

TuTech Innovation GmbH
Harburger Schloßstraße 6-12
D-21079 Hamburg
Tel. + 49 40 76629-0
Fax + 49 40 76629-6119
E-Mail: schmidt-doehl@tutech.de
www.tutech.de

**Institut für Baustoffe, Bauphysik
und Bauchemie**
Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl

Untersuchungsbericht

Thema des Auftrages: Prüfung der Beständigkeit eines SWP Mörtels bei
Schwefelsäureangriff von pH 0 und pH 1

Auftraggeber: Firma
Maleki GmbH
Carl-Stolcke- Str. 1
49090 Osnabrück

Datum des Dokuments: 30.08.2011 Dokumentennummer: 110803
Das Dokument umfasst 14 Seiten inklusive Deckblatt und enthält 2 Anlagen.

Dieses Dokument darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Institutsleiters. Dokumente ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

1 Allgemeines

Die TuTech Innovation GmbH, Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie wurde von der Firma Maleki GmbH durch Frau Gesa Welke beauftragt, die Prüfung des SWP 270 Mörtels nach der "Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau, Fassung 2001" auf Schwefelsäurebeständigkeit bei pH 0 und pH 1 durchzuführen.

Die Probekörper wurden am 9. Mai 2011 in Osnabrück bei der Firma Maleki GmbH hergestellt und am 26. Mai 2011 in unserem Labor angeliefert.

2 Literatur und verwendete Unterlagen

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

3 Mischungszusammensetzung

Der Werk trockenmörtel SWP 270 trug bei der Prüfung die Bezeichnung SWP 270. Die Wasserzugabe bei der Mörtelherstellung mit dem Hobart-Mischer ist in Tabelle 1 aufgeführt. Das Wasser wurde vorgelegt und der Werk trockenmörtel zugesetzt und zunächst 1 Minuten bei Stufe 1 gemischt. Nach einer Reifezeit von 4 Minuten wurde nochmals 1 Minute bei Stufe 2 aufgemischt. Anschließend wurde der Mörtel in die Prismenformen gefüllt und mittels Einfüllverfahren verdichtet.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung

	Werk trockenmörtel	Wasser
	2000 g	340g

4 Durchführung und Auswertung der Schwefelsäurebeständigkeitsprüfung

Die Mörtelprismen für die Prüfung der Schwefelsäurebeständigkeit wurden am 9. Mai 2011 im Labor der Firma Maleki GmbH durch die Firma Maleki GmbH hergestellt.

Die Herstellung der Prismen erfolgte mit dem Hobart Labormischer. Die Mörtelprismen wurden einen Tag abgedeckt in der Form in einer klimatisierten Wanne bei 20 °C und mindestens 95 % rel. F. belassen, entformt und danach 6 Tage unter Wasser gelagert. Anschließend wurden sie bis zum Alter von 17 Tagen bei 23 °C und mindestens 95 % rel. F. gelagert. Im Alter von 17 Tagen wurden die Prismen in unserem Labor angeliefert und halbiert und vermessen. Anschließend wurden sie bis zum Alter von 26 Tagen weiter bei 23 °C und mindestens 95 % rel. F. gelagert und bis zur Einlagerung einer zweitägigen Wasserlagerung unterzogen. Am 28. Tag wurden die bereits vermessenen 5 Prismenhälften für die Dauer von 14 Tagen in Schwefelsäure bei einem pH-Wert von 0 und für die Dauer von 70 Tagen bei einem pH Wert von 1 eingelagert.

Während der Einlagerungsdauer von 14 Tagen bei pH 0 wurde der pH-Wert durch tägliche Nachtitration konstant gehalten. Das Lösungsvolumen wurde während der Versuchsdauer nicht gewechselt.

Bei der pH 1 Einlagerung über 70 Tage wurde der pH-Wert durch rechnergesteuerte Titration konstant gehalten. Die Aggressivlösung wurde wöchentlich ausgetauscht.

Das Oberflächen/Volumenverhältnis wurde auf 20 m⁻¹ eingestellt und die Lösung durch Magnetrührer ständig bewegt. Die Probekörper wurden während der Einlagerungsdauer nicht bewegt und die gebildete Korrosionsschicht nicht entfernt.

Parallel zur Säurelagerung wurden fünf Prismen für die pH 0 Referenzlagerung und 5 Prismen für die pH 1 Referenzlagerung unter Wasser gelagert. Deren Druckfestigkeit nach 14 (Vergleich pH 0), bzw. 70 (Vergleich pH 1) Tagen wird jeweils als Bezugsfestigkeit bei der Berechnung der relativen Festigkeitsänderung und der evtl. korrodierten Randzone der säuregelagerten Prüfkörper herangezogen.

Die Probekörper wurden nach der Einlagerung mit einer Messingbürste von losen Bestandteilen befreit und zur Dokumentation der äußerlichen Veränderungen fotografiert.

Die im Verlauf der Säureeinwirkung hervorgerufenen Korrosionstiefen sind ein Maß zur Beurteilung des Verhaltens der geprüften Mörtel.

An den abgebürsteten Probekörpern wurde die **Abtragstiefe X_A** über die Veränderung der Außenabmessungen bestimmt. Danach wurden Probekörper aus der Mitte der korrodierten Mörtelprismen so herausgesägt, dass sie eine Höhe von ca. 40 mm, entsprechend einer Schlankheit von 1, bezogen auf die Querschnitte vor der Einlagerung, aufwiesen. Die Körper wurden planparallel geschliffen, fotografiert und nach 2-tägiger Lagerung bei 23 °C und 50 % rel. F. die Druckbruchlast ermittelt.

Die beiden, bei der Präparation jedes Probekörpers anfallenden Abschnitte wurden zur Bestimmung der **visuell am Anschnitt erkennbaren Korrosionstiefe X_V** herangezogen. Die Korrosionstiefe X_V gibt an, wie tief die eindiffundierende Säure das Materialgefüge offensichtlich verändert hat, wobei die Abwitterungstiefe zum besseren Vergleich hinzu addiert wird.

Inwieweit bzw. wie tief das Gefüge des Materials aus der Sicht der Tragfähigkeit in Mitleidenschaft gezogen wurde, liefern die speziellen Druckversuche an den Prüfkörpern nach Säurebeanspruchung, aus denen die **Korrosionstiefe $X_{f,D}$** ermittelt wird.

Für die Druckprüfung werden an den aus der Mitte der korrodierten Mörtelproben präparierten Körper die Druckbruchlasten über die planparallel geschliffenen Sägeflächen ermittelt. Mit den wassergelagerten Referenzkörpern wird entsprechend verfahren.

Die Widerstandsfähigkeit gegen den korrosiven Angriff wird über mehrere Kenngrößen beurteilt, die nachfolgend kurz erläutert werden.

Restdruckfestigkeit: Die Restdruckfestigkeit wird ermittelt, indem die Bruchlasten $F_{D,Säure}$ der korrodierten Körper auf deren jeweiligen Ausgangsquerschnitt d_0 bezogen werden.

Relative Restdruckfestigkeit: Die relative Restdruckfestigkeit wird ermittelt, indem die mittleren Restdruckfestigkeiten der korrodierten Körper auf die der wassergelagerten Körper gleicher Zusammensetzung bezogen werden.

Korrosionstiefe $X_{f,D}$ aus dem Restdruckfestigkeitsverhältnis: Die **Korrosionstiefe $X_{f,D}$** wird wie folgt bestimmt: Ausgangsquerschnitt des Prüfkörpers minus Korrosionsrand der Dicke $X_{f,D}$ ergibt die hinsichtlich der Festigkeit unbeeinflussten Kernabmessungen, wobei die Festigkeit eines gleich alten, aber säurefrei gelagerten Prüfkörpers als Festigkeitsreferenz herangezogen wird.

Die Korrosionstiefe $X_{f,D}$ aus dem Restdruckfestigkeitsverhältnis errechnet sich nach dem folgenden formalen Zusammenhang:

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

mit: d_0 = mittlerer Ausgangsquerschnitt
 $F_{D,Säure}$ = Prüfkraft des korrodierten Kerns nach Säurelagerung
 $F_{D,Wasser}$ = Prüfkraft des wassergelagerten Ausgangsquerschnitts

Die Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Festmörteleigenschaften

5.1.1 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 196. Die Mörtelprismen, die für die Prüfung der Schwefelsäurebeständigkeit 6 Tage unter Wasser lagerten, wurden bis zum Alter von 26 Tagen bei 23 °C und mindestens 95 % rel. F. gelagert und anschließend 2 Tage bei 23 °C und 50 % rel. F. bis zur Prüfung gelagert. Am 14. Tag wurden aus einem Mörtelprisma 3 Würfel herausgesägt und die Schnittflächen planparallel abgeschliffen. Die präparierten Würfel hatten die Abmessungen von 40 x 40 x 40 mm. Das Alter der Würfel betrug zum Zeitpunkt der Prüfung 28 Tage. Die Druckfestigkeit (Mittelwert) ist in Tabelle 2 aufgeführt und ist leicht erhöht gegenüber der Anforderung der Richtlinie. Die Festigkeit des Mörtels sollte nicht höher sein als diejenige des Ziegelmaterials bzw. des zu reparierenden Betons. Die Einzelwerte sind in Tabelle 6 bzw. 7 dargestellt.

Tabelle 2 Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Druckfestigkeit nach 28 Tagen $f_{D,28d}$ [N/mm ²]	Bez. SWP 270	Anforderungen		
		Mauer- mörtel	Fugen- mörtel	Reparatur- mörtel
Mittelwert	76,5	20...70		

5.1.2 Festmörtelrohddichte ρ_{Tr}

Die Festmörtelrohddichte ρ_{Tr} wurde nach DIN 18555 ermittelt und an den Würfeln für die Prüfung der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen ermittelt. Der Mittelwert ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Festmörtelrohddichte

Festmörtelrohddichte ρ_{Tr} [g/cm ³]	Bez. SWP 270	Anforderungen		
		Mauer- mörtel	Fugen- mörtel	Reparatur- mörtel
Mittelwert	1,90	zu bestimmen		

5.2 Schwefelsäurebeständigkeit

5.2.1 Abtragstiefe X_A

Zur Bestimmung der Abtragstiefe wurden die äußeren Querschnitte der Probekörper nach dem Abbürsten bestimmt. Als Ausgangsabmessungen wurden die Abmessungen der jeweiligen Probekörper vor der Einlagerung herangezogen. Dabei wurden die in Tabelle 4 und 5 dargestellten Werte ermittelt. Im Anhang Abb.1 und Abb.2 sind die Veränderungen der äußeren Abmessungen der Probekörper nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 0 dokumentiert. In Abb.3 und Abb.4 sind die Veränderungen der äußeren Abmessungen der Probekörper nach 70 Tagen in Schwefelsäure pH 1 dargestellt.

Tabelle 4: Abtragstiefe X_A des Mörtels nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 0 aus den Veränderungen der **Außen**abmessungen bezogen auf die Ausgangsabmessungen der jeweiligen Prüfkörper (negative Werte - quellen).

14 Tage pH 0	
Prüfkörper	Bez. SWP 270
	[mm]
1	-0,3
2	-0,2
3	-0,4
4	-0,3
5	-0,3
Mittelwert X_A	-0,3
Standardabweichung	0

Tabelle 5: Abtragstiefe X_A des Mörtels nach 70 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 1 aus den Veränderungen der **Außen**abmessungen bezogen auf die Ausgangsabmessungen der jeweiligen Prüfkörper.

70 Tage pH 1	
Prüfkörper	Bez. SWP 270
	[mm]
1	0,5
2	0,6
3	0,5
4	0,7
5	0,6
Mittelwert X_A	0,6
Standardabweichung	0,1

5.2.2 Visuell am Anschnitt ermittelte Korrosionstiefe X_V

Die beiden, bei der Präparation jedes Probekörpers zur Druckfestigkeitsprüfung anfallenden Abschnitte, wurden mit Phenolphthaleinlösung besprüht und zur Bestimmung der visuell ermittelten Eindringtiefe herangezogen. Dabei wurde der offensichtlich unbeeinflusste Restquerschnitt an jedem Anschnitt 4 mal bestimmt, so dass für jede Probenserie 40 Einzelwerte zur Verfügung standen.

In Tabelle 6 und 7 sind die ermittelten Werte dargestellt. Die am Anschnitt erkennbaren Veränderungen nach pH 0 Lagerung sind im Anhang Abb. 1 und 2 und nach pH 1 Lagerung im Anhang Abb. 3 und Abb. 4 dokumentiert.

Tabelle 6: Korrosionstiefe X_v der Mörtel nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 0 bestimmt aus den Veränderungen der **visuell** erkennbaren Schädigung am Anschnitt bezogen auf die Ausgangsabmessungen der jeweiligen Prüfkörper.

14 Tage pH 0	
Prüfkörper	Bez. SWP 270
	[mm]
1	3,0
2	3,6
3	2,8
4	2,9
5	3,0
Mittelwert X_v	3,1
Standardabweichung	0,3

Tabelle 7: Korrosionstiefe X_v der Mörtel nach 70 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 1 bestimmt aus den Veränderungen der **visuell** erkennbaren Schädigung am Anschnitt bezogen auf die Ausgangsabmessungen der jeweiligen Prüfkörper.

70 Tage pH 1	
Prüfkörper	Bez. SWP 270
	[mm]
1	3,5
2	3,7
3	3,5
4	3,8
5	3,4
Mittelwert X_v	3,6
Standardabweichung	0,1

5.2.3 Druckprüfung nach Auslagerung in Schwefelsäure

Zur Bestimmung der Restdruckfestigkeit wurden die Festigkeiten der abgeglichenen korrodierten Probekörperwürfel auf die Festigkeiten der Probekörper gleicher Herstellung nach Wasserlagerung bezogen. Diese Bezugsfestigkeiten wurden ebenfalls an Würfeln bestimmt. Die Festigkeiten wurden auf die Ausgangsquerschnittflächen der jeweiligen Probekörper vor der Auslagerung bezogen. Die Einzel- und Mittelwerte der Druck- und Restdruckfestigkeiten und den daraus abgeleiteten Größen relative Restdruckfestigkeit in Prozent und berechnete Korrosionstiefe $X_{f,p}$ für pH 0 sind in Tabelle 8 und für pH 1 in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Druckprüfungen und der daraus abgeleiteten Größen nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 0

	Bez. SWP 270	
	Bruchlast F	Druckfest. f_D
	[kN]	[N/mm ²]
Prüfkörper	vor Einlagerung (28 Tage-Wert)	
1	121	75,6
2	127	79,4
3	119	74,4
Mittelwert		76,5
Standardabweichung	-	4,5
Prüfkörper	14 Tage Wasserreferenzlagerung	
1	143	89,4
2	121	75,6
3	140	87,5
4	136	85,0
5	142	88,8
Mittelwert		85,3
Standardabweichung	-	5,7
Prüfkörper	14 Tage Schwefelsäure pH 0 (Restdruckfestigkeit)	
1	120	74,7
2	112	70,0
3	128	80,0
4	119	74,4
5	110	68,8
Mittelwert		73,6
Standardabweichung	-	4,4
relative Restdruckfestigkeit in Prozent [%]	-	86,3
Korrosionstiefe $X_{f,D}$ aus dem Restdruckfestigkeits-verh. [mm]	-	1,4 ±0,3

Tabelle 9: Ergebnisse der Druckprüfungen und den daraus abgeleiteten Größen nach 70 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure pH 1

	Bez. SWP 270	
	Bruchlast F	Druckfest. f_D
	[kN]	[MPa]
Prüfkörper	vor Einlagerung (28 Tage-Wert)	
1	121	75,6
2	127	79,4
3	119	74,4
Mittelwert		76,5
Standardabweichung	-	4,5
Prüfkörper	70 Tage Wasserreferenzlagerung	
1	152	95,0
2	149	93,1
3	142	88,8
4	129	80,6
5	148	92,5
Mittelwert		90,0
Standardabweichung	-	5,7
Prüfkörper	70 Tage Schwefelsäure pH 1 (Restdruckfestigkeit)	
1	129	80,6
2	123	76,9
3	116	72,5
4	106	66,3
5	123	76,9
Mittelwert		74,6
Standardabweichung		5,5
relative Restdruckfestigkeit in Prozent [%]	-	82,9
Korrosionstiefe $X_{r,D}$ aus dem Restdruckfestigkeitsverhältnis [mm]	-	1,8 ± 0,1

6 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Prüfergebnisse der Schwefelsäureeinlagerung bei pH 0 und pH 1 sind in Tabelle 10 im Überblick zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 10: Zusammenstellung der Prüfergebnisse nach 14 Tagen und 70 Tagen Auslagerung in Schwefelsäure bei pH 0 und pH 1

	14 Tage pH 0	70 Tage pH 1
bei Einlagerung		
Druckfestigkeit, 28 Tage-Wert [MPa]	76,5	76,5
Wasserreferenzlagerung		
Druckfestigkeit [MPa]	85,3	90,0
Säurelagerung		
Restdruckfestigkeit [MPa]	73,6	74,6
visuell bestimmte Korrosionstiefe X_v [mm]	1,4	1,8
relative Restdruckfestigkeit in Prozent [%]	86,3	82,9
Korrosionstiefe $X_{f,D}$ aus dem Restdruckfestigkeitsverhältnis [mm]	1,4	1,7
Der Mörtel erfüllt die Anforderungen der Klasse	Klasse II	Klasse II
Anforderungen (Mauer-, Fugen- und Reparaturmörtel)		
relative Restdruckfestigkeit in Prozent [%]	Klasse II: > 55 Klasse I: > 90	Klasse II: > 75 Klasse I: > 97
Korrosionstiefe $X_{f,D}$ aus dem Restdruckfestigkeitsverhältnis [mm]	Klasse II: < 5,2 Klasse I: < 1,0	Klasse II: < 2,7 Klasse I: < 0,3

Der Mörtel SWP 270 der Firma Maleki GmbH wurde nach der "Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau, Fassung 2001" auf Schwefelsäurebeständigkeit bei pH 0 und pH 1 geprüft.

Die Anforderungen der Einlagerung in Schwefelsäure 14 Tage bei pH 0 und 70 Tage bei pH 1 wird von dem Mörtel SWP 270 in Klasse II erfüllt. Daher hat der Mörtel SWP 270 die Prüfung der Schwefelsäurebeständigkeit bei pH 0 und pH 1 nach der "Richt-

linie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau, Fassung 2001“ bestanden.

Hamburg, 30.08.2011

Der Institutsleiter



Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl

Die Sachbearbeiterin



i.A. Sabine Opeldus

Anlage: Fotodokumentation

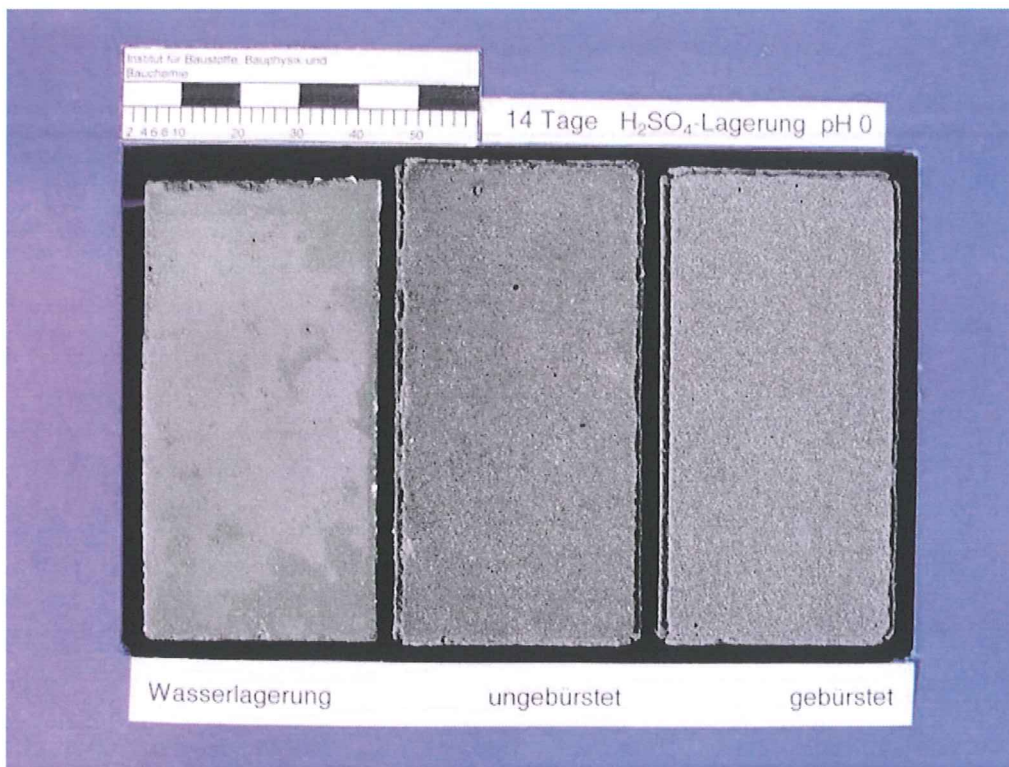


Abb. 1: Mörtelprismen nach Beendigung der Einlagerung Bez. SWP 270 nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 0

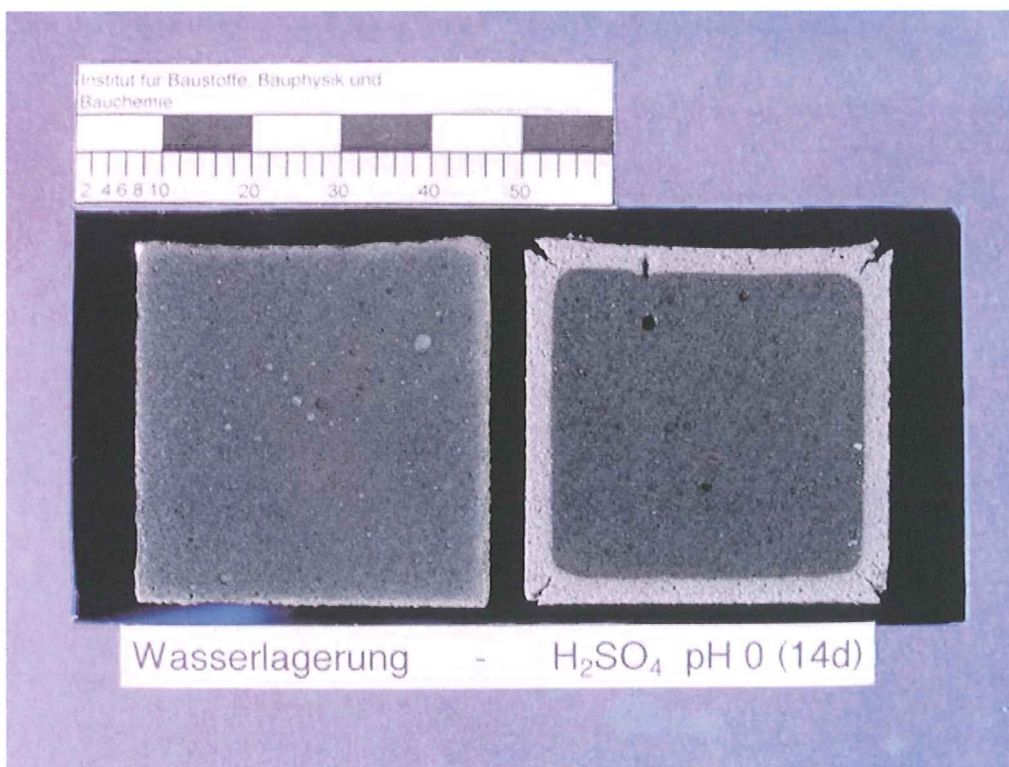


Abb. 2: Abschnitte von Bez. SWP 270 nach 14 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 0

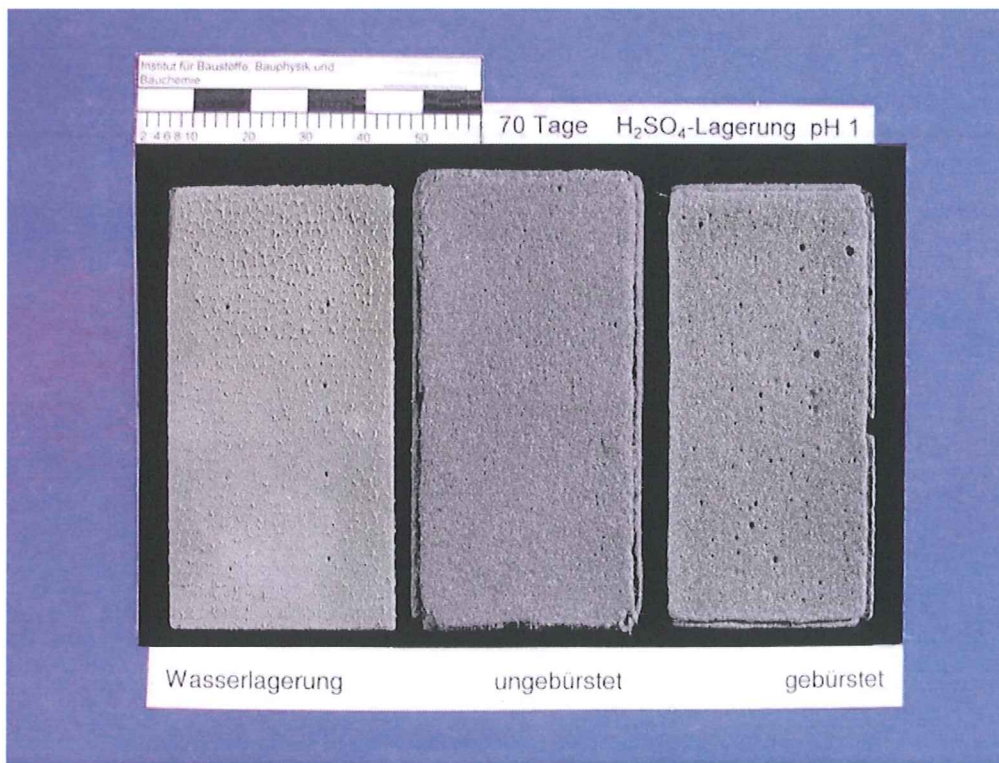


Abb. 3: Mörtelprismen nach Beendigung der Einlagerung Bez. SWP 270 nach 70 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 1

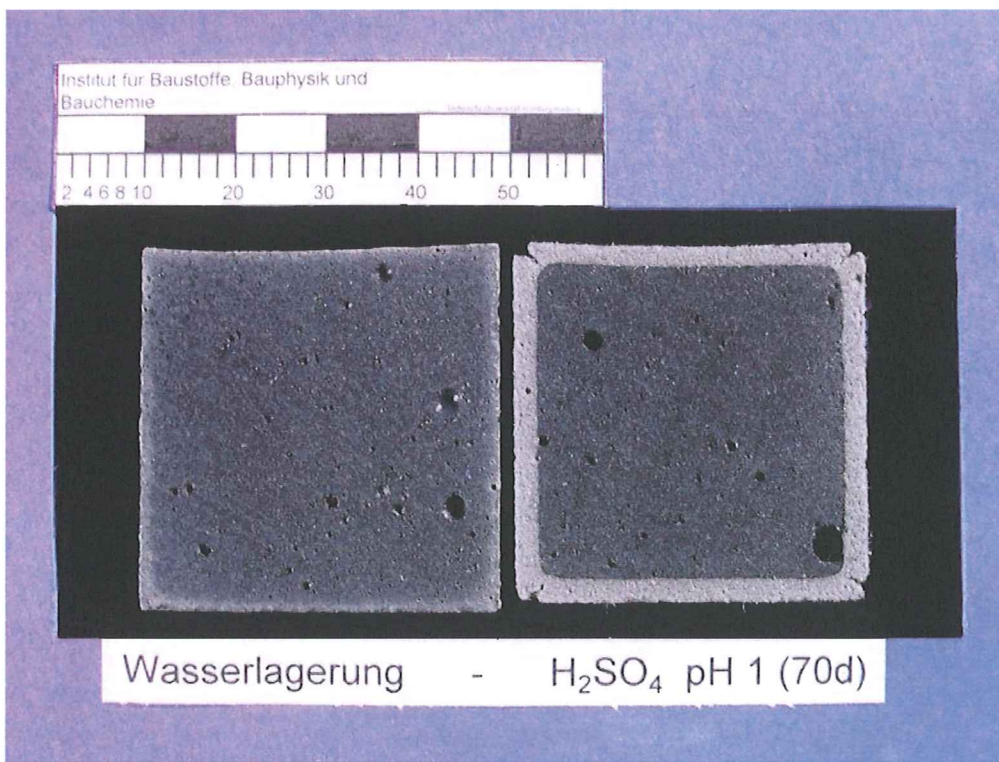


Abb. 4: Abschnitte von Bez. SWP 270 nach 70 Tagen Einlagerung in Schwefelsäure bei pH 1