Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TU

Technische Universität Wien

DISSERTATION

Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Baustoffen durch Applikation von Paraffinen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften
unter der Leitung von

o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen DREYER
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Clemens HECHT

Institut für
Hochbau und Technologie
Zentrum für Bauphysik und Bauakustik
E 206

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
Dipl.-Ing. Jürgen LUKAS
Mat. Nr. 9625022
Fickeysstraße 17/6/26, 1110 Wien

Wien, im April 2005

Danksagung

Außerordentlichen Dank möchte ich zu Beginn an meinen Doktorvater Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer und an meinen Projektleiter und Mentor Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Clemens Hecht für ihre Betreuung meiner Arbeit richten. Weiters will ich mich bei ihnen an dieser Stelle für das gute Arbeitsklima am Fachbereich, ihre Diskussionsbereitschaft und ihre wertvollen Ratschläge bedanken, welche wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für das finanzielle Fundament danke ich der Fa. Sasol Wax GmbH. Deren Mitarbeiter danke ich für die freundliche Zusammenarbeit und ihre fachliche Unterstützung.

Herzlicher Dank gilt des Weiteren Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Franke für die Begutachtung meiner Arbeit.

Nicht zuletzt will ich mich bei meinen Kollegen am Zentrum für Bauphysik und Bauakustik für das gute Arbeitsklima bedanken. Ihre stete Hilfs- und Diskussionsbereitschaft hat die tägliche Arbeit am Fachbereich zur Freude gemacht und das Gelingen der Arbeit erleichtert.

Besonders will ich mich bei meiner Partnerin Elke für ihre Geduld und Unterstützung bedanken.

Abschließend seien meine Familie und meine Freunde erwähnt, die mich in diesem Lebensabschnitt begleitet haben.

Dafür danke ich.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit berichtet über die Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Baustoffen durch die Applikation von Paraffinen. Aus vergangenen Arbeiten ist bekannt, dass sich eine geeignete Applikation von Paraffin günstig auf die Dauerhaftigkeit auswirkt. Dies betrifft beispielsweise die Erhöhung der Frost- und Tausalzbeständigkeit, eine Reduktion der Wasseraufnahme und die Festigkeitserhöhung. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verhalten von mit Paraffin applizierten Baustoffen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion und gegenüber Karbonatisierung behandelt.

Mineralisch gebundene Baustoffe wie Mörtel und Beton, aber auch keramische Werkstoffe wie Ziegel, wurden nach unterschiedlicher Behandlung mit Paraffin auf ihr Verhalten gegenüber einem starken chemischen Angriff untersucht. Durch die Applikation von Paraffin kann die Dauerhaftigkeit gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion bzw. bei einem schwefelsauren Angriff erhöht werden. In Abhängigkeit der gewählten Applikation ergeben sich unterschiedliche Verbesserungen bzw. Schutzwirkungen. Eine deutliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit wird durch die Beschichtung des Baustoffes mit Paraffin erzielt.
Durch die Penetration der Baustoffe mit Paraffin kann eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit erzielt werden. Die Schutzwirkung basiert im Wesentlichen auf einer Verzögerung der Korrosion zu Beginn der Einwirkung. Durch den Abbau der Feststoffmatrix entsteht ein neues Porensystem, über welches die Säure auf den Baustoff einwirken kann. Weil sich dort kein Paraffin befindet, kann es den Baustoff vor einer fortschreitenden Korrosion nicht schützen.
Ein hohes Potenzial an Schutzwirkung ist bei Materialien mit hohem Kapillarporenanteil gegeben oder wenn die Feststoffmatrix langsam korrodiert und der Angriff hauptsächlich über das ursprüngliche Kapillarporensystem erfolgt.

Die Karbonatisierung von Beton kann ebenfalls als Säure-Basen Reaktion betrachtet werden. Weil im Gegensatz zu einem starken Säureangriff kein Abbau der Feststoffmatrix stattfindet und somit kein neuer Porenraum entsteht, kann bei den mit Paraffin penetrierten Probekörpern der Karbonatisierungsfortschritt angehalten werden.

Abstract

The dissertation is about increase of durability on building materials by treatment of paraffin-wax. From available examinations it is common that due to adequate application the durability is improved. This concerns for example increase of frost resistance, reduction of water absorption and increase of strength. Within the scope of this thesis the performance of paraffin-wax treated building materials against biogenic sulfuric acid corrosion and carbonation of concrete has been under examination.

Mineral-bounded materials like mortar and concrete but also ceramic materials like bricks, got tested on hard chemical attack after different treatments with paraffin-wax. Through the application of paraffin the durability against biogenic sulfuric acid corrosion can be in-creased. Depending on the application form different properties of the protection effect can be recorded.
An explicit increase of durability is remarkable for materials which are coated with paraffin-wax.
By the penetration of the materials with paraffin-wax an increase of durability can also be established. This is mainly effected by an deceleration of the corrosion process at the beginning of the deterioration. By relieve of the solid phase of the material new cavities are built and through the new pore network the aggressive agent has new ways to assault the solid phase. Because there is no paraffin-wax, no protection happens.
A higher protection potential can be expected for materials with main fraction of capillary pores and for materials with a higher resistance where the corrosion proceeds mainly over the capillary system.

Carbonation of concrete also can be identified as an acid-base reaction. Unlike the hard chemical attack of sulfuric acid there is no degradation of material. There is not built a new pore space and so the blockage of pores with paraffin-wax is convenient to stop the carbonation process.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 7

2 Stand des Wissens 9

2.1 Paraffine für bauliche Anwendungen 9

2.2 Paraffine und ihre Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen 11

2.3 Einfluss der biogenen Schwefelsäurekorrosion auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen 17
2.3.1 Schadensursache 17
2.3.2 Mörtel und Beton 19
2.3.2.1 Schädigungsprozess 19
2.3.2.2 Anforderungen 21
2.3.2.3 Technologische Maßnahmen 24
2.3.3 Ziegel 26
2.3.3.1 Schädigungsprozess 26
2.3.3.2 Anforderungen und technologische Maßnahmen 27
2.3.4 Schadensfolgen 27
2.3.5 Beurteilung der Dauerhaftigkeit 27

2.4 Einfluss der Karbonatisierung auf die Dauerhaftigkeit von Beton 31
2.4.1 Schadensursache 31
2.4.2 Schädigungsprozess 32
2.4.3 Beurteilung der Dauerhaftigkeit 33

3 Einfluss der biogenen Schwefelsäurekorrosion auf mit Paraffin applizierte Baustoffe 36

3.1 Versuchsaufbau 36

3.2 Materialien 37
3.2.1 Beton 37
3.2.2 Mörtel 38
3.2.3 Ziegel 40

3.3 Applikationen 41
3.3.1 Paraffin-Applikationen 41
3.3.1.1 Paraffinpulver 42
3.3.1.2 Paraffin-Penetration 42
3.3.1.3 Beschichtung mit Paraffin (Paraffin-Coating) 42
3.3.2 PUR-Beschichtung 43
3.3.3 Injektionsstoffe 43
3.3.3.1 Silicon-Mikroemulsion 44
3.3.3.2 Wasserglas 44

3.4 Probekörper, Messgrößen und Methodik 45
3.4.1 Probekörper 45
3.4.2 Messgrößen 45
3.4.2.1 Massenänderung 45
3.4.2.2 Querschnittsabmessungen 46
3.4.2.3 Längenänderung 46

3.4.2.4 Druckfestigkeit 46
3.4.2.5 Ultraschall-Laufzeitmessungen 47
3.4.2.6 Phenolphtaleintest 47
3.4.3 Methodik 48

3.5 Vorversuche 51
3.5.1 Einlagerung beschichteter Proben bei pH0 51
3.5.2 Einlagerung unterschiedlich beschichteter Proben bei pH0 51

3.6 Beton 53
3.6.1 Beton bei pH0 und pH1 53
3.6.1.1 Einlagerungsversuche bei pH0 54
3.6.1.2 Einlagerungsversuche bei pH1 58
3.6.2 Beton mit unterschiedlichem Porenfüllgrad 64
3.6.2.1 Applikationsvorgänge und Porenfüllgrade 64
3.6.2.2 Versuchsbedingungen 67
3.6.2.3 Ergebnisse 68

3.7 Mörtel 70
3.7.1 Mörtel des Siedlungswasserbaus bei pH0 und pH1 70
3.7.2 Kalk- und Kalkzementmörtel bei pH1 77

3.8 Ziegel 83

3.9 Schlussfolgerungen 89
3.9.1 Beton und Mörtel 89
3.9.1.1 Applikation Paraffin-Pulver 89
3.9.1.2 Applikation Paraffin-Coating 89
3.9.1.3 Applikation Paraffin-Penetration 90
3.9.2 Ziegel 94

4 Einfluss der Karbonatisierung auf mit Paraffin appliziertem Beton 95

4.1 Versuchsaufbau 95

4.2 Materialien, Applikationen und Probekörper 97

4.3 Messgrößen und Methodik 97

4.4 Versuchsergebnisse 98

4.5 Schlussfolgerungen 99

5 Zusammenfassung 101

Literaturverzeichnis 103

Anhang 113

Lebenslauf 124

1 Einleitung

Grundgedanke für die Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Baustoffen durch die Behandlung mit Paraffinen ist der Umstand, dass durch das Ein- bzw. Aufbringen des Paraffins eine porenverstopfende bzw. trennende Wirkung vom schädigenden Medium erreicht wird.
Als Paraffin bezeichnet man ein Gemisch aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, welches überwiegend aus unverzweigten n-Alkanen und verzweigten iso-Alkanen zusammengesetzt ist. Es ist wachsartig, geruch- und geschmacklos, ungiftig und elektrisch isolierend. In Reinform ist es weiß durchscheinend. Paraffin ist vor allem inert und tritt somit nicht mit dem Baustoff oder dem angreifendem Medium in Wechselwirkung.
Aus bestehenden Arbeiten ist ersichtlich, dass sich eine Behandlung von Baustoffen mit Paraffin günstig auf deren Dauerhaftigkeit auswirkt. Die Untersuchungen dieser Arbeit haben das Ziel, für konkrete Schädigungsmechanismen Möglichkeiten und Wirkungen von Paraffinapplikationen auf die Erhöhung der Dauerhaftigkeit anzugeben.

Im ersten Teil der Arbeit wird der Stand des Wissens zu diesem Thema vermittelt. Es wird ein Überblick über bauliche Anwendungen von Paraffinen gegeben, gefolgt von einer Literatursichtung bezüglich der Dauerhaftigkeit von mit Paraffin behandelten Baustoffen. Danach werden die in der Arbeit betrachteten Schädigungsprozesse der biogenen Schwefelsäurekorrosion und der Karbonatisierung näher betrachtet. Neben der Schadensursache und dem eigentlichen Schädigungsprozess werden Möglichkeiten zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wiedergegeben.

Die beiden anschließenden Teile bilden den Schwerpunkt der Arbeit. Das erste Kapitel beschäftigt sich mit dem Einfluss der biogenen Schwefelsäurekorrosion auf mit Paraffin applizierte Baustoffe. Neben dem Versuchsaufbau werden die verwendeten Materialien, die untersuchten Applikationen und die zur Beurteilung herangezogenen Messgrößen, sowie die gewählte Methodik erläutert.
Neben Beton und Mörtel wurden Ziegel in die Untersuchungen einbezogen, welche ebenfalls für den Gebrauch in Siedlungswasserbauten bestimmt sind. Um die Schutzwirkung von Paraffin noch deutlicher abbilden zu können, wurden bei den zuvor angeführten Materialien ergänzend Baustoffe gewählt, die nicht für den Einbau in aggressiver Umgebung geeignet sind.
Aus den Erkenntnissen zum Schädigungsverlauf und der erzielten Schutzwirkung der einzelnen Paraffin-Applikationen werden Schlussfolgerungen gezogen und der stattfindende Schädigungsprozess erläutert.
Das zweite Kapitel beschäftigt sich ist mit der Dauerhaftigkeit von mit Paraffin appliziertem Beton gegenüber Karbonatisierung. Nach Erläuterungen zum Versuchsaufbau, den Materialien

und den Applikationen, werden die verwendeten Messgrößen und die gewählte Methodik beschrieben.

Dieses Kapitel ist zwar thematisch eigenständig, jedoch im Kontext mit dem ersten zu betrachten. Bei der Karbonatisierung, als auch beim Schwefelsäureangriff, handelt es sich vereinfacht gesehen um eine Säure-Base Reaktion, wenngleich die verursachende Säure und die daraus resultierende Wirkung eine andere ist. Die Ergebnisse aus beiden Untersuchungen ergänzen sich und machen die ablaufenden Prozesse und die daraus folgende Schädigung erklärbar.

2 Stand des Wissens

2.1 Paraffine für bauliche Anwendungen

Paraffin bezeichnet ein Gemisch aus Alkanen (gesättigte Kohlenwasserstoffe) mit der allgemeinen Summenformel C_nH_{2n+2}. Die Zahl n liegt zwischen 20 und 45, das Molgewicht damit zwischen 275 und 600. Die englische Bezeichnung lautet ebenfalls „paraffin“, wobei im britischen Englisch zwischen „paraffin oil“ (Petroleum) und „paraffin wax“ (Paraffin) unterschieden wird [Wik3w].

Des Weiteren wird berichtet, dass so genanntes Hart-Paraffin zwischen 50°C und 60°C und Weichparaffin bei etwa 45°C schmilzt. Mikrowachse weisen sogar Erstarrungspunkte zwischen 70°C und 80°C auf und enthalten Kettenlängen (n) von bis zu 75. Zwischen den Hartparaffinen und den Mikrowachsen liegen die so genannten Intermediates, die Erstarrungspunkte von 60°C-70°C aufweisen.

Paraffin ist wachsartig, geruch- und geschmacklos, ungiftig und elektrisch isolierend. In Reinform ist es weiß durchscheinend. Es ist unlöslich in Wasser, aber leicht löslich in Benzin. Paraffine sind aus unverzweigten n-Alkanen und verzweigten iso-Alkanen zusammengesetzt. In Hart-Paraffinen dominieren die n-Alkane, in Mikrowachsen dagegen die Iso-Alkane.

Hergestellt wird Paraffin überwiegend aus Erdöl. Daneben wurde es auch aus Braunkohle gewonnen. In letzter Zeit werden die mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellten synthetischen Paraffine immer wichtiger. Diese bestehen im Unterschied zu den mineralölstämmigen Produkten überwiegend aus unverzweigten n-Alkanen.

Die Hart- und Intermediate-Paraffine werden aus Gatschen hergestellt. Diese Gatschen fallen bei der Entparaffinierung von Motorölen als Nebenprodukt an. Die Gatsche wird mit Hilfe von Lösungsmittel-, Schwitz- und Kristallisationsverfahren von Ölresten befreit. Danach werden diese Rohparaffine raffiniert, wobei Aromaten, Schwefel- und Stickstoffverbindungen umgewandelt bzw. entfernt werden. Durch die Raffination entsteht ein weißes, geruchloses Produkt, welches in der Lebensmittel-, Kosmetik und Pharmaindustrie verwendet werden kann.

Mikrowachse werden dagegen aus dem Vakuumrückstand der Motorölraffinerie gewonnen, d.h. hier müssen durch ein spezielles Raffinationsverfahren die schweren Rohölkomponenten entfernt werden. Danach ist der Ablauf analog zu den anderen Paraffinen.

Die Einsatzgebiete sind vielfältig. Hauptabnehmer von Paraffin ist weltweit die Kerzenindustrie. Paraffin dient als Grundstoff für Salben, Kosmetikprodukte, Pflege- und Putzmittel. Bei der Herstellung von Käse dient es bei einigen Sorten als Überzug der Rinde. Große Mengen werden auch im Korrosionsschutz in der Autoindustrie oder als Zusatz zu Gummiprodukten, wie z. B. Reifen, verwendet.

Nach [Ull96] sind Wachse eine der ältesten von Menschen verarbeiteten und verwendeten Materialien. Ihr Nutzen als vielseitiger Werkstoff („erster Kunststoff“) wurde schon sehr früh entdeckt. Heutzutage werden Wachse meistens als Additive verwendet. Wegen ihrer günstigen toxikologischen und ökologischen Eigenschaften wird erwartet, dass ihre Anwendung in der Zukunft steigen wird. In der zuvor angeführten Literatur ist eine umfassende Zusammenstellung über Arten und Vorkommen von Wachsen, ihrer Anwendung und ihrer Eigenschaften enthalten.

Paraffine kommen auch im Bauwesen bei zahlreichen Anwendungen zum Einsatz. Eine umfassende Zusammenfassung zur Verwendung von Paraffinen im Bauwesen ist in [Hec01] wiedergegeben. Als Anwendungsgebiete werden dort unter anderem angeführt:

- in der Vorfertigung als Zuschlagstoff, bzw. Zusatzstoff,
- Sanierung, einschließlich Grund- und Holzbau,
- Bauwerksabdichtung,
- Massivbau,
- Straßenbau,
- Holzindustrie und
- Korrosionsschutz.

Des Weiteren sind eine Zusammenfassung von vorangegangenen Arbeiten und weitere Erkenntnisse zur nachträglichen Horizontalabdichtung mittels Paraffininjektion enthalten. Diese Anwendung wird vor allem in der Sanierung sehr erfolgreich eingesetzt.

Bei diesem Verfahren wird das Mauerwerk aufgeheizt und vorgetrocknet, zeitgleich oder zeitlich versetzt wird geschmolzenes Paraffin eingebracht. Die Aufheizung des Mauerwerks erfolgt z. B. mit Heizstäben. Dabei muss je nach Schmelzpunkt des Paraffins eine Temperatur von wenigstens 60°C erreicht werden, damit sich das flüssige Paraffin verteilen kann. Eine Temperatur über 100°C bewirkt hohe Trocknungseffekte und eine schnelle Paraffinpenetration. Der Porenverschluss tritt durch die nachfolgende Abkühlung und das Erstarren des Paraffins ein. Da dieser Vorgang nur durch die Temperatur bedingt ist, kann er sehr gut gesteuert, beeinflusst und beliebig oft wiederholt werden, so dass unterschiedlichste Technologien mit unterschiedlichen Effekten möglich sind [Dre02].

Weitere Arbeiten zu diesem Thema, insbesondere zu den Auswirkungen von Injektionsstoffen auf die thermische und hygrische Längenänderung, sind in [Hau02] und [Vol03] gegeben. Angaben zu Eigenschaftsänderungen von Porenräumen nach einer Penetration von Injektionsstoffen sind in [Maj04] enthalten.

2.2 Paraffine und ihre Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen

Die nachfolgende Literatursichtung gibt einen Überblick über Ergebnisse aus Untersuchungen, bei welchen die Baustoffbehandlung mit Paraffin eine Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit zur Folge hatte. Unter anderem können Einflüsse auf das Wasseraufnahmeverhalten, die Frost-Tauwechselbeständigkeit, das Verwitterungsverhalten, die Festigkeitseigenschaften, das Quellen, den chemischem Widerstand und den Hydratationsprozess bei Beton genannt werden.

Bei der in [Hec01] vorhandenen Literatursichtung zu Paraffinen im Bauwesen sind zahlreiche Quellen angeführt, welche die Dauerhaftigkeit von mit Paraffin behandelten Baustoffen betreffen. Es wird an dieser Stelle auf die genannte Quelle verwiesen.

In [Gie85] wird von mit Paraffin-Montanwachs behandeltem Beton für den Straßenbau berichtet. Hierbei wurde dem Frischbeton ein Paraffin/Montanwachs-Gemisch (in einem Verhältnis von 3:1) in Pulverform zugegeben, wobei eine Dosierung von 3 M.-%, bezogen auf den Beton gewählt wurde. Im Zuge einer relativ kurzen thermischen Behandlung des ausreichend erhärtenden Betons bei 95°C, kommt es nur zu einer Versiegelung im Randbereich. Dadurch konnte die Frost- Tausalzbeständigkeit wesentlich erhöht werden.
Durch die Zugabe des Paraffin/Montanwachs-Gemisches kommt es jedoch zu einer Festigkeitsminderung, welche je nach Betonzusammensetzung 40-60% beträgt.
Hinsichtlich der baupraktischen Bedeutung wird zusammengefasst, dass ein mit Wachs intern versiegelter Beton einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand besitzt, die hohen Kosten und die relativ aufwendige Verarbeitungstechnik derzeit jedoch allenfalls eine Anwendung bei kleineren Fertigteilen zweckmäßig erscheinen lässt.
Reines Paraffin ist nicht geeignet, weil die gemessene Oberflächenabwitterung sehr stark ist. Der Grund hierfür wird darin gesehen, dass die Durchtränkung und Abdichtung des Zementsteins durch das unpolare Paraffin nicht ausreichend ist.
Dieser Umstand wurde in der Arbeit nicht weiter verfolgt. Im erfolgreich angewandten Paraffin/Montanwachs-Gemisch ist ebenfalls Paraffin enthalten. Die Zugabemenge der beiden Pulverarten (Paraffin und Paraffin/Montanwachs-Gemisch) wurde bei der Probenherstellung gleich gehalten. Des Weiteren weist das als Paraffin bezeichnete Wachs eine andere Form und Größe auf als das Paraffin/Montanwachs-Pulver. Die Frischbetoneigenschaften (Frischbeton-dichte, Verdichtungsmaß, Frischbetonluftgehalt) und die 28 Tage Druckfestigkeiten weichen teilweise markant voneinander ab. Es ist davon auszugehen, dass sich beide Probenarten (Frischbeton mit Paraffin-Pulver und Paraffin/Montanwachs-Pulver) bereits vor der thermischen Behandlung in ihrem Gefüge unterscheiden und die Unterschiede in der Dauerhaftigkeit nicht auf die Eigenschaften der Wachse beschränkt werden kann.

Auf Grund der Ergebnisse der Frost- Tausalzversuche ist jedenfalls ersichtlich, dass für die gewählten Versuchsbedingungen, für das betrachtete Paraffin-Pulver Produkt, keine Erhöhung der Dauerhaftigkeit erzielt werden kann.

In [Dre91] wird von teilpenetrierten Probekörpern berichtet, welche für einen Zeitraum von einem Jahr im Erdreich gelagert wurden. Die nicht mit Paraffin behandelten Teile weisen nach einer starken Durchfeuchtung eine sichtbare Begrünung auf. Die penetrierten Bereiche hingegen bleiben sauber und selbst nach Beregnung und Spritzwasserbelastung kommt es wegen der geringen Wasseraufnahme zu keiner Begrünung. Des Weiteren wird von einer ebenso behandelten Gipsprobe berichtet, welche nach einjähriger Erdlagerung keinerlei Feuchtigkeitsschäden erkennen lässt.

Nach Untersuchungen in [Fra93] weisen mit Paraffin getränkte Ziegelprobekörper im Vergleich zu ungehandelten Probekörpern nach 28 Tagen keine Wasseraufnahme und keine physikalische Feuchtedehnung auf. Es wird daraus geschlossen, dass sich Paraffin in Gegenwart von Wasser völlig stabil verhält und keinerlei Wasser einlagert.

In [Dre95] wird unter anderem berichtet, dass Wasser und darin gelöste Stoffe die Hauptursache für die Zerstörung von Baustoffen und Bauteilen ist. Die eindringende Feuchtigkeit ist an zahlreichen Prozessen wie Frost- Tauwechsel, chemischer Korrosion, Materialauswaschungen und an Veränderungen der thermischen und hygrischen Materialeigenschaften beteiligt.
Eine Möglichkeit, Bauteile mittels Paraffin zu schützen und deren Dauerhaftigkeit zu erhöhen, besteht darin, die Poren der Materialien mit Paraffin zu versiegeln. Paraffin ist umweltverträglich, ungiftig und bewirkt keine chemischen Reaktionen im Baustoff. Der Penetrationsprozess ist durch die thermische Regelbarkeit steuerbar. Dadurch kann Paraffin auch in größere Tiefen eindringen. Bei Untersuchungen zur Druckfestigkeit an penetrierten Ziegeln wurde eine Steigerung von bis zu 30% gegenüber den unbehandelten Materialien festgestellt.

In [Che96] werden Hochleistungsbetone auf Spannungskorrosion bei chemischem Angriff untersucht. Für Vergleichszwecke und um einen gerichteten chemischen Angriff zu bewirken, wurden versuchsweise gegenüberliegende Seitenflächen von Mörtelprismen 4x4x16cm³ mit Paraffin beschichtet (vgl. Abbildung 2).
Die Probekörper wurden unbelastet und belastet (Spannungskorrosion, Belastung mit 30% der Bruchlast nach 28 Tagen) in Ammoniumnitratlösungen (NH_4NO_3 bewirkt einen lösenden Angriff) und Ammoniumsulfatlösungen ($(NH_4)_2SO_4$ bewirkt einen treibenden Angriff) unterschiedlicher Konzentrationen gelagert. Nachfolgend sind Ergebnisse dieser Untersuchung exemplarisch dargestellt (Abbildung 1 und Abbildung 2).

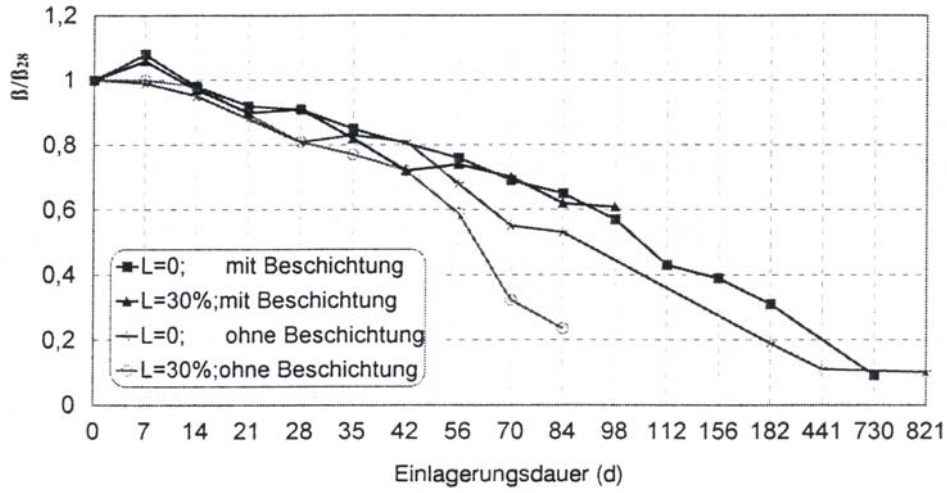


Abbildung 1: Biegezugfestigkeitsentwicklung des Mörtels mit seitlicher Paraffinbeschichtung im Vergleich mit unbeschichteten Proben in 10% NH_4NO_3-Lösung; entnommen aus [Che96]

Anmerkung: L=0 ..... Die Proben wurden während der Einlagerung in der Aggressivlösung nicht belastet.
L=30% ... Während der Einlagerung in der aggressiven Lösung wurden die Proben mit 30% der Bruchlast nach 28 Tagen gelagert.

Abbildung 2: Hochleistungsbeton (B80) bei Einlagerung von 182 Tagen in 10%iger NH_4NO_3-Lösung mit seitlicher Paraffinbeschichtung; entnommen aus [Che96]

Zusammenfassend werden in [Che96] folgende Schlüsse gezogen:

- Selbst durch eine partielle Beschichtung wird der Angriff der Medien behindert und dadurch eine erhebliche Erhöhung der Lebensdauer, insbesondere bei belasteten Proben, bewirkt.

- Die Wirkung der Beschichtung ist für die verschieden angreifenden Medien unterschiedlich. Bei Einlagerung in 5%iger Ammoniumsulfatlösung ist die Wirkung deutlich signifikanter als bei 10%iger Ammoniumnitratlösung.
- Die Wirkung der Beschichtung bei Spannungskorrosion ist signifikanter als bei rein chemischer Korrosion, unabhängig vom angreifenden Medium.
- Proben, welche mit einem Paraffin-Coating versehen waren, zeigen somit im Allgemeinen einen wesentlich höheren Widerstand als unbehandelte Proben.

Die Ausführung und Beschaffenheit der Beschichtung ist in der Arbeit nicht näher erläutert. Des Weiteren sei nochmals darauf hingewiesen, dass gegenüber dem angreifenden Medium nur zwei von vier Seitenflächen beschichtet waren, und dass keine optimierte Schutzwirkung erzielt werden sollte. Bei den in Abbildung 1 dargestellten Ergebnissen ist weiters zu beachten, dass durch die rein seitliche Beschichtung von Probekörpern bei Biegezugbelastung der Angriff des Mediums über die statisch wirksame Höhe stattfindet.
Für eine Beurteilung der Wirkung der Beschichtung muss neben der Korrosionsart (lösender und treibender Angriff bzw. angreifendes Medium) die Konzentration der Lösung und die der Beurteilung der Wirksamkeit zu Grunde gelegte Messgröße überlegt werden.

Bezüglich mechanischer Materialeigenschaften von Baustoffen nach Paraffinbehandlung werden in [Sau00] folgende Aussagen gemacht:

- Die Paraffinbehandlung bewirkt bei Ziegel eine deutliche Festigkeitssteigerung deren Höhe von der Behandlungsart abhängig ist.
- Die Festigkeitserhöhung fällt bei den Biegezugfestigkeiten höher aus als bei den Druckfestigkeiten.
- Bei neuen Ziegelmaterialien werden für die Biegezugfestigkeiten Steigerungen von bis zu 179% und bei den Druckfestigkeiten bis zu 93% angegeben.
- Für historische Ziegel fallen die Steigerungen geringer aus. Sie betragen für die Biegezugfestigkeiten bis zu 90% und für die Druckfestigkeiten maximal 51%.
- Bei Verbundproben werden die Biegezugfestigkeiten von mit Paraffin behandelten Proben mehr erhöht als die Druckfestigkeiten. Dies gilt für neue, als auch für historische Ziegelmaterialien.

Als Grund für die Erhöhung der Festigkeit ist die Auffüllung der Poren mit Paraffin zu nennen. Bei Belastung auf den Baustoff übt das Paraffin einen Stützdruck auf die Poren aus. Die Poren und Hohlräume können dadurch nur schwer zusammengedrückt werden. Bei Zug- und Scherspannungen wirkt sich die Verklebung mittels Paraffin aus.

Von weiteren Festigkeitsuntersuchungen von mit Paraffin behandelten Baustoffen wird in [Hau02] berichtet. Es wurden Kalk- und Kalkzementmörtel untersucht, wobei diese teilweise oder zur Gänze mit Paraffin penetriert wurden.

Die Festigkeit des Kalkmörtels wird durch die Paraffinapplikation wesentlich gesteigert:

- Die Biegezugfestigkeit erhöht sich bei gänzlich penetrierten Proben von ca. 0,1 auf 2,8 N/mm² und jene der teilweise penetrierten auf 0,7 N/mm².
- Die Druckfestigkeit steigt von 0,8 auf 6,6 N/mm² (gänzlich penetriert) bzw. auf 2,9 N/mm² (Teilpenetration).
- Der E-Modul, welcher sich aus dem Druckversuch ergibt, wurde für die Vollpenetration verzehnfacht und für die Teilpenetration verdreifacht.

Beim Kalkzementmörtel kommt es ebenfalls zu einer deutlichen Steigerung der Festigkeit:

- Für die Biegezugfestigkeit ergibt sich bei den gänzlich penetrierten Proben eine Erhöhung von 1,1 auf 4,8 N/mm² und für jene die teilweise penetriert sind auf 2,1 N/mm².
- Die Druckfestigkeit steigt von 5,2 auf 16,1 N/mm² (gänzlich penetriert) bzw. auf 8,0 N/mm² (Teilpenetration).

Aus weiteren Arbeiten am Fachbereich Bauphysik liegen Ergebnisse für den Werkstoff Holz und zur Hydrophobierung von Gips vor. Bezüglich des Baustoffes Holz können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Bei einem Paraffingehalt von 33,5 M.-% wird die Wasseraufnahme längs zur Faser (w-Wert) von 3,1 auf 0,3 kg/(m²h0,5) reduziert.
- Bei einem Paraffingehalt von 29 M.-% wird die Wasserzunahme von einem Mittelwert von 119,5 M.-% auf 12,4 M.-% reduziert.
- Das Quellen wird verringert, wobei sich die Behandlung mit Paraffin für das Quellen quer zur Faserrichtung wesentlich deutlicher auswirkt. Es wird von 6,7% auf ca. 2,4% verringert.
- Die Biegezugfestigkeiten werden geringfügig erhöht.
- Bei einem Paraffingehalt von 29 M.-% wird die Druckfestigkeit längs zur Faser um ca. 10% und quer zur Faser um ca. 2% erhöht.
- Durch die thermische Behandlung und Tränkung mit Paraffin verzieht sich das Holz (ähnlich wie bei der Trocknung von unbehandeltem Holz).

Durch die Anwendung von Paraffin-Emulsion bei der Herstellung von Gips kann durch Hydrophobierung eine deutliche Reduktion der Wasseraufnahme erreicht werden.

Über die Dauerhaftigkeit zementgebundener Materialien, welche bei Siedlungswasserbauten zum Einsatz kommen, wird in [Sar03] berichtet. In Laborversuchen wurden u. a. würfelförmige Probekörper in Säuren gelagert. Um einen eindimensionalen Säureangriff zu gewährleisten wurden fünf Seitenflächen mit Wachs beschichtet.

Unter [Hyd3w] wird von feinteiligen, wasserbasierten Wachsdispersionen auf Paraffinbasis berichtet, mit welchen man die Zement- oder Kalkpartikel des Bindemittels mit einem feinen Coating umgibt. Diese Dispersionen wurden ursprünglich entwickelt, um im Betonbau ein zu

schnelles Austrocknen des frischen Betons zu vermeiden. Weil das Wachs sich vom umgebenden Wasser separiert und einen hydrophoben Teppich mit Trennwirkung aus feinsten Wachspartikeln bildet, verdunstet selbst unter Sonneneinstrahlung nur wenig Wasser.
Eine weitere Anwendung für kationische Wachsemulsionen ergibt sich im Tiefbau bei der Verfestigung von Baugrund. Strukturschwache Böden, die sich auf Grund hoher Wassergehalte kaum verfestigen lassen, werden durch die Beigabe von Kalk bzw. Zement und dem Entzug von überschüssigem Wasser entsprechend behandelt. Wegen der verfahrenstechnischen Notwendigkeit den Beginn der hydraulischen Verfestigung zu steuern, werden die Zement- oder Kalkpartikel mit einem feinen, hydrophoben Paraffin-Coating umgeben.

In den zuvor beschriebenen Arbeiten konnte durch die Anwendung von Paraffinen eine deutliche Erhöhung des Widerstandes gegenüber verschiedenen Beanspruchungen erreicht werden. Demnach wirken sich Paraffine bei geeigneter Applikation positiv auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen aus.

2.3 Einfluss der biogenen Schwefelsäurekorrosion auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen

Es handelt sich bei der biogenen Schwefelsäurekorrosion (BSK) im Wesentlichen um einen Angriff durch Schwefelsäure, welche bei Abwasseranlagen unter komplexen Bedingungen durch Mikroorganismen gebildet werden kann. Dadurch kommt es im Allgemeinen zu einer Schädigung der dort eingesetzten Baustoffe. Um eine ausreichende Nutzungsdauer der Bauwerke zu gewährleisten, wird einerseits versucht, die Schadensursache zu beheben und andererseits der Einsatz dauerhafter Materialien in Erwägung gezogen.

Unter [dud3w] ist unter Dauerhaftigkeit zu finden:
„... Dau|er|haf|tig|keit, die; -: Eigenschaft, dauerhaft zu sein.“ und „... dau|er|haft <Adj.>: einen langen Zeitraum überdauernd, beständig ...“

Bezüglich ausreichender Dauerhaftigkeit von Beton wird in [Sta01] definiert, dass Bauteile aus Beton über die vorgesehene Nutzungsdauer gegenüber allen Einwirkungen (Lasten, Zwänge aus Verformungen, Umwelteinflüsse) bei ausreichender Wartung und Instandhaltung genügend beständig sind.

Es geht somit um den Erhalt der angedachten Funktionen über einen vorbestimmten Zeitraum, wobei ein ausreichender Widerstand gegenüber schädigenden Einwirkungen vorhanden sein muss.

2.3.1 Schadensursache

Eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte wird nach [Sta01] wiedergegeben:
Die von BSK verursachten Schäden an Abwasseranlagen sind schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt. In Deutschland wurde diese Form der Korrosion allgemein etwa ab 1970 bekannt. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein von Schwefelverbindungen in Abwässern, welche aus kommunalen (häusliche Abwässer) oder aus industriellen Einleitungen stammen. In Abwasseranlagen werden diese Schwefelverbindungen durch Mikroorganismen zu flüchtigen Schwefelverbindungen – Schwefelwasserstoff H_2S und organische Polysulfide – umgesetzt und schlagen sich an der feuchten Betonwandung oberhalb des Wasserspiegels nieder (vgl. Abbildung 3).
Durch Luftsauerstoff und möglicherweise auch unter Einwirkung anderer Mikroorganismen werden diese flüchtigen Schwefelverbindungen zu elementarem Schwefel oxidiert, welcher ein Substrat für verschiedene Mikroorganismen der Gattung Thiobacillus ist. Diese Bakterien setzen den Schwefel zu Schwefelsäure um.

Von den über 60 Arten der Thiobazillen ist der Thiobacillus thiooxidians der am stärksten H_2SO_4 produzierende Mikroorganismus. Er wurde früher als Thiobacillus concretivorus „Betonfresser“ bezeichnet.

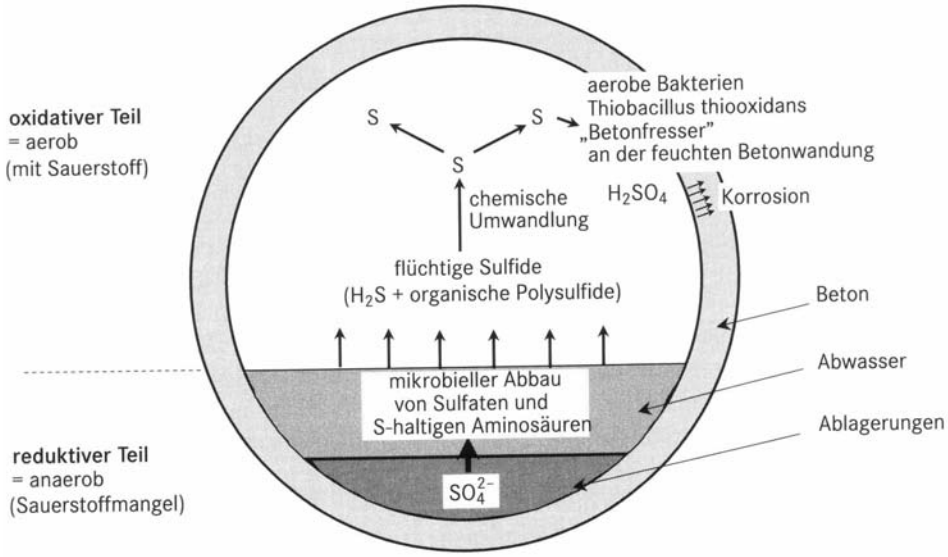


Abbildung 3: Prinzipdarstellung der biogenen Schwefelsäurekorrosion bei teilweise gefüllten Abwasserrohren; entnommen aus [Sta01]

In [Loh86] wird beschrieben, dass sich auf Baustoffen wie Stahl, Kunststoff und Holz die gleiche Flora wie auf mit Zement gebundenen Baustoffen ausbildet. Die Besiedelung der Kanalwand erfolgt in Abhängigkeit vom pH-Wert der Baustoffoberfläche. Baustoffe mit neutralen Oberflächen, z. B.: Steinzeug, Klinker, Beschichtungen und Auskleidungen können sofort besiedelt werden. Bei mit Zement gebundenen Baustoffen muss der pH-Wert erst bis auf ein für Thiobacillen tolerierbares Maß abgesenkt werden, z. B. durch Karbonatisierung, Bewuchs mit Sielhaut[1] und leicht saurem Einfluss aus Schwefelwasserstoffwasser. Durch die Ansiedlung von Thiobacillen und deren Schwefelsäureproduktion sinkt der pH-Wert weiter ab. Fällt der pH-Wert unter 6 werden ideale Lebensbedingungen für den Thiobacillus thiooxidians geschaffen, durch dessen Tätigkeit der pH-Wert weiter bis unter 0,5 fällt. Eine übliche Gasraumsielhaut ist dann nicht mehr zu finden.

Aus Untersuchungsergebnissen wird in [Boc84] berichtet, wonach der Thiobacillus thiooxidians an Entnahmestellen mit starker Korrosion und niedrigen pH-Werten um 1,0 überwog. Bei Stellen an denen mittlere Korrosionsgrade vorlagen, wurden pH-Werte zwischen 5,0 und 6,0 festgestellt. Der Thiobacillus thiooxidians war dann nur in geringer Zahl anzutreffen.

[1] Sielhaut ... Schicht aus organischen Materialien (z.B. Zellulose) und Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) [Boc84]; Sielhäute treten bei Siedlungswasserbauten sowohl im Abwasser führenden Bereich als auch im Gasraum an den Wandungen auf.

T. thiooxidans kann bei entsprechender Substratversorgung gut wachsen und eine pH-Wertabsenkung bis auf Werte kleiner 2 bewirken [Gra95].

Das Auftreten und die Stärke von BSK ist örtlich und zeitlich verschieden. Darüber hinaus spielen klimatische Bedingungen eine wesentliche Rolle. Umstände, welche das Auftreten von BSK begünstigen, sind in [Ste99] zusammengefasst. Kanalstrecken nach

- Pumpwerken,
- Eintritt von Druckleitungen,
- Einleitung sulfidhaltiger Abwässer aus Absetzanlagen, Gewerbe und Industrie,
- Einleitung aus Druckentwässerungssystemen,
- Abstürzen und anderen Bauwerken, durch welche Turbulenzen erzeugt werden,
- wo gleichzeitig Sauerstoff im Gasraum zur Verfügung steht,

sind durch biogene Schwefelsäurekorrosion besonders gefährdet.

Im Sommer, wenn die Konzentrationen flüchtiger Schwefelverbindungen höher als im Winter sind, kühlt sich die Kanalluft an der Wandung ab und sinkt nach unten, während die leichte wärmere Luft im Zentrum aufsteigt und mit ihr flüchtige Schwefelverbindungen in den Scheitel gelangen. Stärkere Korrosionserscheinungen im Scheitel sind auf das erhöhte Substratangebot für Thiobacillen zurückzuführen. Ähnliches gilt für Bauteile, die in den Kanalluftstrom hineinragen und für Laibungen der Schachtbauwerke [Loh86].

2.3.2 Mörtel und Beton

2.3.2.1 Schädigungsprozess

Da sich die Baustoffe Mörtel und Beton in ihrer stofflichen Zusammensetzung im Wesentlichen durch die Korngröße des größten verwendeten Zuschlags unterscheiden, gelten Grundsätze bezüglich deren Dauerhaftigkeit gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion gleichermaßen.

Über die Einwirkung von Säuren wird in [Grü01] unter anderem nachfolgendes berichtet. Säuren bilden mit den calciumhaltigen Bestandteilen des Zementsteins Salze. Die Reaktionsprodukte können schwerlöslich oder leichtlöslich sein, dementsprechend ist die Auswirkung des Angriffs schwächer oder stärker. Dabei spielt die Konzentration der Säure eine wesentliche Rolle.
Starke Mineralsäuren, wie Salzsäure, Salpetersäure und Schwefelsäure greifen alle Bestandteile des Portlandzementsteins an und lösen ihn unter der Bildung von löslichen Calcium-, Aluminium- und Eisensalzen sowie kolloidaler Kieselsäure (Kieselgel) auf.
Beim Angriff von Schwefelsäure und schwefeliger Säure kann es durch die beim lösenden Angriff gebildeten Sulfate zusätzlich zu einer Treibwirkung kommen.

In [Gra95] wird ausführlich über Untersuchungen zur Korrosion von mit Zement gebundenen Materialien durch saure Wässer unter besonderer Berücksichtigung des Schwefelsäureangriffs berichtet. Des Weiteren wird eine ausführliche Literaturübersicht wiedergegeben.

Bei pH-Werten der Porenlösung unter 8 werden die das Bindemittelgerüst bildenden Phasen zersetzt. Dies kann auch durch eine Veränderung der Zusammensetzung nicht beeinflusst werden. Der Schadensmechanismus kann unter Ausbildung von Zonen (Abbildung 4) folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Herauslösen der Alkalielemente aus der Porenlösung
- Auflösung von Calciumhydroxid, Abtransport der gelösten Calcium-Ionen
- Zersetzung der Hydratphasen unter Bildung von amorphen SiO_2, Al- und Fe-Hydroxiden sowie gelöstem Ca^{2+}
- Auflösung der genannten Hydroxide bei Überschreitung der Grenz-pH-Werte
- Abscheidung von Gips bei Überschreitung der Sättigungskonzentration bei der Einwirkung von Schwefelsäure

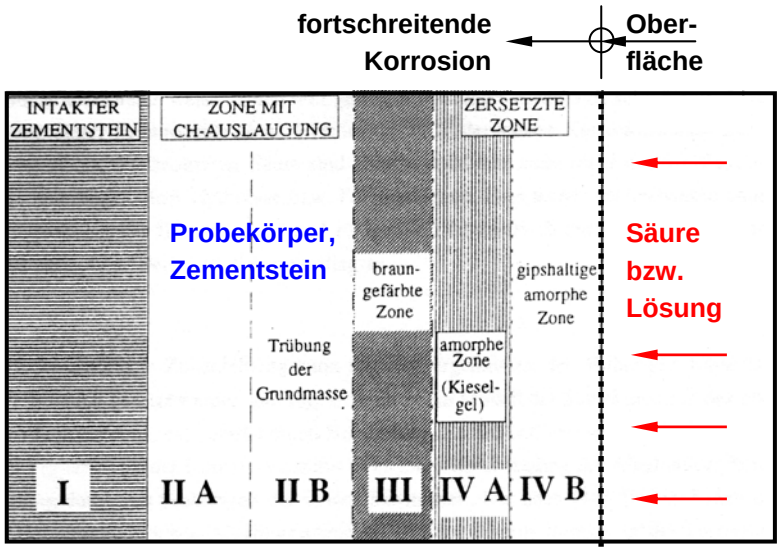


Abbildung 4: schematische Darstellung der Zonenbildung beim Säureangriff; die Stärke der Zonen ist pH-Wert abhängig; entnommen aus [Gra95]

Zone I: ungeschädigter Zementstein; keine Schädigung erkennbar
Zone II: Auslaugung des kristallinen Calciumhydroxids; zunehmende Trübung in Richtung der Aggressivlösung durch Hydrolyse der Hydratphasen
Zone III: Braunfärbung durch ausgefälltes Eisen-Oxohydroxid
Zone IV: vollständig zersetzt, überwiegend gips- bzw. kieselsäurehältig

Bei fortwährendem Säureangebot und Lösungsvermögen handelt es sich um einen fortschreitenden Schädigungsprozess, der sich durch die Ausbildung von Zonen und pH-Wert-Gradienten auszeichnet. Die Schadensfolgen sind unter Pkt. 2.3.4 auf Seite 27 angeführt.

Nachfolgend sind Ergebnisse der Literatursichtung bezüglich der Widerstandsfähigkeit von Betonen und Mörteln gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion angeführt. Neben allgemein

gültigen Erkenntnissen ist der Einfluss der einzelnen Beton- bzw. Mörtelkomponenten und deren Zusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit beschrieben.

2.3.2.2 Anforderungen

Bezüglich der Dauerhaftigkeit von Abwasserbauwerken aus Beton wird in [Boc84] beschrieben, dass bei dichtem Beton und schwachem Angriffsgrad (pH-Werte größer 6) keine Maßnahmen notwendig sind. Gleiches gilt für einen mittleren Angriffsgrad (pH-Wert zwischen 5 und 6), wenn das Bauwerk etwa 40 Jahre stehen soll. Bei starkem Angriffsgrad (pH-Wert um 1) muss der Beton durch Auskleidungen (Steinzeug, Kunststoff oder rostfreier Stahl) geschützt werden.

Für Betone wird in [Loh86] zusammenfassend festgehalten, dass der Angriff bei pH-Werten oberhalb pH3 durch betontechnologische Maßnahmen (niedriger W/Z-Wert, geeignete Kornzusammensetzung, Nachbehandlung) ohne zusätzlichen Korrosionsschutz in den Griff zu bekommen ist.

Beziehungen zwischen Ursachen und Auswirkungen bei biogener Schwefelsäurekorrosion und erforderliche Schritte werden in [Bie83] wiedergegeben (Tabelle 1). Als erforderliche Maßnahme wird in Abhängigkeit vom Angriffsgrad nachfolgendes angegeben:

- bei schwachem Angriffsgrad: dichter Beton, gute Nachbehandlung, sonst keine weiteren Maßnahmen
- bei mittlerem Angriffsgrad: zur Vermeidung von Sanierungsmaßnahmen sind zusätzlich HS-Zemente, Opferbetone oder Zuschläge aus Hartkalkstein zu verwenden
- bei starkem Angriffsgrad: Schutz des Betons durch Auskleidungen

pH-Wert im Kondenswassertropfen an der Kanalwandung	Zellzahlen *)	Angriffsgrad der Korrosion **)	Abtrag der Betonoberfläche pro Jahr ***)	Sanierungsmaßnahmen erforderlich nach Jahren ****)	Bemerkungen
basisch 14					
13,0					nicht carb. Beton
12					
11					
10					
9					
8,5					carbonatisierter Beton
8					
neutral 7	$0–10^2$	schwach	absandend	> 80	
6,0					
5	$10^3 – 10^5$	mittel	< 0,5 mm	> 40	
4					
3,0					
2	$10^6 – 10^8$	stark	> 0,5 mm	> 5	
1					
sauer 0					

*) Die Zellzahlen beziehen sich auf T (thiooxidans) und geben die Anzahl der Zellen pro 1 mg Protein an der Kanalwandung an
**) Die hier gewählte Beurteilung des Angriffsgrades stimmt nicht mit der DIN 4030 überein
***) Die Angaben sind geschätzt und beruhen zum Teil auf Erfahrungen und zum Teil auf Laboruntersuchungen
****) Die Angaben sind geschätzt und beruhen auf Erfahrungen

Tabelle 1: Beziehungen zwischen Ursachen und Auswirkungen bei BSK in Kanälen aus Beton bzw. Stahlbeton [Bie83]

Für gemauerte Abwasserbauten sind nach DIN 4034-10 [DIN403] unter anderem Forderungen an den mineralischen Mörtel einzuhalten. Diese betreffen die Vorgabe der Mörtelgruppe (Mörtelgruppe III nach DIN 1053-1) und die Zementart (CEM I 32,5 R/HS nach DIN 1164).

Geht man nach [ATV98] von einem normalen Beton (Wasserzementwert <0,5 und Wassereindringtiefe <3cm geprüft nach DIN 1048) aus, so liegt für die nachfolgend angeführten Beanspruchungen durch organische und anorganische Säuren eine ausreichende Beständigkeit vor:

- Bei dauernder Beanspruchung darf ein pH-Wert von 6,5 nicht unterschritten werden.
- Bei zeitweiliger Beanspruchung (max. 1 Jahr pro 10 Jahren) darf für organische Säuren der pH-Wert von 6,0 und für anorganische Säuren der pH-Wert von 5,5 nicht unterschritten werden.
- Kurzzeitig (max. 1. Stunde pro Woche) darf ein pH-Wert von 4,0 nicht unterschritten werden.

Für eine dauernde chemische Beanspruchung bis zu einem pH-Wert von 4,5 ist die Anwendung von Hochleistungsbetonen zulässig. Ein ausreichender Widerstand liegt unter Verwendung von hochreaktiven puzzolanischen Feinstoffen bei mind. 5 M-% des Zement- und Betonzusatzstoffgehaltes und/oder der Verwendung von entsprechenden Sonderzementen, ab einer Festigkeitsklasse von C75/85, vor. Der Wasserzementwert muss hierbei <0,45 und die Wassereindringtiefe <2cm sein.

Für Betone werden in der EN 206-1 ([DIE20], [EN206]) bzw. in den nationalen Anwendungsdokumenten (wie z.B. [DIE104], [ONB47]), in Abhängigkeit der vorhandenen chemischen Beanspruchung durch Böden, Grundwasser und Meerwasser bzw. Abwasser, Expositionsklassen definiert (vgl. Tabelle 2) und daraus technologische Anforderungen an den Beton gestellt.

Für Umgebungsbedingungen die außerhalb der angegebenen Grenzen liegen, kann ein besonderes Gutachten notwendig sein, um die Anforderungen an den Beton festzulegen ([DIE20], [EN206]).

Chemisches Merkmal	Referenzprüfverfahren	XA1	XA2	XA3
Grundwasser				
SO_4^{2-} mg/l	EN 196-2	≥ 200 und ≤ 600	> 600 und ≤ 3 000	> 3 000 und ≤ 6 000
pH-Wert	ISO 4316	≤ 6,5 und ≥ 5,5	< 5,5 und ≥ 4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
CO_2 mg/l angreifend	prEN 13577:1999	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100 bis zur Sättigung
NH_4^+ mg/l	ISO 7150-1 oder ISO 7150-2	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
Mg^{2+} mg/l	ISO 7980	≥ 300 und ≤ 1 000	> 1 000 und ≤ 3 000	> 3 000 bis zur Sättigung
Boden				
SO_4^{2-} mg/kg[a] insgesamt	EN 196-2[b]	≥ 2 000 und ≤ 3 000[c]	> 3 000[c] und ≤ 12 000	> 12 000 und ≤ 24 000
Säuregrad	DIN 4030-2	> 200 Bauman-Gully	in der Praxis nicht anzutreffen	

Tabelle 2: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff; Ausschnitt aus Tabelle 2 der EN 206-1 [EN206]

In [ONB25] wird bezüglich der Anforderungen an die chemische Beständigkeit von Rohrkanälen bzw. Fertigteilschächten aus Beton sowie für Ortbetonkanäle eine Einteilung in Aggressivitätsstufen bzw. Expositionsklassen vorgenommen. Die Klassengrenzen entsprechen den Vorgaben des nationalen Anwendungsdokuments (vgl. [ONB47]) der EN 206-1. Bei nicht durch die Expositionsklassen abgedeckten Angriffen sind Sondermaßnahmen erforderlich. Dies betrifft bspw. lösende Angriffe bei pH-Werten ≤ 4,0.

Hochleistungsbeton im Siedlungswasserbau, welcher die Anforderungen nach [ONB50] erfüllt, ist für den Einsatz bei Belastungen der Klasse XA3 gemäß EN 206-1 geeignet. Für einen lösenden Angriff sind somit Beanspruchungen für pH-Werte >4,0 abgedeckt. Im Zweifelsfall ist die Eignung für eine spezielle Beanspruchung durch ein Gutachten zu belegen.

In [GST04] werden Anforderungen an Mörtel für Abwasserkanäle und Bauwerke der Ortsentwässerung gestellt. Zur Prüfung der Beständigkeit bei sehr starkem sauren Angriff (pH3-pH0, biogene Schwefelsäurekorrosion pH2-pH0), bei stark saurem Angriff (pH 4,5-3) und bei saurem Angriff (> pH 4,5) ist z. B. eine Prüfung nach Sielbaurichtlinie oder im Schadgasschrank erforderlich.

Aus der zuvor genannten Literatur, den Normen und Regelwerken ist zu erkennen, dass für eine andauernde chemische Belastung bei pH-Werten <4 alleine durch materialtechnologische Maßnahmen keine ausreichende Dauerhaftigkeit gewährleistet werden kann. Es werden gesonderte Prüfungen oder zusätzliche Maßnahmen gefordert.

2.3.2.3 Technologische Maßnahmen

Der Einfluss der Zementart ist nach [Loh86] von untergeordneter Bedeutung. Wegen der gleichzeitig stattfindenden treibenden Korrosion empfiehlt sich die Verwendung von Zementen mit erhöhtem Sulfatwiderstand.
Bei überwiegend quarzhaltigem Zuschlag zeigt sich eine Struktur ähnlich wie Waschbeton und ein flächenhafter Abtrag bei überwiegend kalkhaltigem Zuschlag. Die Verwendung kalksteinhältiger Zuschläge und das Autoklavieren von Beton bringen bei weniger dichtem Beton Vorteile.

Der Angriff durch Schwefelsäure nimmt unter den anorganischen Säuren eine Sonderstellung ein. So ist z. B. der Angriff bei den pH-Werten 5 und 3 relativ schwach und bei pH 1 dagegen beachtlich. Bei der Verwendung kalksteinhaltiger Zuschläge ist die Korrosionsrate etwa viermal geringer als bei der Verwendung von quarzitischem Material [Bay95].

Die Ausbildung einer gipshaltigen Deckschichte nach Überschreiten der Sättigungs-konzentration wird in [Gra95] als Grund für das günstigere Verhalten von Mörteln mit Kalksteinzuschlag im Vergleich zu Mörteln mit Quarzzuschlag genannt. Es kommt durch die Salzbildung zu einer Behinderung der Aufnahme von aggressiven Ionen. Demnach sind die Lösungskonzentrationen und das Lösungsvolumen entscheidend für den Erfolg beim Einsatz von löslichen und nicht löslichen Zuschlägen.

Bei der Einwirkung von Säuren mit den pH-Werten 0 bis 2 konnten keine baupraktisch relevanten Unterschiede im Verhalten der aus den Bindemitteln Portlandzement, Trasszement und Hochofenzement hergestellte Zementsteine und Mörtel festgestellt werden. Differenzen waren hinsichtlich der Raumstabilität der korrodierten Randkrusten zu verzeichnen [Gra95].

Dass der W/Z-Wert alleine nicht unbedingt Aufschlüsse über die Dauerhaftigkeit gibt, wird in [Fra99] gezeigt. Die Verdichtung, ausgedrückt durch die Rohdichte, hat maßgebenden Einfluss auf den Korrosionswiderstand. Eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit wird bei pH0 durch gute Verdichtung erreicht, wogegen bei einer schlechten Verdichtung selbst bei pH1 ein starker Abfall zu verzeichnen ist.
Weiters wird über die Möglichkeiten zur Verbesserung des Säurewiderstands durch den Ersatz des inerten quarzitischen Zuschlags durch Kalkstein berichtet. Bei den untersuchten Mörteln wurden ganze Sieblinienbereiche des quarzitischen Normsandes durch Kalkstein ersetzt. Mit steigendem Kalksteinanteil konnten die Restdruckfestigkeiten signifikant erhöht werden. Besonders effektiv war die Zugabe von Füller (Korndurchmesser 0-0,08mm).

In [Her99] wird von einem Korrosionsmodell für Beton in sauren Wässern berichtet, welches sich durch mehrere Stadien auszeichnet. Nach einem kurzen reaktionskontrollierten Prozess erfolgen diffusionskontrollierte Prozesse, bis es zur Ausbildung einer konstanten

Deckschichtdicke kommt. Die Untersuchungen beruhen auf Langzeit-Einlagerungsversuchen bei konstanten pH-Werten ohne eine Erneuerung der Lösung.
Für Betone mit unterschiedlichem Zementgehalt wurde festgestellt, dass die Verhältnisse der differentiellen Lösungsraten dem Quotienten aus dem Zementgehalt der Betone entspricht. Für die vorliegenden Korrosionsbedingungen wurde durch die Erhöhung des Zementgehaltes keine Verbesserung des Korrosionswiderstandes erreicht.

Die Widerstandsfähigkeit des Betons gegen chemische Angriffe hängt nach [Grü01] weitgehend von der Dichtigkeit des Betongefüges gegenüber dem Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen ab und steigt mit dem Hydratationsgrad des Zements. Demgegenüber ist der Einfluss der Zementart gering. Allgemein weisen Betone aus hüttensandhaltigen Zementen gegenüber den meisten lösenden Angriffen einen etwas höheren Widerstand auf, als solche aus anderen Normalzementen. Dies wird auf den niedrigeren $Ca(OH)_2$-Gehalt zurückgeführt.
Des Weiteren wird angeführt, dass in der Regel Gesteinskörnungen verwendet werden sollten, die gegenüber den angreifenden Stoffen beständig sind. Karbonathaltige Gesteinskörnungen sind säurelöslich. Sie können bei sauren Wässern aber trotzdem verwendet werden, wenn sich die angreifenden Stoffe nur sehr langsam erneuern und schnell neutralisiert werden. Dadurch wird das Lösungsvermögen des Wassers relativ schnell reduziert. Wenn sich das angreifende saure Wasser dagegen rasch erneuert, ist eine Sättigung durch in Lösung gehende Zuschlagsbestandteile nicht möglich. Durch die Auflösung des Zuschlags werden zusätzlich neue Angriffsflächen geschaffen. Dadurch schreitet der Abtrag schneller fort als bei der Verwendung beständiger Gesteinskörnungen.

In [Ren01] wurden Untersuchungen an Mörteln mit Portlandzementen, Hochofenzementen und Tonerdenzementen sowie Versuche an Hochleistungsbetonen mit Portlandzement-HS und Hochofenzementen durchgeführt. Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass Mörtel mit Hochofenzementen stets größere Widerstände gegenüber biogenen Schwefelsäureangriff aufweisen als Mörtel mit Portlandzement. Es wird festgestellt, dass sehr dichte Betone mit Hochofenzement säurekorrosionsbeständiger sind als entsprechende Betone mit CEM I-HS. Weiters brachten hüttensandreichere Hochofenzemente bessere Ergebnisse als hüttensand-ärmere Zemente.

Die Anwesenheit puzzolanischer Zusatzstoffe führt zu einer zunehmenden Gefügedichtheit und einer damit verbesserten Dauerhaftigkeit. Die gemeinsame Verwendung von Steinkohlenflugasche und Silicastaub im Beton bietet einige Vorteile. Beide Zusatzstoffe verbrauchen Portlandit, welches, besonders im Fall eines chemischen Angriffs, einen Schwachpunkt im Betongefüge darstellt. Das leichter lösliche Portlandit wird in Hydratphasen (C-S-H) gebunden, welche schwerer löslich sind. Durch die Verdichtung der Kontaktzone Zuschlag/Matrix und auch der Matrix selbst, wird das Eindringen von angreifenden Medien in

den Beton erschwert [Sta02]. Des Weiteren wird festgehalten, dass aus thermodynamischer Sicht alle Hydratphasen des Zementsteins gegenüber einem starken Säureangriff unbeständig sind.

Eine Erhöhung des Säurewiderstandes von Beton kann nach [Bre02] durch den gezielten Einsatz von Feinstoffen erzielt werden. Dies ist auf die Ausbildung einer sehr dichten Zementsteinmatrix und auf die sehr geringen Porositäten in der Kontaktzone zur Gesteinskörnung zurückzuführen. Empfohlen wird bspw. die Verwendung von Hochofenzementen CEM III/B sowie bei Verwendung von CEM I-Zementen der Einsatz von Microsilica.

Für die in [Heg03] gewählten Versuchsbedingungen, bei Schwefelsäurelagerung von Feinbetonmischungen, können durch die Verwendung von sulfatbeständigen Portlandzementen keine wesentlichen Vorteile gegenüber der Verwendung von herkömmlichen Portlandzementen festgestellt werden. Des Weiteren zeigen sich bei dem teilweise treibenden Angriff für größere w/z-Werte keine ungünstigeren Ergebnisse, da mehr Porenraum für die sich bildenden Reaktionsprodukte zur Verfügung steht.
Der Einsatz von Silicastaub und Flugasche bringt eine Verringerung von Treiberscheinungen und Abplatzungen. Bei der Verwendung von Hochofenzement kann bei gleichzeitigem Einsatz von Flugasche und Silicastaub keine Verbesserung der Säurebeständigkeit gegenüber den Mischungen mit Portlandzement erzielt werden.

Einen hohen Säurewiderstand erzielt man im Allgemeinen bei Betonen durch die größere Dichtigkeit des Betongefüges und durch die Erhöhung des Anteils an schwer löslichen Hydratationsprodukten, wie z. B. Calziumsilikathydraten im Zementstein [Deh03].

2.3.3 Ziegel

2.3.3.1 Schädigungsprozess

Als Hauptgründe für eine Zerstörung sind nach [Thi79] neben der Verwendung von ungeeignetem Ton, unzureichend gebrannte Materialien zu sehen. Die beim Säureangriff auf den Mörtel gebildeten Sulfate wandern in die keramischen Bauteile und fördern somit die Entwicklung treibender Kräfte. Weiters wird berichtet, dass in einigen Fällen die Säure durch die Kapillaren in die keramischen Bauteile gelangt. Dadurch wird die Entwicklung treibender Kräfte gefördert.

In [Fra92b] wird von Schäden an Kanalklinkern in Abwassersielen berichtet, welche durch biogene Schwefelsäurebildung hervorgerufen wird. Durch den Sulfateintrag in die Ziegel kommt es zur Gipsbildung. Die dadurch hervorgerufenen Kristallisationsdrücke bewirken Abplatzungserscheinungen. Das Calcium, welches für die Gipsbildung erforderlich ist, stammt

aus dem Mauermörtel oder aus dem Calciumcarbonat bzw. den calciumhaltigen und säureempfindlichen Bestandteilen des Ziegels.
Neben den zuvor beschriebenen Abplatzungserscheinungen, welche sich auf produktionsbedingte Fehlstellen beziehen, wird von Zug- und Druckfestigkeitsprüfungen berichtet. Diese zeigen für visuell nicht geschädigte Proben Inhomogenitäten über die Steintiefe.

Ergänzend sei angemerkt, dass eine unzureichende Dauerhaftigkeit von gemauerten Wänden, meist durch eine unzureichende Beständigkeit der verwendeten Mörtel bewirkt wird. Bei Verwendung von entsprechenden Klinkermaterialien bildet der Mörtel die Schwachstelle.

2.3.3.2 Anforderungen und technologische Maßnahmen

Bezüglich der Eigenschaften für den Wandbildner wird in DIN 4034-10 [DIN403] gefordert, dass die verwendeten Ziegel ungelochte Kanalklinker nach DIN 4051 [DIN405] sein müssen.

Als technologische Maßnahme zur Vermeidung von Korrosionsschäden, sind nach den oben angeführten Erkenntnissen zum Schädigungsprozess nachfolgende Grundsätze anzusehen:

- Minimierung der säurelöslichen Bestandteile,
- Optimierung des Herstellungsvorganges (Homogenität, Brenntemperatur, Rissfreiheit) und
- abgestimmter, ausreichend dauerhafter Mauermörtel.

2.3.4 Schadensfolgen

Die möglichen Schadensfolgen auf Grund von Korrosion hängen im Wesentlichen von Korrosionsart, -erscheinung und -umfang ab. Es sind Undichtigkeiten und eine Reduktion der Wanddicke und damit die Beeinträchtigung der Tragfähigkeit mit den möglichen Folgeschäden wie Risse, Deformation, Rohrbruch, Einsturz. Die Innenkorrosion verursacht zusätzlich eine Erhöhung der Wandrauheit und dadurch bedingt eine Reduktion der hydraulischen Leistungsfähigkeit [bbr3w].

Nach [Bos01] treten in den meisten Fällen Kombinationen von mehreren Schäden gleichzeitig auf. Es ist demnach in der Regel nicht möglich, eine einzige Schadensart als maßgebendes Kriterium für eine Sanierungsentscheidung zu benennen.

2.3.5 Beurteilung der Dauerhaftigkeit

Um eine Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Baustoffen oder Bauteilen vornehmen zu können, müssen neben der vorausgesetzten Nutzungsdauer alle Anforderungen, die vorliegenden Einwirkungen und die hierbei ablaufenden Schädigungsmechanismen bekannt sein. Eine Vorhersage wird umso komplexer, wenn es zu einem gleichzeitigen oder überlagerten Auftreten verschiedener Prozesse kommt.

Eine versuchstechnische Erfassung der Schädigungsprozesse erfolgt zwar unter definierten und reproduzierbaren Randbedingungen, jedoch meistens in einem zeitlich verkürzten Rahmen bzw. unter verstärkten Einwirkungen. Die Schwierigkeit besteht im Ansatz der vorliegenden Einwirkungen und in der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf diese.

Über eine realitätsnahe Simulierung der biogenen Schwefelsäurekorrosion in einem klimatisierten Schadgasschrank wird in [Boc83] und [Boc84] berichtet. Die Prüfung diente im Wesentlichen zum Nachweis der durch Thiobacillen biogen gebildeten Schwefelsäure und deren korrosiver Wirkung auf zementgebundene Baustoffe.

Ergänzend wird in [Sey83] von einer Großversuchsanlage berichtet, bei welcher unter definierten Bedingungen der gesamte Korrosionsprozess unter Mitwirkung von Sielhaut, Fließgeschwindigkeit, Abwasserbeschaffenheit, Zusammensetzung und Temperatur sowie Feuchtigkeit der Kanalatmosphäre usw. nachvollziehbar wird.

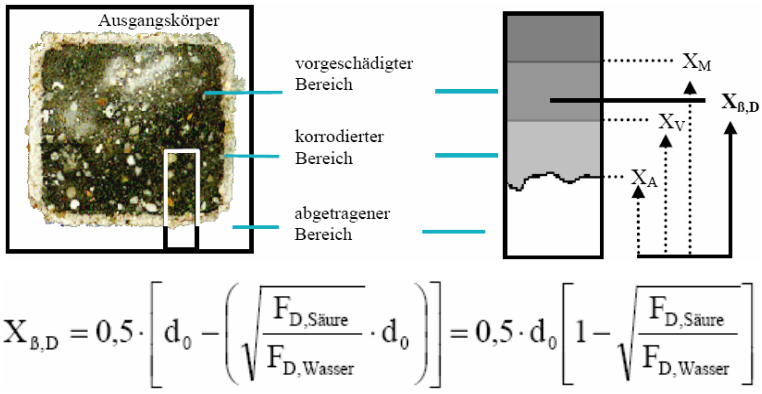
Es gibt weitere zahlreiche Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Baustoffen bei biogener Schwefelsäurekorrosion durch Lagerung in Bioreaktoren (vgl. [Hof97], [Ren01], [Käm03], [Mon01]) und zu Versuchsaufbauten, welche den natürlichen Prozess des Angriffes nachempfinden (vgl. [Wie83], [Liu01], [Bee01], [Mon01]). Dem Vorteil der authentischen Abbildung des Schadensprozesses durch Simulierung der natürlichen Prozesse im Abwasserbauwerk stehen lange Versuchszeiträume und oftmals begrenzte Probekörpergrößen gegenüber.

Die Einlagerung von Baustoffen in konzentrierten Säuren war in der Vergangenheit ([Kue66], [DIN511], [DIN511a]) und ist in der Gegenwart ([Ren99], [Xio01], [Vip02], [Vip02a], [ONB33], [DIN405], [ONB32]) eine gangbare und einfache Methode zur Beurteilung der Beständigkeit gegenüber einem chemischen Angriff. Ein Vorteil besteht vor allem durch kurze Prüfzeiten, einer nahezu unbeschränkten Probekörpergeometrie und -größe und dem verhältnismäßig einfachen Versuchsaufbau. Die Übertragbarkeit auf reale Einwirkungen ist im Einzelfall zu prüfen.

In [Fri93] wurde gezeigt, dass durch eine Säurebadlagerung reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können, welche unter Beachtung der Zeitrafferung mit denen einer Schadgasschranklagerung bezüglich der Restdruckfestigkeiten korrelieren. Somit sind sie mit den tatsächlichen Verhältnissen in Sielen vergleichbar. Die Einlagerung von Proben bei pH0 über 14 Tage entspricht hierbei einer Schadgasschrankauslagerung von rund einem Jahr.
Des Weiteren wurden zahlreiche Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von dem Säurebadlagerungsverfahren gemacht. Diese betreffen die Gewichtsabweichungen und den Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes, die mechanische Reinigung und die Säureerneuerung.

Die Säurebadlagerung ist heutzutage ein gebräuchliches Verfahren. Unter anderem entwickelte sich aus [Fra92] und [Fra92a] eine Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau [Fra97]. Die wesentlichen Bestimmungen der aktuellen Fassung [Fra01] sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

- In Säure- und Wasserbädern mit konstantem Oberflächen/Volumen-Verhältnis (O/V=20m^{-1}) lagern Probekörper (Mörtelprismen 4x4x8cm³).
- Durch laufende Titration mit Schwefelsäure wird über einen Zeitraum von 14 bzw. 70 Tagen ein konstanter pH-Wert von 0 bzw. 1 gehalten.
- Zur Erhaltung der Lösungskraft wird die Badlösung für die Lagerung bei pH1 wöchentlich getauscht.
- Nach der Einlagerung werden aus den Prismenhälften, entsprechend einer Ausgangsschlankheit von l/d=1, Würfel geschnitten und planparallel geschliffen.
- Als Prüf- bzw. Beurteilungsgröße wird das Verhältnis der Druckfestigkeiten von säure- und wassergelagerten Proben herangezogen. Aus dieser relativen Restdruckfestigkeit kann unter Beachtung der Geometrie eine äquivalente Korrosionstiefe $X_{ß,D}$ errechnet werden (Abbildung 5).
- Anhand der relativen Restdruckfestigkeit oder der äquivalenten Korrosionstiefe wird eine Klassifizierung der geprüften Materialien vorgenommen.



$$X_{ß,D} = 0{,}5 \cdot \left[d_0 - \left(\sqrt{\frac{F_{D,Säure}}{F_{D,Wasser}}} \cdot d_0 \right) \right] = 0{,}5 \cdot d_0 \left[1 - \sqrt{\frac{F_{D,Säure}}{F_{D,Wasser}}} \right]$$

Abbildung 5: Querschnitt eines Probekörpers nach Säurelagerung und Gleichung für die Berechnung der äquivalenten Korrosionstiefe, entnommen aus [Fra01]

Des Weiteren wurde nach einer geeigneten Methode gesucht, um die Dauerhaftigkeit von mit Paraffin applizierten Ziegelwerkstoffen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion abbilden zu können. Normierte Prüfverfahren wie [ONB32], [DIN405], [DIN511] und [DIN511a] sind ungeeignet, weil eine Temperierung des Prüfgutes stattfindet, welche über dem Schmelzpunkt des Paraffins liegt. Es kann jedoch festgehalten werden, dass auch bei diesem Verfahren mit einem schwefelsauren Medium geprüft wird. Der Angriff läuft hier jedoch über einen sehr kurzen Zeitraum und ist wesentlich intensiver.

In Hinblick auf die Reproduzierbarkeit und die nachgewiesene Vergleichbarkeit der zeitgerafferten Prüfung nach [Fra01] mit den tatsächlichen Verhältnissen bei biogener Schwefelsäurekorrosion, wurden alle Untersuchungen an mit Paraffin applizierten Baustoffen in Anlehnung an diese Richtlinie durchgeführt.

Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit erfolgt durch die Charakterisierung der Schädigungsprozesse und dem direkten Vergleich von unbehandelten und mit Paraffin behandelten Probekörpern nach den unter Pkt. 3.4.2. (Messgrößen) beschriebenen Ansätzen.

2.4 Einfluss der Karbonatisierung auf die Dauerhaftigkeit von Beton

2.4.1 Schadensursache

Der Karbonatisierungsprozess und daraus resultierende Schäden sind weitgehend bekannt. Die nachfolgende Darstellung der einzelnen Phasen der Karbonatisierung wird nach [Sta01] wiedergegeben:

1. Diffusion von CO_2 durch die Kapillarporen des Betons:

Der in der ersten Phase der Karbonatisierung stattfindende Stofftransport von CO_2 in die Poren des Zementsteins ist ein reiner Diffusionsprozess. Parallel dazu erfolgt das Lösen des kristallinen $Ca(OH)_2$ im Feuchtigkeitsfilm an der Porenwandung und dessen Dissoziation.

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ OH^-$$

2. Reaktion bzw. Lösen des CO_2 mit bzw. im Feuchtigkeitsfilm an der Porenwandung:

Das CO_2 löst sich im Wasserfilm der Porenoberfläche und reagiert zu einem sehr geringen Teil mit Wasser zu Kohlensäure (H_2CO_3), die in Wasser zu Wasserstoffionen und Carbonationen dissoziert. H_2CO_3 steht dabei mit den Carbonationen CO_3^{2-} im Gleichgewicht.

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow 2\ H^+ + CO_3^{2-}$$

3. Neutralisation von $Ca(OH)_2$ durch H_2CO_3

In der dritten Phase läuft die eigentliche Carbonatisierungsreaktion ab.

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2\ H_2O$$

$$Ca^{2+} + 2\ OH^- + 2\ H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 + 2\ H_2O \qquad \text{(nahezu unlöslich)}$$

Gleichzeitig carbonatisieren die Alkalihydroxide KOH und NaOH.

$$2\ NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$$

Die dabei entstehenden Alkalicarbonate reagieren allerdings sofort mit dem gelösten $Ca(OH)_2$ zu Calciumcarbonat und Alkalihydroxid:

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + NaOH \qquad \text{(Reaktion KOH vergleichbar)}$$

Das bedeutet, dass die Alkalihydroxide praktisch erst carbonatisieren, wenn sich kein $Ca(OH)_2$ mehr in der Porenlösung befindet. $Ca(OH)_2$ wird aber in der Porenlösung ständig nachgeliefert, da infolge der Carbonatisierung in der Porenlösung ein Mangel an $Ca(OH)_2$ entsteht und dieser Mangel dazu führt, dass die im Zementstein vorhandenen festen $Ca(OH)_2$-Kristalle (Portlandit) in Lösung gehen. Neben den Alkali- und Erdalkalihydraten können auch alle anderen Hydrate des Zementsteins carbonatisieren, wie z.B. die C-S-H-Phasen.

Der hohe pH-Wert der Porenlösung bleibt so lange erhalten, wie noch festes $Ca(OH)_2$ und Alkalien vorliegen.

Der sich bei der Karbonatisierung bildende Calcit (Kalkstein) hat zunächst keinen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten von Beton bzw. Zementstein. Ist die so genannte Carbonatisierung

(Neutralisierung) vollständig abgeschlossen, erhält der Zementstein eine höhere Dichtigkeit und eine bessere mechanische Festigkeit. Die Carbonatisierung hat also eine positive Auswirkung auf den Beton selbst [Reu01].

2.4.2 Schädigungsprozess

Nach [Kel91] sinkt im Verlauf des Karbonatisierungsvorganges der pH-Wert des ursprünglichen alkalischen Porenwassers von ca. 12,6 auf ca. 8,3. Dringt die Karbonatisierung bis zum Bewehrungsstahl vor, verliert dieser dadurch seinen alkalischen Schutz, wird depassiviert und dadurch einer möglichen Korrosion ausgesetzt.
Bei Zerstörung des Passivfilms wird der Bewehrungsstahl der Korrosion ausgesetzt, wobei es sich um einen elektrochemischen Prozess handelt, welcher in zwei Teilprozessen, einem Oxidations- und einem Reduktionsprozess, abläuft (vgl. Abbildung 6).

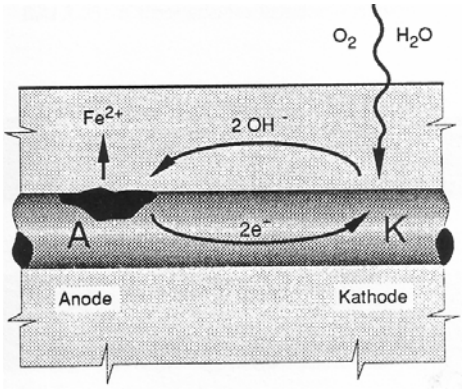


Abbildung 6: Prinzipdarstellung Galvanisches Element; entnommen aus [Kel91]

An der Anode findet der Oxidationsvorgang, die Eisenauflösung, statt:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}\ 2e^-$$

Die hierbei freigewordenen Elektronen e^- fließen zur Kathode und werden dort durch den Sauerstoff O_2 aufgenommen, der entsprechend reduziert wird:

$$H_2O + ½\ O_2 + 2e^- \rightarrow 2\ OH^-$$

Aus den Eisen- und Hydroxidionen (OH^-) bilden sich, je nach Feuchtigkeits- und Sauerstoffangebot, Rostprodukte verschiedenster Modifikation. Weil das Volumen des Rostes ein Mehrfaches des Ausgangsstoffes beträgt, ist die Betondeckung einem Druck ausgesetzt. Dies führt häufig zu Abplatzungen über dem korrodierenden Eisen.

Maßgebend für den Korrosionsschutz ist nach [Grü01] die Karbonatisierungstiefe und damit für die Schutzdauer die Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Diese Größen sind abhängig von:

- den Umweltbedingungen,
- der Betonzusammensetzung und
- der Nachbehandlung.

2.4.3 Beurteilung der Dauerhaftigkeit

Der Karbonatisierungsfortschritt gibt Auskunft über eine vorhandene oder die zu erwartende Schädigung. Die karbonatisierte Zone wird durch die Karbonatisierungstiefe beschrieben. Es handelt sich hierbei um jenen Bereich, in dem die Porenlösung einen pH-Wert <9 aufweist (vgl. Abbildung 7).

Zur Feststellung der Karbonatisierungstiefe werden in [Sta01] nachfolgende Verfahren angeführt:

- Indikative Bestimmung,
- Röntgendiffraktometrie,
- Infrarot-Spektroskopie,
- Mikroskopie,
- Differential-Thermoanalyse und
- chemische Analyse.

Die Indikative Bestimmung mittels Phenolphtaleintest wird im Bauwesen gerne zur einfachen in-situ Bestimmung von Karbonatisierungstiefen an Stahlbetontragwerken angewandt. Hierbei kommt es durch das Aufsprühen einer Indikatorlösung (=Phenolphtaleinlösung) an den frischen Bruchstellen zu einem Farbumschlag. Der karbonatisierte Bereich bleibt farblos, während sich der nicht karbonatisierte Bereich rot-violett verfärbt. Es kommt somit zu einem Farbumschlag der Indikatorlösung, ab einem pH-Wert der Porenlösung von ca. 9 (vgl. Abbildung 7).

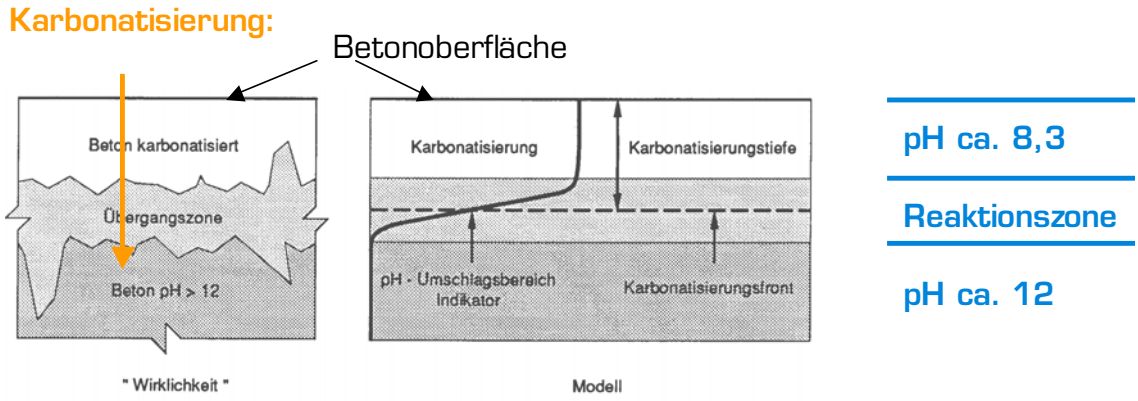


Abbildung 7: Prinzipdarstellung der Zonen bei der Karbonatisierung; nach [Kel91]

Nach [Kel91] sagt jedoch die mittels Indikatorverfahren ermittelte Grenze nichts über den Karbonatisierungszustand des Zementsteins aus. Die Karbonatisierung kann vollständig abgeschlossen sein, die Porenlösung jedoch immer noch eine alkalische Reaktion aufweisen. Die mittels Indikatorverfahren ermittelte Grenze sollte nicht als Karbonatisierungsfront sondern allgemein als Alkalitätsgrenze bezeichnet werden.

Der Fortschritt der Karbonatisierungstiefe kann nach [tud3w] bei gleich bleibenden Umweltbedingungen mit nachfolgender Gleichung bestimmt werden, wobei der Fortschritt proportional mit der Wurzel der Zeit ist:

$$c_k(t) = \alpha \cdot \sqrt{t} \qquad \text{(Gl. 1)}$$

$$\alpha = \frac{c_k(t_0)}{\sqrt{t_0}} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Dabei sind: $c_k(t)$ Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt t

α Faktor, welcher die Materialeigenschaften (w/z-Wert, Zementgehalt, Verdichtung, Nachbehandlung) und die Umweltbedingungen (Feuchtegehalt, CO_2 Konzentration) wiedergibt

t_0 Zeit von der Herstellung bis zum Betrachtungszeitpunkt

Bei bekannter Karbonatisierungstiefe und bei bekanntem Bauwerksalter kann das Fortschreiten für spätere Zeitpunkte ermittelt werden. Es muss berücksichtigt werden, dass die Karbonatisierungsfront praktisch einem Endwert zustrebt.

Weil die Karbonatisierung ein diffusionskontrollierter Prozess ist, sind unter normalen Umweltbedingungen oder im Labor lange Versuchszeiten erforderlich, um einen entsprechenden Fortschritt zu messen.

Eine Möglichkeit den Karbonatisierungsprozess zu beschleunigen wird in [Sta95] angeführt. Es handelt sich hierbei um ein Laborverfahren, der so genannten Druckkarbonatisierung. Mit Konzentrationen V_{CO2} von 80 bis 90 Vol.-% und Drücken von p_{CO2} von 8 bar wird der Karbonatisierungsprozess beschleunigt. Zur Bindung des entstehenden Wassers wird als Trockenmittel Kieselgel eingesetzt. Allgemein wird davon ausgegangen, dass bis 1 Vol.-% der Karbonatisierungsprozess nur beschleunigt und nicht verzögert wird. Bei reinem CO_2 wird der Mechanismus verändert, sodass eine Übertragung auf praktische Verhältnisse sehr problematisch wird.

In [Roy99] wird ein Versuchsaufbau zur Beschleunigung der Karbonatisierung verwendet. Hierbei wird in einem gasdichten Behälter ein Gasgemisch mit erhöhter CO_2-Konzentration (6,0 Vol.-%) unter einem maximalen Druck von 30psi (entspricht 2,07 bar) eingebracht. Um die Auswirkungen der Luftfeuchtigkeit abbilden zu können, werden Salzlösungen zur Einstellung von bestimmten rel. Luftfeuchtigkeiten in den Probenbehälter gestellt. Die Bestimmung der Karbonatisierungstiefen erfolgt mit dem Phenolphtaleintest.

Ein ähnlicher Versuchsaufbau ist in [Ati02] gegeben. Der Versuchsaufbau ist so konzipiert, dass ein Gasgemisch mit bekannter CO_2-Konzentration (5,0 Vol.-%), unter kontrollierter Druckaufbringung und bei geregelter relativer Feuchte durch einen gasdichten Probenbehälter zirkuliert. Die Klimabedingungen innerhalb der Versuchseinheit wurden auf 20°C und 65±5% r.

F. gehalten. Eine Kühlfalle dient zur Entfeuchtung. Die Karbonatisierungstiefen wurden mit Hilfe einer Indikatorlösung (Phenolphtaleinlösung) festgestellt.

In Hinblick auf verkürzte Prüfzeiträume und wegen der Einfachheit, wird zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton gegenüber Karbonatisierung die Druckkarbonatisierung als Verfahren und der Phenolphtaleintest zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefen herangezogen.

3 Einfluss der biogenen Schwefelsäurekorrosion auf mit Paraffin applizierte Baustoffe

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von mit Paraffin applizierten Baustoffen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion wurde, wie in Pkt. 2.3.5 beschrieben, in Anlehnung an [Fra97] festgelegt und ist nachfolgend dargestellt (Abbildung 8).

Für die Einlagerungsversuche aller Materialien wurden die Randbedingungen in Anlehnung an [Fra01] gewählt. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst (Tabelle 3).

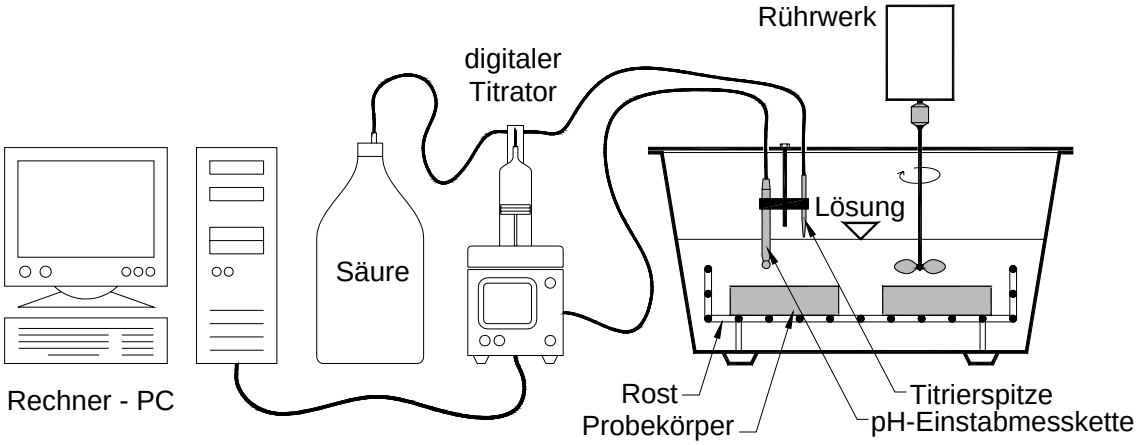


Abbildung 8: gewählter Versuchsaufbau für die Bestimmung der Dauerhaftigkeit von behandelten Baustoffen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion

Randbedingung:	pH-Wert der Lösung pH 0	pH 1	Anmerkung:
Vorlagerung im Wasserbad	ca. 2 Tage		-
Einlagerungsdauer in der Lösung	14 Tage	70 Tage	konst. pH-Werte durch kontinuierliche pH-stat Titration
Titriermittel	Schwefelsäure konz. 96%		chem. Formel: H_2SO_4
Verhältnis von Probenoberfläche zu Lösungsvolumen	O/V=20m^{-1}		gemeinsam dargestellte Ergebnisse beruhen auf einer gemeinsamen Lagerung
Raumklima im Versuchsraum: Temperatur, rel. Feuchte	Laborklima		vgl. Abbildung 60, Anhang S. 114
Austausch der Lösung, Erneuerung der Badlösung	-	1x wöchentlich	zur Erhaltung des Lösungsvermögens
Messintervalle	3 - 4 Tage	1x wöchentlich	Proben vor der Messung gleichmäßig mit Wasser abgespült
Messdauer Lagerung	ca. 2 Stunden im Wasserbad (O/V ca. 20m^{-1})		einzelne Entnahme der Probekörper für die Messungen

Tabelle 3: Zusammenfassung der wesentlichen Randbedingungen für die Säureeinlagerungsversuche in Lösungen mit den pH-Werten 0 und 1

3.2 Materialien

Nachfolgend beschriebene Materialien wurden den Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von mit Paraffin applizierten Baustoffen bei biogener Schwefelsäurekorrosion zu Grunde gelegt. Hierbei kamen unter anderem mineralisch gebundene Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Porositäten zum Einsatz.

Der trockene Zementstein im Beton ist i. d. R. poröser als der Zuschlag, sodass die Rohdichte auch vom Mischungsverhältnis der dichten Zuschlagstoffe zum Zement abhängt. Wegen des sinkenden Zementsteinanteils nimmt deshalb die Porosität in der Reihenfolge Zementpaste - Mörtel - Beton ab [Sta99].

Des Weiteren wurden Ziegelwerkstoffe verwendet, die sich neben den Materialeigenschaften in ihren Porositäten unterscheiden.

3.2.1 Beton

Neben selbst hergestelltem Beton wurden Probekörper aus industriell vorgefertigten Schachtringen geschnitten. Die Betone weisen unterschiedliche Qualitäten auf und können den Expositionsklassen XA1 bzw. XA2 nach EN 206-1 zugeordnet werden.

In der nachfolgenden Tabelle 4 und in Tabelle 5 sind die wesentlichen Bestandteile, Zusammensetzungen und Eigenschaften der Betone beschrieben.

Bezeichnung:	Beton XA1 [XA1]	Beton XA2 [XA2]
Bindemittel nach EN 197-1[2]	CEM II/A-M 42,5 N (S-V-L)	CEM I 32,5 R C3Afrei/HS C3A-frei
Zuschlag 0-4mm[3]	80% quarzhaltig; 92 M-% < 4mm	
Zuschlag >4mm bis GK	80% quarzhaltig; 8 M-% ≥ 4mm, GK < 8mm	
Mischungsverhältnisse (Zement/Zuschlag feucht)	1:3,5 (Gew.-T.)	1:2,75 (Gew.-T.)
W/Z bzw. W/B-Werte	0,60	0,50
Konsistenzklasse[4]	F3/F45	F3/F45
Druckfestigkeitsklasse[5]	C30/37	C35/45
Expositionsklasse nach ÖN B4710-1 [ONB47] und DIN 1045-2 [DIN104]	XA1	XA2

Tabelle 4: Bezeichnung, Eigenschaften und Zusammensetzung der Bestandteile, Frisch- und Festbetoneigenschaften der hergestellten Betone sowie Zuordnung zur entsprechenden Expositionsklasse

[2] Eigenschaften Bindemittel siehe Anhang S. 113, Tabelle 29
[3] Sieblinie siehe Anhang S. 113, Abbildung 58
[4] Geprüft nach Norm ON B3303 [ONB33] bzw. ÖNORM EN 12350-5 [ONE12a]
[5] Geprüft nach Norm ON B3303 [ONB33] bzw. ÖNORM EN 12390-3 [ONE12b]

Bezeichnung:	Schachtring [SR3]	Schachtring [SR4]
Bindemittel nach EN 197-1	CEM II A-S	CEM I C_3A-frei
Zuschlag 0-4mm	kalk- und quarzhaltig	
Zuschlag >4mm bis GK	Dolomit, GK 12mm	Dolomit, GK 16mm
Gütebezeichnung nach ÖN B4200-10 [ONB42]	B300/WU	B400/WU/HS/TS
Äquivalente Expositionsklasse nach ÖN B4710-1 [ONB47]	XA1	XA2

Tabelle 5: Bezeichnung und Zusammensetzung und Güte- bzw. Expositionsklasse der verwendeten Schachtringe lt. Hersteller

Die Herstellungsschritte der Betone (Nachbehandlung, Lagerungsbedingungen) sind in der nachstehenden Tabelle 6 beschrieben.

Bezeichnung:	Schachtringe [SR3] und [SR4]	Betone [XA1] und [XA2]
Herstellung	Herausschneiden der Probekörper aus Schachtringen ab Betonwerk	Mischungen lt. Tabelle 4
Nach-behandlung	-	Verdichten am Rütteltisch Abdecken der Schalung
Lagerung	Lagerung bei Laborklima 21 Tage bei 20°C und 95% r. F	1 Tag in Schalung / Laborklima 6 Tage im Wasserbad / Laborklima 21 Tage bei 20°C und 95% r. F

Tabelle 6: Herstellungsschritte, Nachbehandlung und Lagerungsbedingungen der Betone

3.2.2 Mörtel

Bei den verwendeten Mörteln handelt es sich einerseits um Mörtel, die für die Anwendung im Siedlungswasserbau einsetzbar sind und andererseits um Kalk- bzw. Kalkzementmörtel für andere Einsatzgebiete (Tabelle 7).

Bezeichnung:	Sielbaumörtel [SM]	Referenzmörtel [RM]	Kalkmörtel [KM]	Kalkzement-mörtel [KZM]
Anwendungs-gebiet:	Siedlungs-wasserbau; Mauermörtel nach DIN 4034-10 [DIN403]	Siedlungs-wasserbau; Referenzmörtel nach [Fra01]	Mauermörtel für Bauten ohne besondere Beanspruchung; vgl. historisches Mauerwerk	Mauermörtel für Bauten ohne besondere Beanspruchung;

Tabelle 7: Übersicht zu den verwendeten Mörteln und deren Anwendungsgebiet

In der nachfolgenden Tabelle 8 und in Tabelle 9 sind die wesentlichen Bestandteile, die Zusammensetzungen und Eigenschaften, sowie die Herstellung der Sielbaumörtel beschrieben.

Die Zusammensetzungen, die Herstellung und die Eigenschaften der verwendeten Kalk- und Kalkzementmörtel sind in [Hau02] und [Vol03] ausführlich beschrieben. In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die wesentlichen Merkmale tabellarisch zusammengefasst.

Bezeichnung:	Sielbaumörtel [SM]	Referenzmörtel [RM]
Bindemittel nach EN 197-1[6]	CEM I 32,5 R HS C3A-frei	CEM I 42,5 R HS C3A-frei
Zuschlag 0-2mm	Quarz GK < 4mm[7]	Quarz CEN-Referenzsand[8]
Mischungsverhältnisse (Zement/Zuschlag)	1:4 (Vol.-T.)	1:3 (Gew.-T.)
W/Z bzw. W/B-Werte	0,80	0,45

Tabelle 8: Zusammensetzung der Bestandteile von Mörteln für den Einsatz im Siedlungswasserbau

Bezeichnung:	Sielbaumörtel [SM]	Referenzmörtel [RM]
Herstellung	Mischungen lt. Tabelle 8 2-lagige Einbringung und Stampfen der Schichten	Mischungen lt. Tabelle 8 Herstellung gem. DIN EN 196-1 [EN196]
Nach-behandlung	Verdichten am Rütteltisch Abdecken der Schalung	Nachbehandlung gem. DIN EN 196-1 [EN196]
Lagerung	1 Tag in Schalung / Laborklima 6 Tage im Wasserbad / Laborklima 21 Tage bei 20°C und 95% r. F	

Tabelle 9: Herstellungsschritte, Nachbehandlung und Lagerungsbedingungen des Sielbau- und des Referenzmörtels

Zusammensetzung und Eigenschaften der Mörtel	Kalkmörtel [KM]	Kalkzement-mörtel [KM]	Einheit:	Quelle:
Zement: PZ 275 (K)	-	7,0	Vol.-%	[Vol03]
Kalk: Spezialkalk, Weißkalkhydrat lt. ÖN B 3324-1	20,5	15,0	Vol.-%	
Zuschlag: Dolomitsand Körnung 0/4	61,5	60,0	Vol.-%	
Wasser	18	18,0	Vol.-%	
Rohdichte	1900 – 1950	1900 - 2000	kg / m³	[Vol03]
E-Modul	80 – 100	700 - 900	N / mm²	[Hau02]
Druckfestigkeit	0,8 – 1,0	4,5 - 5,5	N / mm²	

Tabelle 10: Zusammensetzung und Eigenschaften der verwendeten Mörtel von anderen Anwendungsgebieten

[6] Eigenschaften Bindemittel siehe Anhang S. 113, Tabelle 29
[7] Sieblinie siehe Anhang S. 114, Abbildung 59
[8] Sieblinie siehe Anhang S. 113, Tabelle 30

3.2.3 Ziegel

Neben einem Kanalklinker, welcher für eine Anwendung im Siedlungswasserbau gedacht ist, wurde zum Vergleich ein Ziegelmaterial verwendet, welches anderen Einsatzgebieten zugeordnet werden kann. In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Materialien beschrieben und deren Eigenschaften angegeben (Tabelle 11).

Verwendung und Eigenschaften der Ziegel	Kanalklinker [KAK]	Normalformatziegel [WBZ]	Einheit
Anwendungsgebiete	Siedlungswasserbau; Kanalklinker nach DIN 4051	Normalformat-Mauerziegel für Vollziegelmauerwerk nach ÖN B3200	
Ausgangsgröße der Ziegel	240x115x71	280x140x70	mm
Rohdichte	2100 - 2200	1550 - 1650	kg / m³
E-Modul	-	1500 - 1800	N / mm²
Druckfestigkeit	45 - 55	35 - 45	N / mm²

Tabelle 11: Anwendungsgebiete und Eigenschaften bzw. Kennwerte der verwendeten Ziegelmaterialien

3.3 Applikationen

Neben den unbehandelten Grundmaterialien wurden mit Paraffin unterschiedlich applizierte Proben hergestellt und untersucht. Die einzelnen Applikationen sind nachfolgend entsprechend ihrer Ausführung beschrieben. Eine detaillierte Zusammenstellung der Applikationsabläufe wird bei den jeweiligen Versuchen wiedergegeben, da diese variiert wurden.

3.3.1 Paraffin-Applikationen

Das für die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit verwendete Paraffin kann gemäß [Ull96] als makrokristallines Paraffin bezeichnet werden (Abbildung 9).

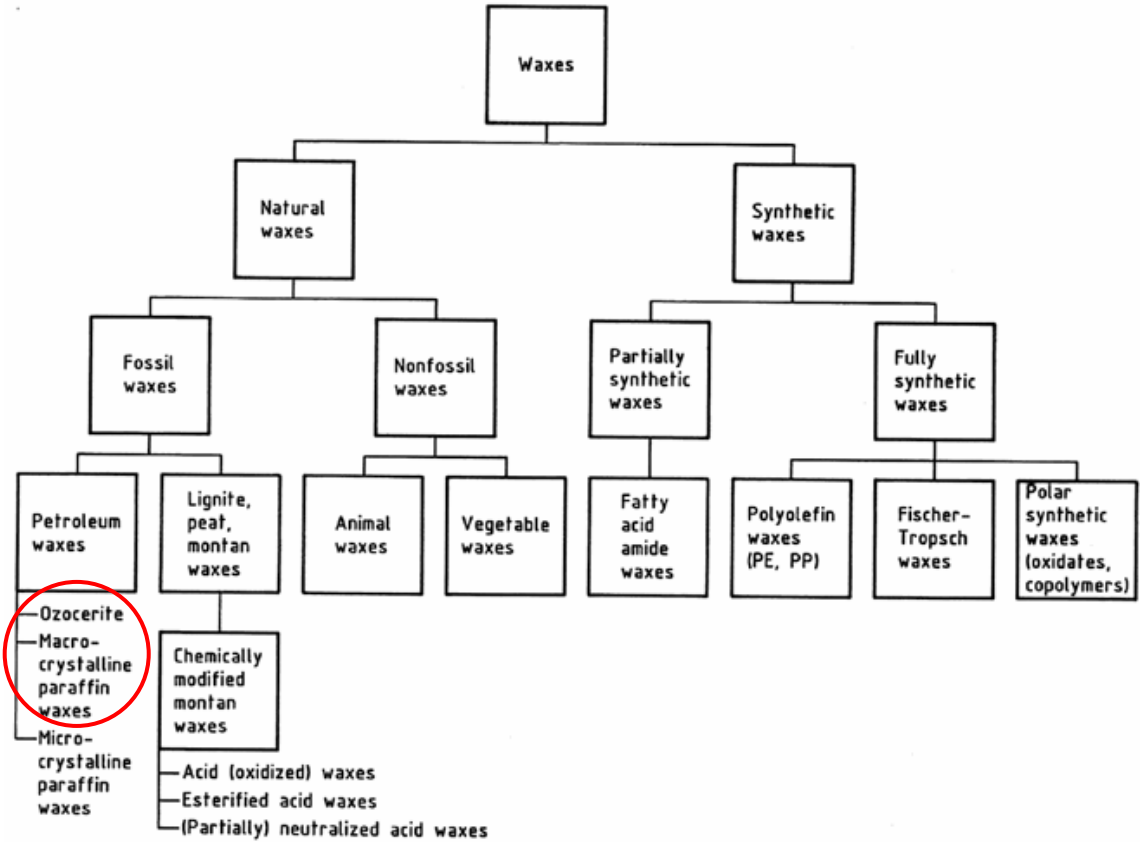


Abbildung 9: Einteilung von Wachsen; entnommen aus [Ull96]

Nach [Mat02] sind makro- und mikrokristalline Paraffine komplex zusammengesetzte Gemische von Kohlenwasserstoffen, wobei bei den makrokristallinen Paraffinen die n-Alkane im C-Zahlbereich von 20 bis 35 überwiegen.

Das verwendete makrokristalline Paraffin wurde auf Basis von Erdöl hergestellt. Die Rohstoffbasis für die Erzeugung sind die bei der Herstellung von Schmierölen aus Erdölvakuumdestillaten und -rückständen im Prozess der Entparaffinierung anfallenden so genannten Gatschen. Dies sind Gemische von überwiegend gesättigten Kohlenwasserstoffen mit höheren Schmelztemperaturen, die entsprechend der Schmieröltechnologie in verschiedenen

Siedelagen anfallen und sich zudem im Anteil niedrig schmelzender Komponenten (Ölgehalt) unterscheiden. Spezifische Kennwerte des verwendeten makrokristallinen Paraffins sind in der nachfolgenden Tabelle 12 angegeben.

Eigenschaft:		Einheit:	Bestimmung nach Norm:
Erstarrungspunkt	58 – 60	°C	DIN ISO 2207
Ölgehalt	0,0 - 0,5	Gew.-%	DIN-ISO 2908
Penetration bei 25°C	15 - 19	1/10 mm	DIN 51579
Farbe	+29 / +30	Saybolt	DIN 51411

Tabelle 12: Kennwerte des verwendeten Paraffins; entnommen aus [Sch97]

3.3.1.1 Paraffinpulver

Im Zuge der Mörtel- bzw. Betonherstellung ist dem Zuschlag Paraffinpulver (3,0 M.-% bezogen auf die Frischbeton- bzw. Mörtelmasse) beigemengt worden. Nach dem Aushärten der Probekörper (28d) wurden diese vor der Einlagerung in das Säurebad thermisch behandelt (3d / 80°C). Es kommt dadurch zu einem Aufschmelzen und einer kapillaren Verteilung des Paraffins.

3.3.1.2 Paraffin-Penetration

Die nachbehandelten Mörtel- und Betonproben sowie die Schachtringproben wurden nach Vorlagerung bei unterschiedlichen Temperaturen für unterschiedliche Zeitspannen im Paraffinbad gelagert. In Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes, der Temperatur und der Einlagerungsdauer weisen die Proben unterschiedliche Porenfüllgrade auf.
Die einzelnen Applikationsvorgänge sind mit den gewählten Randbedingungen bei den jeweiligen Versuchen beschrieben.

3.3.1.3 Beschichtung mit Paraffin (Paraffin-Coating)

Die Applikation Paraffin-Coating wird durch einen kurzen Tauchvorgang der Proben im Paraffin nach zuvor erfolgter Paraffinpenetration erreicht. Die Herstellung des Paraffin-Coatings kann folgendermaßen beschrieben werden:

- Penetration der Proben durch kurze Lagerung im Paraffinbad,
- Auskühlen der Proben und Erstarren des Paraffins, von der Oberfläche aus beginnend nach innen und
- einem kurzen abschließenden Tauchvorgang.

Beim Tauchvorgang im Paraffinbad kommt es an der Oberfläche der Proben gleichzeitig zu einem Erstarren des umgebenden Paraffins und zu einem Anschmelzen des bereits erstarrten Paraffins, im oberflächennahen Bereich. Die durch den Tauchvorgang erzielte Schutzschicht ist

praktisch geschlossen und durch die Vorpenetration wird ein guter Haftverbund erzielt. In Abhängigkeit der Probekörpergeometrie, der Material- und Wachseigenschaften sowie der gewählten Temperatur, gibt es eine ideale zeitliche Abfolge, um eine dichte Beschichtung mit einem guten Haftverbund zu erzielen.
Ein für die Applikation der Probekörper zweckmäßiges, geometrieabhängiges Temperatur-Zeit Regime ist in Vorversuchen ermittelt worden (vgl. Pkt. 3.5.2). Die Applikation erfolgte, wie bei den anderen Proben, frühestens 28 Tage nach der Herstellung.
Die Schichtdicke der Schutzschicht ist >0,1mm. Auf Grund dieser Stärke ist die Schutzschicht nach [EN150] als Beschichtung zu bezeichnen. Das Paraffin-Coating ist somit eine Mischform aus Paraffinpenetration und Beschichtung.

3.3.2 PUR-Beschichtung

Auf die Oberflächen der Probekörper wurde nach frühestens 28 Tagen eine zwei-komponentige, zäh-elastische, chemisch beständige Polyurethanbeschichtung (siehe Tabelle 13) aufgebracht. Dabei ist eine zweite Schicht auf die härtende erste Schicht aufgestrichen worden um einen besseren Porenverschluss zu gewährleisten. Diese Beschichtung dient vor allem dem Vergleich zum Paraffin-Coating.

Eigenschaft:		Einheit:
Dichte (Mischung)	1,11	g/cm³
Viskosität	ca. 3500	mPas
Verarbeitungszeit	ca. 30	Minuten
volle Belastbarkeit	5	Tage

Tabelle 13: technische Eigenschaften der 2-Komponenten Polyurethanbeschichtung

3.3.3 Injektionsstoffe

Aus vergangenen Arbeiten ([Hau02] und [Vol03]) liegen Kalk- und Kalkzementmörtelproben vor, welche mit Paraffin und anderen Injektionsstoffen (Silikon-Mikroemulsion und Wasserglas) penetriert wurden. Ziel von Einlagerungsversuchen war es, die Auswirkungen einer Paraffinpenetration auf diese, dem Beton werkstofftechnisch ähnliche, Materialien zu untersuchen. Des Weiteren wurde die Paraffin-Applikation mit anderen Injektions- bzw. Behandlungsstoffen verglichen.
Die Behandlung der Proben wurde im Zuge der zuvor genannten Arbeiten vorgenommen. Sie sind dort hinreichend beschrieben und nachfolgend kurz zusammengefasst.

3.3.3.1 Silicon-Mikroemulsion

Bei der Silicon-Mikroemulsion handelt es sich um einen Injektionsstoff mit hydrophobierender Wirkung.
Hierbei wurden die Proben mittels Exsikkator im Unterdruckverfahren weitgehend bis zum Kern penetriert und hinterher bei Raumklima getrocknet. Die Proben waren bei der Applikation zur Gänze mit Silicon-Mikroemulsion bedeckt.

3.3.3.2 Wasserglas

Wasserglas wird unter anderem als Injektionsstoff verwendet und hat eine kapillarverengende Wirkung. Wie bei der Silicon-Mikroemulsion wurde die Applikation in den zuvor angeführten Arbeiten vorgenommen.
Die Penetration der Proben mit dem Wasserglas erfolgte wie bei der Silicon-Mikroemulsion mittels Exsikkator im Unterdruckverfahren voll bedeckt. Danach trockneten die Mörtelprismen bei Laborklima.

3.4 Probekörper, Messgrößen und Methodik

Bei den im Zuge der Untersuchungen erfassten Messgrößen handelt es sich einerseits um zerstörende und andererseits um zerstörungsfreie Prüfmethoden. Letztere haben den Vorteil, dass sie Aufschlüsse über den Schädigungsverlauf geben und der Charakterisierung des Schädigungsprozesses dienen. Nachfolgend sind neben den verwendeten Probekörpern die erfassten Messgrößen und die gewählte Methodik beschrieben.

3.4.1 Probekörper

Bei den Probekörpern wurde für die Säurelagerung eine Geometrie von 4x4x16cm³ gewählt. Dies gilt für die selbst hergestellten Materialien, als auch für solche, die aus fertigen Grundmaterialien herausgeschnitten wurden (vgl. Abbildung 10).
Bei einzelnen Versuchen wurden Probekörper mit den Abmessungen von ca. 8x6x3cm³ verwendet.

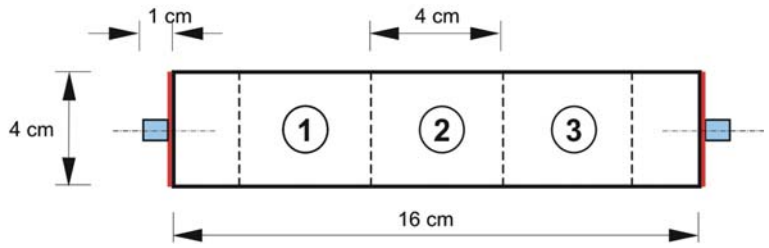


Abbildung 10: Probekörpergeometrie und Ausführung der mit Epoxidharz beschichteten Stirnseiten mit aufgeklebten Glasstäben für die Längen- und Ultraschalllaufzeitmessung

3.4.2 Messgrößen

Die Erfassung der Messgrößen erfolgte in einem klimatisierten Labor (23°C und 50% r.F.) nach der Entnahme der Probekörper aus dem Säurebad, während des wöchentlichen Säurebadwechsels oder zu den jeweiligen Messzeitpunkten. In diesem Messzeitraum lagerten die Probekörper in einem Wasserbad, zuvor wurden sie durch einen Spülvorgang von der locker anhaftenden Gipsschicht befreit (vgl. Tabelle 3).

3.4.2.1 Massenänderung

Für Baustoffe mit kleinen Korrosionszonen (Betone und Mörtel mit niedrigen W/Z-Werten und dichtem Gefüge) ist die Änderung der Masse ein geeignetes Maß zur Charakterisierung des Schädigungsverlaufes und zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit [Fra99]. Das Verhalten von Betonen und insbesondere von Mörteln mit stark porösem Gefüge, welche sich durch die Bildung von größeren Korrosionszonen auszeichnen, kann durch eine alleinige Beurteilung der Massenänderung nicht treffend beschrieben werden.

Durch die Aufnahme der Lösung und der Reaktion der verschiedenen Baustoffphasen mit dem sauren Medium kommt es zu einer kontinuierlichen Änderung der Masse der Probekörper, welche aufgezeichnet wurde. Die Aufnahme der Lösung sowie die Bildung von Gipsphasen als Korrosionsprodukt bedeuten einerseits einen Massenzuwachs, der stark lösende Angriff mit dem einhergehenden Materialabtrag bewirkt andererseits einen Massenverlust. Diese Umstände müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt bzw. korrigiert werden (vgl. 3.4.3, Gl. 6).

3.4.2.2 Querschnittsabmessungen

Durch eine kontinuierliche Bestimmung der Querschnittsabmessungen wird ebenfalls der Korrosionsfortschritt charakterisiert. Durch den Spülvorgang mit Wasser vor den jeweiligen Messungen (vgl. Tabelle 3) wird die gipshaltige amorphe Schicht (Zone IVb nach Abbildung 4) überwiegend entfernt. Zu beachten ist, dass sich die Abmessungen auf die Oberfläche der bereits zerstörten, kieselsäure- und gipshältigen Schicht und nicht auf die Korrosionsfront beziehen (vgl. Abbildung 4).
Die Querschnittsabmessungen wurden mittels Schublehre auf 100µm genau erfasst. Durch Mittelwertbildung (6 Einzelwerte per Abmessung) wurden die Streuungen, vor allem bei den Mörteln und den Betonen durch die Unregelmäßigkeiten des hinausragenden Zuschlags, berücksichtigt. An den beschichteten Probekörpern wurden keine Messungen durchgeführt.

3.4.2.3 Längenänderung

Die Bestimmung der Längenänderung an den Ziegelmaterialien erfolgte analog zu der oben beschriebenen Bestimmung der Querschnittsabmessungen.
Die Messung für die Mörtel und Betone erfolgte auf 10µm genau mit einem Messtaster der Firma Käfer. Um Fehler des Längenmesssystems zu korrigieren wurde dieses mit einem Quarzglasstab vor jeder Messung kalibriert. Die Erfassung der Längenänderung erfolgte für die Mörtel und Betone durch das Abtasten der an den Kopfenden aufgeklebten Glaselemente der Probekörper (vgl. Abbildung 10). Durch Lagerung in einer Haltevorrichtung wurden bei jeder Messung die gleichen Anschlagpunkte abgetastet.

3.4.2.4 Druckfestigkeit

Durch die Reduktion des Querschnittes zufolge Korrosion, kommt es zu einer Abnahme der maximalen Bruchlast gegenüber ungeschädigten, wassergelagerten Proben (vgl. 2.3.5 und. 3.4.3). Die Bestimmung der Druckfestigkeiten erfolgte ausschließlich am jeweiligen Ende der Versuchsdauer, nach vorangegangener Laborlagerung (mind. 2 Tage), unter nachfolgenden Randbedingungen:

- Prüfmaschine: Firma Zwick, Type Z250,

- Vorkraft: 100 N mit 50 mm/min., keine Haltezeit,
- Prüfgeschwindigkeit: kraftgeregelt mit 1000 N/s für Beton und Mörtel (erfüllt [EN196], [ONB33] und [ONE12b]) und 700 N/s für Ziegel (erfüllt [ONB32a]),
- Probekörper-Geometrien: Schlankheit L/d=1 (bezogen auf Ausgangsquerschnitt, vgl. Abbildung 10) und
- Probekörper-Präparation: Probekörper planparallel geschnitten, nicht geschliffen (ggf. daraus resultierende Ungenauigkeiten wurden wegen der hohen Probenanzahl in Kauf genommen).

3.4.2.5 Ultraschall-Laufzeitmessungen

Die Bestimmung der Ultraschalllaufzeiten wurde mit dem Ultraschallgerät TICO der Firma proceq durchgeführt, welches mit Schallköpfen für eine Frequenz von f=54 kHz ausgestattet ist. Eine Kopplung des Schallgebers und des Schallempfängers mit den Probekörpern erfolgte über die aufgeklebten Glaselemente der Probekörper nach dem in Abbildung 11 dargestellten Messprinzip. Die Messung erfolgte auf 0,1µs genau. Es wurden jedoch nur ausgewählte Materialien betrachtet, bei welchen es infolge von Säurelagerung zur Ausbildung von großen Korrosionszonen kommt. Durch die Änderungen der Laufzeiten sollte der Verlauf der Schädigung charakterisiert werden.

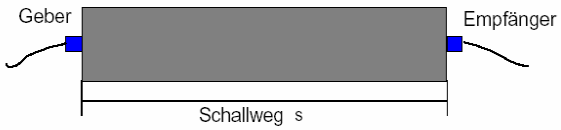


Abbildung 11: Messprinzip Ultraschall-Laufzeitmessung [Bol00]

3.4.2.6 Phenolphtaleintest

Die Auswertung mit dem Phenolphtaleintest erfolgte nur für die Kalk- und Kalkzementmörtelproben und ausschließlich qualitativ. Er wurde dazu verwendet, um das Auslaugungsverhalten (Herauslösen alkalischer Bestandteile durch den stark lösenden Angriff der Schwefelsäure) von behandelten und unbehandelten Proben sichtbar zu machen.

Der Phenolphtaleintest ist für die Ziegelbaustoffe nicht anwendbar. Auf die quantitative Bestimmung von Auslaugungstiefen der mineralisch gebundenen Materialien wurde zu Gunsten der Druckfestigkeitsprüfung weitgehend verzichtet. Zudem sind die Korrosionszonen der Betone sehr klein und dadurch mit dem Indikatortest schwer erfassbar.

Die Porenlösungen der Kalkzementmörtel und der Kalkmörtel weisen auf Grund Ihrer Zusammensetzung (u. a. hoher Anteil an Kalkhydrat) eine hohe Alkalität auf. Es kommt ab einem pH-Wert von ca. 9 zu einem Farbumschlag der Indikatorlösung.

Bei den mit Paraffin penetrierten Proben findet der Farbumschlag etwas verzögert und teilweise weniger intensiv statt. Es ist davon auszugehen, dass dieses durch die Porenverstopfung des Paraffins hervorgerufen wird. Die Anwendung einer Indikatorlösung im Mischverhältnis 0,33 M-% Phenolphtalein (Indikator pH 8,2-9,8) zu 99,66 M-% Ethanol (96 %ig) hat sich als günstig erwiesen.

3.4.3 Methodik

In Anlehnung an [Gra95] wurden mit den Messwerten der zuvor angeführten Messgrößen (Massenänderungen, Querschnittsabmessungen, Längenänderungen und Druckfestigkeiten) äquivalente Korrosionstiefen ermittelt. Diese repräsentieren den Verlauf der Schädigung, wie im nachfolgenden Schema dargestellt (Abbildung 12). Daraus wurden weiters Korrosionsraten ermittelt.

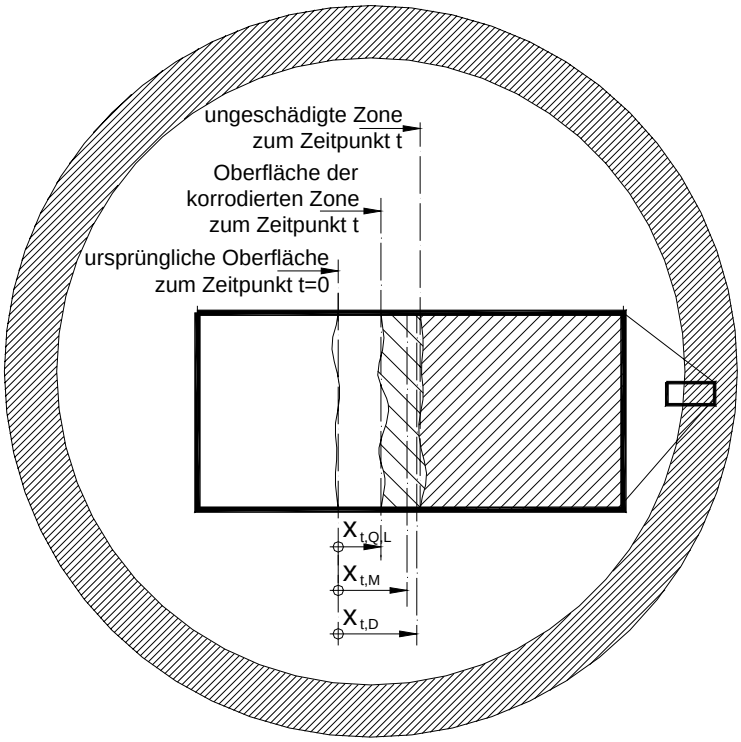


Abbildung 12: Darstellung der äquivalenten Korrosionstiefen am Beispiel eines Schachtbauwerkes; ohne Maßstab

Anmerkung: **$x_{t,Q,L}$ äquivalente Korrosionstiefe, berechnet aus der Querschnitts- bzw. Längenänderung**
$x_{t,M}$ äquivalente Korrosionstiefe, berechnet aus der Massenänderung
$x_{t,D}$ äquivalente Korrosionstiefe, berechnet aus den Druckfestigkeiten

Äquivalente Korrosionstiefe errechnet aus der Massenänderung:

Für die Dichte des ungeschädigten Querschnittes gilt:

$$\rho_t = \rho_{t=0} \quad \text{(Gl. 3)}$$

$$\rho_{t=0} = \frac{m_{t=0}}{V_{t=0}} = \frac{m_{t=0}}{a_{t=0} \cdot b_{t=0} \cdot l_{t=0}} \quad \text{(Gl. 4)}$$

$$\rho_t = \frac{m_{t,k}}{V_t} = \frac{m_{t,k}}{(a_{t=0} - 2 \cdot x_{t,M}) \cdot (b_{t=0} - 2 \cdot x_{t,M}) \cdot l_t} \quad \text{(Gl. 5)}$$

$$m_{t,k} = \frac{m_t}{f_{wt}} \quad \text{(Gl. 6)}$$

Die Lösung der quadratischen Gleichung ergibt die äquivalente Korrosionstiefe für den jeweiligen Zeitpunkt.

Dabei sind:

- ρ_t Rohdichte
- m_t Masse der Proben zum Zeitpunkt t
- V_t Volumen, berechnet aus den Abmessungen a_t, b_t und l_t
- f_{wt} an wassergelagerten Proben bestimmter Korrekturfaktor, welcher die zeitliche Massenzunahme wiedergibt
- $m_{t,k}$ um die Aufnahme von Wasser bzw. Lösung korrigierte Masse zum Zeitpunkt t
- $x_{t,M}$ äquivalente Korrosionstiefe zum Zeitpunkt t errechnet aus der Massenänderung

<u>Äquivalente Korrosionstiefe errechnet aus der Querschnittsänderung:</u>

Die Restquerschnittsfläche zum jeweiligen Zeitpunkt ergibt sich durch die äußeren Abmessungen zu diesem Zeitpunkt:

$$A_t = a_t \cdot b_t \quad \text{(Gl. 7)}$$

$$a_t = a_{t=0} - 2 \cdot x_{t,Q} \quad \text{(Gl. 8)}$$

$$b_t = b_{t=0} - 2 \cdot x_{t,Q} \quad \text{(Gl. 9)}$$

$$a_t \cdot b_t = (a_{t=0} - 2 \cdot x_{t,Q}) \cdot (b_{t=0} - 2 \cdot x_{t,Q}) \quad \text{(Gl. 10)}$$

Die Lösung der quadratischen Gleichung ergibt die äquivalente Korrosionstiefe für den jeweiligen Zeitpunkt.

Dabei sind:

- A_t Restquerschnitt zum Zeitpunkt t, errechnet aus den Abmessungen a_t u. b_t
- $x_{t,Q}$ äquivalente Korrosionstiefe zum Zeitpunkt t errechnet aus der Querschnittsänderung

<u>Äquivalente Korrosionstiefe errechnet aus der Längenänderung:</u>

Die einfache Ermittlung der Korrosionstiefe zufolge Längenänderung erfolgt durch:

$$x_{t,L} = \frac{l_t - l_{t=0}}{2} \quad \text{(Gl. 11)}$$

Dabei sind: l_t Länge der Probekörper zum Zeitpunkt t

$x_{t,L}$ äquivalente Korrosionstiefe zum Zeitpunkt t errechnet aus der Längenänderung

Äquivalente Eindringtiefe xt,D errechnet aus den Druckfestigkeiten:

Für die Bruchspannung des ungeschädigten Querschnittes gilt:

$$\sigma_{dS,t} = \sigma_{dW,t} \quad \text{(Gl. 12)}$$

$$\sigma_{dS,t} = \frac{F_{dS,t}}{A_{S,t}} \quad \text{(Gl. 13)}$$

$$\sigma_{dW,t} = \frac{F_{dW,t}}{A_{W,t}} \quad \text{(Gl. 14)}$$

$$A_{S,t} = (a_{t=0} - 2 \cdot x_{t,D}) \cdot (b_{t=0} - 2 \cdot x_{t,D}) \quad \text{(Gl. 15)}$$

$$A_{W,t} = a_{t=0} \cdot b_{t=0} \quad \text{(Gl. 16)}$$

Durch Einsetzen und Lösen der quadratischen Gleichung erhält man die äquivalente Korrosionstiefe für den Zeitpunkt t, welcher dem Ende der jeweiligen Einlagerung entspricht.

Dabei sind: $\sigma_{dS,t}$ Bruchspannung der säuregelagerten Proben

$\sigma_{dW,t}$ Bruchspannung der wassergelagerten Proben

$F_{dS,t}$ Restdruckfestigkeit der säuregelagerten Proben

$F_{dW,t}$ Druckfestigkeit der wassergelagerten Proben

$A_{S,t}$ Querschnittsfläche der säuregelagerten Proben, berechnet mit den Abmessungen a_t und b_t vor der Einlagerung

$A_{W,t}$ Querschnittsfläche der wassergelagerten Proben, berechnet mit den Abmessungen a_t und b_t

$x_{t,D}$ äquivalente Korrosionstiefe zum Zeitpunkt t errechnet aus den Restdruckfestigkeiten

Korrosionsraten berechnet aus den äquivalenten Korrosionstiefen:

Für die kontinuierlich bestimmten äquivalenten Korrosionstiefen können nach folgender Gleichung sich einstellende Korrosionsraten berechnet werden.

$$v_t = \frac{x_{t=j} - x_{t=i}}{t_j - t_i} \quad \text{(Gl. 17)}$$

Dabei sind: v_t Korrosionsrate bspw. in mm/Tag oder mm/Woche

$t_{i,j}$ aufeinander folgende Einlagerungszeiten, wobei $t_j > t_i$ ist

$x_{t=j,i}$ Korrosionstiefen zu den Zeitpunkten t_i und t_j

3.5 Vorversuche

3.5.1 Einlagerung beschichteter Proben bei pH0

Im Rahmen von Vorversuchen wurden durch mehrmaliges Tauchen mit Paraffin überzogene Betonwürfel [XA1] 4x4x4cm³ hergestellt. Nach einer Einlagerungsdauer von 4 Wochen, im Säurebad bei pH0, zeigten die Probekörper im Querschnitt und an der Baustoffoberfläche keine Veränderung.

In Abbildung 13 ist die Oberfläche und die Bruchfläche im Querschnitt einer solchen Probe dargestellt. Die Säurelagerung hat keinen Einfluss auf die Feststoffmatrix. Die Beschichtung ist dampfdicht.

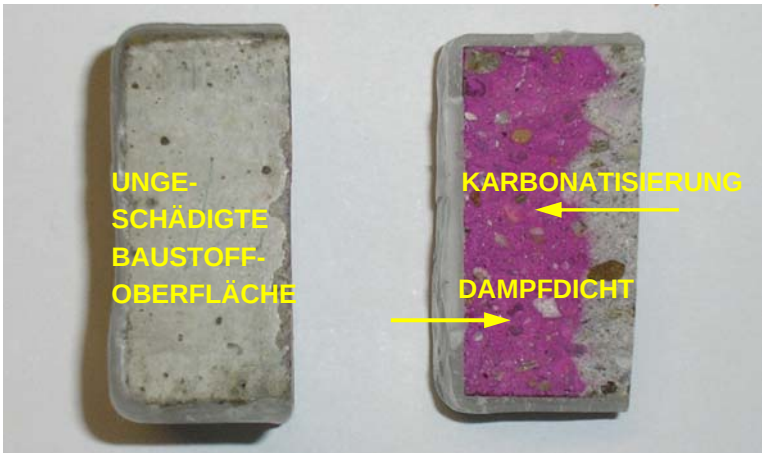


Abbildung 13: Betonwürfel-Probe (4x4x4cm³) nach 4-wöchiger Lagerung im Säurebad bei pH0 und nachfolgender 1 ½-jähriger Lagerung bei Laborklima; (li.) ungeschädigte Baustoffoberfläche bei entferntem Paraffinüberzug (re.) mit Phenolphtaleinlösung benetzte Bruchfläche

Der durch mehrfaches Tauchen hergestellte Überzug hat eine geringe Haftung am Untergrund und kann bei Beschädigung abgeschält werden. Weiters zeigt sich bei einseitig beschichteten, wassergelagerten Proben eine Unterwanderung und Ablösung der Beschichtung. Um dem entgegenzuwirken, wurde eine Mischform aus Penetration und Beschichtung gewählt, welche die zuvor beschriebenen Probleme nicht aufweist. Durch die Beschichtung nach einer Vorpenetration kann ein guter Haftverbund erzielt werden.

3.5.2 Einlagerung unterschiedlich beschichteter Proben bei pH0

In der nachfolgenden Tabelle sind die Applikationsabläufe unterschiedlich beschichteter Proben dargestellt (Abbildung 18).

Probekörper (4x4x16cm³) Applikation	I [XA1]-[PCO]	II [XA1]-[PCO]	III [XA1]-[PCO]	IV [XA1]-[PCO]	V [XA1]-[PCO]	VI [XA1]-[UNB]
Vorpenetrieren / 80°C:	10 min.	20 min.	30 min.	40 min.	10 min.	-
Kühlzeit / Laborklima:	20 min.	20 min.	20 min.	30 min.	45 min.	-
Tauchen / 80°C: (Beschichtung)	10 sec.	10 sec.	14 sec.	10 sec.	10 sec.	-

Tabelle 14: Zusammenstellung der Probekörper und des Applikationsablaufes

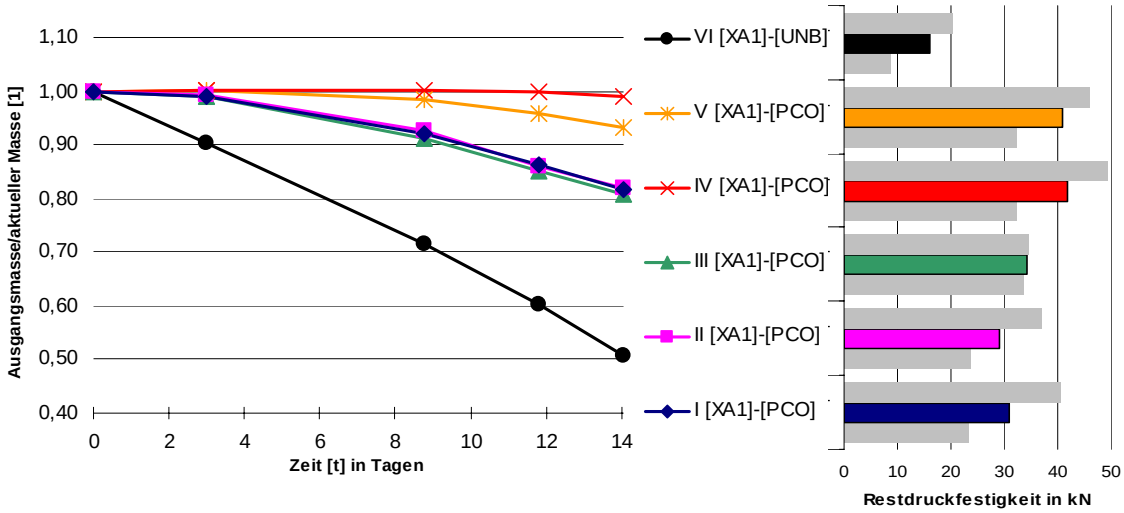


Abbildung 14: Masseverlust von XA1-Proben bei Lagerung 14 d / pH0 (li.); mittlere Restdruckfestigkeiten bzw. max. und min. Werte der Proben zufolge Schädigung (re.)

Abbildung 15: [XA1] Proben nach 14d, pH0; (von li. n. re.: Probe I bis VI)

Für die folgenden Versuchsreihen bei ph0 und pH1 wurde für die Applikation Paraffin-Coating ein einheitliches Temperatur-Zeit Regime festgelegt:

- 20 min. Vorpenetrieren / 80°C,
- 40 min. Kühlzeit / Laborklima und
- 10 sec. Tauchen / 80°C.

3.6 Beton

3.6.1 Beton bei pH0 und pH1

In den nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Materialien und die hierbei angewandten Applikationen (Tabelle 15) sowie die Applikationsabläufe (Tabelle 16) für die Einlagerungsversuche bei pH0 und pH1 zusammengefasst.

Probekörper (4x4x16cm³)	[UNB] unbehandelt	[PPU] Paraffin-Pulver	[PPE] Paraffin-Penetration	[PCO] Paraffin-„Coating“	[PUR] PUR-Beschichtung
[SR3] Schachtring	X		X	X	X
[SR4] Schachtring	X		X	X	X
[XA1] Beton XA1	X	X	X	X	X
[XA2] Beton XA2	X	X	X	X	X

Tabelle 15: Probenübersicht – untersuchte Materialien[9] und Applikationen für die Einlagerungsversuche pH0 und pH1

Bez.	Applikation	Applikationsvorgang
[UNB]	unbehandelt	-
[PPU]	Paraffin-Pulver	3d / 80°C thermische Behandlung im Trockenofen; Aufschmelzen und kapillare Verteilung des Paraffins
[PPE]	Paraffin-Penetration	3d / 80°C freie Paraffinsättigung, Proben voll bedeckt
[PCO]	Paraffin-„Coating“	20 min. penetrieren / 80°C freie Paraffinsättigung, Proben voll bedeckt 40 min. kühlen / Laborklima: 10 sec. tauchen / 80°C Paraffinbad
[PUR]	PUR-Beschichtung	Säubern der Oberfläche und Aufstreichen der ersten Schicht nach ca. 20 min. Aufstreichen einer zweiten Schicht gemessene Schichtdicke: i. M.: 0,15mm

Tabelle 16: Übersicht: Applikationsabläufe[10] der unterschiedlich behandelten Materialien bei den Einlagerungsversuchen pH0 und pH1

[9] ausführliche Beschreibung zu den Materialien siehe Pkt. 3.2.1, S. 37
[10] Beschreibung zu den Applikationen siehe auch Pkt. 3.3, S. 41

3.6.1.1 Einlagerungsversuche bei pH0

Bei den unbehandelten Probekörpern (UNB) findet zu Beginn der Einlagerung ins Säurebad eine sehr starke Reaktion statt. Für die mit Paraffinpulver applizierten Proben (PPU) ist ebenfalls eine Reaktion bemerkbar, wenngleich diese wesentlich schwächer ist.
Alle anderen behandelten Betone zeigen unabhängig von der Applikation (PPE, PCO und PUR) keine Auffälligkeiten. Zu Beginn der Einlagerung finden somit keine bzw. visuell nicht erfassbare Reaktionen statt.
Die Verläufe der relativen Massenänderungen von säure- und wassergelagerten Proben sind im Anhang zu finden (Abbildung 61 bis Abbildung 64). In der nachfolgenden Abbildung 18 und Abbildung 19 ist der zeitliche Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen bzw. -raten der Schachtringbetone und darauf folgend jene der selbst hergestellten Betone (Abbildung 20 und Abbildung 21) dargestellt.

Für die unbehandelten (UNB) und mit Paraffin penetrierten Betonproben (PPE) zeigen sich bei den Korrosionstiefen und -raten ähnliche Verläufe. Die beiden Arten sind nach ihrer Einlagerung visuell nicht voneinander zu unterscheiden.
Die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Querschnittsänderung sind bei den penetrierten Proben (PPE) am Ende der Einlagerungsdauer geringer als bei den Unbehandelten (UNB). Bei den aus der Massenänderung berechneten Korrosionstiefen sind diese bei den Schachtringproben geringfügig größer, bei den selbst hergestellten Betonen geringfügig kleiner bzw. identisch.
Betrachtet man die Korrosionsraten während der Einlagerung so ist ersichtlich, dass die mit Paraffin penetrierten Proben zu Beginn geringere Raten aufweisen als die Unbehandelten. Im Laufe der Zeit treten tendenziell gleiche Korrosionsraten auf.
Bei den penetrierten Proben ist vor allem zu Beginn eine geringere Korrosion als bei den unbehandelten Proben feststellbar.

Bei den Korrosionstiefen und Korrosionsraten der Schachtringbetone (Abbildung 18 und Abbildung 19) ist auffällig, dass die aus der Massenänderung berechneten Werte jeweils größer sind als die aus der Querschnittsänderung ermittelten. Dies wird auf den verhältnismäßig großen Zuschlag zurückgeführt, welcher trotz Korrosion der Feststoffmatrix die ursprünglichen Außenmaße hält. Bei den Betonen mit kleinem Zuschlag stimmen die Tiefen und Raten besser überein (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21).

Die mit Paraffin (PCO) und Polyurethan (PUR) beschichteten Proben weisen gegenüber den unbehandelten (UNB) Proben keine äquivalenten Korrosionstiefen und -raten auf. Augenscheinlich kann festgestellt werden, dass an Fehlstellen der Beschichtungen Korrosion stattfindet. Diese findet sich vor allem an den Kanten der Probekörper (Abbildung 16).

Insbesondere bei den selbst hergestellten Proben (XA1 und XA2) kommt es frühzeitig an den durch die Schalung ausgebildeten Kanten zur Schädigung. Dieser Umstand führt zu den in Abbildung 20 und Abbildung 21 ersichtlichen Korrosionstiefen bzw. -raten. In der Fläche ist vor allem das Paraffin-Coating weitgehend schadfrei.

Die äquivalenten Korrosionstiefen, welche am Ende der Einlagerungsdauer aus den Restdruckfestigkeiten bestimmt wurden, geben den zuvor beschriebenen Sachverhalt wieder (Abbildung 17).

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Streuungen kann erkannt werden, dass für die Paraffinpulver-Applikation (PPU) die größten Korrosionstiefen vorliegen. Die mit Paraffin penetrierten Betone (PPE) liegen im Bereich der unbehandelten Werkstoffe. Die größten Restdruckfestigkeiten wurden bei den beschichteten Proben erzielt, wobei das Paraffin-Coating (PCO) bei den Schachtringproben bessere Ergebnisse liefert, als bei den selbst hergestellten Betonen. Dieser Umstand kann auf den zuvor beschriebenen Umstand zurückgeführt werden, dass die Beschichtung an den Kanten der geschalten Prismen Fehlstellen aufweist.

Abbildung 16: Vergleich von mit Paraffin [PCO] (o.) und mit Polyurethan [PUR] (u.) beschichteten Betonproben [SR3] nach 14 Tagen bei pH0 (Probe 4x4x16cm³)

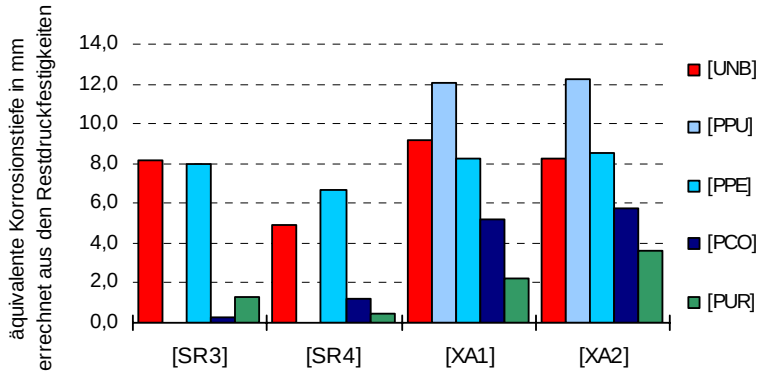


Abbildung 17: äquivalente Korrosionstiefen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

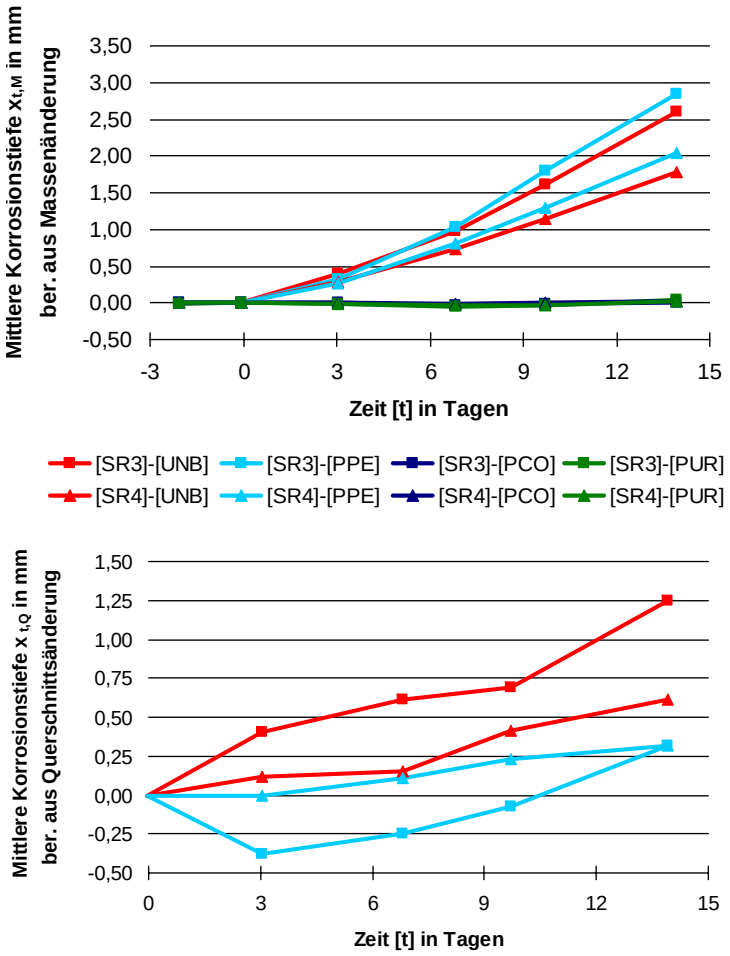


Abbildung 18: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

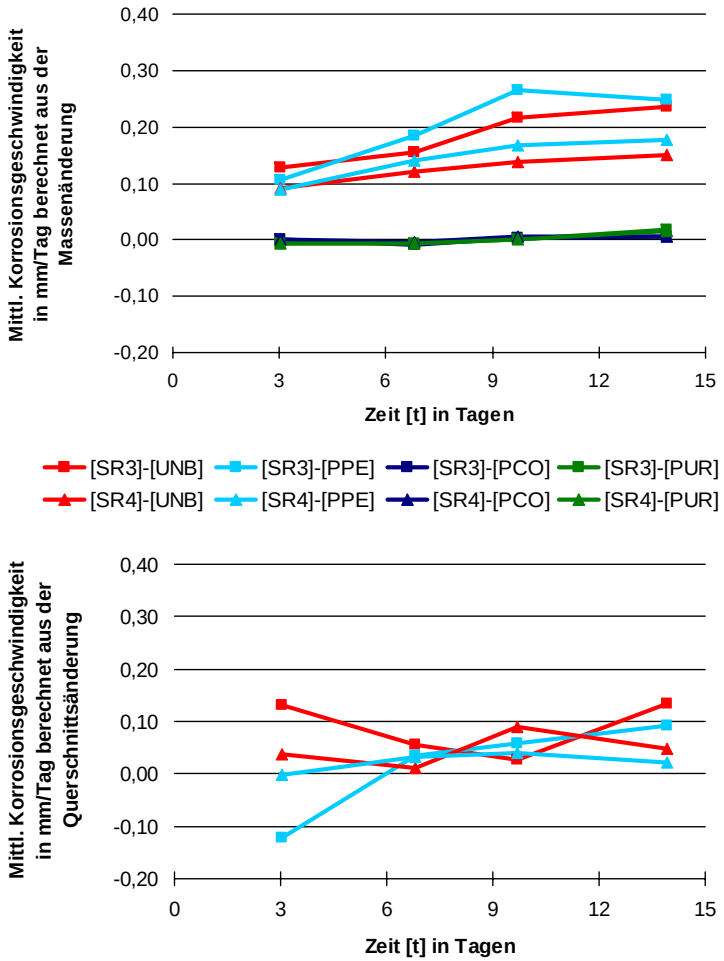


Abbildung 19: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

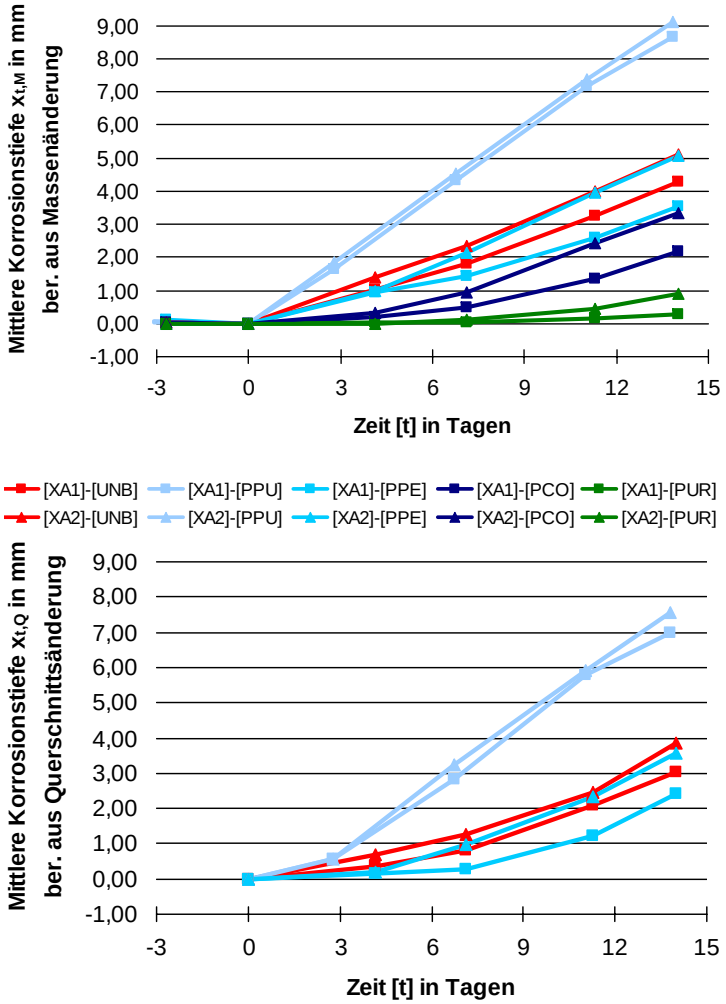


Abbildung 20: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelten Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

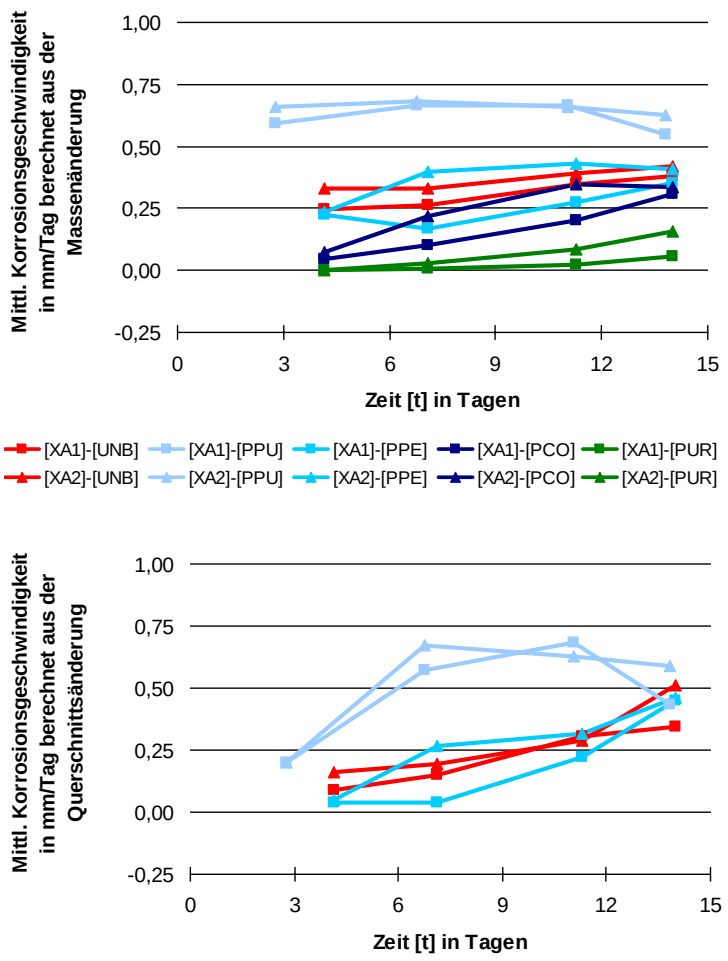


Abbildung 21: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

3.6.1.2 Einlagerungsversuche bei pH1

Bei den applizierten Proben (PPE, PCO und PUR) sind zu Beginn der Einlagerung keine Reaktionen bemerkbar. Für die unbehandelten Betone (UNB) und die mit Paraffinpulver (PPU) applizierten Proben sind die Reaktionen, im Vergleich zu jenen bei pH0, deutlich schwächer ausgeprägt.
Die Verläufe der relativen Massenänderungen von säure- und wassergelagerten Proben sind im Anhang zu finden (Abbildung 67 bis Abbildung 70). In der nachfolgenden Abbildung 24 und Abbildung 25 ist der zeitliche Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen bzw. -raten der Schachtringbetone und darauf folgend jene der selbst hergestellten Betone (Abbildung 26 und Abbildung 27) dargestellt. Des Weiteren sind die gemessenen Längenänderungen dargestellt (Abbildung 28 und Abbildung 29).

Beim Schachtringbeton und bei den selbst hergestellten Betonen sind, entsprechend der Abbildung 24 und Abbildung 26, für die penetrierten Proben (PPE) am Ende der Einlagerungsdauer deutlich geringere Korrosionstiefen zu verzeichnen als für die Unbehandelten (UNB). Dies gilt sowohl für die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Massenänderung als auch für die aus der Querschnittsänderung errechneten.
Bei Betrachtung der Korrosionsraten (Abbildung 25 und Abbildung 27) ist ersichtlich, dass sich diese nach einer Zeitspanne von 3 bis 5 Wochen angleichen.
Bei der messtechnischen Erfassung der Querschnittsänderung der Schachtringproben kommt es durch die Größe des Zuschlags zu großen Schwankungen bei den Korrosionsraten. Ein Trend kann jedoch erkannt werden.
Bei den Ergebnissen muss berücksichtigt werden, dass die Schachtringbetone (SR3) und (SR4) aus dem Inneren des Bauteiles stammen. Die Betone (XA1) und (XA2) hingegen weisen durch den Herstellungsprozess eine Übergangszone auf, in welcher sich der Beton von einer Zementleimschicht zu seinem charakteristischen Gefüge wandelt.
Es kann erkannt werden, dass die kleineren Korrosionstiefen am Ende der Einlagerungsdauer im Wesentlichen auf geringere Korrosionsraten zu Beginn der Einlagerung zurückzuführen sind. Den Messwerten zufolge findet eine Verzögerung der Korrosion statt, welche für die Einlagerungsversuche bei pH1 deutlicher zu erkennen sind als bei pH0.

Für die Polyurethanbeschichtung (PUR) und das Paraffin-Coating (PCO) sind über die Einlagerungsdauer hinweg keine Korrosionsraten zu verzeichnen. Visuell sind an den Kanten für beide Applikationen vereinzelt Schäden zu erkennen (vgl. Abbildung 22), welche im Vergleich zu den bei pH0 gelagerten Proben geringer sind. Vor allem das Paraffin-Coating zeigt sich in der Fläche praktisch schadfrei.

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die zeitlichen Verläufe der mittleren Längenänderungen von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Säure- und Wasserlagerung dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass der Säureangriff keine messbaren Längenänderungen bewirkt. Unstetige Verläufe und Abweichungen zwischen säure- und wassergelagerten Proben sind durch die Probenpräparation bedingt. Es ist davon auszugehen, dass die gemessenen Längenänderungen auf die Quellung der mineralisch gebundenen Materialien zurückzuführen ist. Messbare Längenänderungen bei den Beschichtungen sind durch Undichtigkeiten aufgenommenes Wasser bzw. Lösung verursacht. Während das Paraffin-Coating bei den Schachtringen praktisch dicht ist und die Proben bei der Polyurethanbeschichtung nur geringe Längenänderungen zeigen, neigen die beschichteten Proben der selbst hergestellten Betone durch ihre Undichtigkeiten an den Kanten zum Quellen.

Die Paraffinpulver Applikation (PPU) bewirkt gegenüber den unbehandelten Betonen eine deutliche Verschlechterung der Beständigkeit. Die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Massen- und Querschnittsänderung und die Korrosionsraten liegen im Vergleich zu pH0 aber nur geringfügig höher. Unter der Berücksichtigung, dass die Korrosionszonen für höhere pH-Werte und porösere Materialien bedeutend größer werden, verliert die Beurteilung zufolge Massen- und Querschnittsänderung an Aussagekraft (vgl. 3.4.2.1). Die vergleichende Beurteilung anhand der Restdruckfestigkeiten ist erforderlich (Abbildung 23). Dadurch wird ersichtlich, dass die Korrosionstiefen der Proben mit Paraffinpulver Applikation (PPU) deutlich größer sind als jene der Unbehandelten und Penetrierten.

Die Ergebnisse der restlichen Applikationen, aus den Massen- und Querschnittsänderungen, werden durch die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Restdruckfestigkeit weitgehend wiedergegeben (Abbildung 23).
Wegen der geringeren Korrosionstiefen (verglichen mit pH0) wirken sich die vorhandenen Streuungen noch deutlicher aus, insbesondere bei den Schachtringbetonen, welche für diese zwei Betonarten keine eindeutige Aussage zulassen.
Für die selbst hergestellten Betone stimmen die Relationen gut mit den anderen Korrosionstiefen überein. Die am Ende der Einlagerung festgestellten geringeren Korrosionstiefen, der mit Paraffin penetrierten Proben (PPE), werden gegenüber den Unbehandelten (UNB) wiedergegeben.
Bei den beschichteten Proben (PUR und PCO) sind die Werte betragsmäßig klein bzw. konnte kein Verlust an Restdruckfestigkeit festgestellt werden.
Die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge der gemessenen Restdruckfestigkeiten sind betragsmäßig größer als die aus der Massen- und Querschnittsänderung ermittelten. Neben den Streuungen kann dies durch das Messprinzip erklärt werden (vgl. Pkt. 3.4.2).

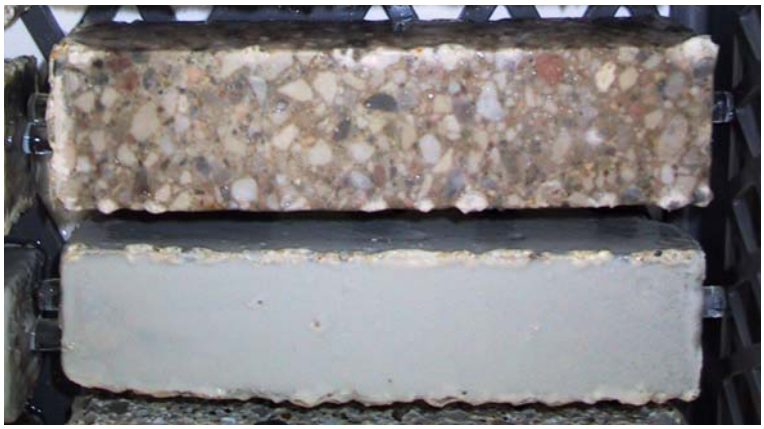


Abbildung 22: Vergleich von mit Paraffin [PCO] (o.) und Polyurethan [PUR] (u.) beschichteten Betonproben [SR3] nach 70 Tagen bei pH1 (Probe 4x4x16cm³)

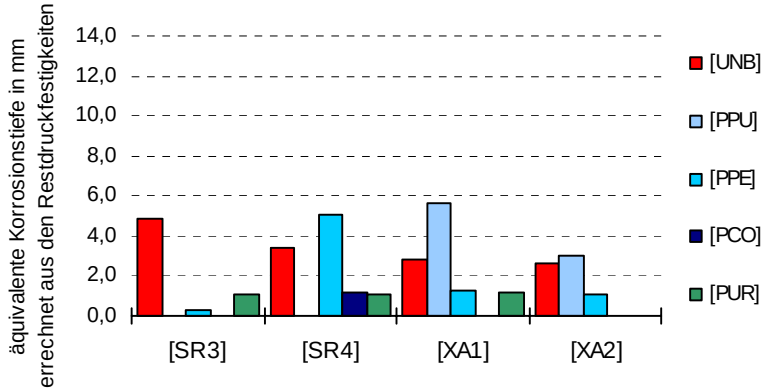


Abbildung 23: äquivalente Korrosionstiefen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

Anmerkung: Wenn bei den Materialien für die Beschichtungs-Applikationen (PUR und PCO) keine Werte angeführt sind, liegen zufolge der Restdruckfestigkeiten keine positiven Korrosionstiefen vor.

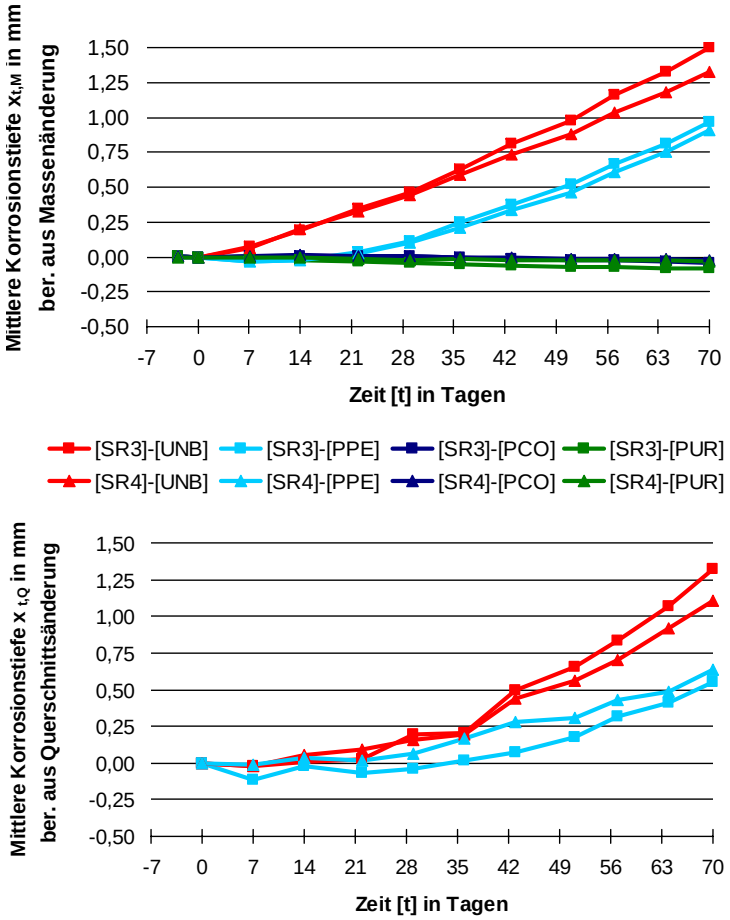


Abbildung 24: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

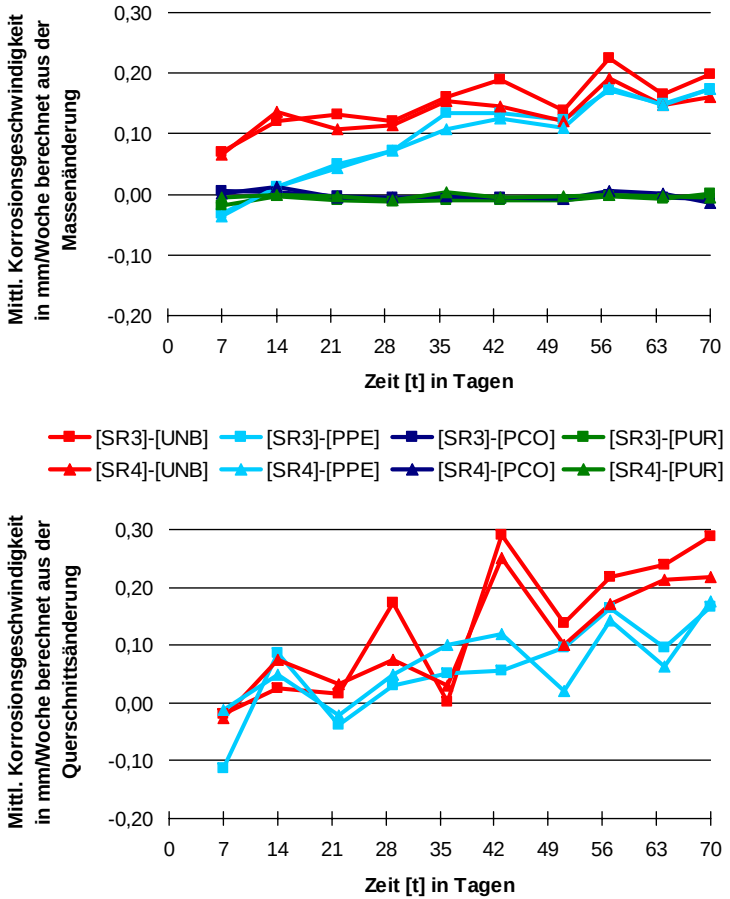


Abbildung 25: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

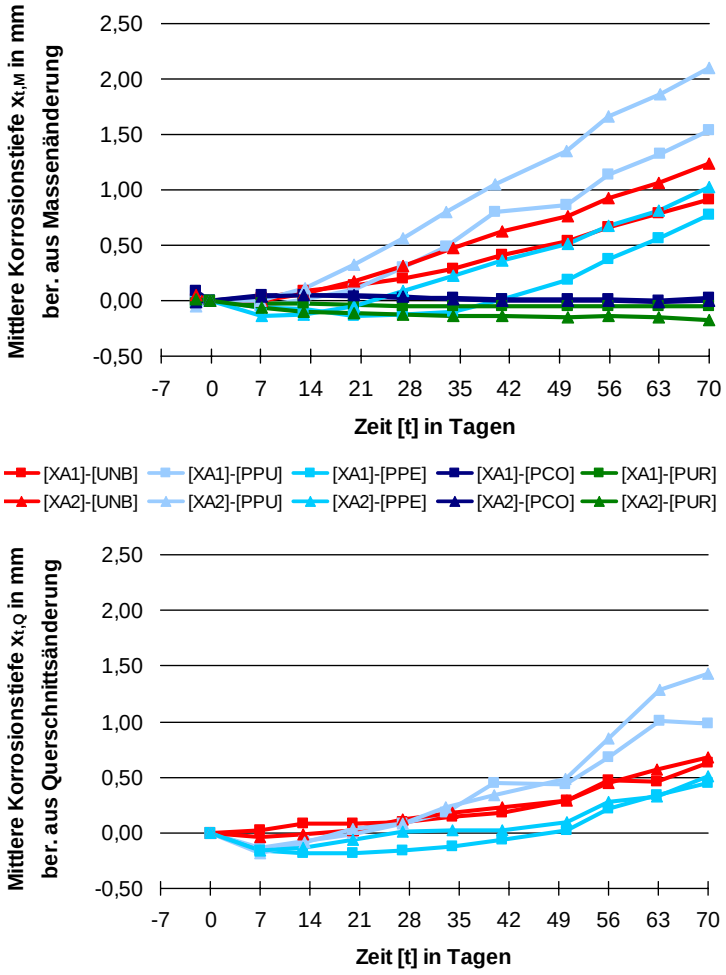


Abbildung 26: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

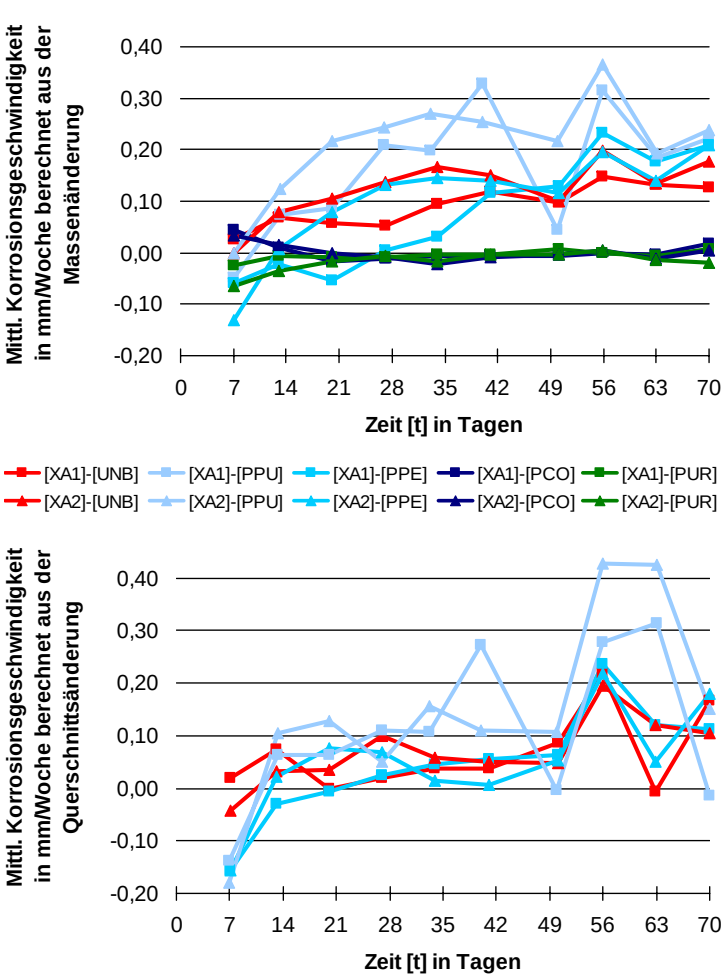


Abbildung 27: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

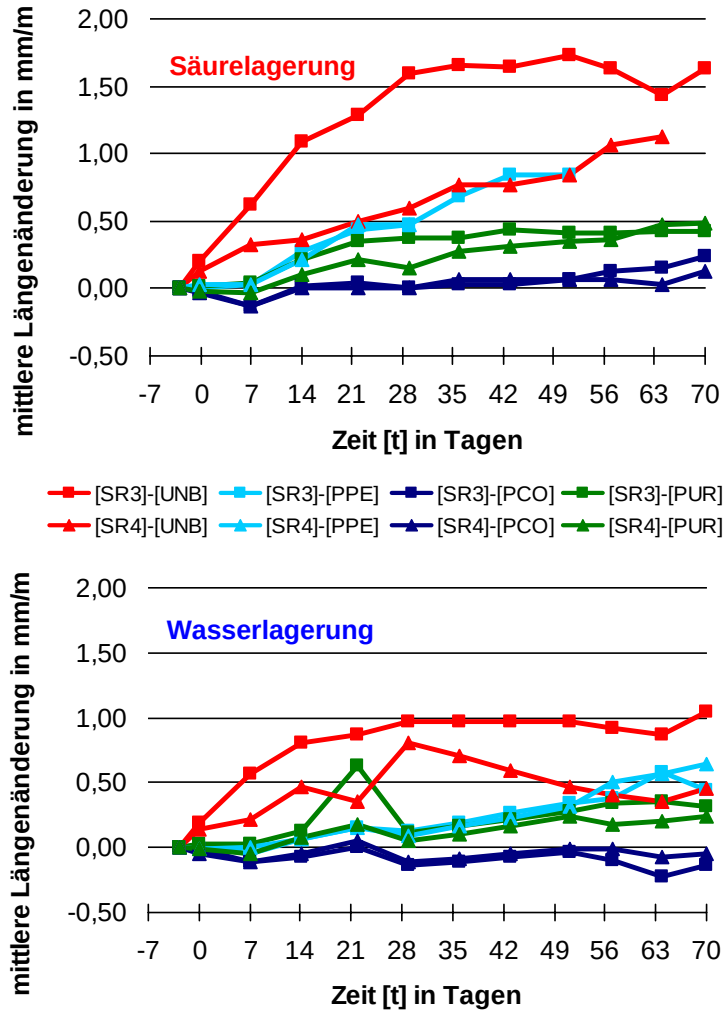


Abbildung 28: zeitlicher Verlauf der mittleren Längenänderung von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Säure- und Wasserlagerung über 10 Wochen

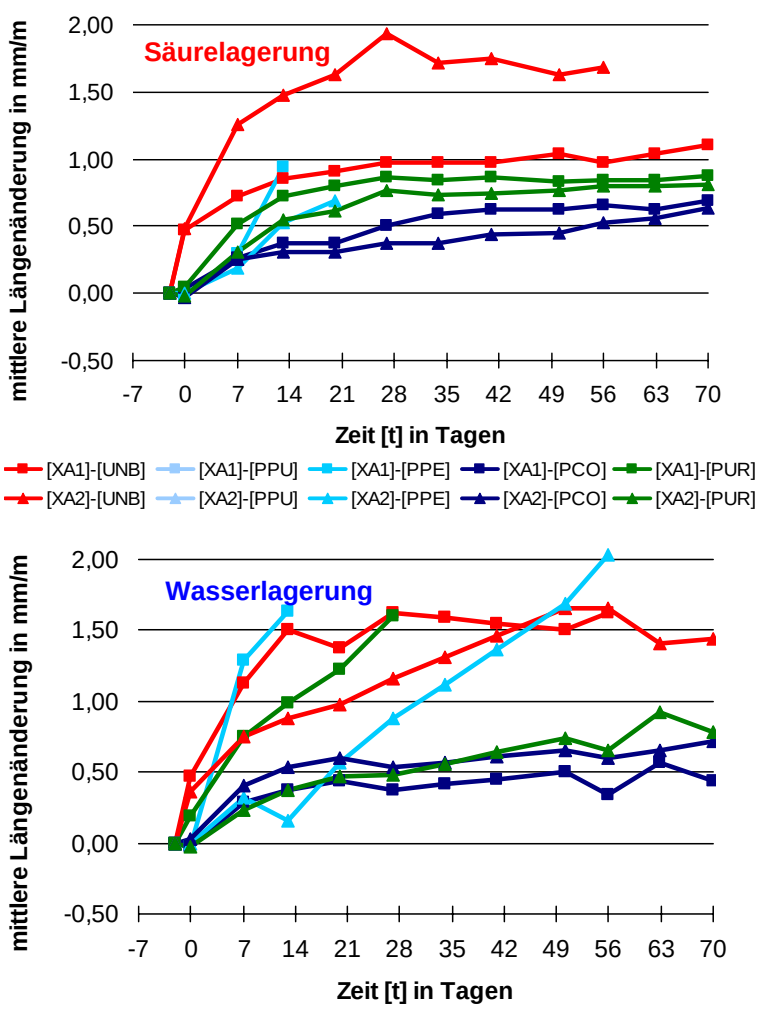


Abbildung 29: zeitlicher Verlauf der mittleren Längenänderung von verschieden behandelten Betonproben zufolge Säure- und Wasserlagerung über 10 Wochen

3.6.2 Beton mit unterschiedlichem Porenfüllgrad

Die nachfolgende Untersuchung hat zum Ziel, bei der Applikation Paraffin-Penetration einen möglichen Zusammenhang zwischen Porenfüllgrad mit Paraffin und Dauerhaftigkeit von Beton gegenüber biogener Schwefelsäure zu zeigen.

3.6.2.1 Applikationsvorgänge und Porenfüllgrade

In der nachfolgenden Tabelle 17 sind die wesentlichen Porositätseigenschaften des verwendeten Betons zusammengefasst. Die Zusammensetzung und weitere Eigenschaften sind unter Pkt. 3.2.1 angeführt.

Eigenschaft	SR3	Einheit
Trockenrohdichte	2,36	g/cm³
Sättigungsfeuchte bei freier Wassersättigung	5,02	M-%
Sättigungsfeuchte bei Exsikkatorlagerung (dadurch kann Wasser in Poren gelangen, in welchen sich sonst Lufteinschlüsse bilden würden)	5,37	M-%
	11,81	V-%

Tabelle 17: gemessene Porositätseigenschaften des Schachtringmaterials SR3

In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind Ergebnisse aus Untersuchungen zum Porenspektrum von mit Paraffin unterschiedlich behandeltem Schachtringbeton SR3 ersichtlich. Eine ausführliche Beschreibung der Messungen und Interpretationen der Ergebnisse sind in [Maj04] enthalten. Die mittels Quecksilberporosimetrie festgestellte Porosität von ca. 8 Vol.-% weist merklich von den Werten in Tabelle 17 ab. Nach [Grü01] sind folgende Einschränkungen und Besonderheiten bei der Quecksilberporosimetrie zu beachten:

- Der erfassbare Porengrößenbereich ist beschränkt. Poren mit Radius über 7,5 mm füllen sich bereits unter atmosphärischem Druck mit Quecksilber und werden daher nicht erfasst. Poren unterhalb von 2 nm werden selbst bei einem Druck von 4000 bar nicht mehr erfasst. Die Porosität ist daher immer kleiner als die ermittelte Gesamtporosität (vgl. Tabelle 17).
- Porenraum und Porengrößenverteilung hängen stark vom Feuchtegehalt der Proben ab. Je stärker die Proben getrocknet werden, desto feinere Poren werden zugänglich gemacht.
- Der Zementstein weist keine zylinderförmigen Poren auf. Weil diese in der Berechnung der Porenradien angenommen werden, können die ermittelten Porenradien nur als Vergleichswerte dienen.

Unter Berücksichtigung der Anmerkungen zu Abbildung 30 und Abbildung 31 und der zuvor genannten Beschränkungen, ist die Interpretation der Porenspektren auf eine qualitative Aussage über die bewirkte Porenverstopfung zu begrenzen.

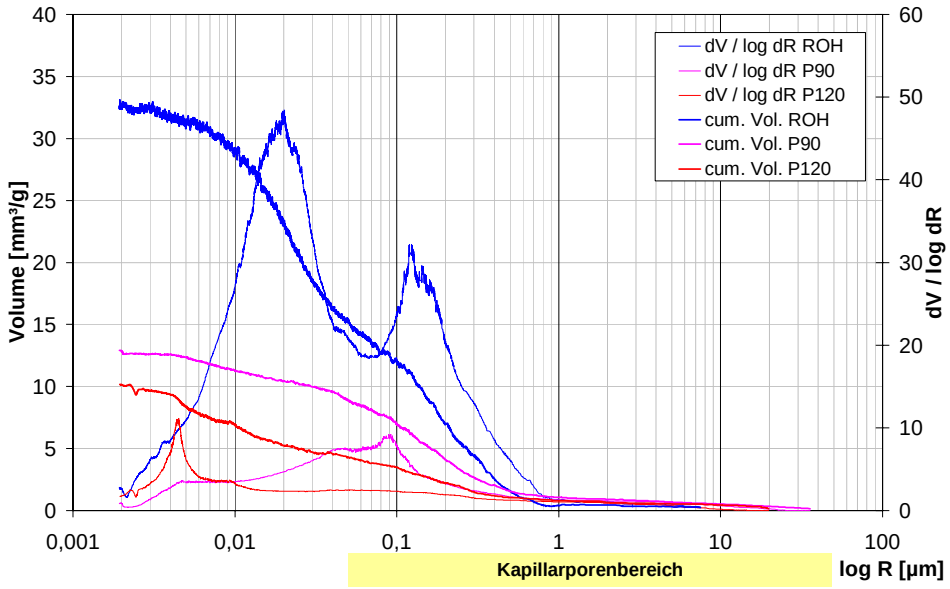


Abbildung 30: Porenradienverteilungen von unbehandeltem und penetriertem Beton SR3; entnommen aus [Maj04]

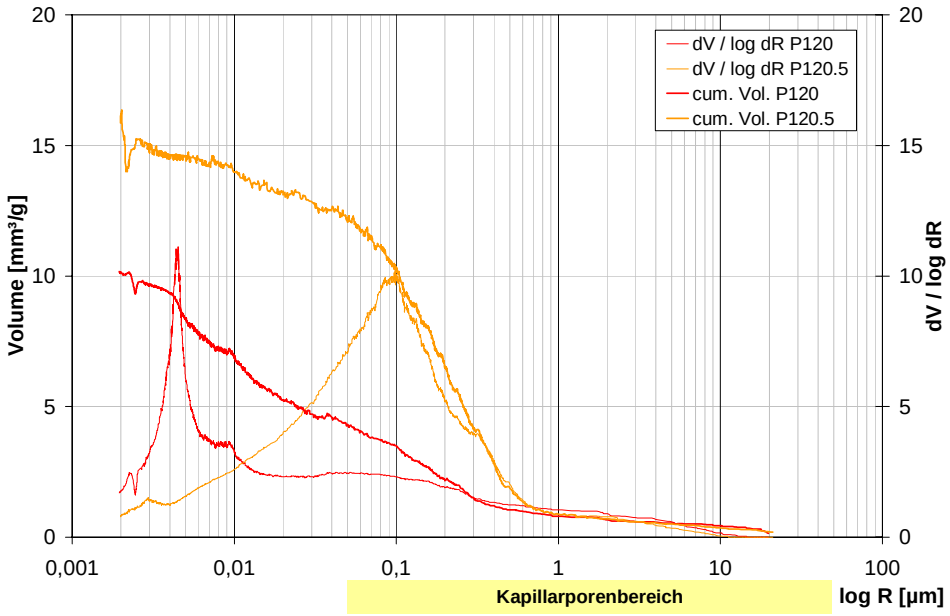


Abbildung 31: Porenradienverteilungen von mit Paraffin behandeltem Beton SR3 zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Penetration; entnommen aus [Maj04]

Anmerkung:

ROH ..... unbehandelter Schachtringbeton SR3; Trocknung bei 105°C vor der Messung

P90 ..... Vorbehandlung durch Lagerung für 24h bei 90°C; penetriert bei 90°C durch 24h kapillare Paraffinaufnahme; Probenentnahme über dem Paraffinspiegel; Trocknung vor der Messung bei 50°C

P120 ..... Vorbehandlung durch Lagerung für 24h bei 120°C; penetriert bei 120°C durch 24h kapillare Paraffinaufnahme; Trocknung vor der Messung bei 50°C

P120,5 .. Vorbehandlung durch Lagerung für 24h bei 120°C; penetriert bei 120°C durch kapillare Paraffinaufnahme bis zu einer Steighöhe von 5cm; Probenentnahme unterhalb der 5cm Marke; Trocknung vor der Messung bei 50°C

Für die Paraffin-Penetration beim Schachtringbeton können folgende Aussagen getroffen werden:

- Durch die Penetration mit Paraffin kommt es zu einer starken Reduktion der Porosität.
- Bei höheren Temperaturen und der damit verbundenen geringeren Viskosität des Paraffins werden bei gleichen Behandlungszeiträumen höhere Porenfüllgrade erzielt (vgl. P90 und P120 in Abbildung 30).
- Zufolge kapillarer Sättigung verschwinden vor allem die Hohlräume im Kapillarporenbereich (vgl. P120 und P120,5 in Abbildung 31).
- Im teilweise penetrierten Baustoff kommt es zu einer Auskleidung der Hohlräume. Dadurch wird eine ausgeprägte Hydrophobie erreicht.
- Wenngleich durch fortlaufende Penetration eine weitere Reduktion der Porosität bewirkt wird, bleibt auf Grund der Kontraktion des Paraffins ein nicht zu verfüllender Porenraum.

Die Porenfüllgrade sind im Wesentlichen von der Behandlungsdauer und von der Behandlungstemperatur (Viskosität) abhängig.

Um unterschiedliche und vor allem auch hohe Porenfüllgrade zu erreichen, wurden verschiedene Penetrationsarten gewählt. Neben der Temperatur wurden die Ausgangsfeuchten und die Behandlungszeiten variiert. Des Weiteren wurden Proben durch freie Paraffinsättigung und durch kapillare Sättigung mit anschließender freier Sättigung penetriert. Die gewählten Applikationsabläufe sind nachfolgend zusammengefasst (Tabelle 18).

Bez.	Applikation	Applikationsvorgang
[UNB]	unbehandelt	Lagerung bei Laborklima
[PEN] (1)	Paraffin-Penetration	Trocknung der Proben bei 120°C bis zur Gewichtskonstanz (66d/90°C bis 120°C) Trocknungsverlauf - Abbildung 77 im Anhang kapillares Saugen der Proben von Paraffin bis zur Gewichtskonstanz (26d/120°C, Saughöhe 7cm) freie Paraffinsättigung bis zur Gewichtskonstanz (19d/120°C, Verlauf siehe Abbildung 78 im Anhang)
[PEN] (2)	Paraffin-Penetration	Trocknung der Proben bei 120°C bis zur Gewichtskonstanz (34d/120°C) freie Paraffinsättigung bis zur Gewichtskonstanz (35d/120°C)
[PEN] (3)	Paraffin-Penetration	Lagerung der Proben bei Laborklima kapillares Saugen der Proben von Paraffin (7d/90°C, Saughöhe 7cm) freie Paraffinsättigung (14d/90°C)
[PEN] (4)	Paraffin-Penetration	Trocknung der Proben bis 120°C bis zur Gewichtskonstanz (28d/105°C bis 120°C) freie Paraffinsättigung (5d/120°C)

Tabelle 18: Applikationsabläufe der unterschiedlich penetrierten Materialien beim Einlagerungsversuch pH1

Die in der nachfolgenden Tabelle 19 angeführten Porenfüllgrade wurden durch Messung der aufgenommenen Paraffinmenge unter Zugrundelegung der Stoffdichten für die jeweiligen Temperaturen bestimmt ($\rho_{D5,120}$=0,75g/cm³, $\rho_{D5,20}$=0,90g/cm³). Das Volumen der Probekörper wurde durch Tauchwägung bestimmt und durch Berechnung kontrolliert.

Probekörper [SR3] Schachtring (ca. 8x6x3cm³)	[UNB] unbehandelt	[PEN] (1) Paraffin-Penetration	[PEN] (2) Paraffin-Penetration	[PEN] (3) Paraffin-Penetration	[PEN] (4) Paraffin-Penetration
Paraffingehalt in V-% bei 120°C	-	11,6	11,1	10,9	8,9
Paraffingehalt in V-% bei 20°C	-	9,6	9,2	9,1	7,4
Porenfüllgrad bez. auf Paraffingehalt bei Raumtemp. (20°C)	0,0 %	81,5 %	78,1 %	ca. 77 %	63,0 %

Tabelle 19: Porenfüllgrade während und nach der Behandlung der Proben durch unterschiedliche Penetration

Die Porenfüllgrade sind von der Behandlungsart, der Behandlungsdauer und von der Behandlungstemperatur abhängig. Der größte Paraffingehalt konnte durch kapillare Sättigung mit anschließender freier Sättigung erzielt werden. Des Weiteren ist der Feuchtigkeitsgehalt der Materialien entscheidend.

Durch die Änderung der Dichte beim Erstarren des Paraffins kommt es wegen der Kontraktion zu einem Absinken der Porenfüllgrade. Die volumenmäßigen Paraffingehalte in der Flüssigphase entsprechen bei hohen Porenfüllgraden jenen zufolge freier Wassersättigung. Bei sehr langen Penetrationszeiten werden auch Feinporen erreicht.

3.6.2.2 Versuchsbedingungen

Entgegen den vorangegangenen Versuchen wurden Probekörper mit den Maßen 8x6x3cm³ verwendet. Im Rahmen von Einlagerungsversuchen sind in [Bre02] unterschiedliche Prüfkörpergeometrien untersucht worden. Hierbei wird festgehalten, dass die Geometrie keinen relevanten Einfluss auf das flächenbezogene Messergebnis hat, sofern ein konstantes Verhältnis zwischen Prüfkörperoberfläche und Flüssigkeitsvolumen besteht.

Bis zur Einlagerungsdauer von 70 Tagen wurde die Lösung wöchentlich erneuert und mittels pH-stat Titration auf einem pH-Wert von 1 gehalten. Danach wurde die Lösung nicht mehr erneuert und der pH-Wert ausschließlich durch fortlaufende Titration konstant gehalten.

Es wurde laufend der Masseverlust bestimmt und es gelten die Randbedingungen von Tabelle 3.

3.6.2.3 Ergebnisse

In Abbildung 32 ist der auf die Oberfläche der Proben bezogene Masseverlust bei Einlagerung ins schwefelsaure Bad bei pH1 dargestellt. Die daraus ermittelten Korrosionsraten sind der Abbildung 33 zu entnehmen.

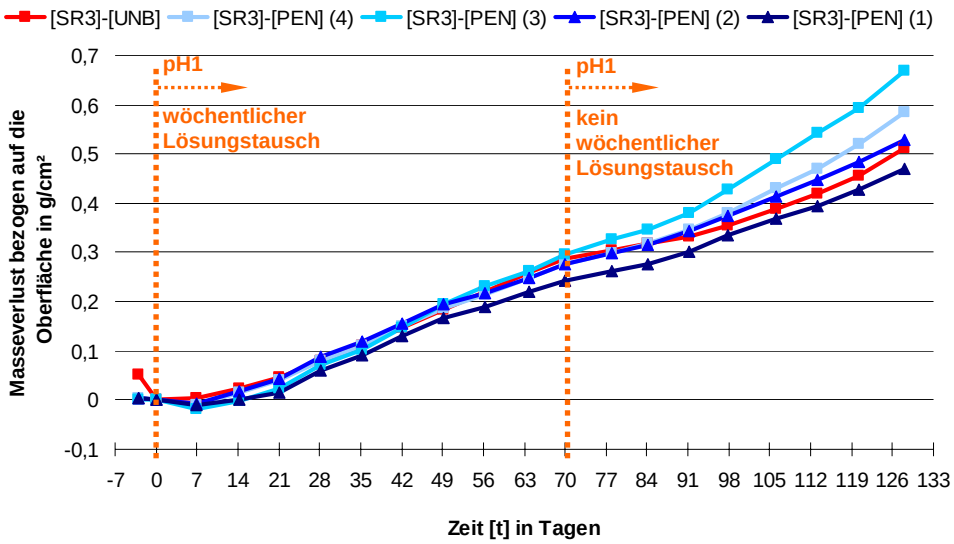


Abbildung 32: korrigierter Massenverlust von unterschiedlich mit Paraffin behandelten Betonproben [SR3] bei pH1

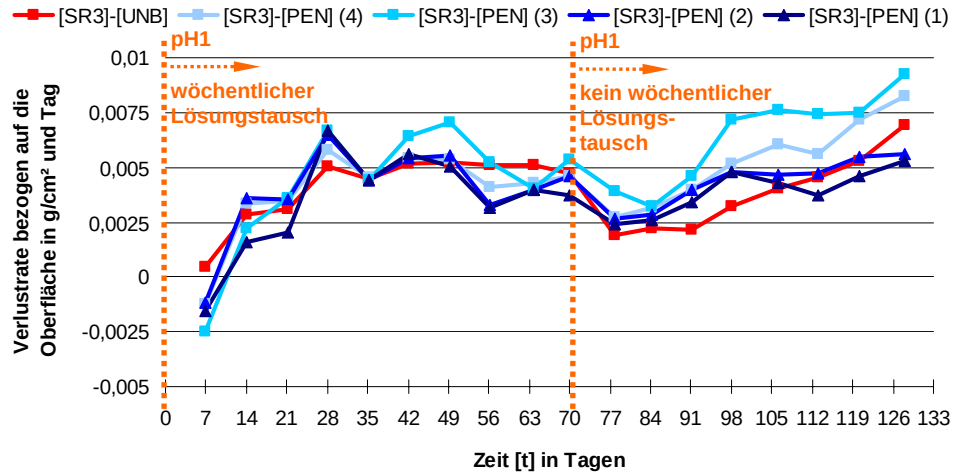


Abbildung 33: Korrosionsraten von unterschiedlich mit Paraffin behandelten Betonproben [SR3] bei pH1

Zu Beginn der Einlagerung weisen alle penetrierten Proben (PEN) geringere Korrosionsraten auf als die Unbehandelten (UNB). Es ist zu erkennen, dass diese im Verlauf der Zeit zunehmen und den Korrosionsraten der Unbehandelten entsprechen. Unter Berücksichtigung einer gewissen Schwankungsbreite liegen diese in einem beständigen Bereich.

Nach einer Einlagerungsdauer von 70 Tagen sind die Massenverluste der penetrierten Proben mit geringerem Porenfüllgrad praktisch gleich hoch wie jene der Unbehandelten. Nur die

penetrierten Proben mit dem höchsten Porenfüllgrad weisen einen geringeren Masseverlust auf. Dieser kann bei Betrachtung der Korrosionsraten vor allem auf die reduzierte Korrosion zu Beginn der Einlagerung zurückgeführt werden. Die negativen Masseverluste und Raten zu Beginn der Einlagerung sind durch die Überlagerung von anfänglich verzögerter Korrosion und einsetzender Gipsbildung bedingt.
Für den Versuchszeitraum nach 70 Tagen wurde die Lösung nicht mehr erneuert um ggf. Auswirkungen einer treibenden Wirkung durch vermehrte Gipsbildung abbilden zu können. Die Korrosionsraten sinken zu Beginn scheinbar ab und steigen danach wieder auf die zuvor aufgezeichneten Werte an. Lediglich die Masseverluste der Paraffin-Applikation PEN (3) und die Raten der Applikation PEN (4) sind am Ende des Versuchszeitraumes deutlich höher als jene der anderen. Die Korrosionsraten der unbehandelten Proben (UNB) steigen tendenziell an. Die Gründe können an dieser Stelle nicht angegeben werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass für den stark lösenden Angriff keine ausgeprägten Unterschiede zwischen den unbehandelten und den mit Paraffin penetrierten Proben vorliegen. Klar ersichtlich ist eine Verzögerung der Korrosion bei den mit Paraffin applizierten Proben zu Beginn der Einlagerung. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Porenfüllgrad und Dauerhaftigkeit kann für den stark lösenden Angriff nicht festgestellt werden.
Bei verstärkter Gipsbildung weisen die penetrierten Proben mit höherem Porenfüllgrad ein günstigeres Verhalten auf.

3.7 Mörtel

3.7.1 Mörtel des Siedlungswasserbaus bei pH0 und pH1

Bei der nachfolgenden Tabelle 20 sind neben den verwendeten Materialien die angewandten Applikationen für die Einlagerungsversuche bei pH0 und pH1 ersichtlich.

Probekörper (4x4x16cm³)	[UNB] unbehandelt	[PPU] Paraffin-Pulver	[PPE] Paraffin-Penetration	[PCO] Paraffin-„Coating“	[PUR] PUR-Beschichtung
[RM] Referenzmörtel	X				
[SM] Sielmörtel	X	X	X	X	X

Tabelle 20: Probenübersicht – untersuchte Materialien und Applikationen für die Einlagerungsversuche pH0 und pH1

Die Applikationsabläufe bei den unterschiedlich behandelten Materialien wurden analog zu den Betonen durchgeführt (vgl. Tabelle 16, S. 53).

Bei der Ersteinlagerung der Proben ins Säurebad ist für den Referenzmörtel (RM) und für die unbehandelten Proben des Sielmörtels (SM-UNB), vor allem bei pH0, eine starke Reaktion zu erkennen.

In Tabelle 21 und den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 35 bis Abbildung 42) sind die Ergebnisse zu den Einlagerungsversuchen bei pH0 und pH1 zusammengefasst.
Während die Referenzmörtelproben (RM) bei pH0 bereits in der zweiten Hälfte der Einlagerungsdauer konstante Korrosionsraten aufweisen, zeigen die bei pH1 gelagerten Proben erst am Ende der Einlagerung eine Konstanz. Die äquivalenten Korrosionstiefen und -raten aus der Massen- und Querschnittsänderung stimmen für pH0 als auch für pH1 gut miteinander überein (Abbildung 37 und Abbildung 38). Zurückgeführt wird dies auf die sehr kleinen, sich ausbildenden Korrosionszonen (vgl. Abbildung 36, pH0). Dies ist an den visuell am Anschnitt bestimmten Korrosionstiefen zu erkennen, welche am Ende der Einlagerungsdauer bei pH0 6,2mm betragen. Sie sind erwartungsgemäß größer als die zufolge der Massenänderung berechneten (Tabelle 21). Für die aus den Restdruckfestigkeiten ermittelten Korrosionstiefen werden unter Berücksichtigung der Schwankungen folglich die größten Werte ermittelt (Abbildung 35).

Betrachtet man die äquivalenten Korrosionstiefen und -raten der Sielmörtelproben (SM) zufolge Querschnitts- und Massenänderung bei pH0 (Abbildung 37 und Abbildung 38) ist zu erkennen, dass die Werte für die penetrierten Proben (PPE) deutlich höher sind als für die Unbehandelten (UNB), welche den Diagrammen zufolge keine Korrosion aufweisen. Die Korrosionstiefen zufolge Restdruckfestigkeit (Abbildung 35) sind für die penetrierten Proben (PPE) größer.

Für die Einlagerungsversuche bei pH1 sind die Korrosionstiefen und -raten der penetrierten Proben jedoch von Beginn an geringer als jene der Unbehandelten. Negative Korrosionsraten zu Beginn können auf die Gipsbildung auf der Oberfläche der Proben zurückgeführt werden.
Wie bereits unter Pkt. 3.4.2.1 angemerkt wurde, ist die alleinige Beurteilung der Dauerhaftigkeit anhand der äquivalenten Korrosionstiefen aus Massen- und Querschnittsänderung bei der Ausbildung größerer Korrosionszonen problematisch.
Der kontinuierliche Materialabtrag wird durch die gleichzeitig stattfindende Gipsbildung nicht abgebildet. Bei den unbehandelten (UNB) Sielmörtelproben (SM) ist selbst beim Angriff pH0 die Ausbildung einer großen Korrosionszone ersichtlich (Abbildung 36). Ähnlich wie bei den Unbehandelten ergeben sich für die mit Paraffin penetrierten Proben (PPE) größere Korrosionszonen, welche jedoch weniger stark ausgebildet sind.
Unter Beachtung der visuell am Anschnitt bestimmten Korrosionstiefen (Tabelle 21) wird ersichtlich, dass der unbehandelte Sielmörtel (SM-UNB) entgegen der Abbildung 37 und Abbildung 38 erhebliche Korrosionstiefen aufweist (vgl. Abbildung 36). Diese liegen im Bereich der penetrierten Proben (PPE), welche eine geringere Korrosionsschichtdicke aufweisen. Die gipsreiche Korrosionszone des unbehandelten Sielmörtels wirkt sich günstig auf den weiteren Verlauf der Schädigung aus. Weil die Korrosionszonen kaum eine Festigkeit aufweisen kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass der durch das Spülen verursachte Abtrag ungleichmäßig erfolgte.
Die oben angeführten Umstände geben Hinweise für die Ursachen der bei pH0 festgestellten Abweichungen gegenüber pH1 und zeigen deutlich, dass für mineralisch gebundene Materialien mit großen Korrosionszonen die alleinige Beurteilung anhand der Querschnitts- und Massenänderung nicht möglich ist.
Wie bei den Betonen ist zusammenfassend festzustellen, dass die Applikation von Paraffin in Form der Penetration eine anfängliche Verzögerung der Korrosion bewirkt. Der Korrosionsfortschritt läuft zeitlich versetzt in gleichem Maße ab.

Der Verlauf der Mittelwerte von Längenänderung und relativen Ultraschalllaufzeiten der Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH0 (Abbildung 34) und pH1 (Abbildung 41 und Abbildung 42) lassen keine Schlüsse auf den Schädigungsverlauf zu. Auf Grund der fortschreitenden Korrosion von außen und dem nicht beeinträchtigten Kern, kann der Schädigungsverlauf über die Längsachse nicht abgebildet werden. Der Verlauf der relativen Ultraschalllaufzeiten weist unter Berücksichtigung der vorhandenen Schwankungen keinen Trend auf. Unstetige Verläufe, als auch abrupt endende Kurven, sind durch das Versagen einzelner Messaufsätze bedingt.

Die Beschichtungen mit Paraffin (PCO) und Polyurethan (PUR) weisen im Vergleich zu den Betonen Undichtigkeiten und dadurch eine messbare Quellung auf. Wegen der Undichtigkeiten

kommt es vor allem für die Einlagerung bei pH0 zu einem vorzeitigen Ablösen des Paraffin-Coatings und zum Verlust der Schutzwirkung. Die Polyurethan-Beschichtung zeigt für pH0 ein günstigeres Verhalten (Abbildung 37 und Abbildung 38), wenngleich visuell bereits zahlreiche Schadstellen sichtbar sind.

Für die Einlagerungen bei pH1 zeigen die Beschichtungen ein wesentlich günstigeres Verhalten (Abbildung 39 und Abbildung 40). Es kommt bei den gecoateten Proben erst gegen Ende der Einlagerung zu einem Ablösen der Beschichtung.

Weiters kann davon ausgegangen werden, dass die Applikation Paraffin-Coating (PCO) für den Sielmörtel optimiert werden kann. Der angewandte Applikationsvorgang ist auf die Betone abgestimmt und wurde für die Mörtel ohne Abänderung übernommen (vgl. Pkt. 3.5 Vorversuche).

Die mit Paraffinpulver (PPU) applizierten Proben weisen bei allen Einlagerungsversuchen deutliche Beeinträchtigungen der Beständigkeit gegenüber der unbehandelten Proben (UNB) auf. Die Korrosionstiefen und -raten sind zufolge aller vorliegenden Messwerte deutlich höher als die der Unbehandelten oder mit Paraffin applizierten. Die Korrosionstiefe zufolge Restdruckfestigkeit war für pH0 nicht mehr bestimmbar und wurde daher im Diagramm mit >14mm dargestellt. Wie bei den Betonen ist diese Applikationsform als ungünstig bzw. korrosionsfördernd einzustufen.

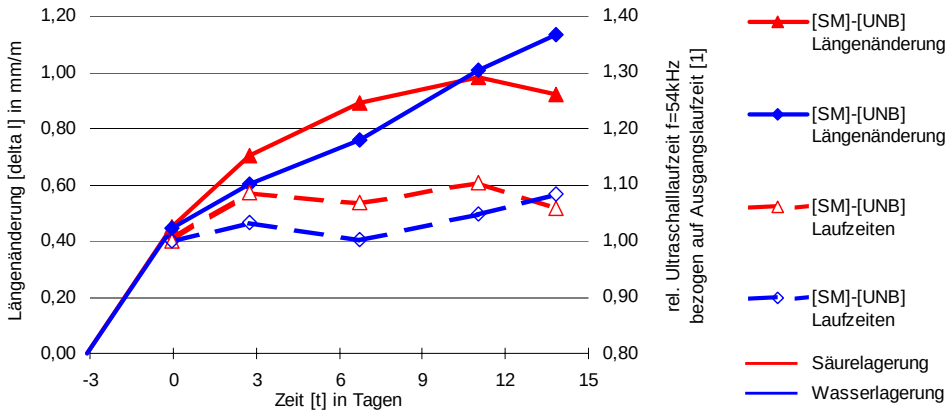


Abbildung 34: Mittelwerte der Längenänderung und Ultraschalllaufzeiten von Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

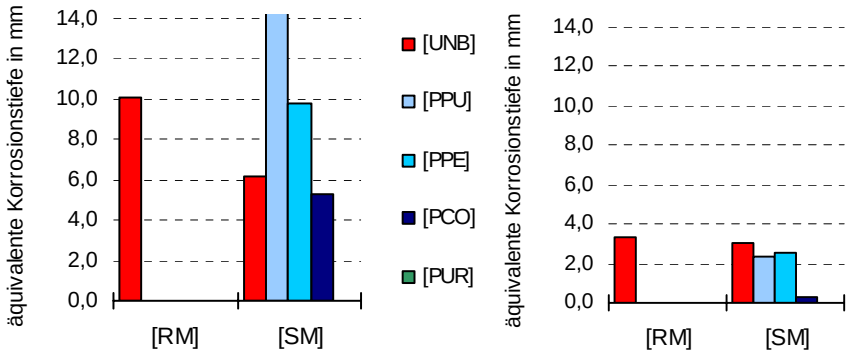


Abbildung 35: äquivalente Korrosionstiefen von verschieden behandelten Referenz- und Sielmörtelproben zufolge der Restdruckfestigkeiten wegen Säurelagerung (li.:) pH0/14 Tage, (re.:) pH1/70 Tage

Anmerkung: Bei der Applikation Paraffin-Pulver (PPU) des Sielmörtels (SM) war die Bestimmung der Druckfestigkeit nicht mehr möglich.

Abbildung 36: Anschnitte der Mörtel für den Einsatz im Sielbau nach Einlagerung bei pH0 über 14 Tage

äquivalente Korrosionstiefen in mm Probekörper (4x4x16cm³)	[RM] unbehandelt	[SM-UNB] unbehandelt	[SM-PPE] Paraffin-Penetration	[SM-PCO] Paraffin-„Coating“	[SM-PUR] PUR-Beschichtung
$x_{Q,t}$ zufolge Querschnittsänderung	4,6	-0,5	2,2	-	-
$x_{M,t}$ zufolge Massenänderung	5,9	0,2	4,1	1,9	0,5
$x_{v,t}$ visuell am Anschnitt bestimmt	6,2	5,0	5,7	3,5	-

Tabelle 21: errechnete bzw. gemessene mittlere Korrosionstiefen von Mörteln für den Einsatz im Sielbau bei Einlagerung pH0 über 14 Tage

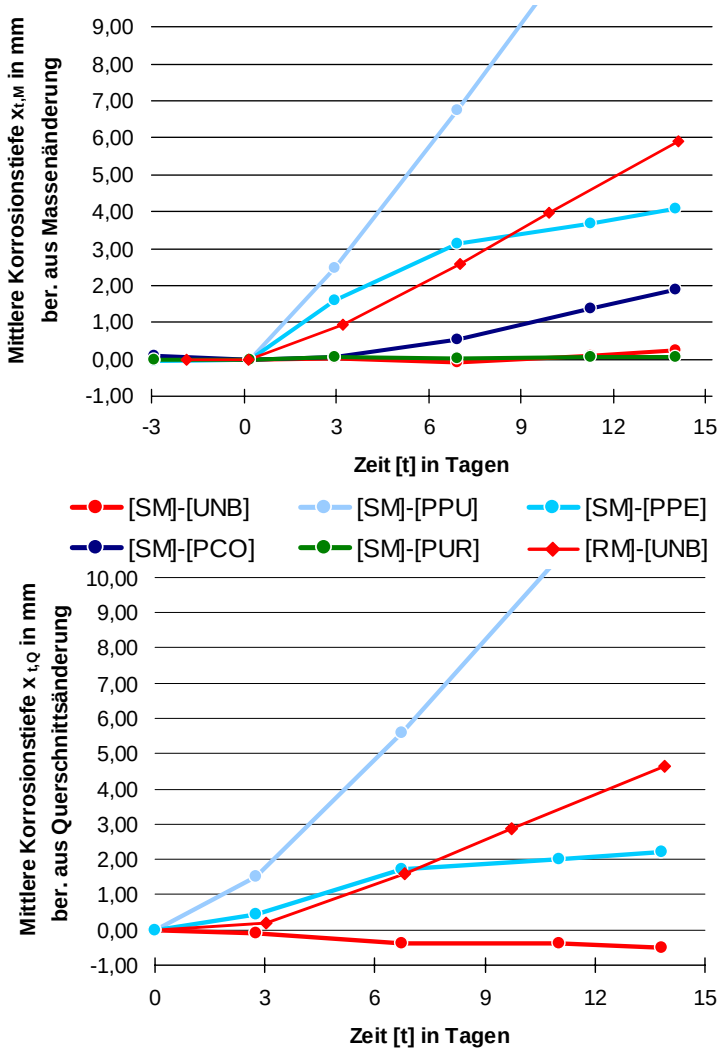


Abbildung 37: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

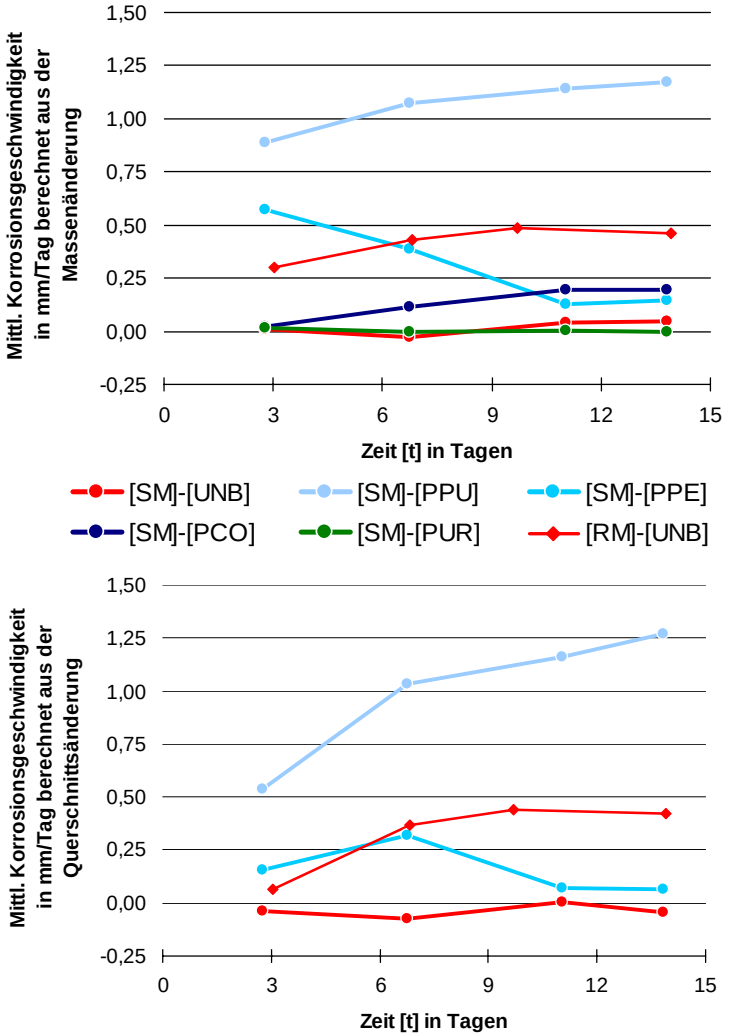


Abbildung 38: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

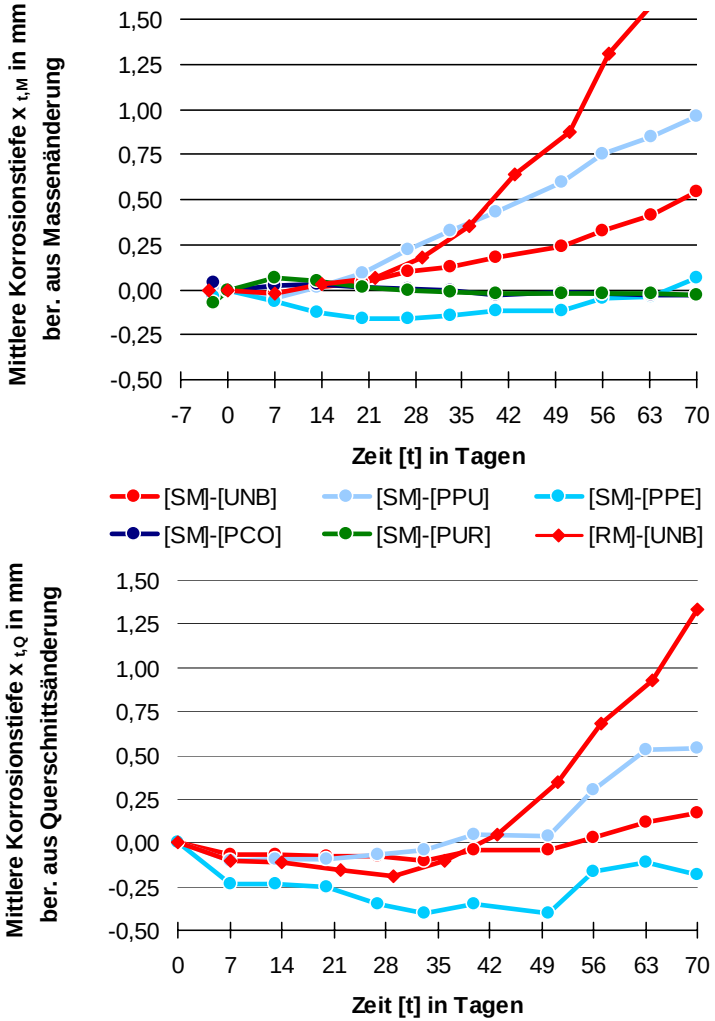


Abbildung 39: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

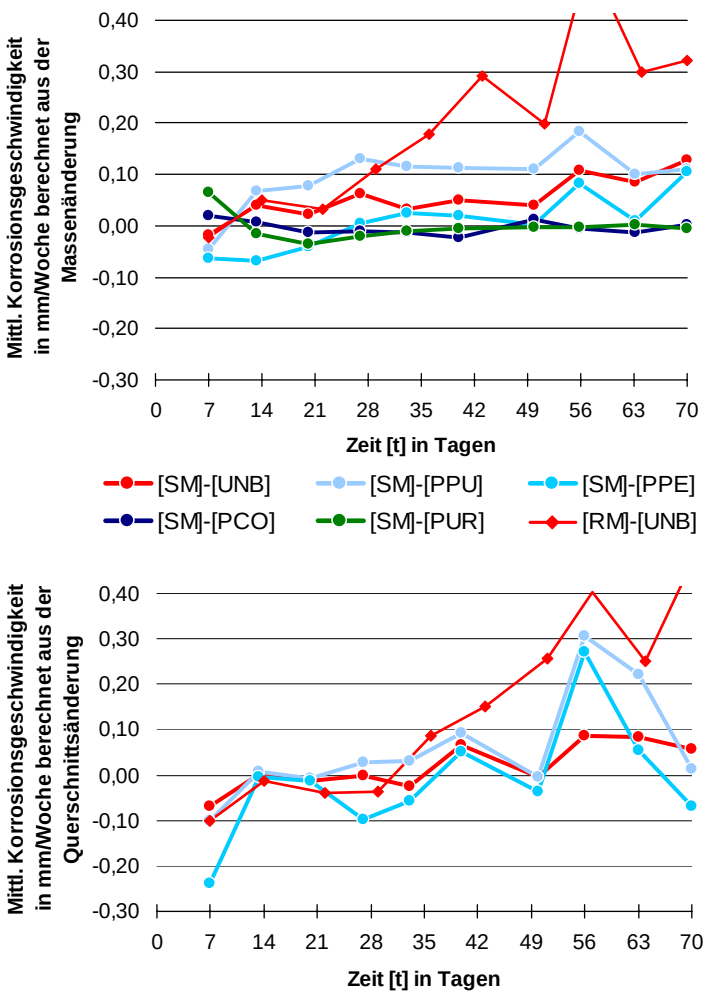


Abbildung 40: zeitlicher Verlauf der Korrosionsraten verschieden behandelter Sielmörtelproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

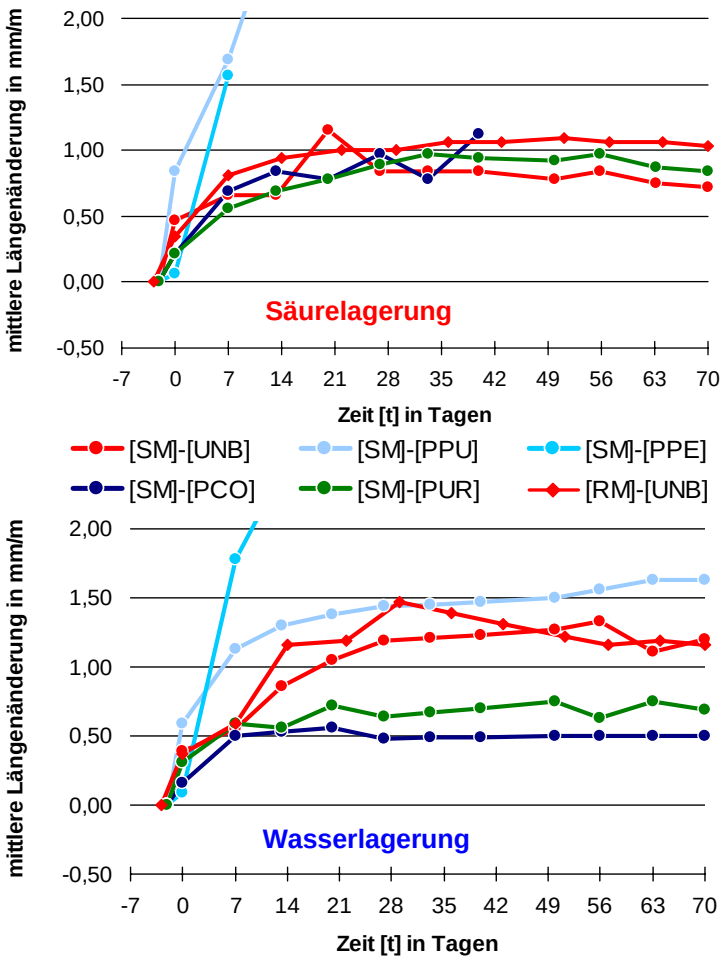


Abbildung 41: zeitlicher Verlauf der mittleren Längenänderung von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Säure- und Wasserlagerung über 10 Wochen

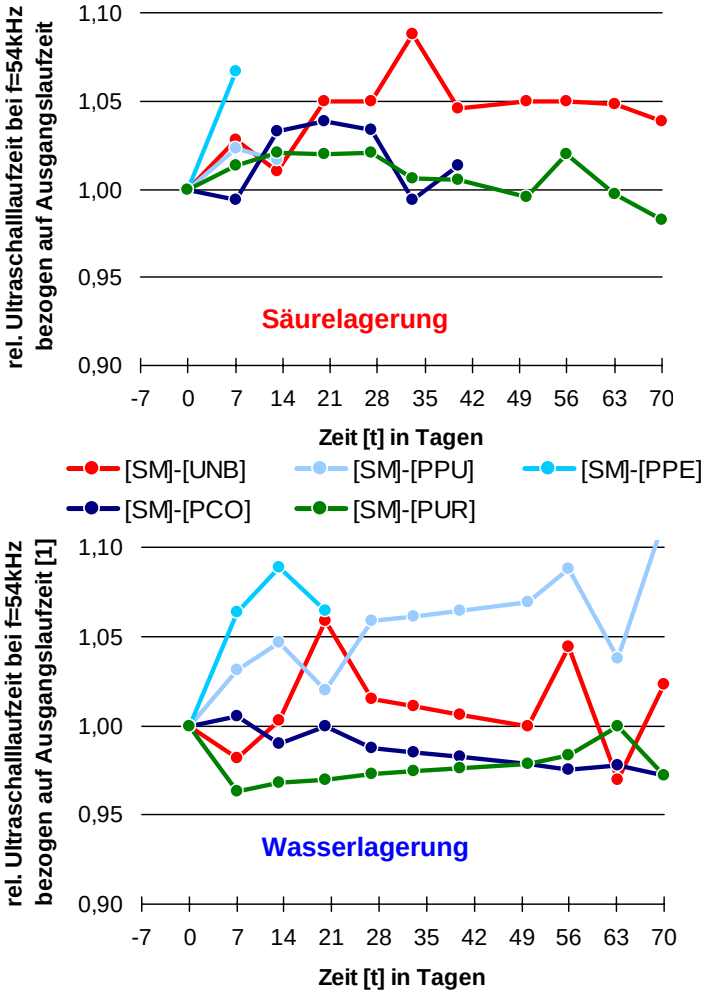


Abbildung 42: zeitlicher Verlauf der mittleren Schalllaufzeiten von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Säure- und Wasserlagerung über 10 Wochen

3.7.2 Kalk- und Kalkzementmörtel bei pH1

In den nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Materialien und die hierbei angewandten Applikationen (Abbildung 24) sowie die Applikationsabläufe (Abbildung 25) für die Einlagerungsversuche bei pH0 und pH1 zusammengefasst.

Probekörper (4x4x16cm³)	[UNB] unbehandelt	[050] Paraffin-Penetration	[100] Paraffin-Penetration	[SME] Silikon-Mikro-emulsion	[WAG] Wasser-glas
[KM]	X	X	X	X	X
[KZM]	X	X	X	X	X

Tabelle 22: Probenübersicht – untersuchte Materialien und Applikationen für die Einlagerungsversuche pH1

Bez.	Applikation	Applikationsvorgang
[UNB]	unbehandelt	-
[050]	Paraffin-penetration 50 %	Trocknung der Proben bei 105°C für 12 h Lagern der Proben im Paraffinbad bei 105°C, Eintauchtiefe 1-2mm Paraffinhorizont steigt in 2-3 h bis zur Hälfte der Probenhöhe Entnahme der Probekörper aus dem Paraffinbad Wenden um 180°, Paraffinverteilung über den Querschnitt 24h, 105°C
[100]	Paraffin-penetration 100 %	Trocknung der Proben bei 105°C für 12 h Lagern der Proben im Paraffinbad bei 105°C, Eintauchtiefe 2cm Penetrationsdauer 24h bei 105°C Entnahme der Probekörper aus dem Paraffinbad
[SME]	Silikon-Mikroemulsion	Anwendung im Verhältnis 1 VT Silikon-Mikroemulsion, 10 VT Wasser Penetrieren der Proben im Unterdruckverfahren mittels Exsikkator Proben bei Behandlung zur Gänze mit Silikon-Mikroemulsion bedeckt Entnahme der Prismen aus der Emulsion nach 3 h
[WAG]	Wasserglas	Anwendung von Kaliwasserglas Penetrieren der Proben im Unterdruckverfahren mittels Exsikkator Proben bei Behandlung zur Gänze mit Silikon-Mikroemulsion bedeckt Entnahme der Prismen aus der Emulsion nach 3 h

Tabelle 23: Übersicht[11]: Applikationsabläufe der unterschiedlich behandelten Materialien bei den Einlagerungsversuchen pH1

Alle Probekörper wurden vor ihrer Einlagerung ins Wasser- bzw. Säurebad im Klimaraum bei 23°C und 50% r.F. bis zur Ausgleichsfeuchtigkeit gelagert.

In der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 43) sind die zeitlichen Verläufe der mittleren relativen Massen verschieden behandelter Kalk- und Kalkzementmörteln zufolge Säurelagerung

[11] weitere Angaben sind unter Pkt. 3.3.3 enthalten, detaillierte Angaben können [Hau02] und [Vol03] entnommen werden

bei pH1 über 10 Wochen dargestellt. Die Massen sind bereits um die stattfindende Aufnahme von Wasser bzw. Lösung korrigiert[12] (vgl. Pkt. 3.4.2.1).

Es sei darauf hingewiesen, dass nach der Korrektur gewisse Unschärfen bestehen bleiben. Durch den chemischen Angriff ändert sich die Porosität in der Korrosionszone und somit auch gegenüber jener der wassergelagerten Proben. Für kleine Korrosionszonen würde die Korrektur jedoch hinreichend genau werden (vgl. Beton, Mörtel mit hoher Rohdichte)

Auf die Messung von Querschnittsänderungen und auf die Darstellung von äquivalenten Korrosionstiefen wurde verzichtet, weil die Ergebnisse für den tatsächlichen Schädigungsverlauf, insbesondere bei Mörteln mit Bildung von großen Korrosionszonen, nicht repräsentativ sind.

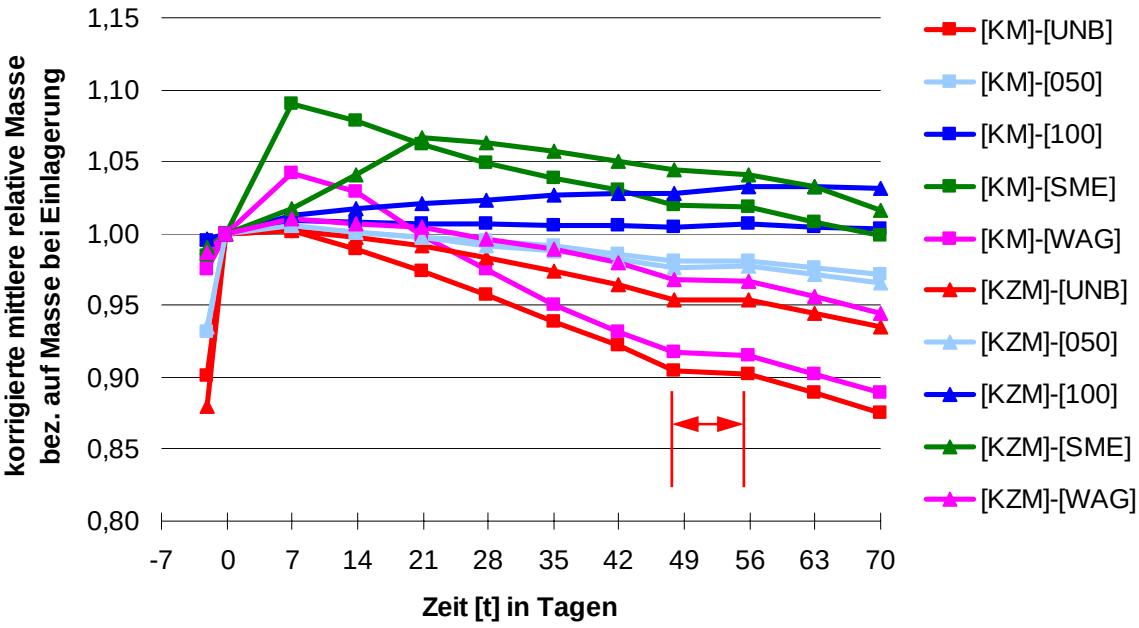


Abbildung 43: zeitlicher Verlauf der korrigierten mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Kalk- und Kalkzementmörteln zufolge Säurelagerung bei pH1 über 10 Wochen

Anmerkung: Für den markierten Zeitraum wurde die schwefelsaure Lösung nicht erneuert. Die Lagerung wurde bei einem konstanten pH-Wert von 1 fortgesetzt.

Die Graphen in Abbildung 43 zeigen, dass durch die Behandlung der Proben (Applikationen 050, 100, SME und WAG) eine Erhöhung des Widerstandes gegenüber Korrosion erreicht wird.

Die unbehandelten Probekörper (UNB) weisen gegenüber den behandelten Probekörpern deutlich größere Massenänderungen auf.

[12] zeitliche Verläufe der mittleren relativen Massen siehe Anhang Seite 121

Nach 47 Tagen wurde die schwefelsaure Lösung nicht erneuert. Es ist ersichtlich, dass das Lösungsvermögen am Ende der Woche bereits stark reduziert ist (Abbildung 43). Der wöchentliche Badwechsel ist für den Erhalt des Lösungsvermögens erforderlich.

Bei den mit Wasserglas (WAG) behandelten Proben ist für die Einlagerung in Wasser eine Wasseraufnahme von über 10 M-% festzustellen, wobei die Wasseraufnahme am Ende der Einlagerung noch nicht abgeschlossen ist (Abbildung 74 im Anhang). Die Verläufe der korrigierten relativen Massen weisen kaum Unterschiede zu den unbehandelten Proben auf. Zu Beginn der Einlagerung kommt es beim Kalkmörtel zu einem merkbaren Anstieg der Masse. Auf Grund von Gipsbildung kommt es zu Beginn der Einlagerung in das Säurebad zu einer Gewichtserhöhung. Die Kurven der mit Wasserglas behandelten Proben und jene der Unbehandelten verlaufen praktisch parallel zueinander, daher sind die Korrosionsraten identisch. Es kann somit zu Beginn der Einlagerung nur eine geringfügige Verzögerung erreicht werden.

Für die mit Silikonmikroemulsion (SME) behandelten Probekörper kann ebenfalls eine deutliche Aufnahme von Wasser festgestellt werden (Abbildung 74 im Anhang). Der markante Massenzuwachs zu Beginn der Einlagerung ins Säurebad bleibt auch nach der Korrektur erhalten (Abbildung 43).
Bei Betrachtung der säuregelagerten Proben ist eine starke Rissbildung an den Kanten der Probekörper feststellbar. Durch den Widerstand beim Brechen der Proben kann eine tiefer reichende Schädigung des Baustoffes erkannt werden. Wie bei den mit Wasserglas behandelten Proben kommt es zu starker Gipsbildung und zu Treiberscheinungen. Eine Reaktion mit dem Injektionsstoff kann nicht ausgeschlossen werden.
Bezüglich der Beständigkeit von Silikonmikroemulsion gegenüber Schwefelsäure wird in [Sch92] und [cud3w] angegeben, dass Silikone und Silane gegenüber schwachen Säuren beständig sind. Gegenüber starken Säuren sind sie jedoch nur bedingt beständig.
Durch die Korrektur der Massenverläufe ist ab der 2. bzw. 3. Woche eine deutliche Gewichtsabnahme ersichtlich (Abbildung 43). Wenngleich die Proben am Ende der Einlagerung messtechnisch noch keinen Massenverlust gegenüber dem Einlagerungsbeginn aufweisen, zeigt die Abnahme der Masse eine deutliche Schädigung. Betrachtet man die Steigung der Verläufe und dadurch gewissermaßen die Korrosionsraten ist ersichtlich, dass diese mit beginnender Schädigung praktisch gleich sind. Wie bei den mit Wasserglas behandelten Proben wird hauptsächlich eine Verzögerung der Schädigung bewirkt.

Der geringere Porenfüllgrad der mit Paraffin applizierten Proben (050) gegenüber der Applikation (100) wird durch die markante Wasseraufnahme vor der Säurelagerung verdeutlicht (Abbildung 74 im Anhang). Gegenüber den unbehandelten Proben weisen sie zumindest beim Kalkmörtel (KM) einen deutlich geringeren Massenverlust auf.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Massenänderung weisen die mit Paraffin applizierten Proben mit höherem Porenfüllgrad (100) auf. Aus der Wasserlagerung wird ersichtlich, dass der für die Wasseraufnahme zur Verfügung stehende Porenraum durch das Paraffin größtenteils verstopft ist (Abbildung 74 im Anhang).
Bei Betrachtung der Verläufe der korrigierten relativen Massen über die Einlagerungsdauer hinweg kommt es zu einer stetigen Erhöhung der Masse, wobei am Ende der Einlagerungsdauer keine weiteren Zuwächse zu verzeichnen sind. Optisch ist während der Einlagerung eine beginnende Schädigung zu erkennen, welche durch eine weiche, anhaftende Schichte ersichtlich wird. Beim Kalkzementmörtel tritt an den Kanten eine Rissbildung auf. Weil diese Korrosion feststellbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Massenverluste durch den Lösenden Angriff durch die mit den Korrosionsprodukten hervorgerufene Gipsbildung überdeckt wird.
Des Weiteren ist deutlich zu erkennen, dass die mit Paraffin applizierten Proben mit höherem Porenfüllgrad (100) einen größeren Widerstand aufweisen als jene mit geringerem Porenfüllgrad (050).

Bei den Untersuchungen mittels Phenolphtaleintest (siehe Pkt. 3.4.2.6) wurden die nachfolgenden Ergebnisse gewonnen. An den ungeschädigten wassergelagerten Proben ist ersichtlich, dass der pH-Wert der Porenlösung für nahezu den gesamten Querschnitt (Abbildung 44) bzw. im Kernquerschnitt (Abbildung 46) über 9,0 liegt.
Durch die Säurelagerung der Proben kommt es zu einem stark lösenden Angriff. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich Korrosionszonen ausbilden. Durch die fortschreitende Herauslösung des Kalkhydrats und anderer alkalischer Elemente kommt es zu einem Absinken des pH-Wertes der Porenlösung.
Nach einer Einlagerungsdauer von 70 Tagen im Säurebad bei pH 1 kann bei den Proben mit Paraffinapplikation (100) erkannt werden, dass der überwiegende Teil des Querschnittes weiterhin einen pH-Wert der Porenlösung von >9,0 aufweist (Abbildung 45 und Abbildung 47).
Bei den mit Paraffin penetrierten Proben mit geringem Porenfüllgrad (050) konnte nur für die Kalkmörtelproben eine Zone erkannt werden, bei welcher der Farbumschlag zumindest in schwachem Ausmaß stattgefunden hat (Abbildung 45).
Die unbehandelten Proben und die behandelten Probekörper mit Silikonmikroemulsion und Wasserglas weisen nach der Säurelagerung eine deutliche Auslaugung auf. Der pH-Wert der Porenlösung liegt jeweils für den gesamten Querschnitt unter 9,0.
Zudem konnte beim Zerteilen der Proben bemerkt werden, dass der Festigkeitsverlust bei diesen deutlich größer war als jener der mit Paraffin applizierten Proben.

Aus den Versuchsergebnissen ist ersichtlich, dass durch die Applikation von Paraffin in Form der Penetration eine deutliche Schutzwirkung von mineralisch gebundenen und besonders kapillarporösen Materialien erzielt werden kann.

Abbildung 44: Farbumschlag durch den Phenolphtaleintest an Bruchstücken von wassergelagerten Kalkmörtelproben; der pH-Wert der Porenlösung liegt für alle Kalkmörtelproben nahezu für den gesamten Querschnitt über 9,0.

Abbildung 45: Farbumschlag durch den Phenolphtaleintest an Bruchstücken von säuregelagerten Kalkmörtelproben (70d – pH 1);

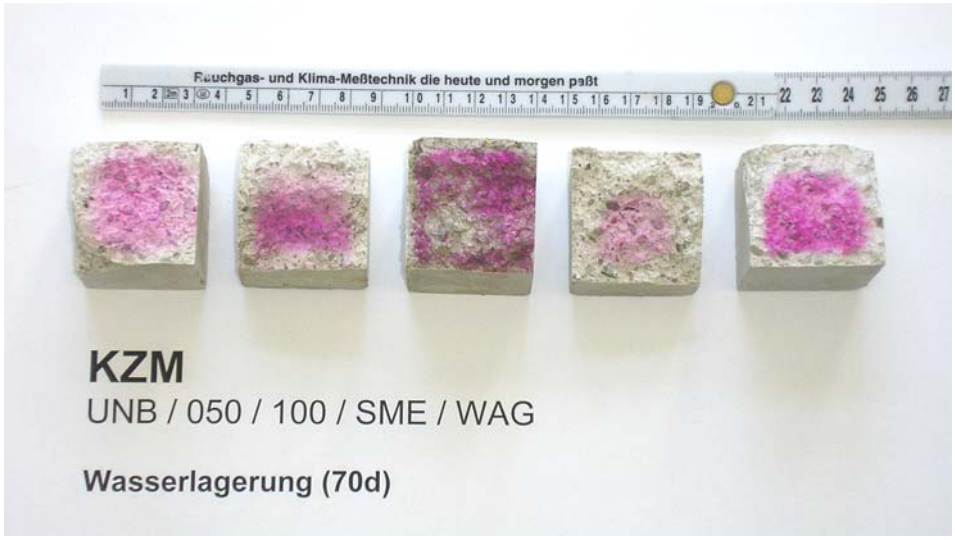


Abbildung 46: Farbumschlag durch den Phenolphtaleintest an Bruchstücken von wassergelagerten Kalkzementmörtelproben; der pH-Wert der Porenlösung liegt für die Kalkzementmörtelproben zumindest im Kernbereich über 9,0.

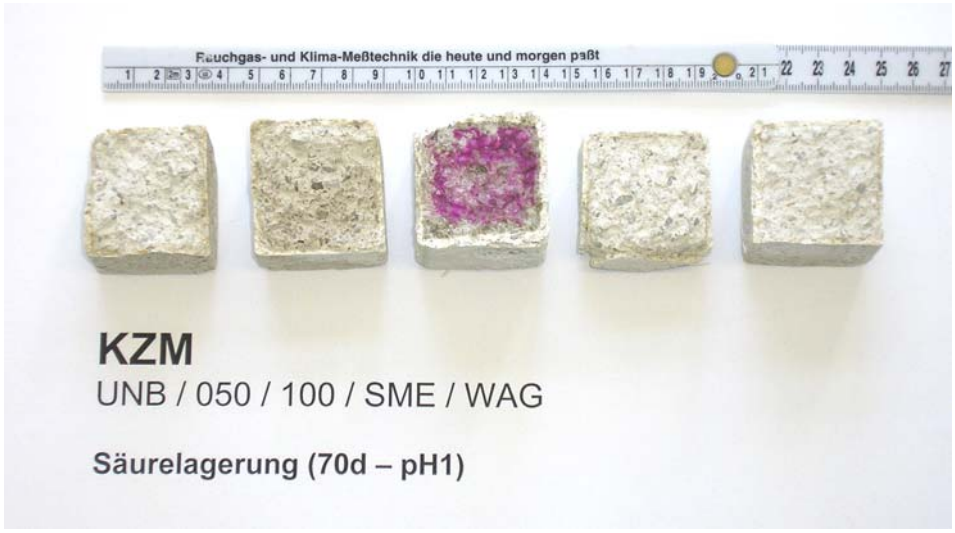


Abbildung 47: Farbumschlag durch den Phenolphtaleintest an Bruchstücken von säuregelagerten Kalkzementmörtelproben (70d – pH 1);

3.8 Ziegel

Die Versuche zur Dauerhaftigkeit von behandelten Ziegeln bei biogener Schwefelsäurekorrosion wurden bei einem pH-Wert von 1 durchgeführt.

In den nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Materialien und die hierbei angewandten Applikationen (Abbildung 24) sowie die Applikationsabläufe (Abbildung 25) für die Einlagerungsversuche zusammengefasst.

Probekörper (4x4x16cm³)	[UNB] unbehandelt	[PPE] Paraffin-Penetration	[PEN] Paraffin-Penetration
Kanalklinker [KAK]	X	X	X
Normalformatziegel [WBZ]	X	X	X

Tabelle 24: Probenübersicht – untersuchte Materialien und Applikationen für die Einlagerungsversuche bei pH1

Bez.	Applikation	Applikationsvorgang
[UNB]	unbehandelt	-
[PPE]	Paraffin-penetration 3d/80°C	Lagerung der Proben bei Laborklima Lagerung im Paraffinbad bei 80°C / 3 Tage, freie Paraffinsättigung Lagerung der Proben bei Laborklima
[PEN]	Paraffin-penetration 5d/120°C	Lagerung der Proben bei Laborklima Lagerung im Paraffinbad bei 120°C / 5 Tage, freie Paraffinsättigung Lagerung der Proben bei Laborklima

Tabelle 25: Applikationsabläufe bei den beiden Ziegelmaterialien für die Einlagerungsversuche bei pH1

Bei Betrachtung des Wasseraufnahmeverhaltens wird ersichtlich, dass bei den mit Paraffin penetrierten Proben eine Porenverstopfung vorliegt. Der kapillare Wassertransport wird dadurch unterbunden. Wegen der Paraffin-Kontraktion beim Erstarren kann jedoch die Aufnahme von Wasser bzw. Lösung nicht gänzlich unterbunden werden (Abbildung 76 im Anhang).

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 48 bis Abbildung 51) sind die Ergebnisse zu den Einlagerungsversuchen bei pH1 zusammengefasst und Anschnitte bzw. Bruchflächen von Proben nach der Säurelagerung abgebildet.

Auf Grund der allgemein guten Beständigkeit von keramischen Baustoffen gegenüber einem Säureangriff, treten im Vergleich zu den Mörteln und Betonen nur geringfügig messbare Schädigungen auf. Diese werden durch die teilweise großen Schwankungen bei der Bestimmung der Korrosionsraten (Abbildung 49) und bei den aus den Restdruckfestigkeiten ermittelten Korrosionstiefen (Abbildung 50) besonders augenscheinlich.

Besonders widerstandsfähig gegenüber dem schwefelsauren Angriff sind, wie erwartet, die bei den Untersuchungen verwendeten Kanalklinker (KAK).
Die größten äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Massen- und Querschnittsänderung konnten für die unbehandelten Kanalklinker bestimmt werden, wobei die Unterschiede zu den behandelten Proben minimal sind (Abbildung 48). Für die unbehandelten (UNB) als auch für die mit Paraffin penetrierten Proben (PPE und PEN) tritt praktisch keine Korrosion auf. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse und den Schwankungen bei den Restdruckfestigkeiten (Abbildung 50) kann weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung der Beständigkeit durch die Applikation von Paraffin erkannt werden.

Für die unbehandelten Ziegel (WBZ-UNB) werden mit der Korrosionstiefe $x_{t,M}$>0,6mm am Ende der Einlagerungsdauer die größten Korrosionstiefen erzielt (Abbildung 48). Die äquivalenten Korrosionstiefen zufolge Querschnitts- und Längenänderung weisen mit 0,3 bis 0,4mm kleinere Werte auf. Dies kann auf die Ausbildung von Korrosionszonen und dem tiefer reichenden Stoffabbau bei einem lösenden Angriff zurückgeführt werden.
Bereits zu Beginn sind die Korrosionsraten vergleichsweise hoch (Abbildung 49). Weil die Änderung der Außenabmessungen deutlich langsamer verläuft als die durch die Massenänderung ausgedrückte Korrosionsfront, kommt es im Laufe der Zeit zu einer Verlangsamung der Korrosion. Dies wird durch die Abnahme der Korrosionsraten zufolge ausgedrückt. Des Weiteren können Auswirkungen durch die Bildung von Korrosionsprodukten, bspw. in Form von Gipsphasen, nicht ausgeschlossen werden. Deren Beitrag ist im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht quantifiziert.
Zwischen dem 21. und dem 42. Tag wurde die Säurelagerung unterbrochen, die Proben waren in diesem Zeitraum in einem Wasserbad. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass bereits angegriffene Stoffphasen durch die Wasserlagerung gelöst werden konnten.
Die Korrosionsraten zufolge Querschnitts- und Längenänderung schwanken sehr stark, liegen aber im Mittel höher als jene der mit Paraffin behandelten Proben.

Für die mit Paraffin penetrierten Proben (WBZ-PPE und WBZ-PEN) sind für $x_{t,M}$ nur geringe Korrosionstiefen feststellbar (Abbildung 48). Zufolge Massenänderung sind praktisch keine Korrosionsraten zu erkennen (Abbildung 49).
Bei den aus Querschnitts- und Längenänderungen ermittelten Korrosionstiefen ist festzustellen, dass diese negative Werte annehmen. Visuell können Treiberscheinungen in Form von Rissen an den Kanten und eine deutliche Entfestigung der Oberfläche erkannt werden (vgl. Abbildung 79 im Anhang), welche leicht ritzbar ist.
Unter Berücksichtigung der stark schwankenden Korrosionsraten (Abbildung 49), dem visuell gleichen Erscheinungsbild (vgl. Abbildung 79) und dem Umstand, dass an den Anschnitten keine Abweichungen zwischen den applizierten Proben (PPE) und (PEN) festgestellt werden

konnten, liegt kein maßgebender Unterschied in der Wirkung zwischen den beiden Applikationen vor.

Bezüglich der ermittelten Restdruckfestigkeiten liegen die äquivalenten Korrosionstiefen für die beiden Paraffin-Applikationen unter jenen der unbehandelten Proben (Abbildung 50), wenngleich die Streuungen wieder zu berücksichtigen sind (vgl. negative Tiefen bei den Kanalklinkern (KAK)).

Der Vergleich am Anschnitt bzw. an den Bruchflächen von unbehandelten (UNB) und mit Paraffin penetrierten Proben (PPE und PEN) zeigt deutlich, dass sich bei den unbehandelten Proben eine wesentlich größere Korrosionszone ausbildet. Die größeren gemessenen Korrosionsraten und Korrosionstiefen bestätigen (Abbildung 51) dies.

Durch die Applikation von Paraffin kann eine Schädigung des Ziegelmaterials nicht verhindert, aber maßgebend verzögert werden. Weil ein großer Teil der Feststoffmatrix nur sehr schwer gelöst werden kann und der Angriff über die bestehenden Kapillarporen stattfindet, wird durch die kapillarverstopfende Applikation von Paraffin (PPE und PEN) eine Verzögerung und Einschränkung des Angriffes auf eine schmale Korrosionszone bewirkt.

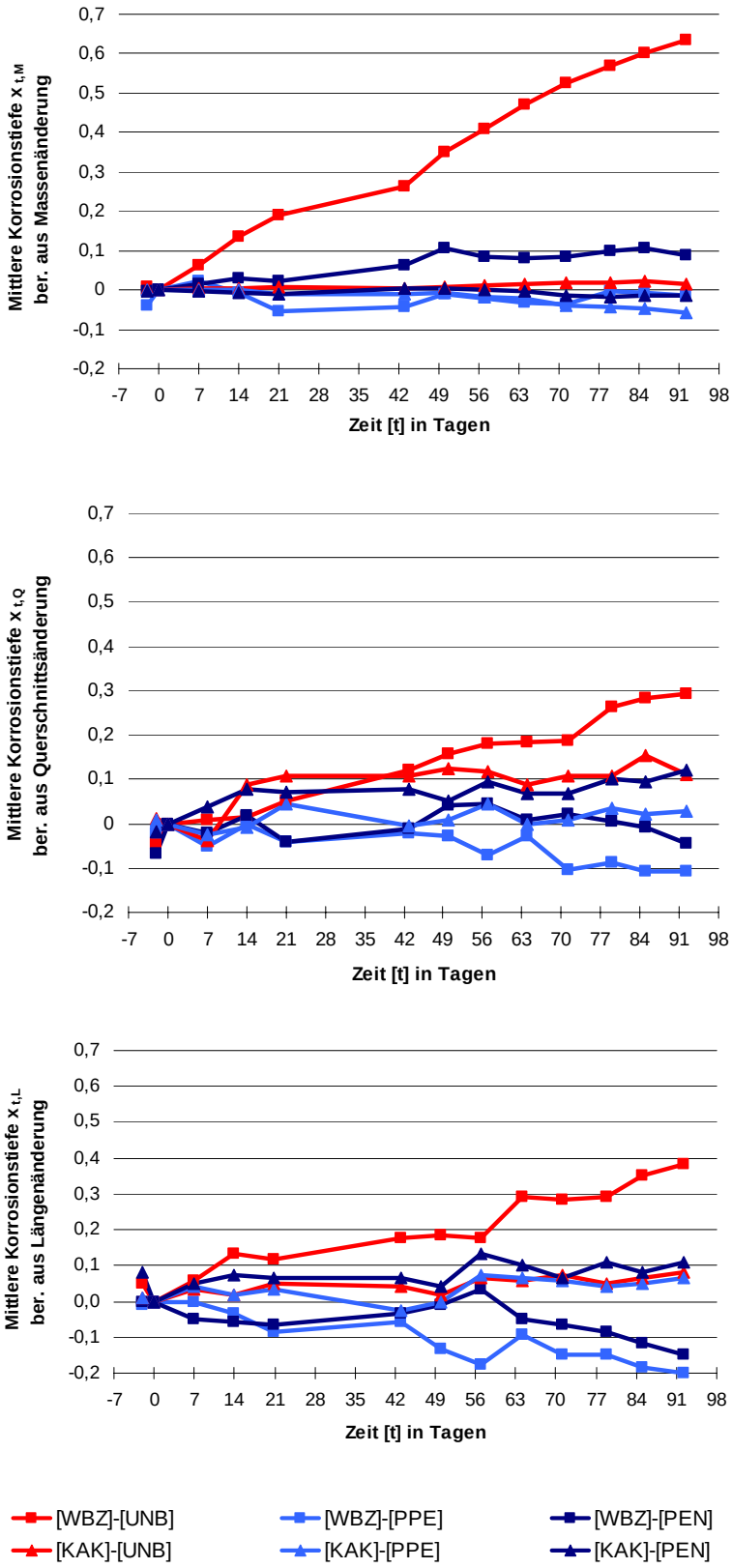


Abbildung 48: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Ziegelproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

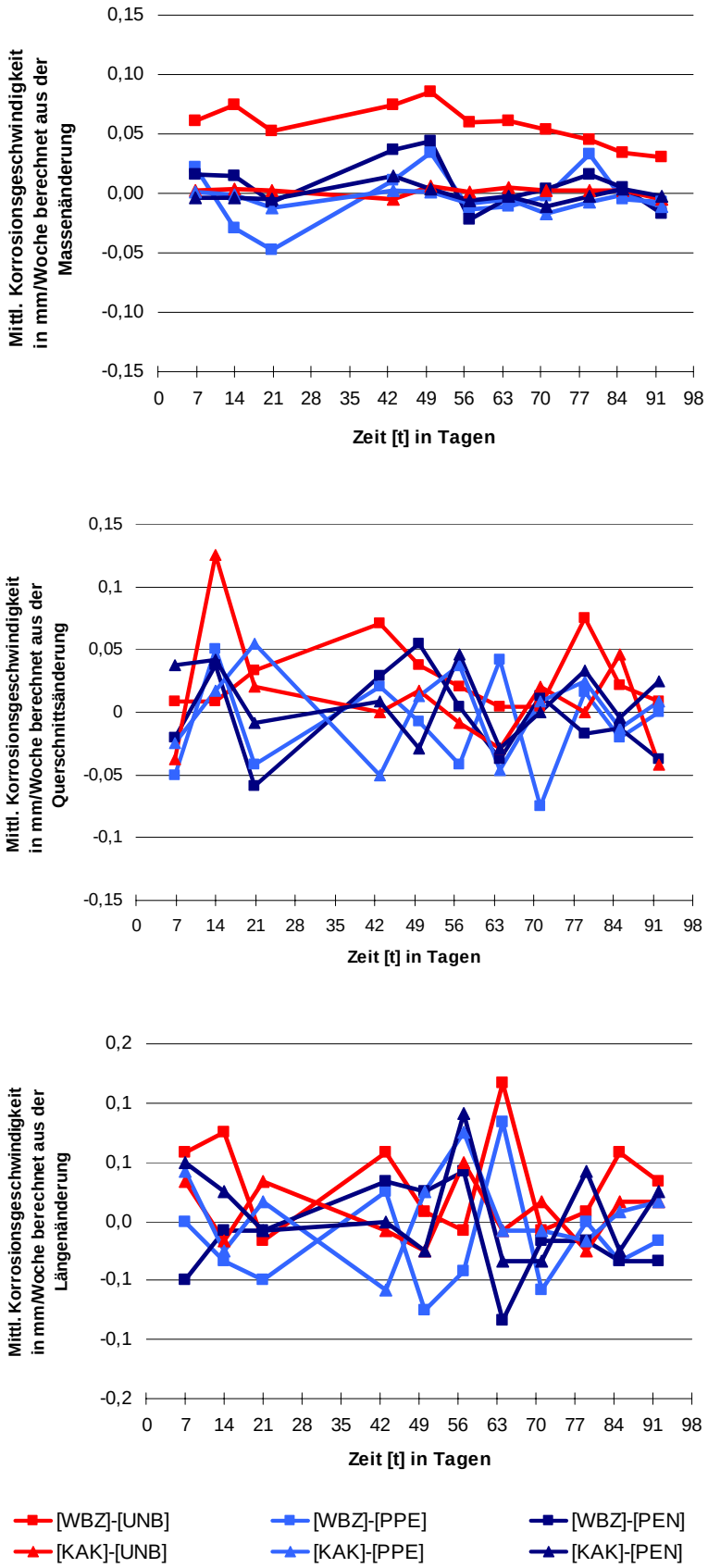


Abbildung 49: zeitlicher Verlauf der äquivalenten Korrosionstiefen verschieden behandelter Ziegelproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage

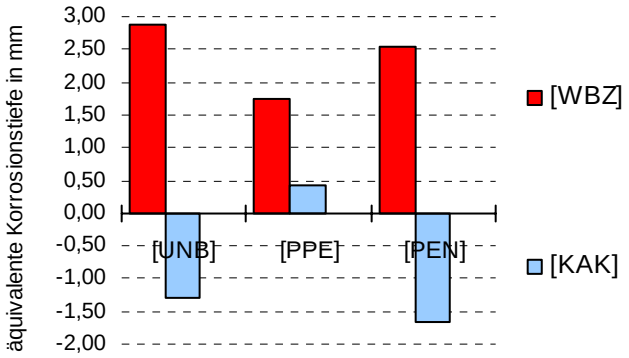


Abbildung 50: **äquivalente Korrosionstiefen von verschieden behandelten Ziegelproben zufolge der Restdruckfestigkeiten nach Säurelagerung bei pH1 über 70 Tage**

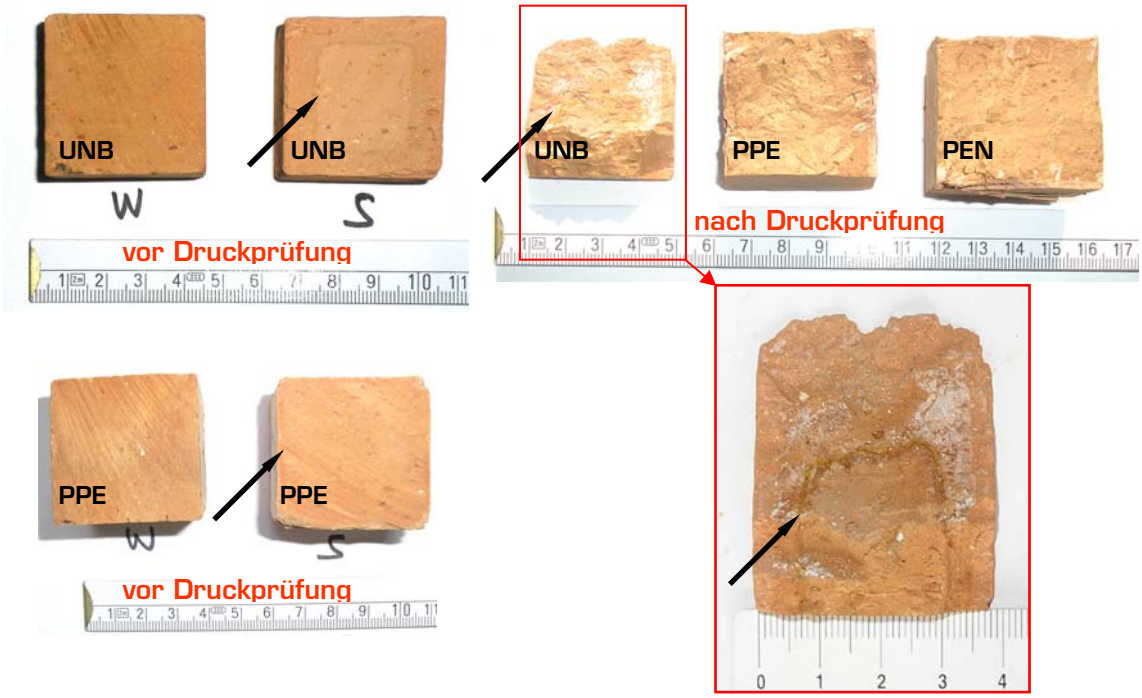


Abbildung 51: **Anschnitte und Bruchstücke von unbehandelten und penetrierten Ziegeln (WBZ) nach deren Einlagerung im Wasserbad bzw. Säurebad bei pH1**

Anmerkung: **li. Bildhälfte: Anschnitte unbehandelter und penetrierter Proben vor der Druckprüfung; die Pfeile markieren eine erkennbare Zonenbildung bei den säuregelagerten Proben (Anmerkung: PEN optisch identisch mit PPE)**
re. Bildhälfte: Bruchstücke säuregelagerter Proben nach der Druckfestigkeitsprüfung; bei den unbehandelten Proben ist in der Korrosionszone eine deutliche Kristallisation zu erkennen; bei den mit Paraffin penetrierten Proben sind im Querschnitt keine Kristalle ersichtlich, lediglich Ausblühungen an der Oberfläche der Proben; Phasenneubildungen, welche die Treiberscheinungen verursachen, sind auf eine kleine Korrosionszone am Rand beschränkt

3.9 Schlussfolgerungen

Bei den einzelnen Untersuchungen wurde gezeigt, dass für Materialien, die einem starken Angriff durch biogener Schwefelsäurekorrosion unterliegen, durch die Applikation von Paraffin eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit erzielt werden kann. Die Wirksamkeit ist neben der Art der Behandlung abhängig vom applizierten Material. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und deren Wirkungsweise angegeben.

3.9.1 Beton und Mörtel

3.9.1.1 Applikation Paraffin-Pulver

Wenngleich die Paraffinpulver-Applikation als korrosionsfördernd einzustufen ist, muss festgehalten werden, dass nicht das Paraffin das ungünstige Verhalten bewirkt, sondern die durch die Zugabe bedingte Veränderung der Feststoffmatrix die beobachteten Effekte verursacht.

Bei den Mörteln und Betonen kommt es durch die Zugabe des Paraffins zu einer Änderung der Materialeigenschaften. Durch die Temperierung und die dadurch erzielte Umverteilung des Paraffins kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Porosität (vgl. relative Massenänderung von wassergelagerten Proben im Anhang). Es wird eine hydrophobe Wirkung erzielt, durch welche die Reaktionen zu Beginn der Einlagerung reduziert werden. Die hohe Porosität und der Umstand, dass durch die Umverteilung des Paraffins bei der thermischen Behandlung keine geeignete Auskleidung der Poren erzielt werden kann, begünstigen die Korrosion.

3.9.1.2 Applikation Paraffin-Coating

Eine Paraffinbeschichtung ohne Fehlstellen ist flüssig- und gasdicht. Dies kann vor allem bei den Vorversuchen gezeigt werden. Das Aufbringen einer Beschichtung ohne Fehlstellen stellt somit den absoluten Schutz des Baustoffes bzw. Bauwerkes dar.

Der für diese Untersuchungen gewählte Applikationsvorgang (siehe Pkt. 3.5) bietet nicht für alle Materialien einen umfassenden Schutz. Die Schutzwirkung besteht nur bis zum Versagen der Beschichtung. Es wird darauf hingewiesen, dass für die Versuche ein Beschichtungsvorgang gewählt wurde, der nicht für die einzelnen Materialien optimiert worden ist und zudem weiter verbessert werden kann. Außerdem sollten Grenzen aufgezeigt werden, welche bei einer hinreichend satten Beschichtung nicht erkennbar sind (vgl Pkt. 3.5).

Für die dichteren Materialien (Betone), für die diese Applikationsform in Vorversuchen optimiert wurde, konnte eine sehr gute Schutzwirkung erzielt werden, welche bezüglich eines schwefelsauren Angriffes mit einer Polyurethanbeschichtung vergleichbar ist und vereinzelt bessere Ergebnisse liefert.

Gelingt es einen geeigneten Applikationsvorgang für den zu schützenden Baustoff zu finden und kann das verwendete Paraffin hinsichtlich der Ausbildung von Fehlstellen (Verringerung der Kontraktion beim Erstarren) optimiert werden, ist eine hervorragende Schutzwirkung gegenüber dem Angriff von aggressiven Medien erzielbar.

3.9.1.3 Applikation Paraffin-Penetration

Beim besonders porösen Kalk- und Kalkzementmörtel wirkt sich die Penetration der Probekörper mit Paraffin positiv auf das Auslaugungsverhalten und dadurch auf die Dauerhaftigkeit aus.

Für die mineralisch gebundenen Materialien des Siedlungswasserbaus (Mörtel und Betone) konnte nicht für jeden Fall eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit festgestellt werden. Besonders bei den höheren pH-Werten war eine Verzögerung der Korrosion augenscheinlich. Überlegungen zum Schädigungsprozess sollen Antworten auf die folgenden Fragen geben:

- Warum lässt die Schutzwirkung nach?
- Warum sind die Korrosionsraten der unbehandelten und behandelten Materialien gleich?

Überlegungen zur Zusammensetzung und chemische Eigenschaften der beteiligten Stoffe:

Paraffin ist inert.
→ es findet keine chemische Reaktion mit der Säure oder dem Baustoff statt
Die Baustoffzusammensetzung (Feststoff) ändert sich durch die Paraffin-Behandlung nicht.
→ die chemische Reaktion mit der Säure bleibt gleich

Überlegungen zur Wirkung der Paraffin-Penetration:

Durch die Penetration wird die Porosität des Baustoffes erheblich reduziert.
→ es findet eine verminderte Reaktion mit der Säure oder dem Baustoff statt

Aus Arbeiten zur Vorhersage des zeitlichen Verlaufs von physikalisch-chemischen Schädigungsprozessen an mineralischen Werkstoffen ([Fra3w], [Bed03], [Fr23w], [Be23w] und [Bed3w]) ist ersichtlich, dass im Zuge eines Säureangriffes Korrosionszonen mit erheblichen Porositäten entstehen.

In [Her99a] sind Ergebnisse zur Porosität von säuregelagerten Proben angeführt. Die Untersuchungen sind mittels Quecksilberporosimetrie durchgeführt worden, wobei neben verschiedenen Materialien auch verschiedene Korrosionszonen und Säuren betrachtet wurden. Gegenüber dem ungeschädigten Baustoff wurde durch die Einwirkung von salzsauren Wässern bei einem pH-Wert 1 eine 10 bis 20-fache Gesamtporosität für die äußeren Korrosionszonen von Zementsteinen gemessen. Für die schwefelsauren Wässer entsteht als äußere Korrosionsschicht eine mit Kieselsäure druchsetzte Gipsschicht. Porositätskennwerte können

für den pH-Wert 1 auf Grund der Phasenumwandlung bei der Präparation nicht angegeben werden. Für die pH-Werte 3 und 5 lagen die erzielten Ergebnisse jedoch im Bereich der Salzsauren. Bezüglich der Porosität an der Korrosionsfront wird vermerkt, dass die Gesamtporosität abnimmt. Einerseits wird durch den sauren Angriff Portlandit gelöst, was zu einer Teilerweiterung von Porenräumen führt, andererseits kommt es durch die Deponierung von Trisulfat zu einer Reduktion des Porenraumes. Des Weiteren wird jedoch angegeben, dass neuer Porenraum bei größeren Porenradien entsteht.

Durch den Abbau der Feststoffmatrix und des Zuschlages entstehen neue Hohlräume, vereinfacht ausgedrückt ein neues Porensystem über welches die Säure auf den bislang ungeschädigten Baustoff einwirken kann. Weil sich dort kein Paraffin befindet, kann es den Baustoff dort nicht schützen.

In der nachfolgenden Abbildung 52 ist der bei der Applikation Paraffin-Penetration stattfindende Schädigungsprozess in seiner zeitlichen Abfolge grafisch dargestellt und nachfolgend beschrieben:

T0 - Behandlung der Materialien durch Paraffin-Penetration:

UNB: Ausgleichsfeuchter Zustand nach Vorlagerung.

PPE: Die Poren werden durch Penetration mit Paraffin verfüllt. Je nach Applikationsvorgang (Vorbehandlung, Paraffinart, Behandlungstemperatur und -dauer) werden unterschiedliche Porenfüllgrade erreicht. Nach der Entnahme aus dem Paraffinbad beginnt das Paraffin zu erstarren und kontrahiert. Die Poren sind weitgehend verstopft, die innere und die sichtbare Oberfläche sind versiegelt, Fehlstellen sind vorhanden.

T1 - Vorlagerung der Materialien im Wasserbad:

UNB: Der Großteil der Poren füllt sich mit Wasser.

PPE: Nur zugängliche Poren werden mit Wasser gefüllt.

T2 - Einlagerung ins Säurebad:

UNB: Eine starke Reaktion ist bemerkbar. Der Abbau des Baustoffes beginnt, die Feststoffmatrix korrodiert. Hierbei entsteht neuer Porenraum. Zu Beginn findet der Angriff über die bestehenden Poren statt.

PPE: Es finden keine wahrnehmbaren Reaktionen statt. Über das verstopfte Porensystem und die dadurch ausgekleideten Oberflächen kann kein Angriff erfolgen. Die stattfindenden Reaktionen sind auf die vorhandenen „Fehlstellen“ beschränkt.

T3 - Säurelagerung:

UNB: Eindringen der Protonen der Säure über das Porensystem und über die neu gebildeten Poren. Es stellen sich deutliche Massenverluste und beginnende Querschnittsverluste bei Anlagerung von Korrosionsprodukten ein.

PPE: Der Zutritt für die Protonen ist über das ursprüngliche Porensystem nach wie vor blockiert. Es kommt zu einer Aufweitung der Fehlstellen. Anfänge der Ausbildung eines neuen Porensystems, Bildung und Anlagerung von Korrosionsprodukten. Es kommt vorerst zu Massen- und Querschnittszuwächsen.

T4 - Fortschreitende Korrosion:

UNB: Es hat sich bereits eine Korrosionszone ausgebildet. Der Angriff erfolgt im Wesentlichen über das sich ständig erweiternde Porensystem. In Abhängigkeit der Randbedingungen liegen konstante Korrosionsraten vor.

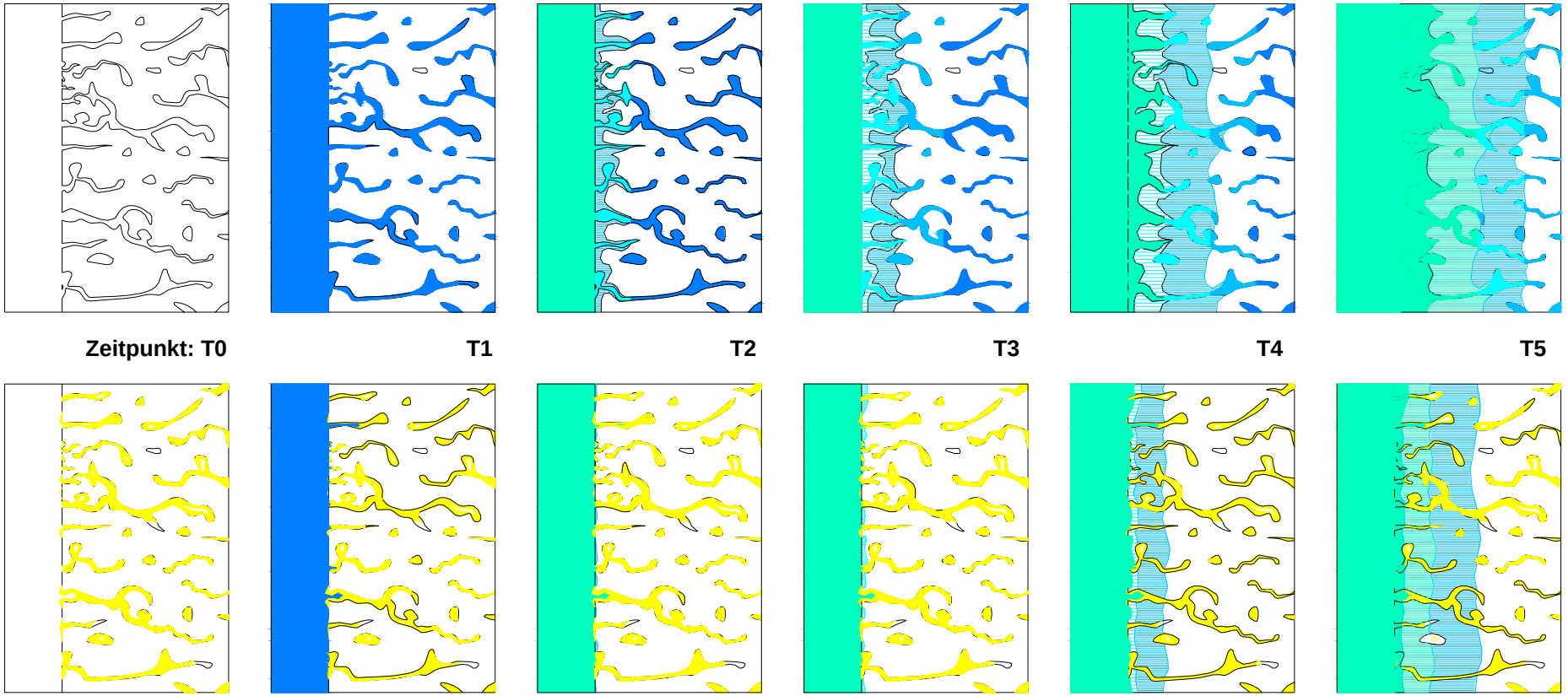
PPE: Über das neu gebildete Porensystem können die Protonen nun ungehindert vordringen. Die Massenzuwächse durch Bildung des Korrosionsproduktes überdecken den stattfindenden Abtrag nicht mehr. Es finden keine weiteren Querschnittszuwächse mehr statt.

T5 - Korrosionsfortschritt mit konstanten Korrosionsraten:

UNB: Wie bereits beim Zeitpunkt T4 beschrieben, kommt es bei gleich bleibenden Randbedingungen zum konstanten Fortschreiten der Korrosion.

PPE: Es treten deutliche Massenverluste auf. Es kann ein beginnender Querschnittsabtrag verzeichnet werden. Zu diesem Zeitpunkt hat sich bereits ein Porensystem gebildet, über welches nun der Angriff stattfindet. Die Paraffin-Penetration verliert zu diesem Zeitpunkt die schützende Wirkung. Nun verläuft die Korrosion unter konstanten Korrosionsraten.

obere Reihe: unbehandelte Materialien



untere Reihe: mit Paraffin penetrierte Materialien

Abbildung 52: Schematische Darstellung des Schädigungsprozesses beim Angriff von schwefelsauren Lösungen an unbehandelten und mit Paraffin penetrierten mineralisch gebundenen Materialien mit geringer Porosität zu verschiedenen Zeitpunkten Ti

Anmerkung: Bei der gewählten Darstellung handelt es sich um eine zeichnerische Vereinfachung/Abstraktion

3.9.2 Ziegel

Für die Ziegelmaterialien wurde nur die Applikation Paraffin-Penetration untersucht. Eine Anwendung der Paraffin-Pulver-Applikation ist hier nicht möglich und auf die Beschichtung der Proben wurde verzichtet.
Auf Grund der allgemein guten Beständigkeit von keramischen Baustoffen gegenüber Säureangriff treten im Vergleich zu den Mörteln und Betonen nur geringfügig messbare Schädigungen auf.

Die untersuchten Kanalklinker weisen eine hohe Dauerhaftigkeit gegenüber dem starken Säureangriff auf. Wenngleich das Paraffin keine Schutzwirkung zeigen kann ist festzuhalten, dass sich die Porenverstopfung nicht nachteilig auf die Lagerung im schwefelsauren Medium auswirkt.

Der Ziegelwerkstoff anderer Einsatzgebiete, mit geringer Beständigkeit und großer Porosität, erfuhr durch die Applikation von Paraffin eine maßgebende Erhöhung der Dauerhaftigkeit.
Für die unbehandelten Ziegel werden am Ende der Einlagerungsdauer die größten Korrosionstiefen erzielt. Des Weiteren kann optisch die Ausbildung einer Korrosionszone erkannt werden. Es erfolgt ein tiefer reichender Stoffabbau, der auf einen lösenden Angriff zurückzuführen ist. Messungen von Massen- und Querschnittsänderung geben diesen Umstand wieder. Die Korrosionszone wird an gebrochenen Proben zusätzlich durch die Ausbildung von Gipskristallen markiert. Die gemessenen Restdruckfestigkeiten bestätigen die Zonenbildung.
Bei den mit Paraffin penetrierten Proben sind im Querschnitt keine Kristalle ersichtlich, lediglich Ausblühungen an der Oberfläche der Proben und die Rissbildung entlang der Kanten lassen auf einen treibenden Angriff schließen. Diese sind, optisch erkennbar, auf eine kleine Korrosionszone am Rand beschränkt. Die gemessenen Restdruckfestigkeiten verdeutlichen dieses Schadensbild.

Der über den vorhandenen Porenraum stattfindende Angriff wird durch die Porenverstopfung mit Paraffin auf eine schmale Korrosionszone beschränkt, weil das ursprüngliche Stoffgerüst des Ziegels nur teilweise und sehr langsam zerstört wird. Durch die Applikation von Paraffin kann eine Schädigung des Ziegelmaterials nicht verhindert, aber maßgebend verzögert werden.

4 Einfluss der Karbonatisierung auf mit Paraffin appliziertem Beton

4.1 Versuchsaufbau

Wie unter Pkt. 2.4.3 beschrieben, wurden die Versuche zur Karbonatisierung durch Prozessbeschleunigung mittels Druckkarbonatisierung, in Anlehnung an [Sta95], [Roy99] und [Ati02] durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 53 dargestellt. In der nachfolgenden Tabelle 26 sind die gewählten Randbedingungen zusammengefasst.

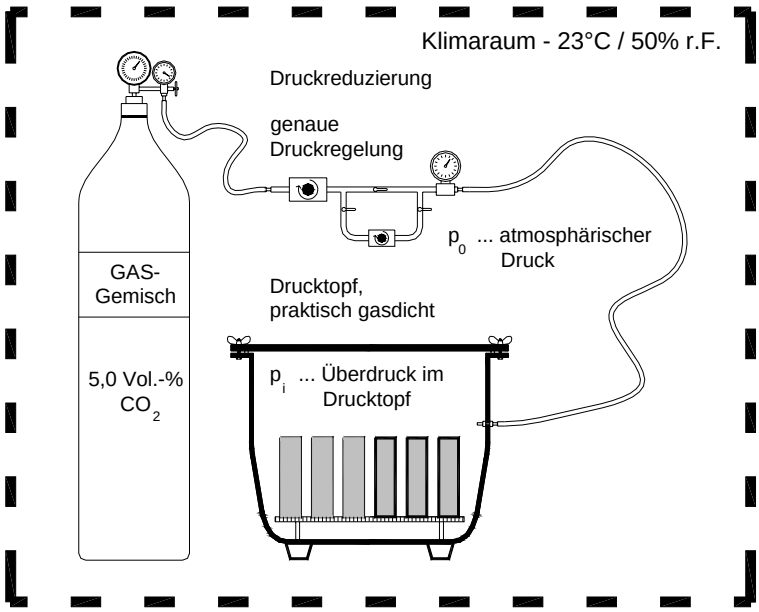


Abbildung 53: gewählter Versuchsaufbau für die Bestimmung der Dauerhaftigkeit von behandelten Baustoffen gegenüber Karbonatisierung

Beschreibung:	Randbedingung:	Anmerkung:
Vorlagerung der Proben im Klimaraum	bei 23°C / 50 % r.F.	bis zur Massenkonstanz
Raumklima im Versuchsraum	23°C / 50 % r.F.	-
Überdruck im Drucktopf	$p_{i,Ü}$ =1,0 ± 0,05 bar	wird durch eine Druckregelungseinheit konstant gehalten
Zusammensetzung Gasgemisch	5,0 Vol.-% CO_2 20,0 Vol.-% O_2 75,0 Vol.-% N_2	Druckflasche ca. 100 bar, Reduktion mittels Druckregeleinheit
CO_2-Volumenkonzentration im Drucktopf	ca. 4,7 Vol.-%	Erneuerung 1x wöchentlich; stufenweise Druckaufbringung, vgl. Abbildung 54
Messintervalle	nach 4, 5 bzw. 9 Wochen	2-tägige Unterbrechung der Prüfserie bei Messung

Tabelle 26: Zusammenfassung der wesentlichen Randbedingungen für die Versuche zur Druckkarbonatisierung

Um bei der wöchentlichen Erneuerung des Gasgemisches eine reproduzierbare CO_2-Konzentration gewährleisten zu können, wurde der Ablauf nach [Ati02] gewählt. Vereinfacht wurde das *ideale Gasgesetz* dahingehend, dass das Volumen eines Gases umgekehrt proportional zum Druck ist. Dadurch ergibt sich bei Einbringen des Gasgemisches und einem Überdruck von 1 bar (entspricht ca. dem doppelten atmosphärischen Druck) eine CO_2-Konzentration von ca. 2,5 Vol.-%. Nach Reduktion des Überdruckes bleibt die CO_2-Konzentration erhalten. Durch erneute Einbringung des Gasgemisches auf einen Überdruck von 1 bar kann die CO_2-Konzentration weiter gesteigert werden. Nach vier Druckstufen ist die reproduzierbare Versuchskonzentration von 4,7 Vol.-% erreicht (siehe Abbildung 54).

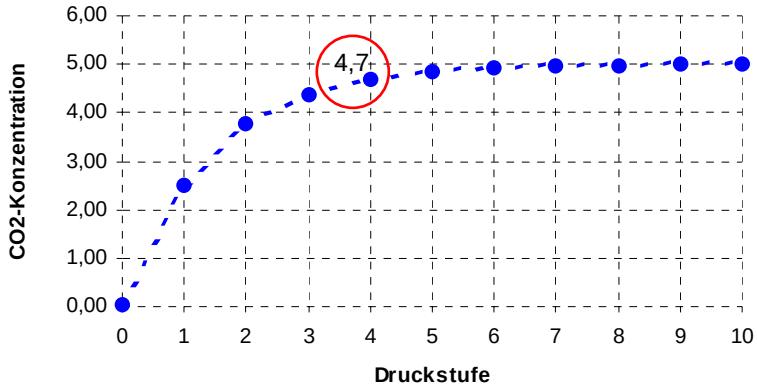


Abbildung 54: CO_2-Konzentration nach den einzelnen Druckstufen; am Ende jeder Stufe beträgt der Druck 1 bar; CO_2-Konzentration nach 4 Stufen 4,7 Vol.-%

Nach [Grü01] sind relative Luftfeuchten zwischen 50% und 70% am günstigsten für die Karbonatisierung. Die maximale Carbonatisierungsgeschwindigkeit tritt nach [Sta01] bei relativen Luftfeuchten zwischen 60% und 80% auf, dies entspricht etwa den mitteleuropäischen Bedingungen.

Die Probekörper wurden vor der Druckkarbonatisierung bis zur Ausgleichsfeuchte bei 50 % r.F. gelagert (vgl. Tabelle 26). Es wird davon ausgegangen, dass die zu einer Karbonatisierung notwendige Feuchtigkeit vorhanden ist.
Im Zuge des Durchlaufens der Druckstufen kommt es zu einer Reduktion der Feuchtigkeit im Drucktopf, während im Verlauf der Karbonatisierung entsprechend der Reaktionsgleichung (vgl. Pkt. 2.4.1) Wasser anfällt. Während der Drucklagerung sind keine feuchteregulierenden Maßnahmen vorgesehen. Die miteinander verglichenen Ergebnisse stammen von gemeinsam gelagerten Proben.

4.2 Materialien, Applikationen und Probekörper

Für die Versuche zur Karbonatisierung wurden Probekörper von selbst hergestellten Betonen der Säureeinlagerungsversuche verwendet, welche unterschiedliche Herstellungszeitpunkte aufweisen. Die äquivalenten Expositionsklassen nach EN 206-1 sind angegeben (Tabelle 27).
Die Materialien wurden einerseits unbehandelt belassen und andererseits mit Paraffin appliziert. Es kam das gleiche Paraffin zum Einsatz wie bei den Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion (siehe Pkt. 3.3.1).

Probekörper[13] (4x4x16cm³)	Expositionskl. gem. EN 206-1	Bez.	Applikation	Applikationsvorgang
[XA1]	XA1 / XC4	[UNB]	unbehandelt	-
[XA2]	XA2 / XC4	[PPE]	Paraffin-Penetration[14]	3d / 80°C freie Paraffinsättigung, Proben voll bedeckt

Tabelle 27: verwendete Betone und untersuchte Applikationen bei den Proben für die Druckkarbonatisierung

Die Probekörper wurden nach der Behandlung entsprechend dem nachfolgenden Schema für den Versuch vorbereitet (Abbildung 55).

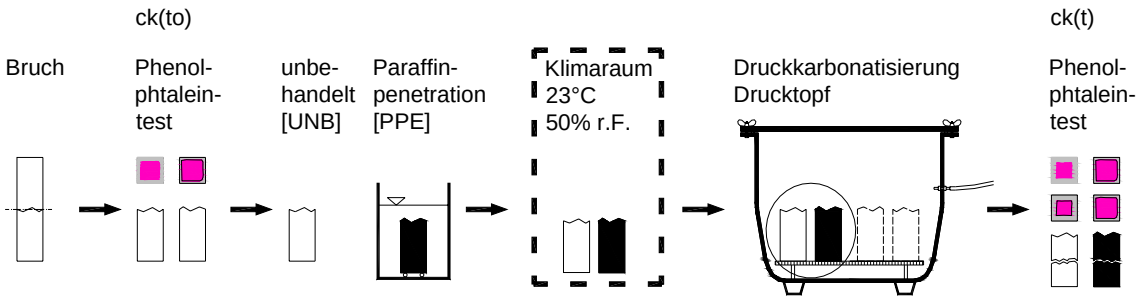


Abbildung 55: Darstellung des Versuchsablaufes der Druckkarbonatisierung

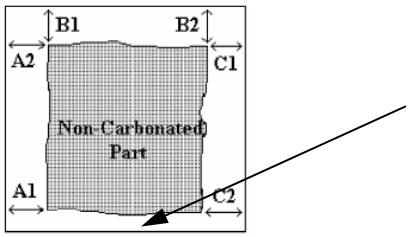
4.3 Messgrößen und Methodik

Die Bestimmung der Karbonatisierungstiefen erfolgte durch Besprühen frischer Bruchflächen mit einer Phenolphtaleinlösung. Die Anwendung einer Indikatorlösung im Mischverhältnis 0,33M-% Phenolphtalein (Indikator pH 8,2-9,8) zu 99,66M-% Ethanol (96%ig) hat sich als günstig erwiesen.
Bei den mit Paraffin penetrierten Proben findet der Farbumschlag verzögert und teilweise weniger intensiv statt. Es ist davon auszugehen, dass dies durch die Porenverstopfung des Paraffins hervorgerufen wird.

[13] Beschreibung und Zusammensetzung der Materialien siehe Pkt. 3.2.1, Seite 37
[14] Beschreibung der Applikation siehe Pkt. 3.3.1.2, Seite 42

Die Eindringtiefe der Alkalitätsgrenze wurde mittels Schublehre auf 0,1mm erfasst. Die Bestimmung erfolgte zwei Tage nach dem Besprühen, weil sich die Alkalitätsgrenze noch geringfügig verändert.

Es erfolgte eine Mittelwertbildung von 6 Einzelwerten je Querschnitt. Die Einzelwerte wurden an den Ecken des nicht karbonatisierten Querschnittes, normal auf die jeweiligen geschalten Oberflächen, gemessen (vgl. Abbildung 56).



Oberseite der geschalten Betonprismen 4x4x16cm³

$$D = \frac{A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2}{6} = c_k(t)$$

Abbildung 56: Bestimmung der mittleren Karbonatisierungstiefe D; Einzelwerte gemessen von den geschalten Oberflächen; Bild entnommen aus [Ati02]

4.4 Versuchsergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 28 sind die gemittelten Ergebnisse aus den Versuchen zur Druckkarbonatisierung dargestellt.

Nr.:	Expositionskl. gem. EN 206-1		Applikation	$c_k(t_0)$ in mm	α in mm/a^{0,5}	c_k (t) in mm zufolge Druckkarbonatisierung nach 4 Wochen	5 Wochen	9 Wochen
1	XA2	XC4	UNB	**1,42**	1,26			**3,84**
2	XA2	XC4	PPE	**1,42**	1,26			**1,22**
5	XA2	XC4	UNB	**0,48**	0,55			**2,36**
6	XA2	XC4	PPE	**0,48**	0,55			**0,33**
7	XA2	XC4	UNB	**0,72**	0,83			**2,03**
8	XA2	XC4	PPE	**0,72**	0,83			**0,58**
9	XA1	XC4	UNB	**1,00**	1,14	2,13	2,63	**4,51**
10	XA1	XC4	PPE	**1,00**	1,14	0,92		**1,07**
11	XA1	XC4	UNB	**0,81**	0,92			**3,94**
12	XA1	XC4	PPE	**0,81**	0,92			**0,70**
13	XA1	XC4	UNB	**3,28**	2,91	4,82	4,90	**5,62**
14	XA1	XC4	PPE	**3,28**	2,91	2,22		**2,73**

Tabelle 28: Ergebnisse aus Versuchen zur Druckkarbonatisierung von behandelten und unbehandelten Betonen; der Wert α wurde nach Gl. 2 (siehe Pkt. 2.4.3) bestimmt

Nach der Druckkarbonatisierung können nur für die unbehandelten Probekörper deutliche Zuwächse bei den Karbonatisierungstiefen erkannt werden. Sie sind danach bis zu 5 mal so groß wie vor der Einlagerung.

Die mit Paraffin penetrierten Proben weisen hingegen keine Zuwächse auf. Die vorliegenden Zu- bzw. Abnahmen sind vernachlässigbar klein und liegen im Rahmen der Messgenauigkeit.

Für die starke Abweichung bei den Proben 13 und 14 wird davon ausgegangen, dass die Feststellung der Karbonatisierungstiefe $c_k(t_0)$ an einer nicht repräsentativen Stelle erfolgte.

Die α–Werte, welche neben der Betonzusammensetzung und der Nachbehandlung die Umweltbedingungen wiedergeben, liegen im Bereich zwischen 0,6 und 1,3 mm/$a^{0,5}$. Bei der Probe Nr. 13 bzw. 14 liegt dieser wesentlich höher.

Des Weiteren kann erkannt werden, dass der gewählte Versuchsaufbau und die vorliegenden Randbedingungen eine mit der Einlagerungsdauer fortschreitende Karbonatisierung gewährleisten (vgl. Tabelle 28, Pr. Nr. 9 und 13).

In der nachfolgenden Abbildung sind zwei Bruchflächen eines Probekörpers zu sehen, welche nach unterschiedlicher Behandlung der Druckkarbonatisierung zugeführt worden sind.

Abbildung 57: mit Phenolphtaleinlösung besprühte Bruchflächen eines Probekörpers; (li.) unbehandelter Beton mit deutlich fortgeschrittener Karbonatisierung (re.) mit Paraffin penetrierter Beton, die vor der Behandlung vorhandene Karbonatisierungstiefe wurde praktisch fixiert

4.5 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Karbonatisierung unter den gewählten Versuchsbedingungen durch die Applikation von Paraffin gestoppt werden konnte.

Durch die Penetration der Probekörper und der stattfindenden Reduktion des Porenraumes wird die eindiffundierende Menge von Kohlendioxid minimiert. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Paraffin-Applikation eine Auskleidung der Oberflächen bewirkt und somit die Feststoffmatrix schützt.

Weil im Gegensatz zu dem starken Angriff bei den säuregelagerten Proben (vgl. Pkt.3) keine neuen Porenräume entstehen und die Reaktionen ausschließlich über den vorhandenen Porenraum stattfinden können, konnte für die vorliegenden Bedingungen und die gewählten Versuchszeiträume das Fortschreiten der Karbonatisierung angehalten werden.

Um für die gewonnenen Erkenntnisse einen auf die Natur übertragbaren Maßstab zu finden, ist es erstrebenswert, einen Bezug zu den beschleunigten Versuchszeiträumen herzustellen. Daher sollte untersucht werden, ob die Karbonatisierung von natürlich gelagerten Probekörpern mit Ergebnissen der Druckkarbonatisierung korreliert.
Des Weiteren gilt es, den Zusammenhang zwischen Porenfüllgrad und Karbonatisierungsschutz zu untersuchen, wobei der Porenfüllgrad wesentlich von der Behandlungstemperatur, der Behandlungsdauer und von den Paraffineigenschaften (insbesondere der Viskosität) abhängt.

Auf Grund der vorliegenden Erkenntnisse und der stattfindenden Karbonatisierung ist zu erwarten, dass der Fortschritt unter natürlichen Verhältnissen erfolgreich reduziert werden kann.

5 Zusammenfassung

Neben den Schlussfolgerungen in den einzelnen Kapiteln, lässt sich für die gesamte Arbeit zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Baustoffen durch Applikation von Paraffinen folgendes zusammenfassen:

Durch die Applikation von Paraffin kann die Dauerhaftigkeit von Baustoffen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion bzw. einem schwefelsauren Angriff erhöht werden. In Abhängigkeit der gewählten Applikation ergeben sich unterschiedliche Verbesserungen bzw. Schutzwirkungen.
Die Verwendung von Paraffinpulver beim Herstellungsprozess und die thermische Umverteilung durch Aufschmelzen des Paraffins ist wegen der Neubildung von Porenraum jedoch als korrosionsfördernd einzustufen.
Eine deutliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit kann durch Beschichtung des Baustoffes in Form eines Paraffin-Coatings erzielt werden. Um Fehlstellen in der Beschichtung zu vermeiden, muss jedoch der Applikationsvorgang und das verwendete Paraffin hinsichtlich der Kontraktion beim Erstarren optimiert werden.
Durch die Penetration der Baustoffe mit Paraffin kann im Allgemeinen eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit erzielt werden. Die Schutzwirkung basiert im Wesentlichen auf einer Verzögerung der Korrosion zu Beginn der Einwirkung. In Folge fortschreitender Schädigung stellen sich jedoch auch beim penetrierten Material analoge Korrosionsraten ein. Ein hohes Potenzial an Schutzwirkung ist bei Materialien mit hohem Kapillarporenanteil und bei höheren pH-Werten gegeben, wenn es zur Ausbildung von größeren Korrosionszonen kommt oder die Feststoffmatrix nur langsam korrodiert und der Angriff hauptsächlich über das ursprüngliche Kapillarporensystem erfolgt.

Beim Baustoff Beton kann die Karbonatisierung als Säure-Basen Reaktion betrachtet werden, bei welcher es durch die stattfindende Stoffumsetzung zu einer Phasenneubildung kommt. Für den Beton selbst bedeutet es eine Erhöhung der Festigkeit, die Calcitbildung führt zu einer Verdichtung des Gefüges.
Im Gegensatz zu einem starken Säureangriff der biogenen Schwefelsäurekorrosion wird kein neuer Porenraum geschaffen, über den der Angriff stattfinden kann. Die Karbonatisierung erfolgt ausschließlich über den Porenraum, welcher bei den mit Paraffin behandelten Probekörpern weitgehend verstopft ist. Dadurch konnte der Karbonatisierungsfortschritt angehalten werden.
In Hinblick auf eine baupraktisch relevante Anwendung gilt es den Applikationsvorgang und die erforderlichen Penetrationszeiten zu optimieren und deren Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit zu ergründen.

Vorangegangene Arbeiten und die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass sich eine geeignete Applikation von Paraffin bei Baustoffen günstig auf deren Dauerhaftigkeit auswirkt. Besonderes Potenzial zur Schutzwirkung liegt bei Schädigungsmechanismen vor, welche vorwiegend über den Porenraum stattfinden.

Literaturverzeichnis

Publikationen:

[Ati02] G. D. Atis: *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash;* Construction and Building Materials, Vol. 17, p. 147-152, 2002

[Bay95] E. Bayer, R. Kampen, et. al.: *Betonbauwerke in Abwasseranlagen;* Hrsg. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, 3. Auflage, Beton Verlag, Düsseldorf, 1995

[Bed03] R. E. Beddoe, H. W. Dorner: *Prognose von Betonschäden bei Säureangriff;* Tagungsbericht ibausil, 15. Internationale Baustofftagung, Weimar, 2003

[Bee01] A. Beeldens, J. Monteny, et. al.: *Resistance to biogenic sulphuric acid corrosion of polymer-modified mortars;* Cement & Concrete Composites, Vol. 23, p. 47-56, 2001

[Bie83] R. Bielecki: *Erkenntnisse und Zielvorstellungen der Korrosionsforschung an Abwasser-Kanälen;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 25, Heft 8, S. 474-477, 1983

[Boc83] E. Bock: *Bedeutung der Mikroorganismen bei der Korrosion von Abwasserkanälen;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 25, Heft 7, S. 437-439, 1983

[Boc84] E. Bock: *Biologische Korrosion;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 26, Heft 5, S. 240-250, 1984

[Bol00] K. Bollmann: *Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen;* Dissertation, an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 2000

[Bos01] B. Bosseler, D. Homann, G. Kaltenhäuser: *Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren;* Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Juli 2001

[Bre02] W. Breit: *Säurewiderstand von Beton;* Beitrag zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf

[Che96] S. Chen: *Untersuchungen zur Chemischen Korrosion und Spannungskorrosion von Hochleistungsbeton;* Dissertation, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Technische Universität Wien; 1996

[Deh03] F. Dehn, K. Friedemann, D. Schmidt: *Säureresistente Hochleistungsbetone;* Betonwerk + Fertigteil-Technik, Ausgabe 3/2003

[Dre91] J. Dreyer: *Thermisch stimulierte Injektion von feuchtegeschädigten Wänden mittels Paraffin;* Bautenschutz und Bausanierung, Jg. 14, Heft 6, 1991

[Dre95] J. Dreyer: *Conservation of Buildings by Filling of the Pores with Paraffin*, IABSE Symposium San Francisco, 1995

[Dre02] J. Dreyer: *Nachträgliche Horizontalabdichtung mittels Injektionsverfahren;* Kongress zum Thema Mauertrockenlegung und Mauerwerksverfestigung; Wels, 2002

[Fra92] L. Franke, G.-D. Ewert, et. al.: *Anforderungen an Mörtel für den Sielbau;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 34, Heft 9, S. 675-S. 676, 1992

[Fra92a] L. Franke, G.-D. Ewert, et. al.: *Prüfverfahren für die Beurteilung von Sielbaumörtel;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 34, Heft 11, S. 834-837, 1992

[Fra92b] L. Franke, R. Fricke, et. al.: *Schädigung von Kanalklinkern in Abwassersielen durch biogene Schwefelsäurebildung;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 34, Heft 6, S. 428-435, 1992

[Fra93] L. Franke, H. Bentrup: *Paraffininjektionsverfahren zur Trockenlegung von Mauerwerk – Beurteilung der Wirksamkeit;* Bautenschutz und Bausanierung, Jg. 16, Heft 1, 1993

[Fra97] L. Franke, M. Oly, F. Pinsler: *Prüfrichtlinie für Mörtel im Sielbau;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 39, Heft 4, S. 19-23, 1997

[Fra99] L. Franke, M. Oly: *Prüfung und Verhalten zementgebundener Mörtel und Betone gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion;* Proceedings of The Fifth International WTA-Colloquium on Materials Science and Restoration – MSR V, Technische Akademie Esslingen, 1999

[Fri93] R. Fricke: *Beurteilung und Verbesserung des Verhaltens von Mörteln bei Angriff schwefelsaurer Wässer;* Reihe Bauwesen, Verlag Shaker, Aachen 1993

[Gie85] E. Gierlinger, R. Springenschmid: *Möglichkeiten zur Erzielung einer Frost-Tausalzbeständigkeit des Betons durch besondere Verfahren ohne Zusatz von Luftporenbildnern;* Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 448, 1985

[Gra95] J. Grabau: *Untersuchungen zur Korrosion zementgebundener Materialien durch saure Wässer unter Berücksichtigung des Schwefelsäureangriffs;* Berichte aus dem Bauwesen, Verlag Shaker, Aachen 1995

[Grü01] P. Grübl, H. Weigler, K. S. Karl: *Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften;* Verlag Ernst und Sohn, 2001

[Hau02] D. Hauer: *Auswirkungen von Injektionsstoffen zur Horizontalabdichtung auf die thermische Längenänderung einzelner Mauerwerksbaustoffe;* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002

[Hec01] C. Hecht: *Bauphysikalische Bewertung ausgewählter Sanierungsvarianten unter besonderer Berücksichtigung von Paraffinen und kapillar leitfähigen Dämmstoffen;* Dissertation, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2001

[Heg03] J. Hegger, W. Brameshuber, O. Bruckermann, et. al.: *Kleinkläranlagen aus textil-bewehrtem Beton;* Abschlussbericht des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen, Institusbericht-Nr.: 84/2003, Aachen, 07/2003

[Her99] G. Herold: *Zeitgesetz zur Korrosion von Beton in mineralsauren Wässern;* Proceedings of The Fifth International WTA-Colloquium on Materials Science and Restoration – MSR V, Technische Akademie Esslingen, 1999

[Her99a] G. Herold: *Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern;* Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Heft 36, Karlsruhe, 1999

[Hof97] F.-J. Hofmann, K. Hormann, et. al.: *Beton mit erhöhtem Widerstand gegen Säure und biogene Schwefelsäurekorrosion;* Sonderdruck aus Betonwerk+Fertigteil-Technik, Heft 4/1997

[Käm03] W. Kämpfer, A. Dimming, J. Stark: *Beständigkeit von kunststoffmodifizierten Sielbaumörteln gegenüber mechanisch-chemischen Belastungen;* Tagungsbericht ibausil, 15. Internationale Baustofftagung, Weimar, 2003

[Kel91] T. Keller: *Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken – Transportmechanismen – Auswirkung von Rissen;* Bericht Nr.: 184, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH-Zürich; Birkhäuser, 1991

[Kue66] W. H. Kuenning: *Resistance of Portland Cement Mortar to Chemical Attack – A Progress report;* Highway Research Record, Number 113, pp. 43-87, Washington D.C., 1966

[Liu01] Jie Liu, C. Vipulanandan: *Evaluating a polymer concrete coating for protecting non-metallic underground facilities from sulphuric acid attack;* Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, p. 311-321, 2001

[Loh86] M. Lohse: *Schwefelverbindungen in Abwasserableitungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der biogenen Schwefelsäurekorrosion;* Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 62; Hannover, 1986

[Maj04] R. Majdalani: *Bestimmung der Eigenschaftsänderung von Porenräumen nach Penetration von Injektionsstoffen;* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002

[Mat02] M. Matthäi, T. Butz u. A. Geißler: *Über die Zusammensetzung von makro- und mikrokristallinen Paraffinen;* Erdöl Erdgas Kohle, 118. Jahrgang, Heft 9, 2002

[Mon01] J. Monteny, N. De Belie: *Chemical and microbiological tests to simulate sulphuric acid corrosion of polymer-modified concrete;* Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 1359-1365, 2001

[Ren99] F. Rendell, R. Jauberthie: *The deterioration of mortar in sulphate environments;* Construction and Building Materials, Vol. 13, S. 321-S. 327, 1999

[Ren01] K. Rendchen: *Beton mit hohem Widerstand gegen chemischen Angriff in Abwasserkanälen - Ein Beitrag zur Auswahl von Zementen;* Beton-Informationen, Ausgabe 5, 2001

[Reu01] H. Reul: *Handbuch Bautenschutz und Bausanierung: Schadensursachen, Diagnoseverfahren, Sanierungsmöglichkeiten;* 4. Auflage, Müller, 2001

[Roy99] S. K. Roy, K. B. Poh, D. O. Northwood: *Durability of concrete-accelerated carbonation and weathering studies;* Building and Environment, Vol. 34, p. 597-p. 606, 1999

[Sar03] H. Saricimen, et. al.: *Durability of proprietary cementitious materials for use in wastewater transport system;* Cement and Concrete Composites, Vol. 25, Issues 4-5, Pages 421-427, May-July 2003

[Sau00] G. Saulich: *Untersuchungen zur Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen am Beispiel von Ziegelmaterialien und im Verbund mit Kalkmörtel;* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2000

[Sch92] H. Schuhmann, et. al.: *Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen: Praxis und Anwendungen, Normen und Empfehlungen;* expert Verlag, 1992

[Sey83] C. F. Seyfried, M. Lohse: *Untersuchungen zur biogenen Schwefelsäurekorrosion in einer Großversuchsanlage;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 25, Heft 8, S. 482-484, 1983

[Sta95] J. Stark, B. Wicht: *Dauerhaftigkeit von Beton;* Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, F.-A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 1995

[Sta99] J. Stark, H. Krug: *Baustoffpraktikum – Band 1: Physikalische Untersuchungen;* Schriftenreihe des F. A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 1999

[Sta01] J. Stark, B. Wicht: *Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff;* Hrsg. vom F.-A.-Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, 2001

[Sta02] J. Stark, et. al.: *Selbstverdichtender Beton hoher Dauerhaftigkeit für Bauteile des Tiefbaus und des Umweltschutzes;* Betonwerk + Fertigteil-Technik, Ausgabe 5/2002

[Ste99] D. Stein: *Instandhaltung von Kanalisationen;* 3. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1999

[Thi79] D. K. B. Thistlethwayte: *Sulfide in Abwasseranlagen – Ursachen, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen;* ISBN 3-7640-0131-3, Beton-Verlag GmbH, 1979

[Ull96] U. Wolfmeier et. al.: *Waxes;* Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 28, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1996

[Vip02] C. Vipulanandan, J. Liu: *Glass-fiber mat-reinforced epoxy coating for concrete in sulphuric acid environment;* Cement and Concrete Research, Vol. 32, S. 205-S. 210, 2002

[Vip02a] C. Vipulanandan, J. Liu: *Film model for coated cement concrete;* Cement and Concrete Research, Vol. 32, S. 1931-S. 1936, 2002

[Vol03] O. Vollgruber: *Untersuchungen zur hygrischen Längenänderung von Baustoffen vor und nach der Injektion zur Horizontalabdichtung;* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002

[Wie83] H.-J. Wierig, H. Nelskamp: *Betontechnische Untersuchungen an Abwasseranlagen;* Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau; Band 25, Heft 7, S. 440-445, 1983

[Xio01] G. Xiong, X. Chen, et. al.: *Sulphuric acid resistance of soluble soda glass-polyvinyl acetate latex-modified cement mortar;* Cement and Concrete Research, Vol. 31, S. 83-S. 86, 2001

Normen, Merkblätter und Richtlinien:

[ATV98] Merkblatt ATV-M 168: *Korrosion von Abwasseranlagen – Abwasserableitung;* Abwassertechnische Vereinigung e. V. [ATV), Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V. [GFA), Juli 1998

[DIE20] DIN EN 206-1: Beton, Teil 1: *Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität Deutsche Fassung EN 206-1:2000;* Ausgabe: Juli 2001

[DIN104] DIN 1045-2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton;* Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1:2000; Ausgabe: Juli 2001

[DIN403] DIN 4034-Teil 10: *Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen, Teil 10: Schachtunterteile aus Mauerwerk für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen, Anforderungen und Prüfungen;* Stand Oktober 1995

[DIN405] DIN 4051: *Kanalklinker – Anforderungen, Prüfung, Überwachung;* Ausgabe: 2002-04

[DIN511] DIN 51 102-Teil 1: *Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe - Bestimmung der Säurebeständigkeit – Verfahren mit stückigem Prüfgut für Kanalisations-Steinzeug;* Mai 1976

[DIN511a] DIN 51 102-Teil 2: *Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe – Bestimmung der Säurebeständigkeit – Verfahren mit gekörntem Prüfgut;* Mai 1976

[EN150] ENTWURF ÖNORM EN 1504-2: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definition, Anforderungen Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme;* Ausgabe: 2000-05-01

[EN196] DIN EN 196-Teil 1: *Prüfverfahren für Zement, Bestimmung der Festigkeit;* Deutsche Fassung EN 196-1:1987, Stand 1989

[EN197] ÖNORM EN 197-1: *Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement;* Ausgabe: 2000-12-01

[EN206] ÖNORM EN 206-1: *Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität;* Ausgabe: 2001-05-01

[Fra01] L. Franke, M. Oly, S. Witt: *Richtlinie für die Prüfung von Mörtel für den Einsatz im Sielbau Fassung 2001;* Technische Universität Hamburg-Harburg, Lehr- und Forschungsbereich Bauphysik und Werkstoffe im Bauwesen

[GST04] GSTT Information Nr. 18: Anforderungen an Mörtel für abwassertechnische Anlagen – Teil 1: Zementgebundene Mörtel; Dezember 2003, überarbeitet 10.06.2004

[ONB25] ENTWURF ÖNORM B 2503: *Kanalanlagen – Ergänzende Richtlinien für die Planung, Ausführung und Prüfung;* Ausgabe: 2002-09-01

[ONB32] ÖNORM B3220: *Klinker - Anforderungen und Prüfungen - Normkennzeichnung;* Ausgabe: 2000-04-01

[ONB32a] ÖNORM B3200: *Mauer- und Hochlochziegel für tragendes Mauerwerk - Anforderungen und Prüfungen - Normkennzeichnung;* Ausgabe: 1999-06-01

[ONB33] ÖNORM B 3303: *Betonprüfung;* Ausgabe: 2002-09-01

[ONB42] OENORM B 4200-10: *Beton – Herstellung, Verwendung und Gütenachweis;* Ausgabedatum: 1996-07-01, Zurückziehungsdatum: 2003-03-01

[ONB47] ÖNORM B4710-1: *Beton, Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis [Regeln zur Umsetzung der EN 206-1);* Ausgabe: 2002-01-01

[ONB50] ÖNORM B 5017: *Hochleistungsbeton im Siedlungswasserbau [HL-SW-Beton) - Herstellung, Verwendung und Gütenachweis;* Ausgabe: 2000-10-01

[ONE12a] ÖNORM EN 12350-5: *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß;* Ausgabe: 2000-04-01

[ONE12b] ÖNORM EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern;* Ausgabe: 2002-05-01

Internet:

[bbr3w] http://www.bbr.bund.de
URL am 06.05.2004 gültig

[dud3w] http://www.duden.at
URL am 22.11.2004 gültig

[tud3w] http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/USER/schnittker/Web/muloe3.pdf
URL am 01.12.2004 gültig

[cud3w] http://www.theochem.uni-duisburg.de/DC/material/silicon/versuch/versuc10.htm
URL am 16.12.2004 gültig

[Hyd3w] http://www.sasolwax.com/Anwendung_f%C3%BCr_kationische_HydroWax_44___45___46___47-highlight-hydrowax-lang-de.html
URL am 10.12.2004 gültig

[Bed3w] http://www.tuhh.de/bp/spp1122/BeddoeDornerBraunschweigSPP1122.pdf
URL am 10.12.2004 gültig

[Fra3w] http://www.tuhh.de/bp/spp1122/TUHH-Franke.pdf
URL am 10.12.2004 gültig

[Fr23w] http://www.tuhh.de/bp/spp1122/Gunstmann.pdf
URL am 10.12.2004 gültig

[Be23w] http://www.tuhh.de/bp/spp1122/BeddoeDorner.pdf
URL am 10.12.2004 gültig

[Wik3w] http://de.wikipedia.org/wiki/Paraffin
URL am 02.02.2005 gültig

Sonstiges:

[Sch97] Technische Information der Firma Schümann-Sasol, Hamburg, 1997

Anhang

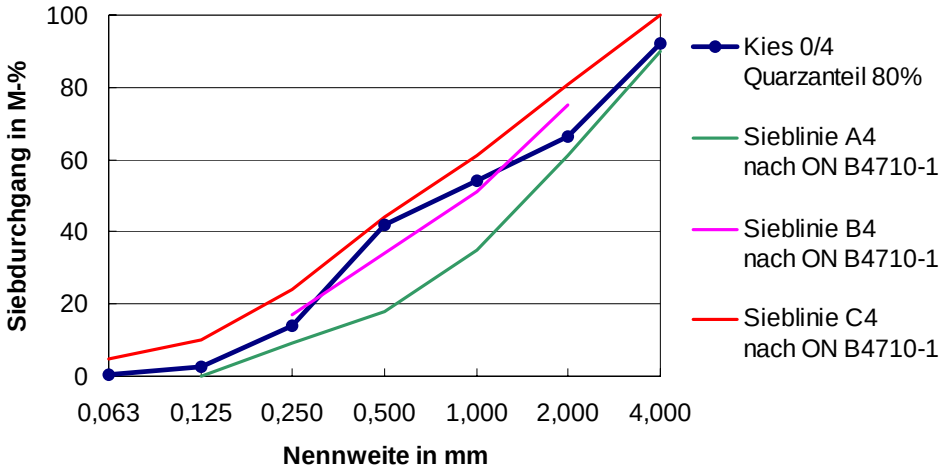


Abbildung 58: Sieblinie für den Zuschlag 0-4 mm und Normsieblinien nach [ONB47] – Zuschlag für Beton XA1 und XA2

Produkt: Normenbezeichnung nach ÖNORM EN 197-1 [EN197]	Druck-festigkeit nach 28 Tagen in N/mm²	Dichte in kg/dm³	Sulfat-beständigkeit gemäß ÖN B 3305
CEM I 42,5 R WT 38 C3A-frei/HS	>42,5	3,15	<1500 mg/l SO_4
CEM I 32,5 R WT 33 C3Afrei/HS	>32,5	3,11	<1500 mg/l SO_4
CEM II/A-M [S-V-L) 42,5 N WT 38	>42,5	3,03	<300 mg/l SO_4

Tabelle 29: Bindemittelverwendung, Bezeichnung und Eigenschaften

Quadratische Maschenweite in mm	Kumulierter Siebrückstand in M-%
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1
Quarzsand-Massenanteil Größtkorn Max. Feuchtegehalt	mind. 98% GK 2mm 0,2 M-%

Tabelle 30: Korngrößenverteilung und Beschaffenheit des CEN-Referenzsandes nach [EN196]

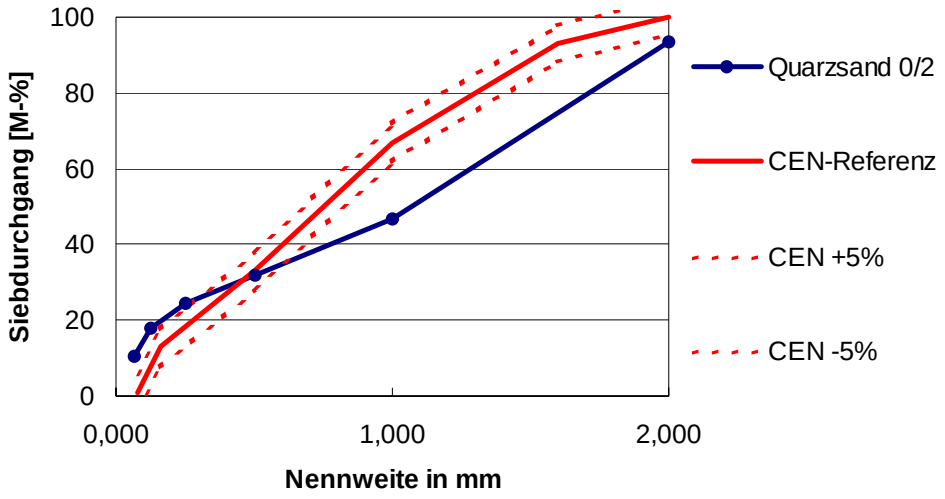


Abbildung 59: Sieblinie Zuschlag 0-2 mm und Sieblinie Normsand nach [EN196] – Zuschlag für Sielbaumörtel und Referenzmörtel

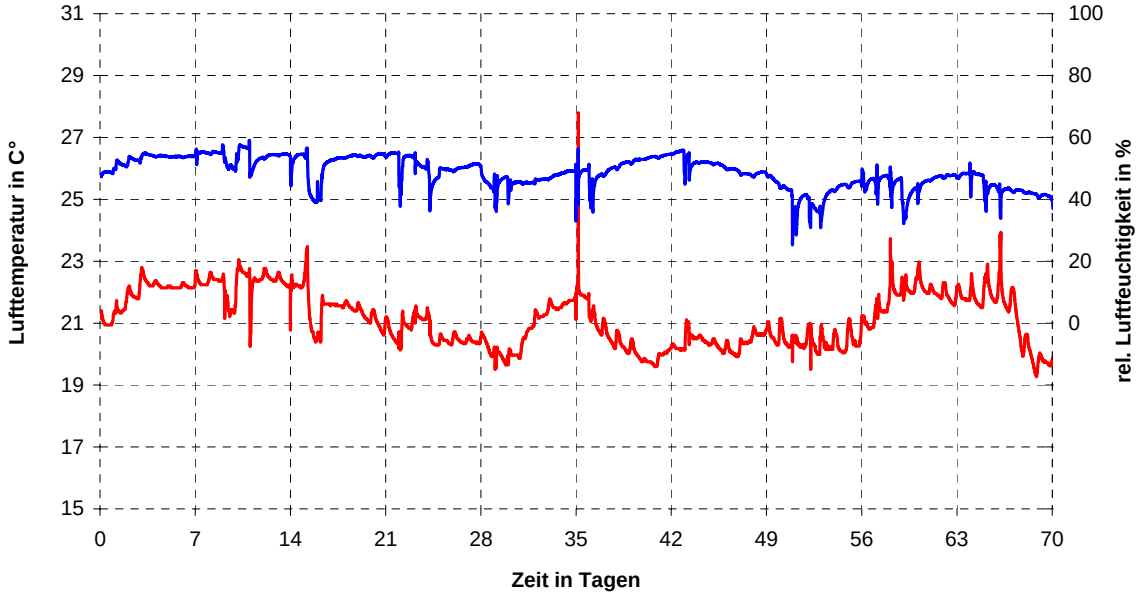


Abbildung 60: aufgezeichnetes Laborklima bei den Einlagerungsversuchen der Mörtel und Betone bei pH 1 über 70 Tage; die mittlere Lufttemperatur beträgt 21°C ± 2K und die mittlere rel. Luftfeuchte 50% ± 10%

Schachtringe der Expositionsklassen XA1 und XA2
[SR3] und [SR4]
pH0 – 14 Tage

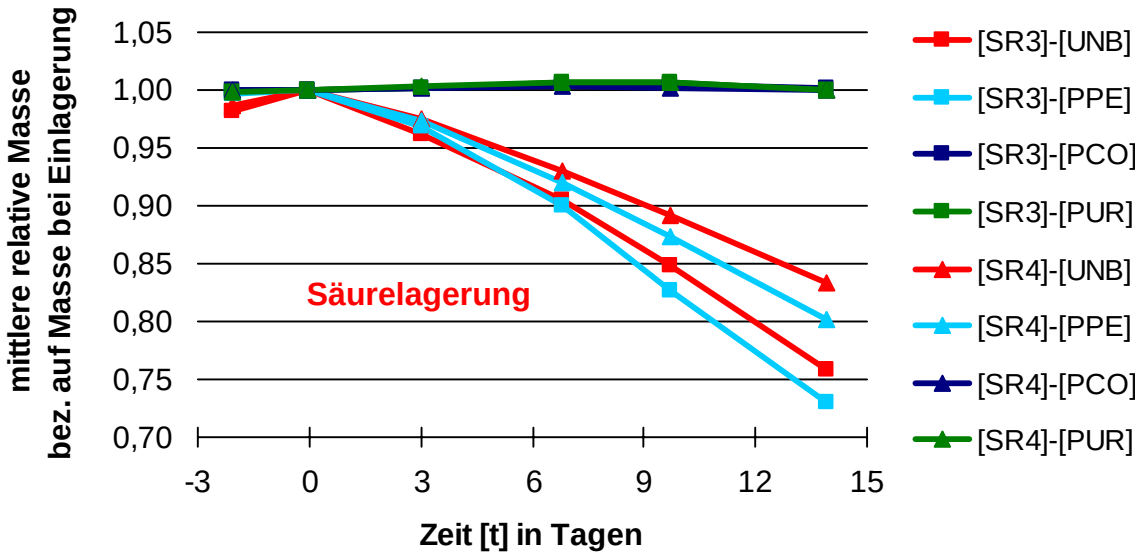


Abbildung 61: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

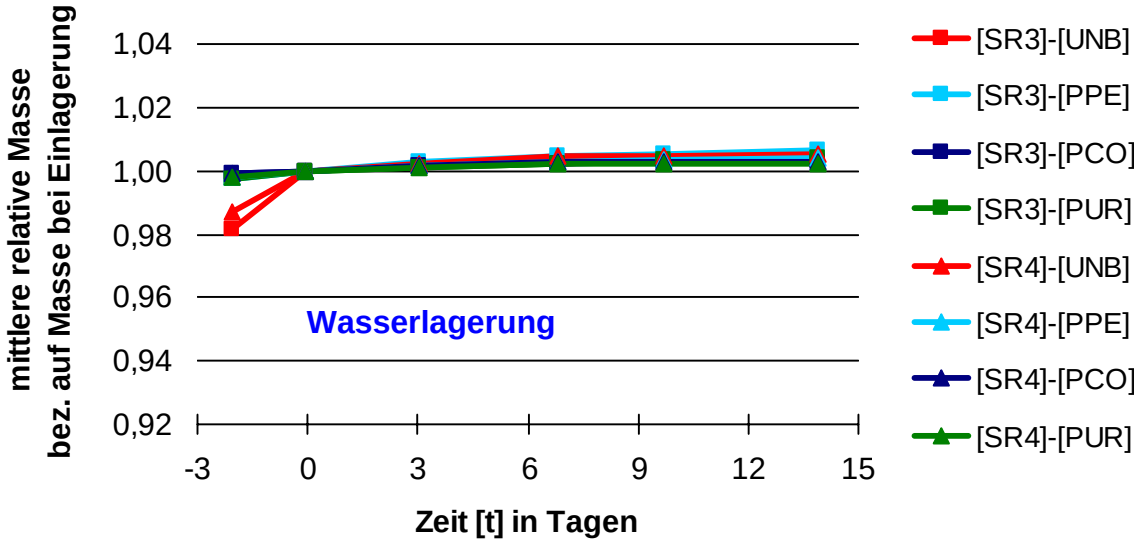


Abbildung 62: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Wasserlagerung über 14 Tage

Betone der Expositionsklassen XA1 und XA2
[XA1] und [XA2]
pH0 – 14 Tage

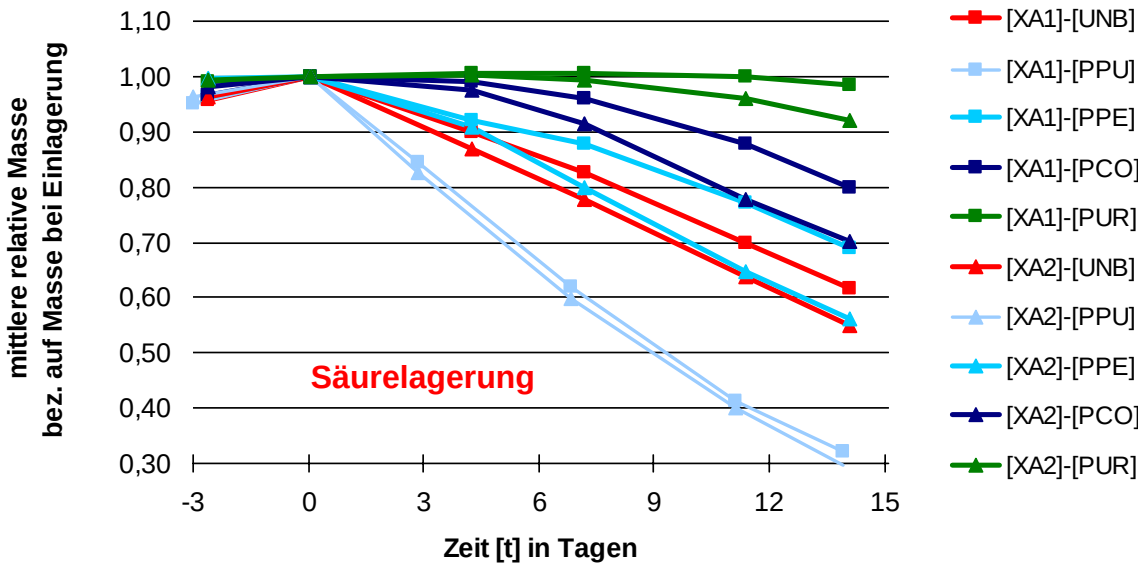


Abbildung 63: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

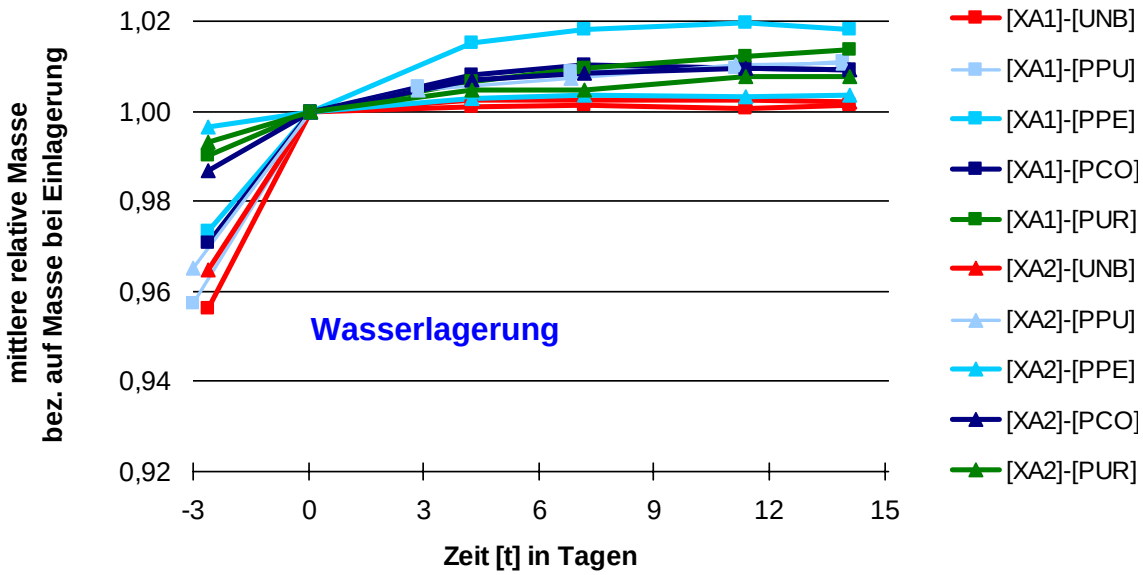


Abbildung 64: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Wasserlagerung über 14 Tage

Mörtel des Sielwasserbaues
[RM] und [SM]
pH0 – 14 Tage

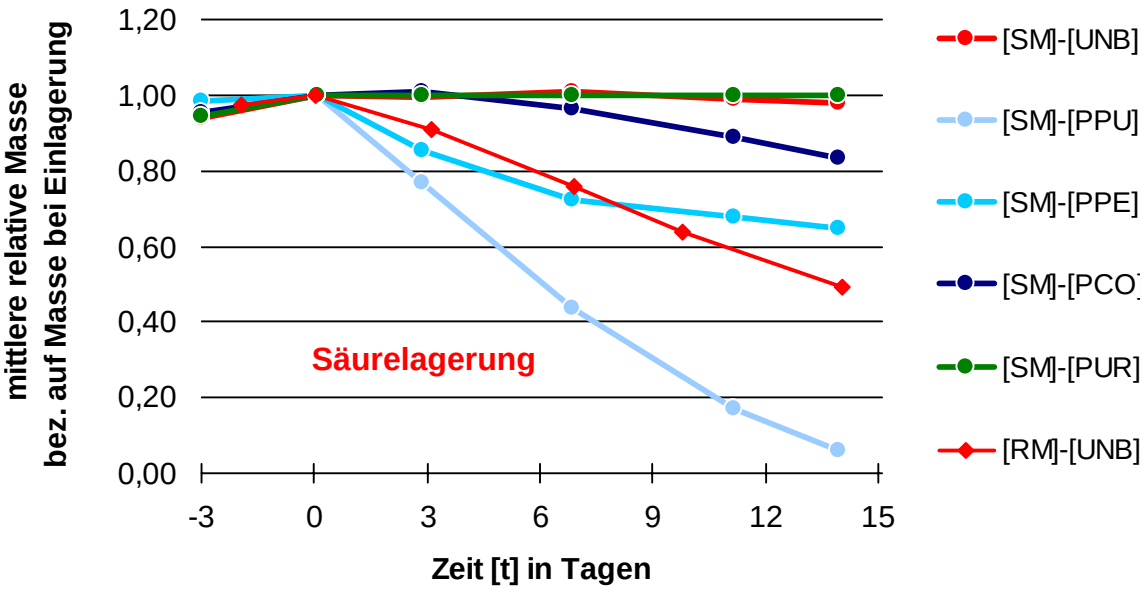


Abbildung 65: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Säurelagerung bei pH0 über 14 Tage

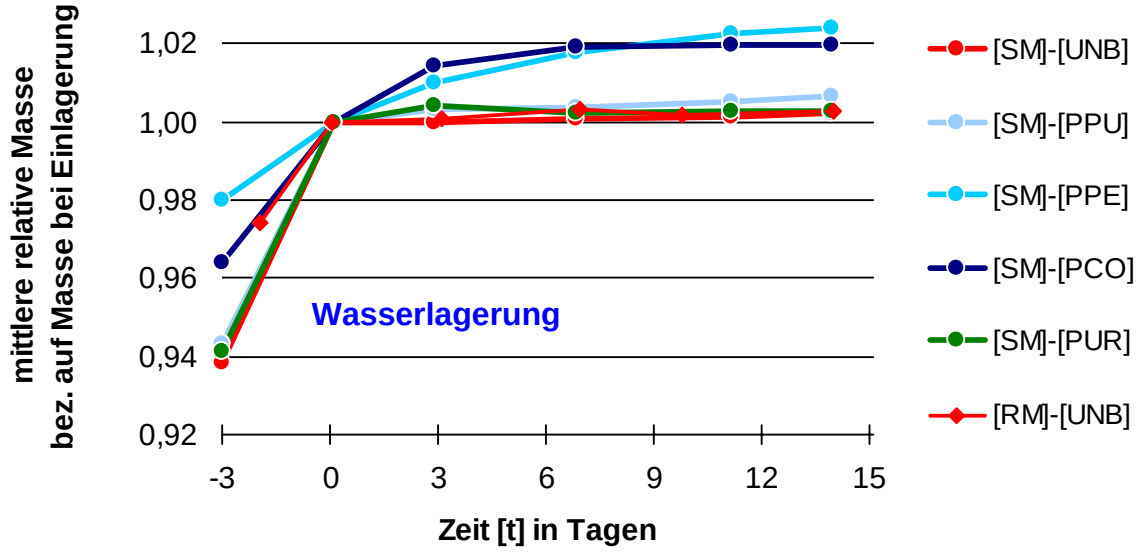


Abbildung 66: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Wasserlagerung über 14 Tage

Schachtringe der Expositionsklassen XA1 und XA2
[SR3] und [SR4]
pH1 – 70 Tage

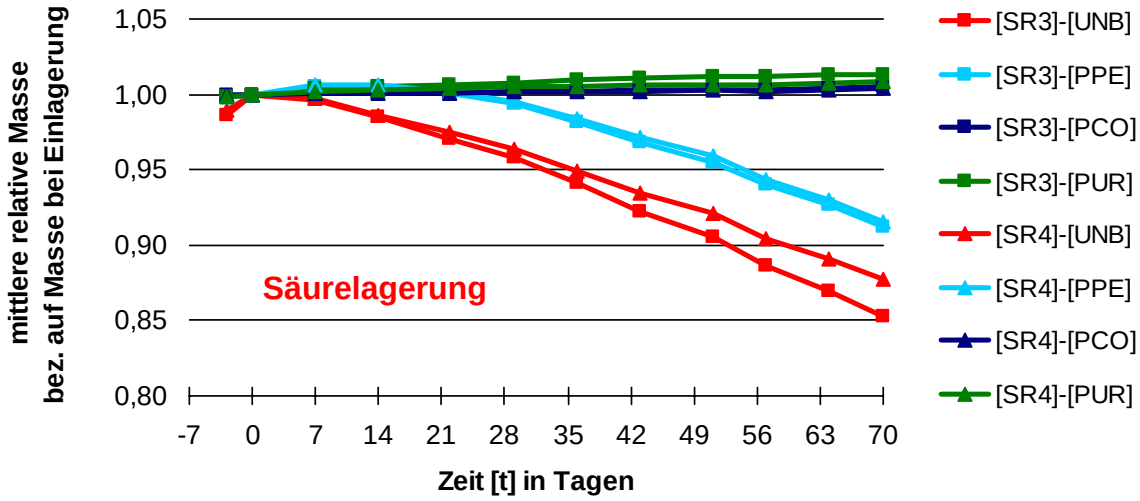


Abbildung 67: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 10 Wochen

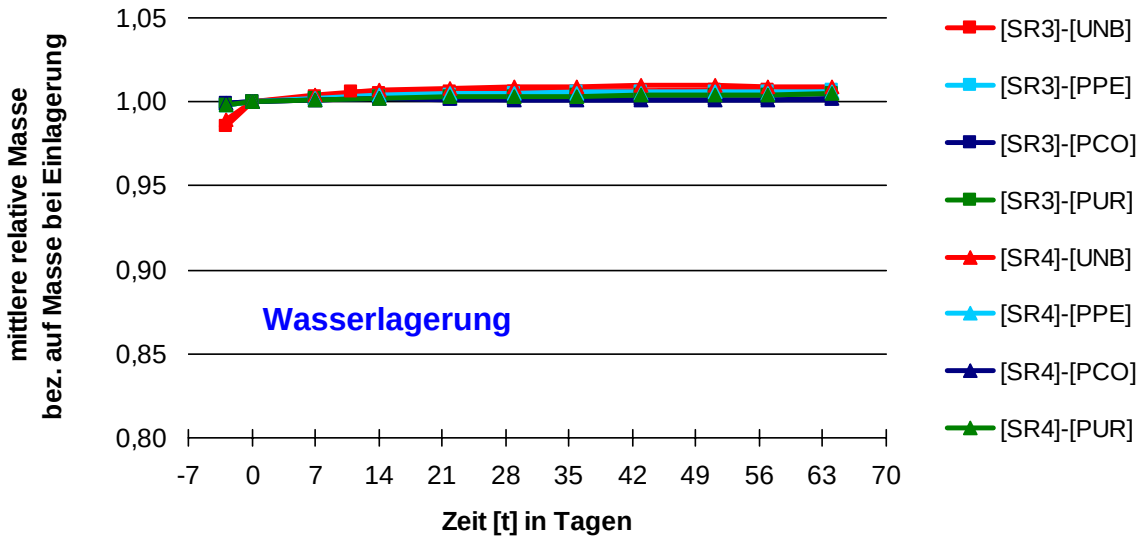


Abbildung 68: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Schachtringproben zufolge Wasserlagerung über 10 Wochen

Betone der Expositionsklassen XA1 und XA2
[XA1] und [XA2]
pH1 – 70 Tage

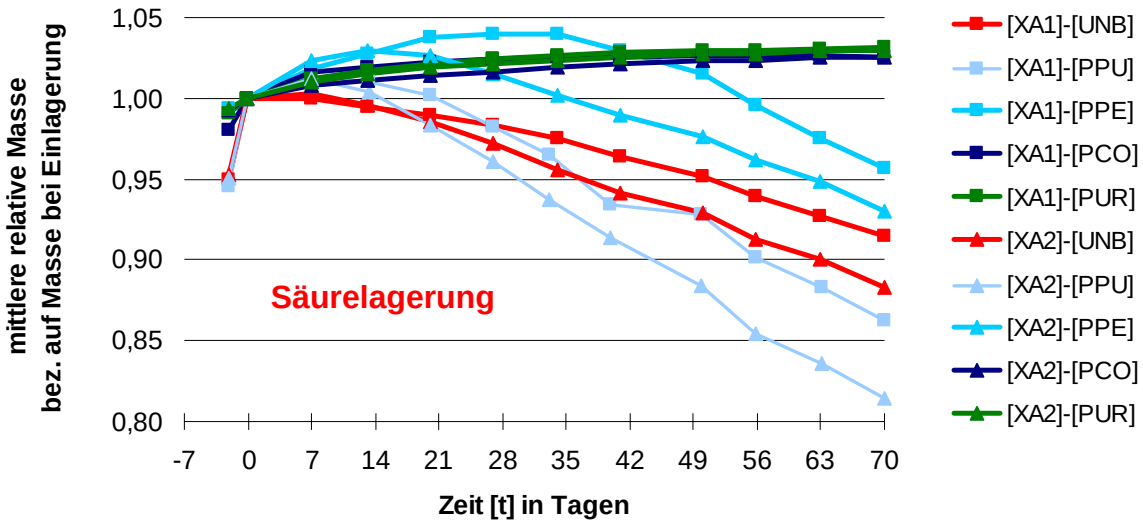


Abbildung 69: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 10 Wochen

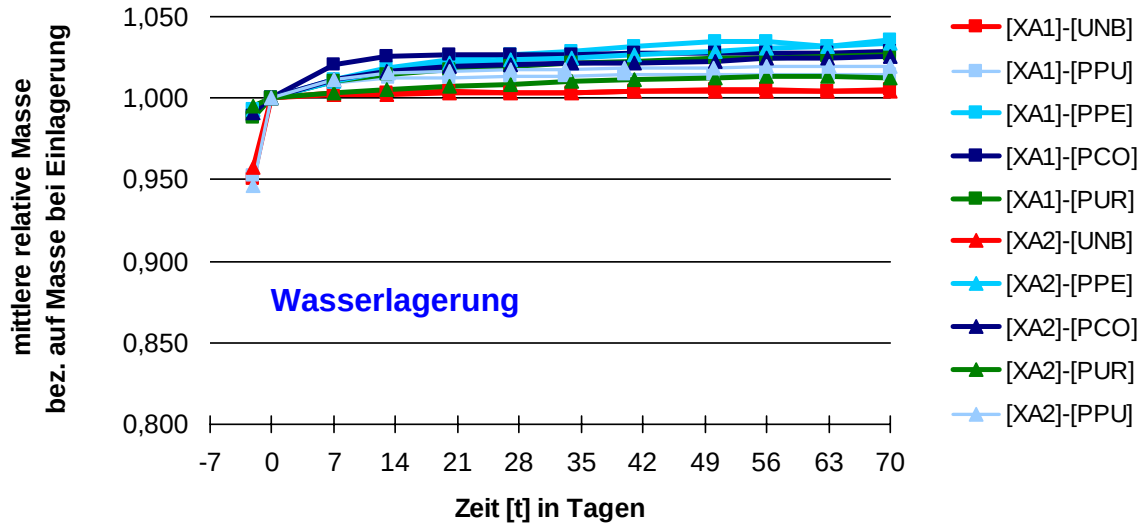


Abbildung 70: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Betonproben zufolge Wasserlagerung über 10 Wochen

Mörtel des Sielwasserbaues
[RM] und [SM]
pH1 – 70 Tage

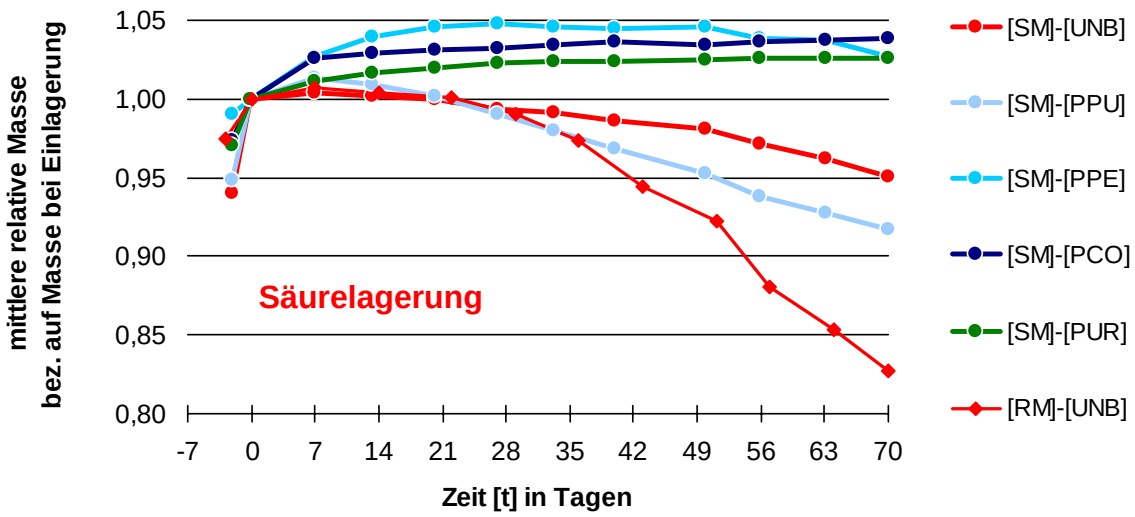


Abbildung 71: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Säurelagerung bei pH1 über 10 Wochen

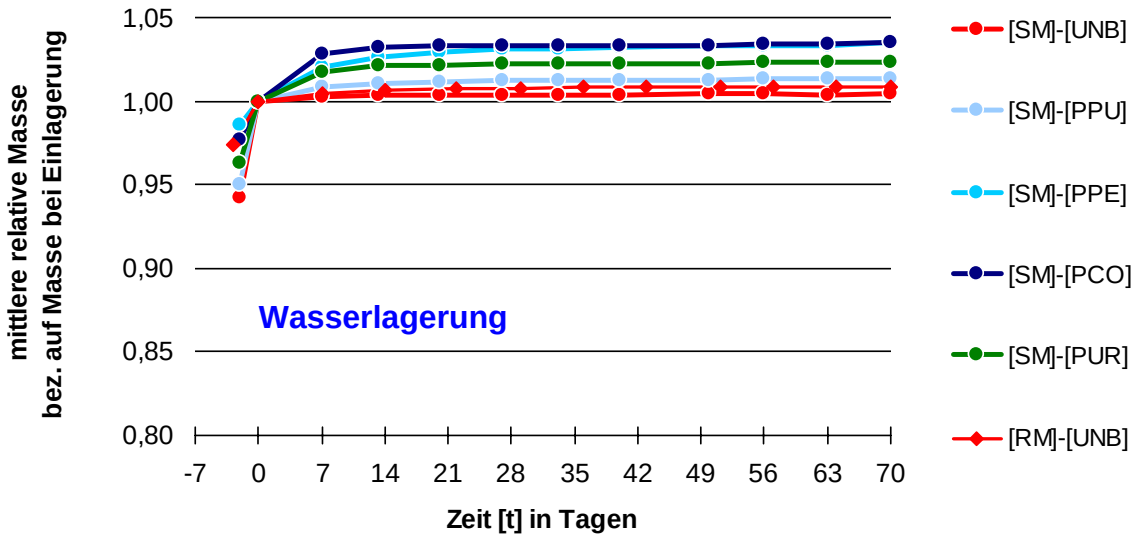


Abbildung 72: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Mörtelproben des Siedlungswasserbaus zufolge Wasserlagerung über 10 Wochen

Kalk- und Kalkzementmörtel
[KM] und [KZM]
pH1 – 70 Tage

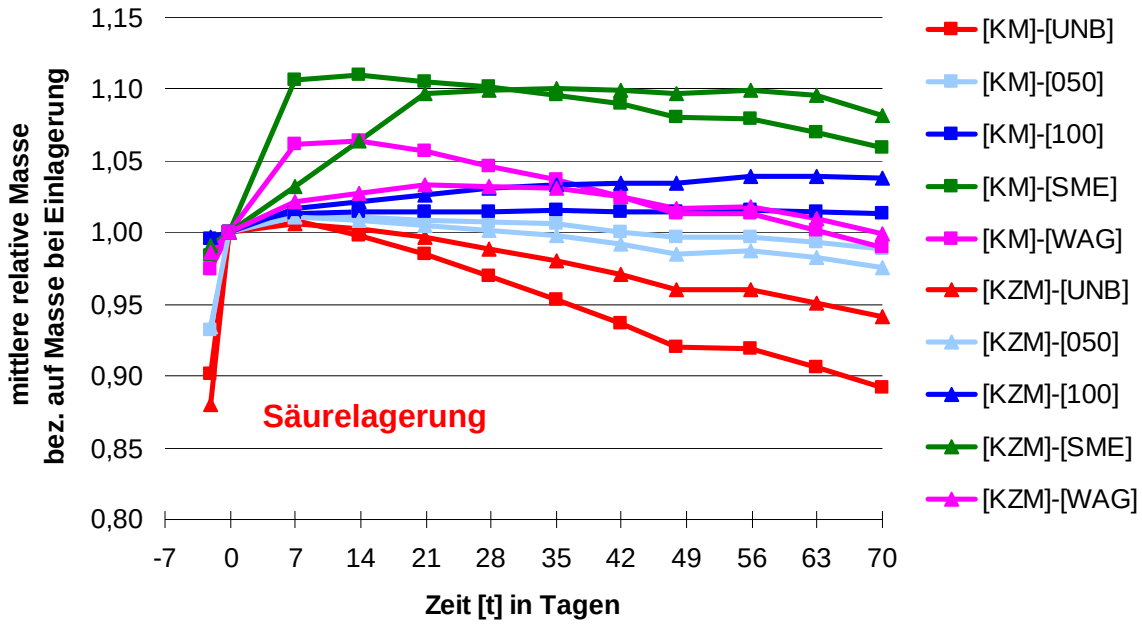


Abbildung 73: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Kalk- und Kalkzementproben zufolge Säurelagerung bei pH1 über 10 Wochen

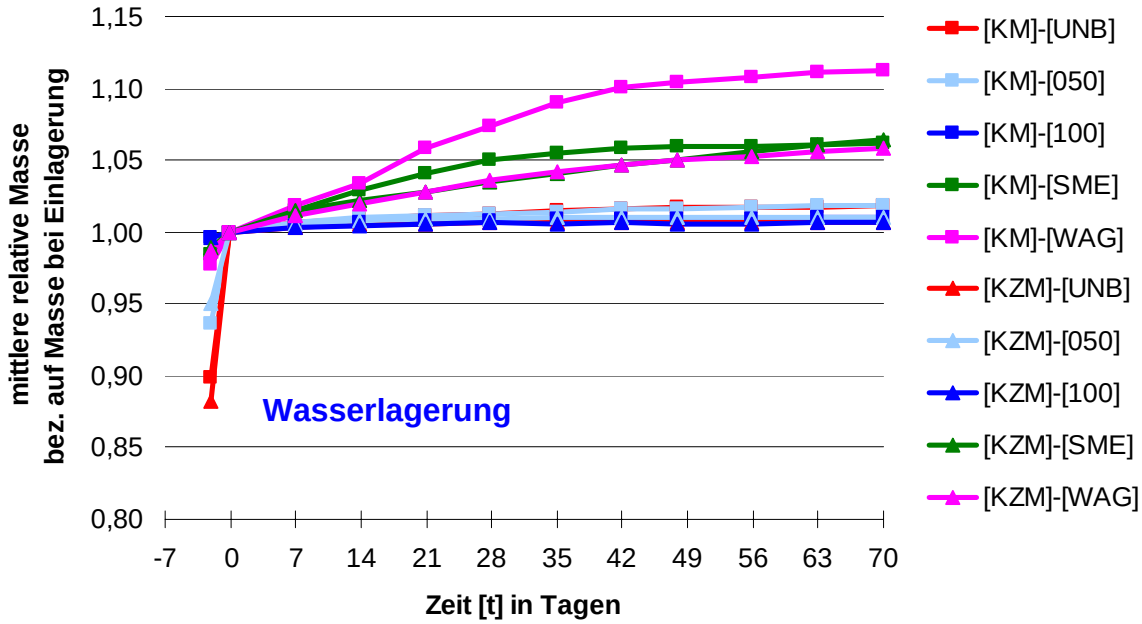


Abbildung 74: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Kalk- und Kalkzementproben zufolge Wasserlagerung über 10 Wochen

Ziegel
[KAK] und [WBZ]
pH1

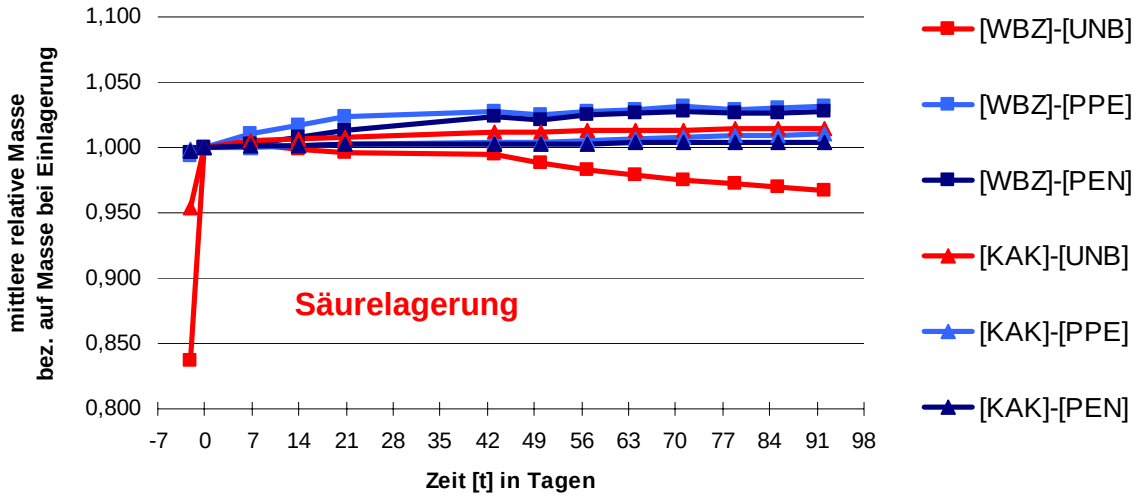


Abbildung 75: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Ziegeln zufolge Säurelagerung bei pH1

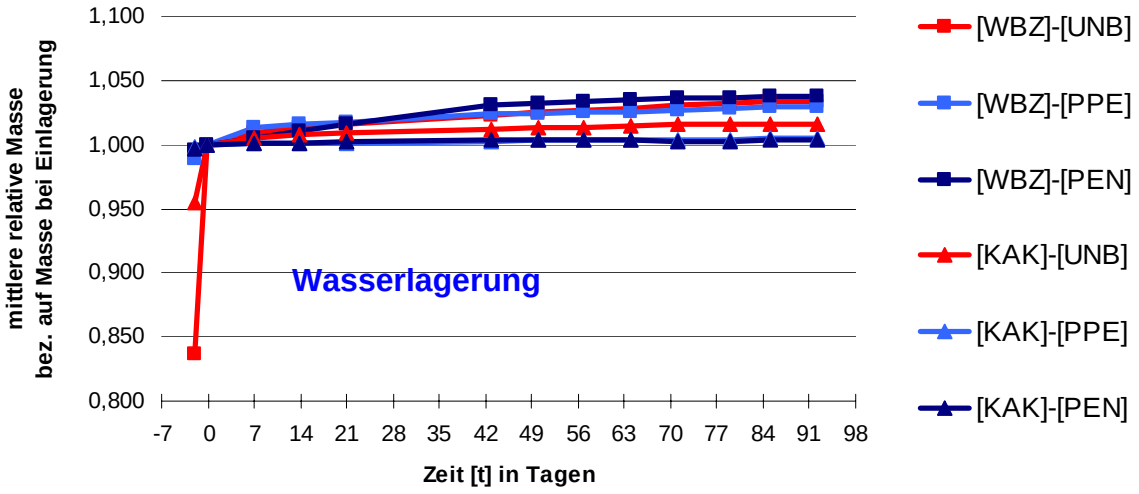


Abbildung 76: zeitlicher Verlauf der mittleren relativen Massen von verschieden behandelten Ziegeln zufolge Wasserlagerung bei pH1

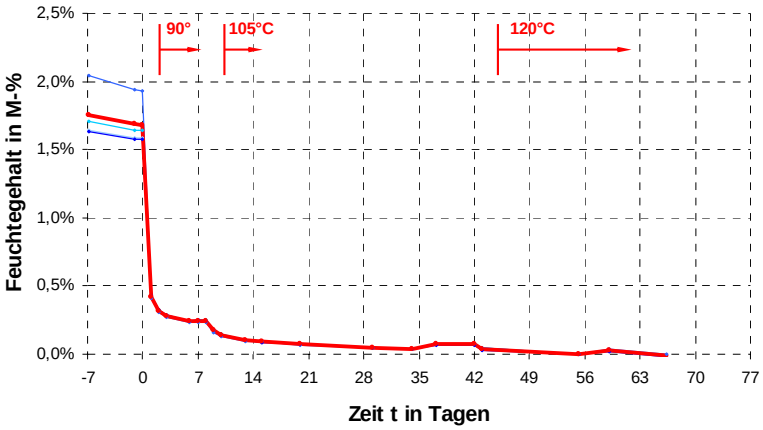


Abbildung 77: Trocknungsverlauf bei unterschiedlichen Temperaturen der Proben [SR3] (1) vor der Penetration mit Paraffin

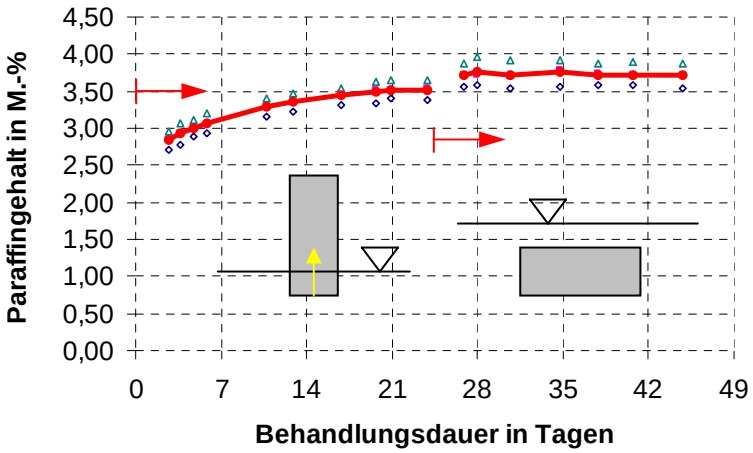


Abbildung 78: Paraffin-Penetration durch kapillares Saugen und anschließende freie Paraffinsättigung der Proben [SR3] (1) bei 120°C

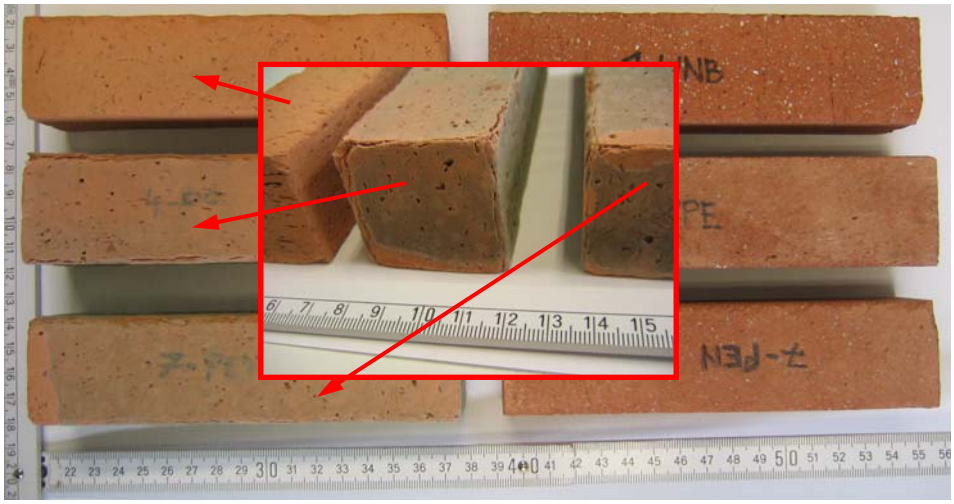


Abbildung 79: unbehandelte und behandelte Ziegelproben nach Säurelagerung bei pH1 (li.:) Ziegel (WBZ), oben: unbehandelt, darunter: behandelte Probekörper; (re.:) Kanalklinker (KAK), unbehandelter und behandelte Probekörper

Lebenslauf

Persönliche Daten:		Dipl.-Ing. Jürgen Lukas Fickeysstraße 17/6/26 1110 Wien geboren am 13. Sept. 1976 in Hainburg a.d. Donau ledig
Ausbildung:	09/1982 bis 06/1986	Volksschule in Petronell-Carnuntum
	09/1986 bis 06/1990	Hauptschule in Hainburg a.d. Donau
	09/1990 bis 06/1995	Camillo Sitte Lehranstalt-Höhere technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt Wien III Abschluss: Reifeprüfung
	10/1996 bis 06/2002	Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Wien Studienzweig: Konstruktiver Ingenieurbau Abschluss: Diplomingenieur
	seit 08/2002	Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien
Tätigkeiten:	07/1991	Ferialpraxis bei der Baufirma Negrelli
	07/1992, 07/1993	Ferialpraxis bei der Baufirma Ilbau
	07/1994, 09/1995	Ferialpraxis im Ingenieurbüro Kollitsch & Stanek
	10/1995 bis 05/1996	Grundwehrdienst beim Österr. Bundesheer
	06/1996 bis 07/1996	angestellt im Ingenieurbüro Kollitsch & Stanek
	08/1996 bis 07/2002	freier Mitarbeiter im familieneigenen Bauplanungsbüro
	seit 08/2002	Projektassistent am Institut für Hochbau und Technologie Zentrum für Bauphysik und Bauakustik und selbständig als beratender Ingenieur im Bereich Bauphysik und Sanierung