

ORIGINAL ARTICLE

Analyse des Frost-Tausalz-Widerstands zementgebundener Baustoffe mittels 3D-Laserscanning

Alexander Haynack¹ | Jithender J. Timothy¹ | Thomas Kränkel¹ | Christoph Gehlen¹ | Charlotte Thiel²

Korrespondenz

Alexander Haynack, M.Sc.
Technische Universität München
Centrum für Baustoffe und Materialprüfung
Franz-Langinger-Straße 10
81245 München
E-Mail: alexander.haynack@tum.de

¹ Technische Universität München, Deutschland; TUM School of Engineering and Design, Department of Materials Engineering, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

² OTH Regensburg, Deutschland

Kurzfassung

Eine Herausforderung performancebasierter Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit ist die Beschleunigung natürlicher Mechanismen. Dies ist notwendig, um innerhalb kurzer Zeit die Langzeit-Leistungsfähigkeit ermitteln zu können. Die Bestimmung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Beton kann durch den CDF-Test erfolgen, welcher für Betone mit ausreichendem Frost-Tausalz-Widerstand sehr gut funktioniert. Bei Proben mit einer unzureichenden bzw. unbekanntem Performance können erhöhte Randabwitterungen auftreten, welche durch das Ablösen des seitlichen Abdichtbands entstehen. Der zunehmende Randeinfluss führt so zu einer Verfälschung der Ergebnisse und zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Performance des Bauteils. In diesem Beitrag werden Mörtel- und Betonprobekörper mit unterschiedlichen Abwitterungsraten in Anlehnung an das CDF-Verfahren untersucht. Zusätzlich wird die Oberflächenschädigung der Proben anhand einer neuartigen Messmethode mittels hochauflösendem 3D-Laserscanning ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Randeinflüsse mit der Laserscan-Methode umgangen und vergleichbare Ergebnisse zu den CDF-Untersuchungen erzielt werden können. Somit können Betone ohne Randeinflüsse charakterisiert und eine präzise Prognose der Langzeitbeständigkeit getroffen werden.

Schlüsselwörter

Beton, Mörtel, Frost-Tausalz-Widerstand, Dauerhaftigkeit, 3D-Laserscanning

1 Einführung

Bis zum Jahr 2050 wird erwartet, dass 70 % der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten leben [1]. Aus diesem Grund werden enorme Investitionen im Bereich der Betoninfrastruktur erforderlich sein. Die Verbesserung der Nachhaltigkeit der Betoninfrastruktur ist von größter Bedeutung. Die Verlängerung der Lebensdauer der Betoninfrastruktur ist daher eine der wichtigsten Komponenten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit. Frost-Tausalz bedingte Schäden haben einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Beton in kälteren Klimazonen [2], z. B. Schäden an Bodenbelägen oder Brückenkappen, die durch das Gefrieren im Winter verursacht werden. Solche Schäden werden hauptsächlich durch den Feuchtetransport in den Beton hervorgerufen. Transportprozesse im Beton hängen weitgehend von der Verteilung, Menge, Art, Größe und Form der kapillaren Poren im System ab [3]. Die Bildung dieser Poren wird durch überschüssiges Wasser verursacht, welches während der Zementhydratation weder chemisch noch physikalisch gebunden wird. Die resultierende kapillare Porenstruktur ermöglicht das Eindringen von Feuchte und Ionen in den Beton [4]. Materialver-

schlechterungen, welche durch Frost-Tau(-salz)-Belastung verursacht werden, können in Abwitterungen an der Oberfläche und die Bildung von Mikrorissen im Inneren eingeteilt werden.



Abbildung 1 Frost-Tausalz induzierte Oberflächenschädigung an einer Stahlbetontreppe im Außenbereich

Abbildung 1 zeigt die Abwitterung an einer Stahlbetontreppe im Außenbereich, welche bereits nach wenigen Nutzungsjahren erhebliche Schäden, sogar in den vertikalen Bereichen, aufgrund von Frost-Tausalz-Belastungen aufweist.

Wesentliche Beiträge zum derzeitigen Verständnis Frost und Frost-Tausalz bedingter Degradation zementhaltiger Materialien umfassen die Arbeit von Setzer (thermisches Gleichgewicht / Mikroislinsenmodell) [5], Powers und Helmuth (osmotischer Druck) [6], Coussy und Monteiro (Poromechanik) [7], Scherer (Kristallisationsdruck) [8; 9], Zhao (Nanofluidische Salzeinschlüsse) [10] und Timothy (Modellierung der Mikrorissbildung) [11]. Diese Theorien bildeten die Grundlage für die Entwicklung einer Vielzahl von analytischen und computergestützten Modellen zur modellbasierten Charakterisierung von Frost-Tau(-salz) bedingten Schäden an zementgebundenen Materialien. Eine genaue Darstellung des Verschlechterungsprozesses könnte unser derzeitiges Verständnis der Schädigungsmechanismen verbessern. Der CDF-Test (gemäß DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 [12]) gilt in Deutschland als Standardtestverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton. Hierbei werden Beton- oder Mörtelproben im Verlauf von zwölf Stunden zyklisch Temperaturen zwischen 20 °C und -20 °C ausgesetzt. Diese sogenannten Frost-Tau-Wechsel (FTW) werden 28-mal wiederholt. Das maßgebende Prüfkriterium ist die Abwitterung der bewitterten Probenfläche. Zur Abdichtung und zur garantierten eindimensionalen Frost-Tau-Wechsel-Exposition werden die vertikalen Seitenflächen der Proben mit einem aluminiumkaschierten Butylkautschukklebeband [13] versiegelt. Betonmischungen mit hoher Abwitterung können ein Ablösen dieser seitlichen Isolierung bewirken, was zu einer zweidimensionalen Exposition und einer erhöhten Abwitterung in den Randbereichen der Proben führt. Eine Trennung der Abwitterung zwischen dem inneren und äußeren Bereich der Prüfkörper ist im herkömmlichen CDF-Verfahren nicht möglich. Durch das Erzeugen eines digitalen Abbilds der Probekörper, beispielsweise durch einen Laserscanner, kann der verstärkt abgewitterte Randbereich weggeschnitten und so nur der eindimensional beanspruchte Innenbereich für die Analyse der Oberflächenschädigung betrachtet werden. Die Verwendung der 3D-Scan-Technologie hat sich bereits im Bereich des Maschinenbaus bewährt [14–17]. Sie wird hauptsächlich zur Quali-

tätskontrolle und zum *Reverse Engineering* eingesetzt, indem Scan-Daten mit ihren jeweiligen digitalen Modellen verglichen werden. Auf diese Weise werden Scan-zu-Modell-Unterschiede wie Schweißnähte, Verformungen und andere Abweichungen erkannt und analysiert [14]. Die Idee dieses Soll-Ist-Vergleichs wird auf das Gebiet der Schadensbewertung von Beton nach Frost-Tausalz-Wechsel bedingten Expositionen angewendet. Hierbei werden die Prüfkörper nach bestimmten Frost-Tau-Wechselzyklen gescannt und anschließend mit ihrem jeweiligen Referenzscan vor der Frost-Tau-Wechsel-Exposition überlagert. Dies ermöglicht die Erkennung der Oberflächenänderung und -verschlechterung durch wiederholte Frost-Tau-Wechselzyklen. Weise [18] hat einen ähnlichen Ansatz mit Photogrammetrie verwendet, um das Höhenprofil von Betonproben nach zunehmenden FTW zu charakterisieren. Das Problem des Ablösens des seitlichen Isolierbands kann schließlich mit dieser neuartigen Methodik durch Entfernen der Probenrandbereiche und damit deren Ausschluss aus der Analyse gelöst werden. Im Rahmen dieser Studie wurde der handgeführte Laserscanner HandySCAN Black Elite der Firma Creaform [19] verwendet. Dieser weist eine Genauigkeit von 25 µm auf, welche durch Kalibrierungsmessungen im Vorfeld bestätigt werden konnte. Durch das handgeführte Design des Scanners ist die Möglichkeit gegeben, die Methodik problemlos auf Praxisanwendungen zu übertragen. Das Hauptziel dieses Beitrags ist es, die Abwitterungsergebnisse aus dem CDF-Test und der Scan-Methode gegenüberzustellen. Die Einschätzung der tatsächlichen Performance der Prüfkörper trotz Ablösens des seitlichen Isolierbands bei hohen Abwitterungswerten soll dadurch verbessert werden.

2 Material

Die ausgewählten Prüfkörper aus Mörtel und Beton wurden aus Portlandzement CEM I 42,5 N und Hochofenzement CEM III/B, jeweils mit den Wasserzementwerten 0,40 und 0,55, hergestellt. Die maximalen Größtkorndurchmesser betragen 2 mm bei den Mörtelmischungen und 8 mm bei der Betonmischung. Genauere Angaben bezüglich der Mischungszusammensetzungen können Tabelle 1 entnommen werden. Die vorgestellten Prüfkörper stammen ursprünglich aus einer Versuchsreihe, welche die Austrocknung vor einer Frost-Tausalz-Belastung bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten untersucht hat.

Tabelle 1 Mischungszusammensetzungen der verwendeten Rezepturen

Bezeichnung	Zementart [-]	w/z-Wert [-]	Zementgehalt [kg/m ³]	Wassergehalt [kg/m ³]	GK ¹⁾ [kg/m ³]	Max. Korn-Ø [mm]
M-0.40-I	CEM I	0,40	680	272	1360	2
M-0.55-I	CEM I	0,55	560	308	1312	2
B-0.55-I	CEM I	0,55	362	199	1759	8
M-0.40-III	CEM III	0,40	665	266	1311	2
M-0.55-III	CEM III	0,55	550	302	1315	2

¹⁾ Gesteinskörnungsgehalt

Ziel war es hier, die Auswirkungen der unterschiedlichen Vorlagerung auf das oberflächennahe Porensystem und somit auf das Abwitterungsverhalten gegenüber der standardmäßigen Vorlagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte zu betrachten. Da sich hierbei zum Teil sehr hohe Abwitterungsverläufe durch starke Isolierbandablösungen ergeben haben, eigneten sich diese Probekörper gut für eine Gegenüberstellung zwischen CDF-Verfahren und Scan-Methode. Ziel dieses Beitrags ist es somit nicht, die sich aus der Vorlagerung ergebenden Unterschiede, sondern den Vergleich zwischen der üblichen CDF-Auswertung und der Oberflächencharakterisierung mittels Laserscanning darzustellen. Für eine nähere Auswertung bezüglich der vorlagerungsbedingten Schädigungsverläufe wird auf die zu dieser Versuchsreihe entstandenen Veröffentlichung verwiesen [20].

Tabelle 2 Vorkonditionierungsvarianten der Prüfkörperserien

Bezeichnung	Temperatur [°C]	VK ¹⁾	Relative Luftfeuchte der VK ¹⁾ [% r.F.]
V65	20		65
V85	20		85

¹⁾ Vorkonditionierung

Die Probekörper verblieben nach der Herstellung für 24 Stunden in den Schalungen. Nach dem Ausschalen wurden die Proben zunächst für 6 Tage im Wasserbad gelagert und anschließend für 21 Tage bei 20 °C und entweder 65 % relativer Luftfeuchte (V65) oder 85 % relativer Luftfeuchte (V85) bei atmosphärischer CO₂-Konzentration vorgelagert, vgl. Tabelle 2. Eine Serie bestand aus 5 einzelnen Probekörpern mit den Abmessungen 15 × 11 × 7 cm³.

3 Methoden

3.1 Capillary Suction of De-icing Chemicals and Freeze-Thaw Test (CDF)

Nach Erreichen des Alters von 28 Tagen wurden die Proben, welche zuvor mit einem aluminiumbeschichteten Butylkautschukband an den vertikalen Seitenflächen abgeklebt worden waren, in den für die kapillare Vorsättigung vorgesehenen Prüfbehälter gelegt. Die Proben wurden auf Abstandhalter gesetzt, die 5 mm tief in eine 3 %ige Natriumchloridlösung eintauchten. Nach 7 Tagen wurden die Proben für 28 FTW von 20 bis -20 °C zyklisch belastet, vgl. Abbildung 2.

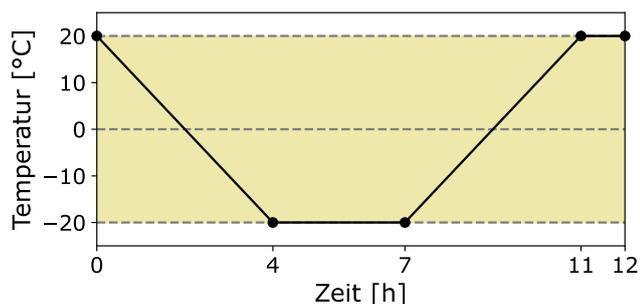


Abbildung 2 Frost-Tau-Zyklus der CDF-Prüfung

Die Messwerte für Abwitterung, Lösungsaufnahme und relativen dynamischen Elastizitätsmodul (RDEM) wurden nach 0, 4, 10, 14, 18, 24 und 28 FTW erfasst. Die Proben wurden nach diesen Wechslern aus der Frosttruhe entnommen und untersucht. Anschließend wurde das lose abgewitterte Material gesammelt, getrocknet und gewogen. Der RDEM der Proben wurde durch Ultraschallmessung und die Lösungsaufnahme durch Wiegen bestimmt [12; 13].



Abbildung 3 Frosttruhe mit Prüfbehältern für CDF-Prüfkörper

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen den Prüfaufbau des CDF-Verfahrens. Abbildung 3 zeigt die Proben platziert in den Prüfbehältern. Während der Tauphasen der zyklischen Temperaturbelastung werden lose Partikel, welche an der Oberfläche der Proben haften, in einem Ultraschallbad entfernt (a). Anschließend werden der RDEM (b) und die Massenänderung (c) der Proben untersucht, siehe Abbildung 4.

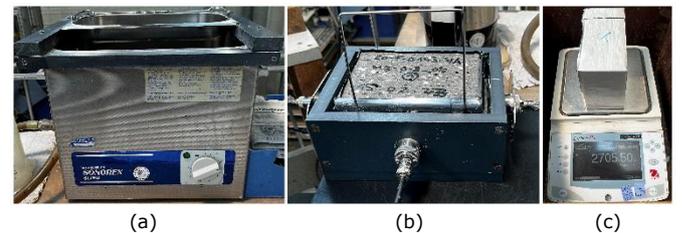


Abbildung 4 Verwendete Prüfgeräte des CDF-Tests: (a) Ultraschallbad zur Entfernung des abgewitterten Materials von der Probekörperoberfläche, (b) Ultraschallsensoren zur Bestimmung des RDEM und (c) Waage zur Bestimmung der Massenänderung

3.2 3D-Scan Methode

Zusätzlich zu den CDF-Messungen wurden die Frost-Tausalz beanspruchten Oberflächen der Proben mit einem hochauflösenden 3D-Laserscanner digitalisiert. Eine neuartige Methodik, entwickelt von [21], wurde zur Charakterisierung der Oberflächen verwendet. Bei großen Mengen an Abwitterung kann sich das seitliche Abdichtungsband von den Proben ablösen und somit, anstatt des beabsichtigten eindimensionalen Angriffs, eine zweidimensionale Beanspruchung (an der Oberfläche sowie den angrenzenden Seitenflächen) verursachen. Dies führt zu einer erhöhten Abwitterung in den Randbereichen der Probekörper. Dieser Randeffect würde in der Praxis nicht auftreten, so dass die von der CDF-Auswertung ermittelten Abwitte-

wertungswerte die tatsächliche Leistung der getesteten Materialien unterschätzen. Die Bewertung mittels Laserscanning liefert präzisere Ergebnisse, indem der Randbereich der Proben von der Quantifizierung der Degradation ausgeschlossen und somit nur die eindimensional belastete Fläche der Probekörper betrachtet wird, vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6.

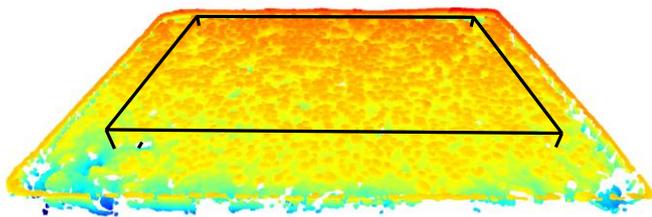


Abbildung 5 Ursprüngliche, abgewitterte Oberfläche eines CDF-Prüfkörpers; die schwarzen Linien symbolisieren den für die spätere Auswertung berücksichtigten Bereich

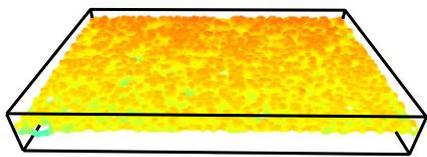


Abbildung 6 Verarbeiteter CDF-Prüfkörper mit extrahiertem Randbereich

Abbildung 7 zeigt den Testaufbau des 3D-Scanning-Prozesses. Die Proben werden auf eine 3D-gedruckte Halterung aus Kunststoff platziert, welche die Positionsmarker zur Orientierung des Scanners enthält. Der 3D-Scanner erzeugt daraufhin eine Punktwolke, welche vom Algorithmus für weitere Untersuchungen der Abwitterung, Oberflächenrauheit und Abwitterungsverteilung verwendet wird [21].

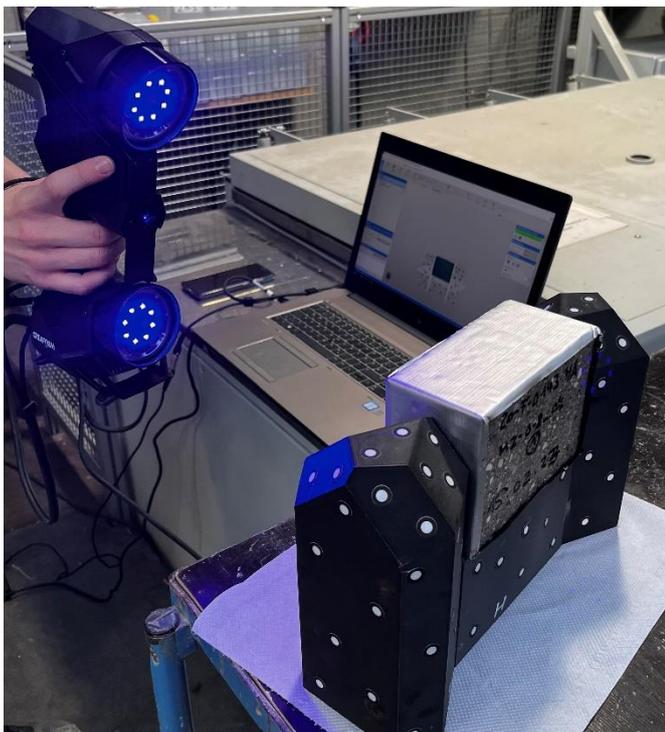


Abbildung 7 Scan-Vorgang zur Digitalisierung der CDF-Prüfkörper

Um die Abwitterungsergebnisse der CDF-Prüfung mit der Scan-Methode vergleichen zu können, müssen die Scan-Daten, welche die Volumenveränderungen der Prüfkörper während der Frost-Tauwechsel-Belastung beinhalten, in die Einheit g/m^2 umgerechnet werden, vgl. Gl. 1 - 3.

$$\Delta V_i = V_0 - V_i \quad (1)$$

$$\Delta m_i = \Delta V_i \rho_i \quad (2)$$

$$\omega_i = \left(\frac{\Delta m_i}{A} \right) * 10^6 \quad (3)$$

Hierbei beschreibt ΔV_i [mm^3] die Volumenänderung der Prüfkörper, bestimmt aus den Messwerten des Volumens vor der Frost-Tauwechsel-Belastung V_0 [mm^3] und nach dem i -ten FTW V_i [mm^3]. Die Volumenänderung wird anhand der Dichte ρ_i [g/mm^3] des Materials in eine Massenänderung Δm_i [g] umgerechnet. Abschließend wird die Abwitterung ω_i [g/m^2] bestimmt, indem die Massenänderung auf die Prüffläche A [mm^2] bezogen wird. Die Prüffläche beträgt nach dem vorangegangenen Wegschneiden des Probekörperperrandbereichs $130 \times 90 \text{ mm}^2$

4 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend wird vergleichend auf die Abwitterungsergebnisse, ermittelt durch Wägung gemäß CDF-Verfahren und mithilfe der Scan-Methode, eingegangen. Serie M-0.40-I bei Vorlagerung V85 wies nur sehr wenige Randeffekte auf, weshalb die Abwitterungsverläufe, trotz einer hohen Gesamtabwitterung von rund 2.800 g/m^2 , aus beiden Verfahren eine sehr gute Übereinstimmung zeigten, siehe Abbildung 8.

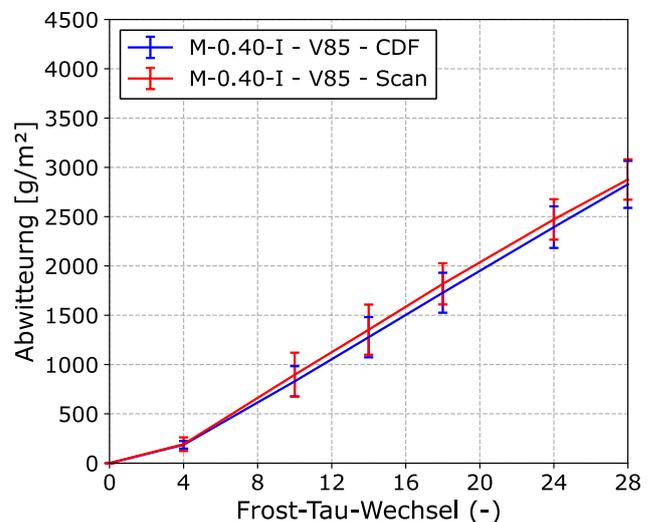


Abbildung 8 Verlauf der Abwitterung der Prüfkörperserie M-0.40-I bei Vorlagerung V85

In Abbildung 9 ist ein Prüfkörper der Serie M-0.40-I V85 vor der Frost-Tausalz-Wechsel-Belastung und in Abbildung 10 nach 28 FTW dargestellt. Nach der Frostprüfung wies der Probekörper eine nahezu vollflächige Abwitterung auf. Das seitliche Isolierband zeigte nur eine sehr geringe Ablösung, weshalb keine nennenswerten zusätzlichen Randabwitterungen auftraten.



Abbildung 9 Oberfläche eines Probekörpers der Prüfkörperserie M-0.40-I bei Vorlagerung V85 vor der Frost-Tausalz-Wechsel-Belastung

FTW, siehe Abbildung 11. Dies war auf die erhöhten Rand-einflüsse durch das abgelöste Isolierband zurückzuführen, vgl. Abbildung 12.



Abbildung 12 Oberfläche eines Probekörpers der Prüfkörperserie M-0.55-I bei Vorlagerung V65 nach 28 FTW



Abbildung 10 Oberfläche eines Probekörpers der Prüfkörperserie M-0.40-I bei Vorlagerung V85 nach 28 FTW

Die Prüferien aus CEM III (M-0.40-III und M-0.55-III), jeweils bei Vorkonditionierung V65, wiesen quantitativ die höchsten Unterschiede zwischen den beiden Prüfmetho- den auf. Es konnte festgestellt werden, dass die mit der Scan-Methode erfasste Abwitterung bei beiden Serien bis zu einem bestimmten Maximalwert analog zur CDF- Methode verlief und danach nur noch sehr gering anstieg. Die Abwitterung aus der CDF-Methode nahm hingegen in vermehrtem, regressiv verlaufendem Maß zu, vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14. Ein maßgebender Einflussfaktor auf das Abwitterungsverhalten bei Hochofenzementen ist die Carbonatisierung [22]. Durch das stärker ausgeprägte Kapillarporensystem bei einem höheren w/z-Wert ließ sich die erhöhte Abwitterung der Serie M-0.55-III im Vergleich zur Serie M-0.40-III erklären. Ebenfalls ließ sich dadurch die sehr früh auftretende Trennung der Abwitterungsverläufe der beiden Methoden erklären. Es liegt nahe, dass die carbonatisierte Randzone dieser Serie nach nur wenigen FTW abgewittert ist und die Oberflächenschädigung der nicht carbonatisierten Bereiche danach nur sehr langsam zunahm. Dies ist an dem abknickenden Verlauf der Abwitterung bei der Scan-Methode zu erkennen. Die zusätzliche Abwitterung durch die auftretenden Rande-ffekte, welche bei der CDF-Methode ebenfalls erfasst wurde, wurde hier mit der Abwitterung überlagert, weshalb der Übergang zwischen carbonatisiertem und nicht carbonati- siertem Bereich nicht eindeutig dargestellt werden konnte.

Abbildung 15 zeigt einen Prüfkörper der Serie M-0.55-III, welcher, analog zum Betrag des Unterschieds der beiden Methoden, die höchste Ablösung des seitlichen Isolier- bands und somit die höchsten Rande-ffekte aufwies.

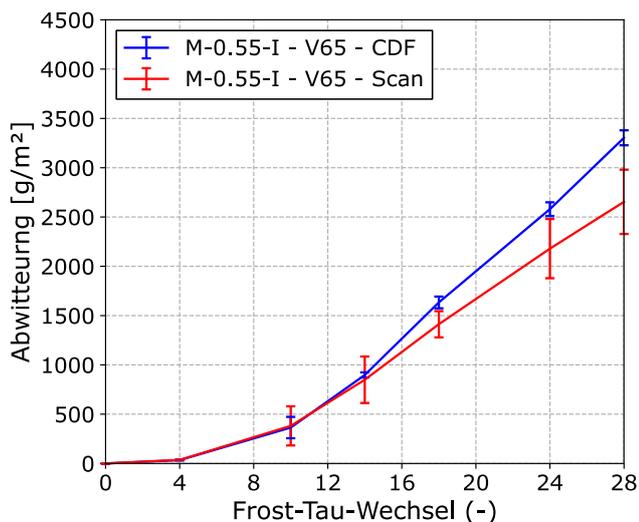


Abbildung 11 Verlauf der Abwitterung der Prüfkörperserie M-0.55-I bei Vorlagerung V65

Serie M-0.55-I bei Vorlagerung V65 zeigte, trotz einer ver- gleichbaren Gesamtabwitterung von rund 2.600 bis 3.250 g/m², eine Abweichung der beiden Verläufe ab dem 14.

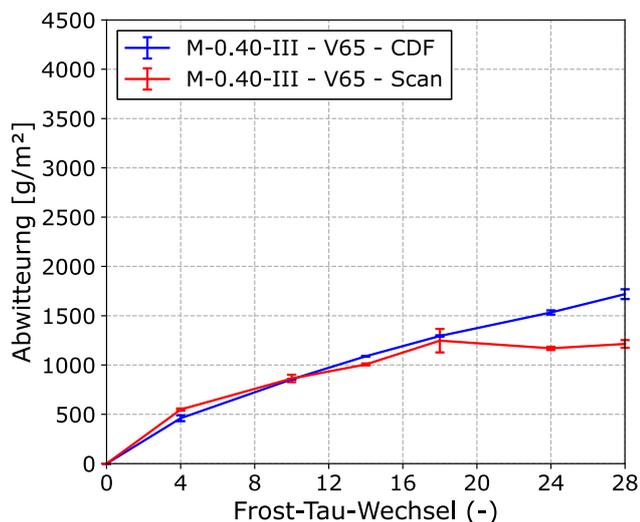


Abbildung 13 Verlauf der Abwitterung der Prüfkörperserie M-0.40-III bei Vorlagerung V65

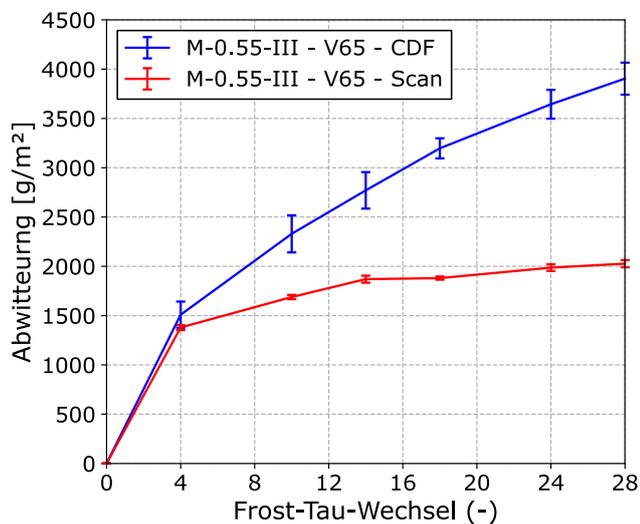


Abbildung 14 Verlauf der Abwitterung der Prüfkörperserie M-0.55-III bei Vorlagerung V65



Abbildung 15 Oberfläche eines Probekörpers der Prüfkörperserie M-0.55-III bei Vorlagerung V65 nach 28 FTW

Ein weiterer Aspekt, welcher im Rahmen dieses Beitrags

aufgezeigt werden sollte, ist die mit der Scan-Methode ermöglichte Präzision des sich über die Tiefe ändernden Abwitterungsverhaltens bei Betonmischungen. Die Kurvenform der Abwitterung der Mörtelmischung in Abbildung 11 zeigt die Scan-Methode als abgeschwächte Version gegenüber der CDF-Methode, maßgeblich beeinflusst durch die Höhe der Randeffekte. Hierbei wiesen die Prüferien aus CEM I bei beiden Methoden stets einen progressiven Abwitterungsverlauf auf, die Serien aus CEM III zeigten einen degressiven Verlauf, vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14.

Serie B-0.55-I bei Vorlagerung V65 zeigte hingegen einen sehr hohen, progressiven Abwitterungsverlauf bei der CDF-Methode und einen zunächst analog zur CDF-Methode verlaufenden und im weiteren Verlauf der Frost-Tausalzprüfung abflachenden Verlauf bei der Scan-Methode, siehe Abbildung 16. Dies ist auf ein unterschiedliches Abwitterungsverhalten zurückzuführen, bedingt durch das sich verändernde Verhältnis zwischen Zementleim und Gesteinskörnung über die Tiefe des Materials. Die Randzone, welche ein höheres Zementleimvolumen [23; 24] und somit einen höheren Anteil an abwitterbarem Material besitzt, wies ein erhöhtes Abwitterungsverhalten im Vergleich zum Inneren des Probekörpers auf. Hier stellte sich das Verhältnis zwischen Zementleim und Gesteinskörnung auf den in der Betonrezeptur angestrebten Betrag ein.

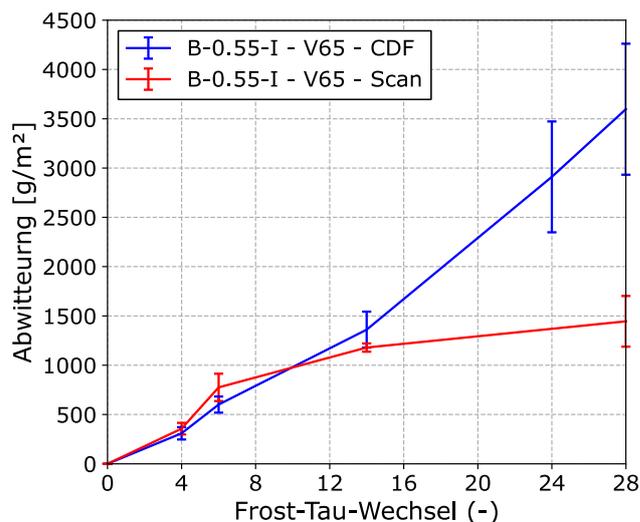


Abbildung 16 Verlauf der Abwitterung der Prüfkörperserie B-0.55-I bei Vorlagerung V65

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methode zur Ermittlung der Abwitterungsmenge Frost-Tausalz belasteter Probekörper mittels 3D-Laserscanning zeigt eine hohe Übereinstimmung mit der Auswertung des CDF-Verfahrens. Maßgebend für die Genauigkeit der Übereinstimmung ist der Grad der Ablösung der seitlichen Isolierschicht der Probekörper. Bei erhöhter Ablösung ergibt sich für die Prüferien aus Portlandzement eine Verringerung des gesamten Abwitterungsverlaufs gegenüber der CDF-Methode. Bei den Prüferien aus Hochofenzement kann indirekt ein Übergang zwischen der carbonatisierten Randzone und des nicht carbonatisierten Inneren des Probekörpers anhand des Abwitterungsverhaltens erkannt werden. Dieses Phänomen wird bei der

herkömmlichen CDF-Auswertung durch auftretende Randabwitterungen überlagert. Zusätzlich lässt sich bei Betonprobekörpern die Ausbildung der Randzone mithilfe der Scan-Methode abschätzen. Das sich über die Tiefe des Probekörpers ändernde Verhältnis zwischen Zementleim und Gesteinskörnung kann anhand der Änderung des Abwitterungsverlaufs beurteilt werden.

Die Unterschiede der Abwitterung zwischen CDF-Verfahren und Scan-Methode konnten in diesem Beitrag nur auf indirekte Art und Weise aufgezeigt werden. Da die Abwitterung im CDF-Verfahren standardmäßig nicht zwischen Kernbereich und Randzone des Prüfkörpers unterteilt wird, musste der Gesamtbetrag der Abwitterung des Probekörpers im CDF-Verfahren mit der inneren Prüffläche bei der Scan-Methode gegenübergestellt werden. Für einen direkten Vergleich der inneren und äußeren Abwitterung ist es Gegenstand von Folgeuntersuchungen, die Abwitterungen der Prüfkörper während des CDF-Tests zu trennen.

Neben der Bestimmung der Abwitterung kann die Scan-Methode benutzt werden, um weitere Parameter abzuleiten. Dazu zählen die Abwitterungstiefe, die zugehörige Verteilungsfunktion der Abwitterungstiefe und die Oberflächenrauigkeit.

In weiteren Untersuchungen soll der Einsatz der Scan-Methode für die Praxis untersucht werden. Hierbei stehen die Parameter der lokalen Abwitterungstiefe und der Oberflächenrauigkeit im Vordergrund.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Projekts „Einfluss intermittierender Trocknungsperioden auf die Schädigungsentwicklung von Betonen unter Frost-Tausalz-Belastung“ (Projektnummer 4283389/63) sowie dem Laborpersonal (Klaus Linz, Maik Hobusch, Felix Bachl, Manuel Gebhart) und der wissenschaftlichen Hilfskraft (Leonie Bartsch) für die Unterstützung bei der Probenherstellung und Versuchsdurchführung.

Referenzen

- [1] United Nations (2019) *World urbanization prospects 2018 – Highlights*. New York: United Nations.
- [2] Stark, J.; Wicht, B. [Hrsg.] (2013) *Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [3] Palecki, S. (2006) *Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung – Schädigungs- und Transportmechanismen*. Göttingen: Cuvillier.
- [4] Powers, T. C.; Copeland, L. E.; Mann, H. M. [Hrsg.] (1959) *Capillary continuity or discontinuity in cement pastes*.
- [5] Setzer, M. J. (2002) *Development of the micro-ice-lens model* in: International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete, RILEM Publications SARL, S. 133–145.
- [6] Powers, T. C.; Helmuth, R. A. (1953) *Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing* in: *Materials and Construction*, Vol 32, S. 285–297.
- [7] Coussy, O.; Monteiro, P. J. (2008) *Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures* in: *Cement and Concrete Research* 38, H. 1, S. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.006>
- [8] Scherer, G. W.; Valenza, J. J. (2005) *Mechanisms of frost damage* in: *Materials science of concrete*, H. 7, S. 209–246.
- [9] Scherer, G. W. (1993) *Freezing gels* in: *Journal of Non-Crystalline Solids* 155, H. 1, S. 1–25. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(93\)90467-C](https://doi.org/10.1016/0022-3093(93)90467-C)
- [10] Zhou, T. et al. (2020) *Freezing point depression and freeze-thaw damage by nanofluidic salt trapping* in: *Physical Review Fluids* 5, H. 12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.124201>
- [11] Timothy, J. J. et al. (2022) *What Is the Internal Pressure That Initiates Damage in Cementitious Materials during Freezing and Thawing? A Micromechanical Analysis* in: *Applied Mechanics* 3, H. 4, S. 1288–1298. <https://doi.org/10.3390/applmech3040074>
- [12] DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 (2017) *Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS_12390-9:2016*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [13] Bundesanstalt für Wasserbau (2012) *BAW Merkblatt – Frostprüfung von Beton (MFB) – Ausgabe 2012*. Selbstverlag, Karlsruhe.
- [14] Kohtala, S. et al. (2021) *Photogrammetry-based 3D scanning for supporting design activities and testing in early stage product development* in: *Procedia CIRP* 100, S. 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.047>
- [15] Haleem, A. et al. (2021) *3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: Issues and solutions* in: *Materials today. Proceedings* 39, S. 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427>
- [16] Helle, R. H.; Lemu, H. G. (2021) *A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control* in: *Materials today. Proceedings* 45, S. 5255–5262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>
- [17] Farahani, B. V. et al. (2019) *Geometry Acquisition and 3D Modelling of a Wind Tower using a 3D Laser Scanning Technology* in: *Procedia Structural Integrity* 17, S. 712–717. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.095>
- [18] Weise, F.; Maier, B.; Ehrig, K. (2012) *Analyse der durch Frost- und Frost-Tausalz-Wechsel induzierten Schädigungsprozesse in Beton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 107, H. 12, S. 816–823.

<https://doi.org/10.1002/best.201200056>

- [19] Creaform (2023) *HandySCAN 3D – BLACK Series* [online]. Leinfelden-Echterdingen: AMETEK GmbH – Creaform Deutschland. <https://www.creaform3d.com/de/messtechnik/tragbare-3d-scanner-handyscan-3d/technische-daten> [Zugriff am: 4. Apr. 2023].
- [20] Haynack, A. et al. (2022) *Frost-Tausalz-Widerstand von Mörtel: Einfluss der Expositionsbedingungen im jungen Alter* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 117, H. 12, S. 985–997. <https://doi.org/10.1002/best.202200072>
- [21] Haynack, A. et al. (2022) *Characterization of Cementitious Materials Exposed to Freezing and Thawing using 3D Scans* in: Preprints.
- <https://doi.org/10.20944/preprints202211.0507.v1>
- [22] Mueller, M. (2021) *Frost-Tausalz-Angriff auf Beton - Neue Erkenntnisse zum Schadensmechanismus* [Dissertation]. Bauhaus-Universität Weimar.
- [23] Zheng, J. J.; Li, C. Q.; Jones, M. R. (2003) *Aggregate distribution in concrete with wall effect* in: *Magazine of Concrete Research* 55, H. 3, S. 257–265. <https://doi.org/10.1680/mac.2003.55.3.257>
- [24] Zheng, J. J.; Li, C. Q.; Zhao, L. Y. (2003) *Simulation of Two-Dimensional Aggregate Distribution with Wall Effect* in: *Journal of Materials in Civil Engineering* 15, H. 5, S. 506–510. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:5\(506\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(506))