ce/papers Proceedings in civil engineering

Ernst & Sohn A Wiley Brand

ORIGINAL ARTICLE

ibausil F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Bauhaus-Universität Weimar

Entwicklung von Carbonfasermörteln als schützende Chloridbarriere für neue und junge Stahlbauwerke

Annika Kunz[1] | Jeanette Orlowsky[1]

Korrespondenz

Annika Kunz, M.Sc.
Technische Universität Dortmund
Werkstoffe des Bauwesens
August-Schmidt-Str. 8
44227 Dortmund
E-Mail: annika.kunz@tu-dortmund.de

[1] TU Dortmund, Dortmund, Deutschland

Kurzfassung

Die Bewehrungskorrosion reduziert die Lebensdauer von Bauwerken aus Stahlbeton maßgeblich. Eine Hauptursache sind Chloride aus Tausalzen oder Meerwasser, die in den Beton eindringen. Daher haben sich die Industriepartner instakorr GmbH, Massenberg GmbH, Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH und Forschungspartner FH Münster sowie TU Dortmund zusammengeschlossen, um im Rahmen eines ZIM-Forschungsprojektes den präventiven Schutz durch eine Chloridbarriere zu untersuchen. Die TU Dortmund führt innerhalb des Projektes Untersuchungen zu Mörtelzusammensetzungen durch und charakterisiert diese. Eine weitere Besonderheit ist der Nachhaltigkeitsaspekt, da recycelte Carbonfasern für die Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit eingesetzt werden. Dafür kommen verschiedene Faserarten, -geometrien und -gehalte zum Einsatz. In dieser Veröffentlichung werden Ergebnisse aus der Definition und Variation der Parameter sowie Daten der Laborversuche gezeigt und die leistungsfähigsten Kombinationen im Hinblick auf den Einsatz in der Chloridbarriere dargestellt.

Schlüsselwörter

Carbonfasern, Mörtel, Dauerhaftigkeit, Schutz, Chloride, Nachhaltigkeit

1 Einleitung

In der Baubranche stellen gegenwärtig Bauwerksinstandsetzungen einen großen Anteil dar. Prognosen zeigen, dass der Anteil der Schäden durch Bewehrungskorrosion sowie die daraus entstehenden Kosten in den kommenden Jahren zunehmen werden. Besonders die chloridinduzierte Korrosion ist bei Untersuchungen von Stahlbetonbauwerken in den vergangenen Jahren als eine maßgebliche Ursache für Schäden identifiziert worden. Vor allem in den Wintermonaten dringen Tausalzlösungen in Parkbauten, Brücken und Tunnel ein. Hinzukommen Meeresbauwerke, die von einem Chlorideintrag in den Beton ganzjährig betroffen sind. Die über die Zeit auftretenden Schäden führen in der Regel unerlässlich zu Instandsetzungsmaßnahmen [1].

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, Konzepte zu entwickeln, die neue und junge Stahlbetonbauten präventiv vor Bewehrungskorrosion durch Chloride schützen und durch verlängerte Lebensdauer den wirtschaftlichen und ökologischen Schaden vermindern. Um einen innovativen Lösungsansatz zu entwickeln, forschen die Projektpartner am Konzept einer elektrochemischen Chloridbarriere, die die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken über die geplante Nutzungsdauer sicherstellt.

Die Entwicklung des Systems basiert auf einem Mörtel mit recycelten Carbonfasern, welcher flächendeckend auf die zu schützenden Bauteiloberflächen appliziert wird. Durch Zugabe von geschnittenen und/oder gemahlenen Carbonfasern wird der Mörtel leitfähig und kann als flächige Anode wirken. Zwischen dem Carbonfasermörtel (Anode) und der Stahlbewehrung (Kathode) wird ein elektrisches Feld hergestellt, wodurch die Diffusion und Migration von Chloridionen in den Stahlbeton erschwert oder sogar unterbunden wird.

Geringe Installations- und Wartungskosten sowie geringerer Energiebedarf soll das innovative System von bereits bestehenden Lösungen wie dem kathodischen Korrosionsschutz unterscheiden. Zudem kann der Einsatz auch bei jungen Bauwerken oder gar im Neubau erfolgen, wodurch aufwendige Sanierungen bzw. hohe Kosten vermieden werden können.

Damit die vollflächige Barrierefunktion erreicht werden kann, gilt es den Mörtel so zu entwickeln, dass zentrale Eigenschaften, wie die elektrische Leitfähigkeit, gezielt einstellbar sind. In dem Zusammenhang forscht die TU Dortmund an Mörtelzusammensetzungen mit verschiedenen Anteilen an recycelten Carbonfasern sowie unterschiedlichen Fasergeometrien. Neben der Variation der Fasern wurden im Vorfeld unterschiedliche Sieblinien entwickelt und optimiert [2]. Insgesamt werden die Mörtel

© 2023 The Authors. Published by Ernst & Sohn GmbH.

https://doi.org/10.1002/cepa.2991

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

anhand Frisch- und Festbetoneigenschaften analysiert. Weiterhin gilt es Mischungsabläufe und Mischenergien zu beleuchten, da die Verarbeitbarkeit des Carbonfasermörtels ein entscheidender Faktor für die Materialeigenschaften und dessen Applikation ist. Kern der Laboruntersuchungen ist die Messung des elektrischen Widerstands. Dieser Versuch geht mit weiteren Untersuchungen zur Feuchtigkeit wie z. B. Versuche zur Wasseraufnahme und -gehalt einher. Um Belastungen in der Praxis standhalten zu können, werden ebenfalls Laborversuche zu den mechanischen Eigenschaften durchgeführt.

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Materialien

Für die nachfolgend erläuterten Untersuchungen wurden vier verschiedene Mörtel hergestellt. Drei von diesen Mörteln enthalten Carbonfasern wohingegen die vierte auf dem gleichen Betonentwurf ohne Fasern basiert. Daher ist die Gemeinsamkeit aller Mörtel die Sieblinie und der Bindemittelgehalt. Somit können die Unterschiede bezüglich der Faserart und -gehalt detektiert werden. Die Entwicklung der hier dargestellten Mörtel basiert auf Voruntersuchungen hinsichtlich mechanischer und physikalischer Eigenschaften sowie Konformitätsmessungen [2].

Den Hauptanteil der Gesteinskörnung bilden verschiedene Jurakörnungen der Firma sh minerals. Das Größtkorn liegt bei 4 mm. Ebenfalls verwendet werden von sh minerals die Feinzuschläge und Betonzusatzstoffe sh easyflow und Nordkalk Enrich A um die Verarbeitbarkeit durch kubische Kornformen zu steigern sowie die Oberflächenqualität zu verbessern.

Als Fasern wurden zwei verschiedene Carbonfasertypen von Mitsubishi Chemical Advanced Materials zugegeben. Zum einen handelt es sich um ein gemahlenes und zum anderen um ein geschnittenes Fasermaterial. Bei beiden Typen handelt es sich um ein recyceltes Material mit mindestens 95 % Carbonfasergehalt, das nahezu frei von Verunreinigungen ist. Die Länge der gemahlenen Fasern beträgt max. 0,1 mm, während das geschnittene Material eine Länge von 6 mm aufweist (Abb. 1).

Abbildung 1 Gemahlene Carbonfaser carbonxt milled 100 NP (links). Geschnittene Carbonfaser carbonxt chopped 6000 NP 5R (rechts)

Der Anteil an Fasern unterscheidet sich deutlich zwischen den Mörteln, da die Verarbeitbarkeit der verschiedenen Fasertypen in anderen Größenordnungen beeinträchtigt wird [2]. Im Vorfeld wurde daher der Wasseranspruch des jeweiligen Fasertyps ermittelt. Denn während des Herstellvorgangs entziehen die Fasern dem Frischmörtel Wasser, das zusätzlich einkalkuliert werden muss. Die Qualität der Verarbeitbarkeit des Frischmörtels hinsichtlich der Konsistenz kann durch die Bestimmung des Ausbreitmaßes verglichen werden.

Tabelle 1 Mörtelzusammensetzungen und Faseranteile

Bezeichnung	Gemahlene Fasern	Geschnittene Fasern
Referenz	Keine	Keine
m.1,5	1,5 Vol.-%	Keine
c.0,3	Keine	0,3 Vol.-%
c.0,1-m.0,9	0,9 Vol.-%	0,1 Vol.-%

2.2 Probekörper und Versuchskonzept

An hergestellten Prismen (40 x 40 x 160 mm³) werden nach 7d und 28d Biege- und Druckfestigkeiten (DIN EN 196-1) gemessen. Innerhalb von 56d wurde das Schwindverhalten nach DIN EN 12617-4 detektiert.

Zusätzlich werden Mörtelscheiben mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 2 cm hergestellt. In der Applikation am Bauwerk soll die geplante Mörtelschicht ebenfalls eine Dicke von 2 cm aufweisen, wodurch die Messungen des elektrischen Widerstands realitätsabbildend werden. Die Proben werden in einem Trockenschrank auf Massekonstanz getrocknet (DIN EN 12570) und anschließend die kapillare Wasseraufnahme bestimmt. Ergänzend wird dazu erneut der elektrische Widerstand bei unterschiedlichen Feuchtegehalten gemessen. Die Ermittlung des elektrischen Durchgangswiderstands erfolgt mit dem Messgerät resipod des Herstellers proceq (Abb.2).

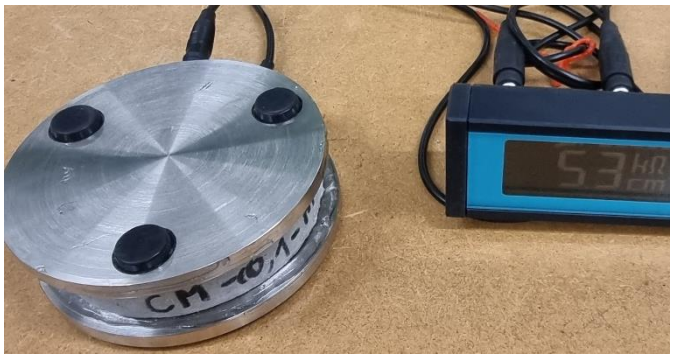

Abbildung 2 Darstellung des Messprinzips des elektrischen Widerstands an einer Probe der Charge c.0,1-m.0,9.

Voruntersuchungen zeigten, dass sich mit den mitgelieferten Schaumkontakten keine präzisen Ergebnisse erzielen lassen. Denn die Carbonfasermörtelproben saugen das Wasser aus den Kontakten zügig auf, wodurch sich der Eigenwiderstand der Schaumkontakte verändert sowie je nach Porosität die der Mörtelscheiben. Daher wird der elektrische Kontakt zwischen den Messplatten mit Ultraschallgel hergestellt, da das Gel keinen Eigenwiderstand

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

aufweist und nicht allzu schnell von den Proben aufgenommen wird. Der Messwert kann direkt abgelesen, aber muss vor der Auswertung mit einem Korrekturwert multipliziert, werden. Dieser ist abhängig von Probenhöhe, Elektrodenabstand und Kontaktfläche. Er lautet für die vorliegenden Proben 1,25 [-]. Ein Messbereich bis ca. 1600 kΩcm ist möglich.

Auf Grundlage, der sich ändernden Verarbeitbarkeit unter Zugabe der Fasermaterialien, werden ausgehärtete Proben auch mit Mikroskopaufnahmen untersucht. Dies erlaubt auch eine Erfassung der Verteilung der Carbonfasern. Eine Gefügeanalyse der Proben findet unter 50-facher und 100-facher visueller Gesamtvergrößerung unter dem Mikroskop statt. Hierzu wurden 1 cm starke abgesägte Streifen von den geprüften Prismen sowie deren Bruchflächen betrachtet.

Die Herstellung der Mörtelproben erfolgt in einem Eimermischer. Zuerst wird die Trockenmasse innerhalb von 30s homogenisiert. Im Anschluss wird ¾ des Wassers hinzugegeben, was als Start der Nullzeit notiert wird. Nach 60s wird das restliche Wasser hinzugegeben und für weitere 60s vermengt. Nach Ablauf der Mischzeit von 120s endet die Mischzeit des Referenzmörtels. Bei den übrigen Mörteln werden im nächsten Schritt die Carbonfasern eingestreut und für weitere 60s untergehoben.

Für die Prismen und Scheiben gilt: Die Frischmörtelmasse wird in zwei Lagen in die jeweilige Schalung eingefüllt und mittels Rütteltisches verdichtet. Alle Schalungen wurden abgedeckt und bis zum Ausschalen nach 24h in einem Feuchtschrank bei 20°C und 90% r.F. gelagert. Die ausgeschalten Proben, mit Ausnahme der Schwindprismen, werden bis zur entsprechenden Prüfung in einem Wasserbad gelagert.

Um weitere Parameter für die Eignung des Mörtels am Bauwerk zu untersuchen, werden 12 Altbetonplatten (300 x 300 x 100 mm³) hergestellt, die nach DIN EN 1766 einem Typ C 0,45 entsprechen. Nach 27d Wasserlagerung und einer 24h Lagerung bei Normallaborklima werden die schalungsglatten Oberflächen mittels druckluftbetriebenen Nadelentroster auf eine Tiefe von 0,65-0,83 mm angeraut. Im Nachgang werden die vier verschiedenen Mörtel mit einer Schichtdicke von 2 cm appliziert und nach 24h erneut 27d im Wasserbad gelagert. Nach 24h Abtrocknungszeit werden acht Proben in die Frosttruhe aufrecht eingelagert und Zyklen von -20°C bis 60°C einer Temperaturwechselbeanspruchung ausgesetzt. Aufgrund des großen Volumens der Anlage, beträgt ein Zyklus etwa 24h. Nach jeweils 10 Zyklen erfolgt eine Sichtprüfung der Proben innerhalb von 16h. Nach 50 Zyklen ist die Prüfung beendet. Die restlichen vier Proben werden 54 Tage bei Normallaborklima aufbewahrt und dienen als Referenzplatte je Charge. Abschließend werden an allen Platten die Haftzugfestigkeit nach DIN EN 1542 geprüft an fünf Messpunkten pro Probenplatte durchgeführt. Dafür werden zunächst Ringnuten mit einem Durchmesser von 50 mm gebohrt. Nach Norm muss die Bohrtiefe bei einer 20 mm Schicht 35 mm betragen. Anschließend werden jeweils fünf Stempel mit dem Haftzugklebstoff MC-Quicksolid angebracht und nach dem Aushärten geprüft.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Verarbeitbarkeit der frischen Mörtel

Im ersten Schritt werden die Konformitätseigenschaften der Mörtel beleuchtet (Tab. 2). Nach Hinzen wird für die Erläuterung der Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit der sogenannte Faserfaktor herangezogen [3]. Dafür wird der Volumenanteil mit der Faserlänge multipliziert und das Ergebnis durch den Durchmesser geteilt. Alle Faktoren in der Gleichung besitzen einen linearen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit mit Faserzuschlag [3,4].

Tabelle 2 Konsistenzklassen nach DIN EN 1015-3 der Mörtel nach 10 min

Bezeichnung	Ausbreitmaß [mm]	Konsistenzklasse	Faserfaktor	Rohdichte [g/cm³]
Referenz	175	plastisch	0,00	2,28
m.1,5	157	plastisch	0,25	2,29
c.0,3	126	steif	3,00	2,23
c.0,1-m.0,9	147	plastisch	1,15	2,26

Der Mörtel mit einer Menge von 0,3 Vol.-% geschnittenen Fasern liegt mit einem Ausbreitmaß von 126 mm deutlich unter dem des Referenzmörtels (175 mm) und wird im Gegensatz zu den anderen Mörteln in die steife Konsistenzklasse eingeordnet. Die längere Faser hat folglich, trotz geringerem Zuschlag, einen großen Einfluss auf die Konsistenz. Daher lässt sich eine eindeutige Abhängigkeit zum Faserfaktor ableiten: je größer der Faserfaktor, desto kleiner die Ausbreitmaße. Der Faserfaktor zeigt außerdem, dass gemahlene Fasern mit einem höheren Volumenanteil an der Gesamtmasse hinzugegeben werden können als die geschnittenen.

Die Faserlänge könnte über dessen Oberfläche bereits für einen Zusammenhalt des Frischmörtels sorgen. Dies lässt sich über die leicht abfallende Rohdichte (2,23 g/cm³) bestätigen. Aufgrund des Zusammenhalts ist die Verdichtungsfähigkeit gegenüber den anderen Mörteln eingeschränkter, wodurch sich leichte Gefügestörungen ausbilden. Eine Faser ist nach Untersuchungen von Hinzen nur effizient, wenn diese ihre vollständige Mantelfläche im Verbund aktivieren kann [3]. Dies gilt es in den nachfolgenden Untersuchungen zu erforschen.

3.2 Gefügeanalysen an Schnittflächen

Die Mikroskopaufnahmen zeigen, dass das gemahlene Fasermaterial homogen im Zementstein verteilt ist. Die Fasern liegen einzeln vor und sind vom Zementstein, ohne angrenzende Porenbildung umschlossen. Ein Vergleich der Mörtel zeigt deutlich, dass sich die geschnittenen Fasern anders in das Gefüge einbinden als das gemahlene Material. Von den geschnittenen Fasern können sich hingegen nicht alle Fasern von dem Faserbündel abtrennen. Der Mörtel mit beiden Faserarten stellt eine Mischung beider

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

Szenarien dar (Abb.3). Während sich das gemahlene Material gleichmäßig verteilt, liegen die geschnittenen Fasern überwiegend gebündelter vor. Bei den Restbündeln können ausschließlich die außenliegenden Fasern Kontakt zum Zementstein bilden. Daher kann nicht von einer Homogenität gesprochen werden, obwohl über die gesamte untersuchte Fläche Fasern vorliegen. Darüber hinaus mindert die kleinere Kontaktfläche zwischen der Faser und dem Zementstein den Einfluss der Faser im Verbund. Des Weiteren ist bei Mörteln mit geschnittenen Kurzfasern zu sehen, dass im Verdichtungsprozess weniger Luft entweicht und sich dies sowohl im Inneren der Probekörper als auch an den Oberflächen durch eine höhere Anzahl an Poren bemerkbar macht.

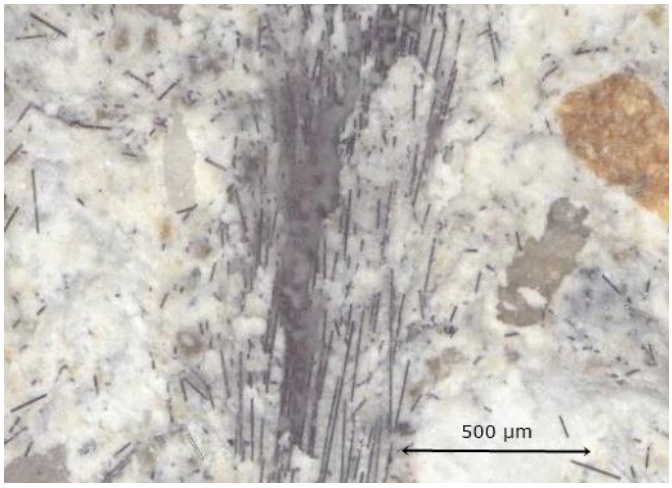

Abbildung 3 Ausschnitt einer Mikroskopaufnahme der Schnittfläche eines c.0,1-m.0,9 Probekörpers

3.3 Biegezug- und Druckfestigkeit

Nach 7d und 28d wird jeweils an drei Prismen die Biegezugfestigkeit bestimmt. Die Festigkeit nach 7d liegt zwischen 6,92 N/mm² und 8,15 N/mm², während die 28-Tagefestigkeit zwischen 8,06 N/mm² und 8,45 N/mm² liegt (Abb. 4).

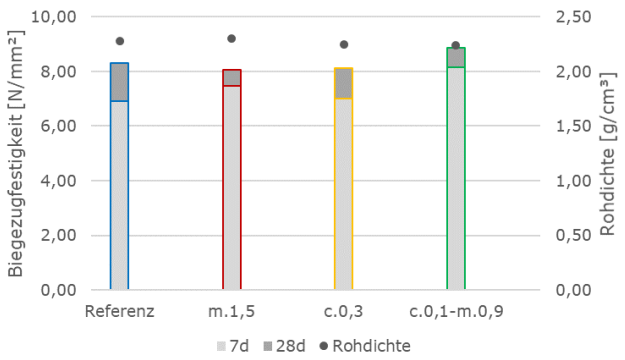

Abbildung 4 Biegezugfestigkeiten der Mörtel im Vergleich

Ein Augenmerk der Untersuchung liegt auf dem Einfluss, ob sich die Biegezugfestigkeit durch die Faserzugabe erhöht und ob die geschnittenen Fasern durch ihre Länge von 6 mm mehr Kraft übertragen können.

Mörtel mit Faseranteilen zeigen nach 7d einen leichten Zuwachs der Biegezugfestigkeit im Vergleich zum Mörtel ohne Fasern. Dabei liegt c.0,3 auf ähnlichem Niveau mit dem Referenzmörtel. Ein Grund dafür könnten die in Kapitel 3.2 beschriebenen Gefügestörungen und die eingeschränkte Verarbeitbarkeit sein. Die Mörtel mit einem Anteil an gemahlenen Carbonfasern weisen nach 28d eine geringere Festigkeitszunahme auf. Jedoch zeigt der Mörtel mit einem Mix aus geschnittenen und gemahlenen Fasern die höchste Festigkeit. Dies könnte bestätigen, dass der Volumenanteil von 0,1 Vol.-% bereits für eine festigkeitsfördernde Wirkung ausreicht bzw. zu gering ist, um das Gefüge zu stören. Des Weiteren könnten die gemahlenen Fasern Hohlräume ausfüllen. Somit liegt eine höhere Verbundwirkung vor.

Bei den Untersuchungen zur Druckfestigkeit ist es nicht zu erwarten, dass die Mörtel durch die Zugabe von Carbonfasern druckfester werden. Es gilt eher zu überprüfen, ob die Fasern keinen deutlichen festigkeitsmindernden Einfluss durch den Eintrag von Poren haben und der Mörtel in der Praxis eingesetzt werden kann. Die Fasern können die Zugverformung quer zur Faser nicht beeinflussen. Für einen Einfluss des höheren E-Moduls der Carbonfasern von über 230.000 N/mm² gegenüber den Mörteln, ist der Volumenanteil zu gering.

Für jeden Prüfungstag liegen jeweils sechs Einzelergebnisse vor. Es ist ausschließlich bei dem Mörtel c.0,3 ein deutlicher Abfall der Druckfestigkeit zu verzeichnen (Abb.5). Der Mörteldruckfestigkeit liegt bei c.0,3 nach 28d unter 40 N/mm² und 10% unter dem des Referenzmörtels. Dies lässt erneut auf Störungen des Mörtelgefüges schließen. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass weder der Fasergehalt noch die Faserlänge einen nennenswerten Einfluss auf die Druckfestigkeit haben. Zudem ergab die Ermittlung des E-Moduls, dass die Faserzugabe keinen nennenswerten Einfluss hat.

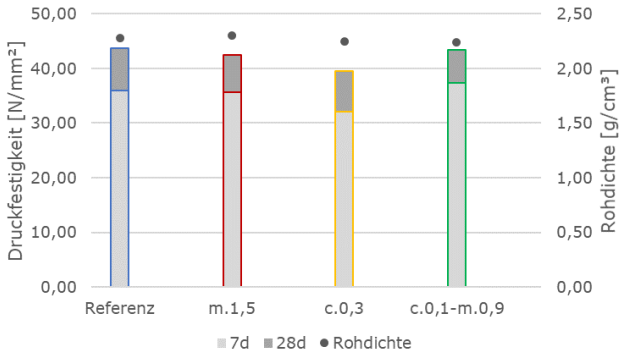

Abbildung 5 Druckfestigkeiten der Mörtel im Vergleich

Abschließend lässt sich feststellen, dass sowohl die Biegezug- als auch die Druckfestigkeitswerte in praxistauglichen Bereichen liegen.

3.4 Schwinden (Früh- und Trocknungsschwinden)

Zur Interpretation der Ergebnisse der Schwindeigenschaften ist zunächst wichtig, dass bei dem Schwindvorgang Spannungen im Gefüge der Probekörper entstehen. Der Grund dafür ist, dass die Gesteinskörnung ein geringeres Schwindmaß aufweist als der Zementstein. Dadurch entsteht eine Druckbelastung auf die Körnung und Zugspan-

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

nungen im Bindemittel. [5] Die Carbonfasern könnten einen positiven Einfluss auf die Zugspannung im Zementgestein haben und dadurch die Schwinddehnung reduzieren. Jedoch hat der Zementanteil den maßgebenden Einfluss auf das Schwindmaß, dieser liegt bei den Mörteln in dieser Veröffentlichung bei 460 kg/m³. Der gesamte Bindemittelgehalt liegt bei 628 kg/m³. Für die Prüfung wurden jeweils 6 Prismen untersucht.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Prüfung zum unbehinderten Schwinden dargestellt. Des Weiteren sind in der Darstellung die Gewichtsänderungen in kg/m³ erfasst. Die Linien für das Schwindmaß sind mit Punkt-Markierungen sowie dem Zusatz „S" gekennzeichnet, wohingegen die Massenverluste durch Rauten und „M" dargestellt werden.

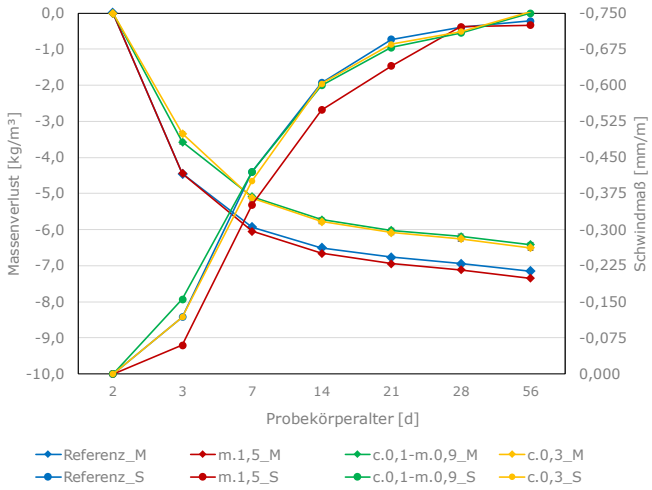

Abbildung 6 Abhängigkeitsdarstellung vom Massenverlust und Schwindmaß

Auffällig ist, dass der Mörtel m.1,5 zunächst eine deutlich geringere Längenänderung erfährt und erst nach 28d den anderen Mörteln gleicht. Zu Beginn ist die Längenänderung der übrigen Mörtel um 100% höher. Wie bereits im Vorfeld erläutert, nehmen die Fasern Wasser auf und der gemahlene Zuschlag verteilte sich homogen im Gefüge, sodass die Fasern ebenfalls gleichmäßig die Probe beeinflussen kann. Der verzögerte Start der Längenänderung kann mit einer Art inneren Nachbehandlung durch die Fasern zusammenhängen. Die Möglichkeit, dass die Fasern durch den deutlichen höheren Anteil in den ersten Tagen einen Anteil des Wassers an die Probe abgibt und den Start des Schwindens so verzögert ist anzunehmen. Der Gewichtsverlust von m.1,5 ist bereits nach drei Tagen vergleichsweise hoch. Dieser Zustand könnte auf Grund einer inneren Nachbehandlung durch die Fasern zustande gekommen sein, da der Referenzmörtel unter gleichem Wasserverlust bereits die doppelte Längenänderung aufweist.

Die Darstellung des Masseverlustes zeigt, dass die Proben mit geschnittenen Fasern in den 56 Tagen weniger Masse verlieren als die übrigen Probekörper. Die Tatsache spiegelt wider, dass die Fasern eine erhöhte Wasseraufnahme haben und den w/z-Wert in der Probe herabsetzen. Im Wesentlichen kann festgehalten werden, dass die Carbonfaser nach 56 Tagen weiterhin Wasser gespeichert hat, da der Gewichtsverlust sonst keine Unterschiede aufzeigen würde. Es ist hingegen zugleich möglich, dass die Fasern das zunächst aufgezogene Wasser zeitlich versetzt wieder an das umliegende Gefüge abgeben. Da die Fasern zusätzlich Zugspannungen im Zementstein aufnehmen können, könnten sich ggf. geringere Schwindmaße ergeben.

Die Faserzugabe zeigt nach 56 Tagen keinen deutlichen Einfluss auf die Längenänderung. Der Linienverlauf des Schwindmaßes zeigt allerdings, dass bei den Mörteln mit geschnittenen Fasern die Längenänderung noch nicht im konstanten Bereich ist. Es ist darauf zu achten, dass der Porenanteil durch die Zugabe von geschnittenen Fasern nicht steigt. Die Gefügestörungen mit einem Eintrag von Luftporen können das Schwindmaß steigern. Positiv festzuhalten ist, dass nach Abschluss der Versuchslaufzeit, auch unter Wasserbenetzung, bei allen Probekörpern kein Rissbild zu erkennen ist.

3.5 Temperaturwechselverträglichkeit

Die Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit ist mit sechs Sichtprüfungen verbunden. Eine erste Prüfung findet vor Einlagerung in die Frost-Anlage statt. Die restlichen Prüfungen erfolgten nach jeweils 10 Temperaturzyklen.

Nach 50 Zyklen ist ein Unterschied zwischen Proben mit Faserzuschlag und dem Referenzmörtel nicht erkennbar. Es ist ausschließlich bei dem Referenzmörtel, der als Referenz bei Normallaborklima gelagert wurde, ein feines Rissbild nach Wasserbenetzung sichtbar. Innerhalb der Frost-Anlage herrscht durch die Temperaturzyklen eine höhere Luftfeuchtigkeit. Die Feuchtigkeit kann sich auf die Festigkeitsentwicklung des Mörtels und des Betons auswirken [6]. Der Feuchteunterschied zeigt, dass der Referenzmörtel bei Laborlagerung netzartige Schwindrisse bekommt. Die Carbonfasermörtel weisen hingegen nach Laborlagerung keine Risse auf. Die Temperaturwechsel von -20°C auf 60°C über 24h scheinen die Probekörper nicht zu beeinflussen.

3.6 Haftzugfestigkeit

Zwei von drei Betonplatten mit den jeweiligen Mörteln nach Tabelle 2 werden in der Frost-Anlage (FA) den Temperaturzyklen ausgesetzt. Die Laborlagerung (LL) gilt ausschließlich für die dritte Vergleichsplatte. Infolgedessen soll der Einfluss aus der Temperaturwechselverträglichkeitsprüfung auf die Proben untersucht werden. Um ein Versagen im Instandsetzungsbereich ausschließen zu können wird eine mittlere Haftzugfestigkeit von ≥ 2,0 N/mm² empfohlen [7 Raupach & Orlowsky].

In der folgenden Abbildung 7 sind die Mittelwerte inklusive Streubreite für die Haftzugfestigkeiten dargestellt. Diese sind auf der primären y-Achse in N/mm² abzulesen. Auf der x-Achse ist die zum einen die Einteilung nach Mörteln, die Lagerungsbedingung sowie die Versagensart zu finden. Dabei steht M/B für Adhäsionsbruch zwischen Beton und Mörtel, M für Kohäsionsbruch im Mörtel und B für Kohäsionsbruch im Beton. Das Versagen zwischen Klebeschicht und Instandsetzungsmörtel ist nicht dargestellt. Die zwei Platten aus der Frost-Anlage (FA) sind als ein Balken dargestellt und spiegeln maximal 10 Messwerte wider.

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

Für die Referenzplatten gibt es maximal fünf Messwerte. Alle Differenzen zur Maximalanzahl sind im Kleber versagt. Auf der Sekundärachse ist die Anzahl der Stempel mit dem jeweiligen Bruchbild dargestellt. Die Punkte können an den entsprechenden Balken abgelesen und der Versagensart auf der horizontalen Achse zugeordnet werden.

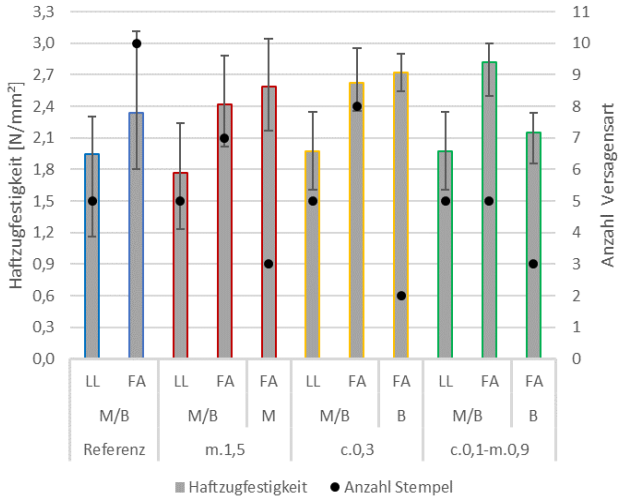

Abbildung 7 Haftzugfestigkeiten aller Mörtel je nach Versagensart und Lagerung

Auffällig ist, dass es bei den Platten, die mit dem Referenzmörtel beschichtet wurden, ausschließlich zum Versagen in der Kontaktzone zwischen Mörtel und Beton kommt. Bei dem temperaturwechselbeanspruchten Mörtel m.1,5 kommt es zudem bei drei von zehn Messungen zum Versagen innerhalb der Mörtelschicht. Allein bei den Mörteln, die geschnittenen Fasern beinhalten und in der Frost-Anlage gelagert werden, kommt es zu Kohäsionsbrüchen im Betonsubstrat. Die Verbundfestigkeit liegt dementsprechend höher.

Generell lässt sich für alle Mörtel feststellen, dass es hauptsächlich zum Adhäsionsbruch kommt. Vor allem die Vergleichsplatten, die bei Normallaborklima gelagert werden, versagen alle zwischen den beiden Schichten. Beim Vergleich der Mittelwerte liegen sowohl die Mörtel mit geschnittenen Fasern als auch der Referenzmörtel bei 1,97 N/mm². Lediglich die Referenzplatte von m.1,5 liegt mit 1,77 N/mm² darunter. Des Weiteren ist die Streubreite der Platten von Mörtel c.0,3 und c.0,1-m0,9 deutlich geringer als bei denen der übrigen Mörtel. Insbesondere die großen Streubreiten bei den Platten auf denen der Referenzmörtel appliziert wurde zeigen, dass unterschiedlich starke Verbundzonen ausgebildet wurden. Vor allem bei den Proben die durch Temperaturwechsel beansprucht werden, bilden sich Wertebereiche von 1,80 bis 3,11 N/mm² aus. In Kapitel 3.5 wird beschrieben, dass die Lagerung im Labor zu oberflächlichen Rissen bei dem Referenzmörtel führt. Die Oberflächenvorbereitung des Betons ist für die vorliegenden Mörtel demnach zu optimieren, um nach 28d sicher eine mittlere Haftzugfestigkeit von 2 N/mm² zu erzielen.

Entgegen der Annahme, dass die Temperaturwechselbeanspruchung zu Schäden führt, zeigt Abbildung 7 deutlich, dass bei jedem Mörtel die Platten aus der Frost-Anlage deutlich höhere Haftzugfestigkeiten erzielen. Bei diesen Platten liegt die Haftzugfestigkeit immer über dem empfohlenen Bereich von 2 N/mm² [7]. Daher ist ein festigkeitsmindernder Einfluss aus der Beanspruchung von 50 Zyklen in der Frost-Anlage zunächst bei den Platten mit Carbonfasermörteln nicht erkennbar. Im Gegenteil sorgt das Klima innerhalb der Frost-Anlage für eine Feuchthaltung und eine damit verbundene höhere Festigkeitsentwicklung sowie steigernde Verbundfestigkeit.

3.7 Elektrischer Widerstand

Auf den elektrischen Widerstand nehmen im Wesentlichen zwei Faktoren Einfluss: der Feuchtegehalt innerhalb des Probekörpers und die Carbonfasern. Für die Bestimmung des elektrischen Widerstands wurden jeweils sechs Proben trocken und bei unterschiedlichen Feuchtegraden gemessen. Die Feuchtegehalte stellten sich durch die kapillare Wasseraufnahme nach DIN EN 13057 ein.

Bei der Auswertung der Daten ergeben sich für die Mörtel zwei unterschiedliche Wertebereiche, daher werden jeweils zwei Mörtel in einem Diagramm zusammengefasst. Die Abbildung 8 umfasst den Referenzmörtel und m.1,5, da diese im trockenen Bereich höhere Leitfähigkeiten aufweisen. In Abbildung 9 sind die Mörtel mit geschnittenen Fasern dargestellt, die bei etwa gleichem Feuchtegehalt, den elektrischen Widerstand um den Faktor 75 verringern können. Im Vergleich zum Referenzmörtel liegt der elektrische Widerstand des m.1,5 bei einer Feuchte von ca. 0,7 M.-% um ein Drittel darunter (Abb. 8). Daher bestätigt sich bereits ein positiver Einfluss von gemahlenen Fasern auf die elektrische Leitfähigkeit. Je höher die Feuchtegehalte werden, desto weniger macht sich der Einfluss der Fasern bemerkbar. Ab einer Feuchte von ca. 4 M.-% nähern sich die Wertebereiche der beiden Mörtel an.

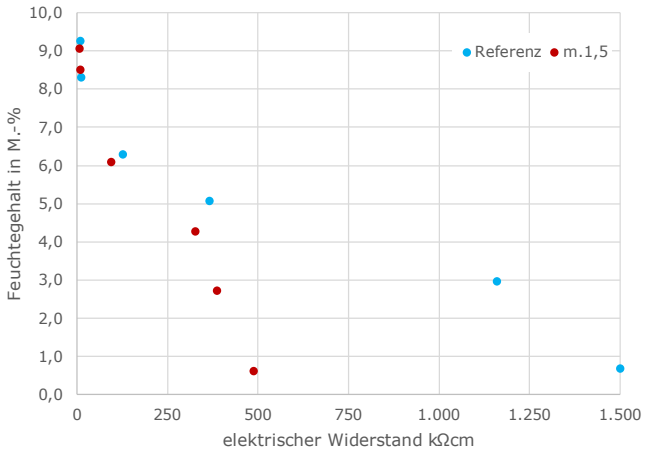

Abbildung 8 Elektrischer Widerstand vom Referenzmörtel und m.1,5 in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

Um bei den Chargen mit geschnittenen Fasern eine Veränderung der Widerstände deutlich zu machen, ist eine abweichende Skalierung der x-Achse gewählt worden (Abb. 9). Unabhängig vom Feuchtegehalt, liegen alle Widerstände unter der des Referenzmörtels. In Abbildung 9 ist ebenfalls erkennbar, dass bei zunehmender Feuchtigkeit, die Faser an Einfluss auf die Leitfähigkeit verliert. Während bei einem Feuchtegehalt von etwa 3 M.-% der Referenzmörtel einen um den Faktor 40 höheren Widerstand aufweist, sinkt der Faktor bei ca. 6 M.-% auf 13.

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

Des Weiteren ist erkennbar, dass mit höherem Anteil an geschnittenen Fasern der elektrische Widerstand sinkt. Obwohl bei dem Mörtel c.0,1-m.0,9 ein vergleichsweiser hoher Anteil an gemahlenen Fasern vorliegt, liegt gerade in trockenen Zuständen noch der Faktor 3 gegenüber den nur geschnittenen Fasern vor. Den Einfluss der Faserart bestätigt ebenfalls die Charge mit 1,5 Vol.-% an gemahlenen Fasern. Diese besitzt einen 5-mal höheren Anteil an Carbonzuschlag und erreicht trotzdem erst einen Widerstand unter 100 kΩcm bei etwa 6 M.-% Feuchte. Die 6 mm langen Fasern scheinen sich in den Probekörpern besser zu vernetzen und den Strom zu leiten. Die gemahlenen Fasern sind zwar homogen verteilt, aber bilden durch die vollständige Ummantelung von Zementstein einen höheren Widerstand aus.

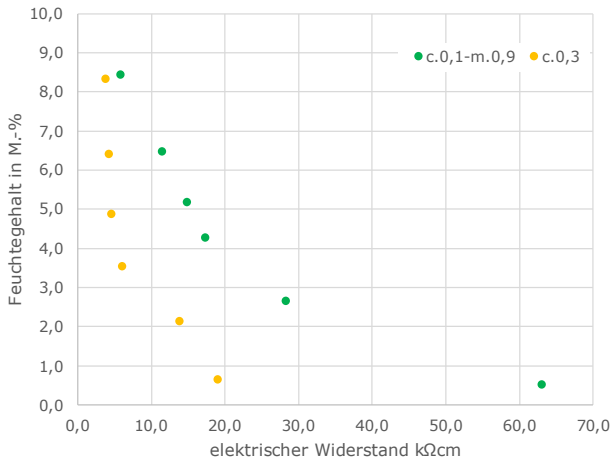

Abbildung 9 Elektrischer Widerstand von c.0,1-m.0,9 und c.0,3 in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

4 Schlussfolgerungen

Bei der Herstellung der Mörtel wurde deutlich, dass die Faserlänge einen großen Einfluss auf die Konsistenz und folglich auf die Verarbeitbarkeit hat. Die Qualität der Verarbeitbarkeit spiegelt sich in den mechanischen Eigenschaften wider.

Die durchgeführten Untersuchungen zum Schwinden zeigen nach 56 Tagen kaum Unterschiede im Schwindmaß. Der Grund dafür ist, dass sich die schwindmaßreduzierenden und schwindmaßsteigernden Einflüsse auszugleichen scheinen. Die Ergebnisse aus 3.4 zeigen unter anderem, dass in einigen Fällen eine Verlängerung der Versuchsdauer sinnvoll ist. Nach 56 Tagen scheint das Schwinden der Proben mit geschnittenem Faseranteil noch weiter zu steigen. Die Vermutung, dass die Faser zur Verzögerung der Entwicklung der Eigenschaften beiträgt, kann mit verlängerter Durchführung untersucht werden. Dies bestätigten ebenfalls Druckfestigkeitsprüfungen nach über 28 Tagen.

Die Wechselverträglichkeit liefert die Erkenntnis, dass der Temperaturwechsel zunächst keinen Einfluss auf die Proben zeigt. Nach 54 Tagen in der Frost-Anlage zeigen die Platten keine Risse oder sonstige Schäden auf. Ein entscheidender Faktor ist hierfür die erhöhte Luftfeuchtigkeit in der Anlage, die eine weitere Hydratation begünstigt. Verdeutlicht wird der Einfluss durch die Ergebnisse der Haftzuguntersuchung. Denn die Werte der Proben aus der Frost-Anlage liegen höher, als die die bei Normallaborklima gelagert wurden.

Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Messung des elektrischen Widerstandes zu unterschiedlichen Feuchtigkeiten. Innerhalb der Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Feuchtigkeit einen Einfluss auf den Widerstand hat, sondern zugleich die Carbonfaser. Beide Faserarten und jeder untersuchte Fasergehalt führt zu einer Reduzierung des elektrischen Widerstands. Das gemahlene Fasermaterial kann den Widerstand bereits erheblich reduzieren, wobei die geschnittenen Fasern einen stärkeren Einfluss zeigen.

Die Verwendung von recycelten Carbonfasern in Mörteln erzielt für das Projekt eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit, um ein elektrisches Feld zwischen der Bewehrung und der Mörtel zu generieren.Jedoch ist auf Basis der Mikroskopaufnahme zu empfehlen den Einfluss der Bündelbildung zu untersuchen. Zudem zeigen Versuche von Walraven und van Mier, dass eine Kombination verschiedenster Faserlängen und Faserarten positiven Einfluss auf die Eigenschaften des gesamten Gefüges haben können [3]. Dies können z.B. die Untersuchungen der Biegezugfestigkeiten aus 3.3 bestätigen.

Im Wesentlichen ermöglicht die Faserzugabe den Mörtel gezielt in seinen Eigenschaften zu modifizieren. Die gemahlene Faser fügt sich sehr homogen in das Gefüge ein. Die mechanischen Eigenschaften werden dadurch nur leicht beeinflusst. Währenddessen kann der elektrische Widerstand gesenkt werden. Dies sind Eigenschaften, welche für den Einsatz als Anode hilfreich sind. Die 6 mm langen Carbonfasern können bei geringer Zugabe die mechanischen Eigenschaften verbessern. Da dies über die Verbundfläche zwischen Faser und Zementstein geschieht, ist eine gewisse Faserlänge nötig.

5 Ausblick

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde sich bei dem Einsatz des Mörtels auf waagerechte Flächen mit einem Handauftrag fokussiert. Ziel ist es, dies zusätzlich an senkrechten Flächen zu erproben. Ferner ist es ebenfalls sinnvoll neben dem Handauftrag zusätzlich das Spritzverfahren zu untersuchen. Erste Versuche mittels Trockenspritzverfahren zeigten praxistaugliche Ergebnisse, daher gilt es dies weiter zu untersuchen und zusätzlich das Nassspritzverfahren im weiteren Projektverlauf anzuwenden.

Die Forschungsergebnisse zum Thema elektrischer Widerstand zeigen, dass die aktuelle Zusammensetzung der Carbonfasermörtel einen widerstandsmindernden Einfluss haben. Die FH Münster untersucht aktuell die Funktionstüchtigkeit der entwickelten Mörtel als Chloridbarriere auf Stahlbetonbauwerken [8].

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK

Danksagung

Dieses Projekt (16KN062149) wurde im Rahmen des Förderprogramms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) als Kooperationsprojekt zwischen den Firmen Massenberg, instakorr, Mitsubishi Chemicals Advanced Materials sowie der FH Münster und TU Dortmund durchgeführt und bearbeitet. Wir danken dem BMWK für die finanzielle Förderung und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e.V. für die administrative Begleitung. Außerdem gilt der Dank der sh minerals GmbH, die den Fortschritt des Projekts durch großzügige materielle Unterstützung ermöglicht.

Referenzen

[1] Dauberschmidt, C. (2010) *Chloridbelasteter Beton – immer ein Entsorgungsfall?* Regionaltagung des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins. München.

[2] Orlowsky, J; Harnisch, J.; Kunz, A; Fache, K.; Faulhaber, A.; Büttner, T. (2022) *Mortar with recycled carbon fibres as active chloride barrier for reinforced concrete structures*. Proceeding for the 6th fib International Congress 2022, Concrete innovation for sustainability, pp. 685-694.

[3] Hinzen, M. (2014*) Einfluss von Kurzfasern auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie das Tragverhalten von Textilbeton* [Dissertation]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

[4] Stähli, P (2008) *Ultra-fluid, oriented hybrid-fibreconcrete* [Dissertation]. ETH Zürich

[5] Müller, H.; Wiens, U. (2016) *Beton*. Betonkalender 2016, Beton im Hochbau, Silos und Behälter, pp. 1-180. Berlin: Ernst & Sohn

[6] Weber, R (2014) *Guter Beton – Ratschläge für die richtige Betonherstellung.* 24. Edition, Baut + Technik.

[7] Raupach, M.; Orlowsky, J. (2008) *Erhaltung von Betonbauwerken. Baustoffe und ihre Eigenschaften.* 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

[8] Fache, K.; Voitenko, P.; Harnisch, J.; Kunz, A.; Orlowsky, J.; Büttner, T.; Faulhaber, A. (2023) *Erprobung der Funktionsweise einer elektrochemischen Chloridbarriere auf Basis von Carbonfaser-Mörteln: ein System zum Schutz neuer und junger Stahlbetonbauwerke vor chloridinduzierter Korrosion*. 8. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, H. 1, pp 59-67.

25097075, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cepa.2991 by Technische Universitaet Dortmund Dezernat Finanzen und Beschaffung, Wiley Online Library on [23/10/2024]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

RIGHTSLINK