

„MPA-Performance-Test“

Testverfahren zur Bestimmung der
Säurewiderstandsfähigkeit von Beton bzw. von
mineralischen Systemen

akkreditiert nach

DIN EN ISO/IEC17025:2018

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkundenanlage
D-PL-11217-01-01 aufgeführten Prüfverfahren.



Inhalt

1 Säurewiderstandsfähigkeit von Betonen	3
1.1 Allgemeines und Anwendungsbereiche	3
1.2 Großprojekte der Kiwa GmbH, MPA Berlin-Brandenburg.....	4
2 „MPA-Performance-Test“	5
2.1 Probekörper / Probekörperherstellung	7
2.2 Säureprüfung (Teil 1).....	7
2.3 Holistic Approach (Teil 2).....	10
2.3.1 Gesamtporosität und Porenradienverteilung	10
2.3.2 Chloridmigrationskoeffizient.....	10
2.3.3 Sulfatbeständigkeit	11
2.3.4 Prüfung der Mikrorissfreiheit über die Bestimmung des Frost- Tausalzwidehstands (CDF)...	11
2.3.5 Restalkalität bezogen auf den Bindemittelgehalt.....	12
2.4 Lebensdauerbetrachtung (Teil 3).....	13
3 Zusammenfassung	14
Literatur	15

1 Säurewiderstandsfähigkeit von Betonen

1.1 Allgemeines und Anwendungsbereiche

U. a. folgende Anwendungsbereiche erfordern eine Säurewiderstandsfähigkeit von Betonen:



Abbildung 1 Anwendungsbereiche – Säurewiderstandsfähigkeit von Betonen

Ein wesentlicher Anwendungsbereich sind die Abwassertechnischen Anlagen.

Ungefähr ein Fünftel des insgesamt ca. 575.000 km langen öffentlichen Kanalnetzes in Deutschland weist Schäden auf, die kurz- bis mittelfristig instand zu setzen sind. Eine Vielzahl von Schäden sind auf die biogene Schwefelsäurekorrosion (BSK) mit einem kombinierten chemisch-biologischen Angriff zurückzuführen. Der Auswahl geeigneter Bauprodukte, in Abhängigkeit von den jeweiligen Beanspruchungsszenarien, kommt hierbei eine besonders große Bedeutung zu. Oft kommen deskriptive Baustoffmodelle an ihre Grenzen. Dieses trifft besonders auf Projekte zu, bei denen die Leistungsfähigkeit der Produkte prüf- technisch für maximale Beanspruchungsszenarien und für Lebenserwartungen von bis zu 100 Jahren nachgewiesen werden muss oder wenn die Expositionsklasse für den chemischen Angriff bei XA3 oder sogar noch höher liegt.

Die Bewertung der Widerstands- sowie Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der einzusetzenden Bauprodukte gegenüber der oben genannten Beanspruchung im Bereich der BSK kann über eine Vielzahl von Prüfverfahren erfolgen. Oft werden Langzeitversuche bzw. Zeitrafferversuche in Schwefelsäure mit unterschiedlichen pH-Werten und Beanspruchungsszenarien herangezogen. Die Bewertungskriterien werden in Abhängigkeit vom Material und dem jeweiligen Testprozedere festgelegt.

Ein in Europa weitverbreitetes Nachweisverfahren zur Bewertung der Säurewiderstandsfähigkeit von Betonen in abwassertechnischen Anlagen ist der „MPA-Performance-Test“ der Kiwa GmbH, MPA Berlin-Brandenburg. Hierbei handelt es sich um ein „normativ“ geregeltes Prüfverfahren, das in dem Europäischen Technischen Bewertungsdokument EAD 180009-00-0704 erfasst ist. Auf Grundlage dieses Regelwerkes werden Europäische Technische Bewertungen (ETA's) für säurewiderstandsfähige Betonrohre in Erweiterung der DIN EN 1916:2003-04 erstellt.

1.2 Großprojekte der Kiwa GmbH, MPA Berlin-Brandenburg

Die Kiwa GmbH ist in Bezug auf Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsleistungen im Bauwesen führend in Deutschland. Mit über 5.000 Mitarbeitern ist die Kiwa GmbH auch europa- und weltweit führend aufgestellt. Die MPA Berlin-Brandenburg als ein Institut der Kiwa ist u.a. spezialisiert auf Prüf-, Überwachungs- und Beratungsleistungen im Anwendungsbereich der Baustoffe in abwassertechnischen Anlagen.

So war die Kiwa GmbH in den letzten 20 Jahren an der Planung von vielen Großprojekten in diesem Bereich beteiligt:

- der „MPA-Performance-Test“ kam u.a. auch im Emscher Projekt, dem größten Bauvorhaben im Bereich der abwassertechnischen Anlagen in Deutschland der letzten 30 Jahre (geplante Nutzungsdauer: 120 Jahre, 4,3 Milliarden € Bausumme) zur Anwendung. Wir waren hier sowohl prüfungstechnisch als auch in beratender Funktion involviert.
- in vergleichbarer Form wird derzeit das Bauprojekt Deep Tunnel Sewerage System II (DTSS Phase II)) in Singapur begleitet.
- weitere Großprojekte wurden mit den führenden Betonherstellern bzw. Betreibern von abwassertechnischen Anlagen (u. a. Berliner Wasserbetriebe, Hafengesellschaft von Kopenhagen HO-FOR), sowohl in der Ortbeton-, als auch in der Transport- und Fertigteilindustrie, erfolgreich umgesetzt.
- die letzten acht Kühltürme von Großkraftwerken wurden materialtechnisch und qualitätssichernd begleitet, weltweit ist die Kiwa GmbH in den Bau dieser Kühltürme, die ein saures Milieu als dauerhafte Exposition aufweisen, involviert.
- im Zuge der Renaturierung der Braunkohletagebaue, einem in Deutschland sehr wichtigen aktuellem Thema, wurden unzählige Untersuchungen durchgeführt. Betonbauwerke, die mit dem sauren Wasser von gefluteten Tagebauen in Berührung kommen, wurden entsprechend ihrer geplanten Lebensdauer entworfen, geprüft und umgesetzt.

Im Rahmen solcher Bauprojekte wurden weit über 300 Betonrezepturen in die Bewertung der Beständigkeit einbezogen. Unzählige Langzeituntersuchungen mit nahezu allen Variationen der Bindemittel liegen der Kiwa GmbH, MPA Berlin-Brandenburg vor. Die Zusammenhänge zwischen Beanspruchungsszenarien und den materialspezifischen Widerständen wurden aufgearbeitet bzw. wissenschaftlich erforscht.

2 „MPA-Performance-Test“

Der „MPA-Performance-Test“ ist ein Verfahren zur Prüfung eines erhöhten Widerstands von mineralischen Systemen gegenüber chemischen Angriffen (insbesondere gegenüber Säure) und setzt sich zusammen aus:

- Säureprüfung (Teil 1),
- Holistic Approach – ganzheitlicher Ansatz (Teil 2),
- Lebensdauerbetrachtung (Teil 3).

Das Verfahren ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert und im Rahmen einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) festgelegt und damit auch normativ geregelt.

Das Prinzip der **Säureprüfung (Teil 1)** beruht in seiner Gesamtheit auf der allgemeinen Charakterisierung der Dichtheit des Werkstoffs Beton sowie dem direkten Nachweis der Beständigkeit gegenüber einem Angriff von Schwefelsäure. Eine wesentliche Stärke des Verfahrens besteht darin, dass die Schädigungstiefe des Betons direkt über mikroskopische Verfahren sichtbar gemacht und quantitativ in mm / Beanspruchungszeitraum ermittelt wird.

Das Verfahren arbeitet mit einem konstanten pH-Wert (pH-stat). Da bei allen Versuchen ein Hochleistungsbeton als Referenzbeton zu Vergleichszwecken mitbetrachtet wurde, existieren bei der Kiwa auch direkt vergleichbare Daten für die verschiedenen pH-Werte. Beim Referenzbeton handelt es sich um einen Beton mit höchstmöglicher Säurebeständigkeit.

Die **Säureprüfung (Teil 1)** im „MPA-Performance-Test“ sieht eine 12-wöchige Beanspruchung in Schwefelsäure bei pH = 3,5 vor. Nur anhand geeigneter Lichtmikroskopie / Polarisationsmikroskopie oder Rasterelektronenmikroskopie an Dünnschliffen ist nach Ende der Beaufschlagung die Bestimmung der Schädigungstiefe möglich. Betone im Allgemeinen, die durch die Säure geschädigt werden, entwickeln mit der Zeit zwei Schädigungsfronten, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Gesamtschädigungstiefe ergibt sich aus der am Anschliff ermittelten Abtragstiefe und der polarisationsmikroskopisch bzw. rasterelektronen- mikroskopisch ermittelten Schädigungstiefe.

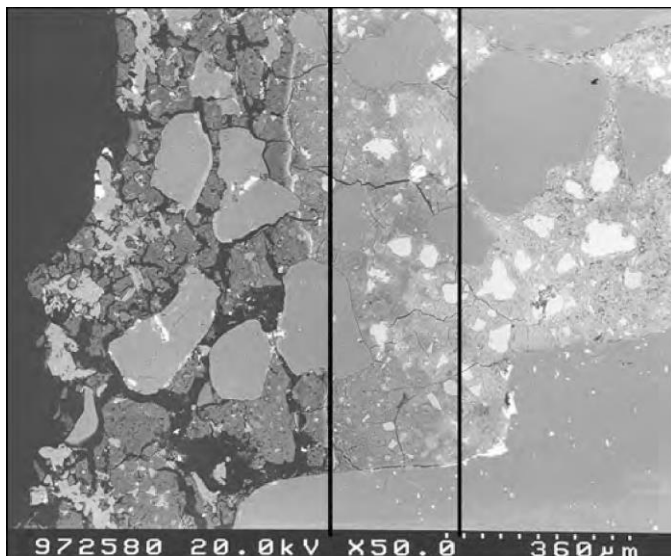


Abbildung 2 Erste und zweite Schädigungsfront (REM-Aufnahme am Dünnschliff)

Der pH-Wert von 3,5 ist für den Nachweis optimaler Säurebeständigkeit von Beton in Deutschland eingeführt und findet sich in den Anforderungen der *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) für Betone mit erhöhtem Säurewiderstand* z.B. der Wasserverbände Emscher Genossenschaft oder Berliner Wasserbetriebe, der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) oder der Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGB) wieder.

Die Erfahrungen zeigen, dass auch Hochleistungsbetone, die bezüglich chemischer Beständigkeit optimiert sind, unterhalb von pH 3,5 einer überproportionalen Zunahme der Abwitterung ausgesetzt sind. Niedrigere pH-Werte (vor allem < 2,5) führen dazu, dass bestehende Beständigkeitsunterschiede zwischen Prüfbetonen eher nivelliert werden, also Qualitätsunterschiede nicht mehr so scharf differenziert werden können.

Vorteil des Verfahrens ist eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die Messreihen des Referenzbetons verdeutlichen dies:

- Mittlere Schädigungstiefe: 1,14 mm
- Standardabweichung: 0,09 mm (VK = 8 %)

Der Prüfungsteil des **Holistic Approach (Teil 2)** liefert darüber hinaus eine gesamtheitliche Beschreibung der Performance des Betons, unter anderem wird hier die „Matrixqualität“ der Rezepturen ermittelt. Unter der „Matrixqualität“ ist die Mikrorissfreiheit der Bindemittelmatrix gemeint, die einen entscheidenden Einfluss auf die Langzeitbeständigkeit hat. Die Bestimmung der Mikrorissfreiheit erfolgt dabei über die Bestimmung der Frost-(Tausalz)-Beständigkeit als Hilfsgröße. Bei den Prüfungen müssen jeweils Grenzwerte eingehalten werden, die eine Betonrezeptur in ihrer Gesamtheit ohne Ausnahme einhalten muss, um als Rezeptur höchster Beständigkeit und Dichtheit zu gelten. Auch die Sulfatbeständigkeit (Prüfdauer: 91 Tage) und der Chlorideindringwiderstand (Prüfdauer abhängig von der Dichtheit der Gefügestruktur) werden als Fingerprint zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Betons im Holistic Approach analysiert.

Bei den Prüfungen müssen jeweils Grenzwerte eingehalten werden, die eine Betonrezeptur in ihrer Gesamtheit ohne Ausnahme einhalten muss, um als Rezeptur höchster Beständigkeit und Dichtheit zu gelten.

Anhand der Ergebnisse des MPA-Performance-Tests kann auch eine **Lebensdauerbetrachtung (Teil 3)** nach einem probabilistischen Ansatz erfolgen, zum Beispiel, wenn die Leistungsfähigkeit der Produkte prüftechnisch für maximale Beanspruchungsszenarien und für Lebenserwartungen von bis zu 100 Jahren nachgewiesen werden muss. So können Instandsetzungsarbeiten langfristig zuverlässig geplant und Ausfallzeiten reduziert werden.

2.1 Probekörper / Probekörperherstellung

Für die Tests werden Würfel (150 x 150 x 150) mm³ im Alter von 56 Tagen verwendet. Die Anzahl der erforderlichen Probekörper für die jeweiligen Prüfverfahren ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Prüfungen und Anzahl der erforderlichen Würfel

Prüfung		Anzahl der Würfel
Säure-Prüfung (Teil 1)	Säurewiderstand nach Einlagerung über 12 Wochen bei pH = 3,5	5
Holistic Approach (Teil 2)	Gesamtporosität und Porenradienverteilung	1
	Restalkalität	1
	Chloridmigration	3
	Frost-Tausalz-Beständigkeit (Bestimmung der Mikrorisse)	5
	Sulfatbeständigkeit	*
Gesamt		15 Würfel (Kantenlänge= 150 mm)

^{*)} Für die Bestimmung der Sulfatbeständigkeit des Bindemittels werden Flachprismen (160x40x10) mm³ nach DIN EN 196-1 (w/z = 0,5) hergestellt.

Im Folgenden werden die Herangehensweise sowie die Prüfbedingungen zu Teil 1 (Säureprüfung) und Teil 2 (Holistic Approach) im „MPA-Performance-Test“ beschrieben.

2.2 Säureprüfung (Teil 1)

Als Prüfkörper für die Bestimmung der Säurebeständigkeit über die mikroskopische Ermittlung der Gesamtschädigungstiefe werden aus den Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm Platten in den Dimensionen von (100 x 150 x 40) mm³ nass mittels Diamanttechnik herausgesägt. Die genauen Maße werden vor der Einlagerung mit dem Messschieber aufgenommen, um den exakten Materialabtrag nach der Säurebeanspruchung feststellen zu können. Es werden vier Platten für die Säurelagerung eingesetzt. Weiterhin werden zwei gleichartige Platten in Leitungswasser gelagert. Eine Kontrollbetonmischung bekannter Schädigungstiefe wird mit geprüft.

Die weiteren Schritte der Vorbereitung sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Ausmessen und wägen der Prüfkörper im Anlieferungszustand,
2. Wassersättigen der Prüfkörper über drei Tage und anschließende Wägung,
3. Einstellen in die Gestelle (z.B. aus PE-HD),
4. Gestelle in der Reihenfolge der Nummerierung in die Container mit der Säure einstellen,
5. Controller zur kontinuierlichen elektrometrischen Überprüfung des pH-Werts einstellen.

Die Prüfanlage zur Bestimmung der Säurebeständigkeit besteht aus einem säurefesten Container mit einem Volumen von mindestens 45 l sowie einem Reservoirbehälter von mindestens 80 l Volumen (siehe Abbildung 3). Die Säure wird ständig mit einer Kreiselpumpe umgewälzt und in dem Container über Düsen, die in dem Container in regelmäßigen Abständen verteilt sind, homogen verteilt. Um mögliche Inhomogenitäten zwischen den Containern auszugleichen, werden die Proben im Wochenabstand innerhalb der Container umgelagert.



Abbildung 3 Prüfanlage zur Einlagerung der Probekörper in Säure

Die Säurebeständigkeit wird über eine 12wöchige Lagerung in Schwefelsäure bei $\text{pH} = 3,5$ ermittelt. Der pH -Wert wird kontinuierlich überwacht, bei einem Anstieg des pH -Werts wird sofort Schwefelsäure nachdosiert. Alle zwei Wochen erfolgt ein Austausch der gesamten Schwefelsäure inklusive der Neueinstellung des pH -Werts.

Nach jeweils einer Woche werden an der Hälfte der Prüfkörper unter laufendem Wasser mit einer Bürste unter leichtem Druck entstandene Aufwachsungen entfernt. Die verbleibenden Prüfkörper einer Rezeptur werden kurz ohne Druck mit Wasser abgespült und anschließend vorsichtig mit einem Tuch trocken getupft. Nach dem Trocknungsschritt wird die Masse der Prüfkörper durch Wägung festgestellt.

Abschließend erfolgt die stereo- und polarisationsmikroskopische Bestimmung der Abtrags- bzw. der Schädigungstiefe der Probekörper mit Simulation eines zusätzlichen abrasiven Angriffs. Der optisch erkennbare maximale Betonabtrag der jeweiligen säuregelagerten Betonmischung (Bindemittelmatrix) wird zunächst mit Hilfe der Stereomikroskopie an Anschliffen bestimmt. Dazu wird aus je einem Probekörper (jeweils gebürstete Proben) der Betonmischungen ein Segment ca. $4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ durch Präzisionsschnitt mit einer Diamantscheibe abgetrennt. Jedes der so hergestellten sechs Anschliffsegmente wird somit sowohl von der Oberseite des Prüfkörpers als auch von zwei Schmalseiten beansprucht bzw. geprüft (siehe Abbildung 4).

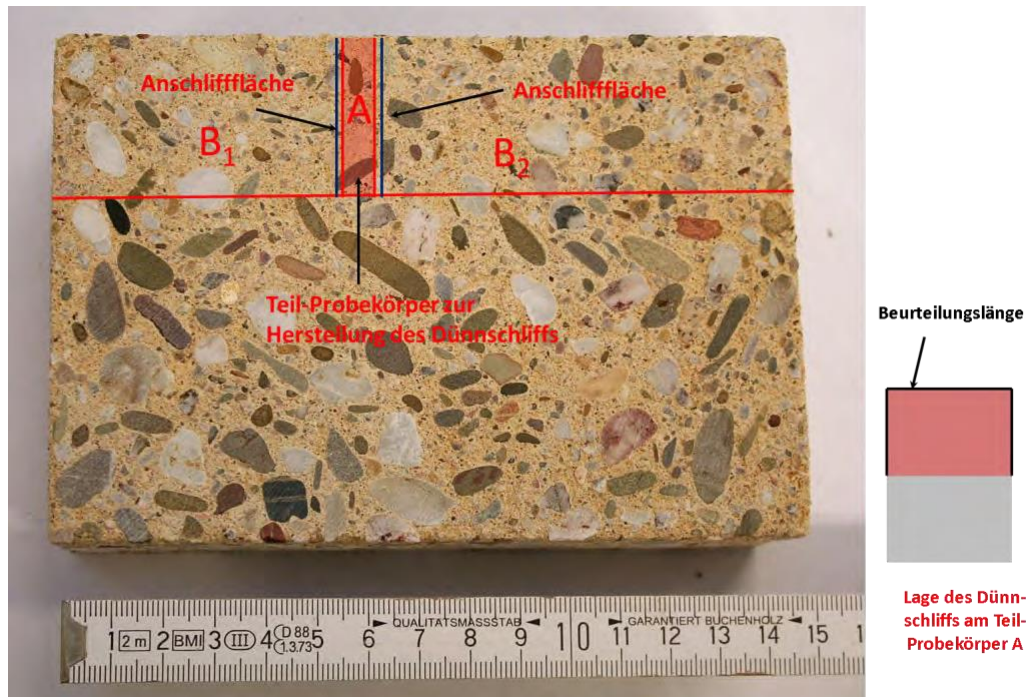


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Gewinnung der Probekörper für die Dünnschliffe (A) und die Anschliffe (B1 und B2)

Während mit der Stereomikroskopie die maximale Abtragstiefe erkennbar ist, zeigt erst die Untersuchung der Beton-Dünnschliffe mit Hilfe eines Polarisationsmikroskops bzw. eines Rasterelektronenmikroskops die genaue Schädigungsart und die Schädigungstiefe (siehe Abbildung 2). Die jeweiligen Dünnschliffe werden beispielsweise in einer Fläche von ca. 2 cm x 4 cm in einer Dicke von 30 µm hergestellt und im Durchlichtverfahren bei Dunkelfeldbeleuchtung im polarisierten Licht beurteilt.

Die Gesamtschädigungstiefe, die sich aus der am Anschliff ermittelten Abtragstiefe und der polarisationsmikroskopisch ermittelten Schädigungstiefe zusammensetzt, muss kleiner als 1,3 mm sein.

2.3 Holistic Approach (Teil 2)

2.3.1 Gesamtporosität und Porenradienverteilung

Die Porosität ist entscheidend für die Dichtheit des Betons gegenüber gelösten Schadstoffen. Die Bestimmung der Gesamtporosität der eingesetzten Betone erfolgt aus der Roh- und Feststoffdichte, die Bestimmung des kumulativen Porenvolumens der eingesetzten Betone sowie der Porengrößenverteilung im Porenbereich $< 100 \mu\text{m}$ ($0,1 \text{ mm}$) mittels Quecksilberdruck- porosimetrie.

Die Gesamtporosität wird nach DIN EN 1936:2007-02 ermittelt und muss kleiner als 11 Vol.-% sein. Das kumulative Porenvolumen des Betons im Porenbereich $< 100 \mu\text{m}$ ($0,1 \text{ mm}$) wird mittels Quecksilberdruck- porosimetrie nach DIN 66133:1993-06 ermittelt und muss kleiner als $40 \text{ mm}^3/\text{g}$ sein. Darüber hinaus muss das mittlere Porenvolumen unter $0,1 \mu\text{m}$ liegen.

2.3.2 Chloridmigrationskoeffizient

Zur Untersuchung wird das Chloridmigration-Verfahren eingesetzt, wie es von Tang¹ und Schießl² bzw. im BAW Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beschrieben wird (siehe Abbildung 5).

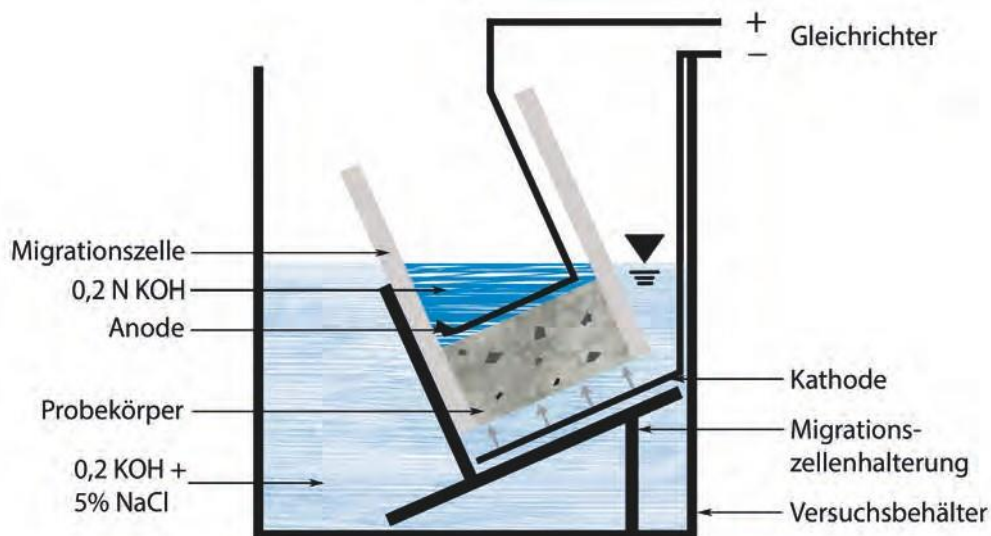


Abbildung 5 Schematische Darstellung des Messaufbaus (entnommen aus der Arbeitsanweisung Schnellbestimmung von Chloriddiffusionskoeffizienten für Betonprüfkörper, ibac) und Foto der Messzelle mit Netzteil und Verteilerbox

Das Prinzip des Verfahrens beruht auf der Beschleunigung des Ionentransports durch Anlegen einer elektrischen Gleichspannung (Migration). Die Kathodenkammer enthält eine Chloridlösung, aus der die Chloridionen unter der Wirkung der angelegten Spannung in den zu prüfenden Beton wandern. Die Wanderungsgeschwindigkeit ist u. a. abhängig von der angelegten Spannung, der Chloridionen Konzentration, der Dimensionen der Prüfkörper, der Temperatur und als wesentlicher und zu beurteilender Größe vom Diffusionswiderstand des eingesetzten Betons.

¹ Tang, L.; Nilsson, L.-O.: Chloride Binding Capacity, Penetration and Pore Structures of Blended Cement Pastes with Slag and Fly Ash. London: Elsevier Applied Science, 1991. - In: International Conference on Blended Cements in Construction, held at the University of Sheffield, 9-12 September 1991; Ed.: Swamy, R. N.

² Schießl, P., Wiens, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die chlorinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. In: ibasil Tagungsbericht - Band 1; Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Stark, J.

Gemessen werden die Migrationszeiten, Anfangs- und Endspannung sowie -Stromstärke an den einzelnen Messzellen, die Temperaturen der Lösungen sowie die Eindringtiefe der Chloridfront an insgesamt 12 Stellen der beiden Bohrkernhälften.

Die Detektion der Chloridfront nach Beaufschlagung erfolgt durch Besprühen mit Fluorescein- und Silbernitrat-Lösung. Unter Wirkung des UV-Lichts bildet sich eine scharfe Migrationsfront aus, kenntlich an der rosa-violetten Farbe. Der auf diese Weise bestimmte Chloridmigrationskoeffizient muss unter dem Wert von $1,0 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^2/\text{s}$ liegen.

2.3.3 Sulfatbeständigkeit

Die Prüfung der Sulfatbeständigkeit der eingesetzten Bindemittelzusammensetzung erfolgt nach 91 Tagen an Mörtelflachprismen mit den Abmessungen (10 x 40 x 160) mm³ der geplanten Bindemittelzusammensetzung, Normmörtel und einem w/zeq-Wert von 0,5 nach dem SVA-Verfahren³.

1. Herstellen von Flachmörtelprismen nach DIN EN 196-1:2016-01, w/z = 0,5
2. Zwei Tage Feuchtraumlagerung in der Form, nach dem Entformen weitere 12 Tage Vorlagerung in gesättigter Ca(OH)₂-Lösung
3. Lagerung in 4,4%-iger Na₂SO₄-Lösung bei 20 °C bzw. in gesättigter Ca(OH)₂-Lösung als Vergleichslagerung. Die Lösungen werden monatlich erneuert.
4. Beurteilung des Sulfatwiderstands anhand der Dehnungsdifferenz ($\Delta\varepsilon \leq 0,5$) nach 91 Tagen

2.3.4 Prüfung der Mikrorissfreiheit über die Bestimmung des Frost- Tausalzwidehrstands (CDF)

Die Prüfung der Mikrorissfreiheit der Bindemittelmatrix erfolgt über die Bestimmung der Frost-Tausalz-Beständigkeit der eingesetzten Betone in Anlehnung an CEN/TS 12390-9:2017-05 mit 56 Frost-Tausalz-Wechseln. Zudem werden die Prüfkörper nicht mit Tefloneinsätzen gefertigt, sondern aus Würfeln mit den Abmessungen (150 x 150 x 150) mm³ mittig herausgeschnitten (halbiert), so dass die Betonmatrix und nicht die geschaltete Oberfläche geprüft wird.

Das Testverfahren umfasst die folgenden drei Schritte:

1. Trockenlagerung,
2. Vorsättigung durch Kapillarwirkung,
3. Frost-Tau-Wechsel mit Tausalzangriff (56 Frost-Tau-Wechsel).

Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel werden lose anhaftende Teilchen und Schmutz von der Prüffläche der Probekörper mittels Behandlung in einem Ultraschallbad, wie in Abbildung 6 beschrieben, entfernt.

³ Deutsches Institut für Bautechnik: Prüfplan für die Zulassungsprüfung eines von DIN 1045 abweichenden Betons mit hohem Sulfatwiderstand, DIBt, Berlin, Februar 1998

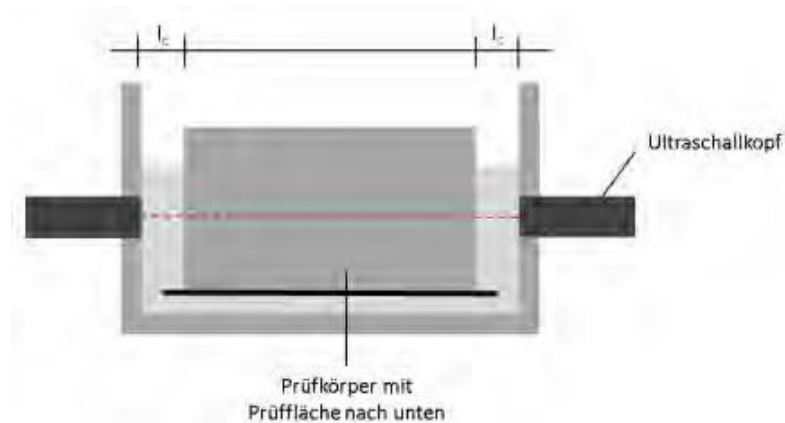


Abbildung 6 Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit

Die Flüssigkeitsaufnahme, die Abwitterung sowie der dynamische E-Modul werden nach 0, 8, 14, 28, 42, 50 und 56 Frost-Tau-Zyklen bestimmt. Als Prüfflüssigkeit dient eine Tausalzlösung aus 97 M.-% demineralisiertem Wasser und 3 M.-% NaCl.

Nach 56 Zyklen muss die Abwitterung unter 1.500 g/m^2 liegen und der Abfall des dynamischen E-Moduls darf nicht mehr als 40 % gegenüber dem Ausgangszustand betragen.

2.3.5 Restalkalität bezogen auf den Bindemittelgehalt

Die Bestimmung des Rest- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts der eingesetzten Betone zur Überprüfung des Korrosionsschutzes der Stahlbewehrung erfolgt mit Hilfe der Thermogravimetrie in Anlehnung an DIN EN ISO 11358-1:2014-10.

Die Ermittlung des Rest- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts in dem Beton wird nach 91 Tagen Hydratationszeit vorgenommen. Für den Versuch wird ein Prüfwürfel unter der hydraulischen Presse zerdrückt und aus der Mitte des Würfels Material entnommen. Der entnommene Beton wird zerkleinert, zweimal mit je 25 ml Isopropanol im Mörser zerrieben, das Isopropanol über eine Fritte abfiltriert und anschließend mit 25 ml Aceton in zwei Teilmengen gewaschen. Danach wird die Probe bei max. $40 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Stunde getrocknet und bis zur Untersuchung im Exsikkator über Natronlauge (CO_2 frei) gelagert.

An der „abgestoppten“ Probe wird anschließend die Bestimmung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts thermogravimetrisch durchgeführt. Ca. 0,5 g des Probenmaterials werden in die Thermowaage gegeben und einem Temperaturprogramm von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $900 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Heizrate von 5 K/min unterworfen. Ausgewertet wird der Masseverlust der Masseabnahmestufe bei $450 \text{ }^\circ\text{C}$, die der Entwässerung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zuzuordnen ist. Aus dem Masseverlust wird stöchiometrisch auf den $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt zurückgerechnet.

Der Rest- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt bezogen auf den Bindemittelgehalt muss mindestens 3 M.-% betragen.

2.4 Lebensdauerbetrachtung (Teil 3)

Im Rahmen eines von RWE geförderten Forschungsprojektes wurde die Säurebeständigkeit von Beton mit erhöhtem Säurewiderstand bei verschiedenen pH-Werten (2,5 / 3,5 / 4,5) über 12 Monate geprüft. Die mit Hilfe eines Stereo- und Polarisationsmikroskops ermittelten Erosions- und Schädigungstiefen der Probekörper sind in Abbildung 7 dargestellt.

Der Unterschied zwischen pH 4,5 und pH 3,5 ist gering, verglichen mit dem hohen Unterschied zwischen pH 3,5 und pH 2,5. Diese Ergebnisse belegen erneut den oben erwähnten kritischen Wert von pH 3,5 für Beton mit erhöhter Säurebeständigkeit.

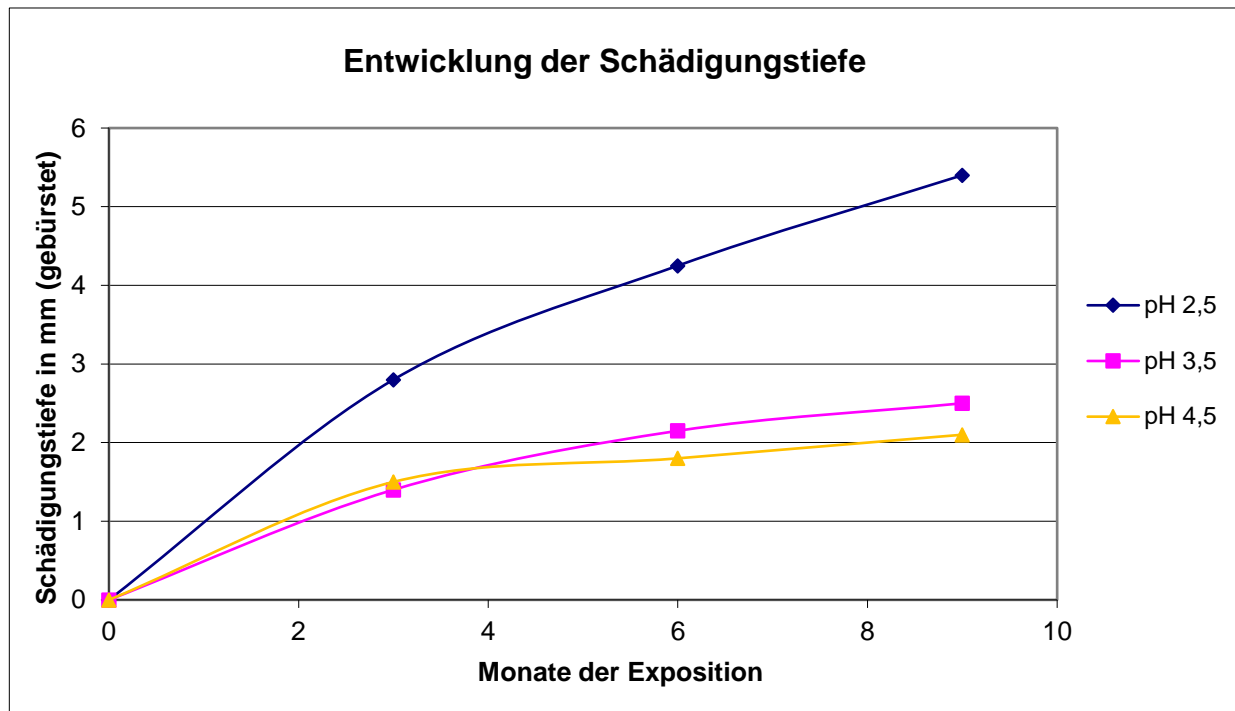


Abbildung 7: Erosions- und Schadenstiefen von Beton mit erhöhter Säurebeständigkeit in Abhängigkeit der Dauer der Exposition

Die Erosions- und Schädigungstiefen lassen sich mit guter Näherung durch eine Quadratwurzel aus der Zeit-Gleichung charakterisieren. So kann die Schädigungstiefe als Funktion des pH-Wertes und der Zeit berechnet und bewertet werden, wie nachfolgend beispielhaft für pH 4,5 erläutert:

Krümmungsanpassung, z. B. für pH 4,5 ergibt:

$$d = 0,5348\sqrt{t} + 0,0414$$

d: Schädigungstiefe, t: Zeit in Monaten

Für t = 1200 Monate (100 Jahre):

$$d = 0,5348 \sqrt{1200} + 0,0414 = 18,6 \text{ mm}$$

$$d = 18,6 \text{ mm} < 25 \text{ mm} = C_{\text{nom}}$$

Die Ergebnisse bereits durchgeführter Langzeittests stimmen mit den praktischen Erfahrungen überein: Betonproben, die in einem Berliner Abwasserpumpwerk mit niedrigen pH-Werten beansprucht wurden, zeigen vergleichbare Erosions- und Schädigungstiefen. Auch die Ergebnisse der in unserem „MIC-Performance-Test“ (ehemals ODOCO-Pilotanlage genannt) geprüften Probekörper entsprechen den berechneten Erosions- und Schädigungstiefen des Langzeittests.

3 Zusammenfassung

Der „MPA-Performance-Test“ wurde zur Prüfung von Hochleistungsbetonen (u. a. für Beton mit erhöhtem Säurewiderstand), aber auch zur Prüfung anderer mineralischer Systeme konzipiert. Das Verfahren ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert und im Rahmen einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) festgelegt und damit auch „normativ“ geregelt. Das Prüfverfahren wurde in unzähligen Bauprojekten zur bestmöglichen Bewertung der Betonrezepturen herangezogen.

Der „MPA-Performance-Test“ gliedert sich in drei Teile, wie folgt:

- Teil 1 Säureprüfung (Einlagerung bei pH = 3,5 über 12 Wochen),
- Teil 2 Holistic Approach (gesamtheitliche Beschreibung der Performance),
- Teil 3 Lebensdauerbetrachtung (probabilistischer Ansatz).

Bei den Prüfungen müssen jeweils Grenzwerte eingehalten werden, die eine Betonrezeptur in ihrer Gesamtheit ohne Ausnahme einhalten muss, um als Rezeptur höchster Beständigkeit und Dichtheit zu gelten. Die Grenzwerte sind in den jeweiligen Prüfabschnitten in Kapitel 3 beschrieben und in nachfolgender Tabelle 2 wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 2 Prüfverfahren und Grenzwerte zur Feststellung einer Betonrezeptur höchstmöglicher Beständigkeit und Dichtheit

Prüfverfahren	Anforderungen (Grenzwerte)
Bewertung durch Schädigungstiefe	$\leq 1,3 \text{ mm}$
Test zur Bewertung der Mikrorissneigung über Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF) nach 56 Zyklen	Reduzierung des E-Modul: 40 % Masseverlust: 1.500 g/m ²
Sulfatwiderstand über das SVA-Verfahren	$< 0,5 \text{ mm/m}$
Gesamtporosität	$< 11 \text{ Vol.-%}$
Kumulative Porenvolumen im Bereich $< 110 \mu\text{m}$ Mittlerer Porenradius	$< 40 \text{ mm}^3/\text{g}$ $< 0,1 \mu\text{m}$
Chloridmigrationskoeffizient	$< 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^2/\text{s}$
Restalkalität, bezogen auf das Bindemittel	$> 3 \text{ g Ca(OH)}_2/100 \text{ g Bindemittel}$

Die Anforderungen (Grenzwerte) sind in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) für Betone mit erhöhtem Säurewiderstand z. B. der Wasserverbände Emscher Genossenschaft oder bei den Berliner Wasserbetriebe, der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) oder der Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGBPowerTech) festgelegt.

Für den gesamtheitlichen „MPA-Performance-Test“ ist nach Probeneingang in unserem Laboratorium von einer Bearbeitungszeit von max. fünf Monaten (inkl. Dokumentation) auszugehen.

Literatur

- 1 Rieck, C.; Hüttl, R.: Beton mit erhöhtem Säurewiderstand für Rohre und Schächte – Prüfung, Entwicklung und Anwendung – BWI BetonWerk International, 2011
- 2 Röben, R.; Hüttl, R.; Waschnewski, J: Beständigkeitsuntersuchungen von Betonen für Abwasserrohre und -schächte. BWI – BetonWerk International, issue 5, 2014; pp. 12-15.
- 3 Rieck, C.; Hüttl, R.: Concrete with increased acid resistance for pipes and manholes – testing, development and application. CPI – Concrete Plant International, issue 3, 2011; pp. 138-144.
- 4 Bergmeister K., Wörner J.D.: Beton Kalender 2006, 2006, pp. 521 – 534
- 5 Rieck, C.; Hüttl, R.; Busch, D.: Quality Assurance and Durability of Concrete with Increased Acid Resistance for Cooling Towers. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013. 23. bis 27. September 2013, Wroclaw University of Technology. Tagungsband herausgegeben von Obrębski, J.B. und Tarczewski, R.

■ Berlin

Voltastraße 5 | 13355 Berlin
T +49 (0)30 / 46 77 61 0
F +49 (0)30 / 46 77 61 10
De.Info.KiwaBerlin@kiwa.com

■ Ihre Ansprechpartner:

M.Sc. Tom von Minding
T +49 163 546 77 02
tom.von.minding@kiwa.com

Dr. Ronny Stadie
T +49 163 546 09 79
ronny.stadie@kiwa.com

Dipl.-Ing. Carsten Rieck
T +49 163 546 77 01
carsten.rieck@kiwa.com

