

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 27/28

Artikel: Mörtel und Beton: Wassergehalt, Porosität und elektrischer Widerstand
Autor: Hunkeler, Fritz / Holtzhauer, Klaus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78475>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mörtel und Beton

Wassergehalt, Porosität und elektrischer Widerstand

Hier wird der Zusammenhang zwischen dem von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängigen Wassergehalt und dem spezifischen elektrischen Widerstand sowie der Porosität von Mörtel- und Betonprüfkörpern analysiert. Die korrekte Bestimmung des Kapillar- und Gelporenvolumens ist ein sehr schwieriges Unterfangen und erfordert daher ein entsprechend angepasstes und geeichtes Vorgehen. Während der spezifische elektrische Widerstand über mehrere Größenordnungen variieren kann, ist jener des Porenwassers nur wenig material- und feuchtigkeitsabhängig, also entspricht der elektrisch nichtleitende Wassergehalt dem Gelporenvolumen. Daher könnte die Widerstandsmessung eine neue Methode zur Bestimmung des Kapillar- und Gelporenvolumens werden.

Poröse Baustoffe wie Beton und Mörtel nehmen aus der Luft Wasser auf. Bestimmend für die Wasseraufnahme sind

VON FRITZ HUNKELER, ZÜRICH
UND KLAUS HOLTZHAUER,
EMBRACH

einerseits strukturelle Parameter des Zementsteins wie z.B. die Verteilung der Porenradien und die Ausdehnung der inneren Oberfläche, und andererseits die relative Luftfeuchtigkeit **RL** bzw. das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdampfdruck. Die strukturellen Parameter sind sowohl von der Zementart, vom W/Z-Wert, von der Art und Menge der Zusätze als auch vom Alter der Betone oder Mörtel bzw. von deren Hydratationsgrad abhängig. In *Bild 1* ist eine typische Sorptionsisotherme von Beton dargestellt [1, 2]. Bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 40% lässt sich die Wasseraufnahme mit der BET-Adsorptionstheorie, welche die chemisch-physikalische Wechselwirkung zwischen den Wassermolekülen und der Zementsteinoberfläche berücksichtigt, beschreiben [2, 3]. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 40% ist die gesamte innere Oberfläche des Zementsteins mit einem monomolekularen Wasserfilm belegt. Diese monomolekulare Wasserschicht unterliegt starken Adsorptionskräften. Dies lässt hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit erwarten, dass bei $RL < 40\%$ Beton und Mörtel kaum mehr elektrisch leitfähig sind. Die weiteren zusätzlich adsorbierten Wasserlagen unterliegen weniger starken Adsorptionskräften.

Bei Werten für $RL > 40\%$ überlagert sich bei der Wasseraufnahme durch Adsorption die Kapillarkondensation in

den feinen (Kapillar-)poren [2, 3]. Unter dem Begriff Kapillarkondensation versteht man die Einlagerung von Wasser im Porensystem aufgrund von Kapillarkräften bei Wasserdampfdrücken unter dem Sättigungsdampfdruck. Kapillarkondensation von Wasser in den Poren tritt umso eher ein, je kleiner der Porenradius, je höher die Oberflächenspannung des Wassers und je höher RL ist. Grössere Poren mit einem Durchmesser von >5 bis $10\ \mu\text{m}$ können auf diese Weise aber nicht mit Wasser gefüllt werden [4]. Poren mit einem Durchmesser von unter etwa $0.2\ \text{nm}$ sind für Wassermoleküle (ϕ etwa $0.3\ \text{nm}$ [2]) nicht mehr zugänglich. Das durch Kapillarkondensation aufgenommene Wasser unterliegt nur schwachen bis keinen Adsorptionskräften (*Tabelle 1*).

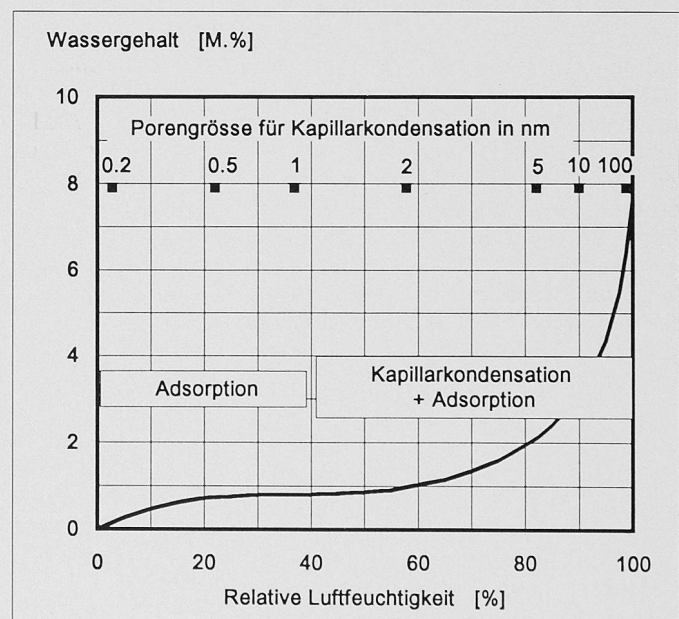
Das Sorptionsverhalten von Beton und Mörtel wird durch hygroskopische Salze (z.B. NaCl , CaCl_2) verändert.

Darüber wie auch über den Einfluss von Betonzusatzmitteln oder Betonverflüssigern gibt es kaum Untersuchungen.

Grundsätzlich kann zwischen «verdampfbarem» und «nichtverdampfbarem» Wasser unterschieden werden. Unter «verdampfbarem Wasser» versteht man dasjenige Wasser, welches sich im Porensystem wie «normales» oder «freies» Wasser bewegen kann sowie das Wasser, welches durch Adsorptions- oder Kapillarkräfte mehr oder weniger stark an die Oberfläche der Porenwände des Zementsteins gebunden ist. Das «nichtverdampfbare Wasser» hingegen ist das in den Reaktionsprodukten des Zementes chemisch gebundene Hydratwasser. Die unterschiedlich starken Bindungskräfte zeigen sich beim Erhitzen von Beton oder Mörtel (*Tabelle 2*). Auch beim Gefrieren des im Porenraum vorhandenen Wassers wirken sich die unterschiedlich starken Bindungskräfte zwischen dem Wassermolekül und den Porenwänden aus [6]: je stärker die Bindungskräfte, desto tiefer ist der Gefrierpunkt. Der stark adsorbierte und dadurch strukturierte molekulare Wasserfilm auf der inneren Oberfläche des Zementsteins gefriert dabei erst bei etwa $-90\ ^\circ\text{C}$, das übrige, nur vorstrukturierte Gelporenwasser schon zwischen -24 und $-40\ ^\circ\text{C}$ [6]. Das unstrukturierte und freie Kapillarporenwasser gefriert hingegen schon wenig unter $0\ ^\circ\text{C}$.

Da das Wasser in den Gel- und Kapillarporen durch unterschiedlich starke Adsorptions- und Kapillarkräfte an die Oberfläche des Zementsteins gebunden ist, hat sich die Unterscheidung zwi-

Bild 1. Typische Sorptionsisotherme von Beton gemäss [1, 2]. Wasser wird durch Adsorption und Kapillarkondensation aufgenommen (s. Text)



schen *Gel- und Kapillarporenwasser* etabliert. Man darf dabei aber nicht vergessen, dass der Übergang zwischen den Porengrößen bzw. -arten und damit auch zwischen den auf das Wasser einwirkenden Kräften fließend ist [3].

In neuerer Zeit wurde erkannt, dass neben der Porosität des Zementsteins, d.h. neben den Gel- und Kapillarporen, auch die Porosität der etwa 25 µm dicken Kontaktzone zwischen Zuschlagskorn und Zementstein berücksichtigt werden muss, um verschiedene Eigenschaften von Mörteln und Betonen zu verstehen [7, 8]. Das Porenvolumen der Kontaktzone wird auf etwa 30 bis 50 Vol.% geschätzt [7]. Man kann annehmen, dass das Wasser in diesem Porenvolumen mindestens so beweglich ist wie jenes in den Kapillarporen.

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand und dem verdampfbaren Wassergehalt im Beton wurde zwar schon früh erkannt (z.B. [9-11]), systematische und quantitative Untersuchungen aber fehlen. In den folgenden Ausführungen soll versucht werden, diese Wissenslücke etwas zu schliessen. Für das Verständnis der Ausführungen ist die vorhergehende Arbeit [12] über die Abhängigkeit des spez. elektrischen Widerstandes von der relativen Luftfeuchtigkeit von Mörteln und Betonen wichtig.

Angaben zu den Untersuchungen

Porositätsmessung

Nach der letzten Widerstandsmessung [12] wurden der Wassergehalt und die Porosität der etwa 650 Tage alten Prüfkörper bestimmt. Der Ablauf zur Bestimmung der Porosität ist in *Bild 2* dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen dem verdampfbaren Wassergehalt und dem spez. elektrischen Widerstand zu analysieren, wurden vor dem normalen Versuchsablauf das Gewicht der unterschiedlich ausgelagerten Prüfkörper vor und nach der Trocknung bei 50 und 110 °C gemessen. Die Berechnung der verschiedenen Kennwerte geht aus der *Tabelle 3* hervor. Bei einigen Prüfkörpern wurde die Porositätsmessung wiederholt, da die Ergebnisse der ersten Messung auffällig oder nicht erklärbar waren.

Probenmaterial

Die Kurzbezeichnungen und einige Angaben zu den untersuchten Mörtelsystemen sind in [12] erläutert. Die Dimension der Prüfkörper betrug 40x40x160 mm. In der Regel wurden zwei Parallelproben untersucht. Die

Bezeichnung	Durchmesser	Beschreibung, Name	Verhalten des Wassers, wirksame Kräfte
Makroporen	1000–15µm	grosse kugelförmige Poren	wie «normales» Wasser
Kapillarporen	15–0,05 µm 50–10 nm	grosse Kapillaren mittlere Kapillaren	wie «normales» Wasser mittlere Oberflächenkräfte
Gelporen	10–2,5 nm 2,5–0,5 nm	kleine (Gel-)Kapillaren Mikroporen, Gelporen	starke Oberflächenkräfte stark adsorbiertes Wasser, kein Meniskus

Tabelle 1: Einteilung der Porengrösse und Rolle des Wassers [4]

Temperatur, °C	Verlust des/durch
0–105	verdampfbaren Wassers
105–380	Hydratwassers des Zementsteins
380–600	Hydratwassers des Ca(OH) ₂
600–750	Zersetzung des vorhandenen CaCO ₃
750–975	Zersetzung von ggf. weiteren chemischen Verbindungen

Tabelle 2: Glühverlust beim Glühen von Beton oder Mörtelproben [5]

Prüfkörper wurden nach der Herstellung 28 Tage unter Wasser nachbehandelt und nach einer 60-tägigen Vorlagerung (RL = 70%) bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 43, 63, 70, 80 oder 100% über etwa 550 Tage ausgelagert (Temperatur: 20 °C). Einige orientierende Messungen wurden an alten Betonen durchgeführt [12].

Ergebnisse

Porosität

Die gemäss *Bild 2* und *Tabelle 3* bestimmten Gesamtporenvolumina nehmen mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit bei der Auslagerung i.a. leicht, die Kapillarporenvolumina i.a. etwas stärker ab. Die Gelporenvolumina nehmen dagegen i.a. leicht zu. Einen Überblick über die gemittelten Porositätsdaten sowie über das nichtfüllbare Porenvolumen und die 28d-Druckfestigkeit [13] gibt die *Tabelle 4*. Die Kennwerte einiger Mörtel, z.B. EL, HS und ST, müssen wegen des für diese sehr dichten Mörtel nicht adäquaten Vorgehens bei der Porositätsmessung mit Vorsicht betrachtet werden (s. unten).

Die Trockenrohichte d_{trocken} in Abhängigkeit vom Gesamtporenvolumen n sollte grundsätzlich der *Gleichung 1* genügen und bei $n = 0\%$ sollte d_{trocken} gleich der theoretischen Dichte d_{theor} sein. Bei der Verwendung üblicher Ausgangsstoffe liegt d_{theor} zwischen etwa 2600 bis 2700 kg/m³ [8].

$$d_{\text{trocken}} = d_{\text{theor}} - d_{\text{theor}} \left(\frac{n}{100} \right) = d_{\text{theor}} \left(1 - \frac{n}{100} \right) \quad (1)$$

Bei einigen Mörteln (z.B. EL, ST) ist *Gleichung 1* nicht erfüllt. Auch Ausreisser sind mit Hilfe der *Gleichung 1* gut eruiert. Die wichtigste Ursache von Fehlmessungen liegt in einer zu kurzen Wasserlagerung und/oder Trocknung. Die Mittelwerte der Trockenrohichten d_{trocken} und der gemäss *Gleichung 1* berechneten theoretischen Dichten d_{theor} der verschiedenen Mörtel sind in *Tabelle 4* aufgeführt.

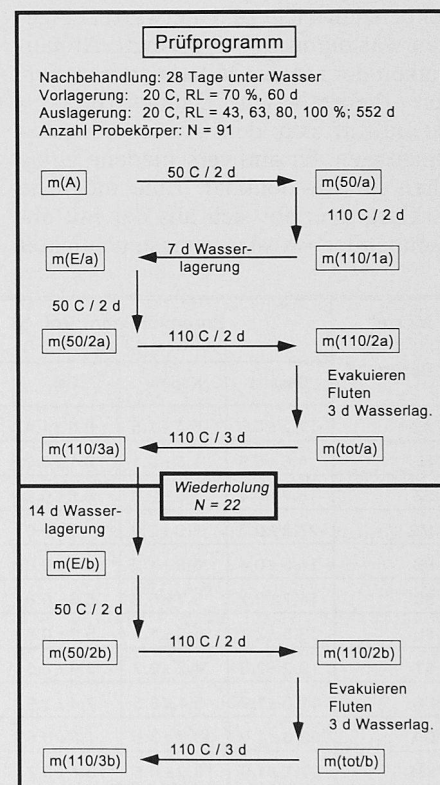


Bild 2. Prüfprogramm für Mörtel und Beton

$n \text{ (Vol. \%)} = \frac{m_{\text{tot, Luft}} - m_{110/3}}{V_{\text{tot}} d_{\text{Wasser}}} 100$	$\text{NFP} = L_P = n - K_P - G_P$
$G_P \text{ (Vol. \%)} = \frac{m_{50/2} - m_{110/2}}{V_E d_{\text{Wasser}}} 100$	$\text{FP} = K_P + G_P$
$G_P \text{ (FG, \%)} = \frac{m_{50/a} - m_{110/1}}{m_{50/2} - m_{110/2}} 100$	n Gesamtporengehalt (füllbare und nichtfüllbare Poren), Vol.% oder M.%
$K_P \text{ (Vol. \%)} = u_E = \frac{m_{E, \text{Luft}} - m_{50/2}}{V_E d_{\text{Wasser}}} 100$	K_P, u_E Kapillarporengehalt (füllbar), Vol.% oder M.%
$K_P \text{ (FG, \%)} = \frac{m_{A, -m_{50/a}}}{m_{E, \text{Luft}} - m_{50/2}} 100$	G_P Gelporengehalt (füllbar), Vol.% oder M.%
$V_E = \frac{m_{E, \text{Luft}} - m_{E, \text{Wasser}}}{d_{\text{Wasser}}}$	NFP Nichtfüllbare Poren (Luftporen), Vol.% oder M.%
$V_{\text{tot}} = \frac{m_{\text{tot, Luft}} - m_{\text{tot, Wasser}}}{d_{\text{Wasser}}}$	FP Füllbare Poren (Kapillar- und Gelporen), Vol.% oder M.%
$d_{c, \text{trocken}} = \frac{m_{110/3}}{V_E}$	FG Füllungsgrad der Poren, %
$d_{c, \text{nass}} = \frac{m_{E, \text{Luft}}}{V_E}$	Umrechnung Porengehalt: Vol.% = (dC, trocken/dWasser) M.%
	$m_E \text{ (Luft, Wasser)}$ Masse des Prüfkörpers, nichtfüllbare Poren (Luftporen) nicht mit Wasser gefüllt, gemessen an Luft bzw. unter Wasser, kg
	$m_{\text{tot}} \text{ (Luft, Wasser)}$ Masse des Prüfkörpers, nichtfüllbare Poren (Luftporen) mit Wasser gefüllt, gemessen an Luft bzw. unter Wasser, kg
	V_E Volumen des Prüfkörpers, nichtfüllbare Poren (Luftporen) nicht mit Wasser gefüllt, m ³
	V_{tot} Volumen des Prüfkörpers, nichtfüllbare Poren (Luftporen) mit Wasser gefüllt, m ³
	m_A Masse des Prüfkörpers nach Auslagerung bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten, kg
	m_{50} Masse des Prüfkörpers nach Trocknung bei 50°C, kg
	m_{110} Masse des Prüfkörpers nach Trocknung bei 110°C, kg
	d_{Wasser} Dichte oder spezifisches Gewicht von Wasser, kg/m ³ (Annahme: 1000 kg/m ³)
	$d_{C, \text{trocken}}$ Trockenrohddichte des Betons oder Mörtels, kg/m ³
	$d_{C, \text{nass}}$ Nassrohddichte des Betons oder Mörtels, kg/m ³

Tabelle 3. Angaben zur Berechnung der Porositätskennwerte

Die Trockenrohddichte der untersuchten Mörtel nimmt mit Ausnahme der Mörtel SM und HS mit zunehmender Auslagerungsfeuchtigkeit wegen des abnehmenden Gesamtporenvolumens tendenziell leicht zu. Unerwartet hingegen war die in Bild 3 gezeigte Abhängigkeit der auf den Mittelwert normierten theoretischen Dichte ($d_{\text{norm}} = d_{\text{theor}}/d_{\text{Mittel}}$) von den Auslagerungsbedingungen. Es sind verschiedene Ursachen hierfür denkbar. Eine mögliche Erklärung ergibt sich aus der mit abnehmender Auslagerungsfeuchtigkeit

zunehmenden Karbonatisierung der Porenwände. CaCO_3 ist schwerer als Ca(OH)_2 [5]. Dies bewirkt eine von der Vorgeschichte bzw. von der Karbonatisierungsgeschwindigkeit abhängige Gewichtszunahme der Mörtel. Dadurch kann die theoretische Dichte Werte annehmen, die höher sind als aufgrund des Gesamtporenvolumens erwartet werden könnte. Der Verlauf der Kurven in Bild 3 könnte somit einen Hinweis auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der einzelnen Mörtel liefern. Um diese wohl plausible, aber doch spekulative

Erklärung abzusichern, wären aber weitere Untersuchungen erforderlich.

Die Erfahrung, dass die Trocknung bei 105 bis 110 °C die Porenstruktur nachhaltig verändert und die Wiederbefüllung der Proben erheblich erschwert [14], wird durch die Ergebnisse der Wiederholung der Porositätsmessung bestätigt. Es zeigte sich, dass das Gesamtporenvolumen der zweiten Messung dann erheblich unter dem Wert der 1. Messung lag, wenn das Gesamtporenvolumen unter etwa 10 Vol.% betrug. Das Gelporenvolumen der 2. Messung

Mörtel Beton	Porenvolumen, Vol. % (RL = 43 bis 100 %)				Dichte, kg/m ³ (RL = 43 bis 100 %)		Spez. Widerstand des Porenwassers, Ω m		Nichtleitender Wassergehalt		Druckfestig- keit, 28 d
	Gesamt	Kapillar	Gel	N. füllbar	Trocken	Theor.	RL = 100 %	RL \leq 80 %	Vol. %	M. %	N/mm ²
AZ	17.2 ± 0.5	5.4 ± 1.5	8.9 ± 1.4	2.9 ± 0.2	2171 ± 7	2622 ± 8	9.6 ± 0.1	15.8 ± 1.7	8.1	3.7	89.0
EL	4.6 ± 0.9	1.3 ± 0.1	3.1 ± 0.9	0.2 ± 1.2	2264 ± 5	2373 ± 24	64.2 ± 2.6	34.1 ± 8.8	1.8	0.8	67.4
EZ	15.7 ± 0.4	7.0 ± 0.8	6.8 ± 0.8	2.0 ± 0.4	2198 ± 14	2610 ± 8	8.6 ± 0.7	8.7 ± 2.0	6.8	3.1	88.3
ME	23.2 ± 0.3	7.5 ± 2.0	11.9 ± 2.0	6.5 ± 4.6	2010 ± 2	2621 ± 7	30.9 ± 1.0	37.2 ± 4.1	10.4	5.2	83.1/86.3
PC	14.5 ± 0.4	6.5 ± 1.2	5.8 ± 0.8	2.2 ± 0.4	2283 ± 4	2670 ± 10	7.8 ± 0.8	15.9 ± 2.3	4.5	2.0	65.1
SC	14.7 ± 0.2	5.7 ± 0.8	6.6 ± 0.8	2.3 ± 0.4	2269 ± 2	2658 ± 6	13.2	21.9 ± 1.8	5.1	2.3	68.0/73.7
SL	13.5 ± 2.1	5.5 ± 1.5	5.9 ± 0.8	2.2 ± 0.3	2254 ± 3	2607 ± 60	9.3 ± 0.2	19.6 ± 2.1	4.4	2.0	58.0
ST	9.2 ± 2.3	4.2 ± 0.7	3.6 ± 0.6	1.4 ± 2.3	2242 ± 2	2511 ± 35	8.4	15.3 ± 1.9	4.5	2.0	54.8/62.3
HS	11.0 ± 1.2	5.1 ± 0.5	7.4 ± 1.9	-1.4 ± 0.7	1860 ± 5	2090 ± 25		39.0 ± 12	6.1	3.3	
GA	53.6 ± 1.0	33.3 ± 3.5	1.6 ± 0.6	18.7 ± 4.3	1253 ± 25	2703 ± 9	22.8 ± 2.2	23.8 ± 2.8	3.0	2.4	2.9
SM	27.1 ± 1.9	6.0 ± 0.5	10.4 ± 0.7	10.6 ± 3.0	1438 ± 8	1973 ± 60	30.4 ± 1.3	30.6 ± 2.3	10.5	7.3	31.2
PC 300 alt	10.1 ± 0.8	5.6 ± 0.4	3.0 ± 0.2	1.5 ± 0.3	2411 ± 20	2683 ± 8	14.9 ± 4.8	28.8 ± 6.1	3.4	1.4	

Tabelle 4. Mittelwerte und Standardabweichung (ohne Extremwerte) verschiedener Kenngrößen

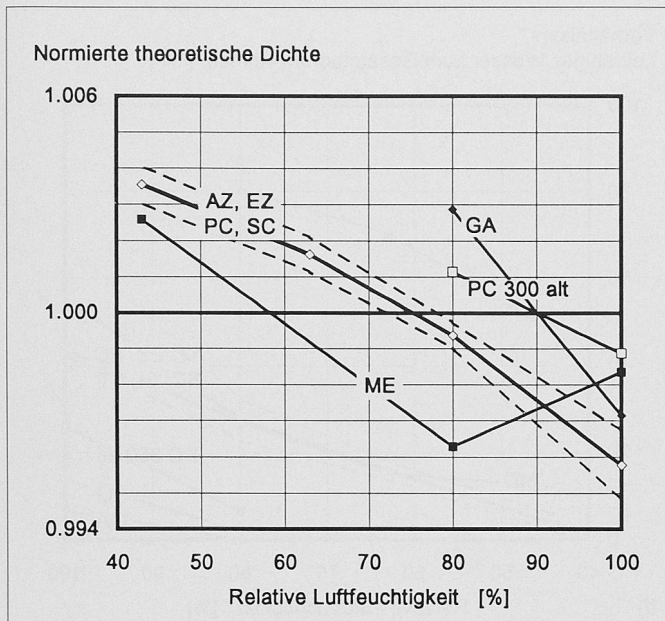


Bild 3. Auf den Mittelwert normierte theoretische Dichte ($d_{\text{norm}} = d_{\text{theor}}/d_{\text{Mittel}}$) einiger Mörtel und eines alten PC 300 Betons als Funktion der Auslagerungsfeuchtigkeit. Für verschiedene Mörtel ist nur der Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben. Die Bezeichnungen und weitere Angaben zu den Mörteln sind in [12] enthalten

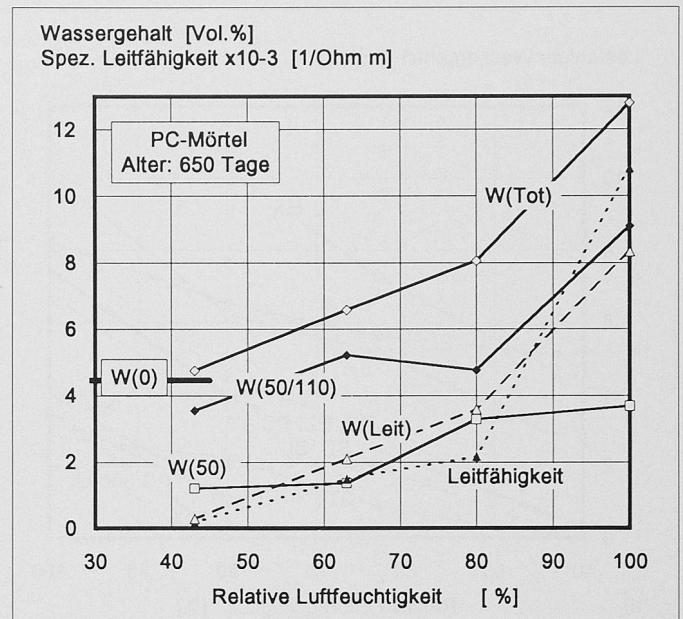


Bild 4. Der bei 50 °C, zwischen 50 und 110 °C und der totale, bei 110 °C verdampfbare Wassergehalt (W_{50} , $W_{50/110}$ und W_{Tot} , ausgezogene Linien) und der elektrisch leitfähige Wassergehalt W_{Leit} (gestrichelte Linie) sowie die spezifische elektrische Leitfähigkeit (punktuelle Linie) des PC-Mörtels als Funktion der Auslagerungsfeuchtigkeit. Eingetragen ist auch der elektrisch nichtleitende Wassergehalt W^0

lag, abgesehen von wenigen Ausnahmen, erheblich unter, das Kapillarporenvolumen hingegen i.a. erheblich über dem Wert der 1. Messung. Man darf daraus schliessen, dass bei der 2. Messung die Poren der Mörtel mit kleinem Porenvolumen nur noch teilweise mit Wasser gefüllt werden konnten.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die Probengrösse das Ergebnis der Porositätsmessung beeinflussen kann, wenn z.B. die Differenzierung zwischen Gel- und Kapillarporenvolumen über die Trocknung bei 50 und 105 °C vorgenommen wird. In Kenntnis dieser Tatsache wurde das Verfahren zur Bestimmung des Gel- und Kapillarporenvolumens für übliche PC 300 Betone und für zylindrische Proben mit einem Durchmesser und einer Länge von 50 mm von der EMPA standardisiert [15]. Wird dieses Standardverfahren bei grösseren Prüflingen angewendet, so ist damit zu rechnen, dass das experimentell bestimmte Kapillarporenvolumen vergleichsweise kleiner, das Gelporenvolumen vergleichsweise grösser ausfällt. Hingegen sollte das Gesamtporenvolumen weniger beeinflusst werden. Über das genaue Ausmass des Einflusses der Probengrösse auf die Kennwerte der Porosität können jedoch keine Angaben gemacht werden. Im weiteren ist es zumindest sehr unsicher, ob mit einem Standardverfahren, welches auf der Trocknung der Prüfkörper bei verschiedenen Temperaturen beruht, bei dichten

und/oder modifizierten Mörteln und Betonen zwischen dem Gel- und Kapillarporenvolumen überhaupt korrekt differenziert werden kann (s. unten).

Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Porosität und elektrischem Widerstand

Zunächst kann festgestellt werden, dass zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ_c und dem Gesamt- oder Kapillarporenvolumen der Mörtel kein direkter Zusammenhang besteht. Dies ist schon daran erkennbar, dass bei $RL = 100\%$, wo mit gefüllten Kapillarporen gerechnet werden kann, kein Mörtel einen kleineren Widerstand aufweist als der PC-Mörtel, obwohl bei einigen Mörteln das Gesamtporenvolumen (z.B. AZ, EZ, GA, ME, SM) oder das Kapillarporenvolumen (z.B. EZ, GA, ME, SM) grösser ist als beim PC-Mörtel. Dies bestätigt die eingangs gemachte Feststellung, dass nämlich Betone und Mörtel Wasser enthalten, welches nichts zur elektrischen Leitfähigkeit beiträgt. Der Zusammenhang zwischen ρ_c und dem Wassergehalt der Mörtel musste deshalb genauer analysiert werden.

Aus den Differenzen zwischen m_A , $m_{50/a}$ und $m_{110/3a}$ können folgende Werte berechnet werden:

$m_A - m_{50/a}$ bei 50 °C verdampfbarer Wassergehalt W_{50} in Vol. %

$m_{50/a} - m_{110/3a}$ zwischen 50 und 110 °C verdampf. Wassergehalt $W_{50/110}$ in Vol. %

$m_A - m_{110/3a}$ totaler verdampfbarer Wassergehalt W_{Tot} in Vol. %.

Für diese Berechnungen wurde $m_{110/3a}$ anstelle von $m_{110/1a}$ eingesetzt, da i.a. $m_{110/3a}$ noch etwas kleiner war als $m_{110/1a}$. Wie unten gezeigt wird, entspricht W_{50} nicht dem Kapillarporenwasser und $W_{50/110}$ nicht dem Gelporenwasser.

Berechnung des nichtleitenden Wassergehaltes und des spez. Widerstandes des Porenwassers

Aufgrund der einleitenden Erläuterungen kann näherungsweise angenommen werden, dass bei $RL > 40\%$ der nichtleitende Wassergehalt W^0 in etwa konstant und unabhängig von RL ist. Mit dieser Annahme kann aus dem totalen Wassergehalt der Prüfkörper W_{Tot} und den gemessenen spez. Widerständen ρ_c der Mörtel [12] der leitfähige Wassergehalt W_{Leit} und der spezifische elektrische Widerstand des leitfähigen Porenwassers ρ_{pw} gemäss Gleichung 2 [16] ermittelt werden. Das leitfähige Wasser ist dabei das bewegliche, freie Wasser, welches nur relativ geringen bis keinen Adsorptionskräften unterliegt.

$$\frac{1}{\rho_c} = \sigma_c \approx \frac{1}{\rho_{pw}} \left(\frac{W_{\text{Tot}} - W^0}{100} \right) = \frac{1}{\rho_{pw}} \left(\frac{W_{\text{Leit}}}{100} \right) = \sigma_{pw} \left(\frac{W_{\text{Leit}}}{100} \right) \quad (2)$$

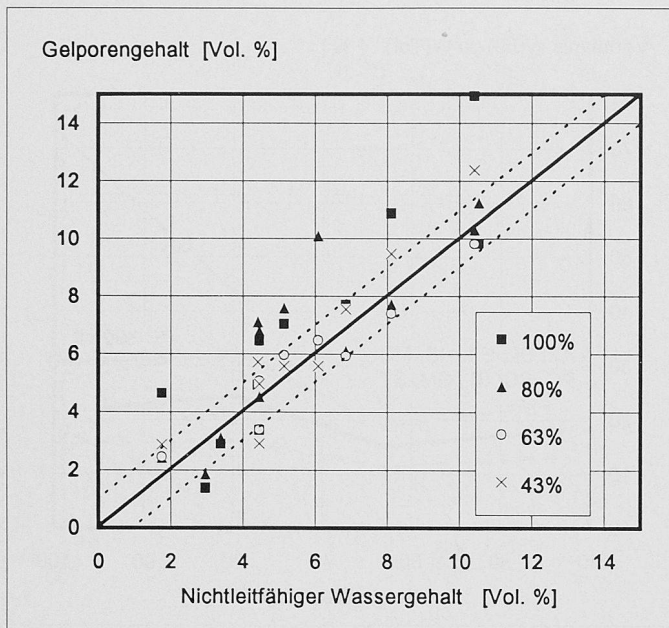


Bild 6. Zusammenhang zwischen dem Gelporenvolumen G_p der bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten ausgelagerten Proben und dem über mehrere Proben gemittelten, nichtleitfähigen Wassergehalt W° (s. Text)

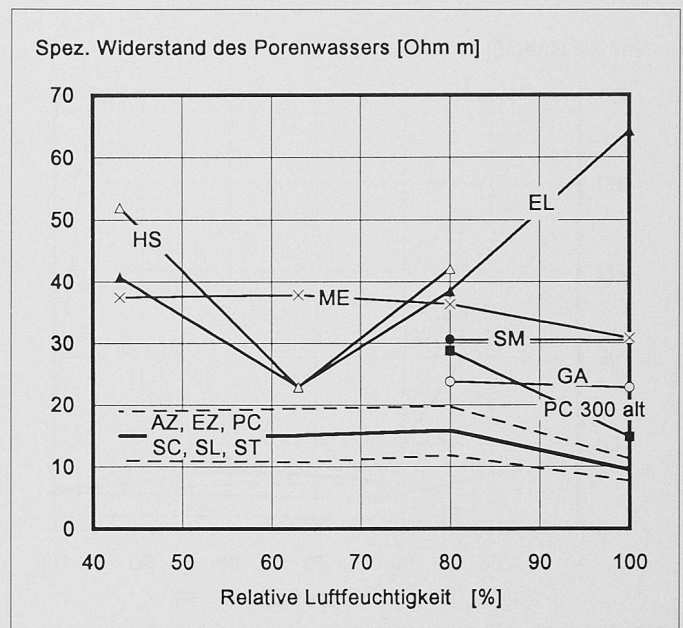


Bild 7. Spezifischer elektrischer Widerstand des Porenwassers ρ_{pw} verschiedener Mörtel und eines alten PC 300 Betons in Abhängigkeit von der Auslagerungsfeuchtigkeit. Für verschiedene Mörtel ist nur der Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben

Bei sehr hohen elektrischen Widerständen ($>20\,000\,\Omega m$) könnte man annehmen, dass die Probe praktisch kein leitfähiges (Kapillar-)Porenwasser mehr enthält. Abhängig vom spez. Widerstand des Porenwassers entspricht ein spez. elektrischer Widerstand von $50\,000\,\Omega m$ gemäss Gleichung 2 bei chloridfreien Mörteln oder Betonen und bei einer Temperatur von $20\,^\circ C$ einem leitfähigen Wassergehalt von <0.02 bis $0.1\,Vol.\%$. Diese Genauigkeit dürfte zumeist ausreichend sein. Im nächsten Schritt könnte die Probe unter Vakuum geflutet und ergänzend der elektrische Widerstand gemessen und danach bei 105 bis $110\,^\circ C$ vollständig ausgetrocknet werden.

Spezifischer elektrischer Widerstand des Porenwassers

Der gemäss Gleichung 2 berechnete spez. elektrische Widerstand des Porenwassers ρ_{pw} ist in Bild 7 in Abhängigkeit von RL dargestellt (s. auch Tabelle 4). Bei den Mörteln AZ, EZ, PC, SC, SL und ST beträgt ρ_{pw} für $RL \leq 80\%$ etwa $15 \pm 4\,\Omega m$, für $RL = 100\%$ etwa $9 \pm 2\,\Omega m$. Dass ρ_{pw} bei $RL = 100\%$ i.a. deutlich niedriger ist als bei $RL < 80\%$, deutet auf die erhöhte Beweglichkeit des Wassers in den bei $RL = 100\%$ gefüllten grösseren Kapillaren hin. Ob und inwieweit auch die Schwachstelle zwischen Zuschlag und Zementstein und die geringere Karbonatisierung der Porenwände hierfür mitverantwortlich sind, kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht beurteilt werden. Die Werte für ρ_{pw} der stark modifizierten Mörtel EL, HS und ME liegen teilwei-

se erheblich höher. Der Verlauf der ρ_{pw} -RL-Kurven der Mörtel EL und HS kann nicht erklärt werden. Die Art der Mörtelzusätze (z.B. Kunststofftyp und mineralische Zusätze) spielt vermutlich eine wichtige Rolle. Die ρ_{pw} -Werte des alten Betons liegen in etwa um den Faktor 1.5 bis 2 höher als jene des PC-Mörtels, was möglicherweise auf eine wegen der Karbonatisierung der Porenwände geringere $Ca(OH)_2$ -Konzentration im Porenwasser und/oder auf eine wegen der vollständigen Hydratation feinere Porenstruktur des alten Betons zurückzuführen ist. Die Abhängigkeit von ρ_{pw} vom Material und von der relativen Luftfeuchtigkeit bedeutet, dass der spez. elektrische Widerstand ρ_c von Mörteln und Betonen über den leitfähigen Wassergehalt allein nur grob abgeschätzt werden kann. In vielen Fällen dürfte dies aber ausreichend und bereits sehr hilfreich sein.

Im Vergleich zum spez. elektrischen Widerstand des Porenwassers ist der Widerstand von wässriger $Ca(OH)_2$ -Lösung wesentlich niedriger. Gemäss [9] und eigenen orientierenden Messungen beträgt der spez. Widerstand einer frischen, gesättigten $Ca(OH)_2$ -Lösung etwa $1.2\,\Omega m$, einer gesättigten, aber gealterten und karbonatisierten $Ca(OH)_2$ -Lösung etwa $5.5\,\Omega m$. Die ρ_{pw} -Werte der jungen Mörtel AZ, EZ, PC, SC, SL und ST sind damit um etwa den Faktor 10 bis 15 höher als der Wert der frischen $Ca(OH)_2$ -Lösung bzw. um den Faktor 2 bis 4 höher als jener der gealterten Lösung. Der Widerstand von wässriger Lösung ist aber nur beschränkt mit ρ_{pw} vergleichbar. Für den Widerstand

des Porenwassers sind verschiedene physikalische und physikalisch-chemische Phänomene von Bedeutung, welche bei der Berechnung von ρ_{pw} nicht berücksichtigt werden können und grundsätzlich ρ_{pw} erhöhen. Von Bedeutung sind z.B.:

- die unterschiedlich starken *Adsorptions- und Kapillarkräfte* zwischen dem Wasser und den Porenwänden.
- die *strukturellen, geometrischen Gegebenheiten* im Porensystem wie z.B. die Verengungen und die Oberflächenrauigkeit im Zementstein bzw. die mittlere freie Weglänge.
- der Einfluss der *Karbonatisierung der Porenwände* auf die chemische Zusammensetzung des Porenwassers. Eine pH-Abnahme bewirkt eine Zunahme des elektrischen Widerstandes des Porenwassers.

Diese Einflüsse sind zusammen mit und teils als Folge der unterschiedlichen Zusammensetzung der Mörtel (Zementgehalt, W/Z-Wert, Zusätze) und des unterschiedlichen Hydratationsgrades wahrscheinlich auch für die unterschiedlichen spez. elektrischen Widerstände des Porenwassers der Mörtel und Betone verantwortlich.

Kritische Anmerkung zur Porositätsmessung

Es wurde bereits eingangs erwähnt, dass die Differenzierung zwischen Gel- und Kapillarporenvolumen über die Trocknung bei verschiedenen Temperaturen

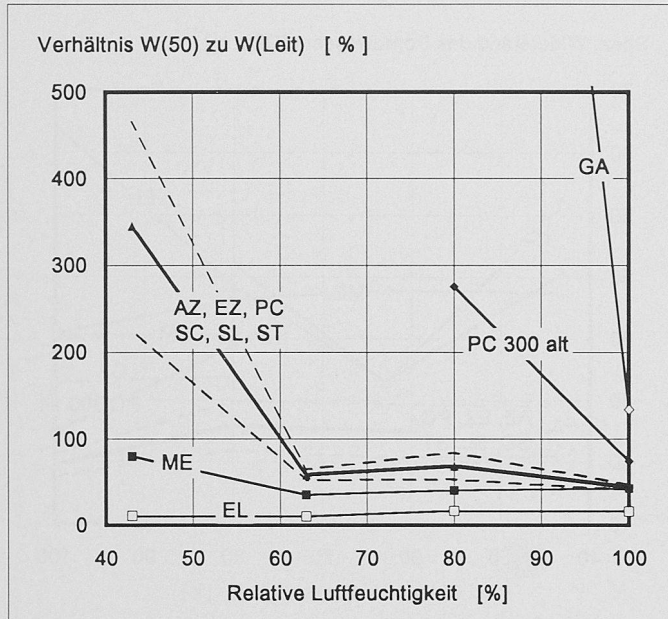


Bild 8. Verhältnis des bei 50 °C verdampfenden zum leitfähigen Porenwasser (W_{50}/W_{Leit}) in Abhängigkeit von der Auslagerungsfeuchtigkeit. Für verschiedene Mörtel ist nur der Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben

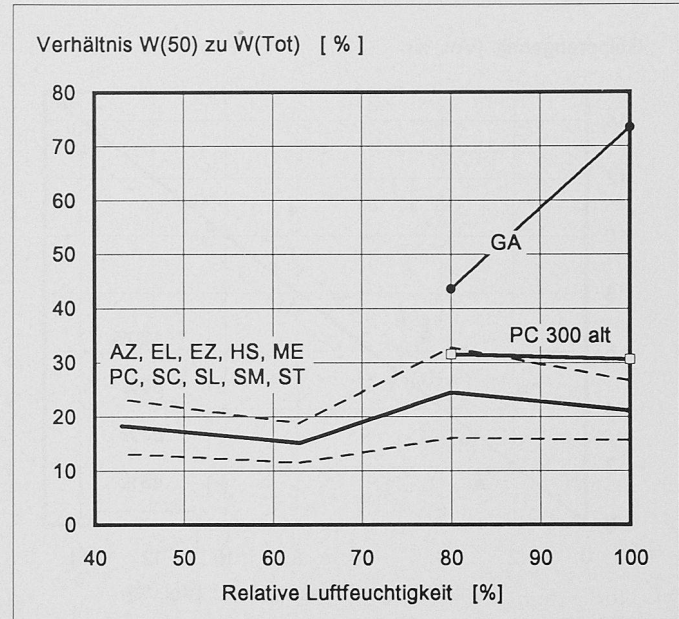


Bild 9. Verhältnis des bei 50 °C verdampfenden zum totalen, verdampfenden Wassergehalt (W_{50}/W_{Tot}) als Funktion der Auslagerungsfeuchtigkeit. Für verschiedene Mörtel ist nur der Mittelwert \pm Standardabweichung angegeben

(vgl. Bild 2) bei dichteren Mörteln und Betonen unsicher ist. Die in den Bildern 8 und 9 gezeigten Ergebnisse bestätigen diesen Sachverhalt und zeigen sehr deutlich, dass diesbezüglich noch einige Fragen zu klären sind.

Wenn bei 50 °C zur Hauptsache das freie und bewegliche Kapillarporenwasser verdampft, wie bei der Porositätsmessung gemäss Bild 2 angenommen bzw. grundsätzlich vorausgesetzt wird, müsste ein Zusammenhang zwischen dem bei 50 °C verdampfenden Wasser W_{50} und dem leitfähigen Wassergehalt W_{Leit} bestehen. Wie aber aus Bild 8 ersichtlich ist, variiert das Verhältnis W_{50}/W_{Leit} sehr stark und steigt bei den meisten Mörteln und beim alten PC 300 Beton tendenziell mit abnehmender RL an. Dies bedeutet, dass bei den feucht ausgelagerten Prüfkörpern W_{Leit} unterschätzt, bei den trocken ausgelagerten Prüfkörpern hingegen überschätzt wird. Das bei der Trocknung bei 50 °C verdampfbare Wasser und damit auch der unterschiedliche Verlauf der Kurven in Bild 8 sind im wesentlichen von der Porenstruktur bzw. vom unterschiedlichen Desorptionsverhalten der verschiedenen Materialien abhängig.

In Bild 9 ist das Verhältnis W_{50}/W_{Tot} in Abhängigkeit von RL dargestellt. Daraus geht hervor, dass W_{50}/W_{Tot} der Mörtel und des alten Betons, abgesehen vom GA-Mörtel mit einem sehr hohen Kapillar- und einem sehr kleinen Gelporenvolumen (Tabelle 4), nicht die erwartete Abnahme mit sinkender RL aufweist. Vielmehr ist W_{50}/W_{Tot} in etwa konstant und liegt für die meisten Mörtel zwischen etwa 10 und 30%. Das Ver-

hältnis W_{50}/W_{Tot} beträgt dementsprechend etwa 90 bis 70%. Die Berechnung des Füllungsgrades der Gel- und Kapillarporen (s. Tabelle 3) lieferte deshalb auch teils ganz unrealistische Werte.

Dieser Befund lässt den Schluss zu, dass bei konstanten Trocknungsbedingungen pro Zeiteinheit eine zu W_{Tot} proportionale Menge Wasser verdampft und zwar unabhängig davon, ob es sich dabei um Kapillar- oder Gelporenwasser handelt. Dies lässt sich so erklären, dass das in den inneren Kapillarporen vorhandene Wasser nur verdampfen kann, wenn die vorgelagerten benachbarten Gelporen entleert sind. Eine den Trocknungsbedingungen entsprechende Verdampfungsfront wandert demnach von der Oberfläche des Prüfkörpers nach innen.

Grundsätzlich bestätigt sich damit die Erfahrung, dass es nicht ganz einfach ist, zwischen dem Kapillar- und Gelporenvolumen zu differenzieren. Die grundsätzliche Frage, ob überhaupt und unter welchen Voraussetzungen mit der Trocknung bei unterschiedlichen Temperaturen das Kapillar- und Gelporenvolumen korrekt bestimmt werden kann, muss vorderhand noch offengelassen werden. Die in den Bildern 8 und 9 gezeigten Ergebnisse lassen dies zumindest bei dichteren Mörteln und Betonen als sehr fraglich erscheinen. Die Trocknungsparameter (z.B. Temperatur, Vakuum, Zeit) müssten auf jeden Fall sowohl den jeweiligen Auslagerungsbedingungen wie auch den einzelnen Materialien und der Probengrösse angepasst werden. Eine Eichung mit

einem anderen, unabhängigen Verfahren zur Bestimmung des Gel- und Kapillarporenvolumens ist aber absolut unerlässlich. Mögliche Eichverfahren sind z.B. die Quecksilberporosimetrie oder vielleicht die Widerstandsmessung, wie es oben vorgeschlagen wurde.

Zusammenfassung und Folgerungen

Die Porositätsmessung wird mit abnehmendem Porenvolumen schwieriger und die Reproduzierbarkeit der Kennwerte schlechter. Die Trocknung bei 105 – 110 °C sollte bei der Messung so spät wie möglich durchgeführt werden. Die Resultate der Porositätsmessung, insbesondere die Angaben zum Gel- und Kapillarporenvolumen, sollten generell mit Vorsicht betrachtet werden. Das für Standardbetone entwickelte Standardverfahren zur Ermittlung der Porositätskennwerte ist für dichte oder kunststoffmodifizierte Mörtel oder Betone nur bedingt geeignet und sollte von Fall zu Fall überprüft und ggf. modifiziert werden. Eine Eichung des Verfahrens ist unerlässlich.

Der Gehalt an leitfähigem oder beweglichem Wasser in Betonen und Mörteln ist mit dem bei 50 °C verdampfenden Wasser, welches manchmal als Kapillarporenwasser betrachtet wird, nicht gleichzusetzen, da bei der Trocknung Gel- und Kapillarporenwasser in einem etwa konstanten Verhältnis verdampft. Der nichtleitende Wassergehalt entspricht in etwa dem Gehalt an Gelporenwasser. Es erscheint sinnvoll zu prüfen, ob mit der Messung des spez. elektri-

Literatur

- [1] H. Klopfer, Bauphysikalische Aspekte für die Auswahl von Beschichtungen für Betonoberflächen, Korrosionsschutz für Stahl und Stahlbeton im Kraftwerksbau, VGB Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., Essen (1989).
- [2] H. Klopfer, Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin (1974).
- [3] T. C. Hansen, Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, Matériaux et Constructions, Vol. 19, No. 114 (1986), p. 423-436.
- [4] R. E. Oberholster, Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: status and prospects, 8th Int. Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 22 - 27 Sept. 1986, Vol. 4 (1986), p. 323-335.
- [5] E. Atlasi, Influence of cement type on the desorption isotherm of mortar, Nordic concrete research, The nordic concrete federation, Oslo, Publication No. 10 (1991), p. 25-36.
- [6] M. J. Setzer, Tieftemperaturverhalten und Mikrogefüge von Beton, Technologie und Anwendung der Baustoffe, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin (1992), S. 159-166.
- [7] R. K. Zimbelmann, Die Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein als Komponente des Betongefüges, Technologie und Anwendung der Baustoffe, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin (1992), S. 51-57.
- [8] Th. Keller, Aspekte der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 44 (1992), S. 826-831.
- [9] P. Catharin, H. Federspiel, Der elektrische Widerstand des Betons, Elektrotechnik und Maschinenbau, Vol. 89 (1972), H. 10, S. 399 - 407.
- [10] J. Höcker, K. J. Passmann, Ermittlung des Feuchtigkeitsgehaltes im Strassenbeton durch elektrische Widerstandsmessung, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, H. 122 (1971). Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Bonn.
- [11] W. J. McCarter, S. Garvin, Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 22 (1989), p. 1773- 1776.
- [12] F. Hunkeler, Der elektrische Widerstand von Mörtel und Beton, Schweizer Ingenieur und Architekt 1993, Heft 43 /93, Seite 767.
- [13] R. O. Müller, K. Holtzhauer, Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen – Langzeitbeständigkeit: Anodenmaterialien und Mörtel, Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bericht Nr. 503 (1992).
- [14] W. Studer, Erfahrungen der EMPA mit der Frostbeständigkeitsprüfung nach der Methode des kritischen Sättigungsgrades, Internationales Kolloquium «Frostbeständigkeit des Betons», 26./27. Juni 1980, Wien.
- [15] W. Studer, Porosität des Betons, EMPA-Bericht Nr. 10'747/1 (1979) und Nr. 10'747/2 (1984).
- [16] F. Hunkeler, The essentials for reinforced concrete monitoring – Particular emphasis on CP onset and future responses, International Conference on Structural Improvement through Corrosion Protection of Reinforced Concrete, London 2-3 June 1992.

schen Widerstandes eine neue Methode zur Charakterisierung der Porosität von Betonen und Mörteln gefunden werden könnte. Vermutlich liesse sich damit der Einfluss der Probengrösse eliminieren.

Der spezifische elektrische Widerstand von Mörteln und Betonen wird im wesentlichen durch die Zusammensetzung und das Alter (Hydratationsgrad) sowie von der davon abhängigen Struktur des Zementsteins und durch den Gehalt an elektrisch leitfähigem oder beweglichem Wasser beeinflusst. Er kann über mehrere Grössenordnungen variieren. Demgegenüber ist der spezifische elektrische Widerstand des leitfähigen Porenwassers nur wenig abhängig von der Mörtel- oder Betonfeuchtigkeit und beträgt bei jungen Mörteln in etwa 10 bis 20 Ωm , bei alten Betonen etwa 20 bis 30

Ωm . Er ist wesentlich höher als der Widerstand von wässrigen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösungen (1.2 bis 5 Ωm). Die strukturellen Gegebenheiten des Zementsteins und die auf das Wasser einwirkenden Adsorptions- und Kapillarkräfte sind wahrscheinlich im wesentlichen für den gegenüber wässrigen Lösungen höheren spez. Widerstand des Porenwassers verantwortlich.

Die Untersuchungen sollten vertieft und auf alte Mörtel und Betone ausgedehnt werden. Auch der Einfluss des Chloridgehaltes auf den spezifischen elektrischen Widerstand von Mörteln und Betonen und auf jenen des Porenwassers sollte im Hinblick auf deren Bedeutung für die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton genauer abgeklärt werden.

Die Autoren möchten sich beim Bundesamt für Strassenbau, welches die Forschungsprojekte «Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen» und «Handbuch – Die Praxis der Potentialmessung bei Stahlbetonbauwerken» finanziert hat und in deren Rahmen ein Teil der Arbeiten durchgeführt werden konnten, herzlich bedanken.

Ein weiterer Dank geht an die Mitarbeiter der TFB-Labors in Wildeggen für die Durchführung der Porositätsmessungen.

Adressen der Verfasser: Dr. F. Hunkeler, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, Seefeldstrasse 301, 8034 Zürich; und Dr. K. Holtzhauer, Techform Engineering AG, Hardhofstrasse 15, 8424 Embrach.