

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von Hydrolysebeständigkeit und Dauerhaftigkeit mineralischer Beschichtungen in Kontakt mit Trinkwasser

Kurzfassung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU)

Anja Tusch, M. Eng.

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach

RWTH Aachen University

Clarissa Glawe, M. Sc.

RWTH Aachen University

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von Hydrolysebeständigkeit und Dauerhaftigkeit mineralischer Be- schichtungen in Kontakt mit Trinkwas- ser

Kurzfassung

Juli 2024

DVGW-Förderkennzeichen W 202005
Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main

1 Einleitung

Im Trinkwasserbereich werden üblicherweise zementgebundene Werkstoffe für Oberflächen mit Wasserkontakt eingesetzt, da sie sich über viele Jahre im Einsatz bewährt haben und Wasser im Allgemeinen als nicht betonangreifend gilt. In der Regel kommt es zur Bildung einer schützenden Carbonatschicht, die Auflösungserscheinungen an der Werkstoffoberfläche verhindert. Insbesondere bei weichen Wässern kann es jedoch zu einem lösenden Angriff kommen, da sich durch den verstärkten Abtrag keine schützende Decksicht aus Calciumcarbonat ausbildet. In diesem Fall werden vor allem Calciumionen aufgrund des Konzentrationsgefälles zwischen dem Trinkwasser und der Porenlösung aus dem Werkstoff herausgelöst [1, 2]. In der Folge kann ein Schadensbild entstehen, das sich typischerweise durch die Bildung von Flecken mit erweichtem und häufig gelb-/bräunlich verfärbtem Oberflächenmaterial auszeichnet [3, 4]. Die Schädigung bzw. der Schädigungsgrad des Werkstoffes ergibt sich zum einen auf der Widerstandsseite aus der Hydrolysebeständigkeit des Materials und zum anderen auf der Einwirkungsseite aus der Aggressivität des auslaugenden Mediums, woraus sich eine Kombination von Lösung- und Fällungsreaktionen ergibt.

Diese Komplexität erschwert eine Vorhersage des Werkstoffverhaltens unter den jeweils gegebenen Bedingungen. Bisher wurde deshalb bei der Planung und Instandsetzung von Trinkwasserbehältern nach einem grundsätzlich präventiven Konzept vorgegangen. Durch die Herstellung möglichst dauerhafter und dichter Oberflächen sollen Schäden von vorneherein vermieden werden. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit wurde im DVGW-Arbeitsblatt W 300 die Expositionsklasse X_{TWB} eingeführt, die Vorgaben zur Zusammensetzung der eingesetzten Betone festlegt. Alternativ kann der Nachweis einer dichten Oberfläche bei dünneren Mörtelschichten, die z. B. im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen appliziert werden, auch über die Einhaltung eines Grenzwertes der Gesamtporosität erbracht werden. Dieser erfolgt dann durch die Bestimmung des Gesamtporenvolumens mittel Quecksilberdruckporosimetrie nach DIN ISO 15901-1:2019-03, ergänzt durch weitere Vorgaben zur Vorkonditionierung der Proben in DVGW-Arbeitsblatt W 300-5. Nachteil bei diesem Konzept ist, dass keine Prognose der Nutzungsdauer möglich ist. Ebenso müssen neue Werkstoffe ggf. von der Verwendung ausgeschlossen werden, da sie im Konzept bislang noch nicht berücksichtigt werden. Ein Prüfverfahren, mit dem sich direkte Parameter zur Beständigkeit ermitteln lassen, könnte hingegen den Weg zu einem performancebasierten Konzept eröffnen und Möglichkeiten zur Bewertung der Dauerhaftigkeit und Prognose der Nutzungsdauer bieten.

Ziel des vom DVGW geförderten Forschungsvorhabens, das gemeinsam von der RPTU Kaiserslautern und der RWTH Aachen University durchgeführt wurde, war daher die Entwicklung eines Prüfverfahrens, welches eine Einordnung zementgebundener Werkstoffe gegenüber lösendem Angriff ermöglicht. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf den speziellen Bedingungen der Expositionsklasse X_{TWB} für trinkwasserberührte Bauteile. Das zu entwickelnde Verfahren sollte außerdem mit einer möglichst kurzen Prüfdauer realitätsnahe Ergebnisse liefern. Des Weiteren sollten Ansätze zur Prognose der Nutzungsdauer in Abhängigkeit von der Zeit und der Aggressivität des einwirkenden Wassers/Mediums entwickelt werden.

Da davon ausgegangen werden muss, dass eine beschleunigte und gleichzeitig realitätsnahe Prüfung nicht mit einer einzelnen Prüflösung möglich ist, wurden im Forschungsvorhaben zwei Prüflösungen definiert und zugehörige quantitative und sensible Messverfahren entwickelt. Hierbei wird die Beanspruchung unter Verwendung (i) ionenarmer Lösungen (Mischung aus

demineralisiertem Wasser und Leitungswasser) sowie (ii) von Fremdionen (saure Lösungen) unterschieden.

2 Untersuchung des Korrosionsverhaltens zementgebundener Werkstoffe

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zunächst das Korrosionsverhalten zementgebundener Werkstoffe im Kontakt mit unterschiedlichen Prüfmedien untersucht, indem Mörtelprismen mit unterschiedlicher Zusammensetzung über einen Zeitraum von 28 Tagen verschiedenen Prüflösungen ausgesetzt wurden. Der pH-Wert der Lösungen variierte dabei von pH 4 bis pH 8. Die Lösungen im sauren Bereich wurden durch den Einsatz verschiedener Pufferlösungen umgesetzt, da dadurch der pH-Wert über einen relativ langen Zeitraum konstant gehalten werden kann. In Tabelle 2.1 sind sowohl die verwendeten Mörtelzusammensetzungen als auch die eingesetzten Prüfmedien aufgelistet. Die Lagerung der Proben erfolgte in Edelstahlbehältern mit einem Fassungsvermögen von ca. 5 l, wobei die Prüflösung mithilfe eines Rührers ständig in Bewegung gehalten wurde. Der Austausch der Lösung erfolgte in Abhängigkeit vom Prüfmedium zu festgelegten Zeitpunkten. Bei den Pufferlösungen erfolgte der Lösungswechsel jeweils nach 7 Tagen und im Fall von Trinkwasser bzw. demineralisiertem Wasser alle 8 Stunden.

Tabelle 2.1: Zusammensetzungen der untersuchten Mörtel und Angabe der verwendeten Prüfmedien

Zusammensetzung ¹⁾	w/z-Wert	Zementart	Zusatzstoff	Prüfmedium						
				Trinkwasser pH 8,4	Demineralisiertes Wasser pH 7,0	KH ₂ PO ₄ /Na ₂ HPO ₄ pH 6,0	Natriumcitrat/NaOH pH 5,5	Essigsäure/Natriumacetat pH 5,0	Essigsäure/Natriumacetat pH 4,5	Salzsäure/Natriumcitrat pH 4,0
V1	0,50	CEM I 42,5	-	x	x	x	x	x	x	x
V2	0,63	CEM I 42,5	-	x	x	x	x	x	x	x
V3	0,30	CEM I 42,5	-	x	x			x		
V4	0,50	CEM III 42,5	-	x	x			x		
V6	0,50	CEM I 42,5	Mikrosilica	x	x			x		
V8	0,50	CEM I 42,5	Kalksteinmehl		x			x		
V11	0,50	CEM II 42,5	-		x			x		
V13	0,40	CEM I 42,5	-		x			x		

¹⁾ Von ursprünglich 13 geplanten Zusammensetzungen haben sich die Zusammensetzungen V5, V7, V9 und V10 als nicht geeignet herausgestellt und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Spätestens alle 7 Tage wurden die Proben aus der Lösung entnommen, teilweise abgebürstet (nur die Proben in saurer Lösung und teilweise in demineralisiertem Wasser) und verschiedene Begleituntersuchungen durchgeführt. In Abbildung 2.1 ist das Prüfkonzept der durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die durchgeführten Untersuchungen in Abhängigkeit vom Prüfmedium und der Forschungsstelle unterscheiden. Fotografie und Massenbestimmung wurden an beiden Forschungsstellen und für alle Prüfmedien durchgeführt, während Computertomografie und Laserscan nur an der RPTU Kaiserslautern und ^1H NMR und ICP-OES nur an der RWTH Aachen University durchgeführt wurden. Auch die Prüfmedien wurden aufgeteilt, so dass an der RPTU Kaiserslautern vor allem das Korrosionsverhalten in sauren Medien untersucht wurde und an der RWTH Aachen University das Korrosionsverhalten in Trinkwasser. Der Einfluss von demineralisiertem Wasser wurde an beiden Forschungsstellen untersucht und diente so auch als Referenz für den Vergleich der Daten aus beiden Forschungsstellen.

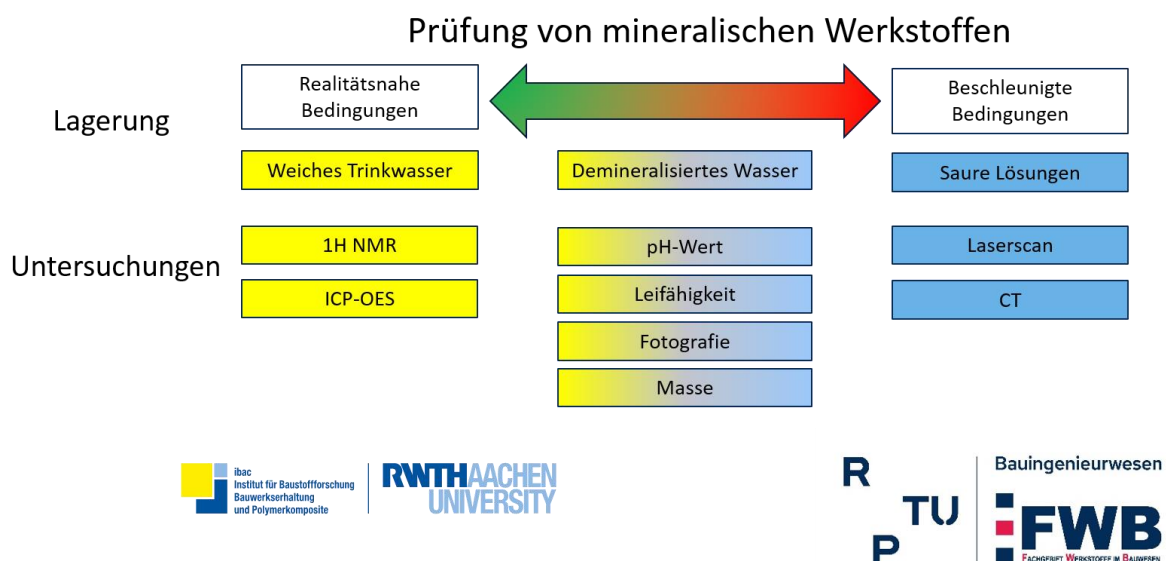


Abbildung 2.1: Prüfkonzept

Die Zusammensetzungen V1 und V2 wurden unter Einfluss aller Prüfmedien untersucht, um zunächst auf Seite der sauren Lösungen ein geeignetes Prüfmedium für die weiteren Untersuchungen zu qualifizieren. Alle weiteren Zusammensetzungen wurden dann unter Einfluss der reduzierten Anzahl von drei Prüfmedien untersucht.

In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurde der Einfluss einer jährlichen Reinigung mit handelsüblichen Reinigungsmitteln auf die Dauerhaftigkeit von Trinkwassermörteln untersucht. Dazu wurden die Proben jeweils 50 Reinigungszyklen unterzogen, bei denen zunächst das Reinigungsmittel aufgesprüht und nach Herstellerangaben einwirken gelassen wurde. Nach dieser Einwirkzeit wurde der Reiniger abgespült und die Proben für mindestens drei Stunden in einem Wasserbecken gelagert, bevor der nächste Reinigungszyklus startete. Nach jeweils fünf Reinigungszyklen wurden die oberflächlichen Veränderungen mithilfe der optischen Mikroskopie dokumentiert und die Massenänderung bestimmt.

3 Ergebnisse

Wie bereits erläutert wurde in einer vorgeschalteten Versuchsreihe das Korrosionsverhalten der Zusammensetzungen V1 und V2 unter Einfluss verschiedener saurer Prüfmedien untersucht. Ziel war es ein Prüfmedium zu qualifizieren, mit dem der lösende Angriff unter beschleunigten Bedingungen betrachtet werden konnte. Insgesamt wurden fünf Pufferlösungen mit unterschiedlichen pH-Werten eingesetzt. Abgesehen von der Phosphatpufferlösung bewirkten alle getesteten Lösungen einen deutlichen Angriff der zementgebundenen Werkstoffe. Wie in Abbildung 3.1 zu erkennen, kam es zu einem deutlich messbaren Massenabtrag, der annähernd linear zur Prüfzeit verlief. Dieser Massenabtrag war auch optisch in der Bildanalyse gut zu erkennen. Bereits nach kurzer Zeit wurde die oberste Zementsteinschicht abgetragen und die Spitzen der Gesteinskörnung freigelegt. Die Phosphatpufferlösung führte hingegen zu keinem Abtrag, sondern zur Ablagerung einer oberflächlichen Schicht, die einem Abtrag entgegenzuwirken schien. Es ist davon auszugehen, dass es sich dabei um Ablagerungen von schwerlöslichen Phosphaten handelt. Auch bei einigen der anderen Prüfmedien kam es trotz Massenabtrag des Probematerials zu Ablagerungen, die einen Einfluss auf den Reaktionsfortschritt haben können.

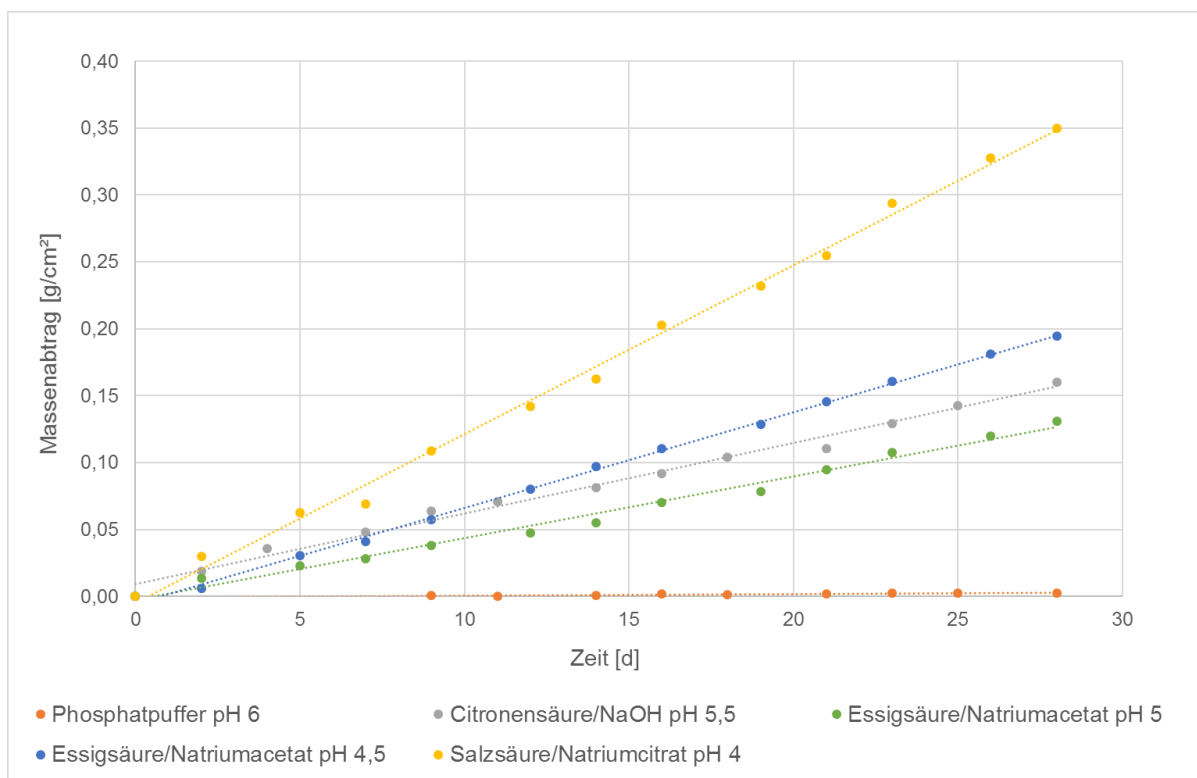


Abbildung 3.1: Mittlerer Massenabtrag in Abhängigkeit vom Prüfmedium für einen Mörtel mit w/z-Wert 0,5 (V1)

Die Untersuchungen zeigten, dass sich durch Einsatz von Pufferlösungen im sauren Bereich der lösende Angriff zwar deutlich beschleunigen lässt, aber die in der Lösung vorhandenen Fremdionen einen entscheidenden Einfluss haben und deshalb berücksichtigt werden müssen. Für eine mögliche Vergleichbarkeit darf es dabei nicht zu Ausfällungen von Reaktionsprodukten kommen. Diese Vorgaben wurden von der Pufferlösung Essigsäure/Natriumacetat erfüllt, weshalb diese als Prüfmedium für die weiteren Untersuchungen gewählt wurde.

Bei den weiteren Versuchen konnte der lineare Massenabtrag über die Zeit unter Einwirkung von Essigsäure/Natriumacetat-Lösung bestätigt werden. In diesen Untersuchungsreihen lag das Augenmerk jedoch auf den Zusammensetzungen der Mörtelproben. Ziel war es die mörtelspezifischen Einflussgrößen auf das Korrosionsverhalten quantifizieren und bewerten zu können. Es zeigte sich, dass vor allem der Wasserzementwert (w/z), aber auch das verwendete Bindemittel (Zement) und mögliche Zusatzstoffe (Kalksteinmehl, Mikrosilica) einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit bzw. Beständigkeit haben. In Abbildung 3.1 ist beispielhaft der Einfluss des w/z -Wertes dargestellt. Es wird deutlich, dass mit steigendem w/z -Wert die Beständigkeit gegen lösenden Angriff abnimmt.

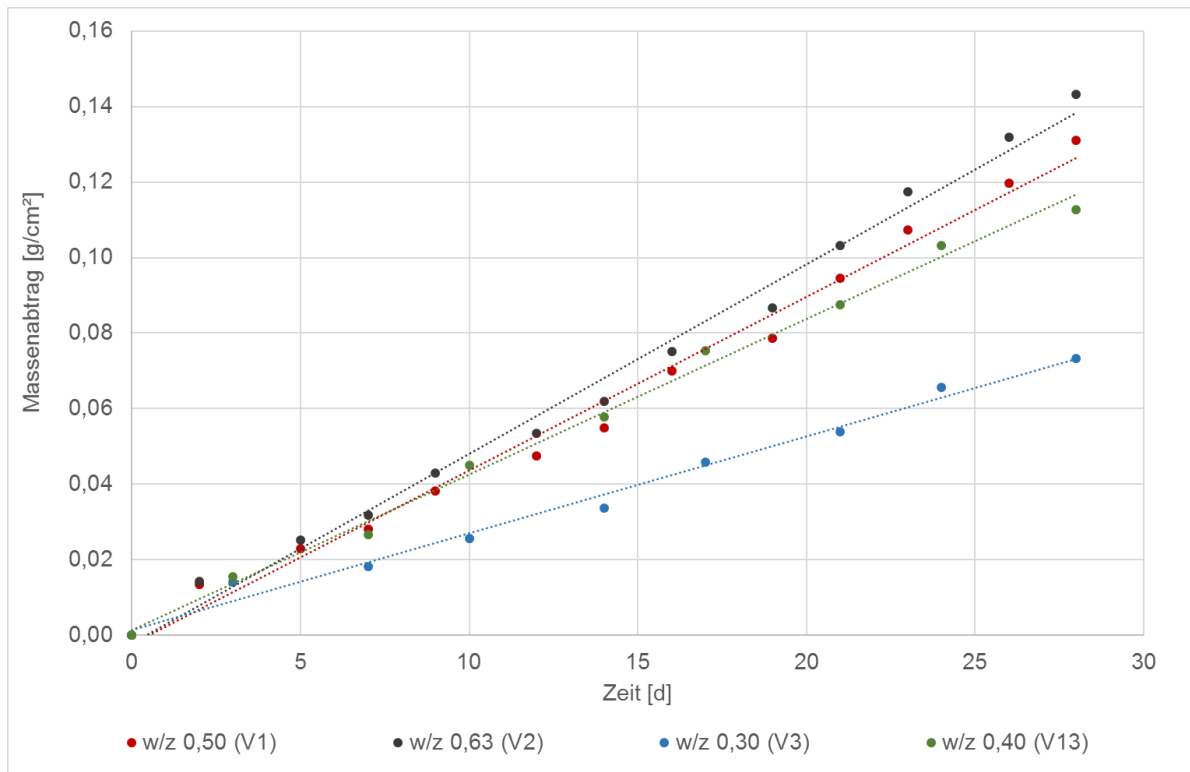


Abbildung 3.2: Massenabtrag in Abhängigkeit vom w/z -Wert bei Lagerung in Essigsäure/Natriumacetat-Lösung

Neben den sauren Lösungen wurden auch demineralisiertes Wasser und Trinkwasser als Prüfmedien eingesetzt. In demineralisiertem Wasser verlief der lösende Angriff erwartungsgemäß deutlich langsamer als in den sauren Prüflösungen. Dennoch kam es erwartungsgemäß zu einem nachweisbaren Massenabtrag. Der Massenabtrag verlief bei den an der RPTU Kaiserslautern durchgeführten Untersuchungen annähernd linear. In den Untersuchungen der RWTH Aachen University verlief der Massenabtrag hingegen teilweise alternierend, wie in Abbildung 3.3 zu erkennen ist. Diese Unterschiede sind vermutlich auf das Abbürsten der Proben an der RPTU Kaiserslautern zurückzuführen. Durch das Abbürsten werden Ablagerungen an der Oberfläche entfernt, die sonst einen Einfluss auf den weiteren Reaktionsverlauf gehabt hätten. Augenscheinlich war der Abtrag in beiden Fällen nicht bzw. kaum erkennbar. Die obere Zementsteinschicht bleibt weitgehend erhalten. In den durchgeführten CT-Aufnahmen zeigte sich, dass der Massenverlust durch Austragen von Ionen aus den oberflächennahen Bereichen der Proben stammt. In Abbildung 3.4 sind Ausschnitte von CT-Aufnahmen einer Probe vor und nach 28 Tagen Lagerung in demineralisiertem Wasser dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Dichte des Materials im Randbereich abnimmt und sich eine poröse Schicht bildet, wobei das Ausgangsvolumen erhalten bleibt. Dies wird auch durch die Auswertung der

Volumenbestimmung aus den CT-Daten bestätigt. Die Daten zeigen, dass das Volumen nicht proportional zur Masse abnimmt, sondern die Masse zunächst stärker abnimmt als das Volumen. In einigen Messungen war sogar zunächst eine Volumenzunahme zu erkennen.

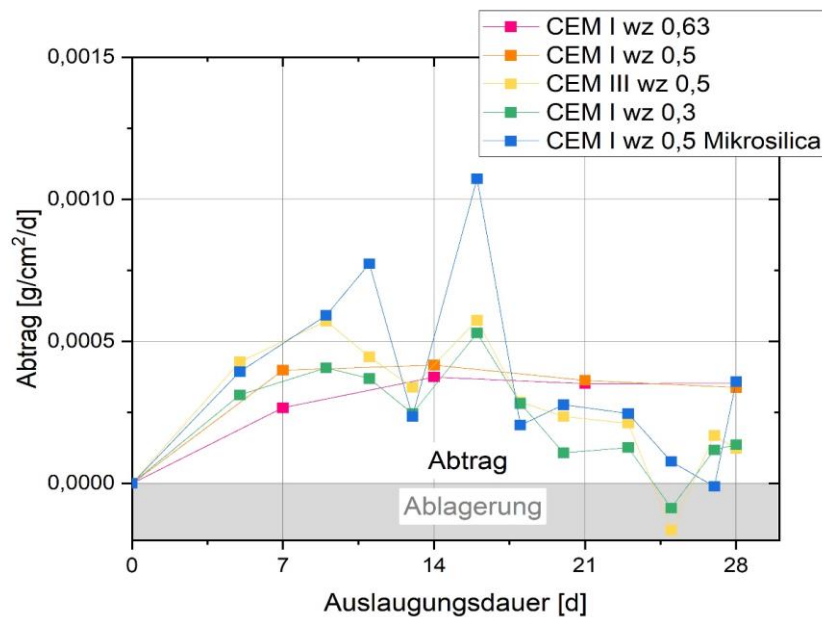


Abbildung 3.3: Massenabtrag der verschiedenen Mörtel in demineralisiertem Wasser

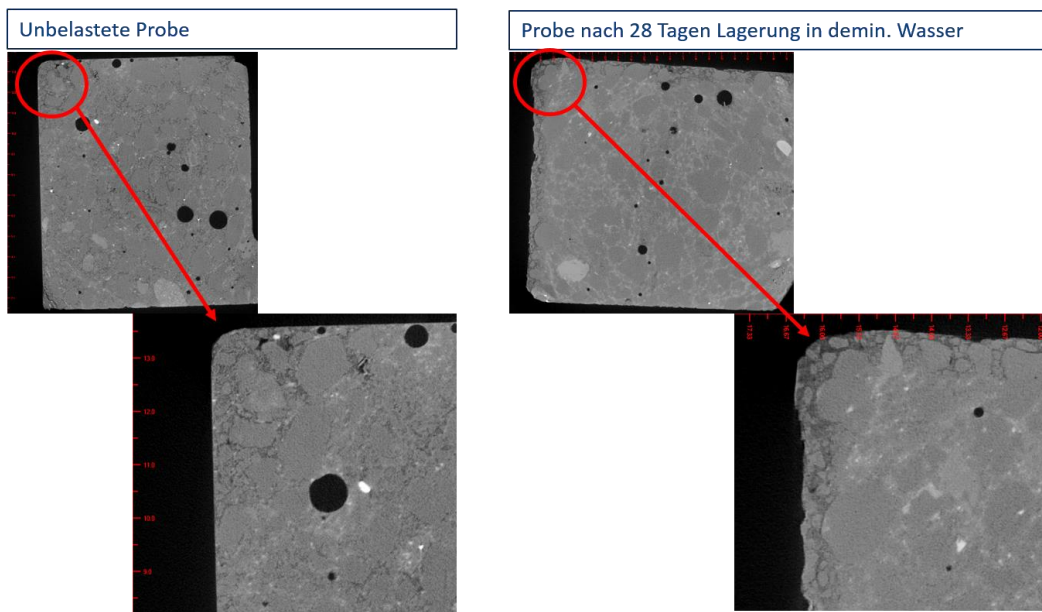
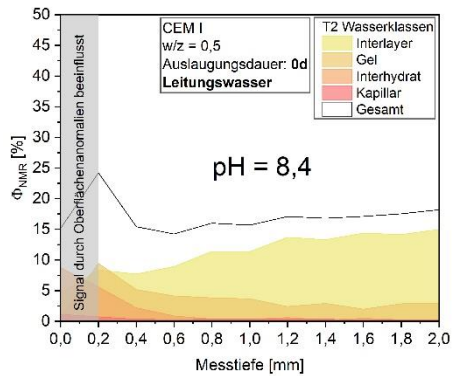


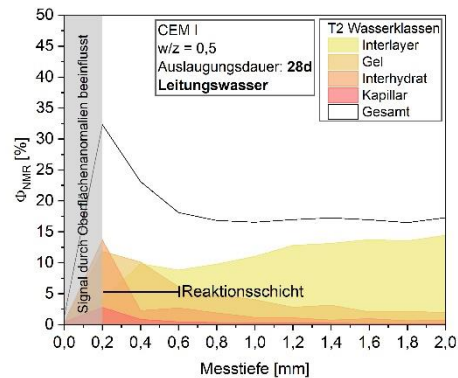
Abbildung 3.4: Detailscan zur Entwicklung der Randzone einer in demineralisiertem Wasser gelagerten Probe in einem Zeitraum von 28 Tagen

In Trinkwasser war der messbare Abtrag noch mal deutlich geringer als bei Lagerung in demineralisiertem Wasser. Auch hier verläuft die Massenänderung eher alternierend und es zeigt sich optisch kein deutlich erkennbarer Angriff der Probenoberfläche. Die obere Zementsteinschicht erscheint vollständig erhalten zu bleiben. Strukturelle Veränderungen, die aus einem Angriff des Wassers resultieren, lassen sich erst durch die Untersuchung mittels ^1H NMR erkennen. In Abbildung 3.5 sind die Ergebnisse der Messungen vor und nach 28 Tagen Lagerung in Trinkwasser für die Zusammensetzungen V1 und V2 dargestellt. Es lässt sich eine

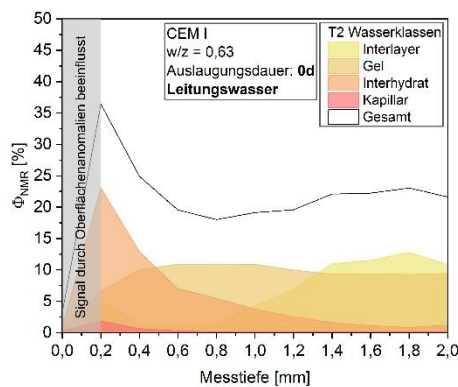
strukturelle Veränderung des oberflächennahen Bereiches erkennen, was ein Hinweis auf die Bildung einer Reaktionsschicht mit abweichender Porosität ist. Weiterhin lässt sich erkennen, dass es bei den Proben der Zusammensetzung V2 zu einem beginnenden Abtrag der Oberfläche und einer Vergrößerung der Porenstruktur kommt.



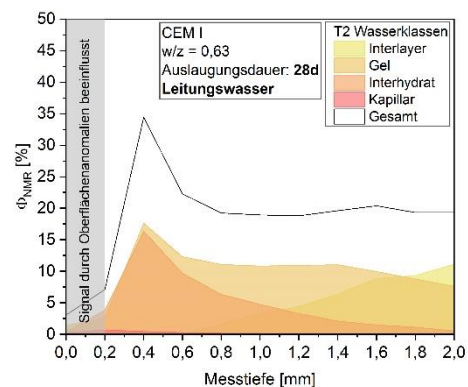
a) V1 vor Lagerung in Trinkwasser



b) V1 nach 28 Tagen Lagerung in Trinkwasser



c) V2 vor Lagerung in Trinkwasser



d) V2 nach 28 Tagen Lagerung in Trinkwasser

Abbildung 3.5: Ergebnisse der ^1H NMR Messungen an den Proben der Zusammensetzungen V1 und V2 jeweils vor und nach 28 Tagen Lagerung in Trinkwasser

In weiteren Versuchen wurde der Einfluss einer jährlichen Reinigung auf die Beständigkeit von Trinkwassermörteln untersucht. Dazu wurden Trinkwassermörtelproben insgesamt 50 Reinigungszyklen mit handelsüblichen Reinigern unterzogen, um eine jährliche Reinigung über einen Zeitraum von 50 Jahren zu simulieren. Als Reiniger wurde sowohl ein neutrales als auch ein saures Reinigungsmittel verwendet. Die Untersuchungen haben einen deutlichen Einfluss der Reinigung auf die Beständigkeit gezeigt. Bereits optisch lässt sich der Einfluss der Reiniger auf die Mörteloberflächen erkennen. Wie in Abbildung 3.6 dokumentiert, zeigen sich teilweise bereits nach wenigen Reinigungszyklen deutliche Spuren eines Angriffs der zementgebundenen Oberfläche. Unter Einfluss des sauren Reinigers wurden bereits nach fünf Reinigungszyklen erste Spitzen der Gesteinskörnung sichtbar, was sich auch in einem messbaren Massenverlust niederschlug. Unter Verwendung des neutralen Reinigers verlief der Angriff weniger stark, doch auch hier waren nach 50 Reinigungszyklen die Spitzen der Gesteinskörnung erkennbar.

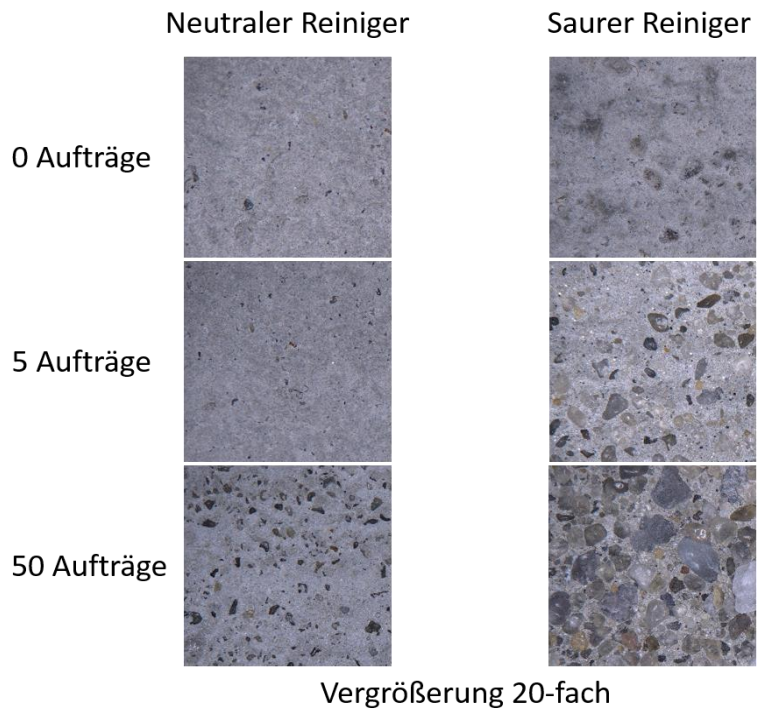


Abbildung 3.6: Optische Veränderung des untersuchten Mörtels in Abhängigkeit vom verwendeten Reiniger und der Anzahl der Reinigungszyklen

4 Entwicklung eines Prognosemodells

Ein Ziel des Projekts war es, anhand der erhaltenen Daten ein Prognosemodell zu entwickeln, um die Dauerhaftigkeit von zementgebundenen Werkstoffen bei ständigem Kontakt mit Trinkwasser bewerten zu können. Beim lösenden Angriff zementgebundener Werkstoffe handelt es sich um heterogene Reaktionen, die an der Werkstoffoberfläche ablaufen und sich langsam ins Innere des Werkstoffs verlagern. Da es sich bei zementgebundenen Werkstoffen um einen heterogenen Stoff mit gleichermaßen nicht homogenen Oberflächen handelt, kommt es zu einer ungleichmäßigen Zersetzung des Werkstoffs. Manche der Zementsteinphasen lösen sich schneller, während andere Phasen später und teilweise inkongruent in Lösung gehen. Dadurch verändert der Werkstoff sich immer wieder in seiner stofflichen Zusammensetzung und es entstehen neue Strukturen. So bildet sich u. a. eine Reaktionsschicht aus, die ebenfalls einen Einfluss auf den Reaktionsfortschritt ausübt. Der Angriff durch saure Medien und durch weiches Wasser verläuft hier prinzipiell ähnlich, aber in unterschiedlich starker Ausprägung. Um eine Lebensdauer zu prognostizieren, muss ein Kriterium festgelegt werden, das das Ende der Nutzungsdauer des Trinkwasserbehälters beschreibt. Als ein Kriterium bietet sich z. B. an, den Zeitpunkt zu definieren, zu dem es zu einem sichtbaren Ausbruch der Gesteinskörnung kommt. In Trinkwassermörteln werden üblicherweise Gesteinskörnungen mit einem maximalen Korndurchmesser von 2 – 4 mm eingesetzt. Damit es nicht zum Kornausbruch kommt, muss die Gesteinskörnung mindestens bis zur Hälfte eingebunden bleiben, so dass sich daraus ein maximaler Abtrag des Zementsteins von 1 mm ergibt.

Die ersten Prognoseansätze basieren darauf, dass sich der Angriff zunächst durch einen linearen Verlauf auszeichnet. In den Versuchen zeigte sich, dass der Angriff durch die Essigsäure/Natriumacetat-Lösung etwa 10x so stark verlief, wie bei demineralisiertem Wasser. Anhand dessen und der bestimmten Massenabtragsraten lässt sich ein hypothetischer Materialabtrag bestimmen. Der Vergleich mit einem real gemessenen Abtrag zeigte, dass der tatsächliche Abtrag durch die Prognose meist überschätzt wurde, es jedoch in Abhängigkeit vom verwendeten Bindemittel auch zu annähernden Überstimmungen kam.

In einem weiteren Prognoseansatz lag der Fokus auf der Annahme, dass die jährliche Reinigung den größten Einfluss auf den Materialabtrag hat. Grund für diese Annahme ist, dass die in Trinkwasser gelagerten Proben keinen oder nur sehr geringfügigen Abtrag zeigten. Teilweise nahmen sie an Gewicht zu, was auf die Ausbildung einer Carbonatschicht schließen lässt, die eine weitere Reaktion stark verlangsamt. Diese entstehenden Reaktionsschichten werden durch die jährliche Reinigung jedoch abgetragen, so dass die Oberfläche danach wieder für einen Angriff freiliegt. Aus den Daten von Boos lassen sich anhand der gemessenen Calcitgehalte Schichtdicken von bis zu 90 µm annehmen. Da es sich bei zementgebundenen Werkstoffen um poröse Materialien handelt, ist davon auszugehen, dass ein Teil der Calcite bereits in den Poren auskristallisiert. Ein weiterer Teil lagert sich auf der ursprünglichen Oberfläche ab, so dass sich das Probenvolumen vergrößert. Die Reaktionsschicht, die sich innerhalb des ursprünglichen Volumens des Probekörpers bildet, hätte demnach eine geringere Dicke. Geht man von einer Schichtdicke und damit auch einem jährlichen Abtrag von etwa 40 µm aus, ergibt sich daraus eine Nutzungsdauer von 20 bis 25 Jahren. Dies stellt eine realitätsnahe Nutzungsdauer eines Trinkwasserbehälters bis zur Instandsetzung der Werkstoffoberfläche dar. Bei angenommener geringerer Schichtdicke der Calciumcarbonatschicht < 40 µm erhöht sich die Nutzungsdauer. Die angenommenen 40 µm können als auf der sicheren Seite liegend angenommen werden und führen somit auch zu gesicherten Prognosen der Nutzungsdauer bzw. der Dauerhaftigkeit.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem sich zementgebundene Werkstoffe hinsichtlich ihrer Hydrolysebeständigkeit untersuchen lassen und im besten Fall eine Prognose der Lebensdauer durchgeführt werden kann. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen, die sich sowohl aus den Werkstoffeigenschaften als auch aus den Prüfmedien und der Versuchsführung ergeben. Durch Verwendung von sauren Lösungen ließ sich der Angriff der untersuchten Mörtelproben effektiv beschleunigen, wobei sich das gewählte Essigsäure/Natriumacetat-Puffersystem als besonders geeignet erwiesen hat. Bei diesem Prüfmedium bilden sich keine schwerlöslichen Reaktionsprodukte an der Werkstoffoberfläche und trotz deutlicher Beschleunigung ist damit kein Ausbruch der Gesteinskörnung verbunden. Darüber hinaus kann Essigsäure mittels Natriumacetat gut über längere Zeiträume bei einem festgelegten pH-Wert abgepuffert werden. Durch hohe Wasserwechselraten ließ sich auch in demineralisiertem Wasser der Angriff des Materials beschleunigen, so dass innerhalb eines Prüfzeitraumes von 28 Tagen Massenänderungen dokumentiert werden konnten.

Aus den erhaltenen Versuchsdaten war es möglich ein Prüfverfahren zu entwickeln, das es ermöglicht, die Veränderungen eines zementgebundenen Werkstoffes durch lösenden Angriff innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne von 28 Tagen zu erfassen. Fotografie und Massenänderung bieten hier gut geeignete Mittel zur Erfassung und Dokumentation der Veränderungen.

Das entwickelte Verfahren ermöglicht bisher vor allem einen direkten Vergleich zwischen den Mörteln, aber noch keine absoluten Aussagen hinsichtlich der Lebensdauer unter Einwirkung verschiedener Medien. Dies wird erst durch ein geeignetes Prognosemodell möglich, das die Superpositionierung zwischen verschiedenen Medien ermöglicht. Auch hierzu wurden im Rahmen des Vorhabens verschiedene Betrachtungen durchgeführt. Dabei wurde einmal von einem konstanten Angriff durch das anstehende Medium ausgegangen. Die Versuche zeigten zu Beginn einen linearen Abtrag, bei dem sich nach 7 bis 10 Tagen eine konstante Massenabtragsrate einstellt. Für die Lagerung in Essigsäure/Natriumacetat-Lösung lag sie dabei etwa 10x so hoch wie in demineralisiertem Wasser. Anhand der ermittelten Massenabtragsraten lässt sich der Abtrag über die Zeit linear extrapolieren und daraus eine maximale Lebensdauer prognostizieren. Da jedoch keine Nebenreaktionen und weiteren Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die den Abtrag verlangsamen können, wird der Abtrag i. d. R. deutlich überschätzt. Eine genauere Prognose wird erst unter Berücksichtigung der ablaufenden Nebenreaktionen möglich, deren genauer Einfluss auf das Schädigungsverhalten noch abschließend zu quantifizieren ist. Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss der jährlichen Reinigung als ein wesentlicher Faktor für einen oberflächlichen Materialabtrag mit einbezogen. Durch die Reinigung werden mögliche Schutzschichten abgetragen und die Oberfläche für den Angriff wieder freigelegt. Geht man von einer Schichtdicke und damit auch einem jährlichen Abtrag von etwa 40 μm aus, ergibt sich daraus eine auf der sicheren Seite liegende Nutzungsdauer von 20 bis 25 Jahren. Bei angenommener geringerer Schichtdicke der Calciumcarbonatschicht $< 40 \mu\text{m}$ erhöht sich die Nutzungsdauer. Um das Prognosemodell weiter zu präzisieren, müssten die sich bildenden Schutzschichten sowie die darunter befindliche Reaktionsschicht noch genauer untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] P. Boos, *Herstellung dauerhafter zementgebundener Oberflächen im Trinkwasserbereich - Korrosionsanalyse und technische Grundanforderungen*. Zugl.: Münster, Univ., Diss., 2002. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2003.
- [2] R. Schulte Holthausen, M. Raupach, M. Merkel, and W. Breit, "Auslaugungswiderstand von Betonoberflächen in Trinkwasserbehältern," *Bautechnik*, vol. 97, no. 6, pp. 368–376, 2020, doi: 10.1002/bate.201900045.
- [3] M. Schwotzer, "Zur Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung am Beispiel von Trinkwasserbehälterbeschichtungen," Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Fredericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008.
- [4] A. Gerdes and F. H. Wittmann, "Langzeitverhalten von zementgebundenen Beschichtungen in Trinkwasserbehältern," in *Materials science and restoration: MSR-VI; proceedings of the Sixth International Conference on Materials Science and Restoration - MSR VI [held at Karlsruhe University from September 16 to 18, 2003] = Werkstoffeigenschaften [i.e. Werkstoffwissenschaften] und Bauinstandsetzen*, F. H. Wittmann and A. Gerdes, Eds., Freiburg: Aedificatio-Verl., 2003, pp. 1–14. Accessed: Jun. 14 2021.