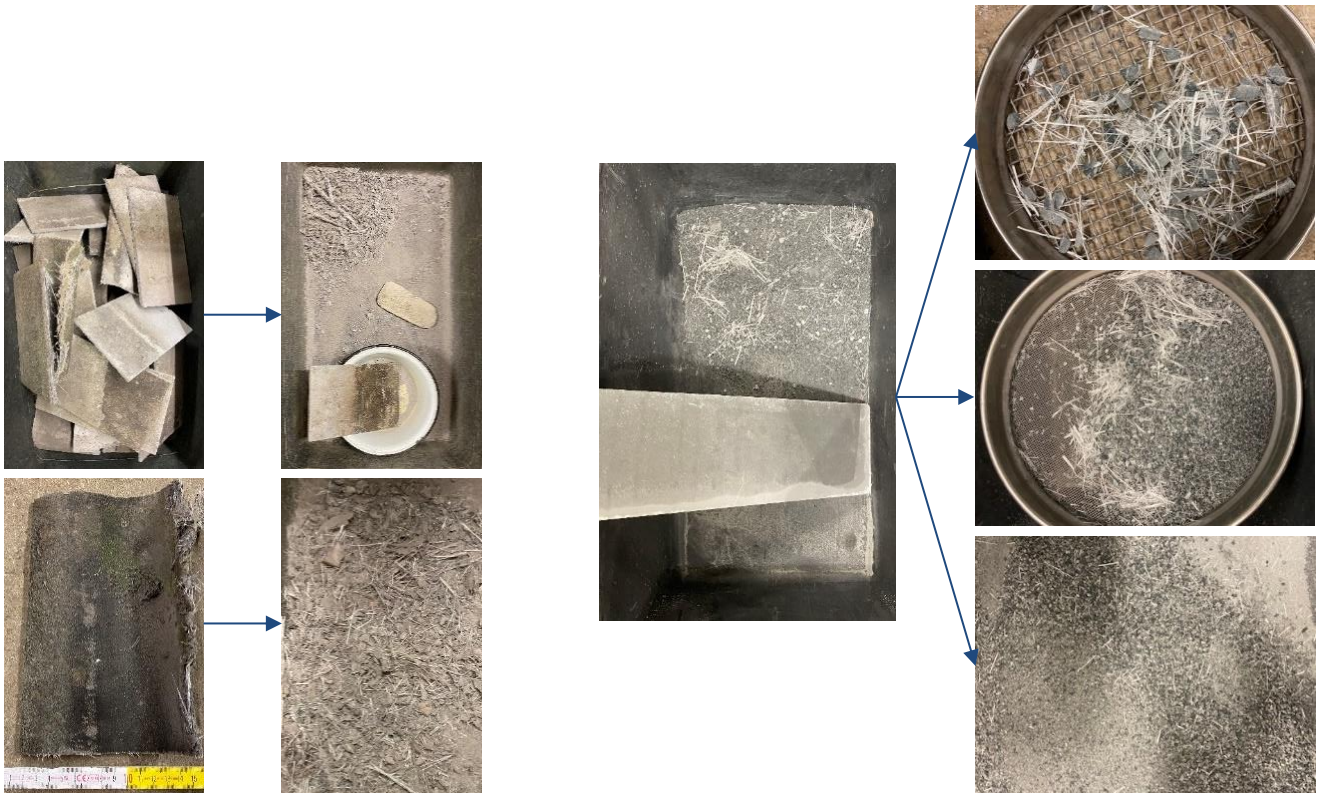


Bild 6: Fotos der Zerkleinerung und Klassierung von Glasfaserbetonproben 4 (links) und 5 (rechts)

Da sich für die selektive Zerkleinerung die Carbonbetonproben als geeignet herausgestellt haben, wurden mit den in Bild 3 dargestellten Fraktionen der Carbonfaserprobe 1 weitere Zerkleinerungs- und Klassierungsschritte durchgeführt. Als zweite Stufe wurde erneut der Backenbrecher genutzt, da hier der Betonbruch noch relativ grob war und als dritte Stufe eine Walzenmühle, welche besser für eine Mittel- bis Feinzerkleinerung geeignet ist. Zur Evaluierung der Ergebnisse wurden Siebdurchgangskurven (Bild 7 - Bild 9) erstellt.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der ersten Zerkleinerungsstufe, einmal die gesamte Kornverteilung (Beton u. Faser) und jeweils die Kornverteilung des Betons und der Faser getrennt. Dabei liegt der d_{50} -Wert für die gesamte Probe bei ca. 7 mm, für Beton bei 6 mm und für Carbonfaser bei 8 mm. Dieser Wert und der gesamte Verlauf der Kurven zeigen, dass nach der Zerkleinerung der Beton gröber vorliegt als die Carbonfaser und so durch eine Klassierung eine Sortierung nach Beton und Faser möglich sein sollte.

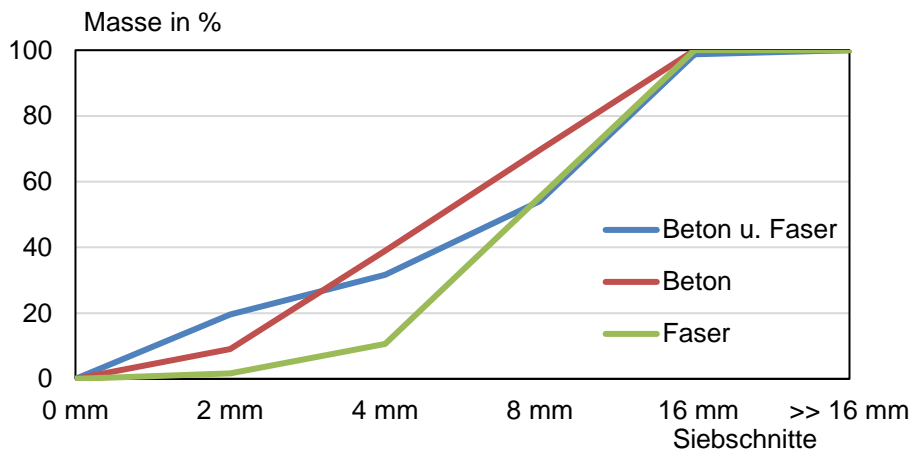


Bild 7: Siebdurchgangskurve Carbonfaserbeton 1. Zerkleinerungsstufe

Bild 8 zeigt die Ergebnisse der nächsten beiden Zerkleinerungsstufen mit der Unterteilung der Fraktion auf Beton und Faser. Es fällt auf, dass sich nach der 2. Stufe (links) beide Kurven und demnach auch die Kornverteilung des Materials verändert haben. Der d_{50} -Wert für Beton liegt bei ca. bei 4 mm und bei Carbonfaser erneut bei ca. 8 mm. Allerdings ist der Anteil < 4 mm im Carbonfaseranteil nun deutlich geringer, was auf eine Teilzerkleinerung der Faser schließen lässt.

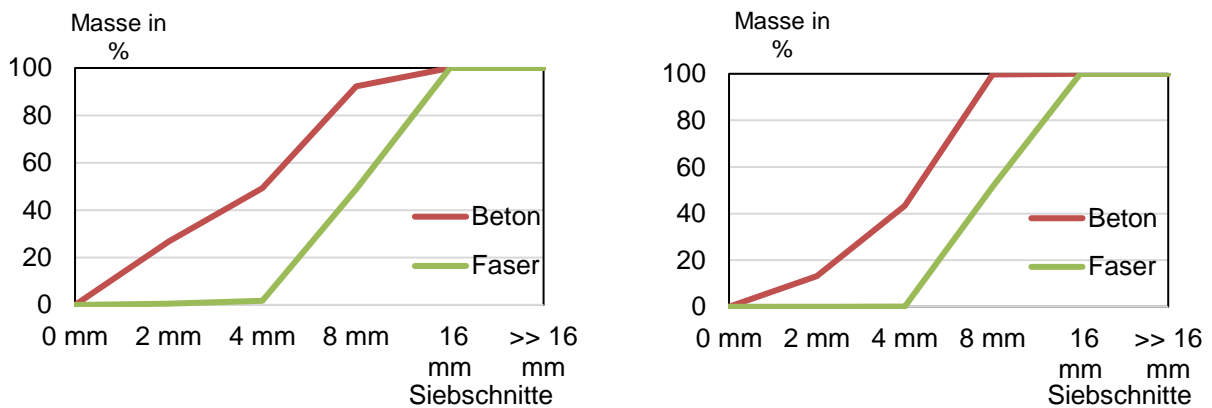


Bild 8: Siebdurchgangskurve Carbonfaserbeton; 2. Zerkleinerungsstufe (links) und 3. Z.-Stufe (rechts)

Nach der 3. Stufe (rechts) hat sich nur der Verlauf der Kurve für Beton leicht verändert; die d_{50} -Werte für Beton und Carbonfaser liegen erneut bei ca. 4 mm bzw. 8 mm. Dies deutet daraufhin, dass die Carbonfasern nicht sonderlich von der Zerkleinerung durch die Walzenmühle beeinflusst wurden und eine selektive Zerkleinerung stattgefunden hat.

Zur weiteren Untersuchung und Bewertung der Ergebnisse bezogen auf die Carbonfaser, werden im Balkendiagramm in Bild 9 die Massenprozentage der Faser in den jeweiligen Siebschnitten der drei Zerkleinerungsstufen gegenübergestellt. Während nach der 1. Stufe (blau) noch ein klar erkennbarer

Anteil von Fasern der Partikelgröße 0-2 mm und 2-4 mm vorhanden ist, wird dieser in der zweiten Stufe deutlich geringer und ist nach der 3. Stufe nur noch bei 2-4 mm mit lediglich 0,08 M.-% enthalten. Gleichzeitig steigt der Anteil der gröberen Fraktionen mit fortschreitender Zerkleinerungsstufe. Das deutet darauf hin, dass ein Teil der Fasern am Ende der 3. Stufe zerkleinert wurde und in dem Betonanteil gelandet ist, aber ein Großteil der Carbonfasern nicht weiter zerkleinert wurde, sodass der Anteil der Fraktionen 4-8 mm und +8 mm prozentual steigt. Hätte eine signifikante Zerkleinerung der groben Carbonfaser stattgefunden, müssten die Balken der Siebschnitte der Fraktionen 0-2 mm und 2-4 mm mit fortschreitender Zerkleinerung wachsen.

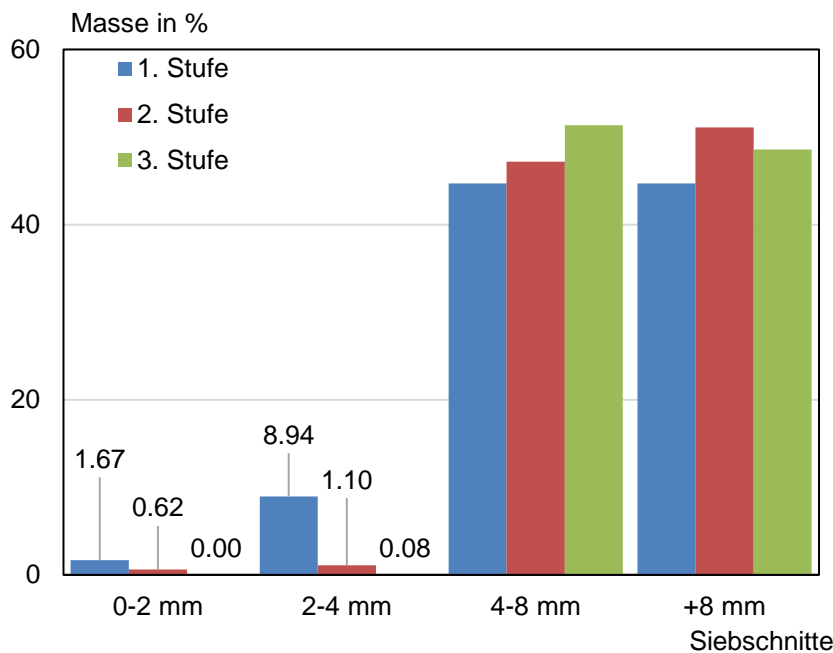


Bild 9: Korngrößenverteilung – Zerkleinerung Karbonfaser

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Sortierung durch eine selektive Zerkleinerung für Carbonbeton möglich ist. Nach der ersten Zerkleinerungsstufe sind mit weiterer Zerkleinerung die Kornverteilungen relativ konstant geblieben und grobe Fasern blieben im Wesentlichen grob. Für den Glasfaserbeton konnten keine vergleichbaren Ergebnisse erzielt werden. Eine „reine“ Betonfraktion und eine „reine“ Faserfraktion konnte für beide Fraktion nicht hergestellt werden.

1.3. Glasfasertbetonplatten

Aufbauend auf den beschriebenen Erkenntnissen zur Aufbereitung wurden insgesamt 1,41 t Textilbetonplatten für die folgenden Arbeitspakete aufbereitet. In Bild 10 ist die erste Anlieferungscharge abgebildet.



Bild 10: Anlieferung Glasfaserbetonproben 2022 am AMR

Wie im Bild 10 zu erkennen, sind die Proben deutlich größer als die Streifenproben der Vorversuche (Bild 2). Daher mussten sie zunächst zwecks Vorkonditionierung mittels Vorschlag- und Pressluft-hammer grob zerkleinert werden. Anschließend wurden sie mittels Backenbrecher analog zu den vorherigen Versuchen bei gleichen Maschinenparametern zerkleinert und klassiert.

Die Glasfasertextilbetonproben waren beim Anlieferungszustand vom assoziierten Partner in drei Arten B, AG und C kategorisiert worden und wurden demnach getrennt aufbereitet. Bild 11 zeigt beispielhaft drei Proben der drei Materialien.

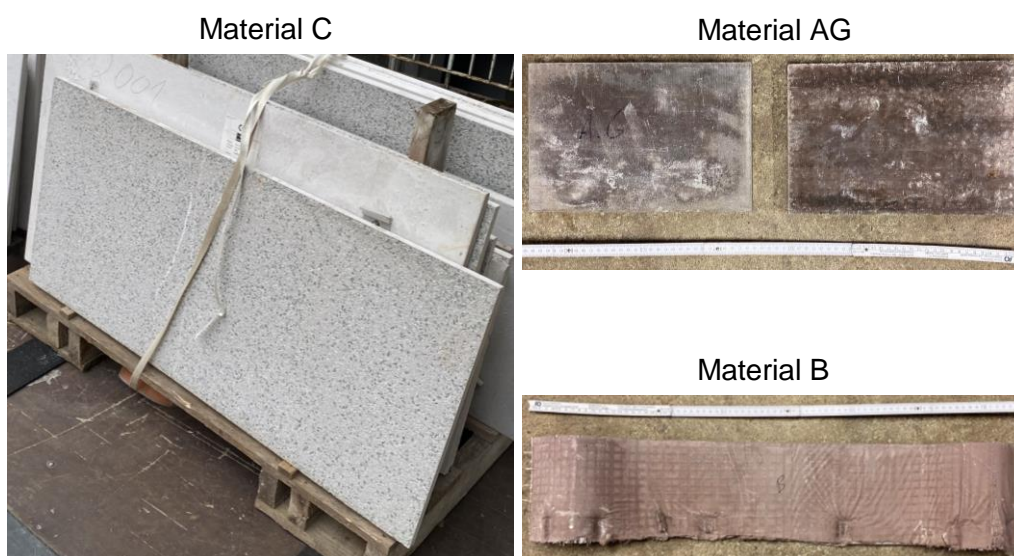


Bild 11: Materialarten beim Anlieferungszustand B, AG und C

Nach der Zerkleinerung und Klassierung wurden dieselben Siebschnitte wie bereits zuvor verwendet, nämlich 2 mm; 4 mm; 8 mm und 16 mm. Bild 12 zeigt beispielhaft Impressionen aus der Aufbereitung. Dabei handelt es sich links um Material C und rechts um Material AG bzw. B während und nach der Zerkleinerung und Klassierung.



Bild 12: Impressionen aus der Aufbereitung der drei Materialarten

Das Ergebnis der Aufbereitung der drei Materialarten zeigt Bild 13 in Form von Siebdurchgangskurven.

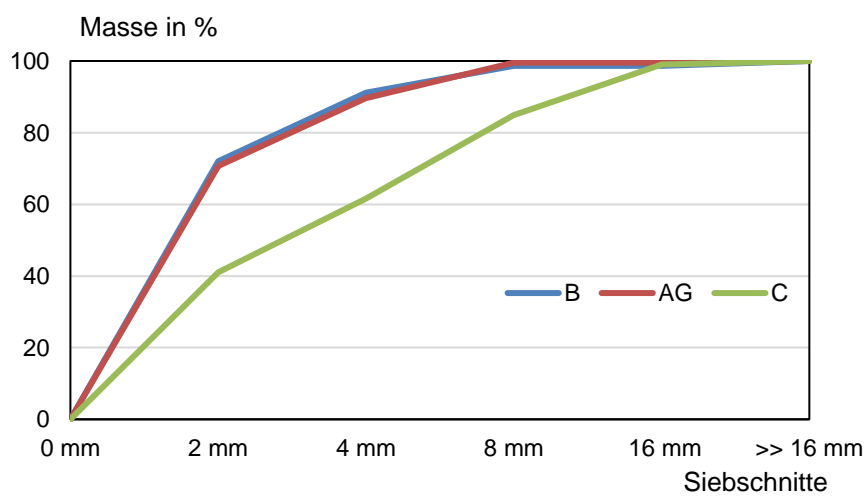


Bild 13: Siebdurchgangskurven der Glasfaserbetonproben B, AG und C nach Zerkleinerung und Klassierung

Dabei haben die Glastextilbetonproben B und AG eine nahezu identische Siebdurchgangskurve und demnach ein ähnliches Brechverhalten, während die Proben C sich deutlich davon unterscheiden, da sie mit einem d_{50} von 3 mm weit gröber sind als B und AG mit einem d_{50} von 2 mm. Eine wichtige Anmerkung ist, dass die Spaltweite des Backenbrechers nicht verändert bzw. angepasst wurde. Die Ursache für die unterschiedliche Zerkleinerung liegt höchstwahrscheinlich in der unterschiedlichen Härte der Materialien. Die Materialien B und AG waren eher weich und verursachten beim Durchgang durch den Backenbrecher eine übermäßige Zerkleinerung durch leichtes Anstauen, ohne jedoch den Brecher zu blockieren. Im Gegensatz dazu erwies sich Material C als härter und abrasiver. Dazu verfügte Material C über zahlreiche Glaspartikel in der Betonmatrix, welche wohl aus gestalterischen Gründen bei der Produktion ursprünglich hinzugefügt wurden. Hier hat der Backenbrecher erneut eine selektive Zerkleinerung hervorgerufen, sodass die härteren Glaspartikel durch den Brechspalt fielen, ohne zerkleinert zu werden. Der Bruch erfolgte hierbei häufig an der Kontaktzone der glatten Glasoberfläche. Durch diese Glaspartikel ist das Körnungsband der Proben C nach der Zerkleinerung gröber als bei Proben B und AG.

1.4. **Aufbereitung CPC-Beton (Holcim)**

Im Laufe des Projektes hat sich zusätzlich die Möglichkeit ergeben, Aufbereitungsversuche mit Carbonbeton im industriellen Maßstab durchzuführen. Seit Ende 2022 läuft die Serienfertigung von CPC Elementen (Carbon Prestressed Concrete) im VETRA Betonfertigteilwerk. Die weltweit einzigartige und hochmoderne Anlage fertigt Großplatten mit einer Größe von 60 x 7 Metern, aus welchen anschließend kundenspezifische Bauteile konfektioniert werden. Aufgrund der Fertigungstechnik fallen bei der Produktion Reste von Zuschnitten der CPC Platten an, welche für die Aufbereitungsversuche gesammelt wurden.

Im ersten Aufbereitungsversuch wurde ein mobiler 2-Wellen Brecher der Firma Albers (Erd- und Abbrucharbeiten) getestet. Dazu mussten die Reste auf eine Größe von ca. 80 x 80 cm vorzerkleinert werden um den Brecher damit befüllen zu können. Da es sich um einen Brecher handelt, der für Baustellenanwendungen gedacht ist, konnten die CPC Reste nur grob auf etwa 0 bis 30 cm gebrochen werden (siehe Bild 14). Um eine im Beton einsetzbare Korngröße zu erreichen, wurde das grob gebrochene Material anschließend auf dem Gelände der Firma Albers mit einer Siebanlage auf die Körnungen 0/8, 8/50 und 50/300 gesiebt. Für eine Rückführung und erneute Zerkleinerung der größeren Stücke war die Anlage jedoch nicht ausgelegt.

Von einem externen Prüfinstitut wurde das Material als rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 gemäß DIN 1045-2 klassifiziert, was den maximalen Einsatz im R-Beton ermöglicht.



Bild 14: Mit mobilem Brecher aufbereitete CPC Reste 0/300

Ein zweiter Aufbereitungsversuch konnte im Holcim Ecocycle Center Dortmund durchgeführt werden. Auch hier war eine Vorzerkleinerung auf eine Größe von ca. 80 x 80 cm notwendig. Mit einem Prallbrecher in Kombination mit einer Siebanlage konnten die Körnungen 0/4, 4/8 und 8/16 (siehe Bild 15) hergestellt werden, wobei es sich um eine, für Beton, übliche Körnungen handelt.



Bild 15: Mit Prallbrecher und Siebanlage hergestellte Körnungen aus CPC: links: 0/4; Mitte: 4/8; rechts: 8/16

Mit beiden Aufbereitungsverfahren war eine Zerkleinerung der CPC Reststücke ohne Probleme möglich, jedoch lassen sich die Fasern nicht einfach von der Matrix trennen. In jeder Fraktion befinden sich Fasern unterschiedlicher Länge, welche im Brechprozess mitgebrochen werden. Bei größerer Körnung sind einige Fasern noch im Beton eingebunden. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte der Carbonfasern im Vergleich zum Beton, sollten sich die Fasern jedoch über einen zu integrierenden Sichter abtrennen lassen. Bereits beim Aufbereitungsversuch separierten sich die Fasern aufgrund des Windes an einer Seite, was in Bild 16 zu sehen ist.



Bild 16: Anordnung der Fasern bei der Aufbereitung

2. AP 1.2 – Charakterisierung Betonbruch (ibac)

Im Berichtszeitraum hat das ibac ca. 69 kg aufbereitetes Carbonbetonmaterial der Korngröße > 2 mm vom AMR erhalten. Aufgrund der guten Separationsergebnisse des Textils von der Matrix wurde für Carbonbeton nur eine Fraktion „Betonbruch mit minimalen Verunreinigungen“ (RC-GK_C) untersucht. Das Rezyklat der glasfaserverstärkten Betone (RC-GK_G) besteht hingegen aus einer gemischten Fraktion, da sich das Textil und erst recht die Kurzfasern nicht ökologisch und ökonomisch sinnvoll abtrennen ließen.

Die RC-GK_C zweier Quellen wurden zunächst separat untersucht. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede, daher wurden im weiteren Verlauf gemischte Fraktionen untersucht, die eine realitätsnähere Zusammensetzung einer Recyclinganlage abbilden.

Die Rezyklate wurden bezüglich der in Tabelle 1 aufgeführten Eigenschaften entsprechend den geltenden Regelwerken charakterisiert. Die Probenteilung für alle Untersuchungen erfolgte gemäß DIN EN 932-2 mit Hilfe eines Riffelteiler.

Tabelle 1: Untersuchte Eigenschaften der RC-GK_C

Eigenschaft	Normverweis
Erscheinungsbild	-
Kornzusammensetzung	DIN EN 933-11
Korngrößenverteilung	DIN EN 933-1
Kornrohichte und Wasseraufnahme nach 24 h	DIN EN 1097-6
Wasseraufnahme nach 10 Minuten	DIN EN 1045-2
Kornform	DIN EN 933-4
Feststoffgehalte und Glühverlust	-
Auslaugverhalten	DIN EN 12457-4, DIN 4226-101

Zur Quantifizierung der Fremdbestandteile wurde jeweils eine Teilprobe durch Vierteln nach DIN EN 932-2 weiter eingegrenzt und die einzelnen Bestandteile händisch sortiert. Bild 17 zeigt die sortierten Fraktionen der Teilproben.

Wie aus Bild 17 ersichtlich, erscheint Betonbruch A heller als B, was auf eine andere Zusammensetzung hinweisen kann. Probe B weist einen augenscheinlich größeren Anteil an roten und grauen, losgelösten oder teils noch an der Körnung haftenden Faserresten auf. Bei den roten Fasern handelt es sich um die Wirkfäden aus Polyester. Die anderen Faserreste sind Carbonfaserbruchstücke (teilweise zusätzlich beschichtet). Die enthaltenen Fasern weisen eine maximale Länge von 40 mm mit durchschnittlich 20 mm in Probe A und 8 mm in Probe B auf. Dieser Längenunterschied wird der augenscheinlich besseren Trennbarkeit der Probe A zugeschrieben, was sich auch in der Anzahl der Faserstücke widerspiegelt. Während in Probe B (749 g) 14 Abschnitte gezählt wurden, sind in Probe A (863 g) nur 9 Reste sowie keine eingeschlossenen Faserbestandteile zu finden.

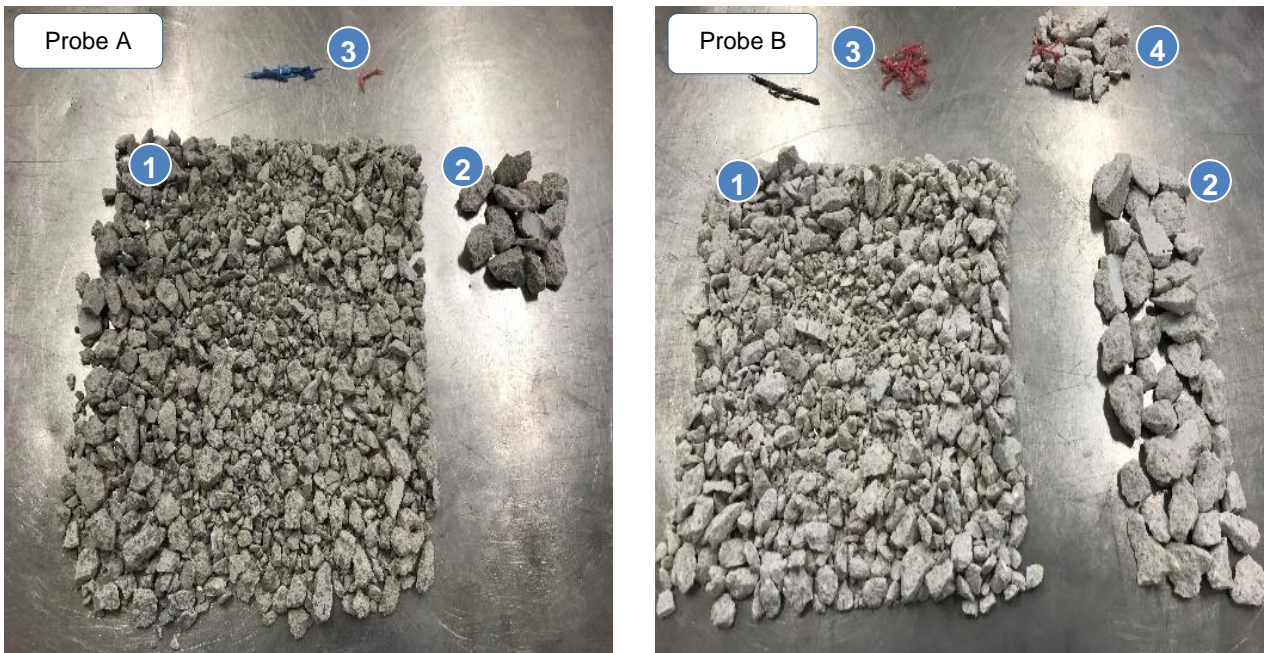


Bild 17: Bestandteile der untersuchten RC-GK_c. 1. Betonbruch 2/16; 2. Betonbruch 16/32; 3. Faserreste; 4. Betonbruch mit eingeschlossenen Faserresten.

In Bild 18 sind die bestimmten prozentualen Massenanteile der jeweiligen Bestandteile in Form eines Kuchendiagramms dargestellt. Die Bestimmung des Volumenanteils mittels wassergefülltem Messzylinder und einem Tauchkolben nach DIN EN 933-11 war jedoch aufgrund der Feinheit der Faserreste nicht möglich, da kein messbarer Unterschied des Wasserstands festgestellt werden konnte. Es lässt sich jedoch klar sagen, dass beide Proben trotz der augenscheinlichen Unterschiede zu nahezu 100 M.-% aus Betonbruch (R_c) bestehen und nach DIN EN 12620 der hochwertigsten RC-GK Kategorie RC₉₀ (Massenanteil an Betonbruch > 90 %) zugeordnet werden können.

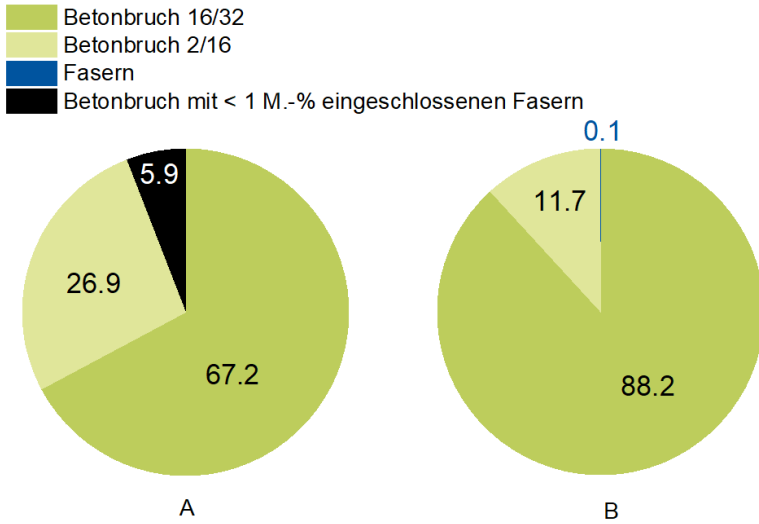


Bild 18: Zusammensetzung der RC-GK_c

Bild 19 zeigt die Korngrößenverteilung der vom AMR erhaltenen Fraktion 2/32 im Vergleich zu den Normsiebblinien für Beton nach DIN 1045-2 sowie der Idealsieblinie nach Fuller. Die Sieblinien beider Proben sind stetig und zeigen untereinander nur geringe Unterschiede. Sie lassen sich als grob und weitgestuft beschreiben. Die Einordnung als grobe Sieblinie ist naheliegend, da die Feianteile nach der Zerkleinerung im Backenbrecher bereits abgeseibt wurden. Die geringe Masse vorhandener Feianteile stammt vermutlich von Abrasionen aus dem Transportprozess, der Probeneinengung sowie der Klassierung selbst. In Hinblick auf herkömmliche Korngrößenverteilungen von Gesteinskörnungen für Beton könnten 65 % der natürlichen Gesteinskörnung mit der im Aufbereitungsprozess entstehenden Körnung (d.h. ohne weitere Klassierung oder Zerkleinerung) ersetzt werden.

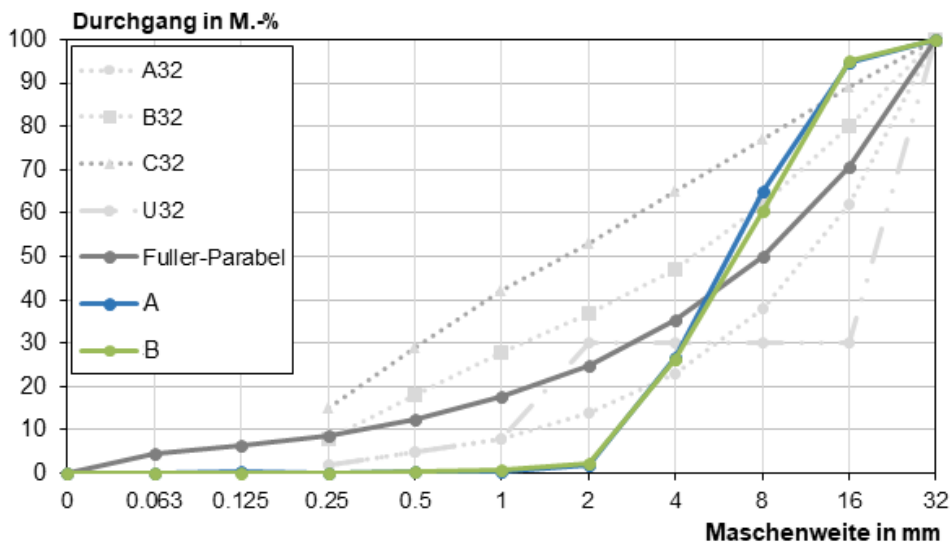


Bild 19: Korngrößenverteilung der RC-GK_c im Vergleich zu Normsiebblinien nach DIN 1045-2

Für die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in Beton ist generell eine möglichst kleine Kornformkennzahl SI und somit eine gedrungene Kornform von Vorteil. Die Ermittlungen der Kornform nach DIN EN 933-4 mittels Messschieber (nicht-kubische Körner mit einem Verhältnis der Länge zur Breite größer 3 ($L/E > 3$) werden aussortiert) ergaben Kornformkennzahlen von 29,7 % für Probe A und 26,4 % für Probe B. Sie liegen damit im Bereich ≤ 40 %, werden demnach der Kategorie SI_{40} nach DIN EN 12620 zugeordnet und erfüllen die Anforderung einer Kornformkategorie SI_{50} für rezyklierte Gesteinskörnung.

Beide Proben weisen mit Kornrohddichten von $\rho_A = 2400 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_B = 2410 \text{ kg/m}^3$ Dichten $> 2000 \text{ kg/m}^3$ auf, liegen mit einer Wasseraufnahme nach 24 h von 5,5 M.-% unter den maximal zulässigen 10 M.-% und können so nach der DIN EN 1045-2:2023-08 (Tabelle E.4) als Typ I eingeordnet werden und für eine Substitution natürlicher Gesteinskörnung in neuem Beton Verwendung finden. Die zusätzlich bestimmte Wasseraufnahme nach 10 Minuten (4,5 und 4,55 M.-%) zeigt, dass ein Großteil des Saugens nach diesem Zeitraum bereits abgeschlossen ist. Dies stellt einen wichtigen Kennwert für die Verarbeitbarkeit von Beton mit dieser Gesteinskörnung dar.

2.1. Umweltverträglichkeit von Recycling Gesteinskörnung

Zur Überprüfung der Wiederverwendbarkeit als RC-GK muss auch die chemische Zusammensetzung geeignet sein sowie die Umweltverträglichkeit sichergestellt werden. Da aufgrund der Herkunft und Zusammensetzung des Materials keine Unregelmäßigkeiten erwartet wurden, sollten diese Prüfungen nur stichprobenartig erfolgen. Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die nach Königswasseraufschluss ermittelten Feststoffgehalte der beiden RC-GK_C Proben sowie die Schwermetallkonzentrationen der im 10:1 Schütteltest (DIN EN 12457-4) hergestellten Eluate.

Da es sich um Produktionsabfälle handelt, wurde auf die Analyse der organischen Parameter (Mineralölkohlenwasserstoffe, PAK, EOX und PCB) im Feststoff verzichtet. Diese Kontaminationen stammen bei RC-GK in der Regel aus Kleber- und Abdichtungsmassen oder entstehen durch Kontamination im Gebrauch, z. B. bei RC-Material aus Kraftwerken oder Tankstellen.

Tabelle 2: Feststoffparameter der RC-GK_C

Parameter	Einheit	Probe A	Probe B
LOI	M.-%	28.88	33.9
Gesamtschwefel als SO ₃		0.48	0.48
Gesamtkohlenstoff als C		7.14	8.13
Chlorid		0.025	0.006
As	mg/kg	< 0.8	< 0.8
Pb		6	4
Cd		< 0.2	< 0.2
Cr		4	9
Cu		5	15
Ni		6	6
Hg		< 0.07	< 0.07
Tl		< 0.2	< 0.2
V		13	9
Zn		10	16

Tabelle 3: Eluatkonzentrationen im Eluat nach DIN EN 12457-4 im Vergleich zu den Grenzwerten für RC-Gesteinskörnung

Element	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	Grenzwert DIN 4226-101
	Eluatkonzentration in µg/L				
As	< 7	< 7	< 7	< 7	50
Ba	67,9	86,1	78,9	78,8	-
Cd	< 0,13	< 0,13	0,19	< 0,13	5
Cr	4,44	4,84	0,65	0,65	100
Cu	0,96	1,27	< 0,8	< 0,8	200
Co	1,02	1,27	< 1	< 1	-
Mo	1,94	1,84	5,29	2,53	-
Ni	< 1,6	< 1,6	< 1,6	< 1,6	100
Pb	< 3,3	< 3,3	< 3,3	< 3,3	100
V	< 0,6	0,70	2,82	1,91	-
Zn	< 5	< 5	< 5	< 5	400

2.2. Bestandteile des Glasfaserbetonbruchs

Auch bei der RC-GK_G wurden zur Quantifizierung der Fremdbestandteile aus jeder der drei Fraktionen jeweils eine Teilprobe durch Vierteln nach DIN EN 932-2 weiter eingegrenzt und die einzelnen Bestandteile händisch sortiert. Bild 22 zeigen die sortierten Fraktionen der Teilproben.

Die Fraktion RC-GK_G > 8mm weist den größten Anteil an Betonbruch mit Faserresten auf. Die anderen Faserreste sind Glasfaserbruchstücke. Die enthaltenen Fasern weisen eine maximale Länge von 100 mm und mit durchschnittlich Länge 40 mm in allen Fraktionen auf.

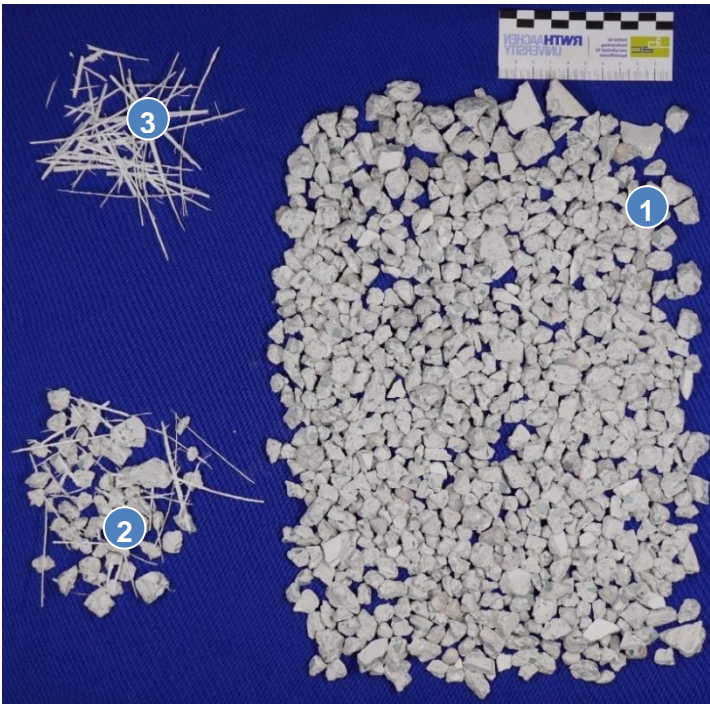


Bild 20 Bestandteile der untersuchten RC-GK_G > 8mm 1. Betonbruch. 2. Betonbruch mit eingeschlossenen Faserresten. 3. Fasern

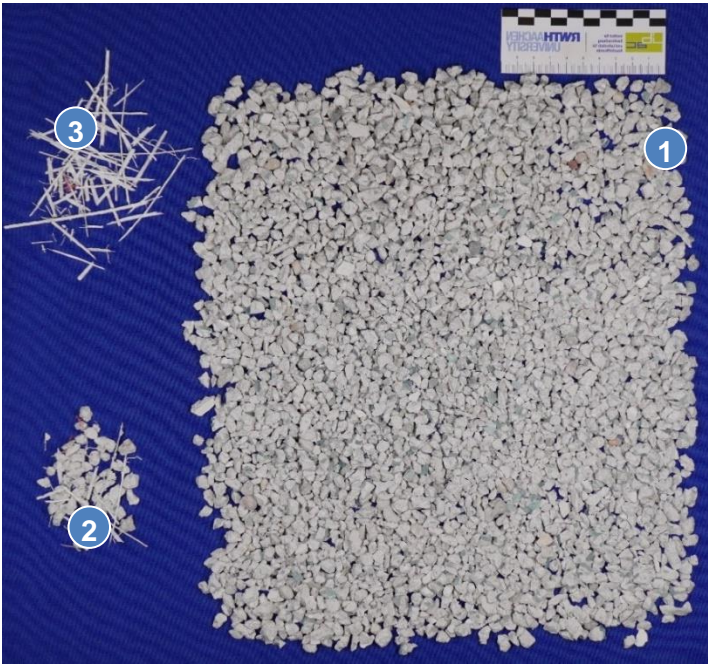


Bild 21 Bestandteile der untersuchten RC-GKG. > 4–8 mm 1. Betonbruch. 2. Betonbruch mit eingeschlossenen Faserresten. 3. Fasern



Bild 22: Bestandteile der untersuchten RC-GKG. GKG > 2–4 mm 1. Betonbruch. 2. Betonbruch mit eingeschlossenen Faserresten. 3. Fasern

In Bild 23 sind die bestimmten prozentualen Massenanteile der jeweiligen Bestandteile in Form eines Kuchendiagramms dargestellt. Der enthaltene Anteil der Fasern liegt dieser hochgerechnet deutlich unter 10 M.-% und der Betonbruch kann demnach trotz der Aufbereitung als Mischbruch der hochwertigsten RC-GK Kategorie RC₉₀ (Massenanteil an Betonbruch > 90 %) nach DIN EN 12620 zugeordnet werden.

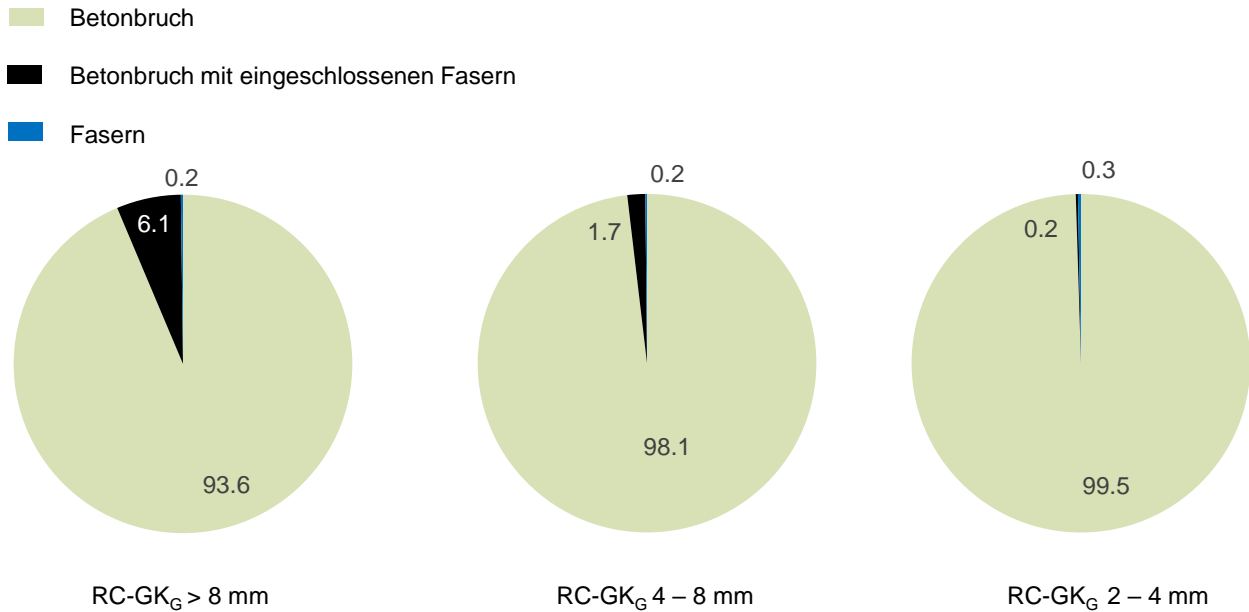


Bild 23: Zusammensetzung der RC-GK_G

Die gemessene Wasseraufnahme und Kornform des RC-GK_G ist vergleichbar zu den RC-GK_c-Werten. Da aufgrund der Herkunft und Zusammensetzung des Materials keine Unregelmäßigkeiten zu erwartet waren, wurde auf weitere Auslaugprüfungen verzichtet.

3. AP 1.3 – Aufbereitung des Faseranteils (MCAM)

MCAM wurden verschiedene Abfallproben siehe Bild 24 der assoziierten Partner zur Verfügung gestellt.

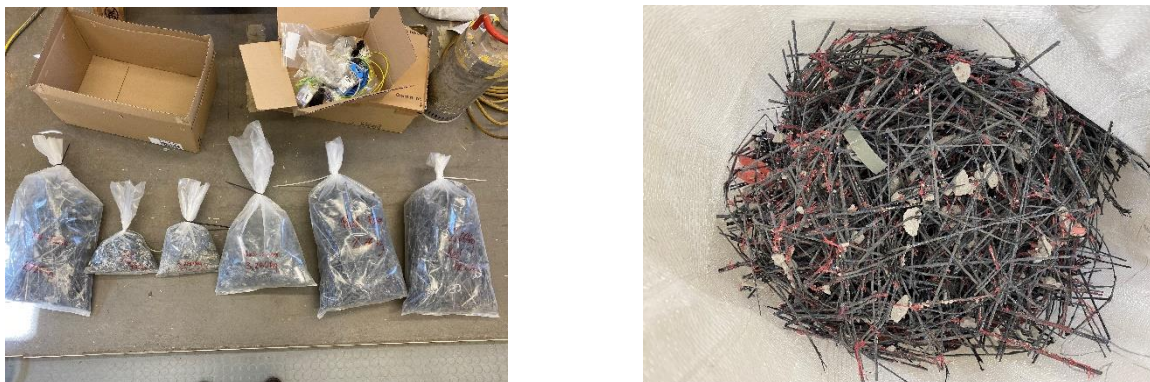


Bild 24: Übersicht der angelieferten Abfallproben

Hierbei handelte es sich um 58 kg zurückgewonnene Carbonfasern (rCF) aus unterschiedlichen Ursprungsproben, an denen teilweise noch Bauschutt haftete. Aufgabe der MCAM war die Rückgewinnung der reinen CF mittels Pyrolyse.

Bei dem von der MCAM betriebenen Pyrolyseverfahren wird zerkleinertes Abfallmaterial auf einem Förderband in den Pyrolyseofen transportiert, in dem unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen von 350° Grad die pyrolytische Zersetzung der Kunststoffstruktur erfolgt. Dabei werden organische Verbindungen thermochemisch aufgebrochen und das verbindende Harz wird zu Gas. Diese Pyrolysegase können verbrannt werden und liefern so die für den Prozess notwendige Energie. Reine Carbonfasern werden zurückgewonnen. Der Pyrolyseprozess dient zum einen der Energieproduktion und zum anderen der Rohstoffrückgewinnung, siehe Bild 25.

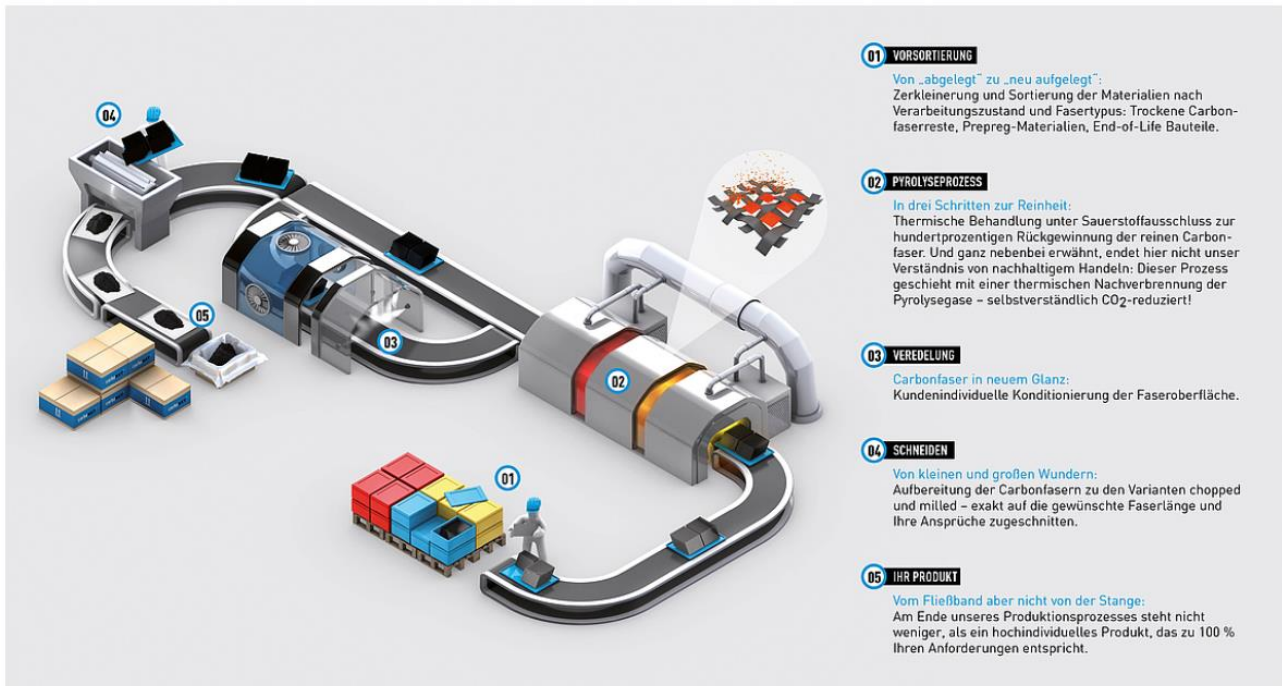


Bild 25: Übersicht der Pyrolyseanlage

Es wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Vor der Pyrolyse wurden in einem ersten Schritt die angelieferten Abfallproben der Länge nach sortiert.	
Abfallproben	Abfallproben > 4 mm
	
2. Die Proben wurden erfolgreich pyrolysiert.	
vorher	nachher
	
3. Das frei gelegte Fasermaterial wurde in einem weiteren Verarbeitungsschritt beschichtet.	
4. Das hergestellte rCF Material wurde zur weiteren Analyse an das RWTH ITA gesandt.	

MCAM ist für die Durchführung des Arbeitspaketes 1: „Aufbereitung der Faserfraktion zu reinen Kurzfasern“ verantwortlich. Hier wurde in einem ersten Schritt während des Kick-off-Meetings im Mai 2021 die Anforderungen an recycelte Carbonfasern (rCF) für die Anwendung in rCF-Beton definiert. Die für einen Kurzfaserbeton benötigten Fasern (10 – 30 mm) können aus Langfasern auf eine definierte Länge zugeschnitten und aufbereitet werden. Für die Anlieferung der aufzubereitenden Betonabfälle ist eine Größe von max. 500 x 500 mm ideal. Restanhaftungen der Betonmatrix sind unkritisch.

Unter den oben genannten Bedingungen definierten die Projektpartner in weiteren Gesprächen das Anforderungsprofil an das aufzubereitende Material, um den Aufbereitungsprozess optimieren zu können.

Im August 2021 stellte MCAM der RWTH Aachen rCF Mustermaterial für eine erste Analyse und Bewertung zur Wiederverwendung als Kurzfasern in rF-Beton zur Verfügung. Hier wurde das in Bild 26 dargestellte Probenmaterial geliefert.


1. carboNXT chopped 12.000 NP 5	
2. carboNXT chopped 12.000 Pure	
3. carboNXT chopped 12.000 NP 5R	

Bild 26: An das ITA der RWTH Aachen geliefertes Probenmaterial

In einem weiteren Schritt in diesem Arbeitspaket wird das von den Projektpartnern zur Verfügung gestellte Abfallmaterial aufbereitet und pyrolysiert.

Das mit Projektbeginn gestartete Arbeitspaket 4.3. befasst sich mit der Erstellung eines Life Cycle Assessment. Ziel ist die Auswertung ökologisch und ökonomisch relevanter Daten und Kennzahlen des Recyclingwerkstoffes, um den Vorteil der Verwendung von rCF nachzuweisen.

Hierzu stellte die MCAM für die Erstellung der Ökobilanz der RWTH Aachen Daten zu folgenden Kriterien zur Verfügung:

- Länge der Transportwege
- Ggf. Verpackung des Ausgangsmaterials
- Materialverlust bei der Aufbereitung
- Energieverbrauch bei der Aufbereitung
- Betriebsmittel
- Weiterverarbeitung der rCF aus vorherigem Schritt

4. AP 2.1 –Verwertung Faserfraktion im Beton (ITA)

Im Rahmen des AP 2.1 wurden im ersten Teil des Projekts Pull-out-Versuche durchgeführt, um die Faser-Matrix-Haftung der recycelten Carbonfasern zu bestimmen. Im zweiten Teil des Projekts wurde die Faserlängenverteilung mittels dem fibreshape Prüfgerät der Firma IST AG untersucht. Im Folgenden sind die Ergebnisse dargestellt.

Zur Durchführung der Pull-out-Versuche sind im Vorfeld die entscheidenden Eingangsparameter definiert und untersucht worden.

4.1. **Auswahl und Untersuchung des Fasermaterials**

Mit Pull-out Versuchen wurde des Adhäsionsverhaltens von verfügbaren rCF der MCAM in einer mineralischen Matrix untersucht. Zum Vergleich wurden als Referenz ebenfalls Untersuchungen an in der Baubranche bereits gängigen, neuwertigen CF (vCF) des Herstellers Teijin Carbon Europe GmbH, Heinsberg (Tenax) mit Epoxidharz- und Polyurethanbeschichtung durchgeführt.

Die Fasern sind im Vorfeld auf ihre Dichte und Zugfestigkeit untersucht worden. Zur Auswertung der Zugfestigkeit wurde die durchschnittliche Bruchspannung herangezogen. Im Anschluss wurden die Ergebnisse mit den Herstellerangaben aus den Produktdatenblättern verglichen. Für die Auswertung der Pull-out-Versuche sind jeweils die am ITA gemessenen Werte für die einzelnen Faserarten zugrunde gelegt worden.

Im Rahmen der Prüfung konnten die Angaben bezüglich der Dichte und des Filamentdurchmessers bestätigt werden. Unter diesen Aspekten sind auch keine eklatanten Unterschiede zwischen den vCF und rCF festgestellt worden.

4.2. **Auswahl Matrixmaterial**

Für die Wahl des geeigneten Matrixmaterials wurden die folgenden Faktoren evaluiert:

- Verarbeitbarkeit der Matrix zur Erstellung eines Prüfkörpers
- Homogenität des Prüfkörpers
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Um das Einzelfilament erfolgreich in den Prüfkörper einbetten zu können, wird eine Rezeptur mit geringem Eindringwiderstand benötigt. Eine zu frühe Erhärtung der Probe oder ein zu hoher Gesteinskörnungsgehalt im Verhältnis zur Bindemittelmatrix verhindern das vertikale Eindringen der Faser und sind daher zur Gewährleistung der Validität der Prüfergebnisse zu vermeiden. Zudem sollte die Rezeptur für das Einbettungsmaterial dazu geeignet sein, im Zuge der Versuche reproduzierbare Eigenschaften in Konsistenz und Körnungsstruktur herzustellen.

Um für Probengrößen von jeweils nur einem Tropfen ein reproduzierbares Ergebnis erzeugen zu können, sind die Vorversuche daher mit einem Zementleim (CEM I 42,5) mit einem Wasser-Zement-Wert von 0,45 durchgeführt worden. Nach 28 Tagen Aushärtung wiesen die Proben eine geringe Härte auf und ließen sich durch leichte manuelle Krafteinwirkung zerstören, was auf eine Sedimentation des Zementleims hindeutet. Auf Grundlage dieser Ergebnisse sind die Hauptversuche

mit einer bewährten ITA-Betonmischung durchgeführt worden. Dabei wurde der Anteil der flüssigen Komponenten (Wasser und Fließmittel) um 25 M.-% im Vergleich zur Standardmischung erhöht, um das störungsfreie Eindringen der Faser in die Betonmatrix des Prüfkörpers zu gewährleisten.

4.3. Auswahl Einbettungstiefe und des Versuchsumfang

Die Einbettungstiefe wurde auf Grundlage der durchgeführten Zugprüfungen sowie einer vorherigen Versuchsreihe mit einer Zementmatrix ausgewählt. Für die durchgeführten Versuche ist eine Einbettungstiefe von 1000 µm gewählt worden.

Trotz der aufwendigen Herstellung wurden 56 Prüfkörper hergestellt. Die durchgeführten Vorversuche deuteten im Vergleich zu den vCF eine hohe Streuung in den Ergebnissen der rCF Proben an. Daher ist zugunsten der Identifizierung möglicher Trends und Ausreißer ein erhöhter Probenumfang an rCF erstellt worden. Insgesamt sind jeweils 10 Prüfkörper mit den vCF E23 und F13 sowie jeweils 18 Prüfkörper mit den rCF Pure und Resized hergestellt worden.

4.4. Versuchsaufbau und –durchführung: Pull-Out Prüfung

Zur Evaluierung des Adhäsionsverhaltens von rCF in einer mineralischen Matrix werden im Rahmen dieser Versuche drei verschiedene Faserarten untersucht. Die Materialeigenschaften der verschiedenen CF sind in Tabelle 4. aufgeführt. Ergänzende Informationen beziehen sich auf die Angaben der jeweiligen Produktdatenblätter.

Tabelle 4: Fasereigenschaften gemäß der durchgeführten Untersuchungen

Faserart	vCF		rCF		
Produktbezeichnung	Tenax-E E23	Tenax-J/E F13	Carbo- NXT Pure	Carbo- NXT Resized	Carbo- NXT NP5 R
Hersteller	Teijin Carbon Europe GmbH		MCAM		
Zugfestigkeit in MPa	2.940	3.120	1.570	1.880	3.460
Zug-E-Modul in GPa	204	201	208	202	210
Bruchdehnung in %	1,4	1,52	0,77	0,94	1,58
Filamentdurchmesser in µm	7,11	7,03	6,96	7,32	6,92
Dichte in g/cm ³	1,774	1,783	1,816	1,767	1,782
Präparation / Beschichtung	Epoxidharz	Polyurethan	-	k.A.	k.A.
Präparationsgehalt in M.-% in Bezug zur Faser*	1,3	1,0	0	k.A.	< 5,0
* nicht am ITA gemessen					

Für die Versuchsdurchführung wurden die trockenen und flüssigen Komponenten der Betonmischung vorbereitet. Die Zusammensetzung der Betonrezeptur ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Betonrezeptur

Bestandteil	Bezeichnung	Menge in kg/m ³
Portlandzement	CEM I 42,5	490
Flugasche	HKV Safament	175
Silikastaub	Woermann	35
Quarzmehl	Quarzwerke Frechen	499
Sand	0,2 - 0,6 mm	714
Wasser		350
Fließmittel	PCE-basiert	8,75
Summe		Σ 2.272

4.5. Erstellung der Prüfkörper

Die Erstellung der Prüfkörper erfolgt mittels des Fimabonds der Firma TexTechno, Herbert Stein GmbH & Co. KG Textile Mess- und Prüftechnik, Mönchengladbach. Der Aufbau des Prüfgerätes ist in Bild 27 dargestellt.

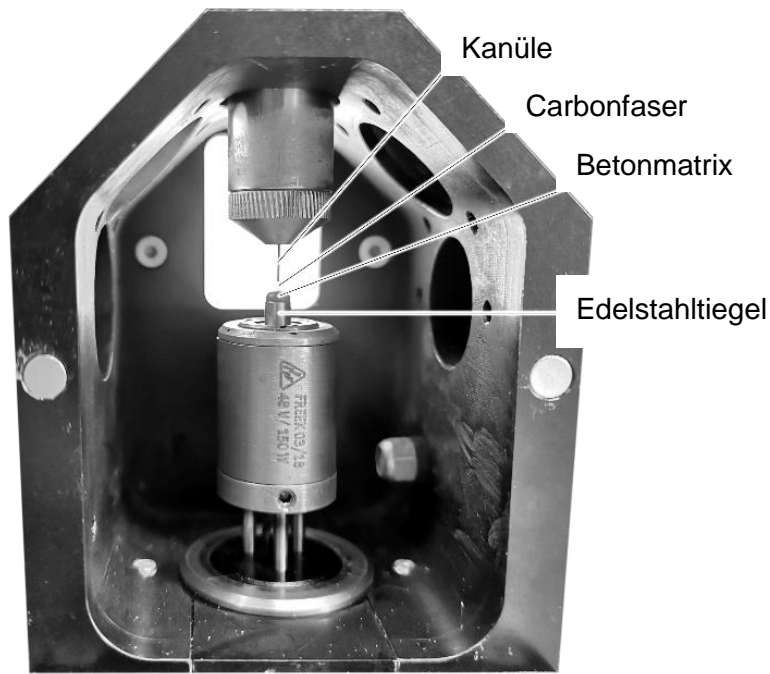


Bild 27: Herstellung der Probe im Fimabond

Zu Beginn des Versuchs wird für jeden Prüfkörper einzeln die Matrix angerührt. Anschließend wird ein Tropfen des Matrixmaterials auf den Edelstahltiegel (in Bild 27 zu sehen) gegeben.

Der Einbettungsvorgang der Probe wird halbautomatisch am Fimabond durchgeführt und ist in seinen einzelnen Schritten in Bild 28 dargestellt.

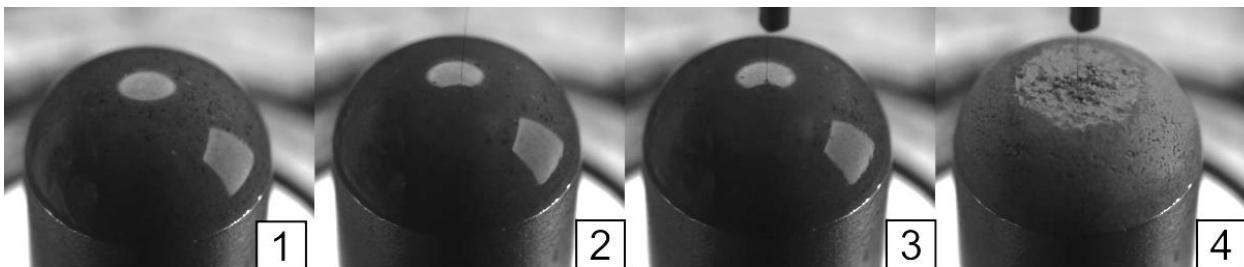


Bild 28: Einbettung der Carbonfasern in die Betonmatrix

Anschließend härten die Proben unter gleichbleibender Temperatur (20°C) und Luftfeuchtigkeit (65%) aus. Die Durchführung der Pull-out Versuche erfolgt am Favimat+. Nach der Durchführung des Versuches wird die Faser mittels eines Klebestreifens gefangen und auf einem Objektträger

befestigt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Fasern aus den Pull-out-Versuchen wird jeweils mit der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials verglichen. Die Betrachtung erfolgt unter dem Elektronenrastermikroskop (REM).

4.6. Auswertung Pull-Out Prüfung

Als relevantes Kriterium zur Bewertung des Adhäsionsverhaltens wird die scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit bewertet.

Insgesamt sind zwischen den einzelnen Versuchsreihen deutliche Unterschiede in den erreichten Festigkeiten und der Variation erkennbar. Eine Übersicht der Versuchsergebnisse ist in Form eines Boxplotdiagramms in Bild 29 dargestellt.

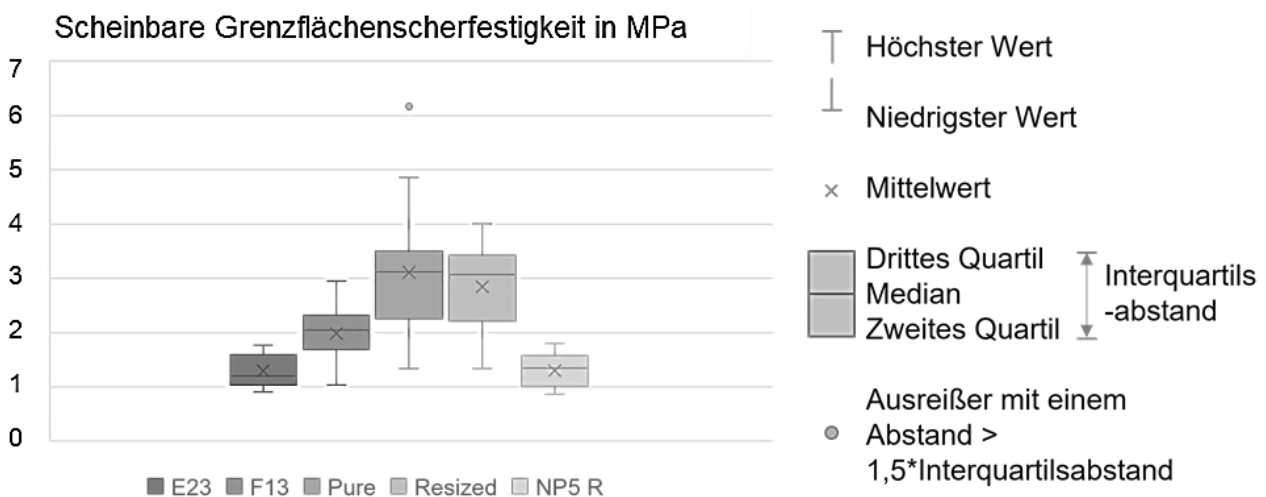


Bild 29: Darstellung der scheinbaren Grenzflächenscherfestigkeiten

Die statistische Darstellung der Ergebnisse ist vor dem Hintergrund des geringen Stichprobenumfangs zu betrachten. Während der Versuchsdurchführung sind insgesamt 4 Proben beschädigt worden, so dass diese nicht geprüft werden konnten. Der Umfang der Pull-out-Prüfung reduziert sich entsprechend auf jeweils 10 Proben der vCF (E23, F13) und jeweils 16 Proben der rCF (Pure, Resized).

Des Weiteren ist während der Erhärtung der Betonmatrix das Volumen des Probekörpers geschrumpft (vgl. Bild 28). Folglich ist die geplante Einbettungstiefe von 1000 µm nicht erreicht worden. In der Auswertung werden die Proben bei einer Unterschreitung der tatsächlichen Einbettungstiefe unter 200 µm von der Versuchsauswertung ausgeschlossen. Alle folgenden Angaben sowie die Darstellung der Ergebnisse in Bild 29 basieren auf dem bereinigten Datensatz.

Bei der Versuchsreihe E23 sind neuwertige Carbonfasern mit einer Epoxidharzbeschichtung untersucht worden. Insgesamt erreichte diese Versuchsreihe mit einer durchschnittlichen Grenzflächenscherfestigkeit von 1,29 MPa die geringsten Festigkeiten. Diese Versuchsreihe wies die geringste Streuung der Ergebnisse auf und erzielte somit homogene Ergebnisse auf insgesamt niedrigem Niveau. Bei der Versuchsreihe F13 sind vCF mit Polyurethanbeschichtung verwendet worden. Diese wiesen mit einer mittleren Grenzflächenscherfestigkeit von 1,98 MPa durchschnittlich höhere Festigkeiten auf. Rund um den Mittelwert streuten die Ergebnisse in einem Bereich von +/- 1 MPa. Die durchschnittliche scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit der rCF Pure Versuchsreihe lag mit einem Wert von 3,11 MPa rund 60 % über der durchschnittlichen Festigkeit der neuwertigen F13. Die Standardabweichung der Grenzscherfestigkeit beträgt dabei 1,27 MPa. Das heißt, bei der Faserart Pure sind stark streuende Ergebnisse festgestellt worden. Insbesondere ist in dieser Versuchsreihe ein Ausreißer nach der Regelung des 1,5-fachen Quartilsabstands erfasst worden. Dieser stellt mit einer Grenzflächenscherfestigkeit von 6,17 MPa den vorläufig höchsten Wert aller Versuchsreihen dar. Mit einem Mittelwert von 2,85 MPa ähneln die Ergebnisse der rCF Resized Versuchsreihe stark der Versuchsreihe Pure. Mit einer Standardabweichung von 0,85 MPa streuen die Ergebnisse der Reihe Resized allerdings weniger stark.

Die Anhaftung der Betonmatrix an den Fasern nach den Pulloutversuchen wird im weiteren Projektverlauf mittels REM Aufnahmen untersucht.

4.7. REM Aufnahmen

Im Anschluss an die Durchführung der Pull-out Versuche wurde die Oberflächen der Fasern unter dem REM untersucht. Dafür wurden sowohl die Fasern aus den Versuchskörpern, sowie jeweils eine Probe der jeweiligen Faserart vor Einbettung verglichen. Insgesamt werden bei den meisten Fasern flächige Reste der mineralischen Matrix festgestellt. Auf die jeweiligen Zustände der Fasern wird im Folgenden getrennt nach Faserart eingegangen.

Bei der Untersuchung der neuwertigen Fasern können feine schuppen- oder klumpenartige Verschmutzungen festgestellt werden. Bild 30 stellt die Aufnahmen der epoxidharzbeschichteten E23 Fasern dar.

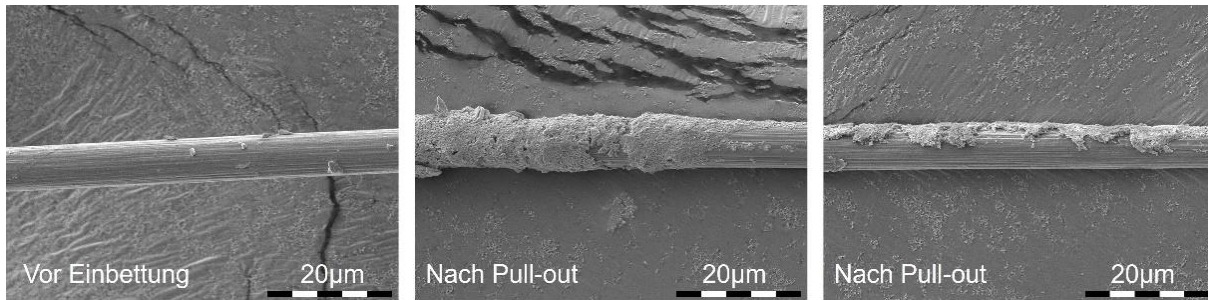


Bild 30: Oberflächenbeschaffenheit von vCF E23

Nach der Durchführung des Pull-out Versuchs ist die Faseroberfläche flächig oder stellenweise durch gebundene Betonrückstände bedeckt. Eine Quantifizierung der Grenzfläche, die zwischen Faser und Matrixmaterial versagt hat, ist auf Grundlage der Bilder nicht zu bestimmen. Die Faseroberfläche, die mutmaßlich im Beton eingebettet und nicht weiterhin durch Rückstände bedeckt ist, weist keine sichtbaren Beschädigungen auf.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Faserart Pure ähnelt vor der Versuchsdurchführung den vCF. Innerhalb der Stichprobe konnten optisch keine Fehlstellen festgestellt werden, die auf eine Beschädigung der Faserstruktur während des Recyclingprozesses hinweisen. Die Beschaffenheit der Faseroberfläche ist in Bild 31 dargestellt.

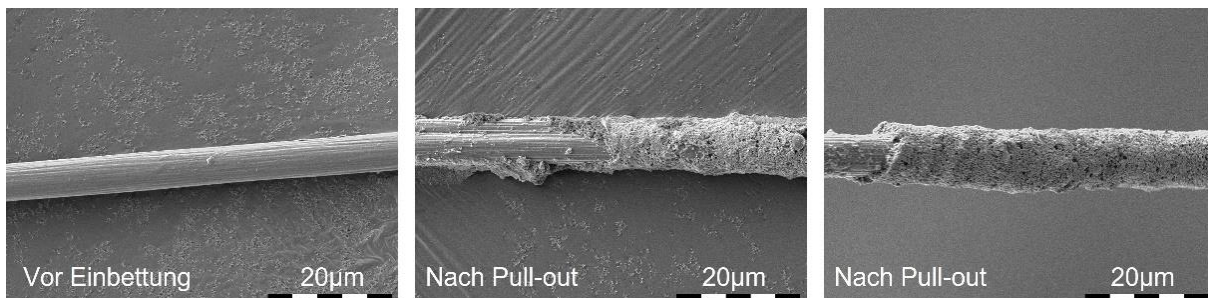


Bild 31: Oberflächenbeschaffenheit von rCF Pure

Auch nach der Durchführung des Pull-out-Tests sind Parallelen zwischen der Faserart Pure und E23 zu erkennen. Neben größeren gebundenen Betonanteilen / -schichten sind auch vermehrt einzelne Körnungsreste an der freiliegenden Faseroberfläche zu sehen. Zudem ist im Rahmen der Untersuchung eine teils unregelmäßige Querschnittsform der Faserart Pure festgestellt worden. Die axialverlaufende Vertiefung der Faser ist mutmaßlich im Rahmen des Herstellungsprozesses entstanden. Somit signalisiert diese keine Verschlechterung der Faserqualität durch das Recycling oder die Einbettung im Beton.

Die Oberflächenstruktur der rCF Resized ist vor Einbettung optisch ebenfalls mit der Struktur der vCF vergleichbar. Eine exemplarische Darstellung der Ergebnisse zeigt Bild 32.

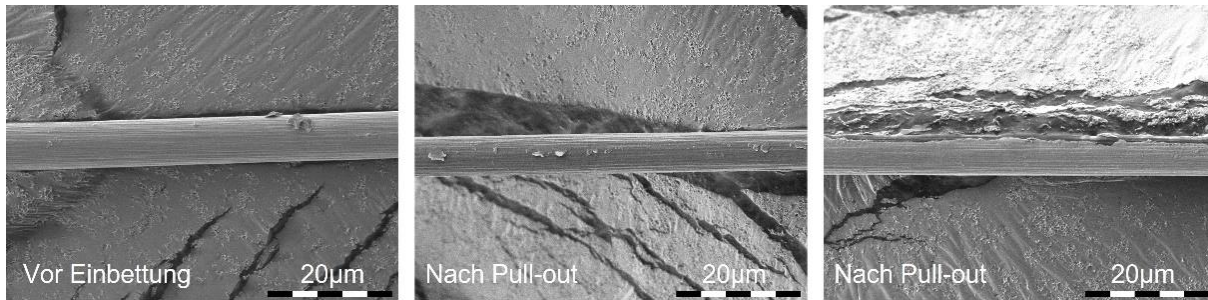


Bild 32: Oberflächenbeschaffenheit von rCF Resized

An der Oberfläche der Resized Fasern können auch nach der Durchführung des Pull-out-Tests keine Rückstände von Beton identifiziert werden. Dies könnte auf die acrylatbasierte Beschichtung der Faser zurückzuführen sein. Insgesamt sind bei der Faserart Resized auch die höchsten absoluten Festigkeiten im Pull-out Versuch gemessen worden.

Im Zustand vor der Einbettung sind bei der NP5 R Faser nur geringe Verunreinigungen der Faser festgestellt worden (s. Bild 28).

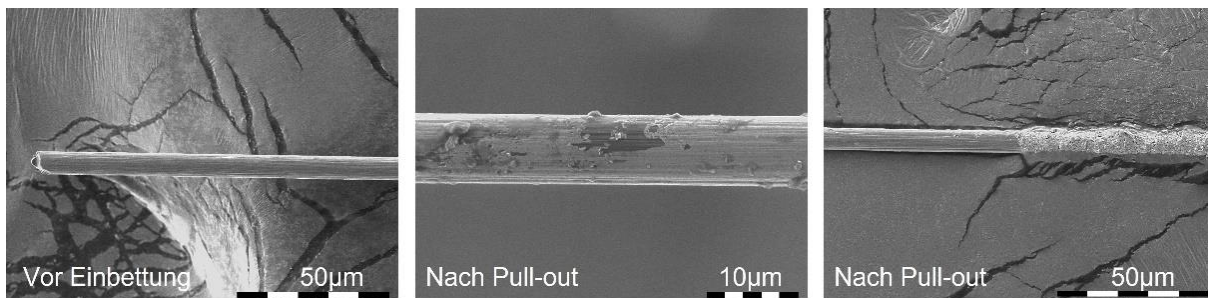


Bild 33: Oberflächenbeschaffenheit von rCF NP5 R

Nach der Durchführung des Pull-out Versuchs werden auch bei der NP5 R Faser deutliche, flächige Rückstände der Betonmatrix festgestellt. Des Weiteren ist ein abblätternder Film auf der Faser vorhanden, bei dem es sich nach interner Abschätzung um abgängige Schlichte der Faser und nicht um mineralische Rückstände aus dem Pull-out Versuch handelt.

Insgesamt konnten aus der Mikroskopie der Fasern folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Oberflächenbeschaffenheit der rCF ähnelt der Beschaffenheit der neuwertigen Fasern. Entsprechend wird die Faseroberfläche durch den Recyclingprozess offenbar nicht tiefgreifend beschädigt.
- Im Format der Pull-out Versuche tritt das Versagen des Haftverbundes (hauptsächlich) nicht an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix, sondern in der Matrix auf. Entsprechend ist der mutmaßliche Haftverbund sowohl bei neuwertigen, wie auch bei rCF an der Grenzfläche höher als der Haftverbund in der Matrix.

Obwohl mutmaßlich alle Faserarten eher in der Matrix versagten, treten Unterschiede in der Höhe und Variation der Ergebnisse der Grenzflächenscherfestigkeit auf.

Zusammenfassend lässt sich zu den Pull-Out Prüfungen folgendes feststellen:

Die erhöhte Adhäsion von pyrolysiertem rCF kann auf der Grundlage chemischer oder physikalischer Einflussfaktoren erklärt werden. Die physikalische Adhäsion kann in Form einer Aufrauung der Oberfläche durch den Pyrolyseprozess erfolgen. Dies würde eine Verzahnung zwischen der Faser und dem Beton bewirken und somit den Widerstand gegen das Ausreißen der Faser erhöhen.

Die mangelnde Haftung der EP-vCF-Proben könnte auf die mikroglatte Oberfläche der beschichteten Fasern und die geringe Reaktivität der Schlichte auf Epoxidbasis mit dem Beton zurückzuführen sein. Dies verschlechtert zwar die Verbindung zwischen Faser und Matrixmaterial, kann aber im Zusammenhang mit dem Recycling nützlich sein. Das Verbundverhalten war genauso gut wie bei den reinen rCF, aber im Hinblick auf das Recycling könnten sie bessere Trennungsergebnisse zeigen.

Insgesamt erreichen die pyrolysierten Fasern die höchsten absoluten und mittleren Scherfestigkeiten. Im Vergleich zu den vCF konnte eine Erhöhung der scheinbaren Grenzflächenscherfestigkeit um 150-250 % festgestellt werden. Dieser Erkenntnis steht jedoch die größte Streuung der absoluten Ergebnisse gegenüber. Die Schlichte scheint einen positiven Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Prüfergebnisse zu haben, da die Fasern mit einer Schlichte eine gleichmäßige scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit ohne Ausreißer aufweisen.

Die Verteilung der Fasern hat einen Einfluss auf die Festigkeitsergebnisse. Kommt es zu Faseragglomeration, sorgt die schwächere Faser-Faser-Bindung dafür, dass die Fasern herausgezogen werden und somit nicht direkt an der Bruchkante brechen. Sind die Fasern vereinzelt verteilt, ist die Faser-Matrix-Bindung im Verbundbauteil so stark, dass die Fasern auch an der Bruchkante brechen.

Es zeigte sich, dass die Art der Schlichte, aber auch die daraus resultierende Faser-Faser-Haftung einen Einfluss auf die Testergebnisse haben - werden die Faseroberfläche nach der Pyrolyse bearbeitet, haften sie weniger zusammen als Neufasern, die bei der Faserherstellung einen Schlichteauftrag erhalten und dann in kurze Fasern geschnitten werden.

Teile der Projektergebnisse wurden im Rahmen eines Journalpapers veröffentlicht.

4.8. Prüfung der Faserlängenverteilung

Zur Vermessung der rCF wurde das Gerät FibreShape der Firma IST AG, Vilters, Schweiz, verwendet, das im Rahmen des Projekts angeschafft worden ist. Mit diesem Prüfgerät können Fasern hinsichtlich ihrer charakteristischen Eigenschaften und ihrer Längenverteilung untersucht werden. Der genaue Aufbau ist in Bild 34 dargestellt. Zur Analyse der Scans wird die Software *FibreShape 6.2* verwendet, welche ebenfalls von der Firma IST AG entwickelt wurde.



Bild 34: Prüfaufbau Faserlängenmessung fibreshape

Die Faserlängenverteilung der rCF wurden an den rCF Arten Pure, Resized und NP5R geprüft. Hierfür wurden je rCF Art drei Proben genommen. Anschließend werden von jeder dieser Proben nacheinander acht verschiedene Ausschnitte gescannt, wobei auch die Größe des Scan-Ausschnitts variiert wird. Dadurch soll eine höhere Diversität der gescannten Bereiche erreicht werden. Durch dieses Vorgehen werden in Summe 72 Scans durchgeführt. Die jeweiligen acht Scans werden zunächst einzeln ausgewertet. Nach der Auswertung werden die Werte gemittelt und so repräsentative Werte für jede Probe ermittelt. So können die einzelnen Proben jeder Faserart anhand dieser Werte ausgewertet und verglichen werden. Im Rahmen der Auswertung wird auch die Möglichkeit der Knickwinkeländerung betrachtet. Dabei wird der erlaubte Knickwinkel von $\alpha = 8^\circ$, auf 4° , 20° und 40° geändert, um den Einfluss dessen auf die Längenverteilung zu untersuchen.

FibreShape ist eine Formbildverarbeitungssoftware für die quantitative Form- und Größencharakterisierung von großen und kleinen Fasern. Es wird eine statische Bildverarbeitungsanalyse verwendet, um die erfassten Formbilder und Fasergrößen sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand

zu messen und zu charakterisieren. Gleichzeitig wird die statistische Auswertung der Messergebnisse nach verschiedenen Verfahren gemäß ISO 9276 ermöglicht. Da es sich bei den hier betrachteten Fasern um verschiedene rCF handelt, deren Länge für die weiteren Nutzungsmöglichkeiten entscheidend ist, liegt das Hauptaugenmerk bei der Auswertung auf der Längenverteilung.

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der Analyse der unterschiedlichen rCF eingegangen, bevor der Einfluss einer Änderung des Knickwinkels dargestellt wird.

4.8.1. Pure

In Tabelle 6 werden die Statistiken der drei Proben der rCF Pure dargestellt, die sich jeweils als Mittelwert aus den Werten der acht Scans ergeben.

Tabelle 6: Statistik der rCF Pure

Probe	Gezählte Fasern	Bildflächenanteil	Längenmittelwert	Standardabweichung
	n	%	mm	mm
1	5.769	8,97	22,52	15,62
2	7.720	9,29	20,53	15,08
3	4.473	7,40	23,02	12,84

Der durchschnittliche, gerundete Längenmittelwert der Probe 1 liegt bei 23 mm, der Probe 2 bei 21 mm und der Probe 3 bei 23 mm. Somit unterscheiden sich die einzelnen Proben hinsichtlich der durchschnittlichen Länge um höchstens etwa 2 mm, obwohl in der Anzahl der gezählten Fasern in allen Proben eine maximale Differenz von ca. 3.300 Fasern vorliegt. Die längste Faser weist eine Länge von 86 mm auf. Die Standardabweichung ist in den Proben 1 und 2 mit ca. 15 mm etwas höher als bei Probe 3 mit ungefähr 13 mm.

Um die Längenverteilung der rCF Pure näher untersuchen zu können, wird nachfolgend beispielhaft das Histogramm der Probe 2 dargestellt. Dabei werden die relative Häufigkeit und die kumulierte Wahrscheinlichkeit abgebildet.

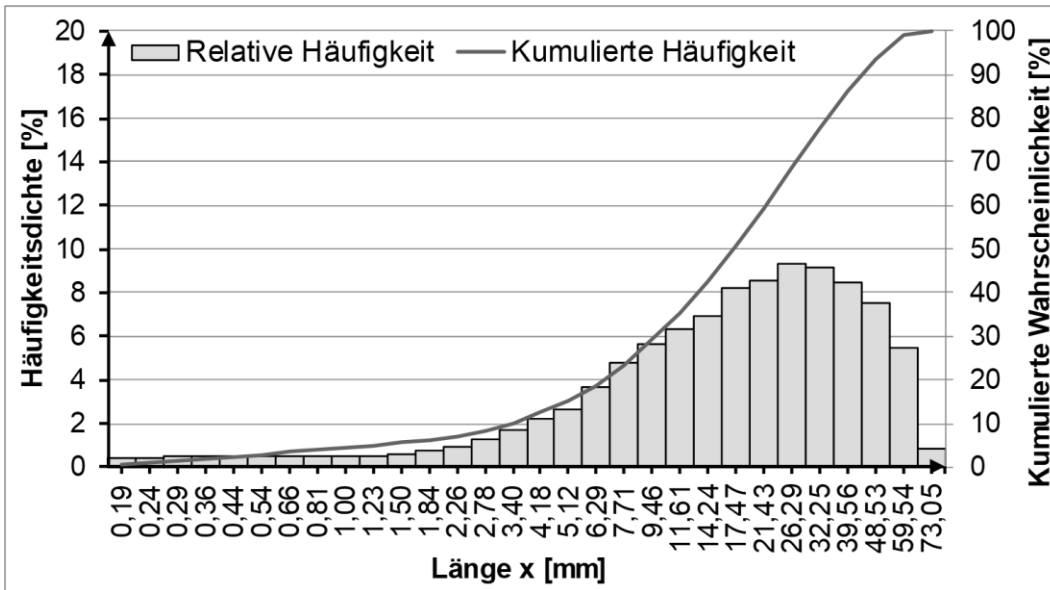


Bild 35: Histogramm rCF Pure - Probe 2

Es zeigt sich, dass am häufigsten Fasern mit einer Länge von 26 mm bis 32 mm vorliegen. Diese Länge macht 20 % aller gemessenen Fasern aus. Ähnlich wie bei Probe 1 sind 10 % der Fasern kürzer als 3,3 mm.

4.8.2. NP5R

In Tabelle 7 werden die Statistiken der drei Proben der rCF NP5R dargestellt, die sich auch hier jeweils aus den Mittelwerten der acht Scans ergeben.

Tabelle 7: Statistik der einzelnen Proben von rCF NP5 R

Probe	Gezählte Fasern	Bildflächenanteil	Längenmittelwert	Standardabweichung
	n	%	mm	mm
1	10.536	9,07	8,72	4,36
2	11.681	9,54	8,12	4,32
3	10.634	8,95	8,20	4,22

Die Fasern in allen drei Proben weisen einen durchschnittlichen Längenmittelwert von etwa 8 mm bis 9 mm auf und auch die durchschnittliche Anzahl der gezählten Fasern liegt in den Proben 1 bis 3 zwischen ca. 10.500 und 11.700. Die längste Faser ist ungefähr 32 mm lang (Probe 1, Scan 1). Die Standardabweichung beträgt bei allen drei Proben ca. 4,2 mm bis 4,4 mm. In Bild 36 wird das Histogramm der Probe 2 der rCF NP5 R dargestellt.

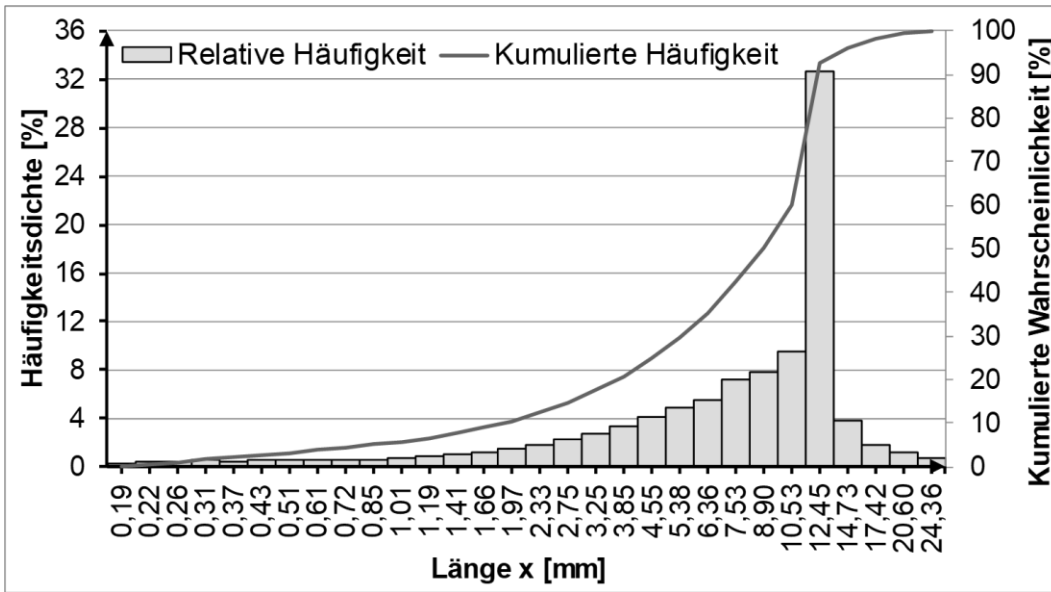


Bild 36: Histogramm rCF NP5 R - Probe 2

Bei der Probe 2 sind 32 % der Fasern 12 mm lang, dies ist vergleichbar zu den anderen Proben. Des Weiteren sind nur 16 % der Fasern kürzer als 2 mm oder länger als 17 mm.

4.8.3. Resized

Die Statistiken der drei Proben der rCF Resized, die sich auch hier jeweils aus den Mittelwerten der acht Scans ergeben, sind in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Statistiken der einzelnen Proben von rCF Resized

Probe	Gezählte Fasern	Bildflächenanteil	Längenmittelwert	Standardabweichung
	n	%	mm	mm
1	7.311	10,78	19,00	12,67
2	9.195	10,81	15,92	10,20
3	10.942	9,61	13,78	10,67

Probe 1 weist einen durchschnittlichen Längenmittelwert von 19 mm, Probe 2 von ca. 16 mm und Probe 3 von ca. 14 mm auf. Somit existieren deutliche Unterschiede in der durchschnittlichen Länge der Fasern in den einzelnen Proben. Auch unterscheiden sich die drei Proben hinsichtlich der Anzahl der gezählten Fasern, wobei die maximale Differenz ungefähr 3.600 beträgt. Die längste Faser hat eine Länge von etwa 78 mm (Probe 1, Scan 7). Die Standardabweichung liegt bei allen Proben in einem konstanten Bereich und nimmt im Verhältnis zum Mittelwert einen hohen Wert an. Bei den

Proben 1 und 2 beträgt der durchschnittliche Bildflächenanteil leicht über 10 %, Probe 3 weist weiterhin den anvisierten Bildflächenanteil < 10 % auf. Die Längenverteilung der rCF Resized der Probe 1 wird in Bild 37 dargestellt.

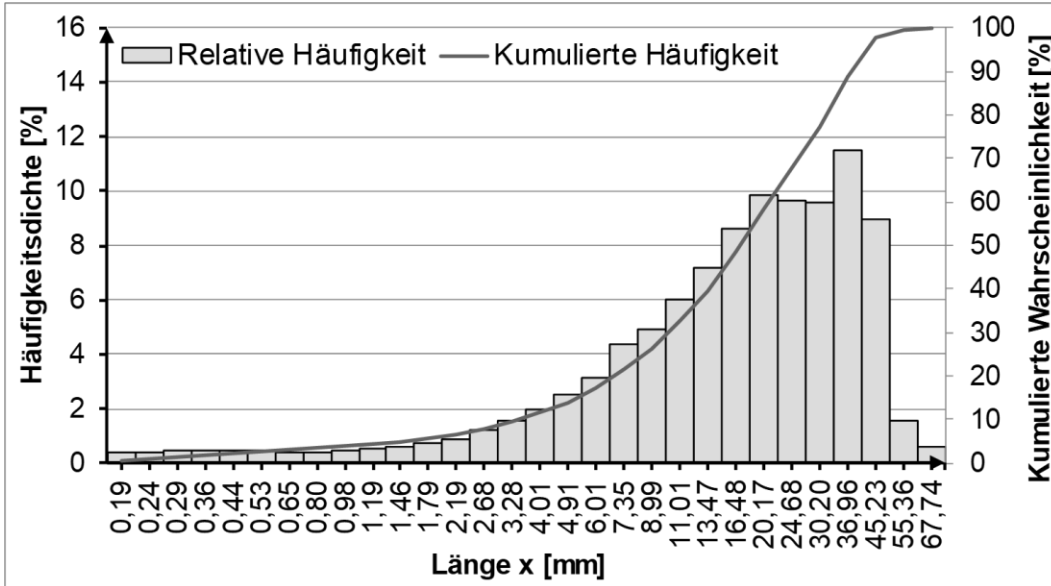


Bild 37: Histogramm rCF Resized - Probe 1

Es ist ersichtlich, dass 50 % der Fasern eine Länge von 20 mm und 45 mm aufweisen. Darüber hinaus sind nur 12 % der Fasern kleiner als 3 mm und größer als 55 mm.

4.9. Einfluss des Knickwinkels

Mit dem erlaubten Knickwinkel wird der Grad der Faserkrümmung festgelegt, oberhalb dessen eine Faser als separate Faser gezählt wird. Dies wird schematisch in Bild 38 verdeutlicht.

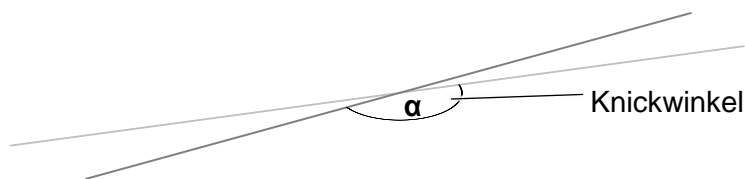


Bild 38: Schematisch Darstellung des Knickwinkels

Um mögliche Veränderungen der Längenverteilung bei einer Knickwinkeländerung untersuchen zu können, wird der Knickwinkel zunächst auf $\alpha = 4^\circ$ verringert und im Anschluss auf $\alpha = 20^\circ$ bzw. $\alpha = 40^\circ$ erhöht. Dafür werden aus jeder der drei Proben jeder rCF Art zwei Scans ausgewählt. So soll festgestellt werden, ob die Auswertung durch die Software *FibreShape* valide ist.

Es wird deutlich, dass sowohl eine Verringerung als auch eine Erhöhung des Knickwinkels einen Einfluss auf die Längenverteilung, den Längenmittelwert, die Anzahl der gezählten Fasern und die

Standardabweichung aller drei Faserarten hat. Wird der Knickwinkel erhöht, sinkt die Anzahl der gezählten Fasern und der Längenmittelwert und die Standardabweichung steigt. Wenn der Knickwinkel verringert wird, kehrt sich der Einfluss um. Des Weiteren ändert sich auch die Längenverteilung der Fasern, bei einer Erhöhung des Knickwinkels misst die Software längere Fasern und bei einer Verringerung kürzere. Grund dafür ist, dass sich kreuzende Fasern, abhängig von dem eingestellten Knickwinkel, einmal als eine lange Faser und einmal als zwei kurze Fasern einbezogen werden. Auch kann es bei einer Kreuzung vorkommen, dass die dahinter- bzw. davorliegende Faser nicht als solche erkannt und folglich nicht gezählt und gemessen wird.

Die verschiedenen Auswirkungen der Knickwinkeländerungen werden exemplarisch anhand der rCF NP5 R Faser in Bild 39 und Bild 40 dargestellt. Diese Veränderungen treten bei allen untersuchten Scans auf, auch bei den rCF Pure und rCF Resized.

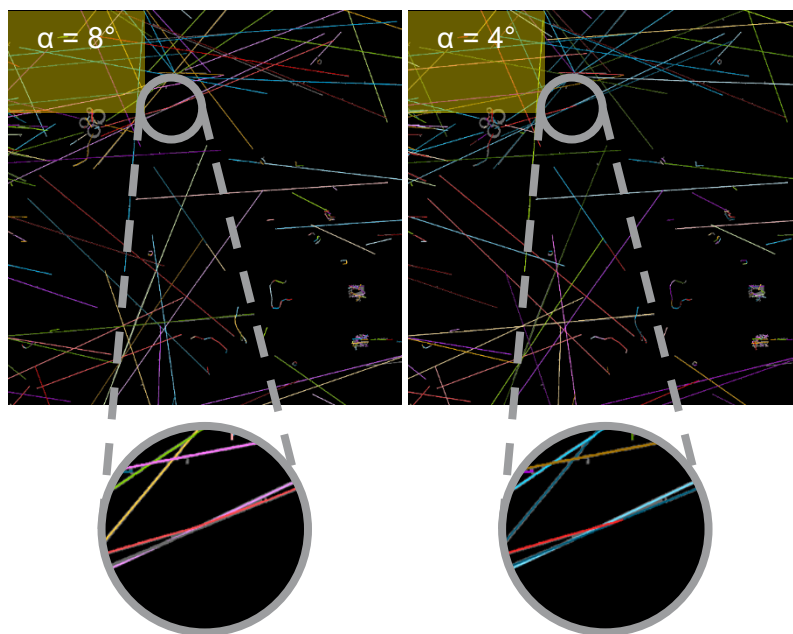


Bild 39: Einfluss der Knickwinkelverringern auf $\alpha = 4^\circ$, exemplarisch an rCF NP5 R

Der vergrößerte Bereich zeigt bei $\alpha = 8^\circ$ zwei Fasern, wobei die rot gefärbte leicht gekrümmt ist. Wenn der erlaubte Knickwinkel auf $\alpha = 4^\circ$ verringert wird, liegt der Winkel der gekrümmten Faser oberhalb dieses Wertes, sodass diese Faser als zwei Fasern erkannt wird (rot und dunkelblau). Dadurch erhöht sich die Anzahl der gezählten Fasern, da mehr kürzere Fasern gezählt werden.

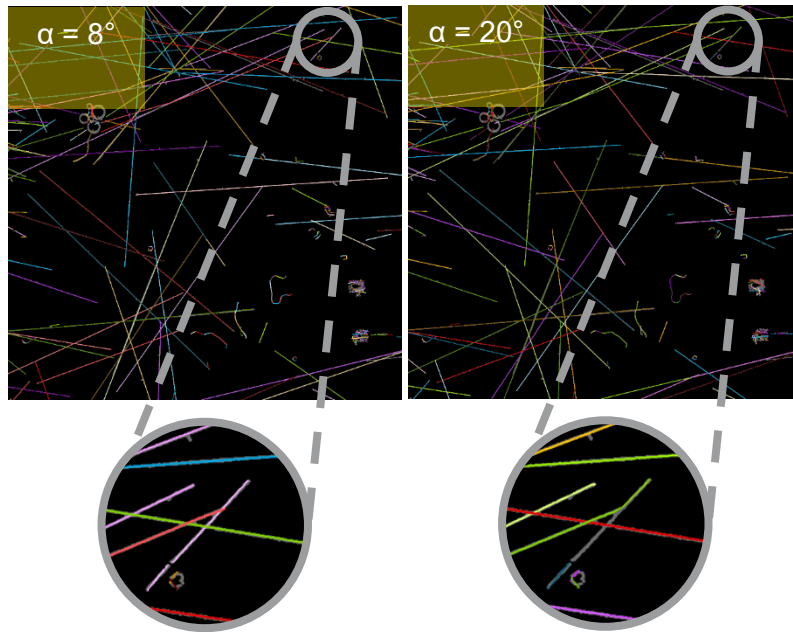


Bild 40: Einfluss der Knickwinkelerhöhung auf $\alpha = 20^\circ$, exemplarisch an rCF NP5 R

In Bild 40 wird die Knickwinkelerhöhung auf $\alpha = 20^\circ$ veranschaulicht. Wird der vergrößerte Bereich bei $\alpha = 8^\circ$ betrachtet, ist erkennbar, dass sich die orange und die rosafarbene Faser zwar berühren, jedoch als zwei Fasern erkannt werden. Bei der Erhöhung des erlaubten Knickwinkels auf $\alpha = 20^\circ$, wird der Berührungspunkt der beiden Fasern als Krümmung der zuvor orangen Faser erfasst und infolgedessen wird der weitere Verlauf der zuvor rosafarbenen Faser nicht mehr gezählt. Die nun gemessene grüne Faser ist somit länger.

Zusammenfassend hat der eingestellte Knickwinkel einen signifikanten Einfluss auf die Faserlängenverteilung. Im Vergleich zu den realen Proben und den Faserverläufen, wird ein Knickwinkel von $\alpha = 8^\circ$ als der realistischste angesehen.

5. AP 2.2 Verwertung der Beton-/Faserfraktion in Beton (ibac)

In AP 2.2. wird untersucht, inwiefern und unter welchen Bedingungen die Mischfraktion aus Betonbruch und Fasern wieder in Beton, vorzugsweise Faserbeton, eingesetzt werden kann. Mörtelversuche zeigen eine vielversprechende Verarbeitbarkeit der RC-GK_C. Auch im Betonmaßstab ist ein Rezyklateinsatz von bis zu 100 % möglich. Dabei kann sowohl der Carbonbetonbruch als auch der Glasfaserbetonbruch gleichermaßen eingesetzt werden. Hierbei kann nun die Möglichkeit einer statischen Nutzbarkeit der aufgearbeiteten recycelten Carbonfasern und der im Brechsand vorhandenen Glasfaserbruchstücke weiter untersucht und optimiert werden.



Bild 41: RC-GK_C und mit dieser hergestellte Normprismen

Das Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University hat sich insbesondere mit der Verwertung aller Rezyklatbestandteile und der gesundheitlichen Unbedenklichkeit möglicher Faseremissionen auseinandergesetzt. Hierbei wurden Unbedenklichkeitsprüfungen sowohl mit dem Betonbruch als auch mit den aufgearbeiteten Fasern durchgeführt und in Anlehnung an Faserzulassungen des DIBt die Wirksamkeit und Unschädlichkeit geprüft.

5.1. Untersuchung der Wirksamkeit von rezyklierten Fasern im Mörtelmaßstab

Um die Wirksamkeit der rezyklierten Fasern zu überprüfen, wurden in ersten Untersuchungen Normprismen mit 1 Vol.-% Fasern hergestellt. Hierzu wurden drei verschiedene Mischungen verwendet, deren Zusammensetzung in Tabelle 9 angegeben ist.

Tabelle 9: Zusammensetzung Mörtelmischungen in Anlehnung an [1]

Parameter	Einheit	Referenzmischung	Kurzfaser	Stapelfaser
CEM I 42,5 R	g	450		
Wasser		225		
Gesteinskörnung		1.350		
Fasern		-	9,5	13
	Vol.-%	-	0,5	1
w/z-Wert		0,5		
Sieblinie der Gesteinskörnung	-	Normsand nach [1]		

Bei der Referenzmischung handelt es sich um eine Mischung ohne Fasern. Die beiden Rezepturen mit Fasern enthalten Kurzfasern aus aufgearbeiteten Carbonfasern aus der Pyrolyse und bzw. Stapelfasern, die Recycling-Carbongelege entnommen wurden (s. Bild 42 links). Die Probekörper wurden in einem Mörtelmischer in Anlehnung an DIN EN 196-1 [1] hergestellt. Nach der Herstellung wurden die Prismen bis zum 7. Tag unter Wasser und anschließend bis zu einem Prüfalter von 28 d bei Normklima (20 °C / 65 % rF) gelagert.

Die Biegezugfestigkeit wurde an Prismen der Abmessungen L/B/H = 160/40/40 mm³ in Anlehnung an DIN EN 12372 [3] im Drei-Punkt-Biegezugversuch ermittelt. Hierbei handelt es sich um einen kleinskalierten Prüfaufbau (s. Bild 42 rechts), der für Normprismen verwendet werden kann. Der Auflagerabstand betrug 100 mm. Die Belastung wurde verformungsgesteuert, gemessen über zwei induktive Wegaufnehmer, in zwei Stufen aufgebracht. Die Wegaufnehmer wurden in Feldmitte angeordnet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,08 mm/min bis zu einer Durchbiegung von 1,0 mm. Anschließend wurde die Prüfgeschwindigkeit auf 0,21 mm/min erhöht. Der Versuch wurde bis zu einer Durchbiegung von 1,7 mm durchgeführt. Die Biegezugfestigkeit wurde für alle Probekörper mit einer mittleren Querschnittsfläche von 40 mm x 40 mm berechnet. Die residuellen Biegezugfestigkeiten der einzelnen Proben sind in Bild 43 dargestellt.

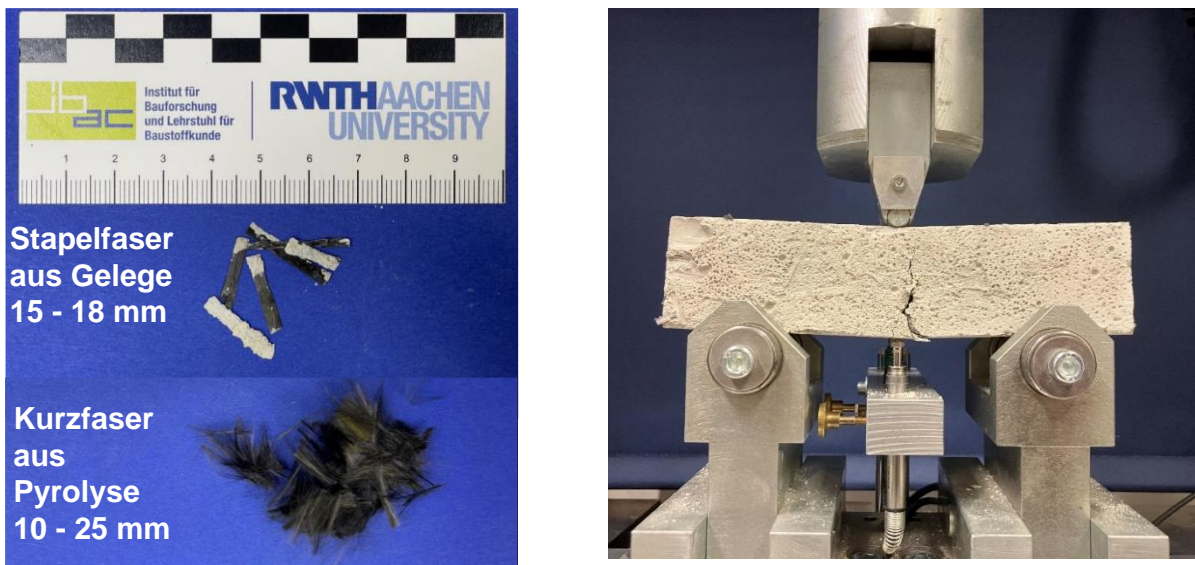


Bild 42: links: Übersicht der eingesetzten Fasern, rechts: Einbau eines Prüfkörpers in der Prüfmaschine: Lastzustand II

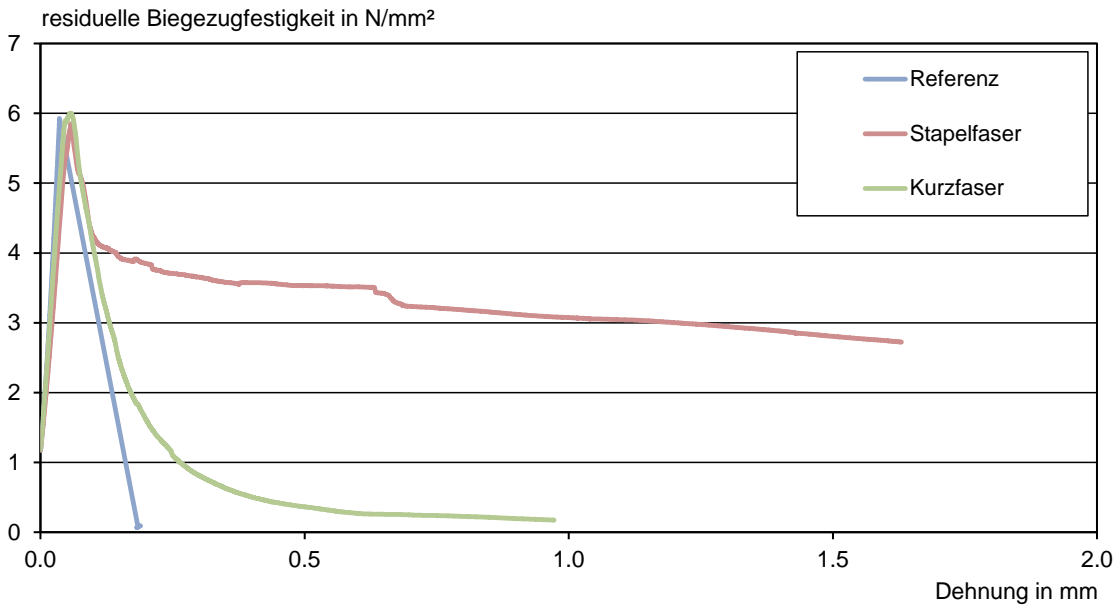


Bild 43: Spannungs-Rissöffnungskurven der einzelnen Prismen

Bei den verwendeten Stapelfasern ist ein deutliches Restzugverhalten nach der Erstrisslast zu erkennen. Dies deutet auf eine statische Wirksamkeit der Fasern hin. Dies wurde durch Balkenprüfungen im Betonmaßstab (Zusammensetzung siehe Tabelle 10), Aufbau siehe Bild 44, validiert.

Tabelle 10: Betonzusammensetzung Faserprüfung in Anlehnung an die Zulassungsgrundsätze der Faserzulassung des DIBts

Parameter	Einheit	IA_0.4	IA_0.7
CEM I 32,5 R	kg/m ³	300	300
Wasser		180	180
Gesteinskörnung		1.837	1.829
Stapelfasern Carbon		8,85	14,62
	Vol.-%	0,4	0,7
Luftgehalt (angenommen)		2,00	2,00
w/z-Wert	-	0,6	0,6
Sieblinie der Gesteinskörnung		A/B 16	A/B 16

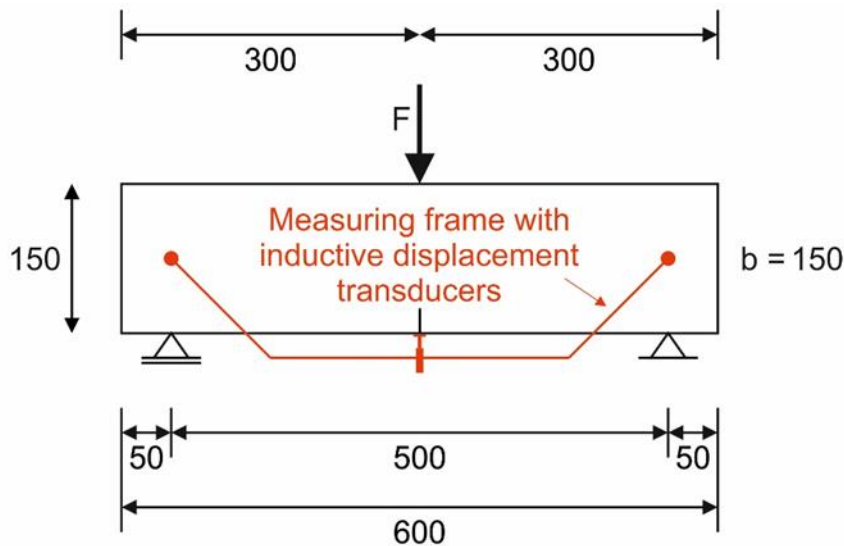


Bild 44: Aufbau 3-Punkt-Biegezugversuch

In Bild 45 sind Ergebnisse der 3-Punkt-Biegezugprüfung mit einer Dosierung von 0,4 Vol.-% und 0,7 Vol.-% Carbonstapelfasern dargestellt. Hierbei konnte ein deutliches Restzugverhalten nach Erstriss gemessen werden. Der Versagensfall war in diesem Falle ein Faserauszug. Generell ist somit eine statische Nutzbarkeit von Carbonstapelfasern darstellbar, hierbei sollten für einen wirksamen Einsatz die Länge und die sehr glatte Oberfläche optimiert werden um die Verbundleistung zu maximieren. Die eingesetzten Kurzfasern weisen keine statische Wirksamkeit auf.

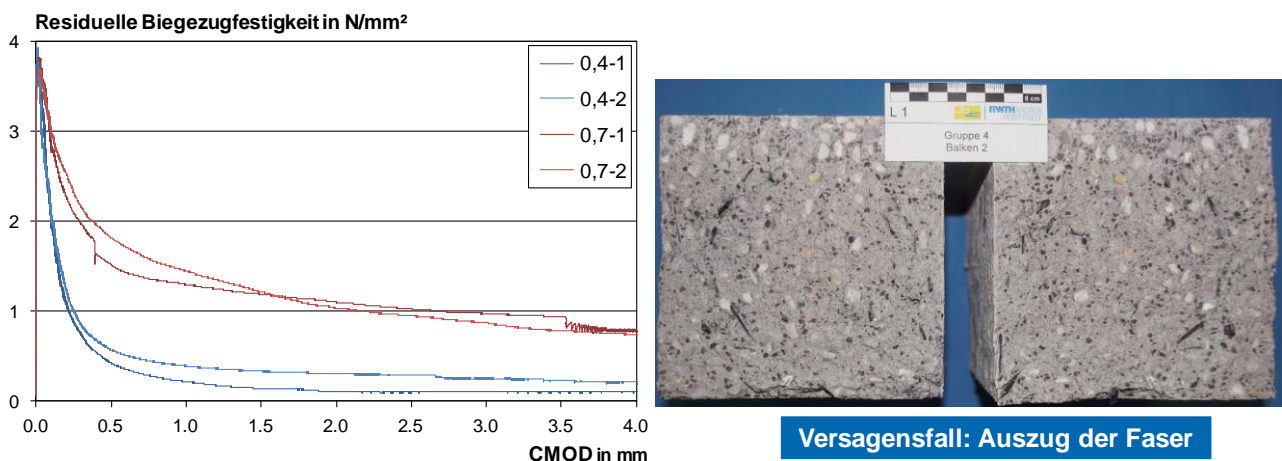


Bild 45: Hochskalierung auf Balken - Faserform "oval"

5.2. Schrumpfrissreduzierung im Betonmaßstab

Mit dem Einsatz von Kurzfasern in Beton können verschiedene Ziele verfolgt werden. Neben der Erhöhung der Zug- und Biegezugfestigkeit (statische Wirksamkeit) kann auch eine Verminderung der Schrumpfrissbildung angestrebt werden. Daher wurde auch der Nachweis der Wirksamkeit in Bezug auf Schrumpfrissbildung durchgeführt. Für diesen Nachweis sind Untersuchungen an den

Betonen IIA_0.03 und IIA_0,04 durchgeführt worden. Die eingesetzten Fasermengen des Betons IIA lagen bei 0,03 und 0,04 Vol.%. Die vollständigen Betonzusammensetzungen sind Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Mischungszusammensetzungen der verwendeten Betone für die Versuche zur Verminderung der Schrumpfrissneigung

Parameter	Einheit	IIA_0.03	IIA_0.04
CEM I 32,5 R	kg/m ³	360	360
Wasser		270	270
Gesteinskörnung		1.176	1.175
Kalksteinmehl		373	373
Pyrolysierte Carbonfasern lose		0,57	0,76
Luftgehalt (angenommen)	Vol.-%	0,03	0,04
w/z-Wert	-	3,00	3,00
Sieblinie der Gesteinskörnung		B8	B8

Die Schrumpfrissbildung wurde an jeweils einer Platte mit den Abmessungen 1600 x 600 mm² und einer Dicke von 80 mm im Prüflabor bei einer Temperatur von 20 °C untersucht (siehe Bild 46). Durch einen Stahlrahmen mit umseitig angebrachter Bewehrung wurde mit den Probekörpern das Verhalten einer großflächigen Platte simuliert. Nach dem Befüllen der Schalung wurde die Platte mit einem Windkanal, in dem eine Windgeschwindigkeit von ca. 5 m/s über einen Zeitraum von 7 Stunden erzeugt wurde, abgedeckt. Zur Auswertung wurden die Rissanzahl, Risslänge und Rissbreite dokumentiert. Die aufsummierte Rissöffnungsfläche wurde berechnet, indem die Flächen aller Rissabschnitte summiert wurden. Diese ergeben sich aus dem Produkt der jeweiligen Rissabschnittsbreite und -länge. Die Verdunstung wurde an je einer Platte mit den Abmessungen 300 x 300 x 80 mm³, die im gleichen Windkanal gelagert wurde, über einen Zeitraum von 7 Stunden durch wiegen bestimmt.

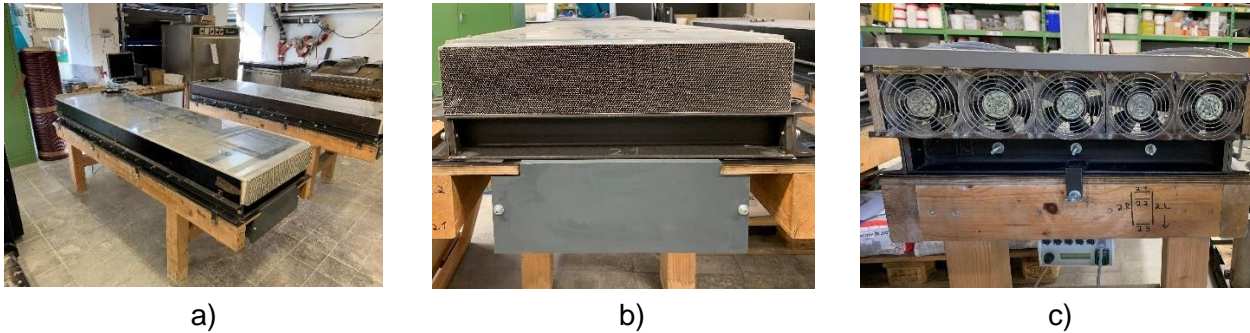


Bild 46: Windkanal a) experimenteller Aufbau, b) Strömungsrichter, c) Antriebsventilatoren

Die gemessenen Windgeschwindigkeiten während der Versuche waren im Mittel 5,09 m/s bei Beton IIA_0,03 und 5,10 m/s bei Beton IIA_0,04. Die Ergebnisse der Auswertung der Versuche zur Schrumpfrissbildung sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Ergebnisse Windkanal: Rissauswertung

Beton	Anzahl der Risse	summierte Risslänge	maximale Rissbreite	mittlere Rissbreite	Rissöffnungsfläche
	-	mm			mm ²
IIB	12	2.757	1,40	0,45	1.232,5
IIA_0,03	2	1.663	0,70	0,43	721,3
IIA_0,04	2	220	0,20	0,13	27,5
IIA_0,05	0	0	0	0	0
IIA_0,1	0	0	0	0	0
IIA_0,2	0	0	0	0	0

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Verdunstungsmessungen im Windkanal dargestellt. Graphische Darstellungen der Windgeschwindigkeiten im Windkanal während der Versuchsdurchführung sind in Bild 47 zu finden. Die Verdunstungsmengen der Betone sind Bild 48 dargestellt, die Rissbilder der untersuchten Betone in Bild 49.

Tabelle 13: Ergebnisse der Verdunstungsmessungen

Versuchsdauer	Beton IIA_0,03		Beton IIA_0,04	
	Wasserabgabe			
	stündlich	summiert	stündlich	summiert
h	M.-%			
1	0,361	0,361	0,276	0,276
2	0,190	0,551	0,166	0,442

3	0,209	0,760	0,203	0,645
4	0,171	0,931	0,184	0,829
5	0,190	1,121	0,203	1,032
6	0,171	1,292	0,184	1,216
7	0,179	1,470	0,184	1,401

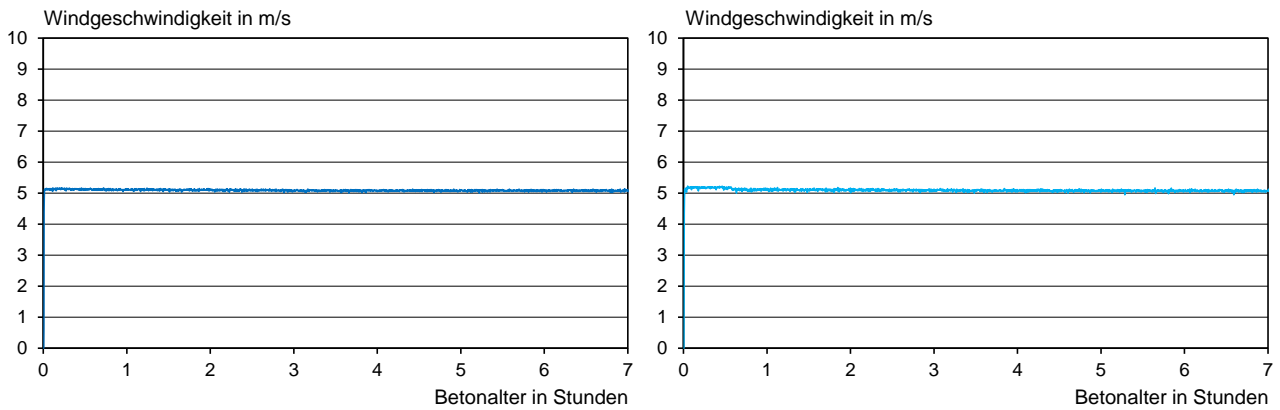


Bild 47: Windgeschwindigkeitsverlauf während der Windkanalprüfung des Betons IIA_0,03 und des Betons IIA_0,04

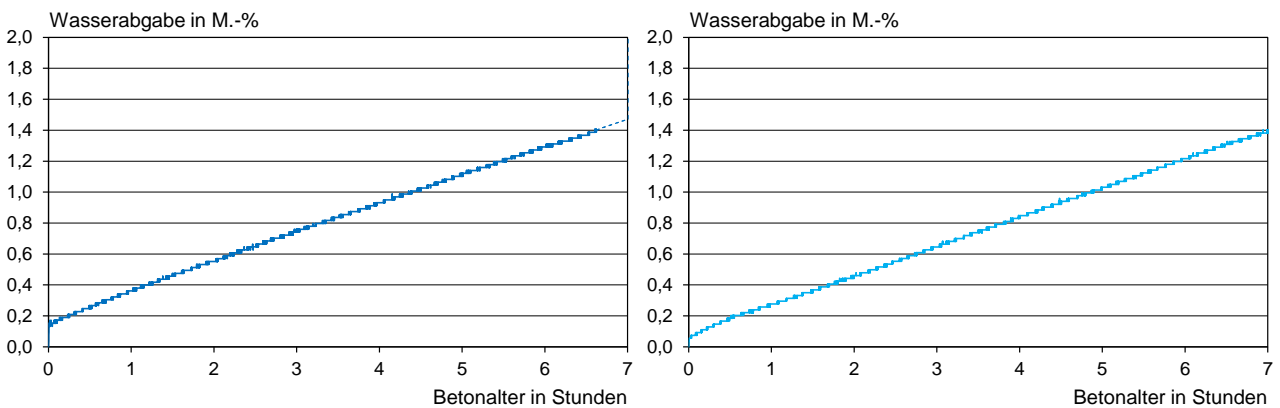


Bild 48: Wasserabgabe durch Verdunstung des Betons IIA_0,03 und des Betons IIA_0,04

In der Risskartierung und auch bei der Rissöffnungsfläche ist eine deutliche Reduzierung der Schrumpfrissbildung zu erkennen. Ab einer Dosierung von 0,05 Vol.-% Fasern ist keine Rissbildung festzustellen. Die Verarbeitbarkeit ist bis zu einer Dosierung von 0,4 Vol.-% gegeben, wobei eine empfohlene Dosierung bei 0,075-0,15 Vol.-% Fasern liegt.



Bild 49: Ergebnisse Windkanal - Risskartierung

5.3. Zusammenfassung

Die pyrolysierten Carbonkurzfasern eignen sich somit für den Einsatz im Beton zur Reduzierung von Schrumpfrissen. Die empfohlene Dosierung liegt bei 0,075 - 0,15 Vol.-% Fasern. Die recycelten Gelegestücke (Stapelfasern) können statisch wirksam eingesetzt werden. Die empfohlene Dosierung liegt bei 0,8 - 0,99 Vol.-% Fasern. Die Dosierung kann durch den Einsatz von geeigneten Geometrien (flacher und ovaler Querschnitt statt rund) und durch eine Oberflächenveränderung (nachträgliche Besandung) minimiert werden. Auf diese Weise könnte die hohe Zugfestigkeit des Carbons besser ausgenutzt werden. Die Gesteinkörnungsfractionen, sowohl der sortenreine Bruch als auch der Mischbruch, können uneingeschränkt mit einer Ersatzrate von bis zu 100 % für die Herstellung von Neubeton verwendet werden.

6. AP 2.3 – Verwertung der Beton-Feinfraktion in Zement (Holcim)

Im Arbeitspaket 2.3 wurde die Verwendung der Feinfraktion, welche beim Recycling von Textilbeton anfällt, zur Herstellung von Recyclingzement (R-Zement) untersucht. Hierzu wurden Versuche im Labormaßstab und im Technikumsmaßstab durchgeführt. Versuche in der Produktion erfolgten im AP 3.2 (s. Abschnitt 7.3)

6.1. Untersuchungen Im Labormaßstab

6.1.1. Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Zuerst wurden die Eigenschaften der Ausgangsstoffe Feinbrechsand aus Carbonbeton 0/2 und Feinbrechsand aus Glasfaserbeton 0/2 bestimmt. In Bild 50 ist die Korngrößenverteilung der beiden Sande dargestellt. Weitere Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 14 zu finden.

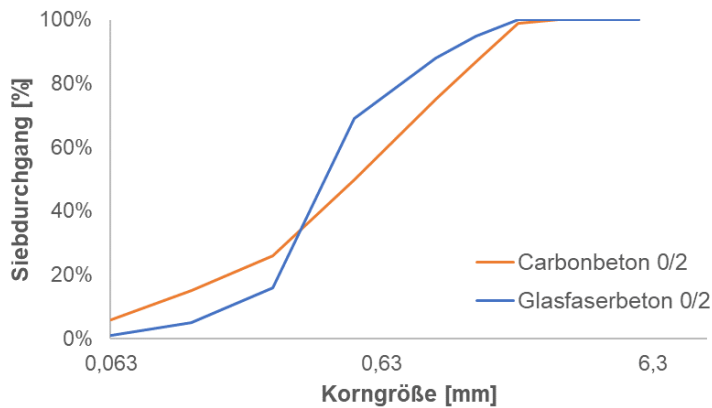


Bild 50: Korngrößenverteilung der Feinfraktionen aus Carbon- und Glasfaserbeton 0/2

Tabelle 14: Eigenschaften der Feinfraktion aus Carbon- und Glasfaserbeton 0/2

Bezeichnung	Einheit	Carbonbeton 0/2	Glasfaserbeton 0/2
Eigenfeuchte	%	4,2	7,2
Wasseraufnahme	%	5,2	5,01
Rohdichte (ofentrocken)	kg/dm ³	2,35	2,31

Bei der Durchführung dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Probe des Carbonbetons sowohl auf dem 0,063 mm als auch auf dem 1,0 mm Sieb schwimmende Rückstände des Carbon-geleges bzw. der Wirkfäden, die dieses zusammenhalten, aufweist (siehe Bild 51). Bei der Aufbereitung der Glasfaserfraktion hingegen waren keine schwimmenden Rückstände erkennbar.



Bild 51: Schwimmende Rückstände der Carbonbeton Feinfraktion auf dem 0,063 (links) und dem 1 mm Sieb (rechts)

6.1.2. Mahlung der Feinfraktion

Die Mahlung der Feinbrechsande erfolgte in einer Labor-Kugelmühle, bei der sich die Feinheit über die Mahldauer steuern lässt. Um den Einfluss der Feinheit des RC-Mehls auf die Eigenschaften des daraus hergestellten Zementes zu untersuchen, wurden mit beiden Feinbrechsanden mehrere Mahlungen mit unterschiedlicher Mahldauer durchgeführt. Angestrebt wurden RC-Mehle mit einer Mahlfinheit (Blaine-Wert nach DIN EN 196-6) von 3.500, 4.000 und 4.500 cm²/g. In Bild 52 ist der Zusammenhang von Mahldauer, Mahlfinheit und Ausgangsmaterial dargestellt. Zur Erzielung vergleichbarer Mahlfinheiten musste der Feinbrechsand des Glasfaserbetons länger gemahlen werden.

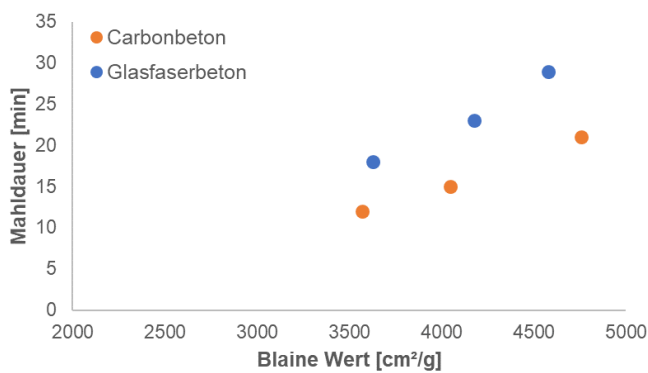


Bild 52: Feinheit der RC-Mehle in Abhängigkeit der Mahldauer und des Ausgangsmaterials

6.1.3. Herstellung und Charakterisierung der Recyclingzemente

Die hergestellten RC-Mehle wurden mit Portlandzement (CEM I) und teilweise Hüttensandmehl (HSM) als weiterem Zementhauptbestandteil in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen zu Recyclingzementen (RCZ) weiterverarbeitet. In Tabelle 15 sind die Zusammensetzungen der R-Zemente mit RC-Mehl aus Carbonbeton (CB) und in Tabelle 16 mit RC-Mehl aus Glasfaserbeton (GfB), dargestellt.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Recyclingzemente (RCZ) mit RC-Mehl aus Carbonbeton (CB)

Bestandteil in M.-%	RCZ 3.500 CB 80/20	RCZ 4.000 CB 80/20	RCZ 4.000 CB 80/20	RCZ 4.500 CB 80/20	RCZ 3.500 CB 65/15/20	RCZ 4.000 CB 65/15/20	RCZ 4.000 CB 65/15/20	RCZ 4.500 CB 65/15/20
CEM I 42,5 R	80	80	-	80	65	65	-	65
CEM I 52,5 R	-	-	80	-	-	-	65	-
HSM	-	-	-	-	15	15	15	15
RC-Mehl 3.500	20	-	-	-	20	-	-	-
RC-Mehl 4.000	-	20	20	-	-	20	20	-
RC-Mehl 4.500	-	-	-	20	-	-	-	20

Tabelle 16: Zusammensetzung der Recyclingzemente (RCZ) mit RC-Mehl aus Glasfaserbeton (GfB)

Bestandteil in M.-%	RCZ	RCZ	RCZ	RCZ	RCZ	RCZ	RCZ	RCZ
	3.500 GfB 80/20	4.000 GfB 80/20	4.000 GfB 80/20	4.500 GfB 80/20	3.500 GfB 65/15/20	4.000 GfB 65/15/20	4.000 GfB 65/15/20	4.500 GfB 65/15/20
CEM I 42,5 R	-	-	80	-	-	-	65	-
CEM I 52,5 R	80	80	-	80	65	65	-	65
HSM	-	-	-	-	15	15	15	15
RC-Mehl 3.500	20	-	-	-	20	-	-	-
RC-Mehl 4.000	-	20	20	-	-	20	20	-
RC-Mehl 4.500	-	-	-	20	-	-	-	20

Aus den Recyclingzementen wurden Mörtelproben nach DIN 196-6 hergestellt und untersucht. Dabei wurden die folgenden Eigenschaften bestimmt: Mahlfineinheit (Blaine-Wert), Wasseranspruch, Normsteife, Ausbreitmaß (Hägermann), Erstarrungsanfang, Erstarrungsende, Hydratationswärme nach 7 Tagen sowie Druckfestigkeit nach 1, 2, 7 und 28 Tagen.

In Bild 53 ist der Wasseranspruch der R-Zemente mit unterschiedlichen Feinheiten des RC-Mehls sowie unterschiedlichen Zusammensetzungen dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass der Carbonbeton mit einem CEM I 42,5 R und der Glasfaserbeton mit einem CEM I 52,5 R hergestellt wurden, worin die Differenz des Wasseranspruchs begründet liegt.

Im Übrigen variiert der Wasseranspruch lediglich im Bereich der Prüfstreuung, was darauf schließen lässt, dass die Mahlfineinheit im betrachteten Bereich keinen signifikanten Einfluss aufweist.

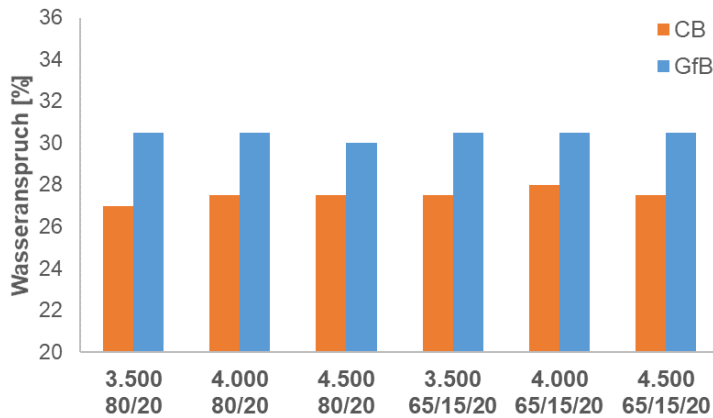


Bild 53: Wasseranspruch der R-Zemente mit RC-Mehl aus Carbon- und Glasfaserbeton mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen

Bild 54 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an den Normmörteln mit R-Zementen aus Carbonbeton-Feinmehl. Auch hier ist der Einfluss der Mahlfeinheit des RC-Mehls auf die Druckfestigkeiten des Mörtels gering; die Mahlfeinheit scheint somit eine untergeordnete Rolle zu spielen. Die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen stützen diese Aussage, weshalb an dieser Stelle auf deren Darstellung verzichtet wird.

Deutlich ist in Bild 54 jedoch die erwartungsgemäße Steigerung der Druckfestigkeit durch die Verwendung eines CEM I 52,5 R anstelle eines CEM I 42,5 R zu sehen. Bei der untersuchten Zusammensetzung 80/20 steigt die 28 Tage Druckfestigkeit um ca. 18 % und bei der Zusammensetzung 65/15/20 um ca. 12 % an. Bei der Verwendung von RC-Mehl aus Glasfaserbeton konnte die Druckfestigkeit nach 28 Tagen um die folgenden Werte gesteigert werden: Zusammensetzung 80/20: ca. 13 % und Zusammensetzung 65/15/20: ca. 11 %.

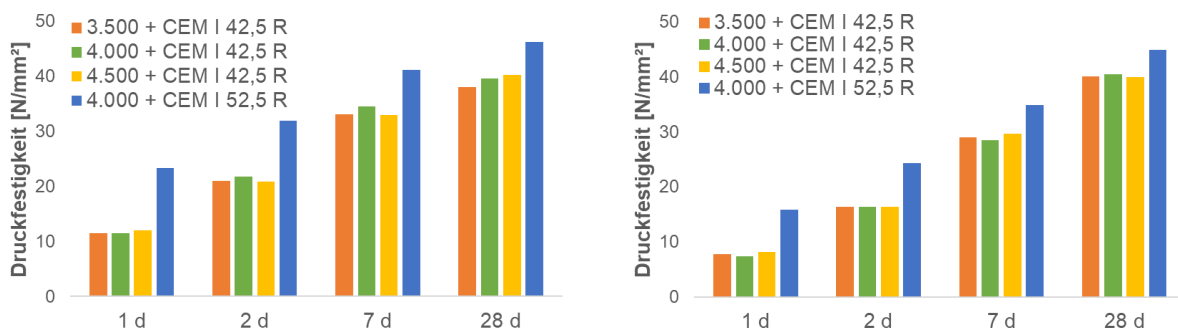


Bild 54: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit Carbonbeton-Feinmehl; links: Zusammensetzung 80/20; rechts: Zusammensetzung 65/15/20

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Mahlfeinheit des RC-Mehls in dem betrachteten Bereich von 3.500 bis 4.500 cm²/g keinen systematischen Einfluss auf die Eigenschaften des Mörtels hat.

Aus diesem Grund wurde zur Reduzierung der Versuchsmatrix für die weiteren Versuche die angestrebte Mahlfineinheit des RC-Mehls auf 4.000 cm²/g festgelegt. Darüber hinaus wird für die weiteren Versuche ein CEM I 52,5 R verwendet, um mit größerer Sicherheit die Festigkeitsklasse 42,5 zu erreichen.

In Bild 55 ist links die Festigkeitsentwicklung der R-Zemente aus Portlandzement und Glasfaserbeton-Feinmehl und rechts aus Portlandzement, Hüttensandmehl und Glasfaserbeton-Feinmehl dargestellt. Erwartungsgemäß nehmen die Druckfestigkeiten mit steigendem RC-Mehl Gehalt ab. Deutlich ist auch der Einfluss des Hüttensandmehls zu erkennen, welcher zu einer verzögerten Entwicklung der Festigkeit und damit niedrigeren Anfangsfestigkeiten führt, welche sich nach 28 Tagen jedoch dem Niveau der anderen Zemente angeglichen haben.

Die horizontalen Linien in Bild 55 markieren die normativen Anforderungen für einen Zement der Festigkeitsklasse 42,5 N: Die Druckfestigkeit muss nach 2 Tagen ≥ 10 N/mm² und nach 28 Tagen $\geq 42,5$ N/mm² sein. Diese Anforderungen werden zwar von allen betrachteten Zusammensetzungen erfüllt, jedoch muss eine zusätzliche Sicherheit für Schwankungen der Produktion und der Prüfung berücksichtigt werden. Somit erfüllen die R-Zement Rezepturen 70/30, 50/20/30 und 50/30/20 die Anforderungen der Festigkeitsklasse 42,5 N nur knapp.

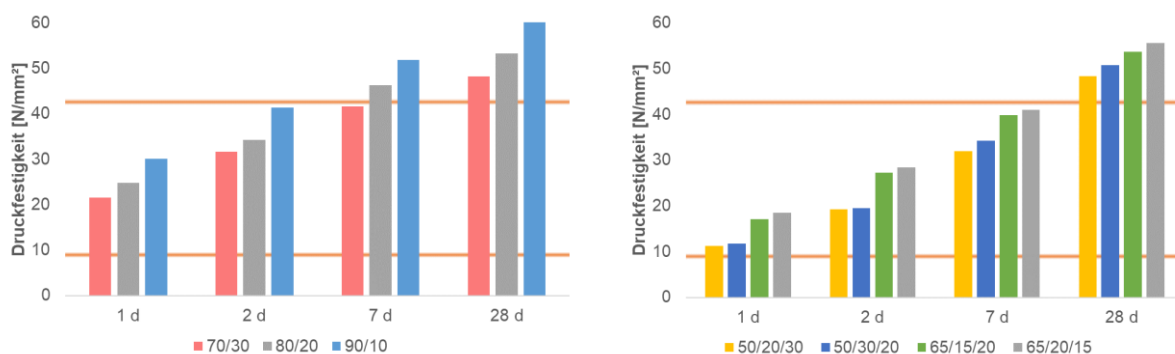


Bild 55: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit Glasfaserbeton-Feinmehl; links: PZ/RC-Mehl; rechts: Zusammensetzung PZ/HSM/RC-Mehl

Im weiteren Projektverlauf sind noch zwei weitere Proben aus Glasfaserbeton am AMR gebrochen und deren Feinfraktion im R-Zement untersucht worden. Mit diesen wurden zum Vergleich die beiden R-Zement Rezepturen 80/20 (Bild 56, links) und 65/20/15 (Bild 56, rechts) hergestellt. Die Druckfestigkeiten in Bild 56 zeigen, dass die verschiedenen Chargen des Glasfaserbetons keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften des R-Zements haben. Dies bestätigt sich auch bei der Betrachtung der weiteren Daten wie Konsistenz, Erstarrungsverhalten etc., auf deren Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

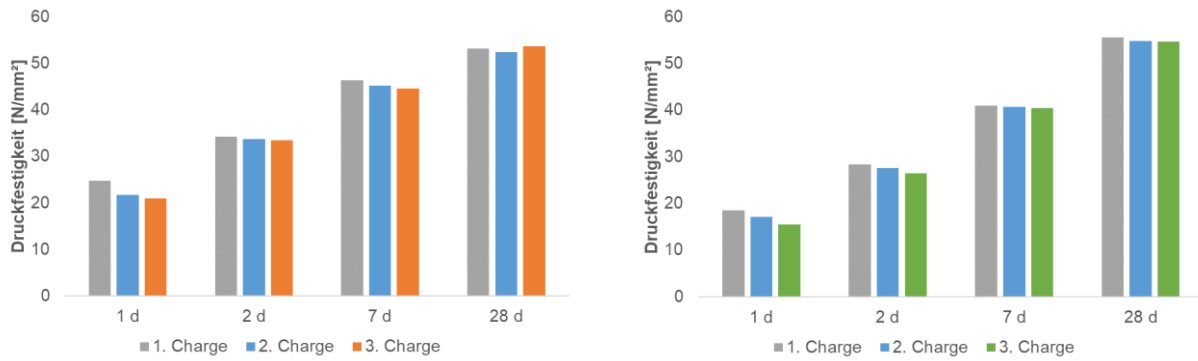


Bild 56: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit Glasfaserbeton-Feinmehl; links: 80/20 (PZ/RC-Mehl); rechts: Zusammensetzung 65/20/15 (PZ/HSM/RC-Mehl)

Von der Carbonbeton Feinfraktion wurden im Projektverlauf ebenfalls mehrere Chargen ins Versuchsprogramm aufgenommen: Zum einen eine zweite Laborprobe (2. Charge in Bild 57) und zum anderen das Material des Technikumsversuchs (3. Charge in Bild 57), von welchem eine kleine Probe entnommen und vergleichend im Labor aufbereitet wurde. Mit den so entstandenen RC-Mehlen mit einer Oberfläche von ca. 4.000 cm²/g wurden die R-Zemente 80/20 und 65/20/15 hergestellt und charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Versuche (Bild 57) bestätigten, dass bei gleicher Aufbereitung der Einfluss verschiedener Carbonbeton Chargen zu vernachlässigen ist, da sich vergleichbare Eigenschaften im Zement einstellen.

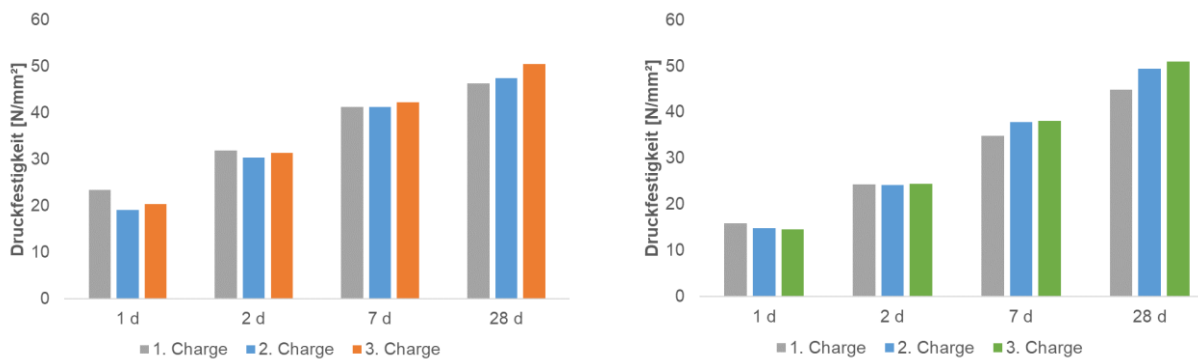


Bild 57: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit Carbonbeton-Feinmehl; links: 80/20 (PZ/RC-Mehl); rechts: Zusammensetzung 65/20/15 (PZ/HSM/RC-Mehl)

In Bild 58 ist die Festigkeitsentwicklung aller untersuchten R-Zemente mit einer Zusammensetzung von 80 % Portlandzement und 20 % RC-Mehl zusammengefasst. Die Druckfestigkeiten der verschiedenen Chargen und RC-Mehle liegen in einem ähnlichen Bereich, auffällig ist nur, dass die höchsten Festigkeiten nach 28 Tagen alle mit RC-Mehl aus Glasfaserbeton erreicht wurden. Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt eine Steigerung um etwa 5 N/mm².

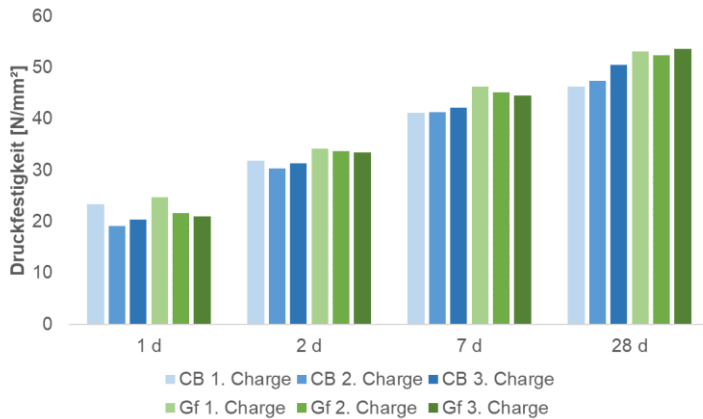


Bild 58: Vergleich der Festigkeitsentwicklung von R-Zement (80/20) mit Feinmehl aus Carbon- und Glasfaserbeton

Um diese leichte Tendenz zu höheren Festigkeiten näher zu untersuchen, wurde der Gehalt an reaktionsfähiger Kieselsäure (DIN EN 197-1) des aufgemahlene RC-Mehls aus Glasfaserbeton (1. Charge) bestimmt. Dabei ergab sich ein Gehalt von 18,8 %. Da es sich bei dem aufbereiteten Material um reinen Glasfaserbeton (Produktionsabfall) handelt, ist die Wahrscheinlichkeit von Verunreinigungen gering. Es könnte sich um Glasfaserreste handeln, welche durch die Mahlung puzolanische Eigenschaften erhalten. Dies könnte die Steigerung der Festigkeiten, besonders zu späteren Zeitpunkten, erklären.

6.2. Untersuchungen im Technikumsmaßstab

Die Untersuchungen im Technikumsmaßstab wurden an RC-Beton aus der 0/2 Fraktion (Kapitel 1.2), welche vom AMR aufbereitet wurde, durchgeführt.

6.2.1. Mahlung der Feinfraktion

Die Mahlung im Technikumsmaßstab wurde im Auftrag von Holcim (Deutschland) GmbH am Lafarge Cement Technical Center Vienna GmbH im Labor Mannersdorf durchgeführt. Es wurden ca. 600 kg Feinbrechsand von Carbonbetonplatten getrocknet und anschließend mit einer Kugelmühle auf die Mahlfineinheiten ~ 4.000 und ~ 6.000 cm^2/g (Blaine-Wert) aufgemahlen. Um einen direkten Vergleich zur Aufbereitung im Labor zu erhalten, wurde vor dem Versand eine Teilprobe entnommen und im Labor ebenfalls auf ~ 4.000 cm^2/g aufgemahlen. In Bild 59 sind die unterschiedlichen Siebrückstände (45, 90 und 200 μm) der RC-Mehle (Labor- und Technikumsmahlung) vergleichend dargestellt. Die deutlich geringeren Rückstände des Materials aus der Technikumsmahlung mit einer Oberfläche von ca. 6.000 cm^2/g auf den Sieben 90 und 45 μm zeigen, dass fast 70 % der Partikel eine Größe von < 45 μm aufweisen. Die beiden Proben mit einer Oberfläche von ca. 4.000 cm^2/g hingegen, haben mehr Partikel > 45 und 90 μm und sind damit erwartungsgemäß gröber. Weiterhin

zeigt sich, dass die Probe der Labormahlung etwas geringere Rückstände aufweist, als die Technikummahlung und damit etwas feiner ist.

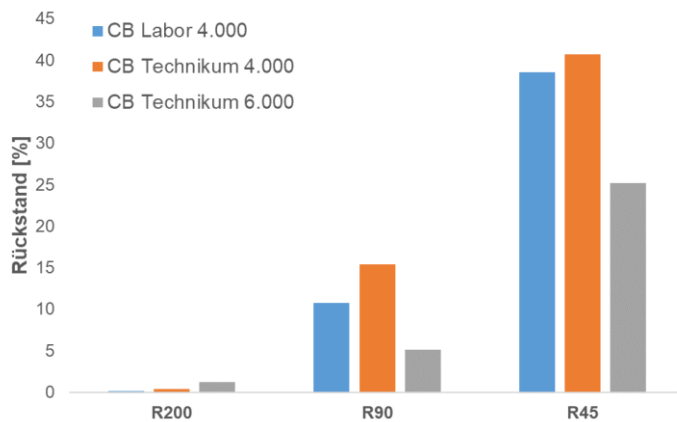


Bild 59: Siebrückstände der RC-Mehle aus Carbonbeton (CB) der Labor- sowie der Technikummahlung

6.2.2. Herstellung und Charakterisierung der Recyclingzemente

Um den Einfluss der Mühle sowie der Feinheit auf die R-Zement Eigenschaften zu bestimmen, wurden mit den drei RC-Mehlen jeweils die Zusammensetzungen 80/20 und 65/20/15 hergestellt und charakterisiert. Die in Bild 60 vergleichend dargestellten Festigkeitsentwicklungen zeigen, dass der Einfluss der unterschiedlichen Mühlen, Mengen sowie Mahlparameter vernachlässigbar ist. Auch die unterschiedlichen Feinheiten der Technikummahlung mit einer Oberfläche von etwa 4.000 und 6.000 cm²/g beeinflussen die Festigkeiten der R-Zemente im betrachteten Bereich nicht.

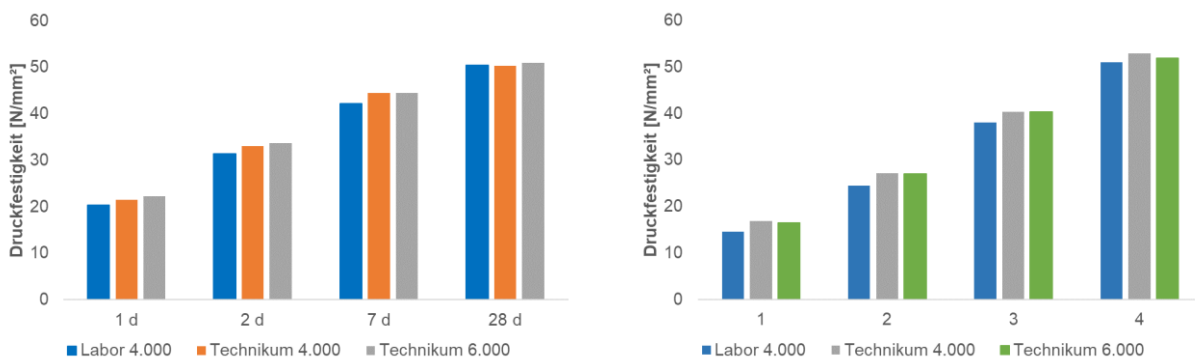


Bild 60: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente der Labor- und Technikummahlung mit Carbonbeton-Feinmehl; links: 80/20; rechts: 65/20/15

Im nächsten Schritt wurden mit dem Carbonbeton Feinmehl der Technikummahlung weitere R-Zemente mit den Zusammensetzungen 50/20/30 und 50/30/20 hergestellt und charakterisiert. Die Anforderung nach 2 Tagen eine Druckfestigkeit ≥ 10 N/mm² zu erreichen, erfüllen alle untersuchten

Zusammensetzungen mit ausreichender Sicherheit (siehe Bild 61). Nach 28 Tagen erreicht der R-Zement mit 20 % Hüttensand und 30 % RC-Mehl jedoch nur eine Druckfestigkeit von 42,2 N/mm² und mit 30 % Hüttensand und 20 % RC-Mehl von 48,1 N/mm². Höhere Druckfestigkeiten nach 28 Tagen erreichen hingegen die Zusammensetzungen 65/20/15 mit 52,9 N/mm² und 80/20 mit 50,3 N/mm².

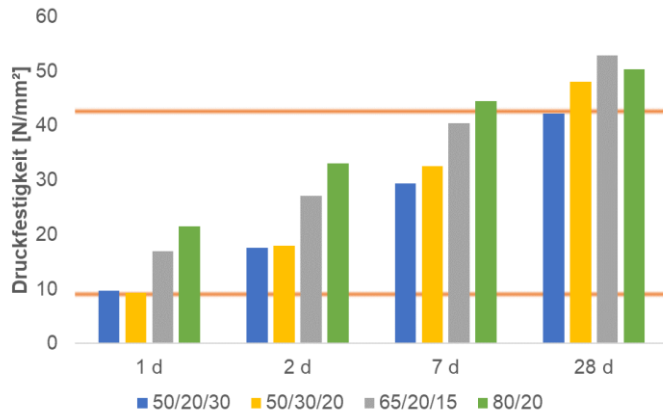


Bild 61: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit Carbonbeton Feinmehl (4.000 cm²/g) der Technikmahlung mit variierenden Zusammensetzungen

Diese Ergebnisse zeigen, dass zur Erreichung der Festigkeitsklasse 42,5 N mit den verwendeten Mischkomponenten der normative Grenzwert (DIN EN 197-6) von 20 % RC-Mehl nicht überschritten werden sollte. Unter Verwendung von 20 bzw. 15 % Recyclingmehl werden die gewünschten Druckfestigkeiten erreicht, mit 30 % hingegen nicht.

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit der R-Zemente im Beton wurden daher die Rezepturen 80/20 und 65/20/15 ausgewählt, da diese die Anforderungen an die Festigkeitsklasse 42,5 N am vielversprechendsten erfüllen. Manche Untersuchungen wurden zusätzlich mit der Abmischung 50/30/20 durchgeführt.

6.2.3. Prüfung von Betonen mit R-Zementen

Für die Zulassung eines neuen Zementes ist neben den Zementeigenschaften nach DIN EN 197-1 die am Mörtel bestimmt werden, auch die Performance im Beton von Bedeutung, um den Anwendungsbereich nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 nachzuweisen. Die Versuchsplanung der Betonversuche orientierte sich daher an Zulassungsversuchen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für einen CEM II/C-M (S-LL). Die jeweilige Zusammensetzung der Betone ist in Tabelle 17 zu finden.

Tabelle 17: Zusammensetzung der Betone mit R-Zement zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit

Parameter	Einheit	Beton CIF	Beton CDF	Feinbeton Karbonatisierung
Zement	kg/m ³	300	350	506
LP-Gehalt (angenommen)	Vol.-%	1,5	4,5	-
w/z-Wert	-	0,6	0,5	0,5
Sieblinie		A/B 16	A/B 16	A/B 8

6.2.4. Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit

Zur Untersuchung des Frostwiderstandes von Betonen mit R-Zement wurde das CIF-Verfahren nach BAW (BAW-Merkblatt: Frostprüfung von Beton) angewendet. Die Ergebnisse sowie die BAW Grenzwerte sind in Bild 62 dargestellt. Das Hauptkriterium der inneren Schädigung, der relativ dynamische E-Modul, wurde von dem Beton mit der R-Zement Abmischung 65/20/15 nicht erfüllt, hingegen mit der pessimaleren Abmischung 50/30/20 erfüllt.

Das zusätzliche Abnahmekriterium, die Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln, wurde hingegen von allen drei Abmischen erfüllt.

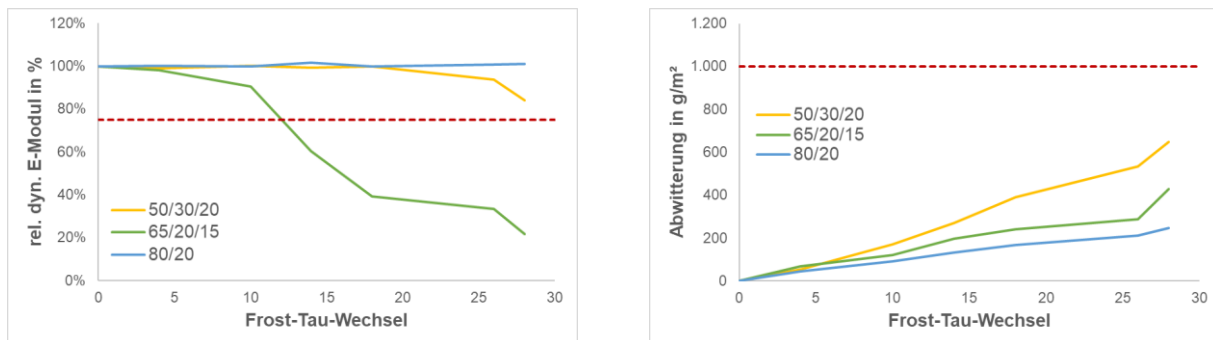


Bild 62: Ergebnisse des CIF-Verfahrens mit R-Zementen: links: Relativ dynamischer E-Modul in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel; rechts: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel

Auffällig ist die deutliche innere Schädigung des Betons mit dem R-Zement 65/20/15, welche sich von den anderen Untersuchungen abhebt. Hier besteht ggf. die Möglichkeit eines Messfehlers.

Zur Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstandes der Betone mit R-Zement wurde das CDF-Verfahren nach BAW (BAW-Merkblatt: Frostprüfung von Beton) angewendet. Die Ergebnisse sowie die Grenzwerte nach BAW sind in Bild 63 dargestellt.

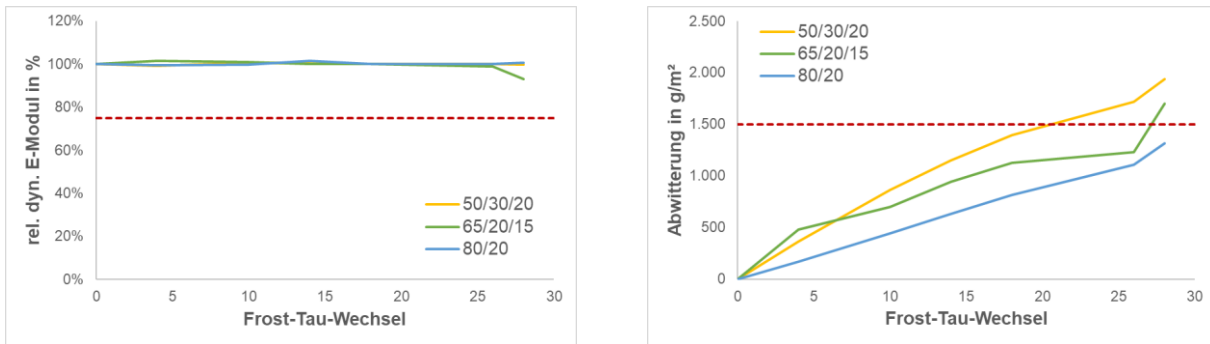


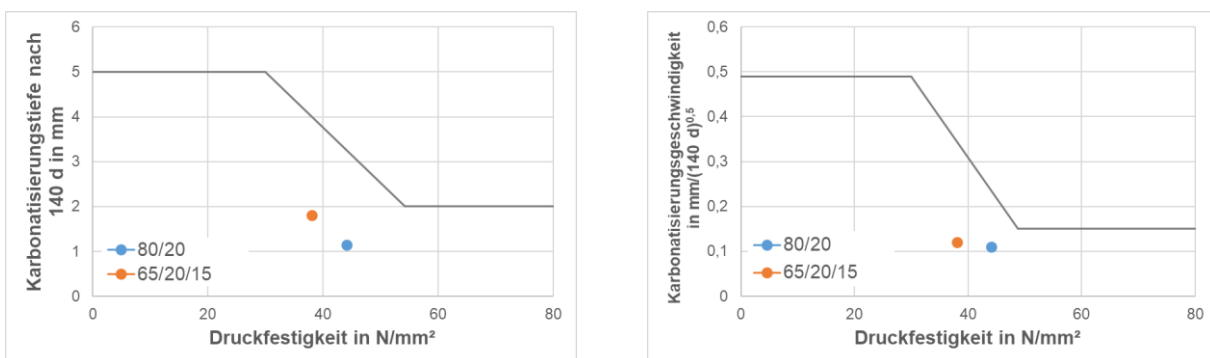
Bild 63: Ergebnisse des CDF-Verfahrens mit R-Zementen: links: Relativ dynamischer E-Modul in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel; rechts: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel

Beim CDF-Verfahren sind sowohl der relativ dynamische E-Modul, als auch die Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel entscheidend. Ersterer wird von allen untersuchten Betonen erfüllt. Die Abwitterung der Betone mit den R-Zement Abmischungen 50/30/20 und 65/20/15 ist jedoch zu hoch und überschreitet den Grenzwert nach BAW-Merkblatt.

Für den Einsatz der hergestellten R-Zemente in den Expositionsklassen XF3 und XF4 sind noch weitere Untersuchungen und ggf. eine Anpassung der R-Zement Zusammensetzung notwendig.

6.2.5. Karbonatisierungswiderstand

Die natürliche Karbonatisierung wurde mit dem DIBt-Verfahren nach DIN CEN/TR 16563 an Feinbetonen bestimmt. Bild 64 zeigt die Ergebnisse nach 7 und 28 Tagen Vorlagerung sowie den dazugehörigen Bewertungshintergrund. Alle untersuchten Feinbetone liegen innerhalb des Grenzbereichs und erfüllen somit die Anforderungen an den Widerstand gegen Karbonatisierung.



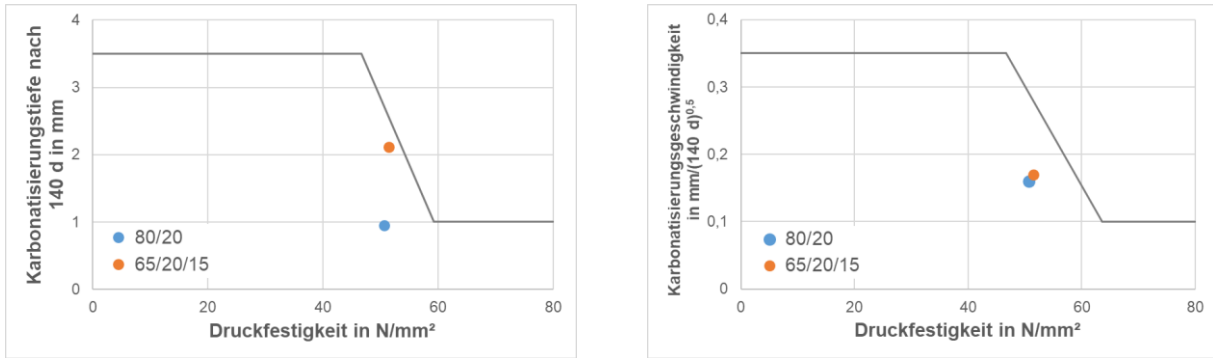


Bild 64: Natürliche Karbonatisierung nach dem DIBt-Verfahren: oben: Karbonisierungstiefe und Karbonisierungsgeschwindigkeit nach 7 Tagen Vorlagerung; unten: Karbonisierungstiefe und Karbonisierungsgeschwindigkeit nach 28 Tagen Vorlagerung

6.2.6. Chlorideindringwiderstand

Um den Einfluss von RC-Mehl auf den Widerstand von Beton gegen das Eindringen von Chloriden zu untersuchen, wurden Betone nach internen Rezepturen hergestellt. Dies ermöglichte den Vergleich zu eigenen Daten mit ähnlichen Zementzusammensetzungen. Die Bestimmung der Chloridmigrationskoeffizienten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-18.

Der Chlorideindringwiderstand eines Betons ist, neben dem eingesetzten Zement, abhängig von der Betonzusammensetzung und damit von dem verwendeten w/z-Wert. Daher wurden verschiedene Normalbetone mit unterschiedlichen w/z-Werten hergestellt, um diese Abhängigkeit zu verdeutlichen, siehe Bild 65. Der R-Zement 80/20 kann mit einem CEM II/A-LL und der R-Zement 65/20/15 mit einem CEM III/A verglichen werden. Die untersuchten Betone zeigen keinen negativen Einfluss des RC-Mehls auf den Chlorideindringwiderstand.

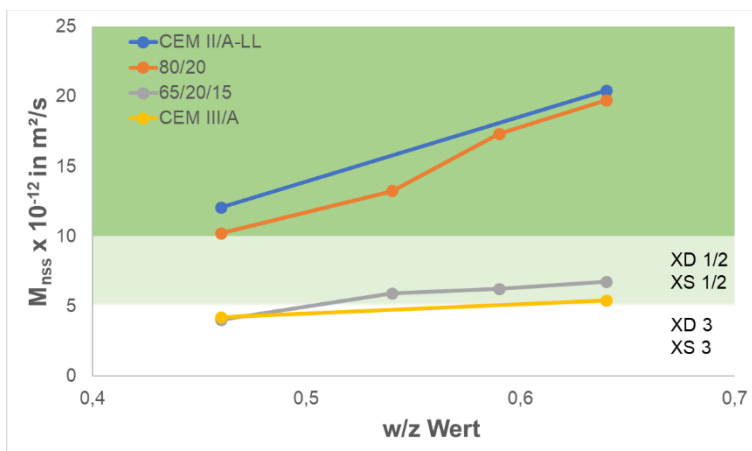


Bild 65: Vergleich der Chloridmigrationskoeffizienten von Betonen mit R-Zementen und Standardzementen in Abhängigkeit der w/z-Werte

In Bild 65 sind darüber hinaus die Grenzwerte der Chloridmigrationskoeffizienten nach BAW Merkblatt (Chlorideindringwiderstand von Beton) eingezeichnet. Die Ergebnisse bestätigen die Daten der Literatur. Bei einem Betonangriff durch Chloride ist der Einsatz hüttensandhaltiger Zemente deutlich von Vorteil, was für die untersuchten R-Zemente gleichermaßen gilt.

6.2.7. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Aufbereitung der Feinfraktion von Glasfaser- und Carbonbeton im Labormaßstab ohne Probleme möglich war, was für die Feinfraktion von Carbonbeton auch im Technikumsmaßstab gilt (Glasfaserbeton wurde hier nicht untersucht). Die aus den aufbereiteten Recyclingmaterialien hergestellten R-Zemente erfüllten in Abhängigkeit der Zusammensetzung die Anforderungen der Zementnorm DIN EN 197-1 und zeigten keinerlei Auffälligkeiten. Die Herstellung von Beton mit R-Zement aus der Technikumsmahlung der Carbonbetonfeinfraktion erfolgte ebenfalls ohne Auffälligkeiten. Mit Standard-Zusatzmitteln konnten Verarbeitbarkeitseigenschaften wie im Normalbeton realisiert werden. Bezogen auf die Dauerhaftigkeit sollten der Frost- sowie der Frost-Tausalz-Widerstand näher untersucht werden, da hier, ähnlich wie bei anderen klinkerarmen Zementen, eine gut abgestimmte Zusammensetzung notwendig ist.

Nichtsdestotrotz können die hier untersuchten R-Zemente für den Großteil der Betonanwendungen, insbesondere im Hochbaubereich, problemlos verwendet werden.

Nach der Charakterisierung der verschiedenen Korngruppen wurde der Brechsand, hier 0/4, auf eine Wiederverwendung im Zement untersucht (vergleiche Abschnitt 1.4 Aufbereitung CPC-Beton). Ein Teil der Ergebnisse der Zementversuche nach DIN EN 196 ist in Bild 66 zu sehen. Der R-Zement mit der Abmischung 50/30/20 aus CPC weist nach 28 Tagen einen leichten Rückgang in der Druckfestigkeit auf, die übrigen Eigenschaften entsprechen denen der bisherigen R-Zemente.

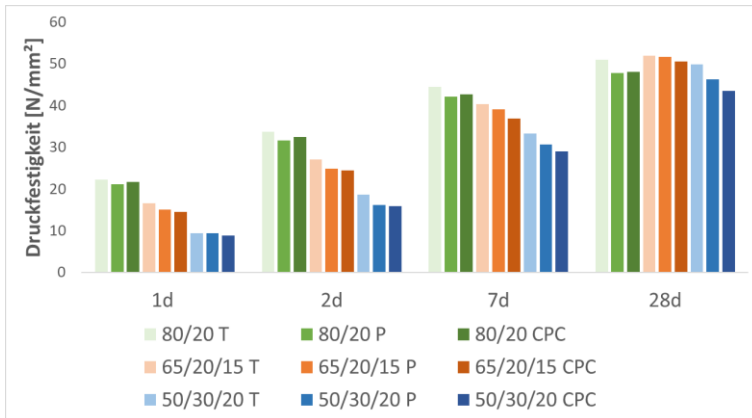


Bild 66: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit CPC im Vergleich zu den R-Zementen aus dem Technikums- (T) und Produktionsmaßstab (P) mit gleicher Zusammensetzung

Die Aufbereitungsversuche der CPC Elemente haben gezeigt, dass diese im Industriemaßstab mit gängigen Verfahren aufbereitet und zu Recyclingkörnungen für Beton weiterverarbeitet werden können. Auch die Herstellung von R-Zement auf Basis des CPC Brechsands ist ohne jegliche negative Auswirkung auf die Betoneigenschaften möglich.

Die RC-Körnungen aus CPC wurden zur Herstellung des Demonstrators ebenfalls zum ibac der RWTH Aachen geliefert.

7. AP 2.4/AP 3.1 - Verarbeitungsprozess und Demonstrator Industriefußboden (ibac)

Parallel zu der Materialentwicklung in AP 2.1 und 2.2 wird der Betonier- und Verarbeitungsprozess für RF-Beton entwickelt. Hierfür wurden erste Vorversuche zur Verarbeitbarkeit im Labor des ibacs durchgeführt. Durch die gebrochene Oberfläche der recycelten Gesteinskörnung ist der Anspruch an die einsetzbaren Betonmischungen höher. Durch eine Optimierung des Feinkornanteils bzw. eine Erhöhung des Mehlkorngeltes ist mit gezielter Dosierung von Zusatzmitteln jegliche Konsistenz einstellbar.

7.1. Demonstrator aus Gehwegplatten

Für den Bau des Demonstrators wurde im Konsortium beschlossen, anstelle eines vor Ort zu betonierenden Industriefußbodens den Demonstrator in Form von Fertigteilen (Gehwegplatten) auszuführen. Hierdurch wurde die Herstellung flexibler und es konnten zwei verschiedene Mischungsvariationen hergestellt und eingesetzt werden. Die entworfenen Betonzusammensetzungen wurden für die maßgebenden Expositionsklassen XD3/XF4 angenommen. Somit ist der Zementgehalt auf min. 320 kg/m³ festzusetzen. Die eingesetzten Mischungen sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Zusammensetzung der eingesetzten Demonstratormischungen

Parameter	Einheit	Mischung 1	Mischung 2
R-Zement	kg/m ³	320	-
CEM III/B 42,5			320
Wasser		144	144
Gesteinskörnung „neu“		893	1.083
RC-Gesteinskörnung Carbon		898	-
RC-Gesteinskörnung Glas		-	705
Kalksteinmehl		48	48
Luftgehalt (angenommen)		5,00	5,00
w/z-Wert	-	0,45	0,45
Sieblinie der Gesteinskörnung		A/B 16	A/B 4

Die Zusammensetzungen wurden entsprechend gewählt, um den erfolgreichen Einsatz der verschiedenen Recyclingfraktionen und Bestandteile aufzuzeigen. In Mischung 1 wurden RC-Zement und 4-16 mm RC-Gesteinskörnung aus recycelten CPC-Platten verwendet. In Mischung 2 wurde ein CEM III Zement mit Glasfaserbeton RC-Gesteinskörnung mit einem maximalen Größtkorn von 4 mm eingesetzt. Bei der verwendeten Glasfaserbeton Gesteinskörnung handelt es sich um einen Mischbruch aus Gesteinskörnung und Glasfasertextilbruch. Die Platten wurden in Chargen a 20 Stück hergestellt und bis zum Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert. Zur Produktionskontrolle wurden bei jeder Herstellung ebenfalls 3 Würfel hergestellt und die Festigkeit nach 28 Tagen überprüft. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Druckfestigkeiten der Demonstratormischungen nach 28d (an Würfeln mit 150mm x 150 mm)

Mischung 1		Mischung 2	
MW der Chargen	MW-Gesamt	MW der Chargen	MW-Gesamt
48,4	49,2	52,8	53,2
47,2		55,2	
48,2		52,5	
47,3		52,0	
48,8		52,2	
55,2		54,7	

MW: Mittelwert

Es wurden insgesamt etwa 280 Platten hergestellt. Anschließend wurde die geforderte Rauheit mittels Feststoffstrahlen eingestellt und mit dem Sandflächenverfahren kontrolliert. Hierbei wurde eine Rauheitsklasse von 0,5-1,0 eingestellt, um eine ausreichende Griffigkeit herzustellen. Um die Dauerhaftigkeit der Platten zu maximieren, wird innerhalb eines Jahres die Oberfläche noch mit einer Hydrophobierung behandelt. Zusätzlich wurden für jeden Projektpartner eine Logoplatte hergestellt. Dabei wurden Untergrundplatten mit der Mischung 1 hergestellt, mit einer Feinbetonmischung verfüllt und anschließend geschliffen. In Bild 67 ist eine Übersicht der hergestellten Logoplatten aufgeführt.



Bild 67: Logoplatten der Projektpartner

Für die Umsetzung der Baumaßnahmen wurden in Absprache mit der RWTH alle notwendigen Genehmigungen bei dem zuständigen Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW vorbereitet und angefragt. Die Genehmigung für den Einbau der Platten als Großdemonstrator am ITA wurde über die zuständige Abteilung der RWTH erhalten.

Um die Platten innerhalb der Projektlaufzeit als Demonstrator umsetzen zu können, wurde statt dem Großdemonstrator am ITA eine andere Option gewählt. Als Alternative und zur Darstellung der Projektergebnisse wurde ein Kleindemonstrator direkt neben der geplanten Fläche erstellt. Hierbei wurden 12 Platten (je 6 pro Mischung) ausgelegt und mit einer Informationstafel und einem zugehörigen Hinweis zu diesem Projekt beschriftet. Der Demonstrator, siehe Bild 68, ist direkt neben einen frequentierten Weg erbaut worden.



Bild 68: Kleindemonstrator mit 12 Platten (Diagonal getrennt in 2 verschiedenen Betonmischungen) neben frequentierten Durchgangsweg am ITA

204 Gehwegplatten wurden an den Kinderschutzbund Aachen e.V. gespendet und vor Ort auf einem lokalen Abenteuerspielplatz eingebaut. Der Abenteuerspielplatz zum Kirschbäumchen ist ein einzigartiger Ort für offene Kinder- und Jugendarbeit. Durch die verlegten Gehwegplatten konnte der Aufbau eines neuen Angebots, den U5-Bereich (zur Anbindung von Familien mit jüngeren Kindern), unterstützt werden, siehe Bild 69.

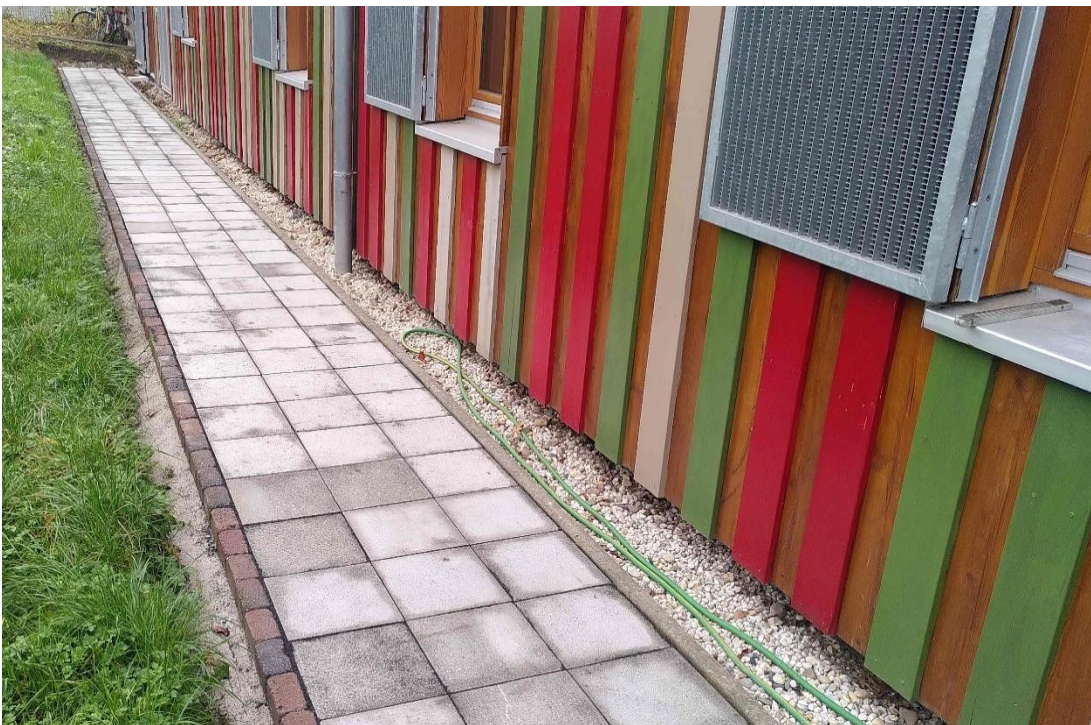


Bild 69: Lage des Demonstrators beim Kinderschutzbund Aachen e.V.

7.2. Demonstrator Betonkanu

Zur Herstellung eines weiteren anschaulichen Demonstrators wurde der Studenteninitiative „Betonkanu“ der Fakultät für Bauingenieurwesen (RWTH) Material in Form von R-Zement und recycelter Gesteinskörnung (CPC-Platten) zur Verfügung gestellt. Diese konnten im Rahmen der 19. Deutschen Betonkanuregatta Betonkanus von Studierenden verbaut werden. Das entwickelte Betonkanu wurde mit einem hohen Anspruch an den Nachhaltigkeitsaspekt konzipiert. Die Studierenden hatten sich als Aufgabe gesetzt die Feinfraktion RC-GK < 2mm in Form eines selbstverdichtenden Betons zu verarbeiten. In Bild 70 ist das Einfüllen des Betons in die Kanuschalung zu sehen. Als Zement wurde der R-Zement (CEM II/A-F 42,5) verwendet. Der Feinanteil F besteht aus dem Gesteinskörnungsanteil mit einer Korngröße kleiner 63 µm, welcher sonst ausgeschlossen werden würde. In Tabelle 20 ist der verwendete Betonentwurf dargestellt. Da es sich um Recycling-Gesteinskörnung handelt, wird diese vor der Herstellung vorgegast. Um eine gute Fließfähigkeit zu erreichen, wurde der Betonentwurf mit einem hohen Mehlkorngelbalt und Fließmittel umgesetzt.



Bild 70: Herstellung Betonkanu, einfüllen des selbstverdichtenden Betons

Tabelle 20: Betonzusammensetzung des SVB-Recyclingbetons

Parameter		Einheit	Gehalt
CEM II 42,5 A-F		kg/m ³	420,0
Wasser			210,0
Wasseranspruch Rec. GK			198,6
Rec. GK	1-2 mm		352,2
Rec. GK	0-1 mm		475,1
Quarzmehl	0,000-0,250 mm		408,2
Quarzmehl	0,000-0,125 mm		289,1
Fließmittel		M.-% von z	0,78

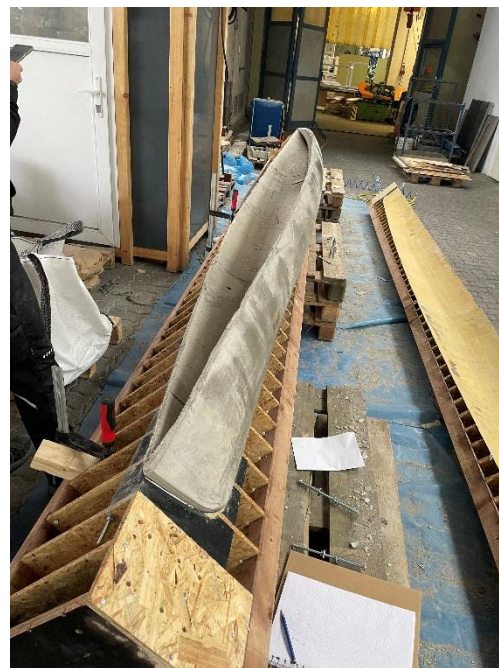


Bild 71: Hergestellte Recyclingbeton Kanus

Der Beton wurde als Recycling-Carbonbeton umgesetzt. Für die Bewehrung wurde Carbonfasergelege eingesetzt, welches in der Form eines Kanus mit Epoxidharz getränkt und mit feinem Quarzsand besandet wurde. Das Kanu wurde nach Abschluss der Betonkanuregatta (1. Platz Konstruktionswettbewerb) wieder zu Gesteinskörnung verarbeitet. Dazu wurde der Beton manuell von der Carbonfaserbewehrung getrennt, siehe Bild 72, zerkleinert und mittels Backenbrecher des AMRs zu Recycling-Gesteinskörnung mit Korngrößen von 4mm, 2mm und 1mm aufgebrochen. Hierbei konnte ebenfalls eine gute Trennbarkeit erreicht werden.



Bild 72: Zerbrochenes Betonkanu mit Textilfasergelege

7.3. AP 3.2 Demonstrator RC-Zement - Untersuchungen im Produktionsmaßstab (Holcim)

7.3.1. Vorversuche

Für die Durchführung eines Produktionsversuchs in einem Zementwerk sind mehr als 150 t Recyclingmaterial notwendig. Da diese Mengen an Carbon- oder Glasfaserbeton, im Besonderen hier bezogen auf die Fraktion 0/2, aktuell nicht vorliegen, wurde im Vorfeld geprüft, wie groß der Einfluss verschiedener RC-Mehle auf die Eigenschaften von R-Zement ist. Bei dem bisher betrachteten Brechsand handelt es sich um Typ 1 Material (DIN EN 4226-101), welches zu > 90 % aus Betonbruch besteht. Daher wurde zum Vergleich ebenfalls Betonbruch Typ I, siehe Tabelle 21, verwendet. Zusätzlich wurden Zemente mit Kalksteinmehl hergestellt, einem weiteren inerten Hauptbestandteil von Zement, welcher zukünftig durch den Einsatz von Recyclingmaterialien ersetzt werden könnte.

Tabelle 21: Verwendete Ausgangsstoffe zur Herstellung verschiedener R-Zemente

Bezeichnung	Ausgangsmaterial	Aufbereitung	Blaine-Wert cm ² /g
Betonbruch I	Rückbeton	Labormühle	4.470
Betonbruch II	Rückbeton	Labormühle	4.770
Mahlversuch	Rückbeton	Werksmühle	~ 12.000
LL	Kalkstein	Labormühle	4.090

Betonbruch I und II sowie das Kalksteinmehl *LL* wurden wie die Feinfraktionen der Carbon- und Glasfaserbetone im Labor getrocknet und auf eine Feinheit von ca. 4.000 cm²/g aufgemahlen. Das RC-Mehl *Mahlversuch* stammt aus einem vorhergehenden Mahlversuch in einem Zementwerk, weshalb kein Einfluss auf die Feinheit genommen werden konnte.

In Bild 73 ist der Wasseranspruch der R-Zemente (80/20) mit unterschiedlichen Recyclingmaterialien dargestellt. Es zeigt sich, dass die deutlich größere Oberfläche des Materials *Mahlversuch* sich nicht auf den Wasseranspruch des R-Zements auswirkt. Dies könnte zum einen auf die relativ geringe Zugabemenge von 20 % zurückgeführt werden. Zum anderen ergänzen die sehr feinen Partikel das Kornband des Zements und optimieren dessen Packungsdichte, wodurch der Wasseranspruch möglicherweise trotz der großen Oberfläche nicht erhöht wird.

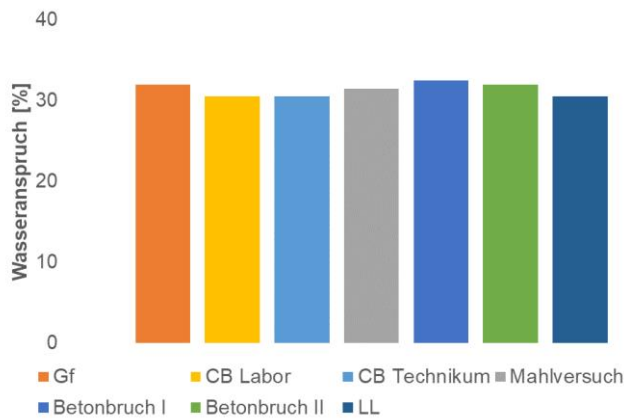


Bild 73: Wasseranspruch der R-Zemente (80/20) mit unterschiedlichen Recyclingmaterialien

Die anschließende Bestimmung der Festigkeitsentwicklung der R-Zemente (Bild 74) zeigt, dass alle Zemente eine ähnliche Druckfestigkeit aufweisen. Etwas höher, besonders nach 28 Tagen, sind die Druckfestigkeiten des R-Zements mit Glasfaserbeton und dem RC-Mehl aus der Werksmühle. Die erhöhten Festigkeiten des R-Zements mit Glasfaserbeton, sind wie bereits erwähnt, möglicherweise auf einen erhöhten Gehalt an reaktionsfähiger Kieselsäure zurückzuführen. Beim RC-Mehl des vorhergehenden Werksversuchs kann die Festigkeitssteigerung auf die bereits erwähnte Optimierung der Packungsdichte des Zements zurückgeführt werden. Auch die Veränderung weiterer Eigenschaften des Feinmehls durch den Mahlprozess im Zementwerk kann nicht ausgeschlossen werden. In den untersuchten Zement Parametern (Blaine-Wert, Normsteife, Erstarrungsanfang, -ende, Hydrationswärme und Hägermann Ausbreitmaß) sind wie beim Wasseranspruch (Bild 73) keine Auffälligkeiten erkennbar. Die R-Zemente mit im Labor aufgemahlene RC-Mehlen aus Carbonbeton, Rückbeton sowie Kalksteinmehl zeigen keine Unterschiede in der Festigkeitsentwicklung.

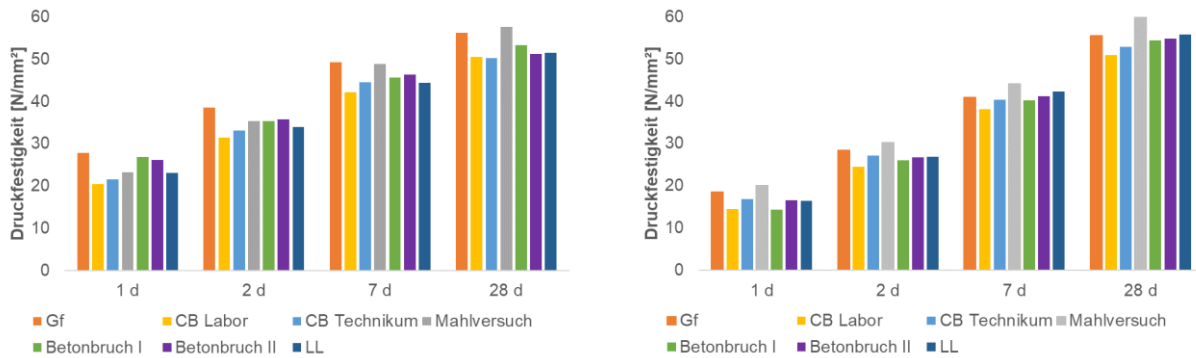


Bild 74: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente aus unterschiedlichen Recyclingmaterialien; links: 80/20; rechts: 65/20/15

Aufgrund dessen wird davon ausgegangen, dass die Herkunft des Feinbrechsandes, sofern es sich um Typ I Material handelt, eine untergeordnete Rolle für die betrachteten Eigenschaften des R-Zements spielt. Daher wird in Absprache mit den anderen Projektpartnern sowie dem Projektträger im Produktionsversuch ein Rückbeton eingesetzt, welcher in ausreichender Menge zur Verfügung steht.

7.3.2. Mahlung

Um die für einen Produktionsversuch ausreichende Menge Recyclingmaterial zu bekommen, wurde über einen längeren Zeitraum der Rückbeton mehrerer Transportbetonwerke gesammelt und anschließend aufbereitet. Die ca. 200 t Material wurden zum Mahl- und Mischwerk Dortmund transportiert und in einer Kampagne aufgemahlen. Da das Recyclingmaterial eine Restfeuchte von ca. 16 % aufwies, führte die durchgeführte Mahltrocknung dazu, dass das RC-Mehl eine relativ hohe Mahlfeinheit erreichen konnte, da die Verweildauer in der Mühle stark vom Feuchtegehalt abhängig ist. Nachdem die Anlage auf dieses neue Material angepasst und eingestellt werden konnte, wurde das komplette Material gemahlen. Dabei wurden zwei größere Proben entnommen, um die weiteren Versuche durchzuführen. Die Proben wiesen eine Oberfläche von ca. 7.100 und ca. 8.300 cm²/g (Blaine-Wert) auf.

Bei diesem Produktionsversuch in einem Mahl- und Mischwerk konnten sämtliche notwendige Schritte von der Sammlung und Lagerung, über den Transport bis zur Mahlung selbst und dem Umgang mit dem Material unter realen Bedingungen getestet werden.

7.3.3. R-Zement

Für die Erwirkung einer Zulassung eines neuen Zements beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) sind eine Vielzahl von Information und Prüfungen notwendig. Neben Zusammensetzung, Herkunft und Eigenschaften der Ausgangsstoffe muss mit diesen ein Produktionsversuch im Werk durchgeführt und begleitet werden. Wie auch an den R-Zementen des Technikumsversuchs wurden

an den R-Zementen des Produktionsversuches die Zementeigenschaften nach der Normenreihe DIN EN 196 bestimmt und Betonversuche zur Dauerhaftigkeit (Frost-Tausalz widerstand, Chloridmigration und Karbonatisierung) in Anlehnung an eine Zulassung des DIBt durchgeführt.

Aus den zwei RC-Mehlen wurden im Werk insgesamt zehn verschiedene R-Zement Zusammensetzungen hergestellt und untersucht, welche den Zementsorten CEM II/A-F, CEM II/B-F, CEM II/C-M (S-F) und CEM VI (S-F) entsprechen. Zur Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen werden im Folgenden nur die Mischungen M1 (63/18/19), M2 (81/19) und M3 (54/27/19) dargestellt.

In Bild 75 sind die Druckfestigkeiten der R-Zemente aus dem Produktionsversuch den Ergebnissen aus dem Technikumsversuch gegenübergestellt. Die Anforderungen für einen Zement der Klasse 42,5 N (Druckfestigkeit nach 2 Tagen $\geq 10 \text{ N/mm}^2$ und nach 28 Tagen $\geq 42,5 \text{ N/mm}^2$) werden mit Sicherheit von allen Abmischungen erfüllt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass Zemente in einem Produktionsprozess oft besser eingestellt werden können und somit höhere Festigkeiten erreichen.

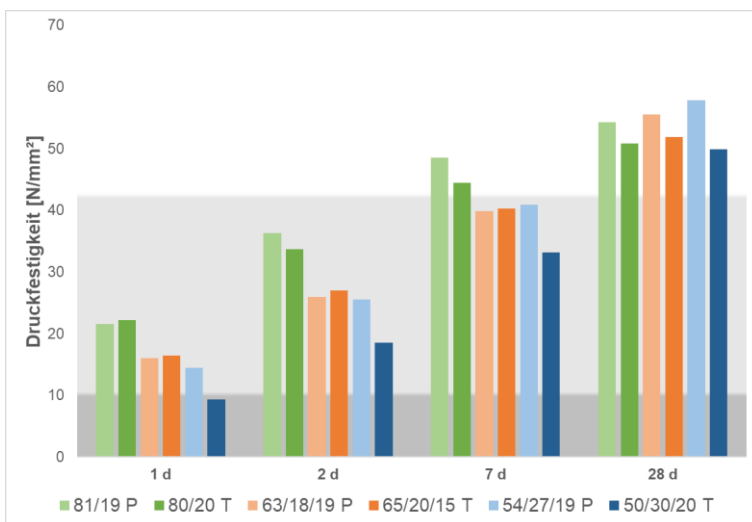


Bild 75: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit unterschiedlichen Zusammensetzungen aus Technikums- (T) und Produktionsmaßstab (P)

Auch in den weiteren Zementeigenschaften wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Somit bestätigt der durchgeführte Produktionsversuch die vorherigen Laborversuche: der Einsatz von RC-Mehl ist zur Herstellung von R-Zement geeignet.

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurde das beim Produktionsversuch hergestellte RC-Mehl zusätzlich analog zu den bisherigen Versuchen zu R-Zementen weiterverarbeitet. Die Festigkeitsentwicklung dieser Mischungen sind in Bild 76 im Vergleich zu den R-Zementen des Technikumsversuchs dargestellt. Es zeigen sich nur leichte Unterschiede in der Festigkeitsentwicklung.

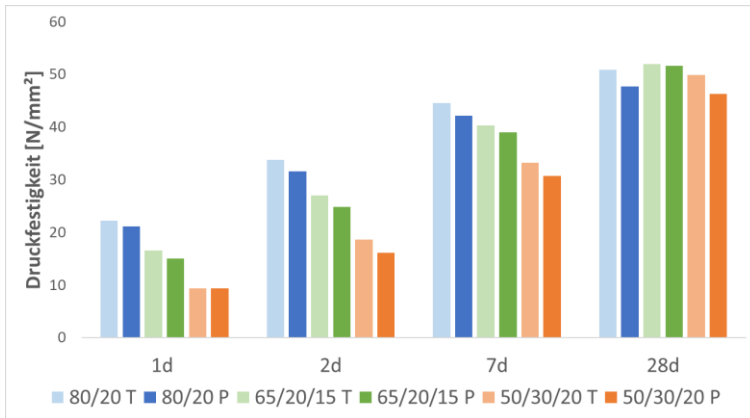


Bild 76: Festigkeitsentwicklung der R-Zemente mit aus Technikums- (T) und Produktionsmaßstab (P) mit gleicher Zusammensetzung

7.3.4. Betone mit R-Zementen

Mit den im Produktionsversuch hergestellten R-Zementen wurden, nach erfolgreicher Prüfung der Zementeigenschaften, Betonversuche durchgeführt. Dazu wurden im Werkslabor gängige Betonrezepturen von Regelprüfungen verwendet). In Bild 77 sind die Ergebnisse der Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes dargestellt. Sowohl die Anforderungen an die innere Schädigung (links), als auch an die Abwitterung (rechts) werden von den geprüften Betonen erfüllt.

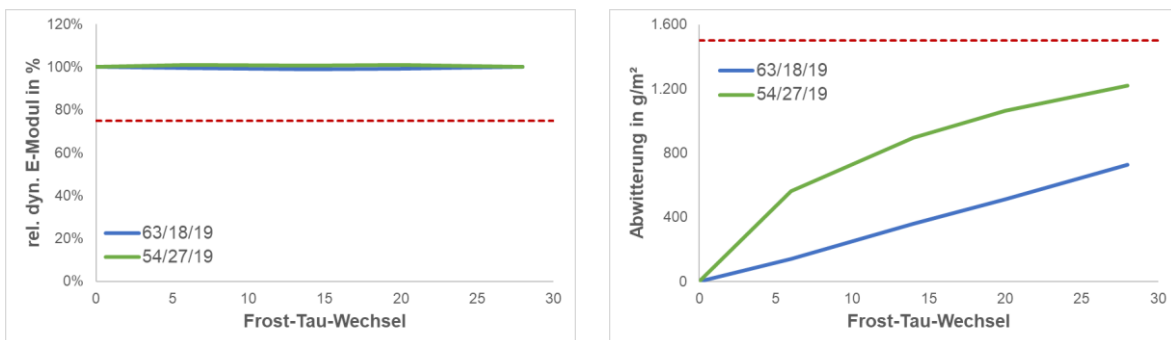


Bild 77: Ergebnisse des CDF-Verfahrens mit R-Zementen: links: Relativ dynamischer E-Modul in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel; rechts: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel

Der Widerstand gegen Karbonatisierung sowie gegen das Eindringen von Chloriden wurde ebenfalls an internen Betonrezepturen geprüft, um die Vergleichbarkeit mit anderen Zementen sicherzustellen. Die Karbonatisierung wurde mit dem beschleunigten Verfahren in Anlehnung an DIN EN 12390-12 geprüft. Bild 78 zeigt die Ergebnisse der Betone mit den R-Zementen 63/18/19 und 54/27/19 mit unterschiedlichen w/z-Werten im Vergleich zur Karbonatisierungsgeschwindigkeit des gleichen Betons mit einem CEM III/A mit einem Klinkergehalt von ca. 50 %. Die Betone weisen alle eine ver-

gleichbare Karbonatisierungsgeschwindigkeit auf, was auf den ähnlichen Klinkergehalt zurückzuführen ist. Etwas geringer ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit dem R-Zement 63/18/19, welcher den höchsten Klinkergehalt aufweist.

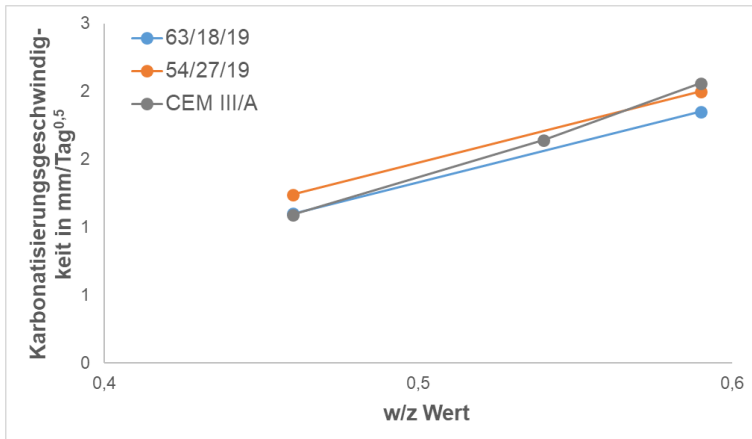


Bild 78: Beschleunigte Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Betone mit R-Zement im Vergleich zu einem Normalbeton mit CEM III/A, in Abhängigkeit des w/z-Wertes

An den gleichen Betonen wurde auch der Widerstand gegen Chloridmigration (in Anlehnung an DIN EN 12390-18) bestimmt, welcher in Bild 79 zu sehen ist. Neben der deutlichen Abhängigkeit vom Wassergehalt der Betone, ist auch der Einfluss der Zementzusammensetzung zu sehen. Hüttensand wirkt sich positiv auf den Chlorideindringwiderstand aus, was auch auf die untersuchten R-Zemente zutrifft. Je mehr Hüttensand der Zement enthält, umso geringer ist der Chloridmigrationskoeffizient des Betons. Unter Berücksichtigung des Bewertungshintergrundes des BAW konnten je nach w/z-Wert die Expositionsklassen XD/XS 1/2 oder XD/XS 3 erreicht werden.

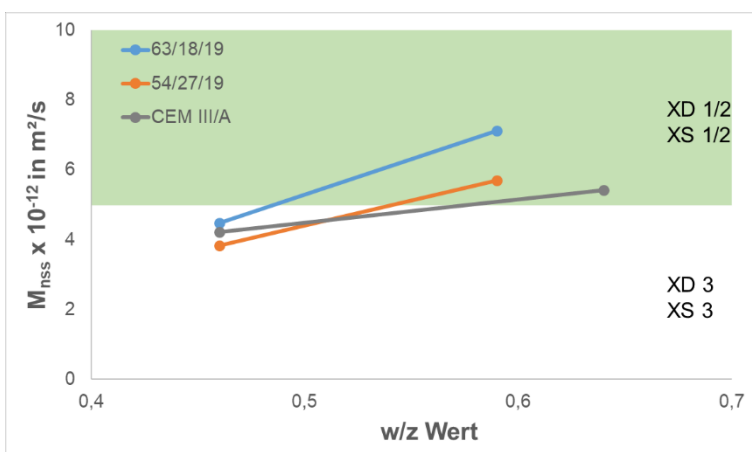


Bild 79: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit R-Zement im Vergleich zu einem Normalbeton mit CEM III/A in Abhängigkeit des w/z-Wertes

7.3.5. Zusammenfassung

Die Herstellung von R-Zement unter Verwendung von Betonrecycling-Material konnte nicht nur im Labor- und Technikumsmaßstab sondern auch in einem Produktionsversuch erfolgreich durchgeführt werden. Die anschließende Charakterisierung des R-Zements hat gezeigt, dass die Normanforderungen nach DIN EN 197 erfüllt werden. Darüber hinaus haben alle mit dem RC-Mehl aus dem Technikumsmaßstab hergestellten Betone die relevanten normative Anforderungen hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften erfüllt, außer einiger Grenzwerte der Frost- und Frost-Tausalz-Anforderungen XF3 und XF4, die von manchen Betonen nicht erreicht werden können. Die Betone mit dem R-Zement des Produktionsversuchs, haben alle untersuchten Anforderungen erreicht. Somit dürfte, nach ggf. kleinen Anpassungen der Zusammensetzung, der Zulassung eines R-Zements aufgrund der Eigenschaften nichts im Wege stehen.

Zur Herstellung des Demonstrators wurde R-Zement aus dem Produktionsversuch zum ibac der RWTH Aachen geliefert.

Für die Erwirkung einer Zulassung eines neuen Zements beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) sind eine Vielzahl von Information und Prüfungen notwendig. Neben Zusammensetzung, Herkunft und Eigenschaften der Ausgangsstoffe muss mit diesen ein Produktionsversuch im Werk durchgeführt und begleitet werden. Der unter pessimalen Bedingungen hergestellte Zement muss anschließend nach DIN EN 196 charakterisiert werden. Weiterhin sind Prüfungen zum Frostwiderstand und Frost-Tausalzwiderstand im Beton notwendig. Soll zusätzlich die Anrechenbarkeit von Flugasche für diesen Zement möglich sein, müssen verschiedene Flugaschen nach DIN EN 450 charakterisiert und im Anschluss weitere Untersuchungen bezüglich der Dauerhaftigkeit im Beton (Frostwiderstand, Frost-Tausalzwiderstand, Karbonatisierung) durchgeführt werden.

Die Zementeigenschaften nach DIN EN 196 wurden an allen hergestellten Mischzementen bestimmt. Neben den Betonversuchen zur Dauerhaftigkeit mit zwei R-Zementen der Technikumsmahlung werden auch mit Zementen des Produktionsversuches Zement- und Betonversuche in Anlehnung an eine Zulassung des DIBt durchgeführt.

8. AP 4.1 – Kreislauffähigkeit (ibac)

8.1. Betonbruch und Fasern (ibac)

Zur Überprüfung der Recyclingfähigkeit der entstandenen Produkte wurden die in AP 2.1 und AP 2.2 entwickelten Rezepturen finalisiert, und die entstandenen Probekörper werden mit unterschied-

lichen Methoden (Brechern, Mahlen) in dem in AP 4.2 entwickelten Faserstand zerkleinert. Der Aufschlussgrad wurde bestimmt und mögliche Separations- bzw. Weiterverwertungsoptionen durch Herstellung von neuen Probekörpern überprüft.



Bild 80: Probe aus dem Faserstand

Die hergestellten Proben mit den eingesetzten Stapelfasern waren zu 100 % trennbar und konnten in neu hergestellten Probekörpern erneut eingesetzt werden. Eine Probe mit herausstehender Stapelfaser als Restprobe aus dem Faserstand ist in Bild 80 dargestellt. Selbst bei der Nutzung des Backenbrechers konnte der Betonbruch gut von den Carbonfasern getrennt werden. Mit den erneut hergestellten Proben könnten ähnliche Festigkeiten wie in AP 3.1 erreicht werden. Im Rahmen des zweiten Demonstrators „Kanu“ wurde ebenfalls die Kreislauffähigkeit überprüft. Hierbei wurde die Recyclingfähigkeit von besandeten Carbontextilien in einer R-Zement/RC-Beton-Matrix untersucht. Auch hier ist eine vollständige Trennung von Textil und Betonmatrix möglich.

Die Glasfaserfraktion konnte bereits im ersten Recyclingschritt nicht abgetrennt und nicht mehr statisch wirksam eingesetzt werden. Auch die pyrolysierten Einzelfasern sind nur begrenzt trennbar, was mit dem feinen Durchmesser der Fasern zu begründen ist. Ein Mehrfachrecycling dieser Faser ist damit nicht möglich.

Der Betonbruch kann dagegen mehrfach recycelt werden; sowohl bei dem Einsatz der Mischfraktion von Glasfasertextilbeton, als auch beim Betonbruch mit enthaltenen Carbonkurzfasern konnte die Unschädlichkeit nachgewiesen werden. Demnach hat der Einsatz von Textilbetonbruch bei der Herstellung von „Neubeton“ keinen negativen Einfluss auf die Frisch- und Festbetonkennwerte.

Die Kreislauffähigkeit ist für alle Betonbruchfraktionen, der Feinfraktion und den Carbon-(Stapelfasern)-Fasern nachgewiesen.

8.2. Kreislauffähigkeit CPC-Elemente (holcim)

Um die gesamte Kreislauffähigkeit der CPC Elemente zu berücksichtigen, wurde der Einsatz der gewonnenen Körnungen 4/8 und 8/16 im Beton geprüft. Dazu wurde die Rezeptur eines C35/45 aus einem Fertigteilwerk verwendet. Die Menge von 40 M.-% RC-Gesteinskörnung ergab sich aus der Nachbildung der Originalsieblinie (siehe Bild 81).

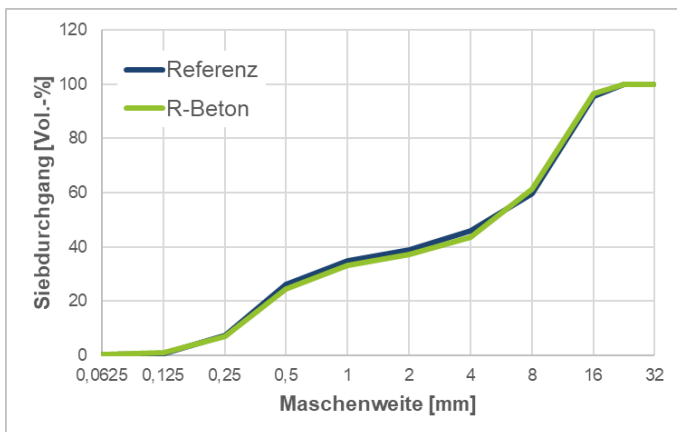


Bild 81: Originalsieblinie des C35/45 sowie mit RC-Gesteinskörnung

Die Frischbetoneigenschaften der beiden Betone waren vergleichbar. Die Festbetoneigenschaften sowie die Abwitterung im CDF-Test sind in Bild 82 zu finden. Abgesehen von einer leicht höheren Abwitterung bei der Prüfung des Frost Widerstandes weist der R-Beton mit CPC-RC Gesteinskörnung gleichwertige Eigenschaften auf wie die Referenz.

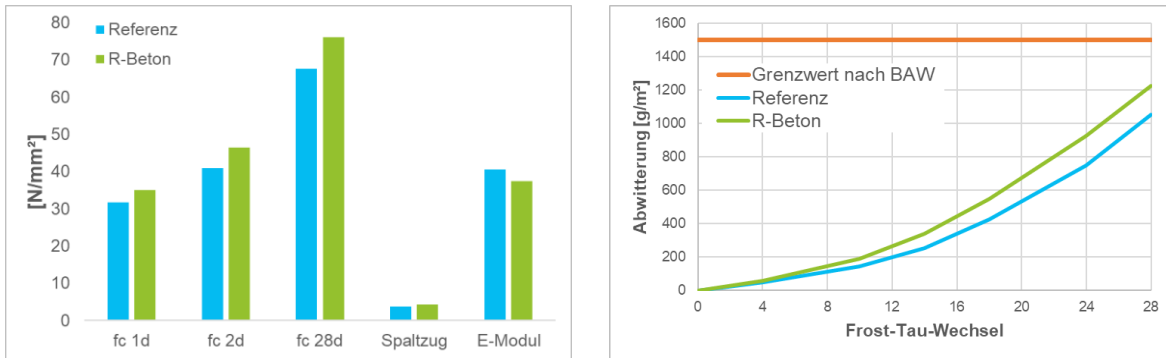


Bild 82: Eigenschaften des R-Betons mit CPC sowie der Referenz: links: Festbetoneigenschaften; rechts: Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel

9. AP 4.2 - Arbeits- und Gesundheitsschutz (ibac)

Die in 2.2 und 2.4 hergestellten Probekörper wurden in diesem Arbeitspaket mit unterschiedlichen Bearbeitungseinheiten in einem im Rahmen des Projektes entwickelten Fasermessstand zerkleinert und die jeweilige Faserfreisetzung untersucht. Ziel war es, jede mögliche Belastung bzw. Freisetzung darstellen, welche innerhalb des Lebenszyklus am Bauteil zu erwarten ist (Brechern, Mahlen, Fräsen und weitere). Hierbei wurden hauptsächlich aufgearbeitete Carbonfasern, welche mittels Pyrolyse von ihrer Schlichte getrennt wurden, betrachtet. Speziell für diese Fasern wurde im Vorfeld eine mögliche Entstehung von WHO-Fasern diskutiert. Daher wurde diese genauer untersucht. Da die ursprüngliche Faser eine Dicke von 6-7 μm hat, können lungengängige Fasern nur durch eine Spaltung längs der Faserachse entstehen. Da die Faserspaltung hierbei nach mehreren Recycling-schritten unterschiedlich ausfallen kann, wurden aus dem aufgebrochenen Material erneut Probekörper hergestellt und diese wiederum bearbeitet bzw. geprüft.

Auch alternativ hergestellte Carbonfaserrovings aus Lignin wurden in diesem Zuge mit untersucht. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird zusätzlich zu den recycelten und pyrolysierten Carbonfasern, Glasfasertextilbeton untersucht. Da sich dieser Bruch, anders als die meisten Carbontextilien, nicht sortenrein aufarbeiten lässt, entsteht beim Recycling ein Mischbruch. Folglich ist in jeder Körnungsfraction Glaserfaser bzw. Glasfaserbruch vorhanden. Um explizit auch die Feinfraktion mit zu untersuchen, wurden Probekörper mit 100 % recycelter Glasfaserbeton-Gesteinskörnung hergestellt, wobei der Anteil < 2 mm ebenfalls ersetzt wurde. Durch teilweise künstliche Alterung der Probekörper (Temperaturbeaufschlagung und Carbonatisierung) wurde zusätzlich dieser mögliche Einfluss auf die Faserfreisetzung mit abgedeckt.

9.1. Versuchsstand zur Untersuchung der Faserfreisetzung

Der multifunktionale Fasermessstand zur Bearbeitung des AP4.2. wurde entworfen und aufgebaut. Eine schematische Darstellung kann Bild 83 entnommen werden.

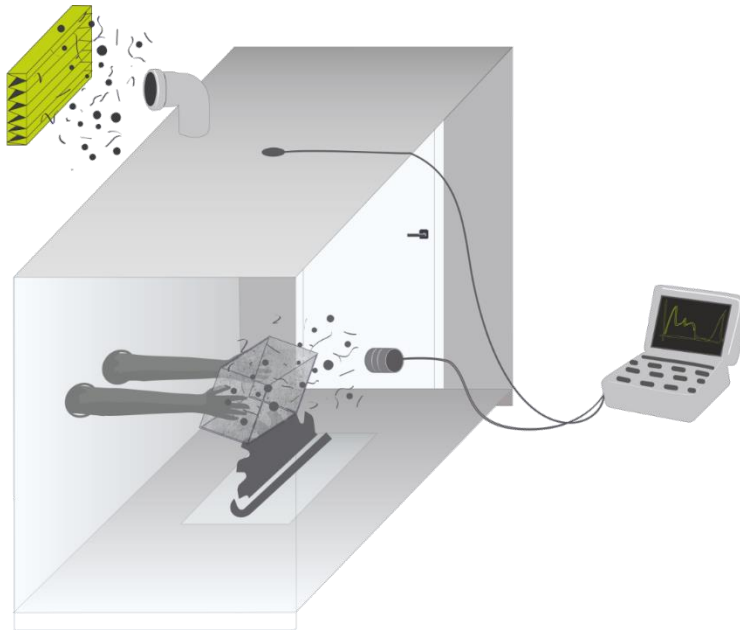


Bild 83: Schematische Darstellung des Versuchsstandes zur Faserfreisetzung

Bei dem Fasermessstand handelt es sich um einen abgedichteten Raum mit den Innenmaßen 200,5 cm x 147 cm x 96,5 cm (H x B x T). Dies entspricht einem Arbeitsraum von etwa 2,84 m³. Für unterschiedliche Arbeitsschritte und Probekörper kann die Einrichtung angepasst werden. So können Bearbeitungseinheiten wie Backenbrecher, Schleifer, Sägen und weitere in Anlehnung an DIN EN 1009-3:2020 [4] eingebaut und betrieben werden. Zusätzlich können die Probekörper mittels der in DIN 52108 geregelten Verschleißprüfung nach Böhme [5] auf die Faserfreisetzung untersucht werden. Während der genormten Prüfung können Staub- und Luftproben gewonnen werden. An zwei Seiten wird der Zugriff über eingebaute Handschuhe ermöglicht. Somit können die Probekörper isoliert ohne Faserexposition bearbeitet werden. Zur Reinigung des Fasermessstandes werden mittels eines Sicherheitssaugers der Staubklasse H und unter Beachtung der Zusatzanforderung für Asbest die restlichen Faser- und Staubpartikel abgesaugt. Somit kann nach Beendigung der Versuche die Bearbeitungseinheit zeitnah gewechselt werden.

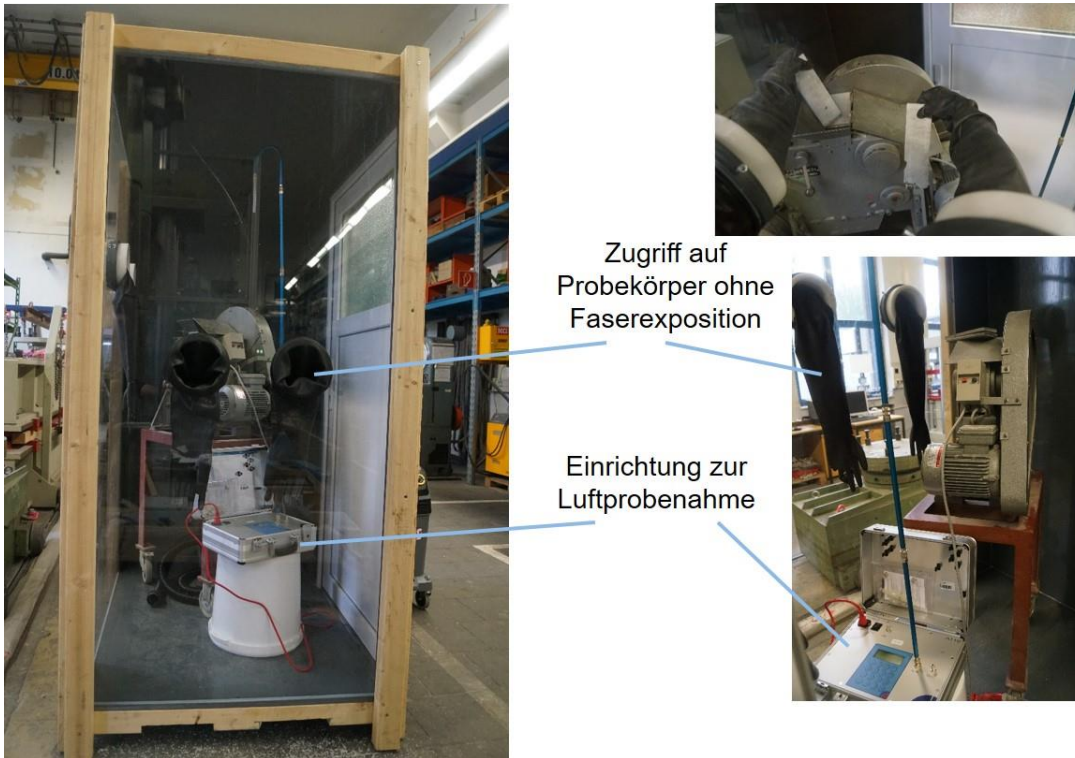


Bild 84: Faserstand mit Backenbrecher und Einrichtung zur Luftprobenahme

9.2. Luftprobennahme im Faserstand

Um die Raumluft während der verschiedenen Arbeitsschritte zu untersuchen, wurde ein Luftprobenentnahmegesetz der Firma Honold installiert. Die Messungen erfolgten in unterschiedlichen Höhen und an verschiedenen Stellen des Arbeitsraums. So können in Anlehnung an die Richtlinien für die Raumluft-Untersuchung (VDI 4300er [6]) Luftproben entnommen werden. Zudem ist es möglich, Dauer und Volumen der Probenahme individuell einzustellen und bei konstanter Flussrate Raumluftproben zu entnehmen, um diese auf WHO-Fasern zu untersuchen.

Die Entnahme und Auswertung erfolgt in Anlehnung an die Richtlinien VDI 3492 [7] und ISO 14966 [8], welche vor allem für Asbestanalysen verwendet werden. In der Richtlinie VDI 3492 [7] wird die Bestimmung von Faserzahlkonzentrationen in Innenraum- und Außenluft, wie auch die Zuordnung der Faserklasse beschrieben. Hierfür wird das REM/EDXA-Verfahren eingesetzt. Die Faserzahlkonzentration in der Luft ergibt sich aus dem Zählergebnis der Filterfläche und dem angesaugten Probenluftvolumen.

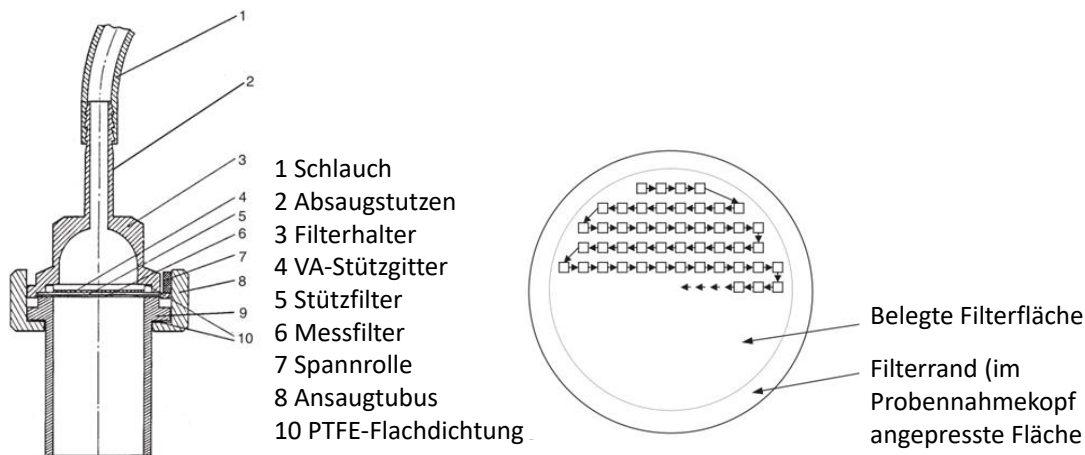


Bild 85: Aufbau einen Probennahmekopfes links und Verteilung der Bildfelder bei der Auswertung des Messfilters rechts nach [7].

Bei dem Messfilter handelt es sich um einen mit Gold bedampften Kernporenfilter, der Stützfilter ist ein Membranfilter. Diese Filter werden in einem Monitor, siehe Bild 85 links, eingebaut, welcher im Faserstand auf dem vorhandenen Luftprobenentnahmegerät angebracht wird. Abweichend zur vorgeschriebenen Probenahmedauer wird hier die Probenahme auf die Betriebszeit reduziert, da vor allem die Fasereexposition während der Bearbeitung betrachtet werden soll. Die Probenahme erfolgt in Arbeitshöhe und zusätzlich direkt an dem Bearbeitungsgerät. Der Volumenstrom wird so eingestellt, dass innerhalb von 2 min pro Quadratzentimeter effektiver Filterfläche und pro Minute ein Luftvolumenstrom von 2 l vorliegt. Bei kleinen Raumvolumina ist zu beachten, dass das Probenvolumen maximal 1/10 des Raumvolumens betragen darf, da andernfalls durch das Probenahmegerät ein "Saugeffekt" entsteht und das Ergebnis verfälscht werden kann. Dies entspricht in dem vorliegenden Faserstand einem insgesamt maximalen Probenvolumen von etwa 280 Litern. Der Filter wird unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abweichend von den in den Richtlinien vorgegebenen Verfahren bei der Untersuchung von Asbest wurde hier auf eine Kaltveraschung verzichtet, da organische Bestandteile in dem Aufbau dieses Prüfstandes nicht, beziehungsweise in vernachlässigbarer Menge aufzufinden sind. Dies konnte durch mehrere REM-Aufnahmen Auswertungen bestätigt werden. Die Faserzählung erfolgt bei Vergrößerungen von 2000:1 bis 2500:1. Die Teilflächen werden mäanderförmig zusammengesetzt, siehe Bild 85, rechts. Dabei sind die Zählregeln nach [8] zu beachten. Die Ausmessung der einzelnen Fasern wird mit einer Vergrößerung von 10.000:1 durchgeführt. Die Beschleunigungsspannung liegt bei 15 kV. Anschließend können die Fasern klassifiziert werden. Dies erfolgt durch die Röntgenspektren, welche mit energiedispersiver Röntgenanalyse gemessen werden. [7]

Wie oben erwähnt wurden im Faserstand wurden hauptsächlich pyrolysierte Carbonfasern betrachtet. Da das Bruchverhalten der Faser nach mehreren Recyclingschritten unterschiedlich ausfallen

könnte, wurden aus dem aufgebrochenen Material erneut Probekörper hergestellt und diese wiederum bearbeitet bzw. geprüft.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde zusätzlich zu den Betonen mit recycelten und pyrolysierten Carbonfasern Glasfasertextilbeton untersucht. Anders als die meisten Carbontextilbetone ließen sich die hier untersuchten Glasfasertextilbetone nicht sortenrein trennen. Es entstand beim Recycling ein Mischbruch, bei dem in jeder Kornfraktion Glasfaser bzw. Glasfaserbruch vorhanden war. Um explizit auch die Feinfraktion (< 2 mm) mit zu untersuchen, wurden Probekörper mit 100 % recycelter Glasfaserbeton-Gesteinskörnung hergestellt. Durch künstliche Alterung einiger Probekörper (Temperaturbeaufschlagung und Carbonatisierung) wurde zusätzlich ein möglicher Einfluss auf die Faserfreisetzung, bzw. das Bruchverhalten der Faser, mit abgedeckt.

9.3. Ergebnisse und Auswertung

Bild 85 und Bild 86 zeigen Staubproben, die im ersten Arbeitsgang bei der Bearbeitung der wiedergewonnenen Recycling-Carbongelege mittels Textilschere entstanden sind. Die Aufnahmen erfolgten mittels Auflichtmikroskopie in bis zu 20-facher Vergrößerung. Die Bilder zeigen das typische granuläre Bruchverhalten [1], welches von PAN-basierten Carbonfasern zu erwarten ist. In der Auszählung konnten keine WHO-Fasern gefunden werden. Es ist zu beachten, dass diese Gelege nicht pyrolysiert wurden.



Bild 86: Carbonstaubprobe eines recycelten Carbongeleges

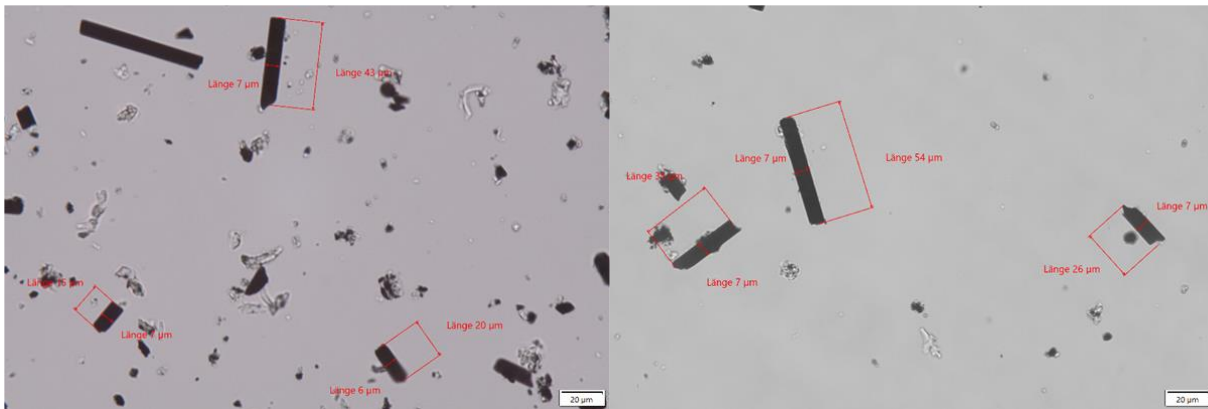


Bild 87: Bildausschnitt der Faserbemessung der Probe aus Bild 85

In einer weiteren Untersuchung wurde die Faserfreisetzung bei der Bestimmung des Abriebwiderstandes nach Böhm [5] geprüft. Hierbei wurden die in Bild 42 abgebildeten pyrolysierten Kurzfasern in einer maximalen Zugabe von 2 Vol.-% in Prüfbeton hergestellt, aufgearbeitet und schließlich in einem Alter von 28 Tagen geprüft. Bei der Bestimmung des Schleifwiderstandes wurden sowohl Staubproben von der Böhmscheibenoberfläche (siehe Bild 88) als auch Luftstaubproben in etwa 10 cm Entfernung des Schleifschuhes während des Schleifvorgangs entnommen und untersucht.

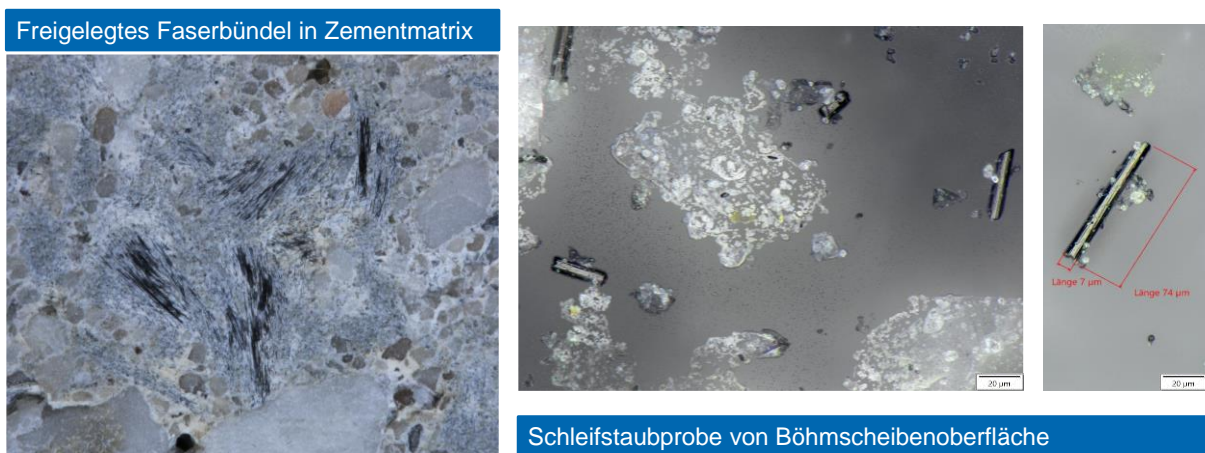


Bild 88: Faserfreisetzung bei der Bearbeitung mittels Schleifscheibe nach Böhm (Prüfung des Abriebwiderstand)

In Bild 88, links, sind Faserbündel dargestellt, welche nach der Schleifbearbeitung freigelegt wurden. Rechts sind Auflichtmikroskopieaufnahmen der gewonnenen Schleifstaubproben dargestellt. Hierbei sind die enthaltenen Carbonfasern deutlich erkennbar und messbar. In der Staubprobe konnten keine Carbonpartikel mit einem Durchmesser $< 5 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden.

Bild 89 zeigt REM-Aufnahmen von Luftstaubproben, die bei der Bestimmung des Schleifwiderstandes der pyrolysierten Einzelfasern entstanden sind. Dabei sind die Carbonbruchstücke deutlich zu

erkennen. Auch hier ist ein granulärer Bruch festzustellen und kein splitterndes Bruchverhalten längs zur Faser.

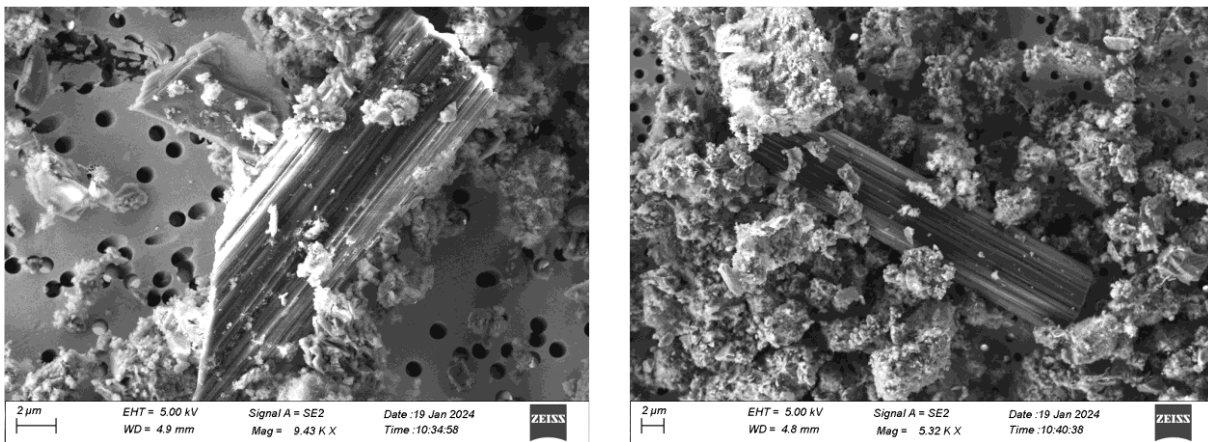


Bild 89: REM-Aufnahmen der in Bild 88 erhaltenen Staubproben

9.4. Bruchverhalten der Fasern

In Bild 90 sind verschiedene detektierte Bruchmechanismen von Carbonfasern in schematischen Darstellungen (oben) und entsprechenden rasterelektronenmikroskopischen (REM) Bildern (unten) dargestellt. Das Bruchverhalten der Carbonfasern zeigte eine hohe Variabilität, ohne dass ein eindeutiger Zusammenhang mit bestimmten Bearbeitungsprozessen oder Fasertypen festgestellt werden konnte. Die Belastungen auf die einzelnen Filamente variieren offenbar stark während der Bearbeitung.

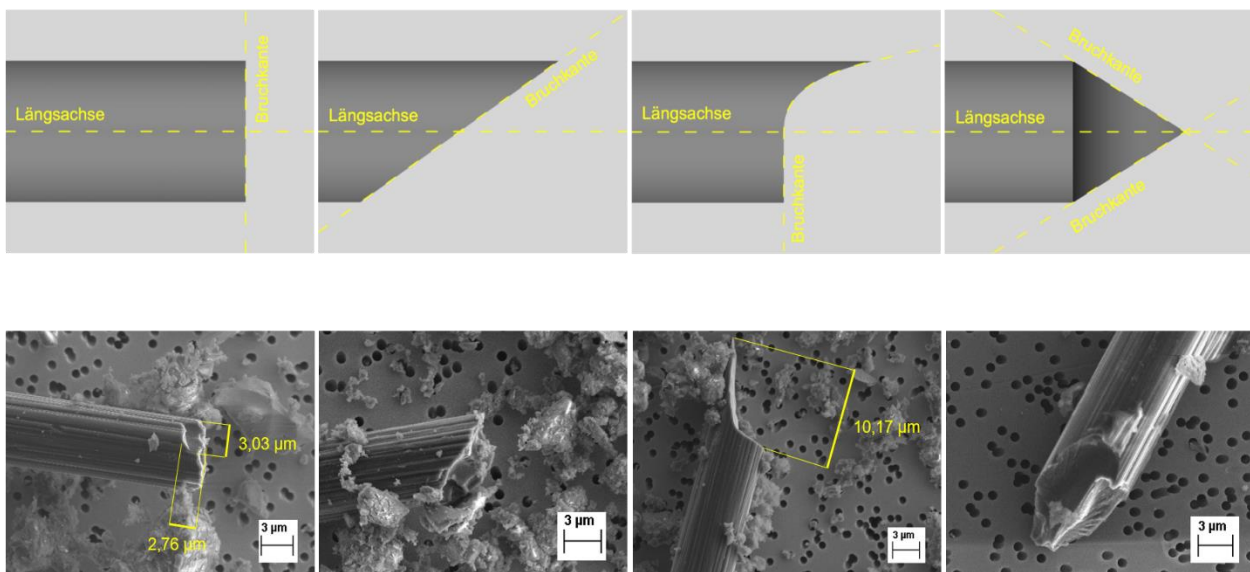


Bild 90: Verschiedene Bruchverhalten der Fasern

Die Abspaltung von granulären Bruchstücken an den Bruchflächen, die nach den WHO-Kriterien keine gesundheitsgefährdende Relevanz haben, beeinflusst die Ausprägung der verschiedenen Bruchmechanismen.

Die Beobachtungen zeigen, dass unterschiedliche Belastungsrichtungen auf die Filamente zu unterschiedlichen Bruchmechanismen führen. So entsteht bei einer Belastung senkrecht zur Faserachse ein anderer Bruchmechanismus als bei einer Belastung parallel zur Faserachse. Aufgrund der ungerichteten Anordnung der Fasern in der Betonmatrix und der unbestimmten Einflüsse der Bearbeitungsprozesse lässt sich die genaue Belastung der Filamente jedoch nicht eindeutig bestimmen.

Das Bruchverhalten der Carbonfasern wird nicht nur durch die verschiedenen Bruchmechanismen, sondern auch durch die Oberflächenbeschaffenheit der Bruchflächen geprägt. Diese kann entweder glatt und bündig oder rau und strukturiert sein. Beide Arten der Oberflächenbeschaffenheit treten unabhängig von den verwendeten Carbonfasern, den Bearbeitungsprozessen oder den Bruchmechanismen auf.

Daraus lässt sich schließen, dass die Oberflächenbeschaffenheit – ähnlich wie die Bruchmechanismen – durch die spezifische Belastung der Filamente während des Bearbeitungsprozesses entsteht. Die REM-Aufnahmen der pyrolisierten Carbonfasern nach dem Bearbeitungsprozess Vollbohren, wie in Bild 91 dargestellt, verdeutlichen den Vergleich zwischen den unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten.

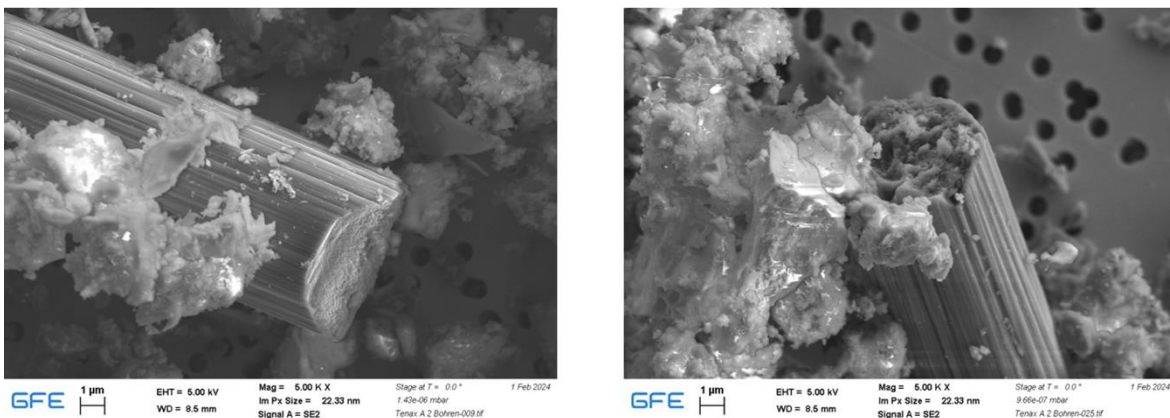


Bild 91: Vergleich zwischen einer glatten und einer rauen Oberfläche der Bruchfläche

9.5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den im Rahmen des Projektes vorgestellten Versuchsaufbauten wurden Faseremissionen im Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozess von Carbonbeton-Rezyklaten erfasst und bewertet. Es

konnten keine Carbonfasern, die den WHO-Kriterien entsprechen identifiziert werden. Der Einsatz einer PSA wird dennoch dringend empfohlen, da bei den Prozessen in erheblichem Umfang feinkörniger Quarzstaub freigesetzt wird, der ebenfalls gesundheitsschädigend ist.

Bei Verwendung neuer Rohstoffe zur Herstellung der Carbonfasern sind analoge Untersuchungen notwendig, um sicherzustellen, dass keine Längsbrüche entlang der Faserachse auftreten. Für diese Untersuchungen wäre eine (Teil-)Automatisierung der Filterauswertung wie sie von Mattenklott [9] vorgeschlagen wird, sinnvoll. Zusätzlich kann dadurch die Ungenauigkeit reduziert werden, die aus der geringen Fasermenge resultiert. Außerdem könnte die Auswertbarkeit gemischter Filterbelegungen verbessert werden.

10. AP 4.3/AP 4.4 – Nachhaltigkeitsbewertung LCA und Soziologische Analyse (INaB)

Ziel von AP 4.3 im Projekt FaBeR war die ökologische und ökonomische Bewertung der entwickelten Demonstratoren (Industriefußboden und RC-Zement) aus dem Recycling von Carbonbeton. Hierfür wurden während des Projekts in Iteration mit den Projektpartnern ökologisch und ökonomisch relevante Daten (primär und sekundär) aufgenommen. Diese dienten als Grundlage zur Durchführung der Ökobilanzen und Lebenszykluskostenrechnungen für die beiden Demonstratoren. Die aus der Analyse gewonnen Erkenntnisse helfen dabei, ökologische und ökonomische Hotspots zu identifizieren und eine nachhaltige Entwicklung des Recyclingmaterials zu gewährleisten. Die Ergebnisse zu dem Demonstrator Industriefußboden wurden im September 2023 in Form eines Posters auf der 11th International Conference on Life Cycle Management“ vorgestellt sowie in einer Open-Access-Publikation im Journal of Cleaner Production veröffentlicht

(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139853>).

Im Folgenden werden die Ökobilanzen und Lebenszykluskostenrechnungen für den Industriefußboden (Kapitel 4.3.1) und den RC-Zement (Kapitel 4.3.2) vorgestellt.

10.1. Industriefußboden: Erläuterung der Vorgehensweise

Der erste betrachtete Demonstrator war ein Industriefußboden aus RC-Beton mit recycelten Carbonfasern (Carbon Reinforced Concrete, CRC). Aufgrund der Neuheit und Langlebigkeit von CRC stand für das Projekt nur ungenutzte CRC-Abfälle aus der Produktion zur Verfügung (Post-Production). Die Analyse beruht Großteils auf den vom AMR (RWTH) und ibac (RWTH) zur Verfügung gestellten Daten.

Der Recyclingprozess begann mit der Zerkleinerung des CRC-Produktionsabfälle mit einem Backenbrecher und einer Hammermühle und der Trennung der Betonmatrix von dem Carbongelege. Weiter genutzt zur Demonstratorherstellung wurde sowohl die Betonfraktion (Korngröße 2/4) als auch die Carbonfaserfraktion.

Für die Betonfraktion (2/4) wurde eine Transportentfernung von 3 km zur Produktionsanlage von R-CRC angesetzt. Da die Wiederverwendung beschädigter Carbongelege nicht möglich ist, wurden diese zu einer Kurzfaserbewehrung verarbeitet. Hierzu wird das Material zunächst pyrolysiert, um die Beschichtung zu entfernen. Der Transport zur entsprechenden Anlage wurde auf ca. 500 km abgeschätzt. Dort erfolgte nach dem Pyrolyseprozess auch der Zuschnitt der Fasern auf eine bestimmte Länge. Anschließend wurden die Carbonfasern über die gleiche Strecke zur Produktionsstätte transportiert, wo sie mit der Betonfraktion und den benötigten Ausgangsstoffen (Kies, CEM III A, 42,5 R, Flugasche und Fließmittel) vermischt wurden. Die Carbonfasern ersetzen Stahlfasern und der gebrochene Beton (2/4) ersetzt 80 % des ursprünglich benötigten Kieses. Die Performance des Industriefußbodens war gleichwertig mit einem Industriefußboden mit Stahlfasern. Daher konnte 1 m³ Beton als funktionelle Einheit gewählt werden. Alle Prozessschritte haben in Deutschland stattgefunden.

10.2. Ökobilanz

Ökobilanzen beurteilen Input- und Outputflüsse eines Produktionssystems im Verlauf seines Lebensweges hinsichtlich potentieller Umweltauswirkungen. Eine Ökobilanz lässt sich generell in vier Schritte unterteilen: Ziel und Untersuchungsrahmen (1), Sachbilanz (2), Wirkungsabschätzung (3) und Auswertung.

(1) Ziel und Untersuchungsrahmen:

Die Ökobilanz wurde basierend auf der ISO 14040/44 unter Verwendung von GaBi Professional[®] durchgeführt, um die Umweltleistung der Industriefußbodenproduktion aus recyceltem CRC-Abfälle zu bewerten. Die betrachtete funktionelle Einheit (Functional Unit, FU) wurde definiert als 1 m³ Beton aus recyceltem CRC-Abfälle (Post-Production) zur Verwendung als Industrieboden in einem Lagerhaus mit einer erwarteten Lebensdauer von 50 Jahren. Die recycelten Carbonkurzfasern waren in eine Betonmatrix eingebettet und können daher, wie in Abschnitt 5 dargestellt, am Lebensende nicht separat zurückgewonnen werden.

Die Systemgrenzen der Studie wurden wie in Bild 92 definiert. Die Prozessschritte, die in die Systemgrenzen einbezogen wurden, waren (auf Labormaßstab) die Zerkleinerung der Carbonbetonabfälle und Aufteilung in verschiedene Fraktionen, die Pyrolyse der Carbonfasern, der Zuschnitt der

Carbonfasern und die Mischung der Betonfraktion (2/4) mit Carbonfasern und notwendiger Primärrohstoffe. Für die Nebenprodukte (gebrochener Beton 0/2, gebrochener Beton >4, Restfraktion, Überschuss an Carbonfasern) wurde eine Massentallokation vorgenommen. Der Cut-Off Ansatz wurde für die Allokationen der Umweltlasten am Lebensende verwendet. Das bedeutet, dass die Auswirkungen des vorangegangenen und nachfolgenden Lebenszyklus nicht berücksichtigt wurden.

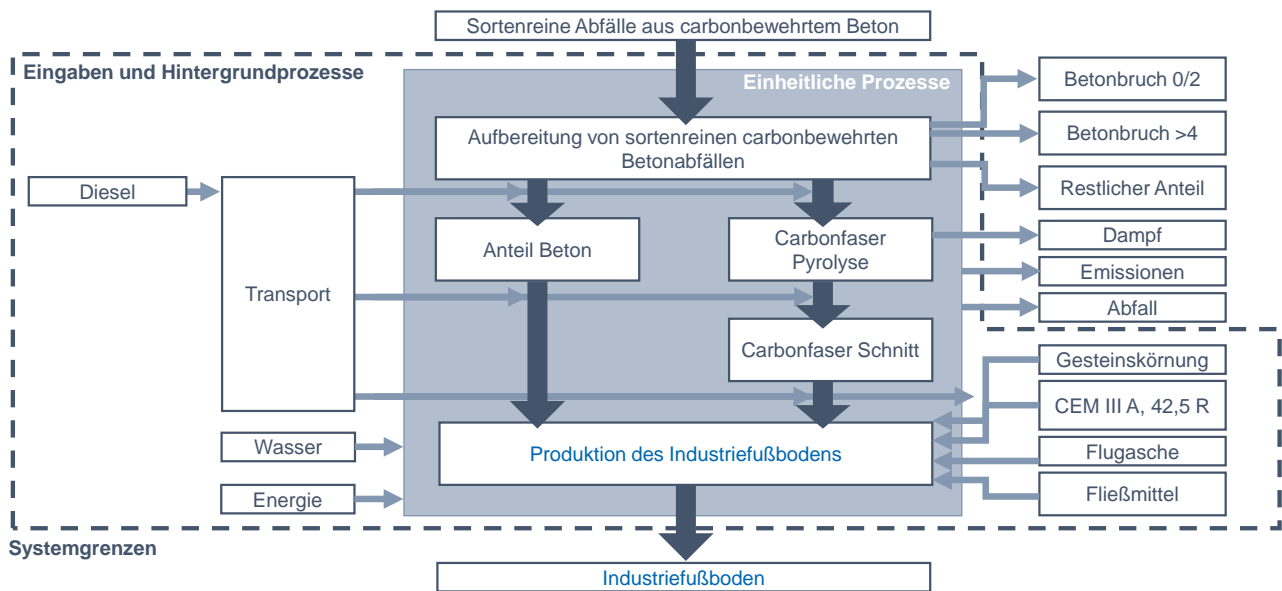


Bild 92: Systemgrenzen der Ökobilanz des Industriefußbodens

(2) Sachbilanz

Die Sachbilanz in der Ökobilanz umfasst die Datenerhebung. Die Daten für die Ökobilanz wurden, auf Grund der frühen Entwicklungsphase, Großteils für den Labormaßstab erhoben. Die Daten für die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Prozesse wurden von Projektpartnern und Kontakten aus der Industrie eingeholt. Fehlende Daten wurden aus der Literatur entnommen. Für Hintergrundprozesse (z.B. primäre Zementherstellung) wurde die Sphera® Professional Datenbank (2022) verwendet. Da die Industriefußbodenproduktion in Deutschland stattfand, wurden, soweit möglich, länderspezifische Daten verwendet. Die Sachbilanz sowie getroffene Annahmen sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Tabelle 22: Sachbilanz der Ökobilanz des Industriefußbodens

Arbeitsschritt	Input / Output Parameter		Einheit	Menge	Annahmen / Erläuterungen	Datenquelle
Verarbeitung von CRC-Produktionsabfällen	Input	CRC Produktionsabfälle	kg	1160,02	Aufgrund des verwendeten Cut-off-Ansatzes sind die CRC-Produktionsabfälle nicht mit Umweltbelastungen verbunden.	AMR (RWTH)
		Stromverbrauch	kWh	4,5803	Strom für Backenbrecher und Taumelsieb	AMR (RWTH)
	Output	Betonbruch > 4 mm	kg	5,20	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet.	AMR (RWTH)
		Betonbruch 2/4 mm	kg	530,64		-
		Betonbruch 0/2 mm	kg	568,94	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet.	AMR (RWTH)
		Gemischte Restfraktion	kg	35,8	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet.	AMR (RWTH)
		Carbonfasern	kg	11,32	-	AMR (RWTH)
Feinanteil	kg	8,12	Geschätzt von Experten (ca. 600g Verlust auf 90kg → ~0,7%); nicht leicht zu quantifizieren; Bereich: 0-30 µm.	AMR (RWTH)		
Transport von CRC-Abfällen	Entfernung		km	475	Transport innerhalb Deutschlands. Annahme Payload: 15 t.	Google Maps
Carbon Fasern: Pyrolyse	Input	Carbonfaserabfälle	kg	2000	Enthält den Faseranteil im Abfallstrom und die Harzmasse (~1 t), die überwiegend zu CO ₂ oxidiert wird.	Industriekontakt
		Stromverbrauch	kWh	7	Strom für die Nachreinigung/Trennung von CF (z. B. Glasfaserentfernung, Dichtentrennung).	Industriekontakt
		Stromverbrauch Abgase	kWh	85	Energieverbrauch für die Einleitung der Pyrolyse und die Nachverbrennung des Abgases.	Industriekontakt
		Salzwasser	kg	20	Salzgehalt 5%	Industriekontakt
	Output	R-carbon fibers	kg	833	-	Industriekontakt

Arbeitsschritt	Input / Output Parameter	Einheit	Menge	Annahmen / Erläuterungen	Datenquelle	
	Abfall	kg	167	Enthält z.B. gefilterte Partikel (Restmüll, fest, unschädlich → Deponie wird angenommen), Gutschrift für Strom wird nicht	Industriekontakt	
	CO ₂	kg	2500	-	Industriekontakt	
	H ₂ O (gasförmig)	kg	20	-	Industriekontakt	
Schneiden der Carbonfasern	Input	R-carbon Fasern	kg	1000	-	Industriekontakt
		Stromverbrauch	kWh	75	-	Industriekontakt
	Output	Carbonfasern mit bestimmter Länge	kg	950	-	Industriekontakt
		Abfall	kg	50	Kürzere Faserfraktion, die in das Extraktionssystem gelangt.	Industriekontakt
Transport von Carbonfasern mit bestimmter Länge	Entfernung	km	475	Transport innerhalb Deutschlands. Annahme Payload: 15 t.	Google Maps	
Transport der Betonfraktion (2/4)	Entfernung	km	3	Transport innerhalb Deutschlands. Annahme Payload: 15 t.	Google Maps	
Transport von Gesteinskörnung	Entfernung	km	25	Transport innerhalb Deutschlands. Annahme Payload: 15 t.	Google maps	
Herstellung Industriefußboden	Input	Zerkleinerter Beton 2/4	kg	1322	Die Aggregate bestehen zu 80 % aus recyceltem Beton (2/4) und zu 20 % aus Kies.	ibac RWTH
		Aggregate (Gesteinskörnung)	kg	330,5	Die Aggregate bestehen zu 80 % aus recyceltem Beton (2/4) und zu 20 % aus Kies.	ibac RWTH
		Carbonfasern mit bestimmter Länge	kg	6	Der endgültige Fasergehalt wurde zum Studienzeitpunkt auf 4-8 kg geschätzt.	ibac RWTH
		CEM III A, 42.5 R	kg	280	-	ibac RWTH
		Flugasche	kg	95	-	ibac RWTH
		Leitungswasser	kg	160	-	ibac RWTH

Arbeitsschritt	Input / Output Parameter		Einheit	Menge	Annahmen / Erläuterungen	Daten- quelle
		Fließmittel	kg	9,8	PCE-Basis [3.5 M.-% vom Zement]	ibac RWTH
		Stromverbrauch	kWh	9,2	Quelle: Backes, Jana Gerta, Marzia Traverso, and Arpad Horvath. "Environmental assessment of a disruptive innovation: comparative cradle-to-gate life cycle assessments of carbon-reinforced concrete building component." <i>The In-</i>	[10]
	Output	Industriefußboden	m ³	1	-	ibac RWTH

(3) Wirkungsabschätzung

Die Ökobilanzsoftware GaBi Professional® wurde verwendet, um die Umweltauswirkungen von 1 m³ produziertem Industrieboden auf der Grundlage der Sachbilanz zu ermitteln. Zur Berechnung der Wirkungskategorien wurde die CML 2001-Aug. 2016 Methode verwendet. Die folgenden Midpoint Wirkungskategorien wurden betrachtet: Global Warming Potential (GWP) - Globales Erwärmungspotential, Abiotic Depletion Potential (ADP) - Potenzial zur Erschöpfung abiotischer Ressourcen, Acidification Potential (AP) - Versauerungspotential, Eutrophication Potential (EP) - Eutrophierungspotential, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP) - Ökotoxizitätspotential in Süßwasser-Ökosystemen, Human Toxicity Potential (HTP) - Humantoxizitätspotential, Marine Aquatic Toxicity Potential (MAETP) - Ökotoxizitätspotential in marinen Ökosystemen, Ozone Depletion Potential (ODP) - Ozonabbaupotential, Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) - Photochemisches Ozonbildungspotential und Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP) - Ökotoxizitätspotential in terrestrischen Ökosystemen. Neben dem Benchmark-Szenario (80 % Einsatz von recyceltem Beton und 20% Kies)), wurde ein Szenario betrachtet, bei welchem eine vollständige Substitution von Kies durch rezyklierte Gesteinskörnung (RC-GK) erreicht wurde (SV1).

Die Umweltauswirkungen wurden für jeden Prozessschritt bewertet. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 gegeben. Die neben den Recyclingmaterialien notwendigen und eingekauften Materialien, die für die Herstellung des Industriebodens benötigt werden, wurden separat betrachtet und umfassten Zement (CEM III/A 42,5), Fließmittel, Kies und Flugasche.

Wie in Bild 93 zu sehen ist, trugen die eingekauften Materialien bei weitem am meisten zu allen Umweltauswirkungskategorien bei (79-99 %). Die einzige Ausnahme war HTP. Bei HTP war die

Verarbeitung von CRC-Abfällen mit einem Anteil von 65 % (7,72 kg DBC-Äq.) in der regulären Produktion und 71 % (9,65 kg DBC-Äq.) in SV1 der größte Belastungsfaktor, während die zugekauften Materialien nur 33 % (3,97 kg DBC-Äq.) bzw. 28 % (3,80 kg DCB-Äq.) beitrugen. Dies lässt sich durch die hohe Menge an Feinstaub erklären, der in die Luft emittiert wurde. Bei den anderen Wirkungskategorien lag der Anteil der CRC-Abfallprozesse an den Gesamtauswirkungen bei 0,3-7 %. Anteile von über 5 % entfielen auf FAETP (SV1) und MAETP (beide Szenarien). Die Pyrolyse von Carbonfasern trug 0,01-13 % zu den Umweltauswirkungen bei, während der höchste Anteil des Schneidens von Carbonfasern an den Umweltauswirkungen 1,24 % für EP (beide Szenarien) betrug. Der Prozess der Herstellung der Industriefußböden selbst trug mit Anteilen von 0,1 bis 9 % zu den Emissionen bei, während der Transport der Materialien nicht mehr als 10 % ausmachte. Für POCP führte der Transport zu einem Wert von $1,02 \cdot 10^{-4}$ kg Ethen-Äq. ($-6,85 \cdot 10^{-5}$ kg Ethen-Äq. für SV1). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Transportprozessen ozonabbauendes Stickstoffoxid (NO) entsteht.

Das gesamte GWP betrug 164 kg CO₂-Äq. für die Produktion von 1 m³ Industriefußboden. Die Substitution aller natürlichen Gesteinskörnungen durch rezyklierten Beton führte zu einem etwas niedrigeren GWP von 1,59 E+02 kg CO₂-Äq. Allein 1,37 E+02 kg CO₂-Äq. (1,28 E+02 kg CO₂-Äq. für S1) stammten dabei von den zugekauften Materialien. Den zweithöchsten Beitrag zu dem GWP leistete die Carbonfaserpyrolyse mit 2,1 E+01 kg CO₂-Äq. Das Gesamt-EP betrug 2,79 E-02 kg Phosphat-Äq. für die reguläre Industriefußbodenproduktion und 2,68 E-02 kg Phosphat-Äq. für SV1. Auch hier setzten die eingekauften Materialien mit 2,43E-02 kg Phosphat-Äq. (2,31 E-02 kg Phosphat-Äq. für SV1) die höchsten Emissionen frei, gefolgt von der Carbonfaserpyrolyse mit 1,19 E-03 kg Phosphat-Äq. Die Industriefußbodenproduktion emittierte mit 1,11 E-03 kg Phosphat-Äq. fast genauso viel. Bei Betrachtung der HTP fällt auf, dass SV1 einen höheren Wert aufwies als die reguläre Produktion (1,4 E+01 kg DCB-Äq. vs. 1,2 E+01 kg DCB-Äq.). Wie bereits erwähnt, trug die Verarbeitung von CRC-Abfall am meisten zu den Auswirkungen auf die Humantoxizität bei, während die zugekauften Materialien den zweitgrößten Beitrag leisteten.

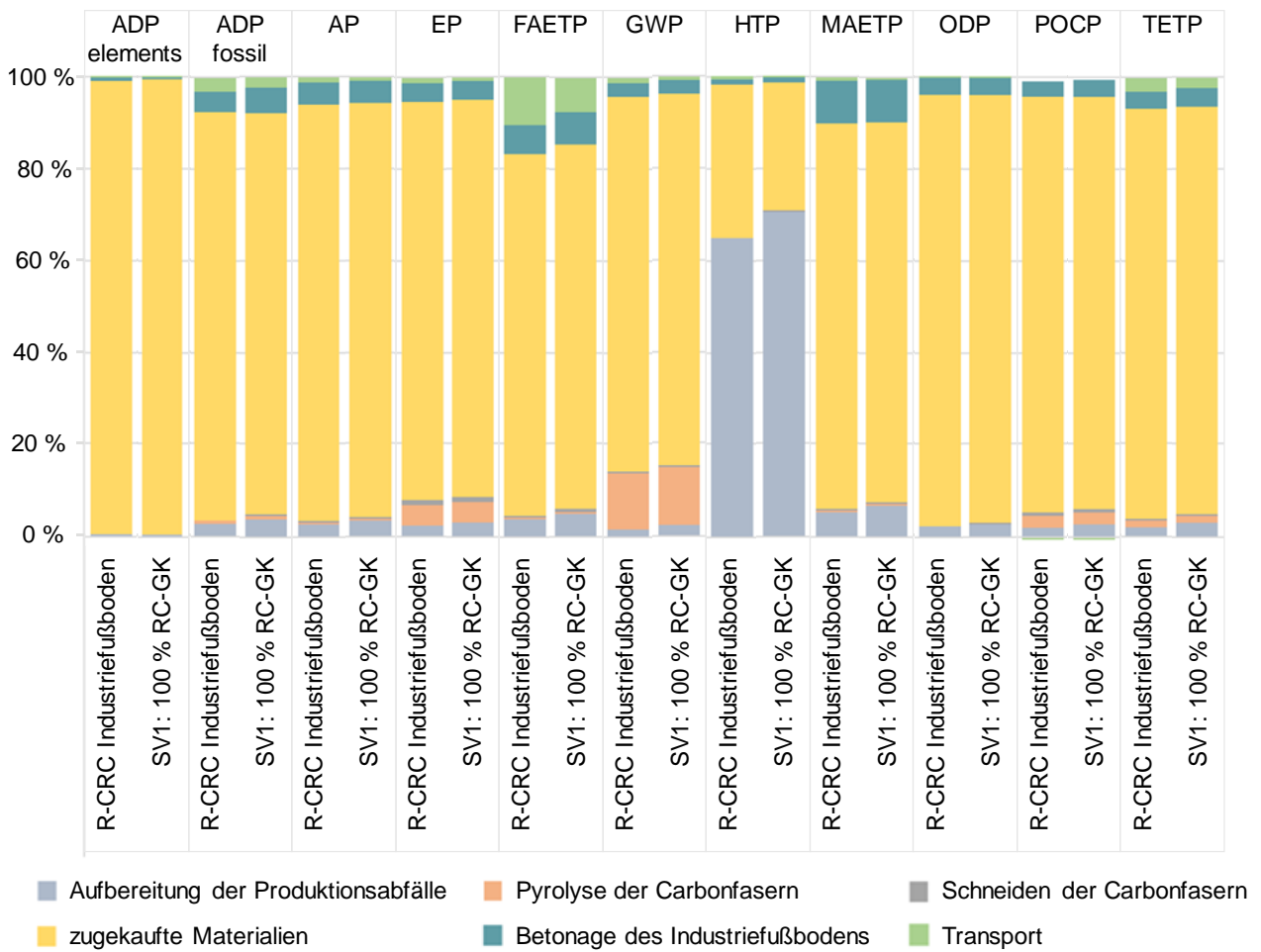


Bild 93: Ergebnisse der Ökobilanz von zwei Varianten des Industriefußbodens mit 80 bzw. 100 % rezyklierter Gesteinskörnung

Tabelle 23: Umweltauswirkung der Produktion von 1 m³ R-CRC Industriefußboden.

Arbeits-schritt	ADP _e	ADP _f	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
	kg Sb eq.	MJ	kg SO ₂ eq.	kg Phosphat eq.	kg DCB eq.	kg CO ₂ eq.	kg DCB eq.	kg DCB eq.	kg R11 eq.	kg Ethene eq.	kg DCB eq.
Verarbeitung von CRC Abfall	1,31 · 10 ⁻⁶	26,2	3,42 · 10 ⁻³	6,42 · 10 ⁻⁴	4,10 · 10 ⁻³	2,66	7,72	291	6,80 · 10 ⁻¹¹	2,37 · 10 ⁻⁴	3,00 · 10 ⁻³
Pyrolyse der Carbonfasern	5,60 · 10 ⁻⁸	6,14	4,49 · 10 ⁻⁴	1,19 · 10 ⁻³	3,89 · 10 ⁻⁴	20,6	8,13 · 10 ⁻³	11,1	8,18 · 10 ⁻¹³	3,16 · 10 ⁻⁴	1,96 · 10 ⁻³
Schneiden der Carbonfasern	1,21 · 10 ⁻⁷	2,59	3,80 · 10 ⁻⁴	3,45 · 10 ⁻⁴	4,33 · 10 ⁻⁴	56,2	8,63 · 10 ⁻³	27,8	6,17 · 10 ⁻¹²	9,50 · 10 ⁻⁵	6,48 · 10 ⁻⁴
zugekaufte Materialien	4,00 · 10 ⁻⁴	872	0,115	2,43 · 10 ⁻²	8,62 · 10 ⁻²	137	3,97	4500	2,99 · 10 ⁻⁹	1,08 · 10 ⁻²	0,129
Herstellung R-CRC Industriefußboden	2,23 · 10 ⁻⁶	44,7	5,83 · 10 ⁻³	1,11 · 10 ⁻³	7,18 · 10 ⁻³	4,54	0,153	497	1,16 · 10 ⁻¹⁰	4,05 · 10 ⁻⁴	5,30 · 10 ⁻³
Transport	2,36 · 10 ⁻⁷	28,6	1,63 · 10 ⁻³	3,55 · 10 ⁻⁴	1,13 · 10 ⁻²	2,13	3,83 · 10 ⁻²	33,8	5,22 · 10 ⁻¹³	-1,02 · 10 ⁻⁴	4,23 · 10 ⁻³
Gesamt	4,04 · 10 ⁻⁴	980	0,127	2,79 · 10 ⁻²	0,110	167	11,9	5370	3,18 · 10 ⁻⁹	1,18 · 10 ⁻²	0,144

Tabelle 24: Umweltauswirkung der Produktion von 1 m³ R-CRC Industriefußboden (100% Substitution Kies, SV1).

	ADP _e	ADP _f	AP	EP	FA- FTP	GWP	HTP	MA- FTP	ODP	POCP	TETP
	[kg Sb eq.]	[MJ]	[kg SO ₂]	[kg Phos-]	[kg DCB]	[kg CO ₂]	[kg DCB]	[kg DCB]	[kg R11]	[kg Ethen]	[kg DCB]
Verarbeitung von CRC Abfall	1.64E-06	3.27 E+01	4.27 E-03	8.03E-04	5.12 E-03	3.32E+00	9.65 E+00	3.64 E+02	8.51 E-11	2.96E-04	3.75E-03
Pyrolyse der Carbonfasern	5.60E-08	6.14 E+00	4.49 E-04	1.19E-03	3.89 E-04	2.06E+01	8.13 E-03	1.11 E+01	8.18 E-13	3.16E-04	1.96E-03
Schneiden der Carbonfasern	1.21E-07	2.59 E+00	3.80 E-04	3.45E-04	4.33 E-04	5.62E-01	8.63 E-03	2.78 E+01	6.17 E-12	9.50E-05	6.48E-04
Zugekaufte Materialien	3.99E-04	7.30 E+02	1.10 E-01	2.31E-02	8.06 E-02	1.28E+02	3.80 E+00	4.39 E+03	2.98 E-09	1.06E-02	1.12E-01
Herstellung R-CRC Industriefußboden	2.23E-06	4.47 E+01	5.83 E-03	1.11E-03	7.18 E-03	4.54E+00	1.53 E-01	4.97 E+02	1.16 E-10	4.05E-04	5.30E-03
Transport	1.59E-07	1.93 E+01	1.10 E-03	2.39E-04	7.64 E-03	1.43E+00	2.58 E-02	2.28 E+01	3.52 E-13	- 6.85E-05	2.85E-03
Gesamt	4.04E-04	8.35 E+02	1.22 E-01	2.68E-02	1.01 E-01	1.59E+02	1.36 E+01	5.32 E+03	3.19 E-09	1.16E-02	1.26E-01

10.3. Lebenszykluskostenrechnung Industriefußboden

Parallel zur Ökobilanz wurde eine Lebenszykluskostenrechnung für den Industriefußboden durchgeführt. Die Schritte, im Einklang mit denen der Ökobilanz, werden nachfolgend präsentiert.

(1) Ziel und Untersuchungsrahmen

Um die wirtschaftliche Performance des R-CRC-Industriebodens zu untersuchen, wurde parallel zur Ökobilanz eine Lebenszykluskostenrechnung gemäß [11] und [13] durchgeführt. Dafür wurde dieselbe funktionelle Einheit und äquivalente Systemgrenzen betrachtet. Die Studie basierte auf realen

Geldströmen. Es wurde die Produktperspektive des Industriefußbodens eingenommen (im Gegensatz zur Wahl der Perspektive eines bestimmten Akteurs in der Wertschöpfungskette). Folglich wurden Geldströme von Zwischenprodukten in der Studie nicht berücksichtigt.

Externe Effekte, also monetarisierte ökologische oder soziale Aspekte, wurden ausgeschlossen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

(2) Inventaranalyse der Kostendaten

Die Erhebung der Kostendaten erfolgte auf der Grundlage der Sachbilanz. Für die aufgelisteten Inputs und Outputs wurden tatsächliche Kostendaten für 2021/2022 ermittelt. Als zusätzlicher Kostenfaktor für die Lebenszykluskostenrechnung wurden Personalkosten identifiziert. Alle Kosteninformationen wurden für Deutschland erhoben, da alle Prozessschritte in Deutschland stattfanden. Da die Erhebung zuverlässiger Kostendaten im Labormaßstab schwierig ist, wurden Informationen von verschiedenen Institutionen eingeholt. Die Kostendaten wurden von Projektpartnern, Industriekontakten, offiziellen Preislisten von Unternehmen und Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis) bezogen. Die gesammelten Kosten und Annahmen sind in Tabelle 25 aufgeführt.

Tabelle 25: Gesammelten Kosten und Annahmen

Input / Output		Einheit	Kosten pro Einheit €/Einheit	Annahmen / Erläuterungen	Datenquelle
Input (Kosten)	CEM III A, 42.5 R	kg	0,125	-	cemex
	Stromverbrauch	kWh	0,2579	Jahresverbrauchsklasse 70.000 - 150.000 MWh, 2022	DESTATIS
	Emittiertes CO ₂	kg	0,03598	Steuer + ETS ("Emission Trading System"); Durchschnittspreis in 2021	OECD
	Flugasche	kg	0,0045	-	ibac RWTH
	Gesteinskörnung	kg	0,0214	Kies für Beton	Bernhard Glück Kies-Sand-Hartsteinsplitt GmbH
Input (Kosten)	Arbeitskraft	h	39.5	-	Destatis
	Natural gas	kWh	0.0934	5.600 – 55.600 kWh, 2022	Destatis
	Salz	kg	12.9	-	Carl Roth GmbH + Co. KG
	Fließmittel	kg	15	-	ibac RWTH

Input / Output		Einheit	Kosten pro Einheit €/Einheit	Annahmen / Erläuterungen	Datenquelle
	Transport	t/km	0,1	Quelle: Zhang, C., Hu, M., Dong, L., Gebremariam, A., Miranda-Xicotencatl, B., Di Maio, F., & Tukker, A. (2019). Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 149, 649-663.	[14], Strukton BV
	Abfall	kg	0,075	Nicht spezifiziert	AWN Price list 2022
	Hausmüll	kg	0,245	Akzeptiert als Hausmüll	AWN Price list 2022
	Wasser	kg	0,0019	Für 10,001 – 20,000 m ³ (incl. 7% VAT)	STAWAG
Output (Einnahmen)	Verkaufspreis Industriefußböden	m ³	165	Preis für 2019; für 2023 wurden jedoch ähnliche Preisspannen für Stahlfaserbeton festgestellt.	Frischbeton Bettels
	Carbonfaser Abfall	kg	5,5	Aufgrund der gewählten Systemgrenzen und Allokationsmethode wurden diese Einnahmen in der Studie nicht berücksichtigt.	ITA RTWH
	Betonbruch > 4 mm	kg	0,015		Industriekontakt
	Betonbruch 0/2 mm	kg	0,005		Industriekontakt
	Gemischte Restfraktion	kg	0,005		Industriekontakt

(3) *Bewertung der Lebenszykluskosten*

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten wurde Microsoft Excel[®] verwendet. Da die Systemperspektive in der Lebenszykluskostenrechnung Gesamtkosten liefert, die mit den Ergebnissen einer Ökobilanz vergleichbar sind, wurden alle Kosten auf 1 m³ Beton für den R-CRC-Industrieboden bezogen [12]. Intermediäre Geldflüsse im Zusammenhang mit Carbonfaserabfällen, verarbeiteten Carbonfasern, Carbonfasern mit bestimmten Längen und gebrochenem Beton (2/4) wurden ausgeschlossen, um Doppelzahlungen zu vermeiden. Der Grund dafür ist, dass Vorteile für einen Akteur der Wertschöpfungskette Kosten für den anderen bedeuten würden. Für Nebenprodukte aus der Verarbeitung von sauberem CRC-Abfall wurden aufgrund der festgelegten Systemgrenzen keine Gutschriften erteilt. Da alle Kosten für 2022 erhoben wurden und keine zukünftigen Kosten und Einnahmen innerhalb der Systemgrenzen lagen, war keine weitere Diskontierung der Kosten erforderlich.

Die Ergebnisse zur Lebenszykluskostenrechnung sind in Bild 94 dargestellt. Sowohl für die reguläre Fußbodenproduktion als auch für SV1 war die Verarbeitung von CRC-Abfall der kostenintensivste Produktionsschritt, der mehr als 50 % zu den Gesamtkosten beitrug (298,17 € vs. 372,71 €). Die zweithöchsten Kosten mit einem Anteil von etwa 30 % entstanden durch den Einkauf von Materialien, die für die Herstellung von CRC-Industriefußböden benötigt werden, darunter Zement, Fließmittel, Kies und Flugasche (189,50 € vs. 182,43 €). Die Pyrolyse und das Schneiden der Kohlenstoffasern sowie der Transport trugen weniger als 1 % zu den Kosten bei. Insgesamt beliefen sich die Kosten für die reguläre Bodenproduktion auf 573,39 € und die für SV1 auf 640,13 €. Bei SV1 lagen die Kosten um etwa 12 % höher als bei der regulären Fußbodenproduktion. Dies lässt sich durch einen Anstieg der Kosten für die Verarbeitung von CRC-Abfall erklären, da mehr R-Beton benötigt wird, während die Kosten für den Einkauf von Materialien (einschließlich Kies) nur geringfügig stiegen. Die Produktion lag weit über dem Verkaufspreis eines ähnlichen Produkts auf dem Markt (~165 €/m³ für einen Industrieboden mit Stahlfasern für leichte Beanspruchung). Die Produktion von 1 m³ R-CRC-Industrieboden würde zu einem Gesamtverlust von 408,39 € führen (475,13 € für SV1). Es ist jedoch zu beachten, dass die Kosten auf Labormaßstab ermittelt wurden. Bei einem Upscaling der Produktion wäre mit deutlich geringeren Kosten zu rechnen.

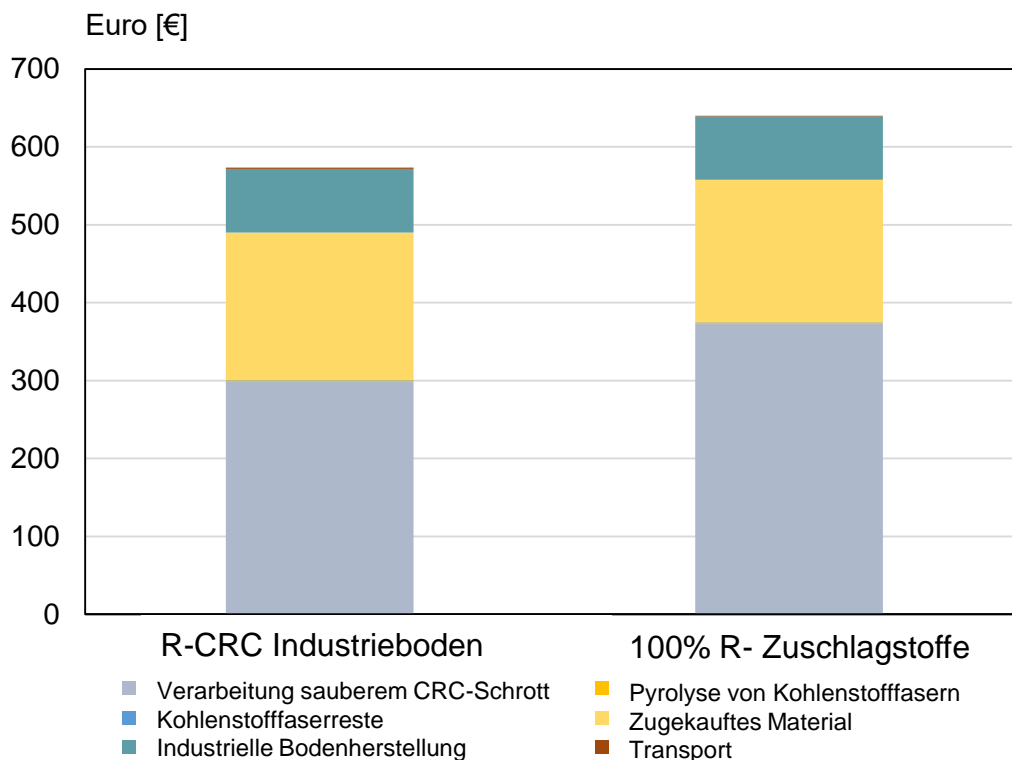


Bild 94: Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung des Industriefußbodens (Prozessschritte)

Um die Kostentreiber zu ermitteln, wurden die verschiedenen Kostenkategorien genauer betrachtet. Die größten Kostentreiber und Erlöse, wobei die Kosten für Wasser, Erdgas, Entsorgung, Transport

und die Kosten für das Emissionshandelssystem, die zusammen weniger als 1 % der Gesamtkosten ausmachen, vernachlässigt werden. Als mit Abstand größter Kostentreiber wurden die Personalkosten identifiziert, die 66 % (70 % für SV1) der Kosten ausmachen. Dies lässt sich mit den relativ hohen Personalkosten in Deutschland und dem im Vergleich zur industriellen Produktion höheren Arbeitsaufwand in der Entwicklungsphase aufgrund weniger effizienter Verfahren erklären. Die Verarbeitung von CRC-Abfall erforderte mit 7,47 Arbeitsstunden einen hohen Arbeitsaufwand für die Herstellung von 1 m³ R-CRC-Industrieboden im Vergleich zu den anderen Prozessschritten, was zu Kosten von 295,22 € (369,03 € für SV1) führte. Ohne die Personalkosten wäre die Produktion von 1 m³ R-CRC-Industrieboden ähnlich hoch wie der zu erzielende Verkaufspreis gewesen.

10.4. **RC-Zement: Erläuterung der Vorgehensweise**

Der zweite betrachtete Demonstrator war der Recyclingzement aus der Betonfraktion (Korngröße 0/2) des recycelten Carbonbetons (RC-Zement). Wie auch für den ersten Demonstrator stand für das Projekt nur sauberer CRC-Abfall aus der Produktion zur Verfügung (Post-Production). Die Analyse beruht Großteils auf den vom AMR (RWTH) und Holcim zur Verfügung gestellten Daten.

Der Recyclingprozess (Maßstab des Produktionsversuchs) begann mit der Zerkleinerung des CRC-Abfalls mit einem Backenbrecher und einer Hammermühle und der Trennung der Betonmatrix von dem Carbongitter. Weiter genutzt zur Demonstratorherstellung wurde die Betonfraktion (Korngröße 0/2). Verbleibende Carbonfasern stellten kein Problem dar. Die Betonfraktion wurde 29 km zur Mahlung / Trocknung innerhalb Deutschlands transportiert. Das gemahlene Material wurde weiterhin 230 km innerhalb Deutschlands zum Produktionsstandort transportiert. Da der Transport in Silo Zügen stattfand, wurde kein Verpackungsmaterial berücksichtigt. Am Produktionsstandort wurde das Recyclingmaterial mit anderen notwendigen Komponenten zur Erstellung des RC-Zements vermischt. Es wurden zwei Zusammensetzungen wurden betrachtet:

- Option A: ersetzt CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N
- Option B: ersetzt CEM II/C-M(S-LL) 32,5 R oder 42,5 N

10.5. **Ökobilanz RC-Zement**

Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Ökobilanz wurde, wie bereits für den Industriefußboden, basierend auf der ISO 14040/44 unter Verwendung von GaBi Professional[®] durchgeführt, um die Umweltleistung des RC-Zements aus recyceltem CRC-Abfall zu bewerten. Die betrachtete funktionelle Einheit wurde definiert als 1 kg recycelter Zement zur Substitution von CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N (A) bzw. CEM II/C-M(S-LL) 32,5 R oder 42,5 N.

Die Systemgrenzen der Studie wurden wie in Bild 95 definiert. Die Prozessschritte des Produktionsversuchs, die in die Systemgrenzen einbezogen wurden, waren die Zerkleinerung der Carbonbetonabfälle und Aufteilung in verschiedene Fraktionen, die Mahlung/Trocknung der Betonfraktion sowie die Mischung der Betonfraktion mit notwendigen (Primär-)Rohstoffen. Für die Allokationen der Umweltlasten am Lebensende wurde der Cut-Off Ansatz verwendet. Um die Auswirkungen des Energiemixes zu betrachten, wurde in einer Sensitivitätsanalyse Green Electricity Supply angenommen (nur bzgl. betrachteter Produktionsschritte).

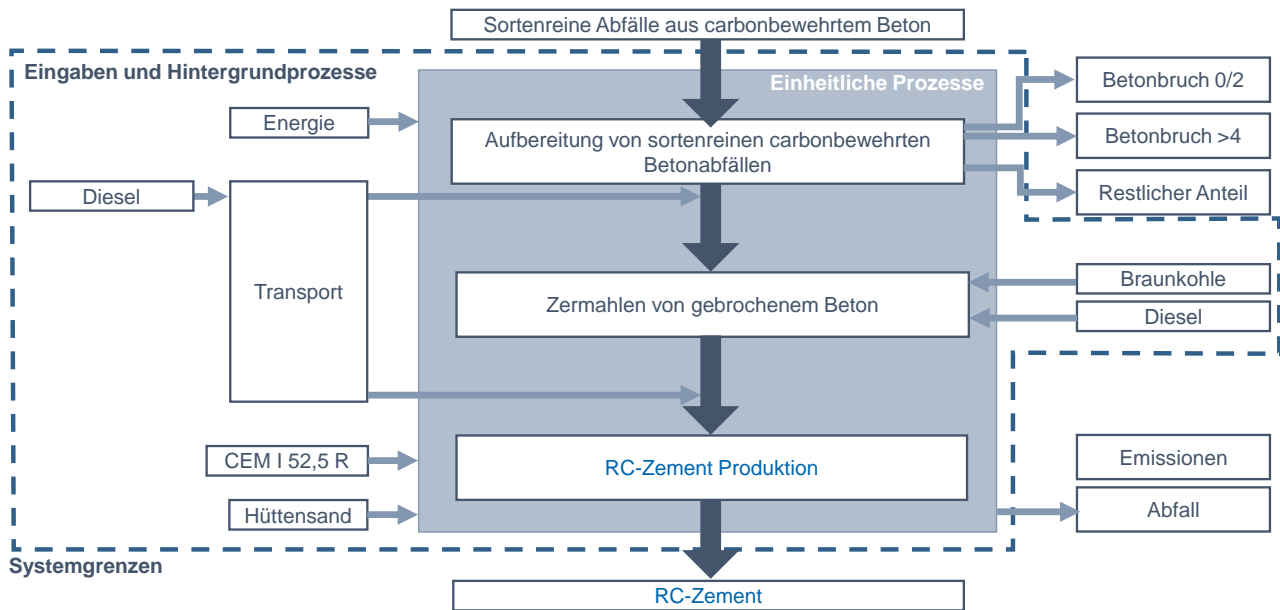


Bild 95: Systemgrenzen der Ökobilanz des RC-Zements

(1) Sachbilanz

Die Daten für die Ökobilanz des RC-Zements wurden von Projektpartnern und Kontakten aus der Industrie eingeholt. Fehlende Daten wurden durch Literaturrecherche ermittelt und die Sphera® Professional Datenbank (2022) wurde zur Modellierung der Hintergrundprozesse genutzt. Google Maps® wurde für die Abschätzung von Transportentfernungen genutzt. Wenn möglich wurden länderspezifische Daten verwendet. In dem Fall, dass keine länderspezifischen Daten verfügbar waren, wurden vergleichbare oder globale Länderdaten ausgewählt. Die Sachbilanz sowie getroffene Annahmen sind in Tabelle 26 gegeben. Im Projektverlauf wurden die Daten mehrere Male in Abstimmung mit den Projektpartnern aktualisiert, um die neusten Erkenntnisse (z.B. hinsichtlich Mahlgrades oder Zusammensetzung) in der Ökobilanz zu berücksichtigen.

Tabelle 26: Sachbilanz des RC-

Arbeitsschritt	Input / Output Parameter	Einheit	Menge	Annahmen / Erläuterungen	Daten- quelle	
Verarbeitung von CRC-Produktionsabfällen	Input	CRC Produktionsabfälle	kg	1160,02	Aufgrund des verwendeten Cut-off-Ansatzes sind die CRC-Produktionsabfälle nicht mit Umweltbelastungen verbunden.	AMR (RWTH)
		Stromverbrauch	kWh	4,5803	Strom für Backenbrecher und Taumelsieb	AMR (RWTH)
	Output	Betonbruch > 4 mm	kg	5,20	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet. -	AMR (RWTH)
		Betonbruch 2/4 mm	kg	530,64		AMR (RWTH)
		Betonbruch 0/2 mm	kg	568,94	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet.	AMR (RWTH)
		Gemischte Restfraktion	kg	35,8	Die Informationen wurden für Allokationszwecke verwendet.	AMR (RWTH)
		Carbonfasern	kg	11,32	-	AMR (RWTH)
Feinanteil	kg	8,12	Geschätzt von Experten (ca. 600g Verlust auf 90kg → ~0,7%); nicht leicht zu quantifizieren; Bereich: 0-30 µm.	AMR (RWTH)		
Transport von CRC-Abfällen	Entfernung	km	29	Transport innerhalb Deutschlands. Annahme Payload: 15 t.	Holcim AG	
Mahlung der Betonfeinfraktion	Stromverbrauch	kWh	7	Annahme: Coarse Grinding (Blaine-Wert: grob: 8.000 cm ² /g → selbst wenn gröberes Material verwendet werden könnte, war es in der Fabrik technisch nicht möglich, gröberes Material herzustellen)	Holcim AG	
	Betonbruch 0/2 mm	kg	1000	Keine signifikanten Verluste → 10% angenommen (hauptsächlich durch Trocknung des Materials während des Mahlens)	Holcim AG	

Arbeitsschritt	Input / Output Parameter	Einheit	Menge	Annahmen / Erläuterungen	Daten- quelle	
		Braunkohle	kg	19,22	Erforderlich für die Trocknung des Materials.	Holcim AG
	Output	Feinanteil	kg	900	-	Holcim AG
		Feinstanteil	kg	20	10 % Verlust beim Mahlen angenommen. 8 % werden durch das Trocknen des Materials und 2 % als Partikel in die Luft angenommen. berücksichtigt.	Holcim AG
		CO ₂ -Emissionen	kg	0.0419	Entsteht bei der Verbrennung von Braunkohle.	Holcim AG
		Chromium	kg	0,1	Chrom wird durch den Verschleiß der Mahlkugeln verursacht.	Holcim AG
Option A: R- Zement produktion (CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N)	Input	Stromverbrauch	kWh	3	Energieaufwand Zementherstellung (Mischung)	Holcim AG
		Beton Feinfraktion	kg	200	-	Holcim AG
		CEM I 52,5 R	kg	800		Holcim AG
	Output	Recycling Zement	kg	1000	-	Holcim AG
Option B: R- Zement produktion (CEM II/C- M(S-LL) 32,5 R or 42,5 N)	Input	Stromverbrauch	kWh	3	Energieaufwand Zementherstellung (Mischung)	Holcim AG
		Beton Feinfraktion	kg	150	-	Holcim AG
		CEM I 52,5 R	kg	650		Holcim AG
		Hüttensand	kg	200		Holcim AG
	Output	Recycling Zement	kg	1000	-	Holcim AG

(2) Wirkungsabschätzung

Die Umweltauswirkungen von 1 kg recycelter Zement zur Substitution von CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N (A) bzw. CEM II/C-M(S-LL) 32,5 R oder 42,5 N (B) wurden, auf der Grundlage der Sachbilanz, mit der Ökobilanzsoftware GaBi Professional[®] ermittelt. Die verwendete Methodik zur Abschätzung

der Umweltwirkung war CML2001-Aug. 2016. Auch für den zweiten Demonstrator wurden die Mid-point Wirkungskategorien Global Warming Potential (GWP) - Globales Erwärmungspotential, Abiotic Depletion Potential (ADP) - Potenzial zur Erschöpfung abiotischer Ressourcen, Acidification Potential (AP) - Versauerungspotential, Eutrophication Potential (EP) - Eutrophierungspotential, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP) - Ökotoxizitätspotential in Süßwasser-Ökosystemen, Human Toxicity Potential (HTP) - Humantoxizitätspotential, Marine Aquatic Toxicity Potential (MAETP) - Ökotoxizitätspotential in marinen Ökosystemen, Ozone Depletion Potential (ODP) - Ozonabbau-potential, Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) - Photochemisches Ozonbildungspotential und Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP) - Ökotoxizitätspotential in terrestrischen Ökosystemen betrachtet.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in den Tabellen **Tabelle 27** und

Tabelle 28 gegeben. Der Schritt der RC-Zement Produktion umfasst dabei die Umweltlasten der benötigten Primärmaterialien (CEM I 52,5 R bzw. CEM I 52,5 R und Hüttensand).

Tabelle 27: Umweltauswirkung der Produktion von 1 kg RC-Zement (Option A: Substitution von CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N)

	ADP	ADP _f	AP	EP	FAET P	GWP	HTP	MAET P	ODP	POC P	TETP
	[kg Sb eq.]	[MJ]	[kg SO ₂ eq.]	[kg Phos- phate eq.]	[kg DCB eq.]	[kg CO ₂ eq.]	[kg DCB eq.]	[kg DCB eq.]	[kg R11 eq.]	[kg Eth- ene eq.]	[kg DCB eq.]
Verarbei- tung CRC Abfall	2.17 E-07	4.33 E+00	5.66 E-04	1.06 E-04	6.78 E-04	4.40 E-01	1.30 E+00	4.82 E+01	1.13 E-11	3.92 E-05	4.96 E-04
Mahlung der Bet- onfraktion	1.80 E-06	7.79 E+01	4.70 E-03	8.84 E-04	1.59 E-01	3.67 E+00	3.81 E+00	4.20 E+02	9.36 E-11	3.26 E-04	4.12 E-03
RC-Ze- ment Her- stellung	1.10 E-03	1.80 E+03	4.53 E-01	6.13 E-02	3.45 E-01	6.90 E+02	2.39 E+01	1.59 E+04	1.72 E-09	4.97 E-02	6.04 E-01
Transport	5.22 E-07	6.79 E+01	3.80 E-03	8.18 E-04	2.66 E-02	5.04 E+00	8.98 E-02	8.00 E+01	1.23 E-12	-2.37 E-04	9.43 E-03
Gesamt	1.10 E-03	1.95 E+03	4.62 E-01	6.31 E-02	5.31 E-01	6.99 E+02	2.91 E+01	1.64 E+04	1.83 E-09	4.98 E-02	6.18 E-01

Tabelle 28: Umweltauswirkung der Produktion von 1 kg RC-Zement (Option B: Substitution von CEM II/C-M(S-LL) 32,5 R oder 42,5 N)

	ADPe	ADPf	AP	EP	FA- ETP	GWP	HTP	MA- ETP	ODP	POC P	TETP
	[kg Sb eq.]	[MJ]	[kg SO ₂ eq.]	[kg Phos- phate eq.]	[kg DCB eq.]	[kg CO ₂ eq.]	[kg DCB eq.]	[kg DCB eq.]	[kg R11 eq.]	[kg Ethen e eq.]	[kg DCB eq.]
Verarbei- tung CRC Abfall	1.62 E-07	3.25 E+00	4.24 E-04	7.97 E-05	5.08 E-04	3.30 E-01	9.72 E-01	3.62 E+01	8.44 E-12	2.94 E-05	3.72 E-04
Mahlung der Bet- onfraktion	1.35 E-06	5.85 E+01	3.53 E-03	6.63 E-04	1.19 E-01	2.75 E+00	2.86 E+00	3.15 E+02	7.02 E-11	2.44 E-04	3.09 E-03
RC-Ze- ment Her- stellung	8.71 E-04	1.01 E+03	6.56 E-01	4.99 E-02	2.80 E-01	6.05 E+02	1.94 E+01	1.30 E+04	2.26 E-06	2.07 E-01	4.91 E-01
Transport	3.92 E-07	5.09 E+01	2.85 E-03	6.13 E-04	2.00 E-02	3.78 E+00	6.73 E-02	6.00 E+01	9.26 E-13	-1.78 E-04	7.07 E-03
Gesamt	8.73 E-04	1.12 E+03	6.63 E-01	5.12 E-02	4.20 E-01	6.12 E+02	2.33 E+01	1.34 E+04	2.26 E-06	2.07 E-01	5.01 E-01

Wie in Bild 96 deutlich zu erkennen ist, leisteten, wie auch beim Industriefußboden, die benötigten Primärmaterialien den größten Beitrag zur Umweltwirkung bei der Herstellung des Demonstrators (65-99,9 %). Beispielsweise betrug der Prozessschritt der RC-Zement Produktion, welcher den Einsatz von Primärprodukten beinhaltet, jeweils 99 % zum GWP bei (6.90E+02 kg CO₂-Äq. (Option A) und 6.05E+02 kg CO₂-Äq. (Option B)).

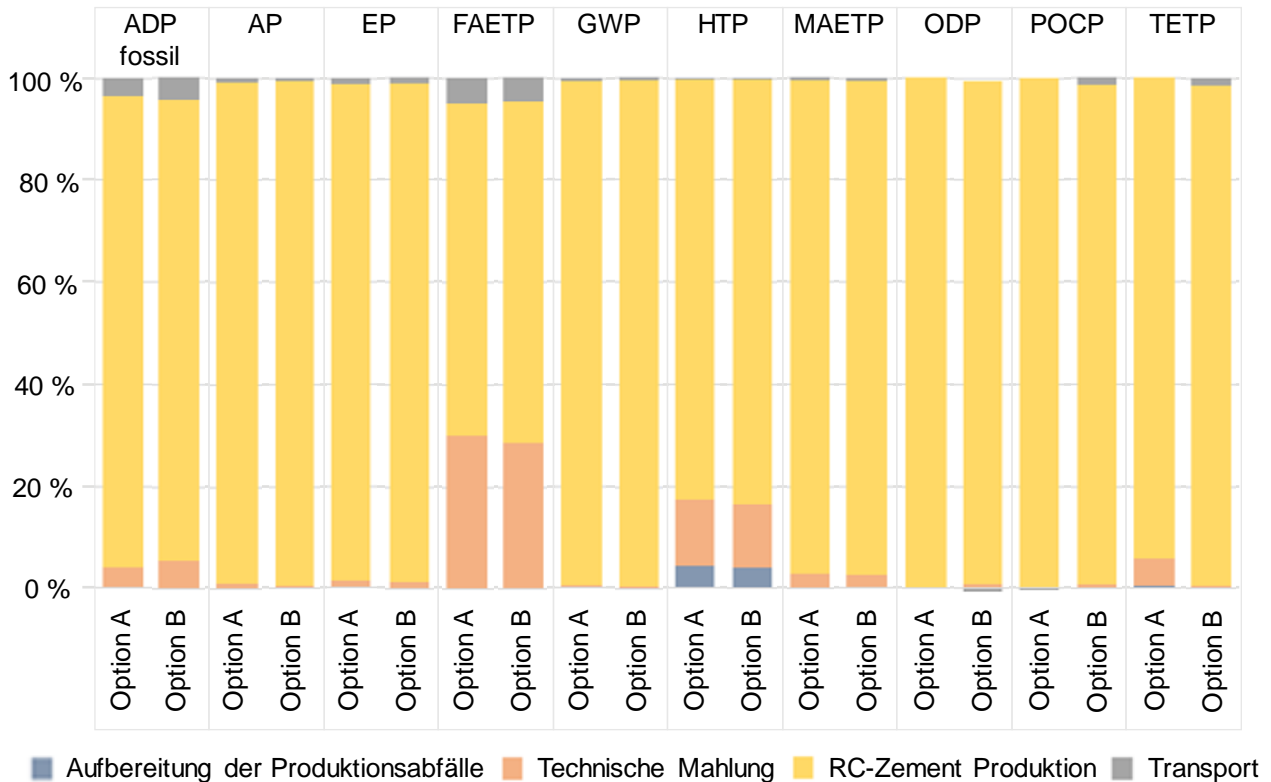


Bild 96: Ergebnisse der Ökobilanz des RC-Zements

Der geringste Anteil mit 65-67 % war für beide Optionen FAETP, bei dem die technische Mahlung einen Anteil an der Auswirkung von 18-25 % (0,159 kg bzw. 0,119 kg DCB-Äq.) hat. Der Anteil der Verarbeitung von CRC-Abfall war im Vergleich zum Industriefußboden mit nur etwa 4 % bei beiden Optionen deutlich geringer. Nur der Transport trug weniger zum HTP bei. Für alle anderen Umweltkategorien zeigte die Verarbeitung von CRC-Abfall die geringsten Auswirkungen.

Vergleicht man Option A und B ist zu erkennen, dass Option A (mit Ausnahme von AP und ODP), etwas höhere Umweltauswirkungen mit sich brachte.

Betrachtet man die Sensitivitätsanalyse, so erkennt man, dass eine Umstellung auf erneuerbare Energie in den eigenen Produktionsschritten das GWP um 4.92 kg CO₂-Äq. (Option A) bzw. um 4.02 CO₂-Äq. (Option B) senken könnte. Eine Verbesserung kann auch für die Umweltkategorien

ADP_{fossil}, AP, MAETP, POCP und TETP festgestellt werden, während sich die Werte für ADP_{elements}, EP, FAETP, HTP und ODP leicht verschlechterten. Lebenszykluskostenrechnung RC-Zement

10.6. Lebenszykluskostenrechnung RC-Zement

Die Lebenszykluskostenrechnung für den RC-Zement wurde parallel zur Ökobilanz erstellt und wird nachfolgend beschrieben.

(1) Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Lebenszykluskostenrechnung wurde unter Betrachtung derselben funktionellen Einheit und äquivalenten Systemgrenzen zur Ökobilanz durchgeführt. Als Grundlage dienten die Guidelines zur Berechnung der Lebenszykluskosten von [11] und [13]. Die Studie basierte auf realen Geldströmen ohne Berücksichtigung von äußeren Einflüssen (z.B. monetarisierte Umweltauswirkungen oder soziale Aspekte). Die Produktperspektive des RC-Zements wurde eingenommen. Geldströme von Zwischenprodukten wurden in der Studie daher nicht berücksichtigt.

(2) Inventaranalyse der Kostendaten

Wie bereits beim Industriefußboden, erfolgte die Erhebung der Kostendaten auf der Grundlage der Sachbilanz – zuzüglich der Personalkosten. Für die aufgelisteten Inputs und Outputs wurden tatsächliche Kostendaten für 2021/2022 ermittelt. Die Kostendaten wurden von Projektpartnern, Industriekontakten, offiziellen Preislisten von Unternehmen und Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis) bezogen. Die gesammelten Kosten und Annahmen sind in Tabelle 29 aufgeführt.

Tabelle 29: Relevante Kostendaten für den RC-Zement in Euro.

Input / Output Kosten	[€/unit]	Datenquelle	Annahmen
CEM I 52,5 R [kg]	0.2	Industry Contact	
Feinanteil [t]	5	Industry Contact	
Elektrizität [kWh]	0.2579	DESTATIS	Jahresverbrauchsklasse 70.000 - 150.000 MWh, 2022
Emitted CO ₂ [kg]	0.03598	OECD	Steuer + ETS ("Emission Trading System"); Durchschnittspreis in 2021
Hüttensand [kg]	0.2	Industry Contact	
Flugasche [kg]	0.14	https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/lignite-coal-price-index/	September 2023

Input / Output Kosten	[€/unit]	Datenquelle	Annahmen
Arbeitskraft [h]	39.3	Destatis	
Transport [t/km]	0.1	[14], Strukton BV	Quelle: Zhang, C., Hu, M., Dong, L., Gebremariam, A., Miranda-Xicotencatl, B., Di Maio, F., & Tukker, A. (2019). Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 149, 649-663.
Einnahmen			
Carbonkurzfasern [kg]	5.5	ITA RTWH	Carbonfasern könnten die angegebenen Einnahmen bringen. Aufgrund der gewählten Systemgrenzen und Allokationsmethode wurden diese Einnahmen in der Studie nicht berücksichtigt.
Betonbruch >4 [kg]	0.015	Industry Contact	Gebrochener Beton >4 könnte die angegebenen Einnahmen bringen. Aufgrund der gewählten Systemgrenzen und Zuteilungsmethode wurden diese Einnahmen in der Studie nicht berücksichtigt.
Betonbruch 0/2 [kg]	0.005	Industry Contact	
Gemischter Betonbruch [kg]	0.005	Industry Contact	Die gemischte Restfraktion könnte die angegebenen Einnahmen bringen. Aufgrund der gewählten Systemgrenzen und Allokationsmethode wurden diese Einnahmen in der Studie nicht berücksichtigt.

(3) Bewertung der Lebenszykluskosten

Wie auch für den Industriefußboden wurden die Lebenszykluskosten des RC-Zements in Microsoft Excel® für die Produktperspektive (1 kg RC-Zement) berechnet. Das heißt, dass potentielle intermediale Geldflüsse zwischen den verschiedenen Akteuren der Wertschöpfungskette nicht berücksichtigt wurden. Wegen der festgelegten Systemgrenzen wurde keine Gutschriften für Nebenprodukte aus der Verarbeitung von CRC-Produktionsabfällen berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgte keine weitere Diskontierung der Kosten, da alle Kosten für das Referenzjahr 2022 erhoben wurden und keine zukünftigen Kosten und Einnahmen innerhalb der Systemgrenzen lagen.

Die Ergebnisse zur Lebenszykluskostenrechnung sind in Bild 97 dargestellt. Sowohl für Option A (mögliche Substitution von CEM II/A-LL 32,5 R oder 42,5 N) und Option B (mögliche Substitution

von CEM II/C-M(S-LL) 32,5 R oder 42,5 N) lagen die berechneten Lebenszykluskosten für das Recycling bei knapp 250 €. Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit können aktuelle Marktpreise betrachtet werden. Der Preis für CEM II/A-LL liegt aktuell bei 197,00 €/t und der für CEM II/C-M liegt bei etwa 273,50 €/t.

Die RC-Zement Produktion war mit einem Kostenanteil von 76-81 % der größte Kostentreiber (184,56 €/t bzw. 192,31 €/t). Dies liegt zum Großteil an den bezogenen Primärmaterialien, welche in der Gesamtbetrachtung 172,00 €/t bzw. 179,75 €/t ausmachten (siehe Bild 98). Den zweitgrößten Kostenanteil hatte die Verarbeitung des CRC-Abfalls mit 15-19 %. Dies ist, wie auch beim Industriefußboden, auf die angenommene Arbeitszeit zurück zu führen.

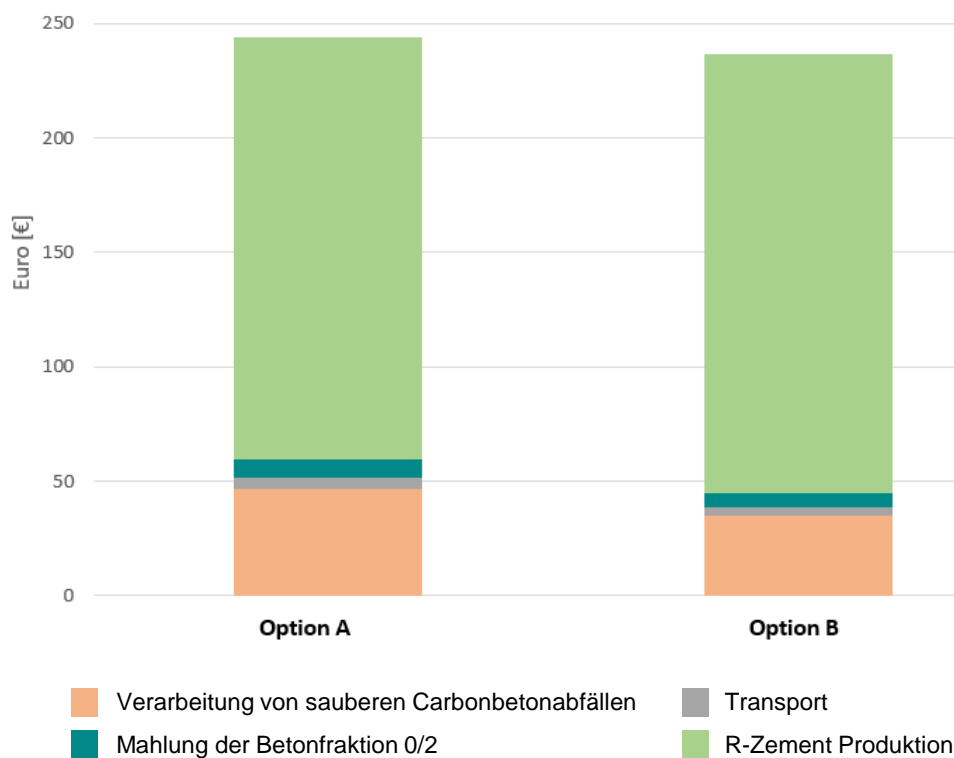


Bild 97: Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung des RC-Zements (Prozessschritte)

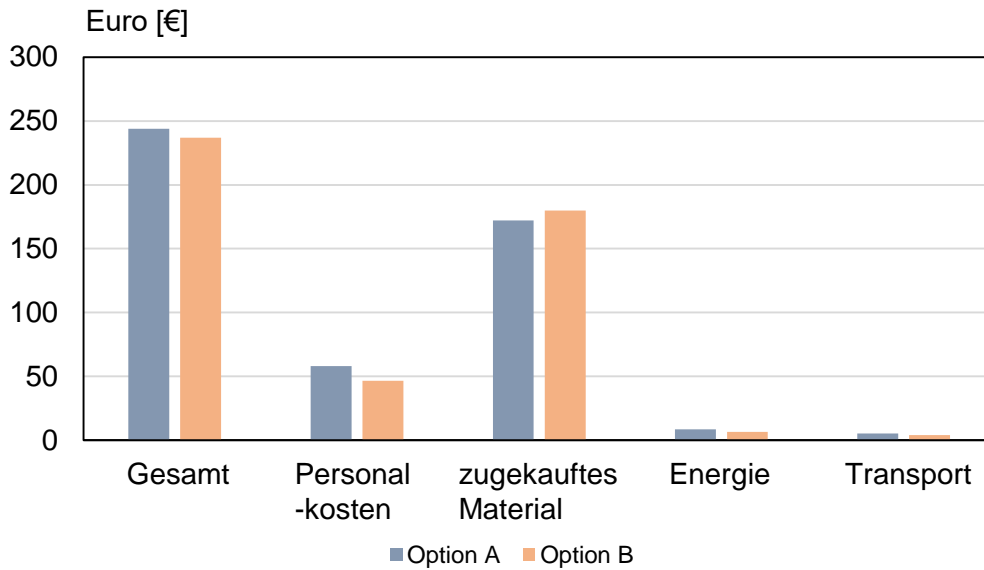


Bild 98: Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung des RC-Zements (Kostentreiber)

10.7. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse aus AP 4.3 zeigen, dass das Recycling von Carbonbetonabfällen das Potential hat, verschiedene Umweltauswirkungen, insbesondere das GWP zu verringern. Nach wie vor sind die zugekauften Primärmaterialien für einen großen Anteil der Umweltauswirkungen verantwortlich. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Verarbeitung des CRC-Abfalls hohe Auswirkungen auf die Humantoxizität hat, welche durch Feinstaubemissionen bedingt sind. Die Ergebnisse der Studie können dabei helfen, diese Problematik bei einem Upscaling der Produktion zu adressieren.

Die Lebenszykluskostenrechnung des Industriefußbodens ergab, dass die Produktionskosten derzeit erheblich über den Verkaufspreisen vergleichbarer Produkte liegen. Die größten Kostentreiber hierbei sind die Personalkosten. Es ist zu erwarten, dass diese Kosten bei einem Upscaling der Produktion reduziert werden können. Im Gegensatz zum Industriefußboden ist der RC-Zement bereits heute potentiell wirtschaftlich profitabel, insbesondere Option B, die auf der Substitution von CEM II/C-M(S-LL) basiert. Generell sollte beachtet werden, dass die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung zwar einen guten Richtwert liefern, jedoch keine traditionelle Wirtschaftlichkeitsprüfung ersetzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Recycling von Carbonbeton eine vielversprechende Innovation darstellt, welche auf lange Sicht sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bieten kann. Carbonbetonrecycling hat das Potential, den Bedarf an Primärmaterialien zu senken und Umweltauswirkungen zu verringern und somit zu einer nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen beizutragen. Jedoch sind weitere Optimierungen der Prozessschritte notwendig, um Kosten

zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der recycelten Materialien langfristig sicherzustellen – wobei Option B des RC-Zementes bereits zum aktuellen Zeitpunkt wirtschaftlich profitabel sein kann.

11.AP 5 – Erstellung eines Anforderungsprofils an Textilbetonrezyklat (ITA)

Im Rahmen dieses AP wurde als Zusammenführung der Untersuchungsergebnisse der AP1 - AP4 ein Lastenheft erstellt. Das Lastenheft mit Anforderungsprofil dient als Anleitung zum Umgang mit den untersuchten Textilbetonen nach der Abfallhierarchie der Europäischen Union.

11.1. Gesetzlicher Rahmen nach der Abfallhierarchie der Europäischen Union

Im Sinne einer einheitlichen Regelung der Abfallbehandlung wurde der erste Grundstein 2008 durch die Einführung der Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) gelegt, die 2018 novelliert wurde. Für die Entwicklung zu einer „Recycling-Gesellschaft“ werden durch die AbfRRL die rechtlichen Grundlagen zur Behandlung von Abfällen aufgezeigt. Ziel ist dabei die getrennte Sammlung von Abfällen, damit diese besser einer Verwertung zugeführt werden können. Eine Erneuerung stellte die hier erstmals festgelegte fünfstufige Abfallhierarchie dar, die in Bild 99 dargestellt wird [17]:



Bild 99: Fünfstufige Abfallhierarchie aus der AbfRRL als Leitbild zum Umgang mit Abfällen nach [17]

Der Umgang mit Abfallprodukten soll sich an dieser Hierarchie orientieren, wobei keine genauen Vorgaben zum jeweiligen Vorgehen formuliert werden. Dabei gilt der Vermeidung die höchste Priorität und die Menge der behandelten Abfälle soll mit jeder Stufe abnehmen. Nach der AbfRRL werden die Mitgliedsstaaten angehalten, eigene Abfallvermeidungsprogramme mit konkreten Maßnahmen und Zielen zu entwickeln. [17]

Für das verbesserte Recycling von Bau- und Abbruchabfällen werden die Mitgliedsstaaten verpflichtet, Maßnahmen zur Förderung des selektiven Abbruchs und der Einführung von Sortiersystemen durchzuführen. Die Sortierung der Abfälle soll dabei in mindestens sechs Fraktionen erfolgen: Holz, Mineralien, Metall, Glas, Kunststoff und Gips. Zusätzlich sollte bis 2020 bei diesen Abfällen eine Recycling- und Verwertungsquote von mindestens 70 M.-% erreicht werden. [17] Die Menge der statistisch erfassten mineralischen Bauabfälle in Deutschland im Jahr 2020 und deren jeweilige Recycling- und Verwertungsquoten zeigt Bild 100.

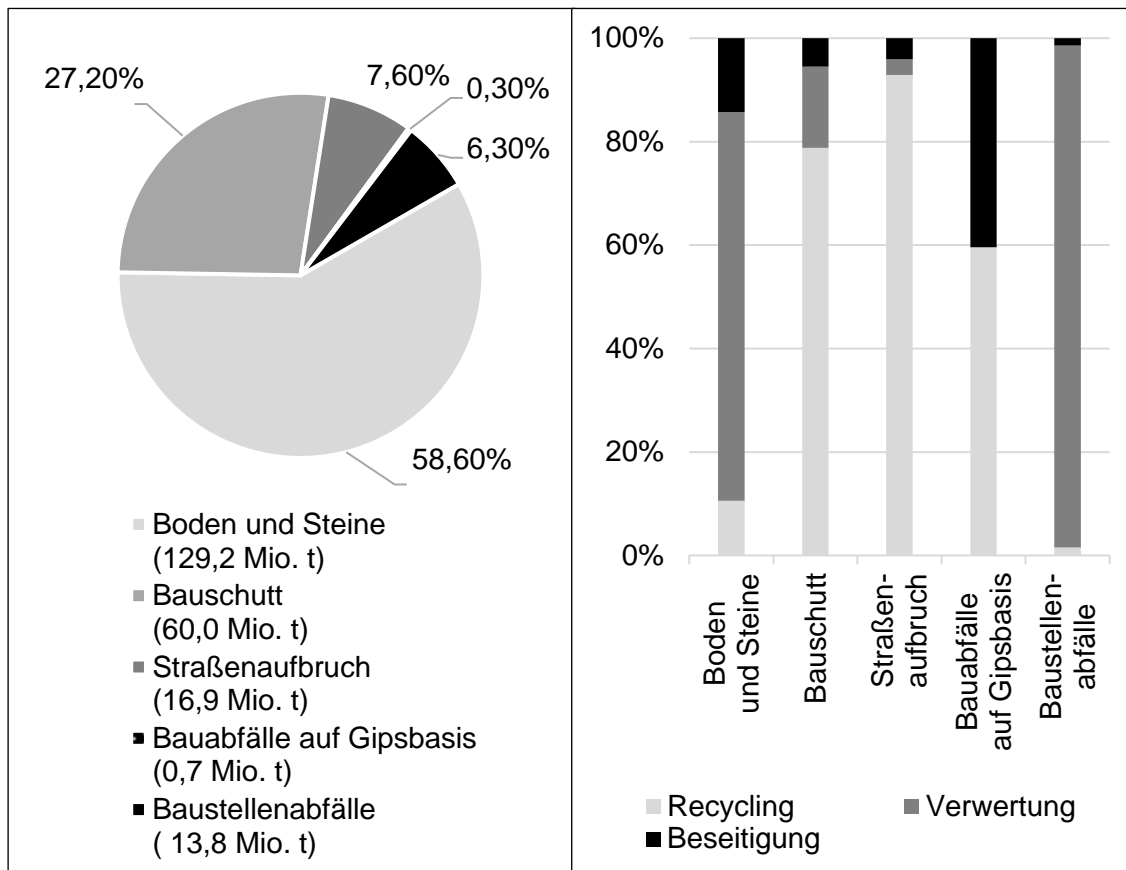


Bild 100: Links – Abfallaufkommen der fünf verschiedenen Bauabfallarten in Deutschland 2020 ; Rechts – Behandlungsquoten der Abfallarten aufgeteilt in Recycling, Verwertung und Beseitigung nach [20]

Des Weiteren zieht die EU-Kommission bis Ende 2024 in Betracht, weiterführende Zielvorgaben für die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Bau- und Abbruchabfällen sowie Textilabfällen zu formulieren. Dies könnte in Form eines neuen Gesetzesvorschlags oder eines jährlich einzureichenden Berichts erfolgen. [17]

Die europäische AbfRRL wurde 2012 in Form des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) in deutsches Recht überführt. Dementsprechend gibt es viele Übereinstimmungen in den Zielsetzungen der beiden Rechtstexte. Durch das KrWG soll die Kreislaufwirtschaft gefördert und eine möglichst umweltschonende Bewirtschaftung von Abfällen geregelt werden. Der Anfall von zu deponierenden

Abfällen soll eingegrenzt und die Verwendung natürlicher Ressourcen gesteigert werden. Zur Umsetzung dieser Ziele wurde die aus der AbfRRL bekannte fünfstufige Abfallhierarchie übernommen. [19] In Bezug auf Carbonbeton kann die Abfallhierarchie wie folgt angewendet werden aufbauen auf [18]:

1. Vermeidung

Einsparung von Abfällen durch dauerhafte Bauweisen

2. Vorbereitung zur Wiederverwendung

Einführung von Bauteilen mit eingebauten Trenntechniken für einen selektiven Abbau bzw. Verwendung einer Tränkung, die eine Trennung von Bewehrung und Beton ermöglicht (Epoxidharztränkung verbessert Trennbarkeit von Betonmatrix und Textilien im Vergleich zu ungetränkten oder SBR getränkten Textilien)

3. Recycling

Sortenreine Trennung zur stofflichen Aufbereitung und Verwertung der Bau- und Abbruchabfälle - Nutzung von recycelten Fassadenplatten für Bodenplatten (AP 4 im Demonstrator nachgewiesen)

4. Sonstige Verwertung

Downcycling der Carbontextilien zur energetischen Verwertung oder Verfüllung

5. Beseitigung

Deponierung der Carbontextilien und der Verbund-Mischfraktion, sollte aber möglichst vermieden werden

Die möglichen Prozesse für die Behandlung der Abfälle sind anhand verschiedener Kriterien abzuwägen, wie den entstehenden Emissionen, der zu verbrauchende Energie oder der Aussetzung von Schadstoffen. Nach dem Gesetz ist der Abfallerzeuger bzw. -besitzer dazu verpflichtet, den Abfall einer Verwertung oder einem Recycling zuzuführen.[19]

Seit einer Novellierung im Jahr 2020 wird für die Vorbereitung zur Weiterverwendung, das Recycling oder die sonstige Verwertung von nichtgefährlichen Bau- und Abbruchabfällen eine Quote von mindestens 70 M.-% vorgeschrieben [19]. Dies ist auch eine Forderung, die identisch zur AbfRRL ist [17]

Eine Neuerung stellt die vorgeschriebene Erstellung von *Abfallvermeidungsprogrammen* (AVP) dar. In diesen Programmen sollen die Ziele der Abfallvermeidung festgelegt und mögliche Maßnahmen präsentiert werden. 2013 wurde das AVP des Bundes verabschiedet. Die Bundesländer konnten entscheiden, sich an der Erstellung des AVPs des Bundes zu beteiligen oder eigene Programme zu erstellen [15]. 14 Mindestanforderungen für die Programme wurden im KrWG definiert. Nach §33 beziehen sich die folgenden zwei auf die Behandlung von Bau- und Abbruchabfällen [19]:

1. Unterstützung der Wiederverwendung und Erstellung von Systemen zur Förderung von Tätigkeiten zur Reparatur und Wiederverwendung von [...] Baumaterialien und -produkten
2. Verringerung der Abfallerzeugung bei Prozessen im Zusammenhang mit [...] Bau- und Abbruchtätigkeiten unter Berücksichtigung der besten verfügbaren Techniken

Nach einer Fortschreibung des AVPs des Bundes aus dem Jahr 2021 zählen die Bau- und Abbruchabfälle zu den vier Abfallströmen, deren intensivere Behandlung als Priorität angesehen werden sollte. Die Langlebigkeit von Gebäuden soll mit Bauteilen, die für einen Rückbau entwickelt sind (Design for Deconstruction) gesteigert werden und ein Materialinventar eingeführt werden. Es wird auch die Einführung einer Gütesicherung von Recyclingbaustoffen und Gebäudepässen in Aussicht gestellt. Zusätzlich werden Verhaltensempfehlungen für Bund, Länder, Wirtschaftsakteure und Verbraucher formuliert. [16]

Nach §10 des KrWG wird die Regierung ermächtigt, „Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken festzulegen“. In §41 werden die Pflichten der öffentlichen Hand festgelegt. Bei Bauvorhaben müssen die Bauherren demnach vorzugsweise Produkte einsetzen, die aus ressourcenschonenden Prozessen und nachwachsenden Rohstoffen (oder Rezyklaten) hergestellt werden. Außerdem sollten sie eine erhöhte Recyclingfähigkeit aufweisen sowie für wenige bzw. schadstofffreie Abfälle sorgen. Inwiefern ein solches Vorgehen überprüft werden kann, wird nicht weiter erklärt. [19]

Zusammenfassend ist das KrWG als deutsche Umsetzung der AbfRRL deren Inhalt sehr vergleichbar. Es wird nun auch auf nationaler Ebene eine Mindestquote bei der Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen von 70 % festgelegt. Eine Erweiterung stellt die verbindliche Erstellung von AVPs dar, um die Ziele der Abfallwirtschaft klarer zu definieren und Transparenz zu schaffen.

11.2. Trennbarkeit

Der Grad zwischen einer möglichst hohen Trennbarkeit bei möglichst geringer Reduktion der Faserlänge sowie unter reduziertem Anteil der Feinanteile ist erstrebenswert. Dadurch wird die Fraktion die in der Abfallhierarchie der vierten und fünften Ebene zuzuordnen ist möglichst geringgehalten. Die Erreichung der Recyclingstufe ist wünschenswert. Eine Zerkleinerung der Textilbetonproben erfolgt mit einem Backenbrecher. Je nach Faserart sind jedoch verschiedene Prozessschritte zielführender. Bei Carbonfasertextilbeton stellte sich eine 3-Stufige Zerkleinerung (2x Backenbrecher, 1x Walzenmühle) als geeigneter Prozess dar. Glasfasertextilien wurden mit einem Backenbrecher zerkleinert und klassiert, da weitere Zerkleinerungsmethoden nicht zielführend für die gewünschte Zerkleinerungsgüte waren. Die Erreichung von nahezu 100 M.-% des Betonbruchs nach DIN EN 12620 bei der Zuordnung der hochwertigsten RC-GK Kategorie RC₉₀ ist somit möglich. Aufgrund der Korngrößenverteilung könnten 65 % der natürlichen Gesteinskörnung somit ersetzt werden (vgl. AP 1.2).

RC-Beton

Grober Betonbruch wird für Wiederverwendung im Beton genutzt als Recyclingalternative zur natürlichen Gesteinskörnung.

Tabelle 30: Anforderung an RF-Beton

Parameter	Norm / Richtlinie	Ziel	Zielerreichung
Bestimmung der Massenanteile (Betonbruch, Fasern, Mischfraktion)	DIN EN 12620	100 M.-% hochwertigste RC-GK Kategorie RC ₉₀	erfüllt
Kornform	DIN EN 933-4	Kornformkennzahl ≤ 40%	Je nach Probe zwischen 26 -30% -
	DIN EN 12620	Kornformkategorie SI ₅₀ für RC-GK	erfüllt mit Kategorie SI ₄₀
Kornrohddichte	DAfStb	> 2000 kg/m ³	erfüllt mit 2400-2410 kg/m ³
Wasseraufnahme nach 24 h und nach 10 Min als Kennwert für die Verarbeitbarkeit	DAfStb	< 10 M.-%	Erfüllt mit 5,5 M.-% (Großteil mit 4,5 - 4,5 M.-% bereits nach 10 min erreicht)

Des Weiteren muss die chemische Zusammensetzung geeignet sein sowie die Umweltverträglichkeit sichergestellt werden. Die Untersuchung der umweltrelevanten Parameter erfolgte nach Königswasseraufschluss sowie mittels Elutionsversuch (Schütteltest). Die Grenzwerte wurden deutlich unterschritten.

Zur Überprüfung der Recyclingfähigkeit der entstandenen Produkte wurden Probekörper mit den entwickelten Rezepturen hergestellt. Diese wurden mit unterschiedlichen Methoden (Brechern, Mahlen) zerkleinert und überprüft. Dabei konnten die eingesetzten Carbongelegestücke zu 80 % zurückgewonnen und von der Betonmatrix getrennt werden. Bei den eingesetzten pyrolisierten Carbonfasern als Kurzfaserbewehrung war keine sortenreine Trennung möglich. Die Fasermatrixhaftung ohne Nutzung einer Tränkung ist nachgewiesen zu hoch um eine sortenreine Trennbarkeit von Kurzfasern zu erreichen. Bei einer Nutzung von Kurzfasern im Beton ist eine zusätzliche Tränkung aus ökonomischen und technischen Aspekten weder sinnvoll noch möglich.

R-Zement:

Feinbrechsande werden weiterverarbeitet für die Wiederverwendung in R-Zement. An den R-Zementen wurden die Zementeigenschaften nach DIN EN 196 bestimmt und Betonversuche zur Dauerhaftigkeit (Frostwiderstand, Frost-Tausalzwiderstand, Chloridmigration und Karbonatisierung) in Anlehnung an die Vorgehensweise des Zulassungsverfahrens des DIBt durchgeführt.

Tabelle 31: Mechanische und physikalische Anforderung an R-Zement der Festigkeitsklasse 42,5 N nach DIN EN 197-1

Parameter	Norm	Ziel	Zielerreichung
Erstarrungsbeginn	DIN EN 196-3	≥ 60 min	erfüllt
Anfangsfestigkeit nach 2 Tagen	DIN EN 196-1	≥ 10 N/mm ²	erfüllt
Normfestigkeit nach 28 Tagen	DIN EN 196-1	≥ 42,5 N/mm ² ≤ 62,5 N/mm ²	erfüllt

Zur Erzielung der Mahlfineinheiten musste Feinbrechsand von Glasfaserbeton länger als Carbonbeton gemahlen werden. Der Wasseranspruch der RC-Zemente weist geringe Unterschiede auf. Die Druckfestigkeit wurde erwartungsgemäß mit CEM I 52,5 anstelle von CEM I 42,5 R deutlich gesteigert. RC-Feinmehle werden mit Portlandzement und Hüttensandmehl zu R-Zement weiterverarbeitet.

rCF

Tabelle 32: Anforderung an rCF

Parameter	Ziel	Zielerreichung
Faserlänge	10-30mm	Variiert nach Prozess
Faser- Matrix Adhäsionsverhalten	Vergleichbare Adhäsion zu Neufasern	Nach Pyrolyse höhere scheinbare Grenzflächenscherfestigkeiten erreichbar
Faserverteilung	Isotrop	Mit einer Fasernachbehandlung konnten die Bildung von Agglomerationen optisch vermieden werden
Bruchart	Nicht in Faserlängsrichtung zur Vermeidung der Lungengängig	CF Brechverhalten variiert je nach Ursprungsmaterial – PAN CF brechen nicht in Faserlängsrichtung

Des Weiteren waren bei Carbonfasern die Dichte sowie die Zugfestigkeit der recycelten Fasern vergleichbar mit den Eigenschaften von Neufasern. Bei Carbonfasern ist eine Pyrolyse für die Trennbarkeit zu Einzelfasern möglich. Bei Glasfasern wird dies aufgrund des geringen Faserneupreises grundsätzlich nicht in Betracht gezogen. Bei anderen Fasermaterialien ist dies zu überprüfen.

Insgesamt erreichen die pyrolysierten Fasern die höchsten absoluten und mittleren Scherfestigkeiten. Im Vergleich zu den Neufasern konnte eine Erhöhung der scheinbaren Grenzflächenscherfestigkeit um 150-250 % festgestellt werden. Des Weiteren zeigte sich, dass die Schlichte scheint einen positiven Einfluss auf die Homogenität der Fasern zu haben, da die Fasern mit einer Schlichte eine gleichmäßige scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit ohne Ausreißer aufweisen.

Die Verteilung der Fasern hat einen Einfluss auf die Festigkeitsergebnisse. Kommt es zu Faseragglomeration, sorgt die Faser-Faser-Bindung dafür, dass die Fasern herausgezogen werden und somit nicht direkt an der Bruchkante brechen. Sind die Fasern vereinzelt verteilt, ist die Faser-Matrix-Bindung im Verbundbauteil so stark, dass die Fasern auch an der Bruchkante brechen.

Es zeigte sich, dass die Art der Schlichte, aber auch die daraus resultierende Faser-Faser-Haftung einen Einfluss auf die Testergebnisse haben - werden die Faseroberfläche nach der Pyrolyse behandelt, haften sie weniger zusammen als Neufasern, die bei der Faserherstellung einen Schlichteauftrag erhalten und dann in kurze Fasern geschnitten werden.

Bei ganzheitlicher Betrachtung ist aufbauend auf das AP 4.3 im Sinne der Nachhaltigkeit zu beachten, dass der Transport des Abfalls zur Aufbereitungsanlage von großer Bedeutung ist und somit auf lokale Gegebenheiten geachtet werden muss. Die Pyrolyse von Carbonfasern hat mit (> 50 kg CO₂ eq.) keinen unerheblichen Anteil am Treibhauspotential. Somit sollte der Einsatz der pyrolysierten Fasern sich im Bezug dazu auch rentieren.

Die Publikation des Lastenheftes erfolgt anschließend an das Projekt. Mitgliederkreise wie unter anderem die Fachvereinigung Faserbeton e.V. werden darüber informiert.

QUELLEN

- [1] DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- [2] KEHREN, Dominic, et al. Release of respirable fibrous dust from carbon fibers due to splitting along the fiber axis. *Aerosol and air quality research*, 2019, 19. Jg., Nr. 10, S. 2185-2195.
- [3] DIN EN 14651:2007-12 Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern - Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit); Deutsche Fassung EN 14651:2005+A1:2007.
- [4] DIN EN 1009-3: Maschinen für die mechanische Aufbereitung von Mineralien und ähnlichen festen Stoffen - Teil 3: Spezifische Anforderungen für Brecher und Mühlen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.
- [5] DIN 52108: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe - Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme - Schleifscheiben-Verfahren, Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [6] VDI Verein Deutscher Ingenieure VDI-RICHTLINIEN VDI 3400-3402.
- [7] VDI Verein Deutscher Ingenieure VDI-RICHTLINIEN VDI 3492 Global status report for buildings and construction. Messen von Innenraumluftverunreinigungen Messen von Immissionen Messen anorganischer faserförmiger Partikel Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren: Düsseldorf, Deutschland, 2013.
- [8] ISO 14966 International Standard Ambient air — Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles — Scanning electron microscopy method, Switzerland, 12-2019.
- [9] Mattenklott M. Nachweisgrenzen der Bestimmung von Asbestfaserkonzentrationen und –massegehalten in Bezug auf Grenzwerte Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Dezember 2013.
- [10] Backes, J.G., Traverso, M., & Horvath, A. (2023). Environmental assessment of a disruptive innovation: comparative cradle-to-gate life cycle assessments of carbon-reinforced concrete building component. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28.1, 16-37.
- [11] Hunkeler, D. Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. (2008). Environmental Life Cycle Costing (D.Hunkeler, K. Lichtenvort, & G. Rebitzer, Eds.). SETAC.
- [12] Lichtenvort, K., Rebitzer, G., Huppel, G., Ciroth, A., Seuring, S., Schmidt, W.-P., Günther, E., Hoppe, H., Swarr, T., & Hunkeler, D. (2008). Introduction: History of Life Cycle Costing, Its Categorization, and Its Basic Framework. In D. Hunkeler, K. Lichtenvort, & G. Rebitzer (Eds.), *Environmental Life Cycle Costing* (pp. 1–16). SETAC.
- [13] Schwarr, T. E., Hunkeler, D., Klopffer, W., Pesonen, H.-L., Ciroth, A., Brent, A. C., & Pagan, R. (2011). *Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice*. SETAC.
- [14] Zhang, C., Hu, M., Dong, L., Gebremariam, A., Miranda-Xicotencatl, B., Di Maio, F., & Tukker, A. (2019). Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 649-663.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder 2013, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallvermeidungsprogramm_bf.pdf, letzter Zugriff am 27.06.2024.
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder - Fortschreibung 2021,

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/fortschreibung_abfallvermeidungsprogramm_bund_laender_bf.pdf, letzter Zugriff am 27.06.2024.

- [17] Europäische Kommission: Richtlinie über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien – Abfallrahmenrichtlinie 2008,
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705>
- [18] Kortmann, J.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton, Dissertation. - Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [19] Bundesministerium der Justiz: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen - Kreislaufwirtschaftsgesetz 2012,
<https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>
- [20] BAU, KREISLAUFWIRTSCHAFTSTRÄGER. "13. Monitoring-Bericht der Bauwirtschaft." *Berlin/Düsseldorf/Duisburg* 2023, <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf>

Gemäß Antragstellung verfolgte das Projekt FaBeR das Ziel einer stofflich hochwertigen, umfassenden Nutzung von zu recycelnden Textilbetonbauteilen. Die Mineralik- und Faserfraktionen sollten in der Produktion von Zement, RC-Beton und Textil-/Faserbetonen genutzt werden. Diese Verwertung sollte den übrigen Baustoffstrom faserfrei halten. Weiterhin sollte die gesundheitliche Unbedenklichkeit im Hinblick auf mögliche Faseremissionen über den gesamten Aufbereitungs- und Verwertungszyklus sichergestellt werden. Abschließend erfolgte ein LCA, eine ökonomische Bewertung der entwickelten Baumaterialien und die Entwicklung mehrere Demonstratoren wie beispielsweise die Technikumsherstellung eines R-Zementes und die Entwicklung und der Bau eines faserbewehrten Industriefußbodens.

Die assoziierten Industriepartner Fydo Glassfibreconcrete und Hering Bau haben wie vorgesehen Produktionsabfälle aus Textilbeton mit Glas- bzw. Carbonbewehrung für die Aufbereitung zur Verfügung gestellt. Am AMR wurde die selektive Zerkleinerung mittels Backenbrecher mit anschließender Klassierung, mittels Siebung, zur Sortierung von Betonbruch und Fasern sowie zur Herstellung bestimmter Korngrößenverteilungen durchgeführt. Die Glasfasern konnten bei den verwendeten Proben nicht vollständig vom Beton separiert werden, so dass auch eine gemischte Fraktion entstanden ist. Die entsprechenden Fraktionen 0-2 mm, 2-4 mm, 4 - 8mm, > 8 mm, Carbon- bzw. Glasfaser wurden den jeweiligen Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Der produzierte Betonbruch wurde am ibac charakterisiert und in Zusammenarbeit mit der Firma PAGEL SPEZIAL-BETON als Gesteinskörnung in einer Werkrockmischung eingesetzt.

Die Feinfraktion wurde von der Holcim GmbH als Zementbestandteil in unterschiedlichen Zusammensetzungen im Labor getestet. Im Technikumsmaßstab wurde der Brechsand aufbereitet und anschließend mit Portlandzement und teilweise mit Hüttsandmehl zu unterschiedlichen Zementarten gemischt. Die verschiedenen Feinheiten der Technikumsmahlung beeinflussen die Festigkeiten der R-Zemente im betrachteten Bereich nicht. Diese Ergebnisse zeigen, dass zum Erreichen der Festigkeitsklasse 42,5 mit den verwendeten Mischkomponenten der normative Grenzwert (DIN EN 197-6:2023-12) von 20 % RC-Mehl nicht überschritten werden sollte.

Die Aufbereitung der Carbonfaserfraktion erfolgt bei Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH.

In einem Pyrolyseverfahren konnten aus CFK-Abfällen Kurzfasern hergestellt werden, die am ITA auf ihre Verbundeigenschaften beim Einsatz in Beton geprüft wurden. Die Kurzfasern zeichnen sich bereits ohne weitere Oberflächenbearbeitung oder -beschichtung durch hohe Verbundfestigkeiten aus. Die Faserlängenverteilung wurde mittels dem fibreshape-Prüfgerät der Firma IST AG untersucht. Bei der automatisierten Zählung von Fasern in dem optischen Verfahren ist eine wesentliche Schwierigkeit die Fasern voneinander zu separieren. Wenn Fasern sich kreuzen oder übereinanderliegen, hat das Programm Schwierigkeiten die Längenverteilung zu bestimmen, um dies zu umgehen, wird die Knickwinkeländerung betrachtet.

Mörtelversuche und Versuche im Betonmaßstab zeigen eine grundsätzlich gute Verarbeitbarkeit beider Recyclingfraktionen. Es ist ein Rezyklateinsatz von bis zu 100 % der Gesteinskörnung möglich. Der Mischbruch insgesamt funktioniert sowohl als Gesteinskörnung, sowie als Feinfraktion in Zement.

Das INaB erhielt von den Projektpartnern relevante Prozessdaten (Inputs und Outputs), die für die Modellierung der Ökobilanz relevant waren. Der Energiemix der Pyrolyse wirkt sich stark auf das Treibhausgaspotential aus, während die Zerkleinerung des Betons anteilmäßig am

bedeutendsten für das Humantoxizitätspotential ist. Die größten Umweltauswirkungen treten im Herstellungsprozess des Industriefußbodens auf. Dies ist insbesondere auf den nach wie vor notwendigen Einsatz von CEM III/A 42,5 R zurückzuführen.

Basierend auf den positiven Ergebnissen wurden unterschiedliche Rezepturen für einen faserbewehrten Industriefußboden in Form von Fertigteilen (Platten) entwickelt, um sowohl die Carbonkurzfasern, den separierten Betonbruch als auch den glasfaserhaltigen Betonbruch hochwertig zu nutzen. Die Rezepturen wurden zunächst im Labor getestet und anschließend als Gehwegplatten mit variierenden Zusammensetzungen auf einer Probefläche am ITA eingebaut und einer größeren Demonstratorfläche beim Kinderschutzbund Aachen e.V.

Auch zwei Recyclingzemente wurden im Betonmaßstab im Hinblick auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht.

Mögliche Faseremissionen im Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozess wurden in einer im Rahmen des Projekts aufgebauten Prüfkammer erfasst und bewertet. Es konnten keine Carbonfasern, die den WHO-Kriterien entsprechen identifiziert werden. Der Einsatz einer PSA wird dennoch dringend empfohlen, da bei den Prozessen in erheblichem Umfang feinkörniger Quarzstaub freigesetzt wird, der ebenfalls gesundheitsschädigend ist.

Bei Verwendung neuer Rohstoffe zur Herstellung der Carbonfasern sind analoge Untersuchungen notwendig, um sicherzustellen, dass keine Längsbrüche entlang der Faserachse auftreten.

Im letzten Schritt wurde ein Anforderungsprofil (ein Lastenheft) als Zusammenführung der Untersuchungsergebnisse der vorhergehenden Arbeitspakete erstellt. Das Lastenheft mit Anforderungsprofil dient als Anleitung zum Umgang mit den untersuchten Textilbetonen nach der Abfallhierarchie der Europäischen Union.