

**Ermittlung von
Zulassungsanforderungen bei der
Prüfung von Beton (Eindringverhalten
von Referenzflüssigkeiten) unter neuen
Prüfbedingungen für die Verwendung
in der Landwirtschaft, JGS-Anlagen**

T 3284

T 3284

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8789-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

***Ermittlung von Zulassungsanforderungen
bei der Prüfung von Beton
(Eindringverhalten von Referenzflüssigkeiten)
unter neuen Prüfbedingungen für die
Verwendung in der Landwirtschaft, JGS-Anlagen***

Bericht Nr. 134/11

**Ermittlung von Zulassungsanforderungen bei der Prüfung von Beton
(Eindringverhalten von Referenzflüssigkeiten) unter neuen
Prüfbedingungen für die Verwendung in der Landwirtschaft, JGS-
Anlagen**

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt
Kolonnenstraße 30
10829 Berlin

Auftragnehmer: Kiwa MPA Bautest GmbH
NL MPA Berlin – Brandenburg
Voltastraße 5, Geb. 10.6
13355 Berlin

Dieser Bericht besteht aus 42 Seiten.

Wissenschaftliche Bearbeiter: Dipl. Geol. Susanne Henke
Dr. rer. nat. Roland Hüttl
Dr. rer. nat. Ralf Röben

Berlin, den Oktober 2011

Dr. R. Hüttl
Geschäftsführer

Bitte beachten Sie, dass die Materialprüfungsanstalt MPA Berlin-Brandenburg GmbH sowie die Gesellschaft für Materialprüfung und Baustoffforschung mbH (MBF) gemeinsam neu firmieren als Kiwa MPA Bautest GmbH, Niederlassung (NL) MPA Berlin-Brandenburg.
Bitte berücksichtigen Sie in diesem Zusammenhang auch unsere neuen Steuernummern sowie die Bankverbindung.
Bis die Ummeldung unserer Anerkennungen als PÜZ-Stelle nach Landesbauordnung bzw. nach Bauproduktengesetz (notified body) seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erfolgt, erhalten Sie unsere Prüf- und Überwachungsberichte sowie Zertifikate u. ä. in der bisherigen Form von der Materialprüfungsanstalt MPA Berlin-Brandenburg GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1..... Sachverhalt und Aufgabenstellung	4
1.1..... Problematik der JGS-Anlagen	4
1.2..... Silagesickersäfte	5
1.3..... Einsatz von Beton in chemisch stark angreifender Umgebung	7
1.4..... Verfahren zur Beurteilung der Säurebeständigkeit von Beton bzw. Mörteln	7
1.5..... Prüfvarianten	11
2..... Material und Methoden	14
2.1..... Angeliefertes Probenmaterial	14
2.2..... Verteilung der Proben auf die Verfahren	14
3..... Verfahren A und Verfahren B	15
3.1..... Einlagerung	15
3.2..... Druckfestigkeit und Umwandlungstiefe nach Beanspruchung in den Untersuchungsmedien	16
3.3..... Mikroskopische Untersuchungen nach der Beanspruchung	17
3.4..... Probendokumentation nach Beanspruchung in den Untersuchungsmedien	18
3.5..... Ermittlung der Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048-2 / DIN EN 12504	20
3.6..... Ergebnisse der Umwandlungstiefe	21
3.7..... Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen	22
4..... Verfahren C: Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 3,5	26
4.1..... Säureanlage	27
4.2..... Ergebnisse Masseabträge	28
4.3..... Probendokumentation nach Beanspruchung	31
4.4..... Mikroskopische Untersuchungen	32
5..... Zusammenfassung und Bewertung	38

1 Sachverhalt und Aufgabenstellung

Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) bearbeitete die Kiwa MPA Bautest GmbH, NL MPA Berlin-Brandenburg das folgende F & E-Vorhaben:

Ermittlung von Zulassungsanforderungen bei der Prüfung von Beton (Eindringverhalten von Referenzflüssigkeiten) unter neuen Prüfbedingungen für die Verwendung in der Landwirtschaft, JGS-Anlagen

Veranlassung für das Vorhaben sind die Arbeiten im Rahmen des SVA 74: *AK Dichtkonstruktionen für die Landwirtschaft*. In diesem Arbeitskreis des DIBt wird derzeit das "Prüfprogramm für Abdichtungssysteme zur Verwendung in Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Jauche, Gülle und Silagesickersäften (JGS-Anlagen)" erarbeitet. Unter anderem werden hier Prüfgrundsätze zur Beurteilung des Eindringverhaltens bzw. der Medienbeständigkeit von unbeschichtetem Beton erarbeitet.

1.1 Problematik der JGS-Anlagen

Für den Bau und den Betrieb von JGS-Anlagen sind die entsprechenden bau- und wasserrechtlichen Regelungen zu beachten und zu erfüllen.

Nach dem Wasserhaushaltsgesetz müssen Anlagen zum Umgang mit Jauche, Gülle und Silage so aufgebaut sein, dass der **bestmögliche Schutz** von Grund- und Oberflächen-Gewässern gewährleistet ist. Diese Anforderungen beinhalten, dass JGS-Anlagen über die vorgesehene Lebensdauer die Gewähr bieten müssen, dass schädliche Bestandteile der eingelagerten landwirtschaftlichen Stoffe nicht in den Boden sickern und damit Grundwasser (oder auch Oberflächenwasser) nachteilig beeinflussen können.

Dies setzt voraus, dass bei der baulichen Planung und Ausführung solcher Anlagen zu berücksichtigen ist, dass Wände und Boden eine Dichtfunktion übernehmen müssen, also flüssigkeitsundurchlässig sein müssen. Flüssigkeitsundurchlässig in diesem Sinn bedeutet, dass die Dicht- und Tragfunktion der Bauausführungen während der Beanspruchungsdauer nicht verloren geht¹.

Betonbauten müssen – ebenso wie auch Bauteile aus anderen Werkstoffen - dicht gegen die möglicherweise einwirkenden Flüssigkeiten über bestimmte, festzulegende Zeiträume sein. Für Beton gilt die Unterscheidung nach flüssigkeitsdichtem Beton (FD-Beton) und flüssigkeitsdichtem

¹ Arbeitsblatt DWA-A 786 (TRwS) Ausführung von Dichtflächen

Beton nach Eindringprüfung (FDE-Beton)², wobei die übliche Einwirkungsdauer der Flüssigkeit in der Prüfung 72 Stunden beträgt. Bei FD- und FDE-Betonen wird also (nur) die temporäre Einwirkung im Havariefall (Schadensfall) betrachtet. Beton in JGS-Anlagen muss dagegen planmäßig eine dauerhafte Dichtfunktion übernehmen.

Stahlbeton ist in vielen landwirtschaftlichen Bauwerken wie z. B. Fahrsilos der dominierende Baustoff, da er statisch-konstruktiv und wirtschaftlich erhebliche Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen besitzt. Betone in landwirtschaftlichen Anlagen wie in Fahrsilos werden häufig beschichtet, da die in den landwirtschaftlichen Biomassen während der Lagerung gebildeten Sickersäfte häufig einen deutlich sauren pH-Wert aufweisen und damit als chemisch stark angreifend gegenüber Beton wirken. Die Aussage der Betonaggressivität trifft insbesondere auf Silagesickersäfte zu. Entsprechend stellen Silagesickersäfte für Beton eine chemisch stark angreifende Umgebung dar, diese Aussage findet sich auch in der DIN 11622-2 (2004)³. Entsprechend ist für den Beton von Gärfuttersilos ein Beton der Expositionsklasse XA3 vor zu sehen. Gülle wird als schwach angreifend eingestuft und erfordert Beton der Expositionsklasse XA1.

Sofern der Beton planmäßig als Dichtung ohne zusätzliche Beschichtung eingesetzt werden soll, muss gewährleistet sein, dass die Dichtfunktion des Stahlbetons und die Standsicherheit für die üblicherweise mit 25 Jahren angesetzte Lebensdauer eingehalten werden kann.

Auch ein Beton, der als FD-Beton eingestuft bzw. als FDE-Beton beurteilt ist, unterliegt damit der Gefährdung durch den korrosiven Angriff durch Säureeinwirkung. Für den Fall des sauren Angriffs ist nicht nur das physikalische Eindringen und Durchdringen der beaufschlagenden Flüssigkeit vorrangig relevant, sondern die Betonkorrosion, die zu einer Querschnittsminderung des Bauteils, zur Schädigung der Bewehrung von Stahlbetonteilen und damit - bei einer zyklischen Beanspruchung wie z. B. in Fahrsilos - zur Aufhebung der Flüssigkeitsundurchlässigkeit führen kann.

1.2 Silagesickersäfte

Ziel der Silierung von landwirtschaftlichen Produkten ist die Erzeugung eines Futters, das haltbar, für das Vieh leicht verdaulich und in seinem Nährgehalt weitgehend erhalten ist.

Die Milchsäuregärung im Futtersilo oder Fahrsilo ist ein anaerober Prozess, bei dem neben der Zersetzung von Biopolymeren die Bildung von organischen Säuren einen Hauptreaktionsweg darstellt. Vorrangig wird dabei die Milchsäure gebildet, daneben finden sich aber auch höhere und niedrigere Fettsäuren, die zu dem vielfach als unangenehm empfundenen Geruch beitragen.

² DAfStb-Richtlinie, Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, 10/2004

³ DIN 11622-2; Gärfuttersilos und Güllebehälter – Teil 2: Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit – Gärfuttersilos und Güllebehälter aus Stahlbeton, Stahlbetonfertigteilen, Betonformsteinen und Betonschalungssteinen. Beuth Verlag, Berlin, 06/2004

Die Zusammensetzung von Silofutter und entstehenden Silagesickersäften ist dabei abhängig von einer Reihe von Faktoren:

- B Art der Futterpflanze bzw. Feuchtegehalt
- B Verlauf der Gärung
- B Temperatur

Tabelle 1 pH-Werte von Gärsäften unterschiedlicher Futtermittel⁴

Gärfutterart	pH-Wert
Wiesengras	4,7
Rübenblatt mit Köpfen	4,4
Mais grün	4,2
Mais milchreif	3,9

Aus diesen Aussagen folgt, dass nicht „die“ Zusammensetzung bzw. „der“ pH-Wert eines Silagesickersafts oder Gärsafts angegeben werden kann, sondern mit Schwankungen in der Zusammensetzung von Gärsäften zu rechnen ist. In der Literatur finden sich als typischer pH-Bereich, der in Gärsäften auftritt, zwischen 3,9 und 4,7 (s. Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 2 Exemplarische Zusammensetzung von Gärsaft⁵

Substanz	Einheit	Anteil im Gärsaft
Asche	g/kg	12
Eiweiss	g/l	16
Zucker	g/kg	3
Calcium	g/kg	1,55
Essigsäure	g/kg	8,6
Propionsäure	g/kg	0,2
Buttersäure	g/kg	0,4
Milchsäure	g/kg	17,2
Ammoniak	g/l	0,35
Ethanol	g/kg	3,8
pH-Wert Gärsaft		3,9

⁴ Schutzanstriche und Beschichtungen für Gärfutterbehälter aus zementgebundenen Baustoffen, KTBL Arbeitsblatt Nr. 1060, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 1996

⁵ Asphaltböden, eine Alternative zu Gärfuttersilos? Beton-, Walz- und Gussasphalt im Vergleich, FAT-Bericht Nr. 543, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, 1999

In der Silage selber finden sich auf Grund der schlechteren Wasserlöslichkeit vor allem höhere Fettsäuren ab C 8:0 sowie Biopolymere, der pH-Wert ist entsprechend höher.

Wichtig ist festzuhalten, dass der pH-Wert nach den Angaben in der Literatur einen Wert von 3,9 praktisch nicht unterschreitet.

1.3 Einsatz von Beton in chemisch stark angreifender Umgebung

In einer ganzen Reihe von ingenieurtechnischen Bauwerken wird Beton auch in chemisch stark angreifender Umgebung eingesetzt. Typische Beispiele für starken sauren Angriff sind Bereiche von abwassertechnischen Bauwerken, in denen es zur biogenen Bildung von Schwefelsäure kommt (BSK) oder Naturzugkühler von Kohlekraftwerken. Erfahrungen aus diesen Anwendungsbereichen zeigen, dass es durch Optimierung der Gefügedichtheit und durch die Optimierung der chemischen Zusammensetzung gelingt, Hochleistungsbetone herzustellen, die bis zu einem pH-Wert von ca. 3,5 eine ausreichende Lebensdauer aufweisen. Die Lebensdauer von Naturzugkühlern von Großkraftwerken wird normalerweise mit 50 Jahren angesetzt⁶. Unterhalb eines pH-Wertes von 3,5 beschleunigt sich die Korrosionsgeschwindigkeit deutlich.

1.4 Verfahren zur Beurteilung der Säurebeständigkeit von Beton bzw. Mörteln

Im Rahmen des SVA 74: *AK Dichtkonstruktionen für die Landwirtschaft* wird derzeit das "Prüfprogramm für Abdichtungssysteme zur Verwendung in Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Jauche, Gülle und Silagesickersäften (JGS-Anlagen)" erarbeitet. Unter anderem werden hier Prüfgrundsätze zur Beurteilung des Eindringverhalten bzw. der Medienbeständigkeit von unbeschichtetem Beton erarbeitet. Da die Korrosion durch sauren Angriff der Effekt ist, der die Dichtigkeit der Konstruktion am stärksten einschränkt, ist die Medienbeständigkeit des Betons die Größe, die für die Beurteilung der langfristigen Flüssigkeitsundurchlässigkeit zu beurteilen ist.

Im Arbeitskreis wird derzeit als Verfahren für die Beurteilung der Säurebeständigkeit das Verfahren A.4 des Anhangs A der DAfStb-Richtlinie, Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen in modifizierter Form favorisiert. Als Prüfmedium wird eine wässrige Lösung von 3,0 % Milchsäure, 1,5 % Essigsäure und 0,5 % Buttersäure empfohlen. Das prinzipielle Prüfszenario ist das folgende:

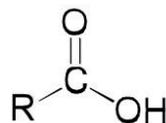
⁶ VGB Powertech VGB-R 613, 2010: Richtlinie: Leitfaden für das Lebensdauermanagement von Stahlbeton-Kühltürmen in Kraftwerken

- 1. Einlagerung von drei Betonbohrkernen** (h=150 mm, Ø=80 mm) **des zu untersuchenden Festbetons in die Gärsäure-Modell-Lösung:**
3 M.-% Milchsäure, 1,5 M.-% Essigsäure, 0,5 M.-% Buttersäure
über die Dauer von 2160 Stunden (90 Tage), davon zunächst
28 Tage zu Beginn bei erhöhter Temperatur (40 °C),
Wechsel der Gärsäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C ± 2 °C in der durch einen Magnetrührer
leicht bewegten Gärsäure-Modell-Lösung
nochmaliger Wechsel der Gärsäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C ± 2 °C in der durch einen Magnetrührer
leicht bewegten Gärsäure-Modell-Lösung
- 2. Prüfung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein**, Beurteilung der
Säureeindringtiefe an aufgespaltenen Prüfkörpern mittels indikativem Test nach
Prüfverfahren A.4
- 3. Bestimmung der Festigkeit der eingelagerten Prüfkörper**, Bestimmung der
Druckfestigkeit der in der Gärsäure eingelagerten Prüfkörper im Vergleich zu den
wassergelagerten Referenzprüfkörpern

Nachteil dieses Verfahrens ist der Einsatz der stark geruchsbelästigenden Buttersäure in der Gärstoff-Modell-Lösung. Die Lösung ist traditionell für Prüfverfahren im JGS-Bereich eingeführt. Insbesondere bei der Einlagerung bei 40 °C verlangt die Abdichtung der Einlagerungsbecken gegen die Umgebungsluft große Sorgfalt.

In diesem Zusammenhang sollte geprüft werden, ob ein Ersatz der Buttersäure durch eine äquivalente Menge einer anderen, weniger geruchsbelästigenden Säure zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

Die Buttersäure (oder Butansäure) gehört ebenso wie die Essigsäure oder die Propionsäure zur homologen Reihe der aliphatische Monocarbonsäuren mit der allgemeinen Formel:



R = CH₃: Essigsäure, R = CH₂-CH₃: Propionsäure, R = CH₂-CH₂-CH₃: Butansäure

Bei den drei genannten Substanzen handelt es sich um mittelstarke organische Säuren, die sich bezüglich der Säurestärke kaum unterscheiden. Dies sei an Hand des pK_s-Werts beschrieben, der

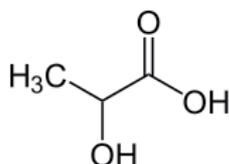
die Säurestärke quantitativ beschreibt (zum Vergleich sind einige bekannte Mineralsäuren aufgeführt);

Tabelle 3 pK_s-Werte verschiedener Säuren

Name	pK _s -Wert	Allgemeine Charakterisierung
Salzsäure	-6	Sehr starke Säure
Phosphorsäure	2,13	Starke Säure
Essigsäure	4,74	Mittel starke Säure
Propionsäure	4,85	Mittel starke Säure
n-Buttersäure	4,82	Mittel starke Säure
Kohlensäure	6,52	Mittelstarke bis schwache Säure

Die pK_s-Werte der Essigsäure, der Propionsäure und der Buttersäure sind praktisch identisch. Neben der Carbonsäurefunktion sind in diesen Säuren keine weiteren funktionellen Gruppen enthalten. Damit sind die Reaktionsmöglichkeiten der drei Säuren Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure unter den aufgeführten Bedingungen gleich. Ein Austausch der drei Säuren untereinander sollte somit keine signifikante Veränderung im Angriffsgrad hervorrufen.

Die mengenmäßig dominierende organische Säure des Säuregemischs ist die Milchsäure. Diese unterscheidet sich von den aliphatischen Monocarbonsäuren durch eine zusätzliche Hydroxylgruppe:



Aus diesem Grund ist ein Ersatz der Milchsäure durch eine Monocarbonsäure wie Essigsäure nicht sinnvoll.

Auf Grund dieser Fakten wurde für die Prüfung des möglichen Ersatzes der Buttersäure in der Säuremischung die Buttersäure durch eine gleiche Menge Essigsäure ersetzt und die Milchsäure in der Mischung beibehalten.

Weiterhin sollte untersucht werden, wie das Ergebnis des DAfStB-Verfahrens im Verhältnis zu anderen eingeführten Säurebeständigkeitsprüfungen ausfällt. Es sind eine Reihe von Verfahren beschrieben, die allerdings meist keine weitere Verbreitung gefunden haben.

Am bekanntesten sind im Bereich der Mörtelprüfung für den Sielbau die „Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau“⁷, die die Einlagerung von Mörteln bei pH 1,0 in

⁷ L. Franke, M. Oly, S. Witt: Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau, Universität Hamburg, 2001

Schwefelsäure ohne weitere Kontrolle des pH-Werts beinhaltet. Wesentliche Kriterien bei der Bewertung der Säurebeständigkeit sind innerhalb dieses Verfahrens die mikroskopisch ermittelte Schädigungstiefe und die Restdruckfestigkeit der Prüfkörper.

Ein Verfahren, das als „Performance“-Prüfung von Betonen im Abwassersektor und beim Bau von Naturzugkühlern in Großkraftwerken herangezogen wird, ist ein Verfahren, das an der MPA Berlin-Brandenburg entwickelt wurde. Bei diesem Verfahren erfolgt die Einlagerung des Betons bei einem kontinuierlich kontrollierten und konstant gehaltenem pH-Wert von 3,5 über die Dauer von 12 Wochen. Die Beurteilung der Säurebeständigkeit erfolgt dabei über die mikroskopisch ermittelte Schädigungstiefe sowie die Masseveränderung der Betonprüfkörper. Für den kompletten Performance-Test werden daneben noch allgemeine Parameter zur Charakterisierung der Dauerhaftigkeit wie Porositätskenndaten oder der Chlorideindringwiderstand ermittelt.

Das Verfahren ist im VGB Powertech, dem Verband der Großkraftwerkbetreiber als Referenzverfahren für die Prüfung von Betonen mit erhöhtem Säurewiderstand (z. B. für Naturzugkühler) vorgeschrieben.

Auch eine Reihe von Abwasserverbänden wie z.B. die Emscher-Lippe-Genossenschaft oder die Berliner Wasser Betriebe haben das Verfahren zum Bestandteil ihrer ZTVs gemacht.

Die Säureprüfung aus der Performance-Prüfung wurde als Referenz-Prüfung zum DAfStB-Verfahren eingesetzt.

Im folgenden Kapitel sind die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen noch einmal im einzelnen dargestellt.

1.5 Prüfvarianten

Im Folgenden sind die untersuchten Prüfvarianten noch einmal zusammengefasst:

Verfahren A - Prüfung nach modifiziertem DAfStB-Verfahren (Anhang A, A4) und eingeführter Gärssaft-Lösung:

1. Einlagerung von drei Betonbohrkernen ($h=150$ mm, $\varnothing=80$ mm) des zu untersuchenden Festbetons in die eingeführte Gärssäure-Modell-Lösung:
3 M.-% Milchsäure, 1,5 M.-% Essigsäure, 0,5 M.-% Buttersäure
über die Dauer von 2160 Stunden (90 Tage), davon zunächst
28 Tage zu Beginn bei erhöhter Temperatur (40 °C),
Wechsel der Gärssäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C \pm 2 °C in der durch einen Magnetrührer leicht bewegten Gärssäure-Modell-Lösung
nochmaliger Wechsel der Gärssäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C \pm 2 °C in der durch einen Magnetrührer leicht bewegten Gärssäure-Modell-Lösung
2. Prüfung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein, Beurteilung der Säureeindringtiefe an aufgespaltenen Prüfkörpern mittels indikativem Test nach Prüfverfahren A.4
3. Bestimmung der Festigkeit der eingelagerten Prüfkörper, Bestimmung der Druckfestigkeit der in der Gärssäure eingelagerten Prüfkörper im Vergleich zu den wassergelagerten Referenzprüfkörpern

Zusätzlich:

4. Mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

Verfahren B - Prüfung nach modifiziertem DAfStB-Verfahren (Anhang A, A4) und variiertes Gärsäure-Lösung:

1. Einlagerung von drei Betonbohrkernen ($h=150$ mm, $\varnothing=80$ mm) des zu untersuchenden Festbetons in die abgewandelte Gärsäure-Modell-Lösung:
3 M.-% Milchsäure, 2 M.-% Essigsäure
über die Dauer von 2160 Stunden (90 Tage), davon zunächst 28 Tage zu Beginn bei erhöhter Temperatur (40 °C), die Restdauer bei 20 °C \pm 2 °C; parallele Einlagerung von Prüfkörpern für die mikroskopische Untersuchung (Quader)
2. **Prüfung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein**, Beurteilung der Säureeindringtiefe an aufgespaltenen Prüfkörpern mittels indikativem Test nach Prüfverfahren A.4
3. **Bestimmung der Festigkeit der eingelagerten Prüfkörper**, Bestimmung der Druckfestigkeit der in der Gärsäure eingelagerten Prüfkörper im Vergleich zu den wassergelagerten Referenzprüfkörpern

Zusätzlich:

4. **Mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper**; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

Als Referenz wurden entsprechend des Verfahrens A.2 der DAfStB-Richtlinie Bohrkerne bzw. Reststücke als Referenz in Trinkwasser eingelagert, die ansonsten unter exakt denselben Lagerungsbedingungen wie die Gärsäurelösung behandelt wurden.

Verfahren C - Prüfung nach Säure-Perfomance-Test mit verdünnter Schwefelsäure (pH 3,5, konstant):

1. Einlagerung von zwei Quadern (150 mm x 100 mm x 40 mm) des Betons in die Schwefelsäure bei pH 3,5 (konstant) im Vergleich zu einem Referenzbeton (Hochleistungsbeton mit bekannter Säurebeständigkeit)
2. Wöchentliche Wägung der Prüfkörper unter leichter Abrasion (bürsten)
3. Nach zwölfwöchiger Einlagerung mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

2 Material und Methoden

2.1 Angeliefertes Probenmaterial

Bei dem untersuchten Beton handelte es sich um einen FD-Beton (flüssigkeitsdichten Beton) nach DAfStb (C 35/45, w/z = 0,48, CEM I, Größtkorn: 16 mm, Sieblinie A/B), der bei der KIWA MPA Bautest hergestellt wurde. Der Beton wurde bis zum Betonalter von 7 Tagen im Wasser und anschließend im Normalklima gelagert. Im Betonalter von 28 Tagen ging der Beton in die Prüfung.

2.2 Verteilung der Proben auf die Verfahren

Aus neun der Prüfwüfel wurde durch Kernbohrung (nass) je ein Bohrkern mit einem Außendurchmesser von 80 mm entnommen. Von diesen wurden jeweils

B drei Bohrkern in die Gärsäure-Lösung nach Verfahren A + ein Viertel eines weiteren Würfels,

B drei Bohrkern in die Gärsäure-Lösung nach Verfahren B + ein Viertel eines weiteren Würfels
und

B drei Bohrkern in das Trinkwasser (Referenz) + ein Viertel eines weiteren Würfels
eingelagert.

Aus zwei weiteren Prüfwürfeln wurden zwei Prüfquader in den Dimensionen 150 mm x 100 mm x 40 mm herausgearbeitet.

Diese wurden zusammen mit dem Referenzbeton entsprechend Verfahren C eingelagert.

An den Bohrkernen erfolgte nach erfolgter Einlagerung jeweils die Ermittlung der Druckfestigkeit.

Die zusätzlich nach Verfahren A und B eingelagerten Betonquader wurden für die Ermittlung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein und für die mikroskopische Bestimmung der Schädigungstiefe verwendet.

An den nach Verfahren C eingelagerten Betonquadern wurde die Masseveränderung und mikroskopisch die Schädigungstiefe ermittelt.

3 Verfahren A und Verfahren B

3.1 Einlagerung

Die Einlagerung erfolgte über die vorgesehene Dauer in Glasbecken von 500mm x 300 mm x 300 mm Größe; die Überdeckungshöhe mit dem jeweiligen Medium betrug mindestens 50 mm, das entsprach ca. 8,5 kg des Mediums.

Es wurden folgende Prüflösungen hergestellt, in welche die Probekörper eingelagert wurden:

Verfahren A:

950 g dest. Wasser
30 g Milchsäure
15 g Essigsäure
5 g Buttersäure
pH-Wert 2,10

Verfahren B:

950 g dest. Wasser
30 g Milchsäure
20 g Essigsäure
pH-Wert 2,14

Als Referenzlagerung wurde entsprechend der DAfStb-Richtlinie die Einlagerung in Wasser gewählt.

Die Bohrkern- bzw. Reststücke wurden aufrecht mit der ursprünglichen Oberseite nach oben in die Flüssigkeiten eingestellt.

Die Einlagerung erfolgte zunächst bei einer erhöhten Temperatur und anschließend bei Raumtemperatur, die Lagerungsbedingungen sind im Folgenden beschrieben:

Einlagerung für 28 Tage bei $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$
Wechsel der Gär-säure-Lösung
Einlagerung für 31 Tage bei $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$
Wechsel der Gär-säure-Lösung
Einlagerung für 31 Tage bei $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$
Gesamtlagerungsdauer: 90 Tage

3.2 Druckfestigkeit und Umwandlungstiefe nach Beanspruchung in den Untersuchungsmedien

Nach der vorgesehenen Einlagerungszeit wurden die Prüfkörper aus den beiden Medien entnommen und die Prüfkörper mit wenig Wasser abgespült.

Die eingelagerten Bohrkern wurden auf eine Länge von ca. 82 mm zugeschnitten und planparallel auf eine Prüflänge von 80 mm geschliffen. An diesen Zylindern wurde die Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048, Teil 2 : 1991/ DIN EN 12504, Teil 1 : 2009 ermittelt.

Die Bestimmung der Umwandlungstiefe erfolgte am Querschnitt der eingelagerten Betonzylinder. An jeweils einer frischen Bruchfläche (Schnittfläche) wurde diese mit Phenolphthalein-Lösung bestimmt. Dazu wurden die Zylinder mittig gespalten, die frischen Bruchflächen angefeuchtet und mit Phenolphthalein-Lösung besprüht. „Gesunder“ alkalischer Beton färbt sich violett, geschädigter Beton bleibt ungefärbt.

Beide Verfahren sind in der DAfStb-Richtlinie, *Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, 10/2004*² als Standardverfahren zur Beurteilung der Schädigungstiefe vorgesehen.

3.3 Mikroskopische Untersuchungen nach der Beanspruchung

Die mikroskopischen Untersuchungen erfolgten an An- und Dünnschliffen der Betonquader, welche in den unterschiedlichen Medien eingelagert waren. Von den Prüfkörpern aus den organischen Säuregemischen wurde je ein Querschnitt dieser Prüfkörper erzeugt, sodass der Angriff des jeweiligen Mediums von vier Seiten untersucht werden konnte: zwei dieser Seiten waren die bindemittelreiche Außenfläche des ehemaligen Würfels (Schalungsflächen), zwei andere Seiten sind Trennflächen (Schnittflächen durch Sägen), welche ebenfalls den Medien ausgesetzt waren.

Die optisch erkennbaren Schädigungen (z. B. Schädigungstiefe der Säuren) der jeweiligen Prüfkörper wurde zunächst mit Hilfe der Stereomikroskopie an Anschliffen bestimmt. Dazu wurden aus je einem Probekörper der unterschiedlich beanspruchten Proben ein Segment abgetrennt und mit unterschiedlichen Körnungen geschliffen und poliert.

Die Untersuchung der Beton-Dünnschliffe mit Hilfe der Polarisationsmikroskopie an einem Durchlichtmikroskop zeigt die genaue Schädigungsart und die Schädigungstiefe. Die jeweiligen Dünnschliffe wurden in einer Größe von ca. 2 cm x 4 cm und einer Dicke von exakt 30 µm hergestellt. Sie wurden im Durchlichtverfahren bei linearen Polarisatoren (lpl, Hellfeld) und mit zwei senkrecht aufeinander gekreuzten Polarisatoren (xpl, Dunkelfeldbeleuchtung) beurteilt.

3.4 Probendokumentation nach Beanspruchung in den Untersuchungsmedien

In den folgenden Abbildungen sind die Prüfkörper nach der Einlagerung in den Gärtsäurelösungen entsprechend den Verfahren A und Verfahren B dargestellt. Die Außenflächen der in den organischen Säuren eingelagerten Prüfkörper zeigen eine hellere Zementsteinmatrix und ein starkes oberflächliches Absanden. Teilweise sind sogar bereits größere Gesteinskörner heraus gebrochen. Neben der Zementsteinmatrix sind auch einige Gesteinskörner von den Säuren angegriffen worden und zeigen Lösungserscheinungen. Die wassergelagerten Referenzprüfkörper zeigen dieses Verhalten nicht.



Abbildung 1: : Prüfkörper 7 nach der Einlagerung in Prüflösung A (mit Buttersäure)nach 90 d



Abbildung 2: Prüfkörper 10 nach der Einlagerung in Prüflösung B (ohne Buttersäure) nach 90 d

Die pH-Werte der Gärsäurelösungen des Verfahrens A und B lagen zum Zeitpunkt des Beginns der Einlagerung übereinstimmend zwischen pH 2,1 und pH 2,2. Nach dem Ende einer Einlagerungsphase war der pH-Wert – ebenfalls für beide Lösungen – auf pH-Werte zwischen 5,0 und 5,1 angestiegen.

Ermittlung der Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048-2 / DIN EN 12504

Tabelle 4 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung (1, 2, 3 – Verfahren A: Gärsäurelagerung mit Buttersäure, 4, 5, 6 – Verfahren B: Gärsäurelagerung ohne Buttersäure, 7, 8, 9 – Wasserlagerung)

Prüf- körper	Höhe	Durch- messer	Masse	Roh- dichte	Bruch- last	Form- beiwert	Würfeldruck- festigkeit	Mittelwert Festigkeit	Rel. Festigkeit	S _{ctk} *
	mm	mm	g	kg/dm ³	kN	f	N/mm ²	N/mm ²	%	mm
1	78,2	81,9	832,2	2,12	155,3	1	32,3			
2	77,9	79,5	812,1	2,14	207,4	1	43,5	39,4	68,8	6,9
3	78,0	78,0	809,7	2,17	201,9	1	42,3			
4	78,2	81,1	831,0	2,13	172,4	1	35,9			
5	78,1	81,4	841,3	2,16	220,9	1	46,1	39,5	68,9	6,8
6	78,2	79,8	833,9	2,18	174,9	1	36,4			
7	78,4	80,6	907,0	2,33	286,0	1	59,2			
8	78,4	80,7	914,7	2,35	251,8	1	52,2	57,3	100	0
9	78,4	80,9	912,7	2,34	292,7	1	60,6			

Die in der vorletzten Spalte angegebene relative Festigkeit in % ist die Rest-Druckfestigkeit der Gärsäure-gelagerten Prüfkörper bezogen auf die wassergelagerten Prüfkörper (= 100 %).

Aus den mittleren Bruchlasten lässt sich entsprechend der DAfStb-Richtlinie *Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, 10/2004*² die charakteristische Schädigungstiefe S_{ctk} wie folgt berechnen:

$$s_{ctk} = 0,5 \cdot d \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{P_{uC}}{P_{uW}}} \right)$$

d mittlerer Durchmesser des Prüfkörpers,

P_{uC} Mittlere Bruchlast der chemisch beanspruchten Prüfkörper,

P_{uW} Mittlere Bruchlast der chemisch unbeanspruchten Prüfkörper.

Die charakteristischen Schädigungstiefen sind in der letzten Spalte der Tabelle 4 angegeben.

3.5 Ergebnisse der Umwandlungstiefe

Tabelle 5 Umwandlungstiefen, ermittelt mit dem pH-Indikator Phenolphthalein

Prüfkörper	Umwandlungstiefe mm
Gärsäure A (mit Buttersäure)	
7	ca. 5 mm (4 mm – 6 mm)
Gärsäure B (ohne Buttersäure)	
10	ca. 5 mm (4 mm – 6 mm)
Wasser	
11	Z 0

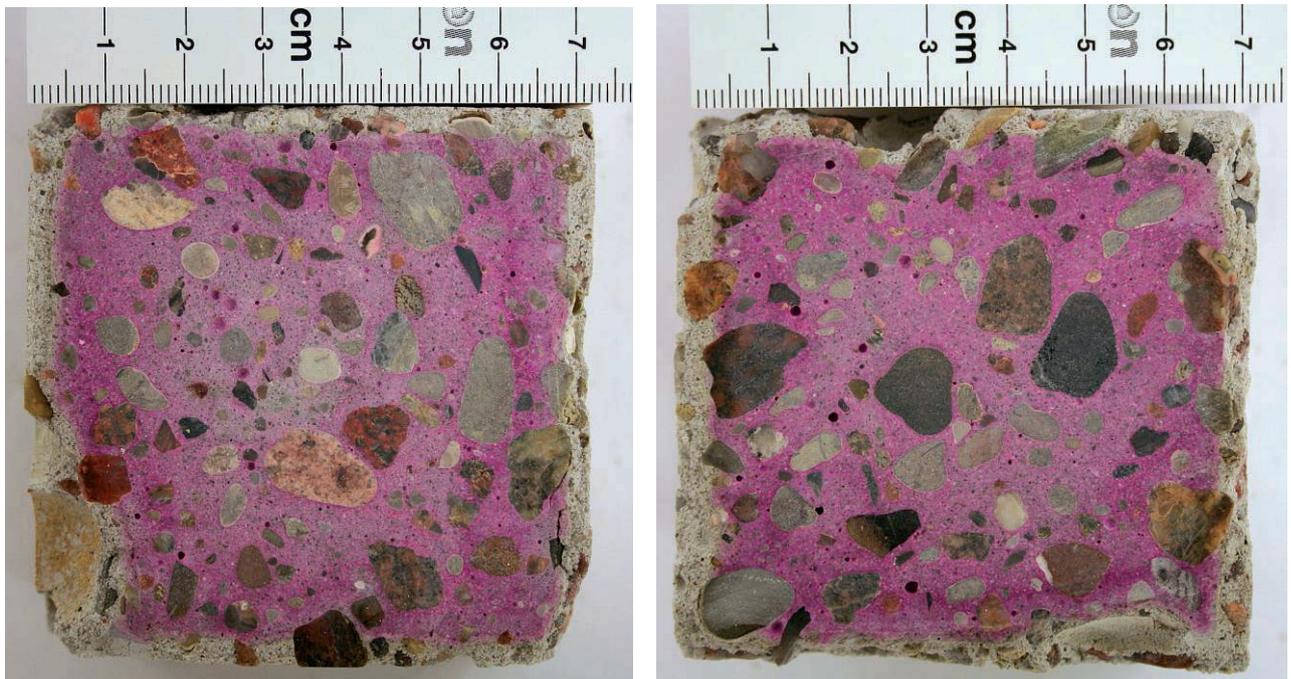


Abbildung 3: Prüfkörper 7 (links) und 10 (rechts) nach Bestimmung der Umwandlungstiefe

3.6 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Die Prüfkörper wurden wie in Kapitel 2.5 beschrieben präpariert und zunächst mit einem Stereomikroskop bei maximaler Vergrößerung von 65 : 1 untersucht. Die polarisationsmikroskopische Untersuchung erfolgte bei maximaler Vergrößerung von 250 : 1.

Zu den Anschliffen und Dünnschliffen wurde eine ausführliche Bilddokumentation erstellt. In diesen Abbildungen sind die charakteristischen Merkmale und Schädigungsverläufe des jeweiligen Prüfkörpers abzulesen. Die folgenden Seiten zeigen exemplarische stereo- und polarisationsmikroskopische Aufnahmen, an denen die Schädigungsart und gegebenenfalls der Betonabtrag bzw. die Schädigungstiefe der jeweils beanspruchten Probe bestimmt wurde.

Die mikroskopischen Aufnahmen sind wie folgt geordnet:

- ❖ Übersichtsaufnahme des Anschliffs
- ❖ Stereomikroskopische Detailaufnahme an einer beanspruchten Trennfläche (gesägt) des Anschliffs
- ❖ Polarisationsmikroskopische Übersichtsaufnahme am Dünnschliff zur Schädigungsart und gegebenenfalls zur Schädigungstiefe

Die im Rahmen der mikroskopischen Untersuchungen ermittelten maximalen Schädigungstiefen sind in der Übersicht in Tabelle 7 zusammengefasst.

Einlagerung in Prüflösung A (mit Buttersäure) - Stereomikroskopie

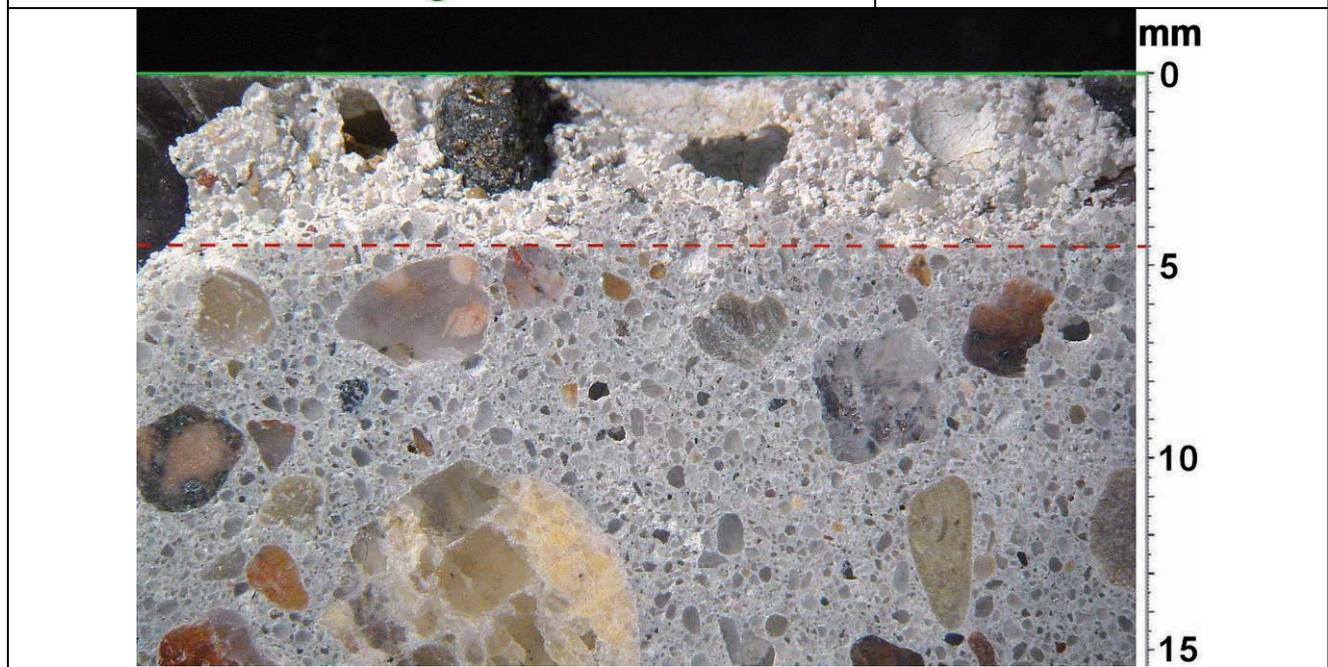
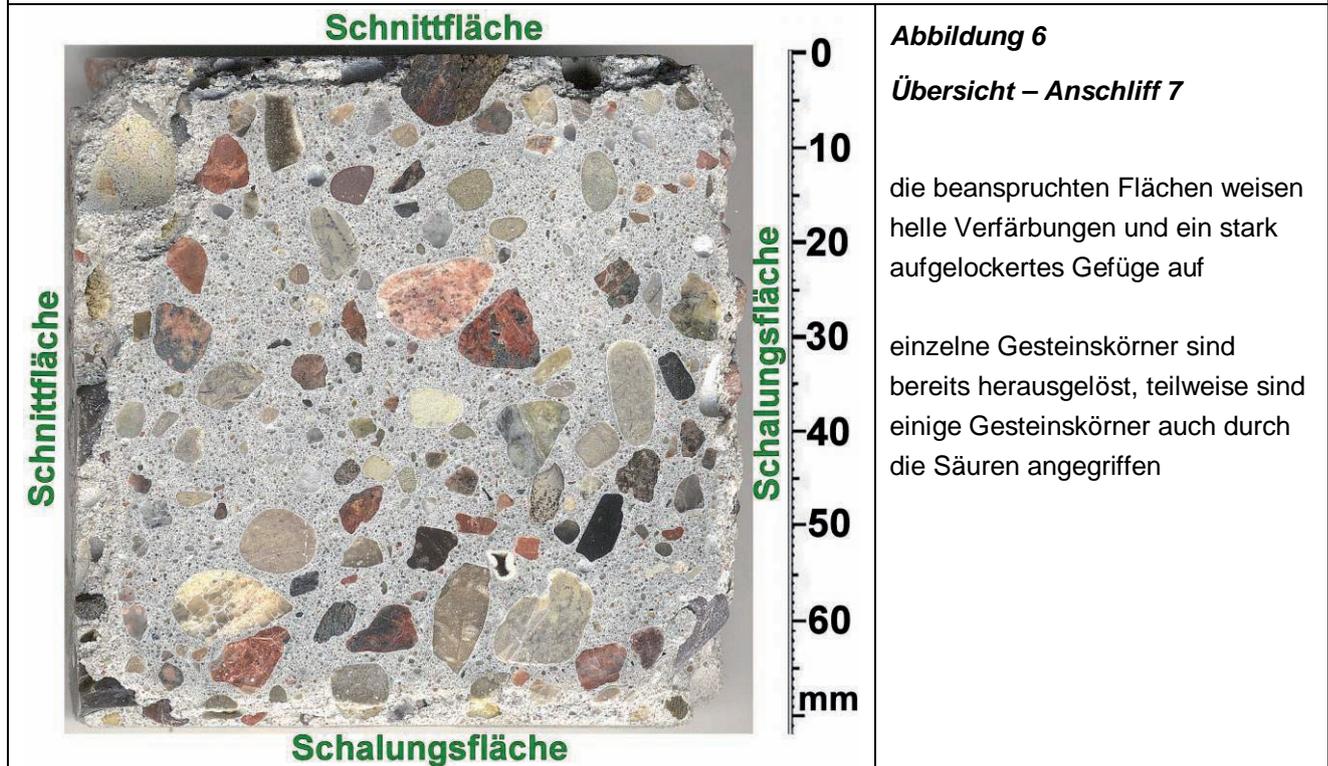


Abbildung 7 Detail – beanspruchte Schnittfläche

Oberfläche bereits abgesandet, Bindemittelmatrix mit stark aufgelockertem Gefüge, weiße Verfärbung der Betonmatrix und ein stark aufgelockertes Betongefüge bis ca. 4,5 mm Tiefe (die Bereiche, in denen bereits größere Gesteinskörner ausgebrochen sind, wurden nicht in diese Tiefenangabe einbezogen)

Einlagerung in Prüflösung A (mit Buttersäure) – Polarisationsmikroskopie

lpl: Hellfeld

xpl: Dunkelfeld

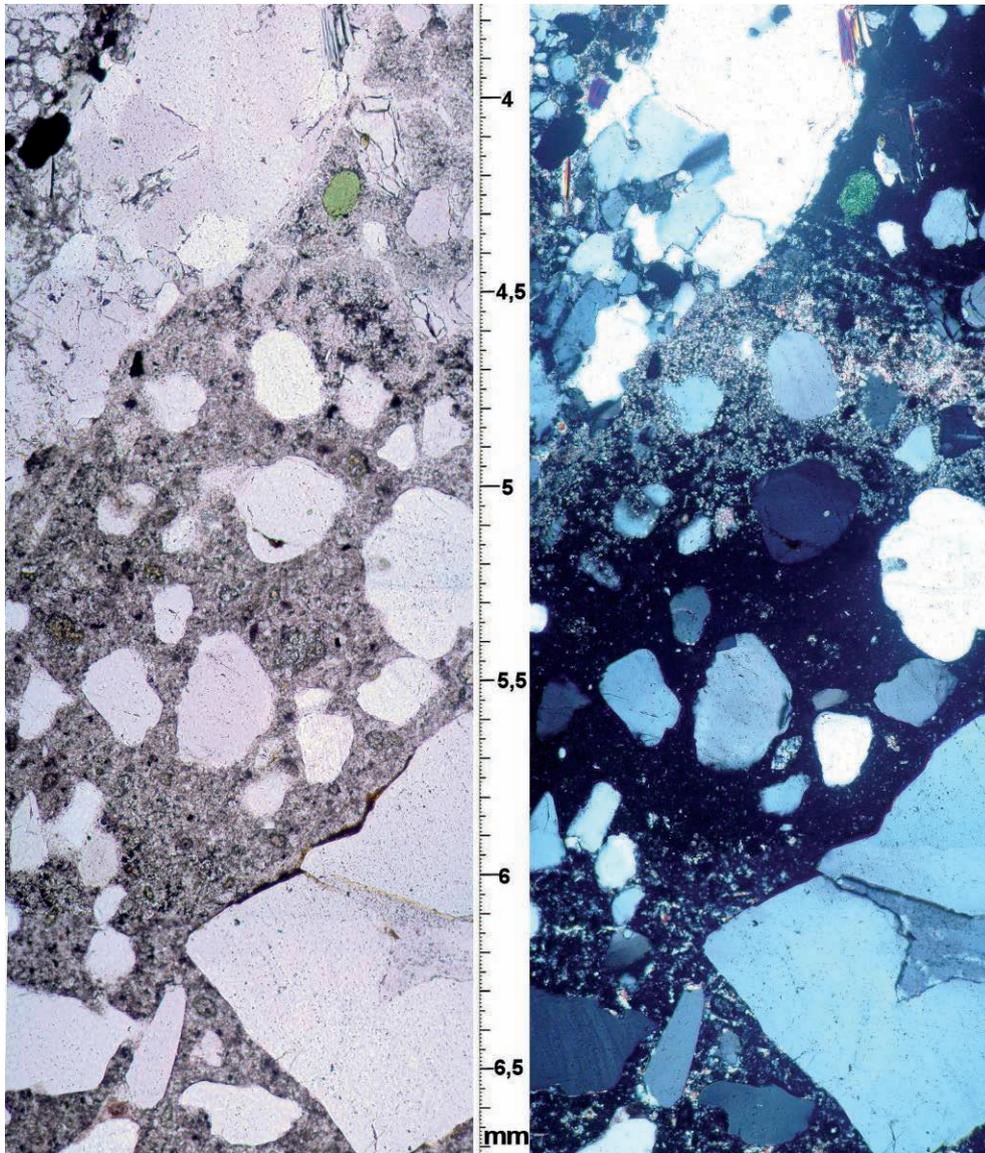


Abbildung 8
Schadensverlauf

Umwandlungszone I:
bis ca. 4,5 mm weist die Matrix eine schwarze Interferenzfarbe unter xpl auf, dieser Bereich entspricht der unterm Stereomikroskop weißen Matrixfärbung
Umwandlungszone II:
von ca. 4,5 bis ca. 5,1 mm Tiefe befindet sich ein Bereich mit hellen Interferenzfarben
Umwandlungszone III (lösender Angriff):
von ca. 5,1 bis ca. 6 mm Tiefe erscheint die Matrix unter xpl vollständig schwarz, was auf eine Lösung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hinweist
„gesunde“ Betonmatrix ab ca. 6,0 mm Tiefe:
innerhalb der Matrix befinden sich zahlreiche kleine Phasen mit bunten Interferenzfarben ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Oberfläche des unbeanspruchten Probekörpers = 0 mm

Einlagerung in Prüflösung B (ohne Buttersäure) - Stereomikroskopie

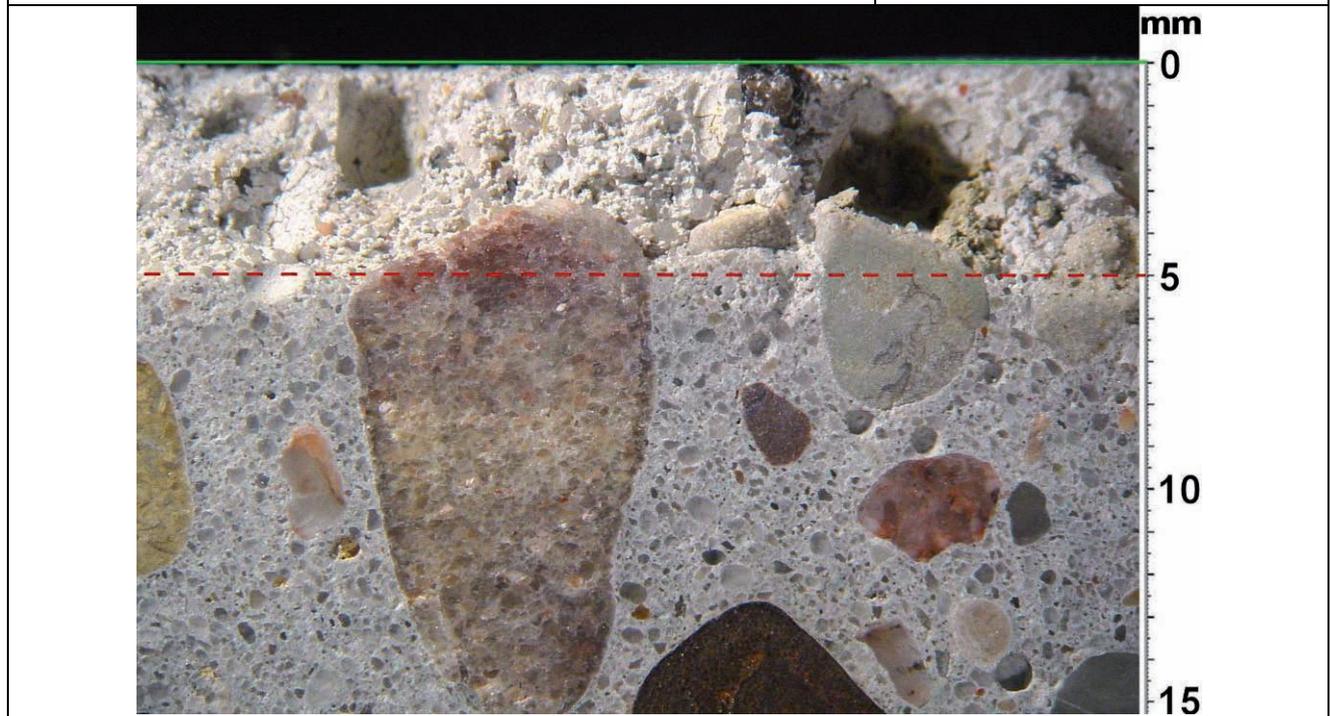
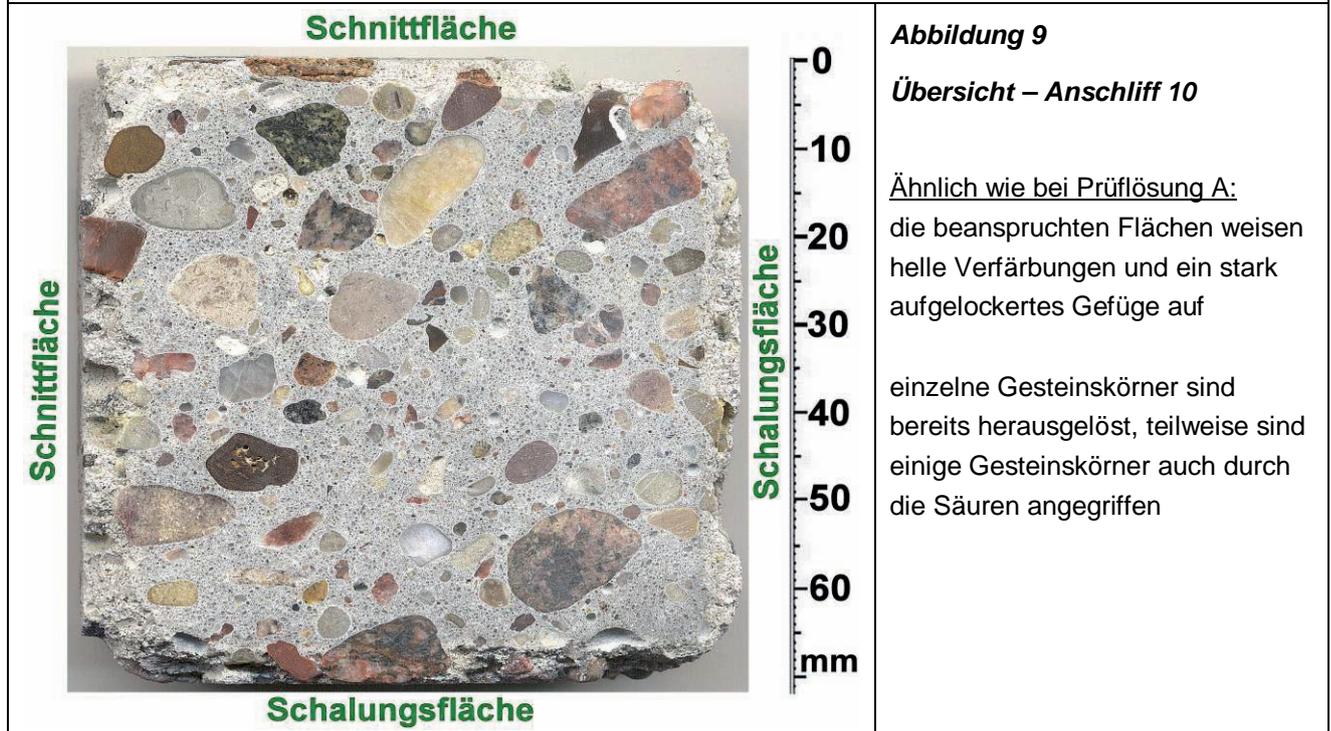
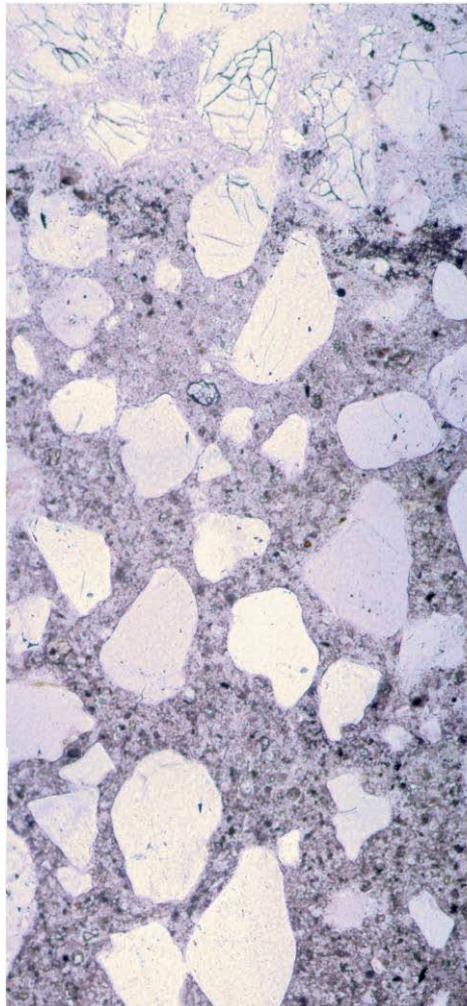


Abbildung 10 Detail – beanspruchte Schnittfläche

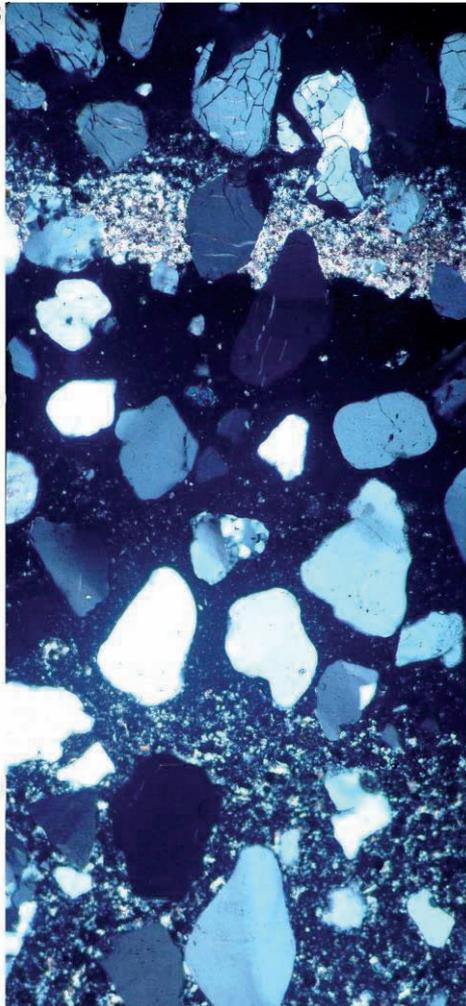
Oberfläche bereits abgesandet, Bindemittelmatrix mit stark aufgelockertem Gefüge, weiße Verfärbung der Betonmatrix und ein stark aufgelockertes Betongefüge bis ca. 5 mm Tiefe (die Bereiche, in denen bereits größere Gesteinskörner ausgebrochen sind, wurden nicht in diese Tiefenangabe einbezogen)

Einlagerung in Prüflösung B (ohne Buttersäure) – Polarisationsmikroskopie

lpl: Hellfeld



xpl: Dunkelfeld



**Abbildung 11
Schadensverlauf**

Umwandlungszone I :
bis ca. 5 mm weist die Matrix eine schwarze Interferenzfarbe unter xpl auf, dieser Bereich entspricht der unterm Stereomikroskop weißen Matrixfärbung

Umwandlungszone II:
von ca. 5 bis ca. 5,4 mm Tiefe befindet sich ein Bereich mit hellen Interferenzfarben

Umwandlungszone III (lösender Angriff):
von ca. 5,4 bis ca. 6,3 mm Tiefe erscheint die Matrix unter xpl vollständig schwarz, was auf eine Lösung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hinweist
„gesunde“ Betonmatrix ab ca. 6,3 mm Tiefe:
innerhalb der Matrix befinden sich zahlreiche kleine Phasen mit bunten Interferenzfarben ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Oberfläche des unbeanspruchten Probekörpers = 0 mm

4 Verfahren C: Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 3,5

Zusätzlich wurde der Beton in Schwefelsäure mit einem pH-Wert von 3,5 eingelagert. Mit Einlagerungen in Schwefelsäure liegen der Kiwa MPA Bautest GmbH zahlreiche Erfahrungswerte vor, welche das Einordnen der Betonqualität ermöglichen. Mit dem zu untersuchenden Beton wurde zusätzlich ein Referenzbeton eingelagert, welcher höchste Säurebeständigkeiten aufweist.

4.1 Säureanlage

Die Beständigkeitsuntersuchungen in Hinblick auf einen lösenden Angriff wurden entsprechend dem Hausverfahren der Kiwa MPA Bautest GmbH mit Schwefelsäure durchgeführt. Schwefelsäure wurde gewählt, weil sie gegenüber Beton die häufigste Ursache für lösenden Angriff darstellt (z. B. durch biogene Säurekorrosion in abwassertechnischen Anlagen oder saure Kondensate in Kühltürmen).

Die Schwefelsäure wurde mit einem konstanten pH-Wert von 3,5 eingesetzt, der pH-Wert wurde kontinuierlich überwacht und bei einem Anstieg des pH-Werts Säure nachdosiert. Die Prüfanlage zur Bestimmung der Säurebeständigkeit besteht aus mehreren säurefesten Containern sowie einem Reservoirbehälter. Die Säure wird ständig mit einer Kreiselpumpe umgewälzt und in den Containern über Düsen, die in den Containern in regelmäßigen Abständen verteilt sind, homogen verteilt. Die genauen Bedingungen der Säurebeanspruchung sind im Folgenden dargestellt:

Vorbereitung:

- Ausmessen und wägen der Prüfkörper vor Einlagerung.
- Wassersättigen der Prüfkörper über mind. drei Tage und anschließende Wägung.
- Einstellen in die Gestelle (PE-HD-Gestelle).
- Gestelle in der Reihenfolge der Nummerierung in die Container mit der Säure einstellen.
- Controller zur kontinuierlichen elektrometrischen Überprüfung des pH-Werts einstellen.

Nach jeweils einer Woche:

An den Prüfkörpern wurden unter laufendem Wasser mit der Bürste und leichtem Druck entstandene Aufwachsungen entfernt und anschließend vorsichtig mit Tissue trocken getupft. Nach dem Trocknungsschritt wird die Masse der Prüfkörper durch Wägung festgestellt. Beim erneuten Einstellen in Säure werden die Gestelle innerhalb des jeweiligen Containers um jeweils eine Position verschoben, um mögliche Unterschiede bei der Durchströmung mit Säure innerhalb eines Behälters auszugleichen.

Alle 2 Wochen:

Austausch der gesamten Säure und Einstellen des pH-Werts.

4.2 Ergebnisse Masseabträge

Zu Beginn des Versuchs wurden die Prüfkörper zunächst lufttrocken gewogen und dann kapillar wassergesättigt, um ein kapillares Aufsaugen der Schwefelsäure zu Beginn des Versuchs zu vermeiden. In der folgenden Tabelle sind die Masseveränderungen der Prüfkörper in Gramm und in Prozent (bezogen auf die Ausgangsmasse, wassergesättigt) zusammengestellt.

Tabelle 6 *Ermittlung der Masseveränderung der Prüfkörper mit abrasiven Einfluss in Gramm und in Prozent – Mittelwerte aus jeweils zwei Prüfkörpern*

Tage	Angaben in g		Angaben in %	
	gebürstete Prüfkörper		gebürstete Prüfkörper	
	untersuchter Beton nach Verfahren C	R (eferenz)	untersuchter Beton nach Verfahren C	R (eferenz)
0	0,0	0,0	0,00	0,00
7	-2,0	-1,5	-0,14	-0,10
14	-3,5	-3,5	-0,24	-0,24
21	-5,5	-3,5	-0,38	-0,24
28	-8,5	-4,5	-0,59	-0,31
35	-12,5	-5,5	-0,86	-0,38
42	-16,5	-7,5	-1,14	-0,51
49	-20,0	-9,0	-1,38	-0,62
56	-23,0	-10,0	-1,59	-0,69
63	-26,0	-11,0	-1,80	-0,76
70	-30,0	-12,0	-2,07	-0,82
77	-33,5	-13,5	-2,32	-0,93
84	-36,5	-15,0	-2,52	-1,03

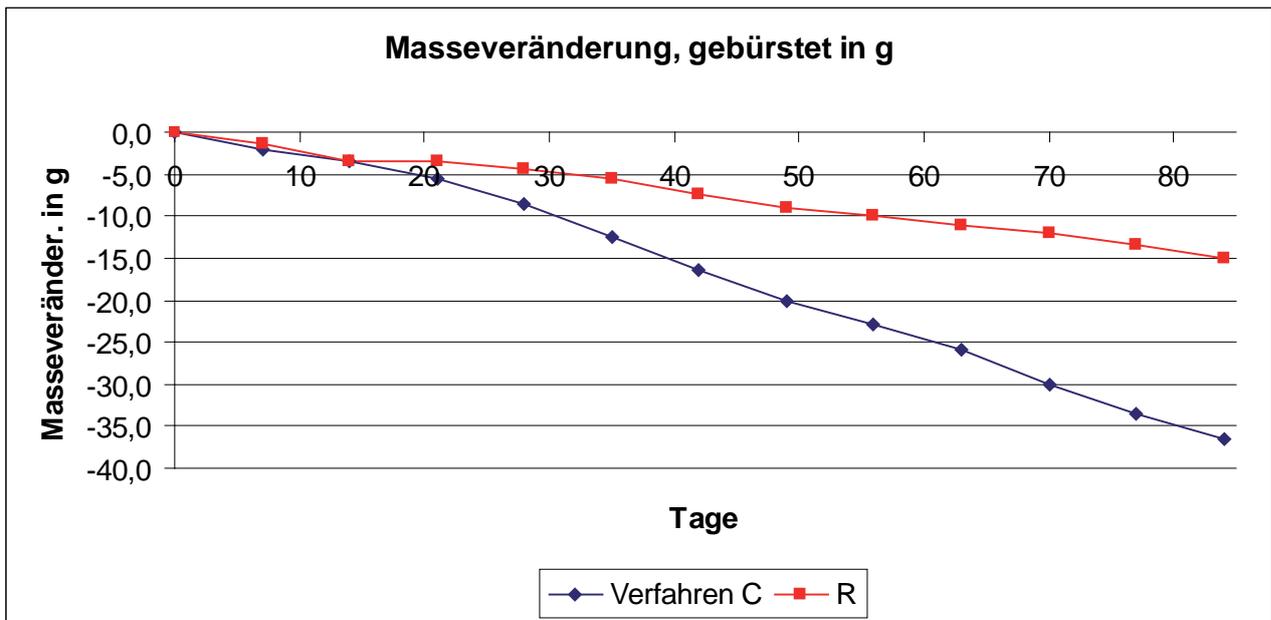
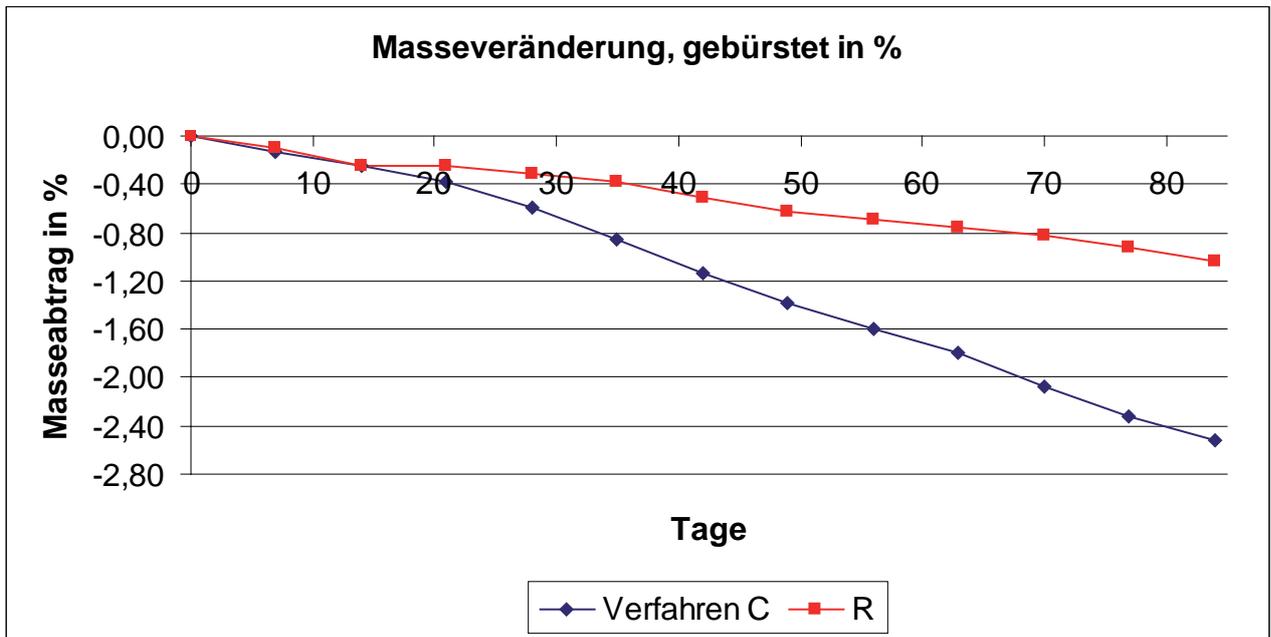


Abbildung 9 Masseänderungen des untersuchten Betons innerhalb des Verfahrens C (Mittelwert der exponierten Prüfkörper) bezogen auf die Ausgangsmasse (wassergesättigt):

oben: in Prozent,
unten: in Gramm

Der Abtrag der Betonmischung liegt mit einem prozentualen Masseverlust von -2,5 % mehr als doppelt so hoch wie die des Referenzbetons.

Die Masseveränderung im Säurebad kann zwar Hinweise auf die Beständigkeit geben. Letztlich entscheidend für die Beurteilung der Säurebeständigkeit verschiedener Betonrezepturen ist jedoch nicht vorrangig der Masseabtrag, da dieser durch den gleichzeitigen Massezuwachs durch die Bildung von Sulfaten (Gips / Ettringit / Thaumasit) verfälscht werden kann (Einbindung aus der Schwefelsäure). Insbesondere Betone mit schlechten Beständigkeiten gegenüber Schwefelsäure können einen geringen Masseabtrag durch starke Sulfatbildung aufweisen.

Entscheidend für die Beurteilung der Säurebeständigkeit ist daher vorrangig die Schädigungstiefe, die nur mikroskopisch mit Hilfe der Stereo- und Polarisationsmikroskopie am Anschliff bzw. Dünnschliff ermittelt werden kann.

4.3 Probendokumentation nach Beanspruchung

In der folgenden Abbildung ist ein Prüfkörper des zu untersuchenden Betons nach der Einlagerung in Schwefelsäure dargestellt. Die Zementsteinmatrix an den Außenflächen des in Schwefelsäure eingelagerten Prüfkörpers ist etwas weniger hell als nach Einlagerung in den organischen Säuren. Auch das oberflächliche Absanden ist weniger stark (die Proben wurden alle zwei Wochen gebürstet, um das absandende Material zu entfernen). Die größeren Gesteinskörner befinden sich noch vollständig im Beton, einige sind jedoch oberflächlich angelöst (Gesteinskörner aus Carbonatgestein).

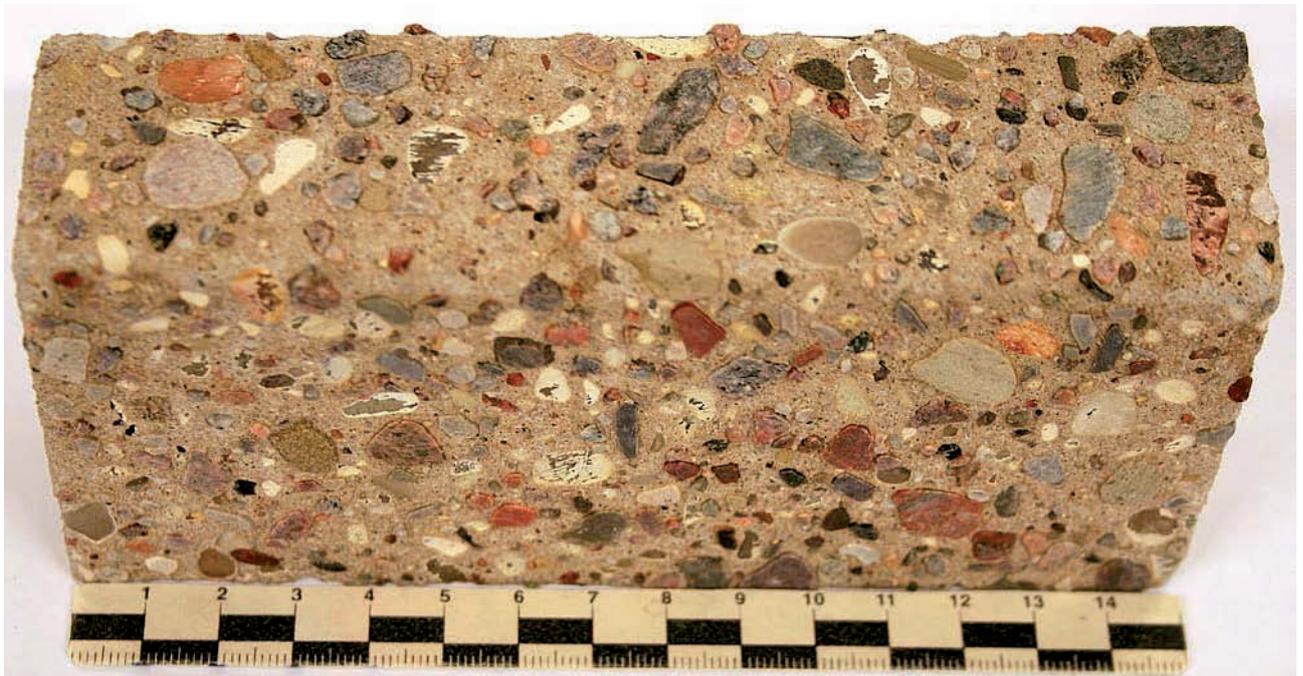


Abbildung 12: Prüfkörper nach der Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 3,5

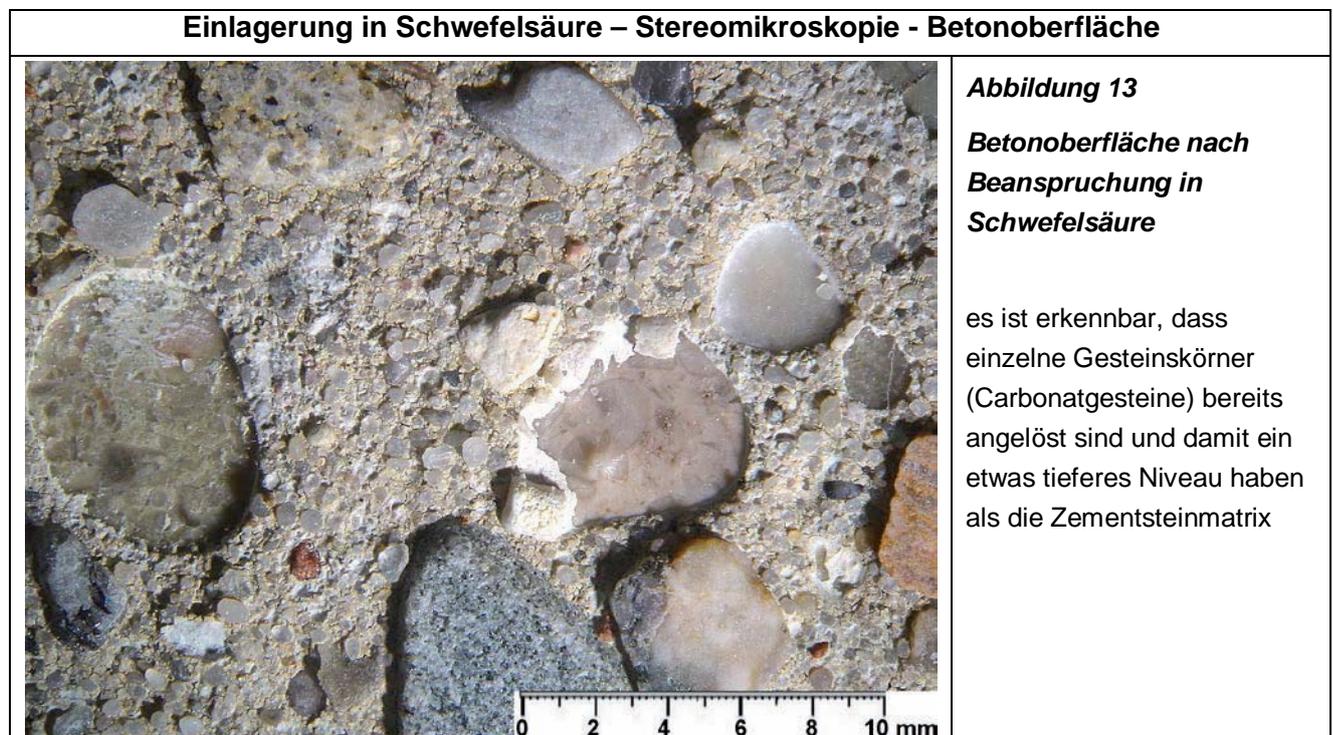
4.4 Mikroskopische Untersuchungen

Es erfolgten ebenfalls mikroskopische Untersuchungen an An- und Dünnschliffen der Betonquader, welche in Schwefelsäure eingelagert wurden. Dafür wurden entsprechende Schliffe des zu untersuchenden Betons und des Referenzbetons angefertigt. Die Prüfkörper, welche in Schwefelsäure gelagert waren, wurden jeweils von drei Trennflächen her begutachtet.

Die Prüfkörper wurden wie in Kapitel 2.5 beschrieben präpariert und mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie untersucht.

Zu den Anschliffen und Dünnschliffen wurde eine Bilddokumentation erstellt, in der charakteristische Merkmale und Schädigungsverläufe der Prüfkörper abzulesen sind. Die folgenden Seiten zeigen exemplarische stereo- und polarisationsmikroskopische Aufnahmen, an denen die Schädigungsart und gegebenenfalls der Betonabtrag bzw. die Schädigungstiefe der jeweils beanspruchten Probe bestimmt wurde.

Die im Rahmen der mikroskopischen Untersuchungen ermittelten maximalen Schädigungstiefen sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.



Einlagerung in Schwefelsäure - Stereomikroskopie



Abbildung 14

Übersicht

es ist bereits Material von der beanspruchten Oberfläche abgesandet, die verbliebenen beanspruchten Flächen sind etwas hell verfärbt

einzelne Gesteinskörner sind bereits angelöst, siehe dazu auch das vorhergehende Bild

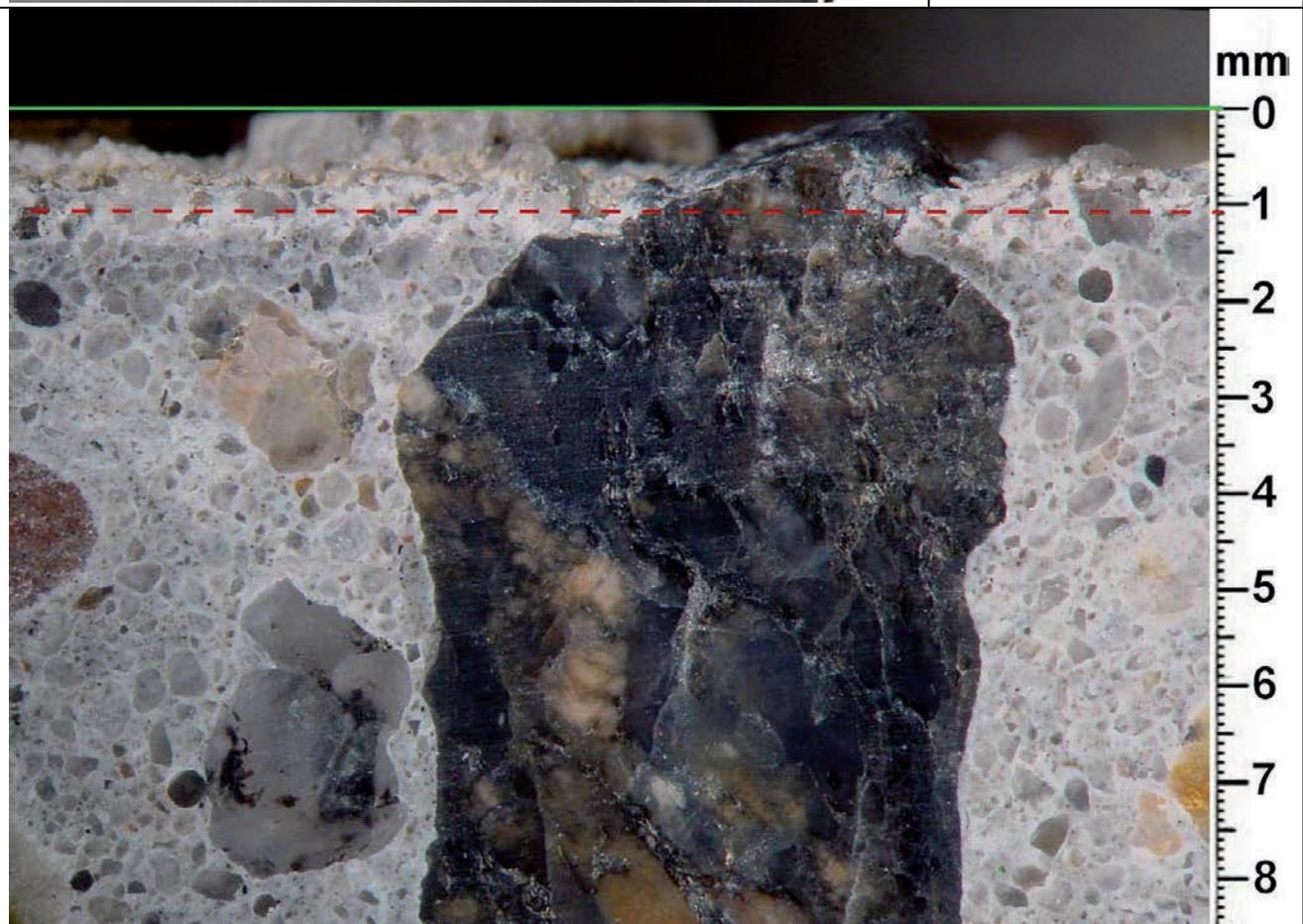


Abbildung 15 *Detail – beanspruchte Schnittfläche*

**Oberfläche bis maximal 1,1 mm Tiefe abgesandet,
Bindemittelmatrix im oberflächennahen Bereich mit stark aufgelockertem Gefüge,**

Einlagerung in Schwefelsäure – Polarisationsmikroskopie

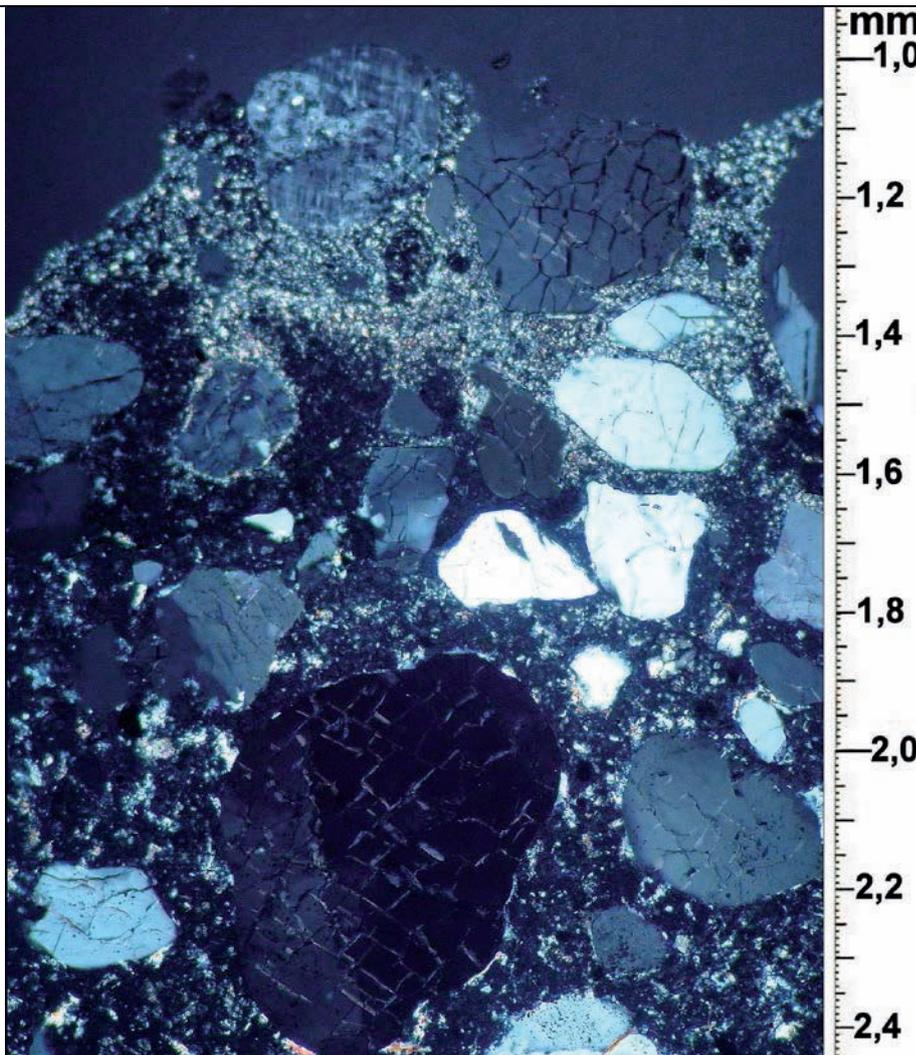


Abbildung 16
Schadensverlauf im
Dunkelfeld

Umwandlungszone I:
von ca. 1,1 bis ca. 1,5 mm
Tiefe befindet sich ein Bereich
mit sehr hellen, kleinen
Interferenzfarben

Umwandlungszone II
(lösender Angriff):
von ca. 1,5 bis ca. 1,8 mm
Tiefe erscheint die Matrix
unter xpl vollständig schwarz,
was auf eine Lösung des
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hinweist

„gesunde“ Betonmatrix ab ca.
1,8 mm Tiefe:
innerhalb der Matrix befinden
sich zahlreiche kleine Phasen
mit bunten Interferenzfarben
($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Oberfläche des unbeanspruchten Probekörpers = 0 mm

Referenzbeton - Einlagerung in Schwefelsäure - Stereomikroskopie

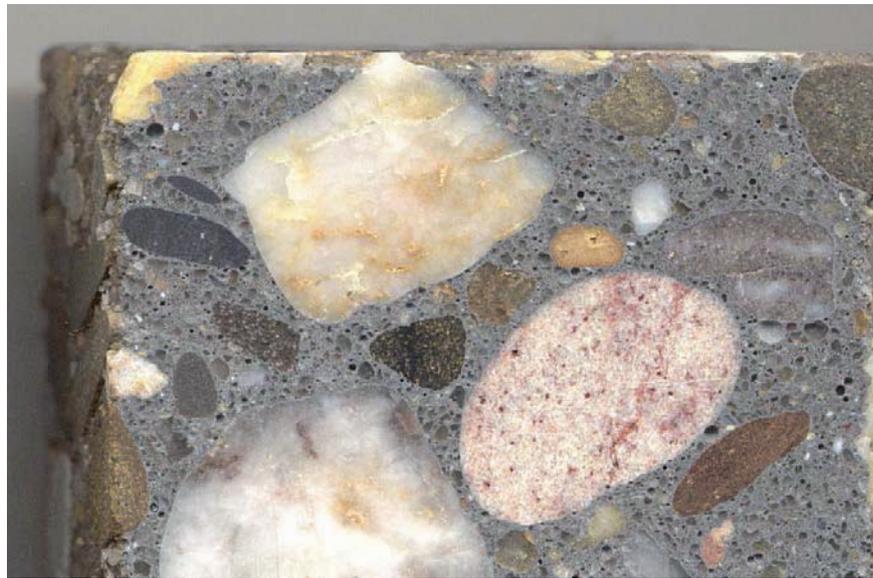


Abbildung 14

Übersicht

es ist bereits etwas Material von der beanspruchten Oberfläche abgesandet, die verbliebenen beanspruchten Flächen sind etwas bräunlich verfärbt

die Gesteinskörner zeigen keine Schädigungserscheinungen

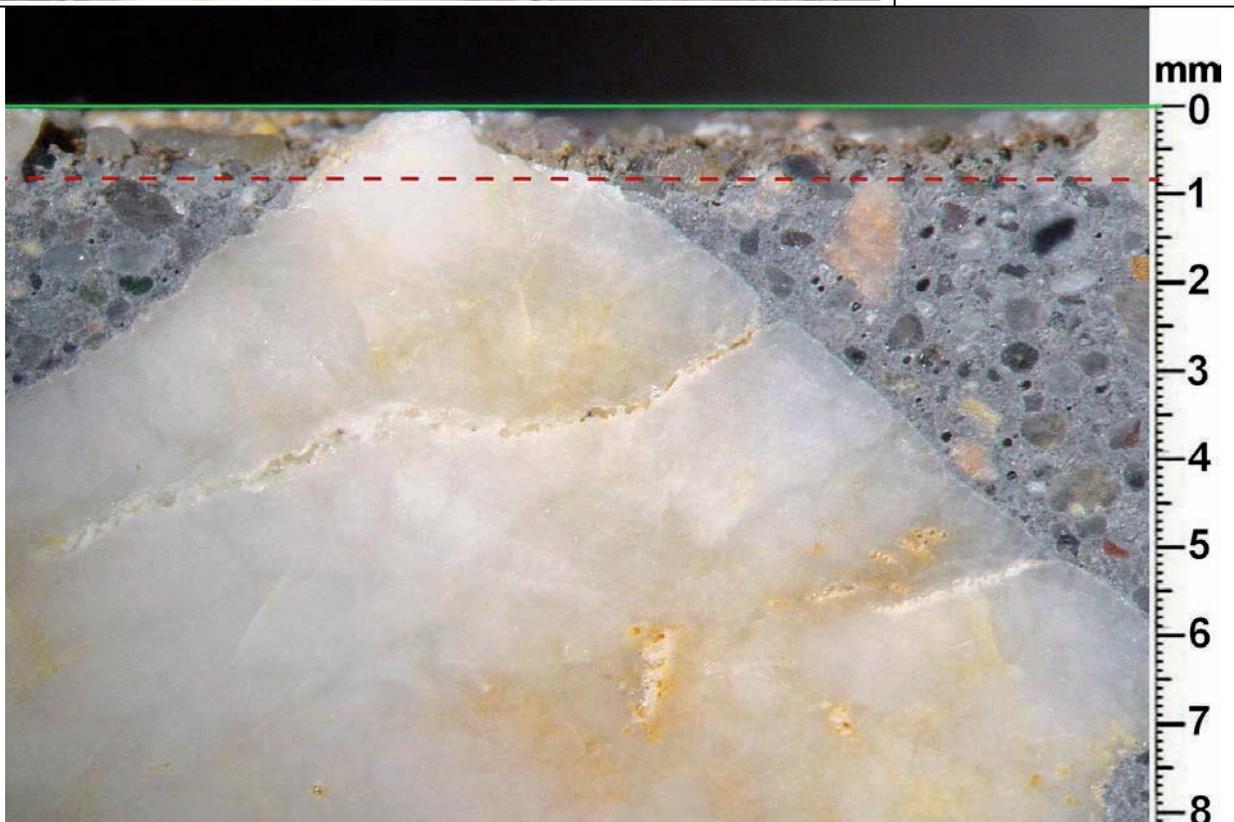


Abbildung 15 Detail – beanspruchte Schnittfläche

**Oberfläche bis maximal 0,85 mm Tiefe abgesandet,
Bindemittelmatrix im oberflächennahen Bereich mit etwas aufgelockertem Gefüge**

Referenzbeton - Einlagerung in Schwefelsäure – Polarisationsmikroskopie

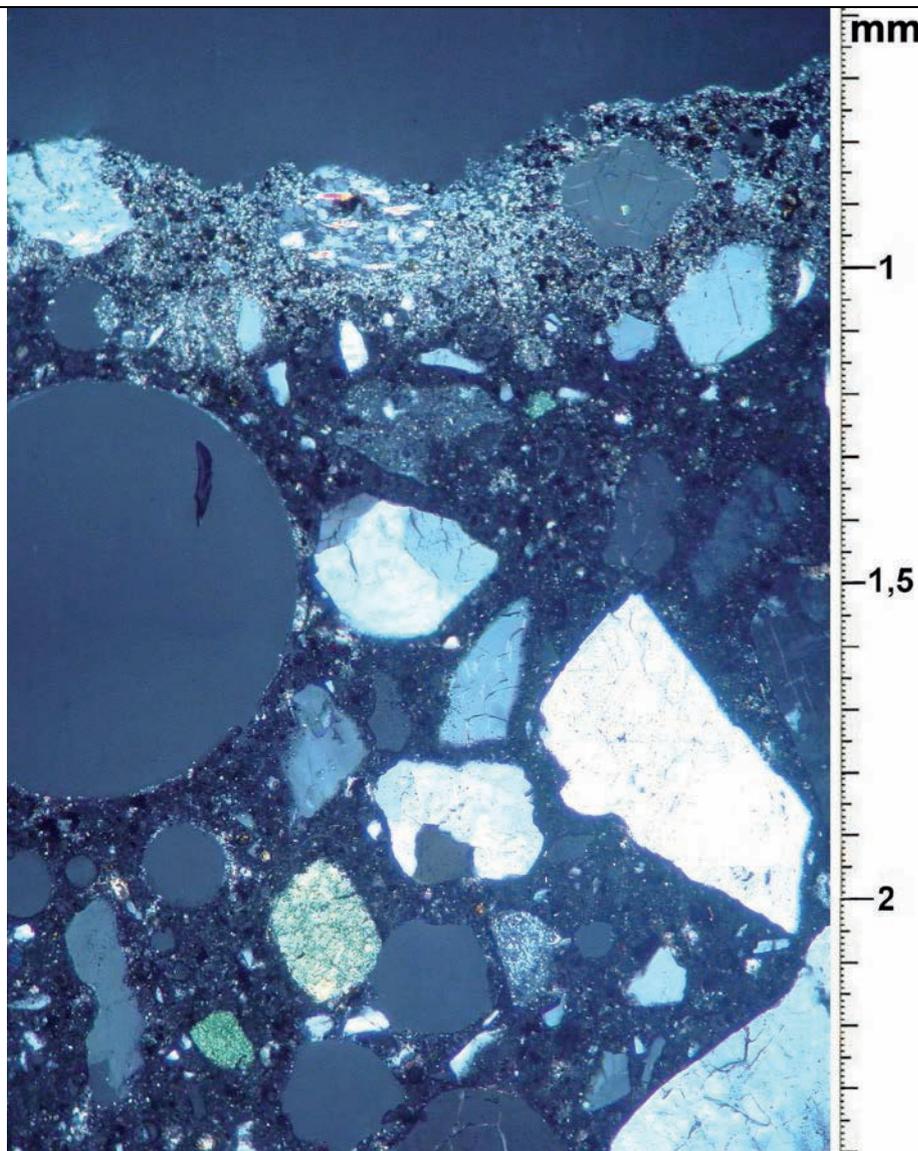


Abbildung 16
Schadensverlauf

Umwandlungszone I:
von ca. 0,85 bis ca. 1,15 mm
Tiefe befindet sich ein Bereich
mit sehr hellen, kleinen
Interferenzfarben

darunter keine weiteren
Umwandlungen erkennbar

„gesunde“ Betonmatrix ab ca.
1,15 mm Tiefe:
innerhalb der Matrix befinden
sich einige kleine Phasen mit
bunten Interferenzfarben
($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Der Nullpunkt dieser Maßangabe liegt bei dem Oberflächenwert des unbeanspruchten Probekörpers

Tabelle 7 Zusammenfassung der Ergebnisse nach 12 Wochen Lagerung in Schwefelsäure pH 3,5

Einlagerungs- medium	Mikroskopisch ermittelte Schädigungstiefen		<i>Max. Gesamt- schädigungstiefe Mikroskopie</i>
	<i>Stereo- mikroskopie</i>	<i>Polarisations- mikroskopie</i>	
	Schädigungsart und Schädigungstiefe	Schädigungsart und max. Schädigungstiefe	
Schwefelsäure bei pH 3,5	Abtrag, geringe Verfärbung bis ca. 1,10 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen und lösendem Angriff bis 1,80 mm	1,80 mm
Referenzbeton in Schwefelsäure bei pH 3,5	Abtrag bis ca. 0,85 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen bis 1,15 mm	1,15 mm

5 Zusammenfassung und Bewertung

Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) bearbeitete die Kiwa MPA Bautest GmbH, NL MPA Berlin-Brandenburg das folgende F & E-Vorhaben:

Ermittlung von Zulassungsanforderungen bei der Prüfung von Beton (Eindringverhalten von Referenzflüssigkeiten) unter neuen Prüfbedingungen für die Verwendung in der Landwirtschaft, JGS-Anlagen

Veranlassung für das Vorhaben sind die Arbeiten im Rahmen des SVA 74: *AK Dichtkonstruktionen für die Landwirtschaft*. In diesem Arbeitskreis des DIBt wird derzeit das "Prüfprogramm für Abdichtungssysteme zur Verwendung in Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Jauche, Gülle und Silagesickersäften (JGS-Anlagen)" erarbeitet. Unter anderem werden hier Prüfgrundsätze zur Beurteilung des Eindringverhaltens bzw. der Medienbeständigkeit von unbeschichtetem Beton erarbeitet.

Im Rahmen des Vorhabens wurden drei verschiedene Säureeinlagerungen an einem FD-Beton nach DAfStb ($\geq C 30/37$, $w/z \leq 0,50$, CEM I, Sieblinie A/B) (vergleichend) untersucht:

Verfahren A - Prüfung nach modifiziertem DAfStB-Verfahren (Anhang A, A4) und eingeführter Gärsaft-Lösung:

1. Einlagerung von drei Betonbohrkernen ($h=150$ mm, $\varnothing=80$ mm) des zu untersuchenden Festbetons in die eingeführte Gärsäure-Modell-Lösung:
3 M.-% Milchsäure, 1,5 M.-% Essigsäure, 0,5 M.-% Buttersäure
über die Dauer von 2160 Stunden (90 Tage), davon zunächst
28 Tage zu Beginn bei erhöhter Temperatur (40 °C),
Wechsel der Gärsäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C \pm 2 °C in der durch einen Magnetrührer leicht bewegten Gärsäure-Modell-Lösung
nochmaliger Wechsel der Gärsäure-Modell-Lösung und
erneute Einlagerung für weitere 31 Tage bei 20 °C \pm 2 °C in der durch einen Magnetrührer leicht bewegten Gärsäure-Modell-Lösung
2. Prüfung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein, Beurteilung der Säureeindringtiefe an aufgespaltenen Prüfkörpern mittels indikativem Test nach Prüfverfahren A.4
3. Bestimmung der Festigkeit der eingelagerten Prüfkörper, Bestimmung der Druckfestigkeit der in der Gärsäure eingelagerten Prüfkörper im Vergleich zu den wassergelagerten Referenzprüfkörpern

Zusätzlich:

4. Mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

Verfahren B - Prüfung nach modifiziertem DAfStB-Verfahren (Anhang A, A4) und variiertes Gärtsaft-Lösung:

1. Einlagerung von drei Betonbohrkernen ($h=150$ mm, $\varnothing=80$ mm) des zu untersuchenden Festbetons in die abgewandelte Gärtsäure-Modell-Lösung:
3 M.-% Milchsäure, 2 M.-% Essigsäure
über die Dauer von 2160 Stunden (90 Tage), davon zunächst 28 Tage zu Beginn bei erhöhter Temperatur (40 °C), die Restdauer bei 20 °C \pm 2 °C; parallele Einlagerung von Prüfkörpern für die mikroskopische Untersuchung (Quader)
2. **Prüfung der Umwandlungstiefe mittels Phenolphthalein**, Beurteilung der Säureeindringtiefe an aufgespaltenen Prüfkörpern mittels indikativem Test nach Prüfverfahren A.4
3. **Bestimmung der Festigkeit der eingelagerten Prüfkörper**, Bestimmung der Druckfestigkeit der in der Gärtsäure eingelagerten Prüfkörper im Vergleich zu den wassergelagerten Referenzprüfkörpern

Zusätzlich:

4. **Mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper**; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

Als Referenz wurden entsprechend des Verfahrens A.2 der DAfStB-Richtlinie Bohrkerne bzw. Reststücke als Referenz in Trinkwasser eingelagert, die ansonsten unter exakt denselben Lagerungsbedingungen wie die Gärtsäurelösung behandelt wurden.

Verfahren C - Prüfung nach Säure-Performance-Test mit verdünnter Schwefelsäure (pH 3,5, konstant):

1. Einlagerung von zwei Quadern (150 mm x 100 mm x 40 mm) des Betons in die Schwefelsäure bei pH 3,5 (konstant) im Vergleich zu einem Referenzbeton (Hochleistungsbeton mit bekannter Säurebeständigkeit)
2. Wöchentliche Wägung der Prüfkörper unter leichter Abrasion
3. Nach zwölfwöchiger Einlagerung mikroskopische Untersuchung der Prüfkörper; Untersuchung der Tiefenschädigung mittels Stereo- und Polarisationsmikroskopie

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8 Zusammenfassung der Ergebnisse nach 90 Tagen Lagerung in Gärsäure-Lösung

Einlagerungs- medium	Mikroskopisch ermittelte Schädigungstiefen		Max. Gesamt- schädigungstiefe Phenolphthalein/ Mikroskopie	Festigkeit in N/mm ² / relativ in % zu Wasser und charakteristische Schädigungstiefe
	Stereo- mikroskopie	Polarisations- mikroskopie		
	Schädigungsart und Schädigungstiefe	Schädigungsart und max. Schädigungstiefe		
Gärsäure- Lösung A (mit Buttersäure)	Abtrag, Gefügebrauflocke- rung, Verfärbung bis ca. 4,5 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen und lösendem Angriff bis 6 mm	ca. 5 mm / 6,0 mm	39,4 / 68,8 % s _{Ctm} = 6,9
Gärsäure- Lösung B (ohne Buttersäure)	Abtrag, Gefügebrauflocke- rung, Verfärbung bis ca. 5 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen und lösendem Angriff bis 6,3 mm	ca. 5 mm / 6,3 mm	39,5 / 68,9 % s _{Ctm} = 6,8
Wasser	keine Schädigung erkennbar	keine	0 mm / 0 mm	57,3 / 100 %
Schwefelsäure bei pH 3,5	Abtrag, geringe Verfärbung bis ca. 1,1 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen und lösendem Angriff bis 1,8 mm	1,8 mm	
Referenzbeton in Schwefelsäure bei pH 3,5	Abtrag bis ca. 0,85 mm	Umwandlungszonen mit Phasen- neubildungen bis 1,15 mm	1,15 mm	

Fazit:

- B Der pH-Wert der Gärsäure-Modelllösung A (mit Buttersäure) und B (ohne Buttersäure) ist praktisch identisch. Dies ist erklärlich durch die nahezu identischen pH-Werte der Lösungen zu Beginn der Einlagerung von pH 2,1 bis pH 2,2. Beim Wechsel der Gärsäure bzw. zum Ende der Lagerung liegen die pH-Werte übereinstimmend bei pH 5,0 bis pH 5,1. Entsprechend sind auch keine signifikanten Unterschiede bei den unterschiedlichen Kennwerten bzw. Schädigungstiefen fest zu stellen. Beide Einlagerungsarten bringen eine identische Entfärbungszone von Phenolphthalein, nahezu identische Schädigungstiefen bei der mikroskopischen Beurteilung und einen identischen Abfall bei der Druckfestigkeit. Die beiden Lagerungsarten in Gärsäure-Modelllösung A (mit Buttersäure) und B (ohne Buttersäure) führen zur gleichen Beurteilungskennwerten des Betons. Daher spricht aus unserer Sicht nichts gegen einen Verzicht auf die geruchsbelästigende Buttersäure, also den Ersatz der Gärsäure-Modelllösung A (mit Buttersäure) durch die Gärsäure-Modelllösung B (ohne Buttersäure).
- B Die charakteristische Schädigungstiefe s_{ctm} , berechnet über die Druckfestigkeitsminderung, ergibt die größte Schädigungstiefe von 6,9 mm bzw. 6,8 mm. Die mikroskopische Auswertung erbringt noch ähnliche Ergebnisse mit 6,0 mm bzw. 6,3 mm. Die Abschätzung mittels Phenolphthalein bewertet die Schädigungstiefe am geringsten mit 5 mm. Die Prüfung mit Phenolphthalein bewertet die Schädigungstiefe also um ca. 25 % geringer als bei Ermittlung der Schädigungstiefe über die Druckfestigkeitsminderung und ca. 20 % geringer als Ermittlung über die Mikroskopie. Somit lässt sich folgern, dass für den untersuchten Beton die Abminderung der Festigkeit und die mikroskopische Untersuchung vergleichbare Bewertungen liefern. Die Untersuchung mit Phenolphthalein liefert für den Beton dagegen deutlich niedrigere Werte.
- B Die Schwefelsäure-Lagerung bei pH 3,5 erbringt erwartungsgemäß eine deutlich geringere Schädigungstiefe, die nach 12-wöchiger Lagerung bei Raumtemperatur bei 1,8 mm liegt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Betonkorrosion sich unterhalb eines pH-Wertes von 3,5 deutlich beschleunigt. Die organischen Säuren wirken auch ohne kontinuierliche Kontrolle des pH-Werts deshalb so stark, da sie eine puffernde Wirkung haben, die bewirkt, dass der pH-Wert trotz des ständigen Lösens von Betoninhaltsstoffen nicht so stark ansteigt und auch um die Prüfkörper herum keine „alkalischen“ Bereiche entstehen. Die Schwefelsäure-Lagerung bei pH 3,5 scheint somit keine Alternative zu der Lagerung nach DAfStb darzustellen. Ergebnisse aus dieser Einlagerungsvariante können aber unter Umständen in Korrelation zur Gärsäurelagerung gesetzt werden.
- B Es erscheint angeraten, zu überprüfen, ob die hier ermittelte gute Übereinstimmung zwischen Druckfestigkeit und mikroskopischer Bewertung auch auf andere Betone (z. B. SVB oder Hochleistungsbetone) übertragbar ist.

Fazit:

Die hier vorgestellten Ergebnisse erbrachten eine Reihe von Erkenntnissen, die eine genauere Einschätzung des Verfahrens ermöglichen.

Gleichwohl verbleibt eine Reihe von Fragen.

Dies betrifft zum einen wünschenswerte breitere Datenbasis zum Verhalten verschiedener Betonrezepturen mit verschiedenen Zementarten und Zusammensetzungen.

Daneben ist die Thematik einer möglichen Grenzwertsetzung sicher ein vorrangiges Thema. Auf der Basis der ermittelten Daten muss dabei in Zweifel gezogen werden, ob die Festsetzung eines derartigen Grenzwertes beim derzeitigen Kenntnisstand sinnvoll ist. Einer derartigen Grenzwertsetzung müsste in jedem Fall eine Lebensdauerbetrachtung zu Grunde liegen. Gesicherte Modelle liegen für derartig lange Zeiträume wie hier betrachtet momentan noch nicht vor.

Daneben würde jedes Modell bei Verwendung unterschiedlicher Eingangsgrößen (ermittelte Schädigungstiefen) auch erhebliche Unterschiede in den prognostizierten Schädigungstiefen produzieren.

Daneben existiert als weitere Einflussgröße die angenommene jährliche Nutzungsdauer bzw. der erwartete Zeitraum, in dem Silagesickersaft auf den Beton tatsächlich einwirkt. Auch diese Größe beeinflusst zwangsläufig jede Lebensdauer- und Grenzwertbetrachtung und müsste sicherer abgeklärt werden.

Weiterhin sind von der Seite der Bauteilkonstruktion die statisch konstruktiven Belange von erheblicher Bedeutung. Die Schädigungstiefe (egal wie ermittelt) ist aussagekräftig nur bei gleichzeitiger Betrachtung der Größen wie Restbauteildicke oder der Betondeckung des Stahls.

Daher erscheint eine Grenzwertsetzung auf Basis der derzeitigen Kenntnisse problematisch.