

Überprüfung der Aussagekraft des Wenner-Verfahrens zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beton

T 3262

T 3262

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

2011

ISBN 978-3-8167-8520-0

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

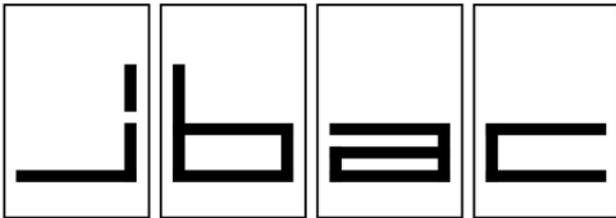
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

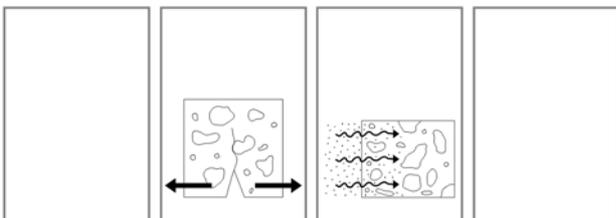
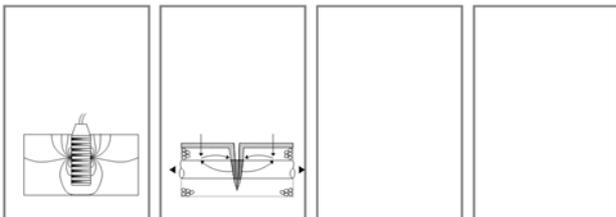
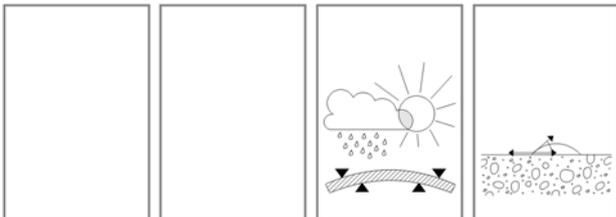
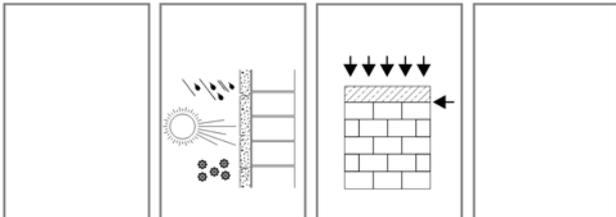
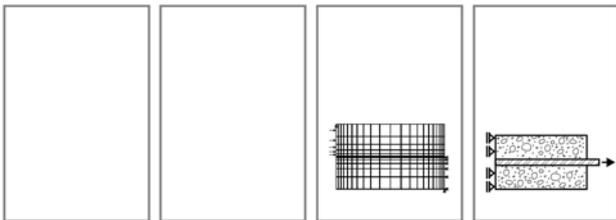
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN

FORSCHUNG · ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG · BERATUNG



Forschungsbericht F 7073

Überprüfung der Aussagekraft
des Wenner-Verfahrens zur
Bestimmung der Dichtigkeit
von Beton

Nz/Fk/Sc

2. Ausfertigung

THEMA

Überprüfung der Aussagekraft
des Wenner-Verfahrens zur
Bestimmung der Dichtigkeit
von Beton

- ABSCHLUSSBERICHT -

Forschungsbericht Nr.

F 7073
vom 03.05.2011

Projektbearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. C. Neunzig

Auftraggeber/Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin

Vertragsdatum/Auftragsbestätigung 01.12.2008

Ihr Aktenzeichen

ZP 52-5-7.293-1316/09

Dieser Bericht umfasst 46 Seiten, davon 35 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

| <u>INHALTSVERZEICHNIS</u> | | Seite |
|----------------------------------|--|--------------|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 | Allgemeines | 1 |
| 1.2 | Ziel des Forschungsvorhabens | 2 |
| 2 | LITERATURAUSWERTUNG | 2 |
| 3 | VORUNTERSUCHUNGEN..... | 3 |
| 4 | HAUPTUNTERSUCHUNGEN | 4 |
| 4.1 | Mischungskonzeption und Übersicht über das Prüfprogramm..... | 4 |
| 4.2 | Prüfungen an den Betonen | 5 |
| 4.3 | Prüfungen an Zementsteinen..... | 5 |
| 4.4 | Ausgangsstoffe | 5 |
| 4.4.1 | Bindemittel | 5 |
| 4.4.2 | Gesteinskörnung..... | 5 |
| 4.5 | Herstellung und Lagerung der Probekörper | 6 |
| 4.5.1 | Beton | 6 |
| 4.5.2 | Zementleime | 6 |
| 4.6 | Versuchsbeschreibungen | 7 |
| 4.6.1 | Prüfung des Elektrolytwiderstands..... | 7 |
| 4.6.1.1 | Wenner-Elektrode | 7 |
| 4.6.1.2 | Allgemeine Verfahrensbeschreibung | 7 |
| 4.6.1.3 | Versuchsdurchführung..... | 7 |
| 4.6.1.4 | Ermittlung von spezifischen Elektrolytwiderständen | 9 |
| 4.6.2 | Prüfung der Wasseraufnahme..... | 10 |
| 4.6.3 | Prüfung der Sauerstoffdiffusion..... | 11 |
| 4.6.4 | Bestimmung der Porengrößenverteilung | 13 |
| 4.6.5 | Durchführung der Prüfung zur Gewinnung von Porenwasser | 14 |

| <u>INHALTSVERZEICHNIS</u> | | Seite |
|----------------------------------|---|--------------|
| 4.7 | Ergebnisse der Prüfungen an den Betonen | 15 |
| 4.7.1 | Allgemeines | 15 |
| 4.7.2 | Elektrolytwiderstand | 15 |
| 4.7.3 | Wasseraufnahme | 16 |
| 4.7.4 | Gasdiffusion | 18 |
| 4.8 | Ergebnisse der Prüfungen an den Zementsteinen | 19 |
| 4.8.1 | Allgemeines | 19 |
| 4.8.2 | Porengrößenverteilung | 19 |
| 4.8.2.1 | Porenwasseranalyse | 21 |
| 5 | AUSWERTUNG UND INTERPRETATION | 21 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG | 29 |
| 7 | LITERATUR | 31 |
| | TABELLEN | A1-A5 |
| | BILDER | B1-B6 |

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Das sogenannte Wenner-Verfahren wurde ursprünglich zur Messung des Elektrolytwiderstandes von Böden konzipiert /Wen15/. Für dieses Einsatzgebiet existiert noch immer eine ASTM-Norm /AST06/. Zur Bestimmung des Elektrolytwiderstandes nach diesem Verfahren werden 4 in einer Reihe angeordnete Elektroden mit gleichen Abständen verwendet. Zwischen den beiden äußeren wird eine Spannung angelegt und der Spannungsabfall zwischen den beiden inneren Elektroden gemessen. Anhand des Spannungsabfalls kann der Elektrolytwiderstand berechnet werden. Das Verfahren wird bereits seit vielen Jahren auch für Beton angewendet, um z. B. die Gefahr einer Bewehrungskorrosion abzuschätzen. In älteren Quellen wurde empfohlen, die Elektroden über flache Bohrlöcher mit dem Beton in Kontakt zu bringen /Vas80, Fig85/. Als Ankopplungsmedium wurde eine wässrige Graphitsuspension empfohlen /Fig85/. Bei den heute gebräuchlichen Messgeräten werden die Elektroden i. d. R. auf die Betonoberfläche aufgesetzt. Zur Ankopplung wird ein Schaumstoff verwendet, der mit Wasser getränkt ist.

Im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen kann der Nachweis der Anrechenbarkeit von Betonzusatzstoffen nach dem sog. k-Wert-Konzept durch die Prüfung des Elektrolytwiderstands des Betons erfolgen. Dieser Nachweis wird geführt, wenn die Dichtigkeit des Betons nachgewiesen werden soll. Die Prüfung erfolgt an wassergelagerten Proben bei 20 °C, um auszuschließen, dass unterschiedliche Feuchten im Beton oder schwankende Temperaturen das Ergebnis verfälschen. Der Elektrolytwiderstand hängt jedoch neben der Dichtigkeit auch von der chemischen Zusammensetzung bzw. der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten ab. Im Inneren des Betons ist der Elektrolyt die Porenlösung. Die Leitfähigkeit der Porenlösung hängt von den Betonausgangsstoffen und dem w/z-Wert ab. Sie ist nicht proportional zur Dichtigkeit des Betons, sondern sinkt nicht-linear mit steigendem w/z-Wert. Hinzu kommt, dass bei Wasserlagerung insbesondere dann eine Verdünnung der Porenlösung und damit ein Absinken der Leitfähigkeit auftritt, wenn das Gefüge weniger dicht ist. Somit sind die Leitfähigkeit und die Dichtigkeit des Betons die beiden Einflussgrößen, die Auswirkungen auf den Elektrolytwiderstand haben. Es ist daher denkbar, dass sich diese beiden Einflussgrößen überlagern bzw. aufheben können.

Außerhalb des Betons ist der Elektrolyt das Wasser, mit dem der Schaumstoff zur Ankopplung getränkt wird. Üblicherweise wird hier Leitungswasser verwendet. Die Leitfähigkeit dieses Ankopplungsmediums hat ebenfalls großen Einfluss auf das Messergebnis. Taucht man beispielsweise den Schaumstoff in das Lagerungsbecken der Betonproben,

anstatt frisches Leitungswasser zu verwenden, so wird der gemessene Elektrolytwiderstand halbiert. Verwendet man deionisiertes Wasser, so ist kein Stromfluss mehr messbar. Einen ähnlich starken Einfluss hat der Anpressdruck. Diese Ergebnisse geben einen Anhaltspunkt dafür, wie groß der Einfluss der Elektrolytzusammensetzung auf das Messergebnis ist und wie fehleranfällig die Messmethode ist.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, zu überprüfen, inwieweit der Elektrolytwiderstand unterschiedlicher Betonrezepturen mit der Dichtigkeit des Betons korreliert. Wenn eine gute Korrelation festgestellt werden kann, so soll eine eindeutige Versuchsbeschreibung erstellt werden, die Messfehler, z. B. durch ungenügende Ankopplung ausschließt. Diese Versuchsbeschreibung soll erstellt werden, um sicherzustellen, dass der zu prüfende Beton und die Referenz immer gleich untersucht werden und auch die Ergebnisse verschiedener Laboratorien vergleichbar werden.

Vor diesem Hintergrund wurde das Institut für Bauforschung Aachen (ibac) vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragt, zu überprüfen, ob mit Hilfe des Wenner-Verfahrens eine Aussage über die Dichtigkeit von Beton getroffen werden kann.

Im Abschnitt 2 wird zunächst ein kurzer Überblick über die Literatur gegeben. Anschließend wird in Abschnitt 3 ein Resümee der Voruntersuchungen gezogen. Abschnitt 4.1 zeigt eine Übersicht der Mischungen. Die Abschnitte 4.2 und 4.3 zeigen die Prüfungen, die am Beton bzw. am Zementstein durchgeführt werden. Abschnitt 4.4 beschreibt die Ausgangsstoffe und Abschnitt 4.5 die Herstellung und Lagerung der Probekörper. In Abschnitt 4.6 werden die Versuchsmethoden detailliert beschrieben. Die Abschnitte 4.7 und 4.8 dienen der Darstellung der Versuchsergebnisse. Die Bewertung der Versuchsergebnisse erfolgt in Abschnitt 5. In Abschnitt 6 werden das Vorgehen und die Ergebnisse zusammengefasst.

2 LITERATURAUSWERTUNG

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand sind keine Untersuchungen bekannt, die sich mit der Überprüfung der Aussagekraft des Wenner-Verfahrens zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beton befassen.

Umfassende Untersuchungen mit dem Wenner-Verfahren wurden in /Geh00/ durchgeführt. Es konnte ein guter Zusammenhang zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten $D_{RCM,0}$ und dem spezifischen Elektrolytwiderstand $\rho_{WER,0}$ aufgezeigt werden. Zudem wird dargestellt, dass mit abnehmendem w/z_{eq} -Wert bei einer ansonsten identischen Betonmischung der spezifische Elektrolytwiderstand $\rho_{WER,0}$ steigt. Der Widerstand ändert sich zudem bei gleichem w/z_{eq} -Wert und unterschiedlichen Zementen bzw. durch die Zugabe von Flugasche erheblich.

In /New08/ werden Untersuchungen zum Einfluss der Kontaktflüssigkeit und des Anpressdruckes auf den elektrischen Widerstand von Beton dargestellt. Bei diesen Messungen gab es deutliche Unterschiede beim gemessenen Widerstand mit unterschiedlichen Kontaktflüssigkeiten. Es wurde ein anderer Versuchsaufbau als beim Wenner-Verfahren verwendet. Sowohl die Schwämme mit der Kontaktlösung als auch die Elektroden hatten die gleiche Fläche wie der Betonwürfel selbst. Der Widerstand wurde von einer Fläche zur gegenüberliegenden Fläche des Würfels gemessen.

Des Weiteren wird in /Fer06/ herausgestellt, dass sowohl die Temperatur als auch die Geometrie des Probekörpers einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben können.

In /Mcc09/ wird dargelegt, dass die Leitfähigkeit der Porenlösung im Beton großen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

3 VORUNTERSUCHUNGEN

Zur Überprüfung der Randbedingungen wurde in Vorversuchen an ca. vier Jahren alten wassergelagerten Betonwürfeln getestet, welche Auswirkungen der Anpressdruck und die Kontaktflüssigkeiten mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten haben. Die Spannweite der Kontaktflüssigkeiten lag in einem Bereich von etwa 50 bis ca. 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die verschiedenen Leitfähigkeiten wurden mit KOH-Lösungen eingestellt. Für jedes Wasser wurden neue Schaumstoffschwämme verwendet, die für 24 Stunden im jeweiligen Wasser gelagert wurden. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass es für diesen Bereich der Leitfähigkeiten keine signifikanten Unterschiede bei den Ergebnissen der Messungen gab. Das ist widersprüchlich zu den Untersuchungen von /New08/. In /New08/ wurde ein anderer Versuchsaufbau als beim Wenner-Verfahren verwendet. Die Kontaktfläche ist beim Wenner-Verfahren wesentlich kleiner und somit ist der Einfluss des Kontaktmediums geringer. Zur Überprüfung der eigenen Untersuchungen wurden an einer Vergleichsmischung mit Hüttensandanteil

im Alter von ca. 120 Tagen ebenfalls Wässer mit verschiedenen Leitfähigkeiten eingesetzt, um den Einfluss zu untersuchen. Auch hier konnten keine bedeutsamen Unterschiede festgestellt bzw. kein eindeutiger Trend erkannt werden. So lagen die gemessenen Werte des Elektrolytwiderstandes bei der Verwendung von deionisiertem Wasser bzw. Leitungswasser in einem Bereich von ca. 720 bis 730 Ωm . Bei der Verwendung der drei anderen Wässer wurden Werte von etwa 800 Ωm ermittelt.

Das verwendete Messgerät fordert einen Anpressdruck von mindestens 2,0 kg. In den Vorversuchen kam es durch eine weitere Steigerung des Anpressdrucks zu keiner Änderung der Messergebnisse.

4 HAUPTUNTERSUCHUNGEN

4.1 Mischungskonzeption und Übersicht über das Prüfprogramm

Um gut differenzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden Betonrezepturen nach Norm und Rezepturen mit sehr hohen Zusatzstoffgehalten oder hohen w/z-Werten verwendet. Die Rezepturen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Herstellung der Betone erfolgte im Zwangsmischer. Zunächst wurden Zement, Flugasche und Gesteinskörnung trocken angemischt. Nach der Wasserzugabe und ggf. der Zugabe von Silika-Slurry wurde – sofern notwendig – Fließmittel für eine Zielkonsistenz F4 nach DIN EN 206-1:2001-07 /DIN01/ zugegeben.

Tabelle 1: Übersicht der geplanten Mischungen

| Parameter | | Einheit | Mischungen | | | | | | |
|---------------------------|--------|-------------------|--------------|------|------------------|------|--------------|------|-------------|
| | | | M11 | M12 | M21 | M22 | M13 | M14 | M15 |
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Zement | Art | - | CEM I 42,5 R | | CEM III/A 32,5 N | | CEM I 42,5 R | | |
| | Gehalt | kg/m ³ | 300 | 300 | 300 | 300 | 240 | 180 | 270 |
| Zusatzstoff | Art | - | - | - | - | - | Flugasche | | Silikastaub |
| | Gehalt | kg/m ³ | - | - | - | - | 160 | 150 | 29,7 |
| Wassergehalt | | kg/m ³ | 150 | 210 | 150 | 210 | 152 | 171 | 180 |
| Gehalt an Gesteinskörnung | | kg/m ³ | 1950 | 1780 | 1950 | 1780 | 1820 | 1830 | 1860 |
| w/z _{eq} -Wert | | - | 0,50 | 0,70 | 0,50 | 0,70 | 0,56 | 0,84 | 0,60 |

Neben den Betonmischungen wurden äquivalente Zementleime hergestellt, die die gleiche Bindemittelzusammensetzung und denselben w/z-Wert aufwiesen wie die Betone.

4.2 Prüfungen an den Betonen

Zur Überprüfung der Aussagekraft des Wenner-Verfahrens wurden die 7 unterschiedlichen Betonrezepturen aus Tabelle 1 (s. Abschnitt 4.1) herangezogen. An diesen Betonen wurde der Elektrolytwiderstand im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen bestimmt. Die Proben wurden bis zur Prüfung bei 20 °C wassergelagert. Die Messung erfolgte jeweils diagonal an den Schalseiten von zwei 200 mm Würfeln. Zum Vergleich wurde die Dichtigkeit anhand der Wasseraufnahme unter Druck nach DIN 1048-5:1991-06 /DIN91/ und der Gasdiffusion in Anlehnung an /Bun91/ ermittelt. Auf die genaue Versuchsdurchführung wird später detailliert eingegangen.

4.3 Prüfungen an Zementsteinen

Zusätzlich zu den Betonversuchen wurden die Porengrößenverteilung mit der Quecksilberdruckporosimetrie und die Zusammensetzung der Porenlösung bestimmt. Für diese Untersuchungen wurden Zementsteinproben hergestellt, die analog zu den Betonproben bei 20 °C wassergelagert wurden. Die Wasser-Bindemittelverhältnisse der Zementsteinproben entsprechen den jeweiligen Betonen (vgl. Tabelle 1, Abschnitt 4.1), jedoch ist keine Gesteinskörnung enthalten. Diese Prüfungen wurden im Alter von 28 Tagen durchgeführt. Auf die genaue Versuchsdurchführung wird ebenfalls später detailliert eingegangen.

4.4 Ausgangsstoffe

4.4.1 Bindemittel

Bei den eingesetzten Zementen handelte es sich um einen Portlandzement (CEM I 42,5 R) und einen Hochofenzement (CEM III/A 32,5-N-LH). Die Zemente erfüllten die Anforderungen der DIN EN 197-1:2004-08 /DIN04/. Zudem wurde eine Flugasche nach DIN EN 450-1:2008-05 /DIN08a/ mit mittlerer Feinheit gewählt. Außerdem wurde ein Silikastaub, der als Silika-Slurry zugegeben wurde, nach DIN EN13263-1:2009-07 /DIN09a/ verwendet. Die chemischen Zusammensetzungen der Zemente, der Flugasche und des Silikastaubes sind in Tabelle A1, Anhang A, angegeben. Die physikalischen Eigenschaften der Bindemittel enthält Tabelle A2, Anhang A.

4.4.2 Gesteinskörnung

Für die Untersuchungen an Beton wurden quarzitischer Rheinkies und -sand gemäß DIN EN 12620:2008-07 /DIN08b/ und DIN 1045-2:2008-08 /DIN08c/ verwendet. Die Sieblinie lag im Bereich A/B16 gemäß DIN 1045-2:2008-08 /DIN08c/.

4.5 Herstellung und Lagerung der Probekörper

4.5.1 Beton

Die Temperatur des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraumes und der Ausgangsstoffe betrug während der Herstellung 18 bis 22 °C. Das Mischen der Ausgangsstoffe Wasser, Zement, Flugasche, Silika-Slurry und Gesteinskörnung erfolgte in einem Zwangsmischer mit einem Nennvolumen von 40 Litern. Zunächst wurden je nach Mischung Zement, Flugasche und Gesteinskörnung trocken vorgemischt, danach das Wasser und ggf. Silika-Slurry zugegeben. Die Mischzeit betrug zwei Minuten. Lag das Ausbreitmaß unter 490 mm, so wurde ein Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis nachdosiert und erneut 1 bis 2 Minuten gemischt. Am Frischbeton wurden das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2009-08 /DIN09b/, der Luftporengehalt nach DIN EN 12350-7:2009-08 /DIN09c/ und die Frischbetonrohichte nach DIN EN 12350-6:2009-08 /DIN09d/ bestimmt. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in der Tabelle A3, Anhang A, aufgeführt.

Die Herstellung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2:2009-08 /DIN09e/. Die Probekörper lagerten bis zum Ausschalen im Alter von 24 Stunden in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte ≥ 95 %. Anschließend wurden die Probekörper unter Wasser bei 20 °C vorgelagert und im Anschluss entweder im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte (20/65) nach DIN 50014:1985-07 /DIN85/ bzw. weiter unter Wasser gelagert. Die Länge der Vorlagerung ist bei den einzelnen Prüfungen angegeben.

4.5.2 Zementleime

Die Herstellung der Zementleime erfolgte analog zu DIN EN 196-1:2005-05 /DIN05a/ im Mörtelmischer. Direkt nach dem Mischen wurden die Zementleime in PE-Flaschen mit einem Volumen von 250 ml bzw. 100 ml abgefüllt. Die Flaschen wurden mit Gummistopfen verschlossen, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Lufteinschlüsse auftraten. Anschließend wurden die Flaschen 24 Stunden über Kopf rotiert, um ein Entmischen zu ver-

hindern. Nach 2 Tagen wurden die Zementleime aus den PE-Flaschen ausgeschalt und bis zum Prüfalter von 28 Tagen bei 20 °C im Wasser gelagert.

4.6 Versuchsbeschreibungen

4.6.1 Prüfung des Elektrolytwiderstands

4.6.1.1 Wenner-Elektrode

4.6.1.2 Allgemeine Verfahrensbeschreibung

Die Wenner-Elektrode, auch Wenner-Sonde genannt, ist ein Messgerät, welches die direkte Bestimmung des spezifischen Elektrolytwiderstandes an der Oberfläche des Betons erlaubt. Dazu wird ein Elektrodenquartett, wie in Bild 1 illustriert, auf eine glatt geschaltete Betonoberfläche aufgesetzt.

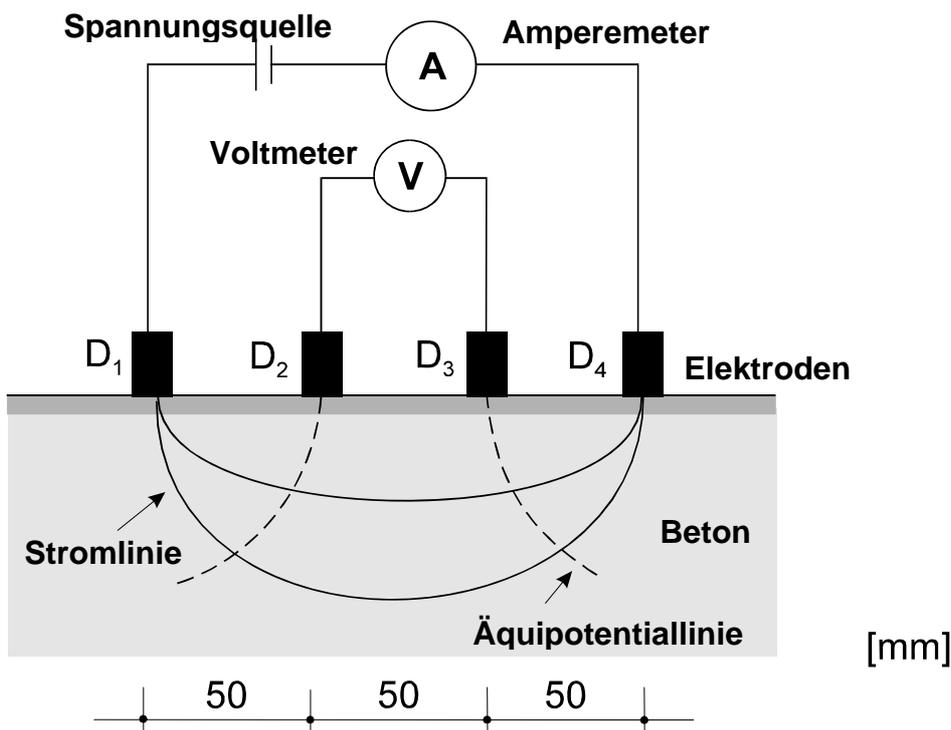


Bild 1: Prinzipskizze der Wenner-Elektrode

4.6.1.3 Versuchsdurchführung

Die Elektrolytwiderstandsmessungen werden standardisiert an ständig wassergelagerten Prüfkörperwürfeln ($T = 20\text{ °C}$) mit den Abmessungen $h = b = l = 200\text{ mm}$, wie in den fol-

genden Bildern 2 und 3 dargestellt, durchgeführt, um auszuschließen, dass unterschiedliche Feuchten im Beton oder schwankende Temperaturen das Ergebnis verfälschen.

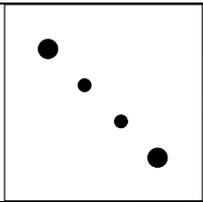
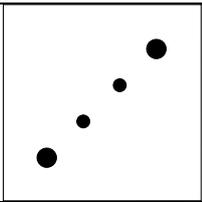
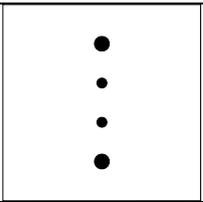
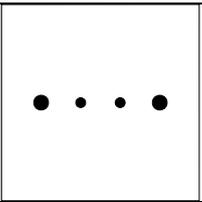
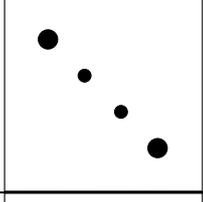
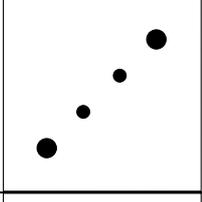
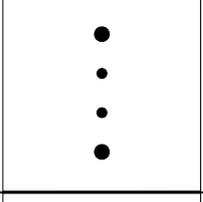
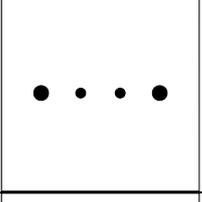
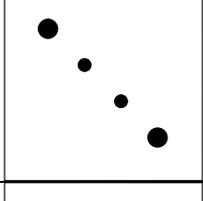
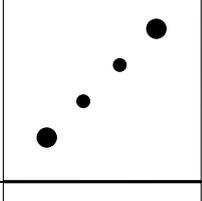
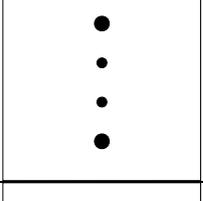
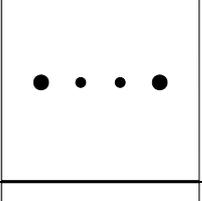
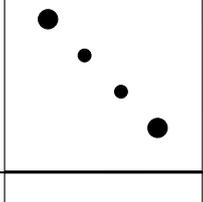
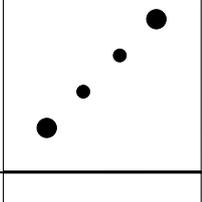
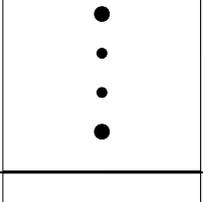
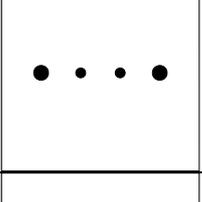
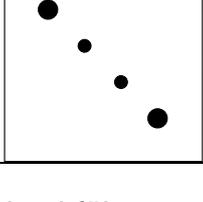
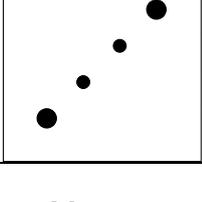
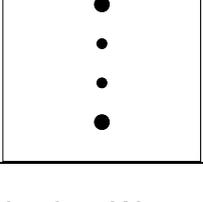
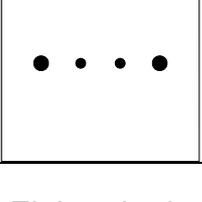
| Zu messende Seite: | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 |
|---------------------------|---|---|--|---|
| Beschriftete Seite (oben) |  |  |  |  |
| nach hinten drehen |  |  |  |  |
| nach hinten drehen |  |  |  |  |
| nach hinten drehen |  |  |  |  |
| nach links/rechts drehen |  |  |  |  |

Bild 2: Versuchsdurchführung der Messung mit der Wenner-Elektrode bei einer Würfelkantenlänge von 200 mm

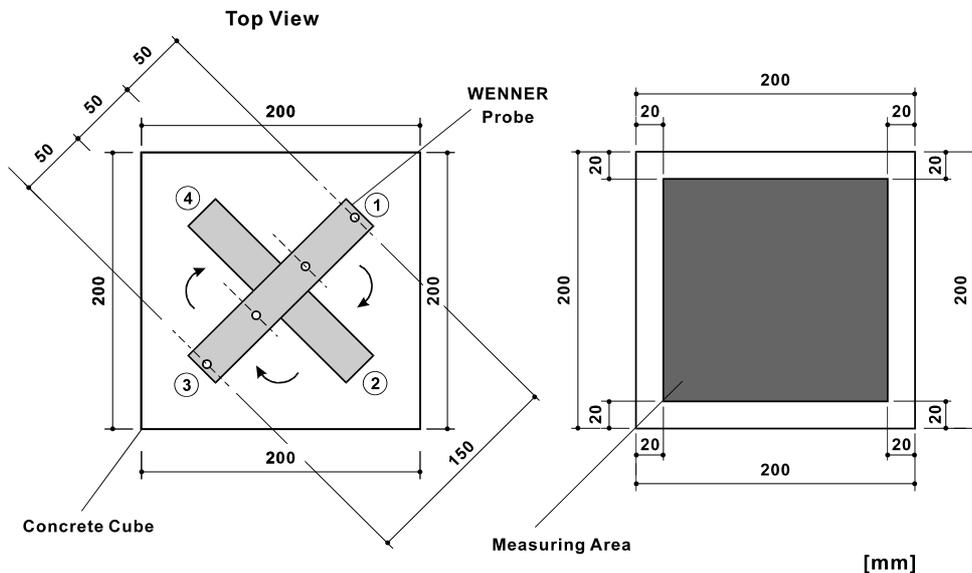


Bild 3: Versuchsdurchführung der Messung mit der Wenner-Elektrode bei einer Würfelmesslänge von 200 mm /Geh00/

4.6.1.4 Ermittlung von spezifischen Elektrolytwiderständen

Die Ermittlung des spezifischen Elektrolytwiderstandes erfolgt nach Gleichung (1). In allen kommerziell angebotenen Geräten wird diese Umrechnung automatisch durchgeführt. Der angezeigte Messwert ist daher bereits ein spezifischer Elektrolytwiderstand.

$$\rho_{\text{WER},0} = k \cdot \frac{U}{I} \quad (1)$$

mit:

$\rho_{\text{WER},0}$: spezifischer Elektrolytwiderstand (WER) in [Ωm]

k: Zellkonstante, in diesem Fall $k = 2 \cdot \pi \cdot a = 0,314$ [-]

a: Abstand der Einzelelektroden der Wenner-Elektrode in [m]; hier: 0,050 m

U: Potentialabfall gemessen zwischen den beiden Spannungs-Elektrodenpaaren (D_1, D_4) [V]

I: Wechselstrom zwischen den beiden Strom-Elektrodenpaaren (D_2, D_3) [A]

Der Elektrolytwiderstand wurde nach dem Wenner-Verfahren (Vier-Elektroden-Methode) gemessen. Dabei wurden alle fünf Schalseiten eines Würfels mit 200 mm Kantenlänge diagonal und parallel zu den Rändern (in der Mitte des Würfels) geprüft, so dass jeweils

20 Messwerte vorlagen, die gemittelt wurden. Die Herstellung des Betons erfolgte nach Abschnitt 4.5. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper unter Wasser bei 20 °C gelagert. Die Prüfung erfolgte im Alter von 7, 14, 28, und 56 Tagen.

4.6.2 Prüfung der Wasseraufnahme

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Die Betonherstellung erfolgte nach Abschnitt 4.5. Nach dem Ausschalen lagerten die Probekörper bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser. Anschließend erfolgte die Lagerung im Normklima 20/65. Eine Woche vor dem Prüftermin wurde aus dem Probewürfel ein Bohrkern mit 80 mm Durchmesser gezogen und in Scheiben mit einer Dicke von jeweils 40 mm gesägt. Die Stirnseiten der Bohrkern wurden verworfen. Auf diese Weise wurden je Beton drei Betonscheiben hergestellt, die weiter im Normklima 20/65 gelagert wurden. Um Gefügeschädigungen wie z. B. Risse durch Trocknungsschwinden zu vermeiden, wurden die Proben entgegen der Vorgehensweise in /Bun91/ vor der Wasseraufnahme **nicht** getrocknet. Die Prüfung erfolgte im Alter von 28 Tagen. Vor Prüfbeginn wurden die Scheiben gewogen.

Bestimmt wurde zunächst die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (W_A). Hierzu wurden die Betonscheiben zunächst eine Stunde bis zur Hälfte und anschließend vollständig mit Wasser bedeckt unter Atmosphärendruck gelagert (Überdeckung: rd. 20 mm). Die Lagerung erfolgte so lange, bis Massenkonstanz erreicht war. Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wurde nach Abschluss der Prüfungen nach Gleichung (2) berechnet:

$$W_A = \frac{m_A - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad (2)$$

mit:

W_A : Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck in M.-%

m_A : Masse des Prüfkörpers bei Massenkonstanz in g

m_d : Masse des Prüfkörpers nach Trocknung bei 105°C in g

Die nassen Proben wurden anschließend in einen wassergefüllten Drucktopf gelegt und 24 Stunden einem Druck von 150 bar ausgesetzt, um die Wasseraufnahme unter Druck ($W_{150\text{bar}}$) gemäß Gleichung (3) zu bestimmen.

$$W_{150\text{bar}} = \frac{m_{150\text{bar}} - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad (3)$$

mit:

$W_{150\text{bar}}$: Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar in M.-%

$m_{150\text{bar}}$: Masse des Prüfkörpers nach 24 Stunden im Drucktopf in g

Im Anschluss wurden die Proben bis zur Massenkonstanz bei 105 °C getrocknet, um m_d zu bestimmen.

Neben der Wasseraufnahme kann anhand der festgestellten Massen der kapillare Sättigungsgrad der Proben nach Gleichung (4) ermittelt werden. Der Sättigungsgrad gibt an, welcher Anteil der prinzipiell aufnehmbaren Wassermenge in der Probe enthalten ist.

$$S = \frac{m_i - m_d}{m_{150\text{bar}} - m_d} \quad (4)$$

mit:

S: Sättigungsgrad

m_i : Masse der Probe im Zustand i in g;

der Sättigungsgrad bei Lagerung im Normklima ergibt sich z. B. durch $m_i = m_{20/65}$

4.6.3 Prüfung der Gasdiffusion

Für die Bestimmung der Gasdiffusion wurde Sauerstoff als Prüfmedium verwendet, da sich dieses Gas gegenüber Beton weitgehend inert verhält. Bei der Diffusion erfolgt der Gasstrom durch die Probe aufgrund eines Konzentrationsgefälles. Zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten wurde die Probe von oben mit Stickstoff und von unten mit Sauerstoff beaufschlagt. Die Gase strömen jeweils mit einem geregelten Volumenstrom über die Oberflächen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Druck auf beiden Seiten identisch ist. Die Prüfung wird über einen Zeitraum von 2 Stunden durchgeführt, wobei jeweils nach einer halben Stunde der Volumenstrom des Stickstoffs und die Sauerstoffkonzentration im Stickstoff bestimmt wurde, um zu prüfen, ob sich ein Gleichgewicht einstellt. Der Diffusionskoeffizient wurde dann nach Gleichung (5) berechnet.

$$D = \frac{Q_V \cdot d}{A} \cdot \frac{\Delta c}{c_{O_2} - \Delta c} \quad (5)$$

mit:

D: Gasdiffusionskoeffizient in m²/s

Q_V: Stickstoffstrom in m³/s

d: Dicke des Prüfkörpers in m

Δc: Anstieg der O₂-Konzentration im Stickstoffgas in Vol.-%

c_{O₂}: Ausgangskonzentration des Sauerstoffgases, hier c_{O₂} = 100 Vol.-%

Für die Durchführung der Messungen wurde der Beton gemäß Abschnitt 4.5 hergestellt. Da die Streuungen der Ergebnisse bei den Untersuchungen erfahrungsgemäß sehr gering ausfallen (10 bis 15 %), wurde bei den Mischungen M13 bis M15 sowie M21 und M22 pro Betonmischung ein Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm hergestellt, nach einem Tag ausgeschalt und bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser gelagert. Im Alter von 7 Tagen wurden aus diesem Zylinder jeweils vier Scheiben mit einer Dicke von rd. 30 mm herausgesägt, wobei die Stirnflächen verworfen wurden. Anschließend wurden die gesägten Scheiben bis zum Prüftermin weiterhin in Wasser gelagert. Die Trocknung erfolgte im Vakuumschrank bei 60 °C bis zur Massekonstanz. An jedem Prüftermin wurde jeweils eine Scheibe pro Mischung geprüft.

Zur Absicherung der geringen Streuungen wurden bei den Mischungen M11 und M12 je Betonmischung zwei Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm hergestellt. Das Probenhandling erfolgte analog zu der ersten Herstellungsserie. Im Alter von 7 Tagen wurden aus beiden Zylindern jeweils vier Scheiben mit einer Dicke von rd. 30 mm herausgesägt, wobei die Stirnflächen ebenfalls verworfen wurden. An jedem Prüftermin wurden jeweils zwei Scheiben pro Mischung geprüft.

Die Diffusionsmessungen wurden mit der Prü fzelle, die in Bild 4 schematisch dargestellt ist, durchgeführt.

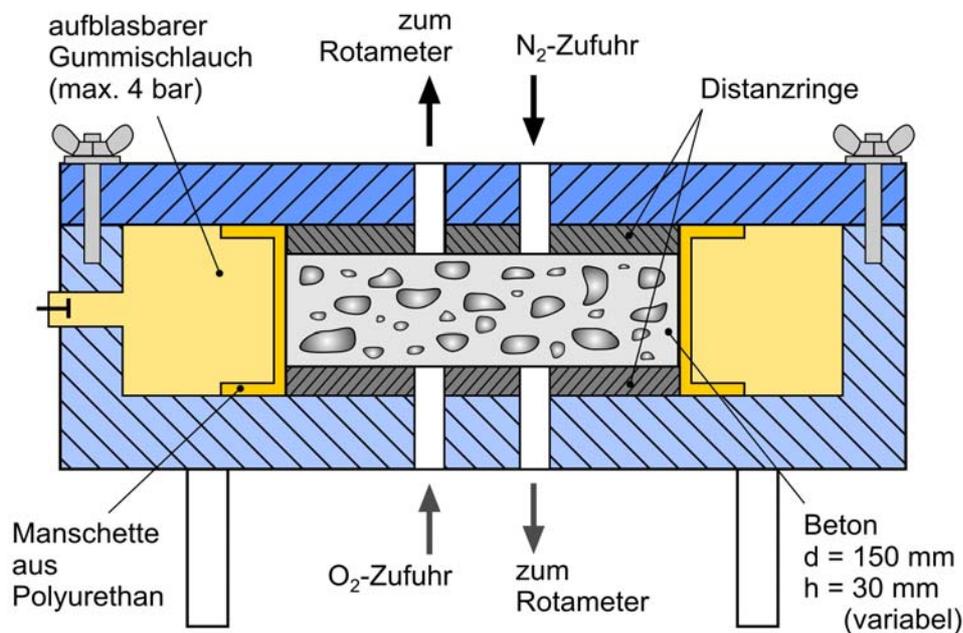


Bild 4: Schematische Versuchsanordnung für die Ermittlung des Diffusionskoeffizienten

4.6.4 Bestimmung der Porengrößenverteilung

Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung wurde die Quecksilberdruckporosimetrie angewendet. Dieses Verfahren beruht auf dem Prinzip, dass Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit nur unter äußerem Druck in die offenen Poren von Zementstein eindringt. Unter der vereinfachenden Annahme von zylinderförmigen Poren wird aus dem Druck, der zur Quecksilberaufnahme führt, der Porendurchmesser berechnet. Dabei gehen die Oberflächenspannung des Quecksilbers ($\sigma = 0,485 \text{ N/m}$) und der Kontaktwinkel Quecksilber/Prüfkörperoberfläche in die Berechnung ein. Der Kontaktwinkel wurde zu $\varphi = 130^\circ$ gewählt. Aus der quantitativen Quecksilber-Aufnahme der Probe in Abhängigkeit des aufgetragenen Drucks wird die Porengrößenverteilung berechnet. Als charakteristischer Kennwert wurde aus den Messkurven der Medianradius bestimmt. Der volumenbezogene Medianradius ist der Radius, bei dem 50 % des Gesamtintrusionsvolumens eingedrungen ist. Neben der Porengrößenverteilung werden Dichte, Rohdichte, Gesamtporosität und Porenoberfläche festgestellt. Diese Werte sind jedoch sehr ungenau und nicht repräsentativ für den Beton, da durch das Aussortieren der groben Gesteinskörnung bei der Probenvorbereitung eine Beeinflussung der Ergebnisse vorgenommen wird.

Die Proben wurden aus Zementstein gewonnen. Die Herstellung und Lagerung der Proben erfolgte daher wie im Abschnitt 4.5 beschrieben. Vor der Durchführung der Quecksilberdruckporosimetrie wurden die Proben bei 60 °C im Vakuum bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Probemenge betrug ca. 2 bis 5 g.

4.6.5 Durchführung der Prüfung zur Gewinnung von Porenwasser

Die Porenwasseranalyse wurde an Zementstein durchgeführt. Die Zementsteine weisen die gleichen Bindemittelgehalte und den selben äquivalenten w/z-Wert auf wie die Betone (vgl. Tabelle 1, Abschnitt 4.1).

Zum Prüftermin wurde die Probe aus dem Lagerungsbecken entnommen. Die Probe wurde anschließend gewogen und in die Auspressvorrichtung (s. Bild 5) eingebaut.

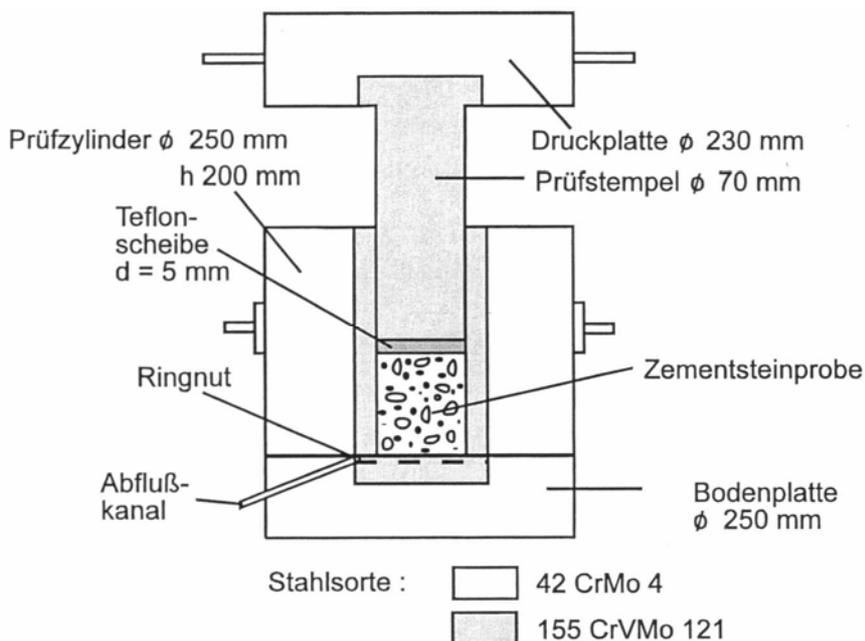


Bild 5: Prüfeinrichtung zum Auspressen der Porenlösung

Das Auspressen der Porenlösung erfolgte bei einer maximalen Laststufe von 2000 kN und einer Belastungsgeschwindigkeit von 2 kN/s. Nach Erreichen der Höchstlast wurde der Druck aufrecht erhalten, bis keine Porenlösung mehr austrat. Die Flaschen zum Abfüllen der Porenlösung wurden mit Stickstoffgas gefüllt, um eine Karbonatisierung der Lösung zu

verhindern. Nach Abschluss des Auspressvorgangs wurde die Probe ausgebaut und erneut gewogen.

4.7 Ergebnisse der Prüfungen an den Betonen

4.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden alle Betonrezepturen betrachtet. An den Betonen wurden der Elektrolytwiderstand mittels Wenner-Sonde, die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Druck von 150 bar sowie die Sauerstoffdiffusion untersucht.

4.7.2 Elektrolytwiderstand

Der Elektrolytwiderstand wurde nach Abschnitt 4.6.1 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A4, Anhang A, zusammengestellt und in Bild 6 graphisch dargestellt. Bei allen Mischungen zeigte sich, dass der Elektrolytwiderstand mit dem Alter ansteigt. Die Mischung M21 mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,5 weist i. d. R. die höchsten Widerstände auf. Lediglich nach 28 Tagen liegt die Mischung M15, die Silikastaub enthält, auf einem ähnlichen Niveau. Auffallend ist der verhältnismäßig starke Anstieg der Mischung M13 nach 28 bzw. 56 Tagen im Vergleich zu 7 bzw. 28 Tagen. Bei der Mischung M14, die wie M13 ebenfalls Flugasche enthält, jedoch einen höheren w/z_{eq} -Wert hat, ist der relative Anstieg geringer. Die Mischung M22 zeigt während des Untersuchungszeitraums einen relativ starken Anstieg des Elektrolytwiderstandes. Bei den Mischungen M11 und M12 ist ein Anstieg des Elektrolytwiderstandes zu erkennen, der im Vergleich mit den anderen Mischung weniger stark ausgeprägt ist.

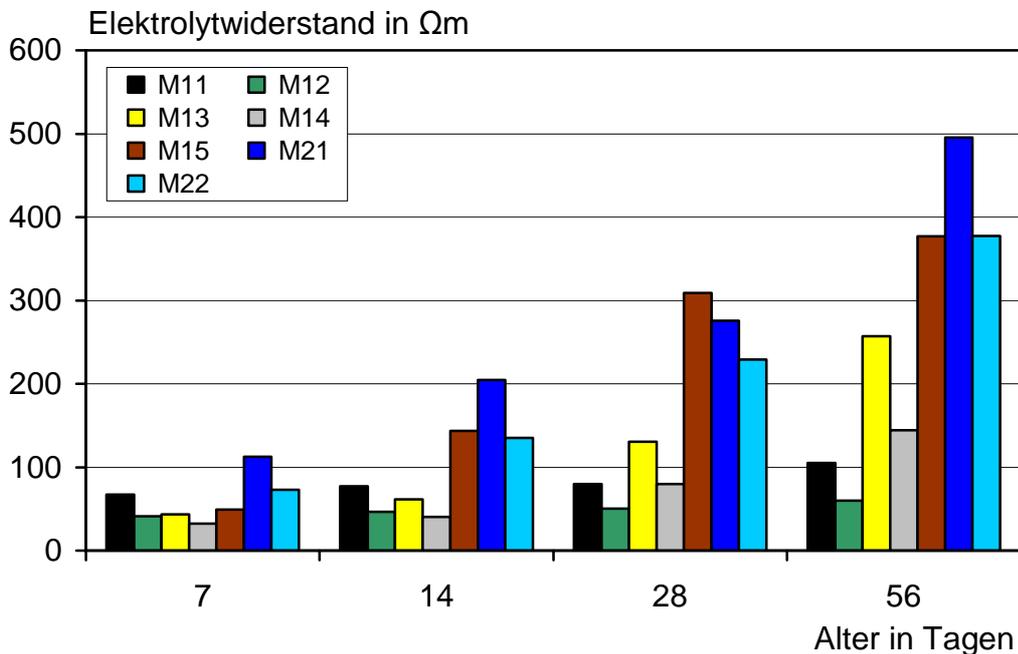


Bild 6: Elektrolytwiderstände der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen

4.7.3 Wasseraufnahme

Die Prüfungen zur Wasseraufnahme sind in Abschnitt 4.6.2 beschrieben. Die ermittelten Werte für die Wasseraufnahme unter den verschiedenen Randbedingungen sowie die Sättigungsgrade im Alter von 28 Tagen sind in Tabelle A5, Anhang A, zusammengestellt. Die Bilder 7 und 8 zeigen die Ergebnisse graphisch. Die Betone mit dem geringsten w/z_{eq} -Wert von 0,5 (M11 und M21) weisen die geringsten Wasseraufnahmen auf. Für alle Betone zeigt sich, dass die Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar, wie zu erwarten, höher liegt als unter Atmosphärendruck. Die Betone mit den höchsten w/z_{eq} -Werten (M12, M14 und M22) weisen, mit Ausnahme der Mischung M15, die Silikastaub enthält, die höchsten Wasseraufnahmen auf. Der Einfluss der Flugasche ist im geprüften Alter von 28 Tagen noch nicht festzustellen.

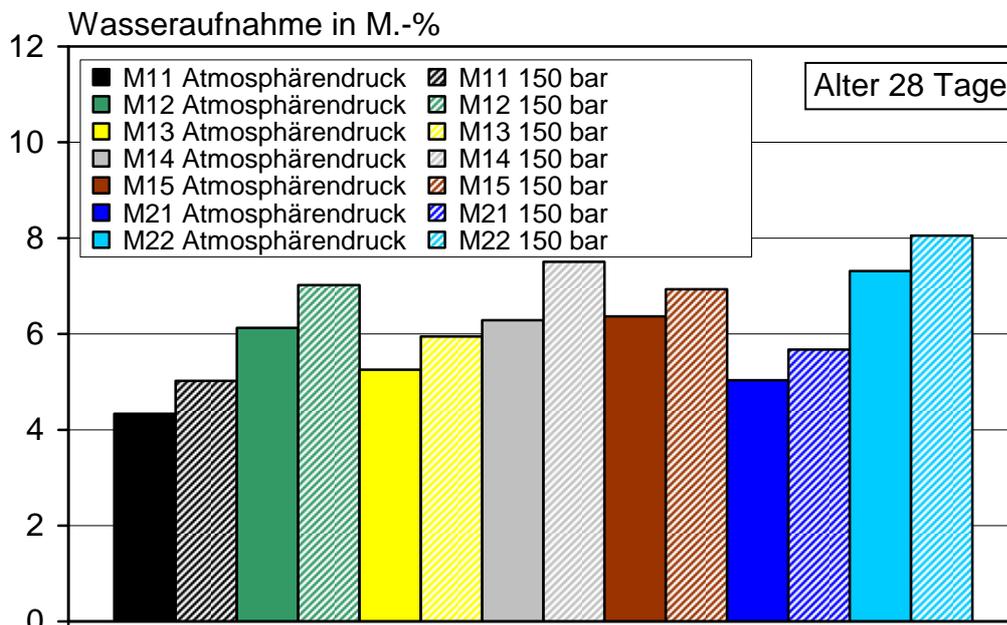


Bild 7: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Druck von 150 bar der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Beim Sättigungsgrad S nach 28 Tagen weist die Mischung M15 den höchsten Wert auf. Die flugaschehaltige Mischung M14 dagegen den geringsten. Die Mischungen M11 und M21 (w/z_{eq} -Wert von 0,5) liegen unterhalb der Mischungen mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,7 (M12 und M22). Die M13 weist annähernd den gleichen Sättigungsgrad wie die Mischung M21 auf.

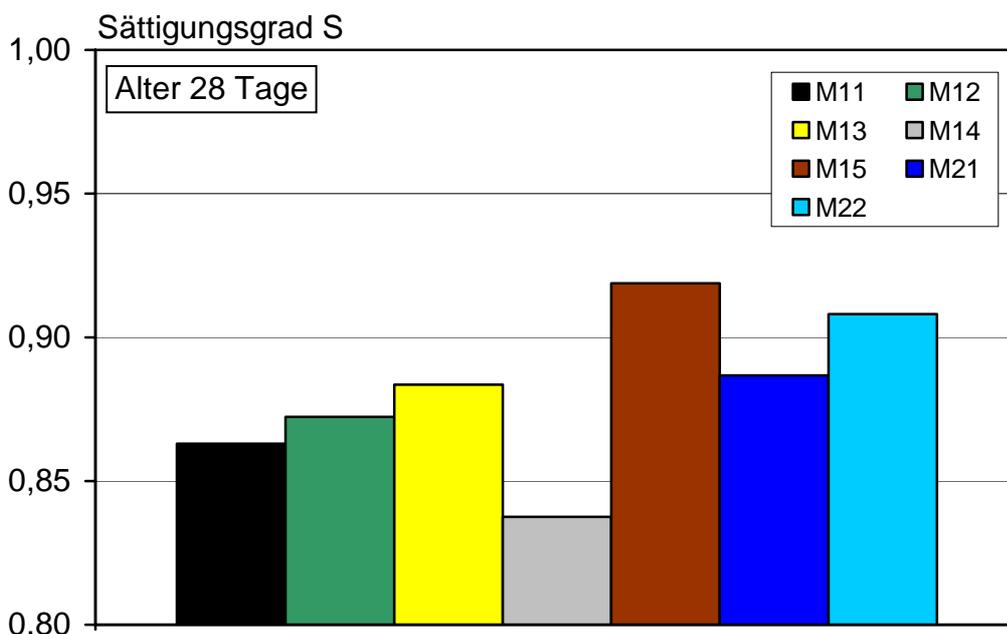


Bild 8: Sättigungsgrad s der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

4.7.4 Gasdiffusion

Die Prüfung zur Bestimmung des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten D_{eff} ist in Abschnitt 4.6.3 beschrieben. Die Tabelle A6, Anhang A, fasst die Ergebnisse zusammen. Eine grafische Darstellung ist im folgenden Bild 9 gegeben. Einen besonders starken Abfall zeigt die flugaschehaltige Mischung M14, wobei der Ausgangspunkt des Diffusionskoeffizienten nach 7 Tagen relativ hoch ist. Die Mischung M13, die ebenfalls Flugasche enthält, zeigt einen starken Abfall. Jedoch ist der Ausgangswert deutlich niedriger als bei M14. Sowohl M13 als auch M14 weisen nach 56 Tagen verglichen mit dem Ergebnis nach 7 Tagen einen Diffusionskoeffizienten von 1/3 auf. Bei den Mischungen M11 und M12 sinken die Diffusionskoeffizienten im gleichen Zeitraum um ca. 25 bis 30 %. Bei den Mischungen M21 und M22 sinken die Diffusionskoeffizienten um etwa 50 %. Tendenziell ist bei allen Mischungen, wie zu erwarten, ein Abfall des Diffusionskoeffizienten mit zunehmendem Alter festzustellen. Allerdings steigt bei der Mischung M15, die Silkastaub enthält, der Wert nach 56 Tagen verglichen mit 28 Tagen wieder an und befindet sich knapp unter dem Niveau der Messung im Alter von 14 Tagen. Somit kann keine abschließende Aussage über den Abfall des Diffusionskoeffizientens über die Zeit getroffen werden. Bei einer Kontrollmessung wurde dieser Wert bestätigt. Auffällig ist zudem, dass der 14-Tage-Wert der Mischung M21 der Höchste der Prüfreihe ist. Hier wurde ebenfalls eine Kontrollmessung durchgeführt, die wieder zu dem gleichen Ergebnis führte. Bei der Mischung M22 liegt der Wert nach 56 Tagen etwas über dem Wert nach 28 Tagen. Wie bei den beiden anderen Fällen wurde ebenfalls eine Kontrollmessung durchgeführt. Eine Erklärung gibt es in den drei Fällen zum jetzigen Zeitpunkt nicht. Die Streuungen der Ergebnisse bei den Wiederholungsserien (vgl. Abschnitte 4.6.3 und 4.7.1) lagen unter 15 %.

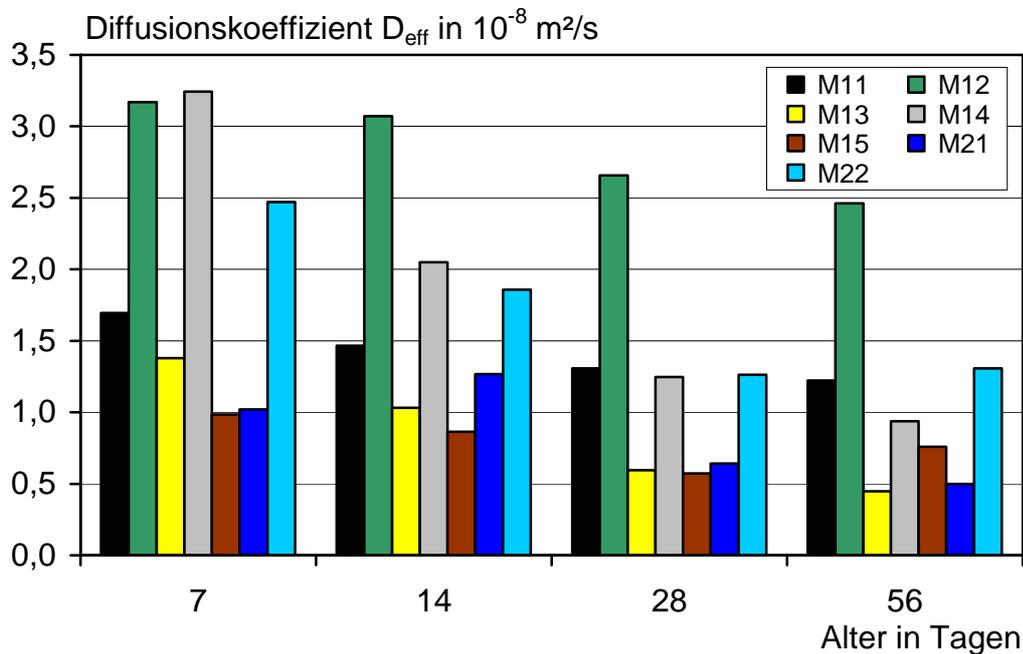


Bild 9: Diffusionskoeffizienten der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen

4.8 Ergebnisse der Prüfungen an den Zementsteinen

4.8.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden alle den Betonen zugehörigen Zementsteine betrachtet. An den Zementsteinen wurden jeweils eine Quecksilberdruckporosimetrie und eine Porenwasseranalyse durchgeführt.

4.8.2 Porengrößenverteilung

Die Porengrößenverteilung wurde gemäß Abschnitt 4.6.4 mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Die Bilder 10 und 11 zeigen die inkrementellen und kumulativen Porengrößenverteilungen der Betone. Die Medianradien sind in Tabelle A7, Anhang A, angegeben und in Bild 12 dargestellt. Tabelle A8, Anhang A, zeigt die Porositäten der Zementsteine M11 bis M22.

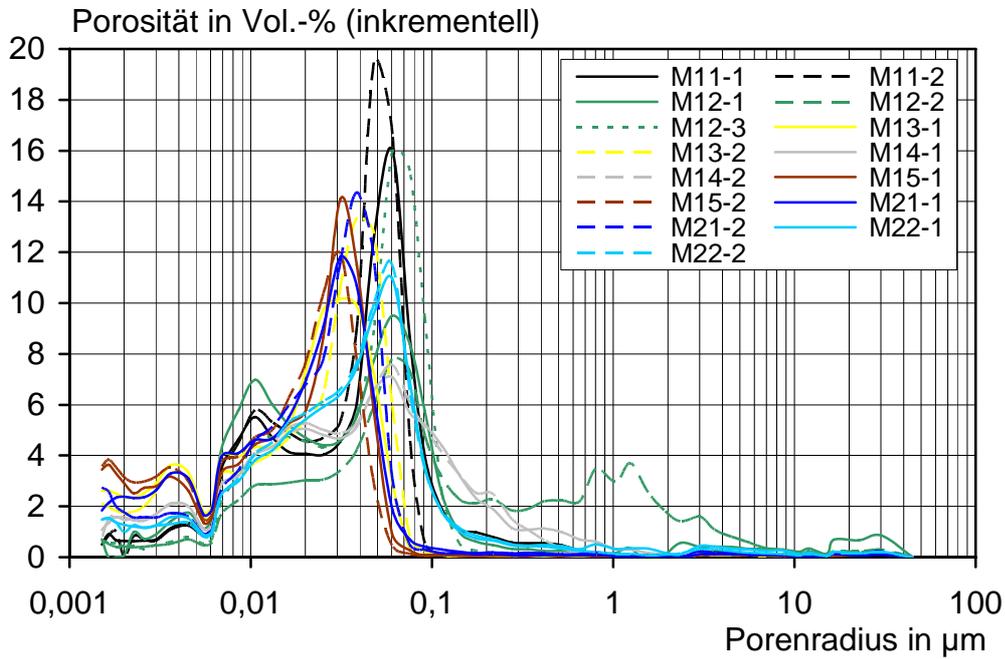


Bild 10: Inkrementelle Porengrößenverteilungen der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

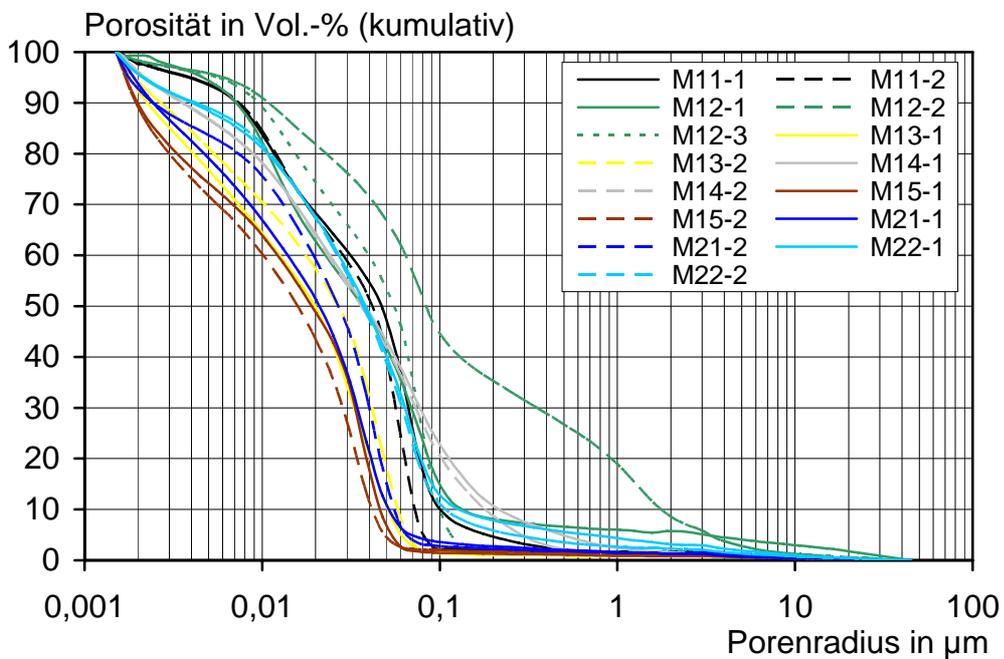


Bild 11: Kumulative Porengrößenverteilungen der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

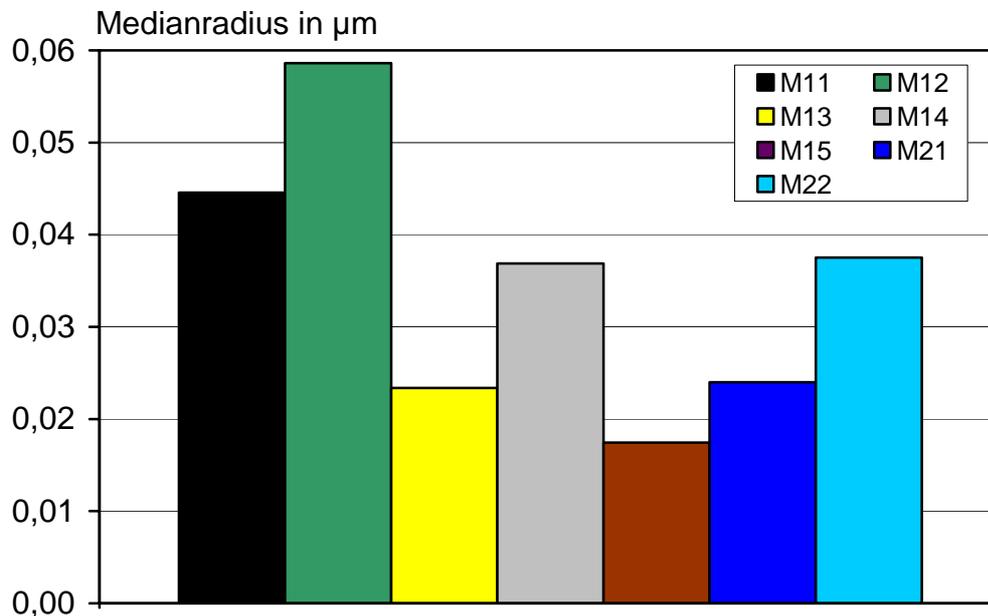


Bild 12: Medianradien der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

4.8.2.1 Porenwasseranalyse

An der ausgepressten Porenlösung (vgl. Abschnitt 4.6.5) wurden direkt der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Der pH-Wert wurde mit der pH-Elektrode bestimmt. Anschließend wurde die auspresste Porenlösung mit deionisiertem Wasser auf ein Gesamtvolumen von 100 ml aufgefüllt, um ausreichend Probemenge für die weiteren Analysen zu erhalten. An der verdünnten Probe wurden folgende Parameter bestimmt: Natrium, Kalium, Calcium, Chlorid, Sulfat und Nitrat. Der Chlorid- und Sulfatgehalt wurden mit dem Ionenchromatographen gemessen, die Alkaligehalte und der Calciumgehalt wurden mit dem Flammenphotometer bestimmt, und die Analyse der Spurenelemente erfolgte mit ICP-OES. Die Analyseergebnisse wurden anschließend entsprechend der Verdünnung hochgerechnet. Die Säurekapazität $K_{S4,3}$ wurde gemäß DIN 38409-7:2005-12 /DIN05b/ bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A9 zusammengestellt.

5 AUSWERTUNG UND INTERPRETATION

Sowohl der Diffusionskoeffizient D_{eff} als auch der Medianradius liefern eine Aussage über die Dichtigkeit des Betons bzw. des Zementsteins. In Bild 13 ist der Diffusionskoeffizient D_{eff} über den Medianradius für alle Mischungen im Alter von 28 Tagen aufgetragen. Hier ist zu erkennen, dass sich zwischen Medianradien, die mittels Quecksilberdruckporosimetrie er-

mittelt worden, und dem Diffusionskoeffizient D_{eff} , der mittels Sauerstoffdiffusion am Beton bestimmt wurde, eine gute Korrelation finden lässt. Je höher der Diffusionskoeffizient D_{eff} , desto höher ist ebenfalls der zugehörige Medianradius. Die Mischung M15 mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,60 weist das dichteste Gefüge auf. Obwohl der w/z_{eq} -Wert der Mischungen M11 und M21 mit 0,5 geringer ist als bei der Mischung M15, weisen diese Betone eine geringere Dichtigkeit auf. Die Dichtigkeit der Mischung M11 ist noch deutlich geringer als die der Mischung M21. Bei den Mischungen mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,7 (M12 und M22) ist eine ähnliches Verhältnis zu erkennen, wie bei den Mischungen M11 und M21. Jedoch sind die Absolutwerte deutlich höher. Die Mischungen M13 und M14 enthalten Flugasche, deren puzzolanische Wirksamkeit i. d. R. erst nach 28 Tagen bemerkbar ist. Somit ist bei dem Vergleich nach 28 Tagen noch nicht mit einer signifikanten Auswirkung der Flugasche zu rechnen. Die Mischung M15 hat einen maximal zulässigen Silikastaub-Anteil von 11 M.-% vom Zementgehalt. Durch die nanofeinen Silikastaub-Partikel kommt zur Ausbildung einer dichten Struktur, die im vorliegenden Fall den höheren w/z_{eq} -Wert kompensiert. Da die Blaine-Werte der Zemente sehr eng zusammen liegen (vgl. Tabelle A2), ist der Einfluss des Zementtyps auf die Dichtigkeit als nicht sehr hoch einzustufen.

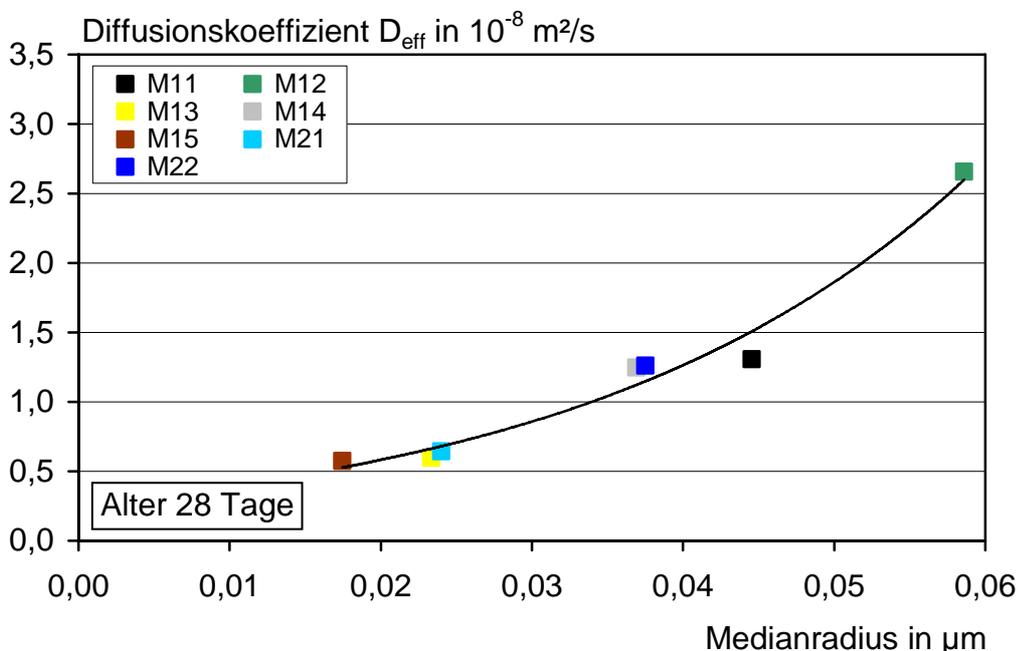


Bild 13: Diffusionskoeffizient D_{eff} aufgetragen über den Medianradius der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte herausgefunden werden, wie gut die Aussagekraft des Wenner-Verfahrens zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beton ist. Um dieses zu überprüfen, wurden die gemessenen Elektrolytwiderstände mit den zugehörigen Diffusionskoeffizienten bzw. Medianradien verglichen. Die Bilder 14 und 15 zeigen, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Dichtigkeit von Beton und dem Elektrolytwiderstand gibt. Die Zugabe von Flugasche führt zu einer Absenkung des Widerstandes, wahrscheinlich auch bedingt durch die höhere Porosität.

Die Mischungen M15 und M21, die gemäß den Prüfungen der Quecksilberdruckporosimetrie und der Sauerstoffdiffusion neben der Mischung M13 die höchste Dichtigkeit haben, weisen auch den höchsten Elektrolytwiderstand auf. Jedoch gibt es große Unterschiede bei den untersuchten Mischungen. Bei den Diffusionskoeffizienten und Medianradien weisen die Mischungen M13 und M21 annähernd den gleichen Wert auf. Die gemessenen Elektrolytwiderstände liegen jedoch erheblich voneinander entfernt. Ein ähnliches Verhältnis der untersuchten Parameter zeigt sich für die Mischungen M22 und M11 bzw. M14. Alle drei Mischungen weisen in etwa den gleichen Diffusionskoeffizienten auf. Die Mischungen M11 und M14 haben fast den gleichen Elektrolytwiderstand, aber nur etwa ein Drittel des Elektrolytwiderstandes der Mischung M22. Die Mischung M12 hat sowohl den geringsten Elektrolytwiderstand als auch den höchsten Diffusionskoeffizienten. Die Bilder B1 bis B3, Anhang B, zeigen den Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Diffusionskoeffizienten nach 7, 14 und 56 Tagen. An diesen Prüfterminen gibt es ebenfalls keinen eindeutigen Trend für alle Mischungen. Zu beobachten ist jedoch, dass die Differenz der Elektrolytwiderstände der einzelnen Mischungen untereinander mit zunehmendem Alter ansteigt. Die Aussagekraft des Elektrolytwiderstandes, der mit dem Wenner-Verfahren bestimmt wurde, ist hinsichtlich der Bewertung der Dichtigkeit nicht als sehr gut einzustufen.

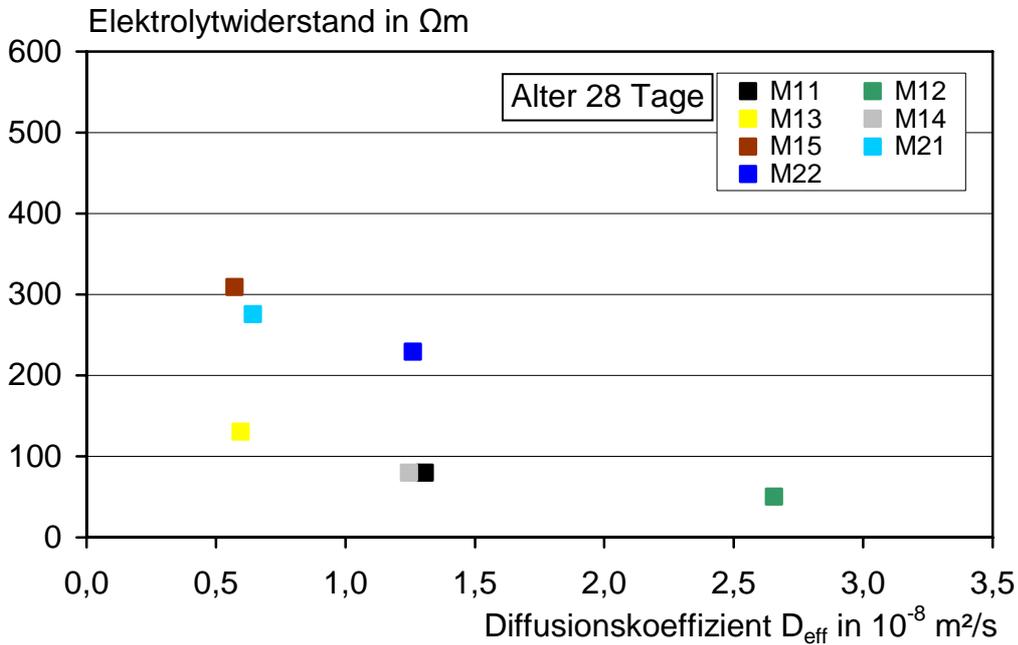


Bild 14: Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Diffusionskoeffizienten D_{eff} der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

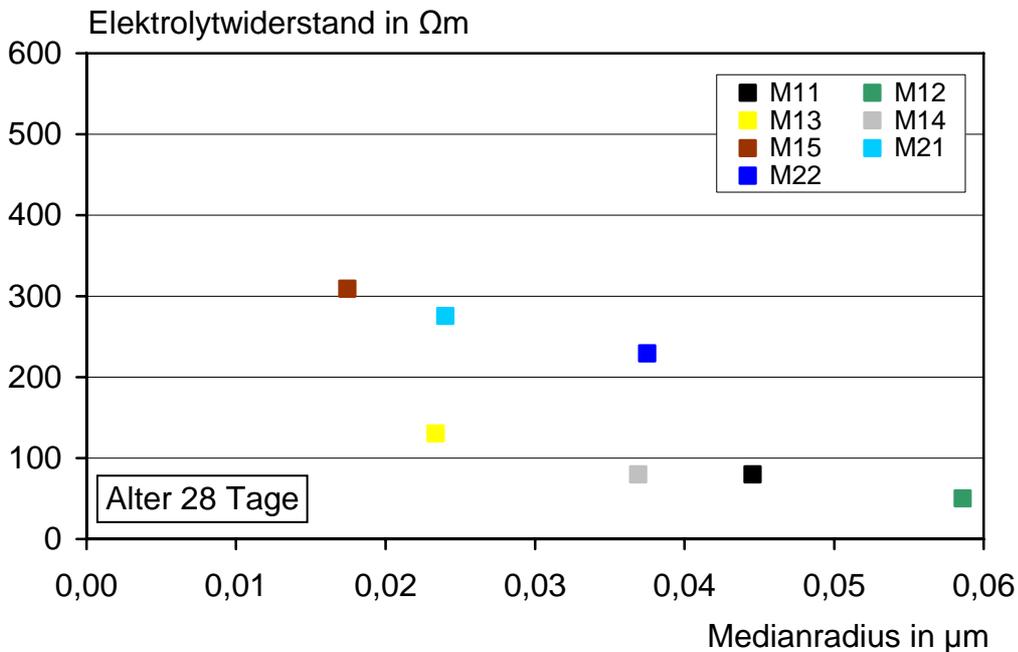


Bild 15: Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Medianradius der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Neben dem Diffusionskoeffizienten D_{eff} und dem Medienradius sind sowohl die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck als auch die Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar, besonders im Randbereich, und die Porosität ein Indiz für die Dichtigkeit des Betons. Wenn der Elektrolytwiderstand durch die Wenner-Messung lediglich in der Randzone des Betons bestimmt würde, könnte es eine Korrelation zwischen der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck bzw. bei 150 bar mit dem Elektrolytwiderstand geben. Neben dem Vergleich mit den unterschiedlichen Wasseraufnahmen wurde der Elektrolytwiderstand mit der mittels Quecksilberdruckporosimetrie an den Zementsteinen ermittelten Porosität verglichen. Die Aussagekraft der Porositäten ist allerdings nicht mit der der Medianradien zu vergleichen, da die Gesamtporosität keinen unmittelbaren Rückschluss auf die Porenstruktur und -verteilung zulässt. Wird der Elektrolytwiderstand über diese drei Parameter aufgetragen, was den Bildern 16 bis 18 entnommen werden kann, zeigt sich, wie zu erwarten war, ebenfalls kein eindeutiger Trend.

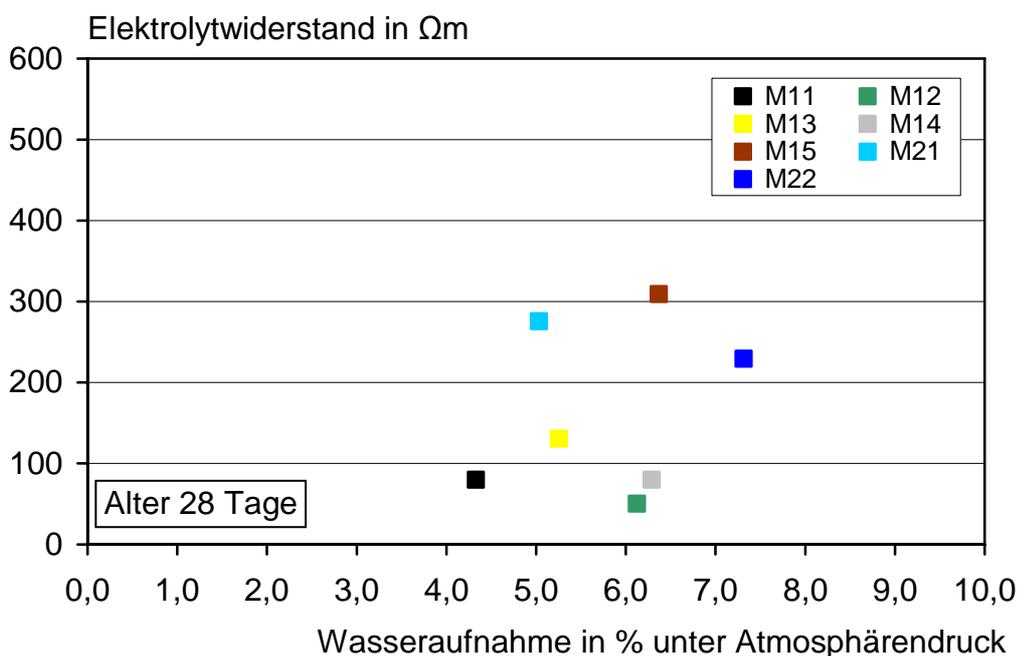


Bild 16: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Zur Überprüfung der Parameter Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck, Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar sowie die mittels Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Porosität, wurden diese mit dem Diffusionskoeffizienten in Bezug gesetzt. Da bei der Gasdiffusion die Dichtigkeit des Betons über den ganzen Querschnitt ermittelt wird, war zu erwarten, dass es keine Korrelation zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck bzw. unter Druck von 150 bar, wo lediglich die Randzone untersucht werden kann, vorliegt. Auch zwischen der Porosität und dem Diffusionskoeffizienten war kein eindeutiger Zusammenhang festzustellen. Die Bilder B4 bis B6, Anhang B, zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen.

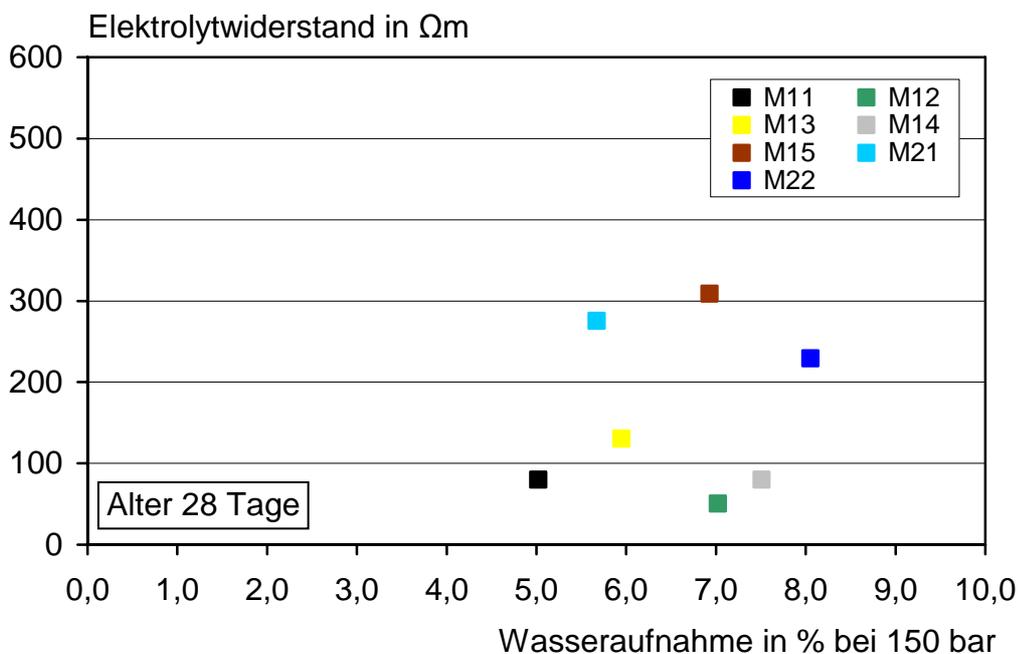


Bild 17: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

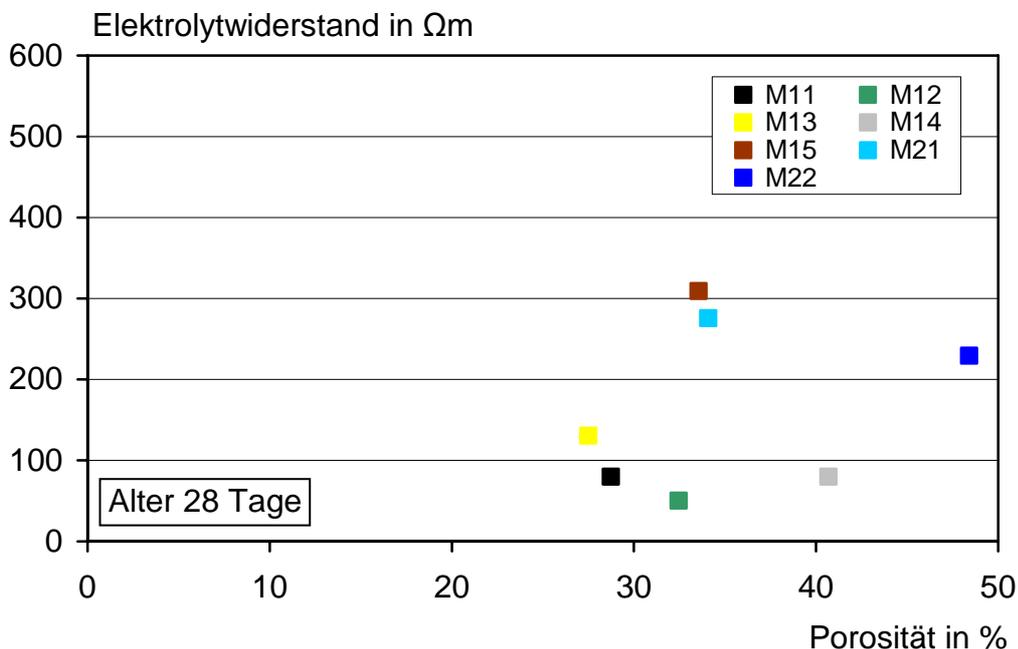


Bild 18: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Porosität der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Aufgrund der Leitfähigkeit der Porenlösung (vgl. Tabelle A9, Anhang A) sollte sich grundsätzlich ableiten lassen, ob der Beton über einen hohen oder niedrigen Elektrolytwiderstand verfügen müsste. In Bild 19 ist der Elektrolytwiderstand über die Leitfähigkeit der Porenlösung im Alter von 28 Tagen aufgetragen. Wie zu erkennen ist, ergibt sich auch hier kein wirklicher Trend und somit auch keine gute Korrelation, da es erhebliche Abweichungen zwischen der jeweils ermittelten Leitfähigkeit der Porenlösung und dem gemessenen Elektrolytwiderstand gibt.

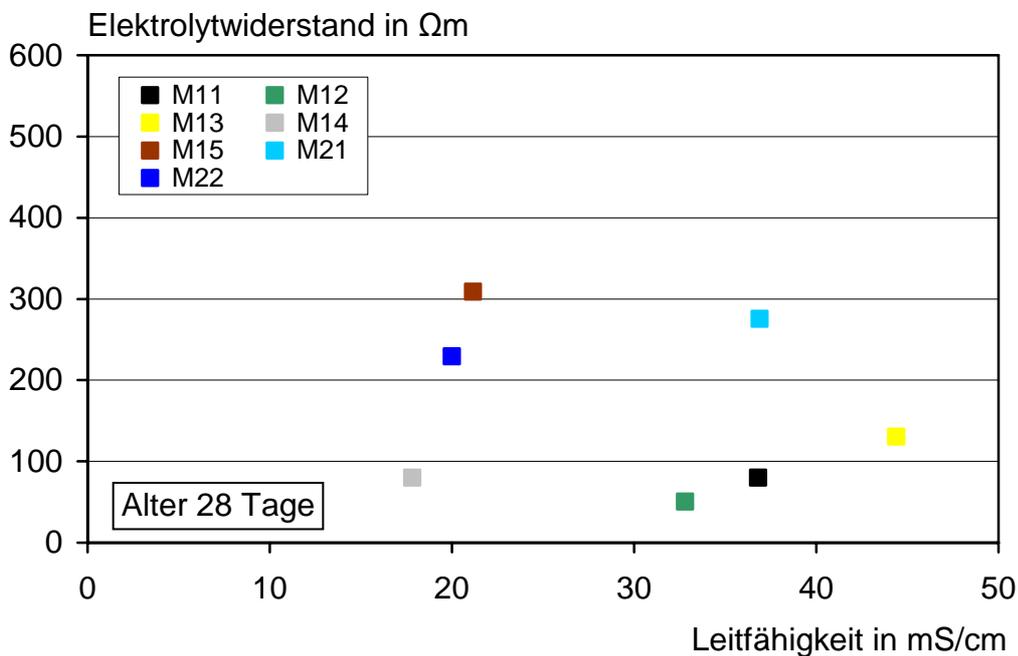


Bild 19: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösungen der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

Somit scheint es bei Beton nicht möglich zu sein, von der Leitfähigkeit der Porenlösung direkt auf den Elektrolytwiderstand schließen zu können. Daher müssen andere Faktoren, wie beispielsweise die Porenstruktur und -verteilung, mit in Betracht gezogen werden. In /Geh00/ wurde bereits dargestellt, dass die Betonzusammensetzung und der w/z_{eq} -Wert einen großen Einfluss auf den spezifischen Elektrolytwiderstand haben. Daher sollte überprüft werden, ob es möglich ist, mittels eines Faktors, bei dem sowohl die Leitfähigkeit der Porenlösung als auch die Dichtigkeit berücksichtigt werden, einen Zusammenhang zu finden. Dazu müsste eine größere Datenbasis geschaffen werden, um eine fundierte Aussage über den Zusammenhang der Parameter (w/z_{eq} -Wert, Bindemittelgehalt und -zusammensetzung) auf die Dichtigkeit von Beton treffen zu können. Im Rahmen der Auswertung wurde beispielsweise versucht, den Diffusionskoeffizienten oder den Medianradius mit der Leitfähigkeit der Porenlösung zu faktorisieren. Dazu wurden die ermittelten Werte der Leitfähigkeit der Porenlösung mit den Ergebnissen der übrigen Prüfungen (Gasdiffusion, Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und bei 150 bar, Quecksilberdruckporosimetrie (Medianwert und Porosität)) multipliziert. Dieses Vorgehen führte allerdings zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Die graphische Darstellung ist in den Bildern B7 bis B11, Anhang B, dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, kann im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen der Nachweis der Anrechenbarkeit von Betonzusatzstoffen nach dem sog. k-Wert-Konzept durch die Prüfung des Elektrolytwiderstands des Betons erfolgen. Dieser Nachweis gilt, wenn die Dichtigkeit des Betons nachgewiesen werden soll. Die Prüfung erfolgt an wassergelagerten Proben bei 20 °C, um auszuschließen, dass unterschiedliche Feuchten im Beton oder schwankende Temperaturen das Ergebnis verfälschen.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens unterstreichen die Vermutung, dass der Elektrolytwiderstand neben der Dichtigkeit ebenfalls von der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten abhängen muss und sich diese beiden Einflussgrößen überlagern bzw. teilweise aufheben können. Die Zusammensetzung der Betonrezeptur und somit auch der w/z_{eq} -Wert, der Bindemittelgehalt, der Zementtyp und der Anteil an Betonzusatzstoffen haben einen Einfluss auf die Dichtigkeit und auf die elektrische Leitfähigkeit der Porenlösung und somit auf den Elektrolytwiderstand des Beton.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen kann der Nachweis der Anrechenbarkeit von Betonzusatzstoffen nach dem sog. k-Wert-Konzept durch die Prüfung des Elektrolytwiderstands des Betons erfolgen. Dieser Nachweis wird geführt, wenn die Dichtigkeit des Betons nachgewiesen werden soll. Die Prüfung erfolgt an wassergelagerten Proben bei 20 °C, um auszuschließen, dass unterschiedliche Feuchten im Beton oder schwankende Temperaturen das Ergebnis verfälschen. Der Elektrolytwiderstand hängt jedoch neben der Dichtigkeit auch von der chemischen Zusammensetzung bzw. der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten ab. Im Inneren des Betons ist der Elektrolyt die Porenlösung. Die Leitfähigkeit der Porenlösung hängt von den Betonausgangsstoffen und dem w/z -Wert ab. Sie ist nicht proportional zur Dichtigkeit des Betons, sondern sinkt nicht-linear mit steigendem w/z -Wert. Hinzu kommt, dass bei Wasserlagerung insbesondere dann eine Verdünnung der Porenlösung und damit ein Absinken der Leitfähigkeit auftritt, wenn das Gefüge weniger dicht ist. Somit sind die Leitfähigkeit der Porenlösung und die Dichtigkeit des Betons die beiden Einflussgrößen, die Auswirkungen auf den Elektrolytwiderstand haben. Es ist daher denkbar, dass sich diese beiden Einflussgrößen überlagern bzw. aufheben können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte die Aussagekraft des Wenner-Verfahrens zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beton überprüft werden. Weiterhin war zu untersuchen, inwieweit die bestehenden Verfahrensanweisungen ausreichen, um Ergebnisse auch reproduzieren zu können. Die bestehenden Beschreibungen reichen grundsätzlich aus, erheb-

liche Beeinflussungen aus der angewandten Prüftechnik unter Beachtung der Anweisungen wurden nicht festgestellt.

Um zu überprüfen, inwieweit der Elektrolytwiderstand unterschiedlicher Betonrezepturen mit der Dichtigkeit des Betons korreliert, wurden 7 Betonmischungen mit den dazu gehörigen Zementsteinen hergestellt.

Untersucht wurde die Gefügedichtheit am Beton mittels Wasseraufnahme und Sauerstoffdiffusion sowie am Zementstein mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Zudem wurde für jeden an dem zum jeweiligen Beton zugehörigen Zementstein eine Porenwasseranalyse durchgeführt.

Zunächst wurden die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen dargestellt und die wesentlichen Erkenntnisse herausgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Prüfungen zur Dichtigkeit gut miteinander korrelieren bzw. für eine tendenzielle Aussage gut geeignet sind. So korrelieren die Ergebnisse der Sauerstoffdiffusion (Diffusionskoeffizient) und die der Quecksilberdruckporosimetrie (Medianradius) sehr gut miteinander.

Ziel dieses Forschungsvorhaben war die Überprüfung der Aussage des Wenner-Verfahrens zur Bestimmung der Dichtigkeit von Beton. Um dies zu untersuchen, wurden die Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfungen mit den Ergebnissen des Wenner-Verfahrens (Elektrolytwiderstand) gegenübergestellt. Hier zeigte sich keine generelle Korrelation für alle Betone.

Um die Aussage zu quantifizieren, wurden ebenfalls die Leitfähigkeiten der Porenlösungen, die am Zementstein ermittelt wurden, in Bezug zum gemessenen Elektrolytwiderstand gesetzt. Weitere Vergleiche des gemessenen Elektrolytwiderstand mit den anderen ermittelten Ergebnissen wie der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Druck von 150 bar sowie der Porosität lieferten keine sinnvolleren Ergebnisse. In einem weiteren Schritt wurde versucht, die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen mit den gemessenen Werten der Leitfähigkeit der Porenlösung zu multiplizieren. Dieser Ansatz führt jedoch nicht zu einem besseren Ergebnis, so dass davon ausgegangen werden muss, dass der Elektrolytwiderstand, nicht nur von der Dichtigkeit des Betons und/oder der Leitfähigkeit der Porenlösung abhängt. Die beiden Einflussgrößen können sich überlagern bzw. aufheben. Aufgrund der Ergebnisse wird deutlich, dass sowohl der w/z_{eq} -Wert als auch der Gehalt und die Zusammensetzung des Bindemittels eine Rolle spielen. Dazu ist es erforderlich, in Zukunft eine Datenbank zu erstellen, die viele Variationen beinhaltet. Es sollte systematisch untersucht werden, welche Auswirkungen jeder einzelne Parameter auf den Elektrolytwiderstand hat. Wenn diese Einflüsse bekannt sind, sollte es ggf. möglich sein, aufgrund der Zusammensetzung einen Faktor zu ermitteln, mit dem dann vom Elektrolyt-

widerstand bessere Rückschlüsse auf die Dichtigkeit des Betons gezogen werden könnten. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens deuten darauf hin, dass Rückschlüsse auf die Dichtigkeit des Betons durch die Messung des Elektrolytwiderstandes nicht grundsätzlich möglich sind.

7 LITERATUR

- /AST06/ ASTM: Standard Test Method for Field Measurements for Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. Designation: G 57 – 95a (Reapproved 2006)
- /Bun91/ Bunke, N.: Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- /DIN85/ DIN 50014:1985-07 Klimate und ihre technische Anwendung; Normalklimate
- /DIN91/ DIN 1048-5:1991-06 Prüfverfahren für Beton; Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- /DIN01/ DIN EN 206-1:2001-07 Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /DIN04/ DIN EN 197-1:2004-08 Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- /DIN05a/ DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- /DIN05b/ DIN 38409-7:2005-12 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Teil 7: Bestimmung der Säure- und Basekapazität (H 7)
- /DIN08a/ DIN EN 450-1:2008-05 Flugasche für Beton; Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /DIN08b/ DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton
- /DIN08c/ DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- /DIN09a/ DIN EN 13261-1:2009-07 Silikastaub für Beton - Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /DIN09b/ DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 5: Ausbreitmaß
- /DIN09c/ DIN EN 12350-7:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren
- /DIN09d/ DIN EN 12350-6:2009-08 Prüfung von Frischbeton; Teil 6: Frischbetonrohichte

- /DIN09e/ DIN EN 12390-2:2009-08 Prüfung von Festbeton; Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- /DIN09f/ DIN EN 196-3:2009-02 Prüfverfahren für Zement; Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
- /Fer06/ Ferreira, M. ; Jalali, S.: Quality Control Based on Electrical Resistivity Measurements. Helsinki : Concrete Association of Finland, 2006. - In: European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures ESCS-2006, Espoo, Finland, June 12-14, 2006, S. 325-332
- /Fig85/ Figg, J.W. ; Marsden, A.F.: Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete: a State of the Art Survey of Electrical Potential and Resistivity Measurements for Use Above Water Level. London: Her Majesty's Stationery Office; Department of Energy. - In: Concrete in the Oceans Technical Report (1985), Nr. 10 = Offshore Technology Report OTH 84 205
- /Geh00/ Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerermessung von Stahlbetonbauwerken : Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 510 = Dissertation
- /McC09/ McCarter, W.J. ; Starrs, G. ; Kandasami, S. ; Jones, R. ; Chrisp, M.: Electrode Configurations for Resistivity Measurements on Concrete. In: ACI Materials Journal 106 (2009), Nr. 3, S. 258-264
- /New08/ Newlands, M. D. ; Jones, M. R. ; Kandasami, S. ; Harrison, T.A.: Sensitivity of Electrode Contact Solutions and Contact Pressure in Assessing Electrical Resistivity of Concrete. In: Materials and Structures (RILEM) 41 (2008), Nr. 4, 621-632
- /Vas80/ Vassie, P.R. ; Transport and Road Research Laboratory (TRRL): A Survey of Site Tests for the Assessment of Corrosion in Reinforced Concrete. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1980. - In: TRRL Laboratory Report (1980), Nr. 953
- /Wen15/ Wenner, F.: A Method of Measuring Earth Resistivity. In: Bulletin of the Bureau of Standards 12 (1915), S. 469-478

Tabelle A1: Chemische Zusammensetzung der Zemente, der Flugasche und des Silikastaubes

| Bestandteil | Einheit | CEM I 42,5 R | | CEM III/A 32,5 N | | Flugasche | | Silikastaub | |
|--|---------|--------------|---------|------------------|---------|------------|---------|-------------|---------|
| | | Gehalt | | | | | | | |
| | | getrocknet | geglüht | getrocknet | geglüht | getrocknet | geglüht | getrocknet | geglüht |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Glühverlust, Atmosphäre | M.-% | 1,96 | - | 0,89 | - | 1,98 | - | 2,22 | - |
| Glühverlust, Schutzgas | | n. b. | - | 3,80 | - | n. b. | - | n. b. | - |
| Gesamtschwefel als SO ₃ | | 3,10 | 3,16 | 4,00 | 4,04 | 1,83 | 1,87 | n. b. | n. b. |
| Sulfat als SO ₃ , gravimetrisch | | n. b. | n. b. | 2,59 | 2,61 | n. b. | n. b. | n. b. | n. b. |
| Gesamtkohlenstoff als CO ₂ | | 1,56 | n. b. | 2,33 | n. b. | 3,34 | n. b. | n. b. | n. b. |
| Gesamtkohlenstoff als C | | 0,43 | n. b. | 0,64 | n. b. | 0,91 | n. b. | n. b. | n. b. |
| CO ₂ , "Säureaufschluss" | | n. b. | n. b. | 1,30 | n. b. | n. b. | n. b. | n. b. | n. b. |
| Chlorid | | 0,014 | 0,014 | 0,039 | 0,039 | 0,028 | 0,029 | 0,060 | 0,061 |
| Na ₂ O | | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 1,16 | 1,19 | 0,08 | 0,08 |
| K ₂ O | | 0,76 | 0,77 | 0,83 | 0,84 | 2,38 | 2,43 | 1,22 | 1,25 |
| Na ₂ O-Äquivalent | | 0,59 | 0,60 | 0,64 | 0,64 | 2,73 | 2,78 | 0,88 | 0,90 |
| MgO | | 1,58 | 1,61 | 4,14 | 4,18 | 2,11 | 2,15 | 0,49 | 0,50 |
| Al ₂ O ₃ | | 4,80 | 4,90 | 7,70 | 7,77 | 22,71 | 23,17 | 0,01 | 0,01 |
| SiO ₂ | | 20,64 | 21,05 | 27,84 | 28,09 | 48,17 | 49,14 | 94,93 | 97,09 |
| P ₂ O ₅ | | 0,09 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,11 | 0,11 | 0,09 | 0,09 |
| CaO | | 63,88 | 65,15 | 52,41 | 52,88 | 6,12 | 6,24 | 0,40 | 0,41 |
| TiO ₂ | | 0,25 | 0,26 | 0,69 | 0,70 | 0,99 | 1,01 | 0,00 | 0,00 |
| MnO | | 0,07 | 0,07 | 0,18 | 0,18 | 0,12 | 0,12 | 0,04 | 0,04 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,60 | 2,65 | 1,41 | 1,43 | 12,80 | 12,06 | 0,07 | 0,07 | |
| Freikalk als CaO | n. b. | n. b. | n. b. | n. b. | 0,61 | 0,62 | n. b. | n. b. | |

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A2: Physikalische Eigenschaften der Zemente, der Flugasche und des Silikastaubes

| Prüfparameter | Einheit | Prüfwert | | | |
|---------------------------------|--------------------|--------------|------------------|-----------|-------------|
| | | CEM I 42,5 R | CEM III/A 32,5 N | Flugasche | Silikastaub |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Dichte | kg/m ³ | 3128 | 2997 | 2365 | 2273 |
| spez. Oberfläche (Blaine) | cm ² /g | 2678 | 2905 | – | – |
| Kornanteil > 90 µm | M.-% | 0,06 | 0,22 | – | – |
| Kornanteil > 40 µm | | – | – | 21,0 | – |
| Wasseranspruch ¹⁾ | M.-% | 28,7 | 30,4 | – | – |
| Raubeständigkeit ¹⁾ | mm | 0,5 | 0,9 | | |
| Erstarrungsbeginn ¹⁾ | h:min | 3:20 | 4:00 | | |
| Erstarrungsende ¹⁾ | h:min | 3:50 | 4:35 | | |

¹⁾ gemäß DIN EN 196-3:2009-02 /DIN09f/

Tabelle A3: Frischbetonkennwerte und Betonzusammensetzung der Mischungen M11 bis M22

| Beton | Ausbreitmaß | Frischbetonroh-dichte | Luft-poren-gehalt | Gehalt an | | | | | |
|-------|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------|--------|------------------|--------------------------|
| | | | | Zement | Flug-asche | Silika-staub | Wasser | Gesteins-körnung | Fließmittel |
| - | mm | kg/m ³ | Vol.-% | kg/m ³ | | | | | M.-% v. Z. ¹⁾ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| M11 | 510 | 2421 | 1,2 | 300 | 0 | 0 | 150 | 1950 | 0,67 |
| M12 | 600 | 2342 | 0,7 | 300 | 0 | 0 | 210 | 1780 | 0,00 |
| M13 | 565 | 2370 | 0,5 | 240 | 160 | 0 | 152 | 1820 | 1,04 |
| M14 | 580 | 2330 | 0,8 | 180 | 150 | 0 | 171 | 1830 | 0,42 |
| M15 | 515 | 2331 | 1,8 | 270 | 0 | 29,7 | 180 | 1860 | 0,48 |
| M21 | 525 | 2369 | 1,7 | 300 | 0 | 0 | 150 | 1950 | 0,00 |
| M22 | 620 | 2318 | 0,8 | 300 | 0 | 0 | 210 | 1780 | 0,00 |

¹⁾ v. Z.: vom Zementgehalt

Tabelle A4: Gemessene Elektrolytwiderstände mittels Wenner-Verfahren der Betone M11 bis M22 im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen

| Beton | Zement | Flug- asche | Silika- staub | w/z _{eq} - Wert | Elektrolytwiderstand im Alter von | | | |
|-------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| | | | | | 7 d | 14 d | 28 d | 56 d |
| - | - | - | - | - | Ωm | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| M11 | CEM I 42,5 R | - | - | 0,50 | 67 | 77 | 80 | 105 |
| M12 | | - | - | 0,70 | 41 | 47 | 50 | 60 |
| M13 | | X | - | 0,56 | 44 | 62 | 131 | 257 |
| M14 | | X | - | 0,84 | 32 | 40 | 80 | 145 |
| M15 | | - | X | 0,60 | 49 | 144 | 309 | 377 |
| M21 | CEM III/A 32,5 N | - | - | 0,50 | 113 | 205 | 276 | 496 |
| M22 | | - | - | 0,70 | 73 | 135 | 229 | 378 |

Tabelle A5: Ergebnisse der Prüfung der Wasseraufnahme und Ermittlung des Sättigungsgrades der Betone M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

| Beton | Zement | Flug- asche | Silika staub | w/z _{eq} - Wert | Prüf- alter | W _A ¹⁾ | W _{150bar} ²⁾ | Sättigungs- grad S |
|-------|------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|----------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| - | - | - | - | - | d | M.-% | | - |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| M11 | CEM I 42,5 R | - | - | 0,50 | 28 | 4,33 | 5,02 | 0,86 |
| M12 | | - | - | 0,70 | | 6,12 | 7,02 | 0,87 |
| M13 | | X | - | 0,56 | | 5,26 | 5,95 | 0,88 |
| M14 | | X | - | 0,84 | | 6,29 | 7,51 | 0,84 |
| M15 | | - | X | 0,60 | | 6,37 | 6,93 | 0,92 |
| M21 | CEM III/A 32,5 N | - | - | 0,50 | 5,03 | 5,67 | 0,89 | |
| M22 | | - | - | 0,70 | 7,31 | 8,05 | 0,91 | |

1) W_A: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

2) W_{150bar}: Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar

Tabelle A6: Sauerstoffdiffusionskoeffizienten der Betone M11 bis M22 im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen

| Beton | Zement | Flug- asche | Silika- staub | w/z _{eq} - Wert | Diffusionskoeffizient im Alter von | | | |
|-------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|------|------|------|
| | | | | | 7 d | 14 d | 28 d | 56 d |
| - | - | - | - | - | 10 ⁻⁸ m ² /s | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| M11 | CEM I 42,5 R | - | - | 0,50 | 1,69 | 1,47 | 1,31 | 1,22 |
| M12 | | - | - | 0,70 | 3,17 | 3,07 | 2,66 | 2,46 |
| M13 | | X | - | 0,56 | 1,38 | 1,03 | 0,60 | 0,45 |
| M14 | | X | - | 0,84 | 3,24 | 2,05 | 1,25 | 0,94 |
| M15 | | - | X | 0,60 | 0,98 | 0,86 | 0,57 | 0,76 |
| M21 | CEM III/A 32,5 N | - | - | 0,50 | 1,02 | 1,27 | 0,64 | 0,50 |
| M22 | | - | - | 0,70 | 2,47 | 1,86 | 1,26 | 1,31 |

Tabelle A7: Medianradien der Porengrößenverteilung der Zementsteine M11 bis M22 bestimmt mittels Quecksilberdruckporosimetrie im Alter von 28 Tagen

| Beton | Zement | Flug- asche | Silika- staub | w/z _{eq} - Wert | Medianradius im Alter von 28 d |
|-------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| - | - | - | - | - | µm |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| M11 | CEM I 42,5 R | - | - | 0,50 | 0,045 |
| M12 | | - | - | 0,70 | 0,059 |
| M13 | | X | - | 0,56 | 0,023 |
| M14 | | X | - | 0,84 | 0,037 |
| M15 | | - | X | 0,60 | 0,017 |
| M21 | CEM III/A 32,5 N | - | - | 0,50 | 0,024 |
| M22 | | - | - | 0,70 | 0,038 |

Tabelle A8: Porositäten der Zementsteine M11 bis M22 bestimmt mittels Quecksilberdruckporosimetrie im Alter von 28 Tagen

| Beton | Zement | Flug- asche | Silika- staub | w/z _{eq} - Wert | Porosität im Alter von 28 d |
|-------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| - | - | - | - | - | % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| M11 | CEM I 42,5 R | - | - | 0,50 | 28,7 |
| M12 | | - | - | 0,70 | 32,5 |
| M13 | | X | - | 0,56 | 27,5 |
| M14 | | X | - | 0,84 | 40,7 |
| M15 | | - | X | 0,60 | 33,6 |
| M21 | CEM III/A 32,5 N | - | - | 0,50 | 34,1 |
| M22 | | - | - | 0,70 | 48,4 |

Tabelle A9: Ergebnisse der Porenwasseranalyse der Zementsteine M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

| Parameter | Einheit | Zementstein | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | M11 | M12 | M13 | M14 | M15 | M21 | M22 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| pH-Wert gemessen | - | 13,7 | 13,5 | 12,8 | 13,2 | 12,7 | 12,9 | 13,2 |
| Leitfähigkeit | mS/cm | 36,80 | 32,80 | 44,40 | 17,83 | 21,16 | 36,90 | 20,00 |
| Natrium | mmol/l | 85 | 52 | 97 | 32 | 37 | 56 | 32 |
| Kalium | mmol/l | 172 | 92 | 139 | 44 | 58 | 121 | 63 |
| Calcium | mmol/l | 5 | 6 | 0 | 6 | 0 | 4 | 5 |
| Chlorid | mmol/l | 3 | 0 | 1 | 8 | 1 | 1 | 4 |
| Nitrat | mmol/l | 0,1 | 0,0 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,2 |
| Sulfat | mmol/l | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 2 | 1 |
| Hydroxidgehalt, K _{S4,3} | mmol/l | 247 | 152 | 225 | 79 | 102 | 193 | 92 |
| Summe Anionen mWert | mval/l | 252 | 153 | 232 | 88 | 105 | 198 | 98 |
| Summe Kationen | | 266 | 157 | 236 | 89 | 95 | 186 | 105 |

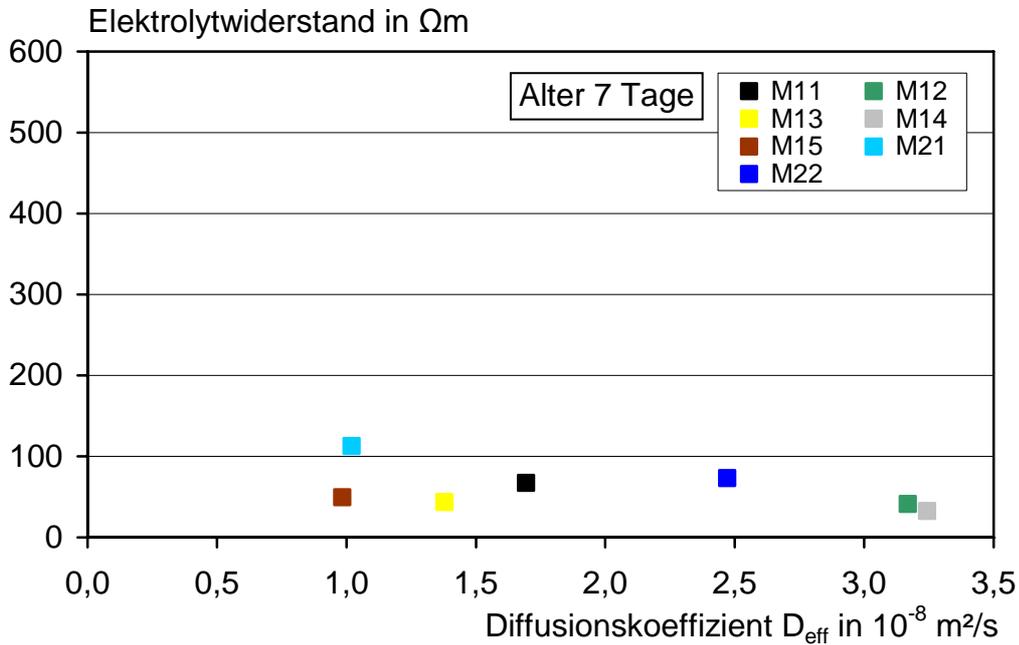


Bild B1: Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Diffusionskoeffizienten der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 7 Tagen

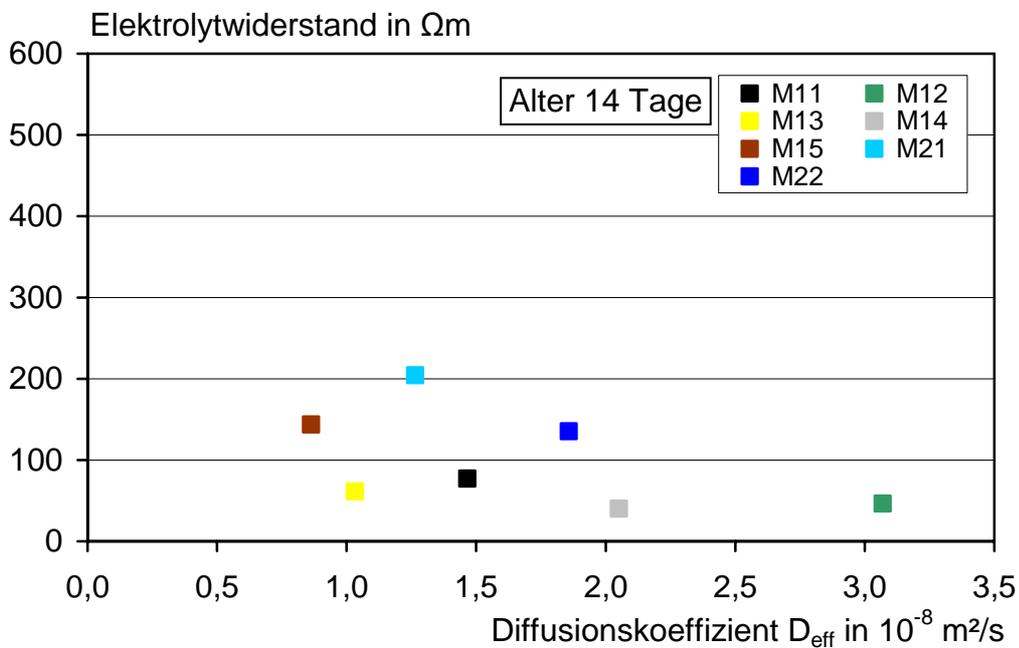


Bild B2: Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Diffusionskoeffizienten der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 14 Tagen

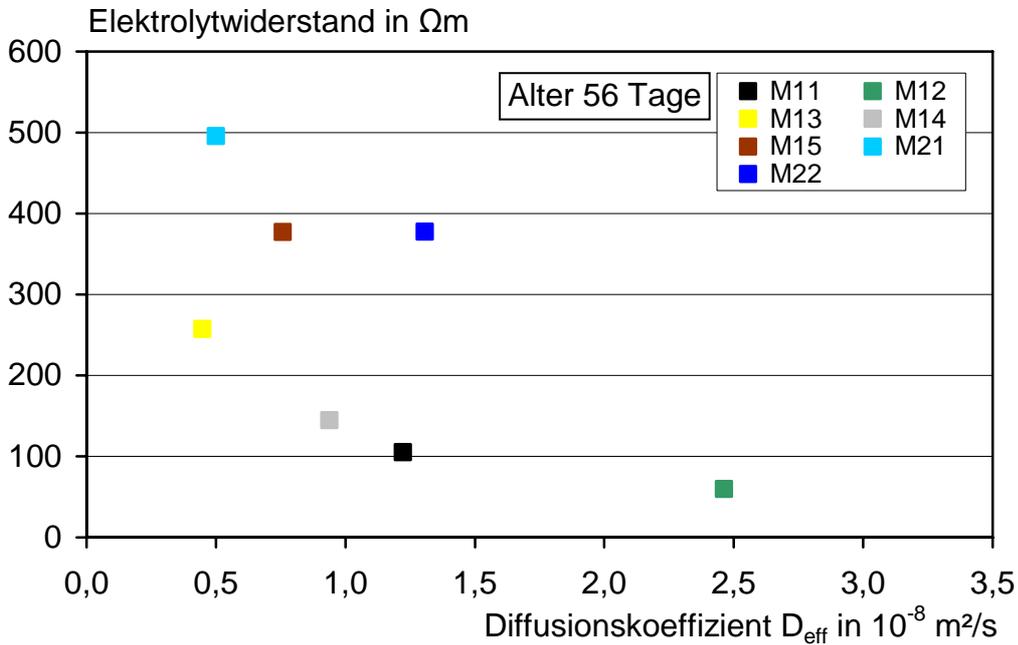


Bild B3 Elektrolytwiderstand aufgetragen über den Diffusionskoeffizienten der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 56 Tagen

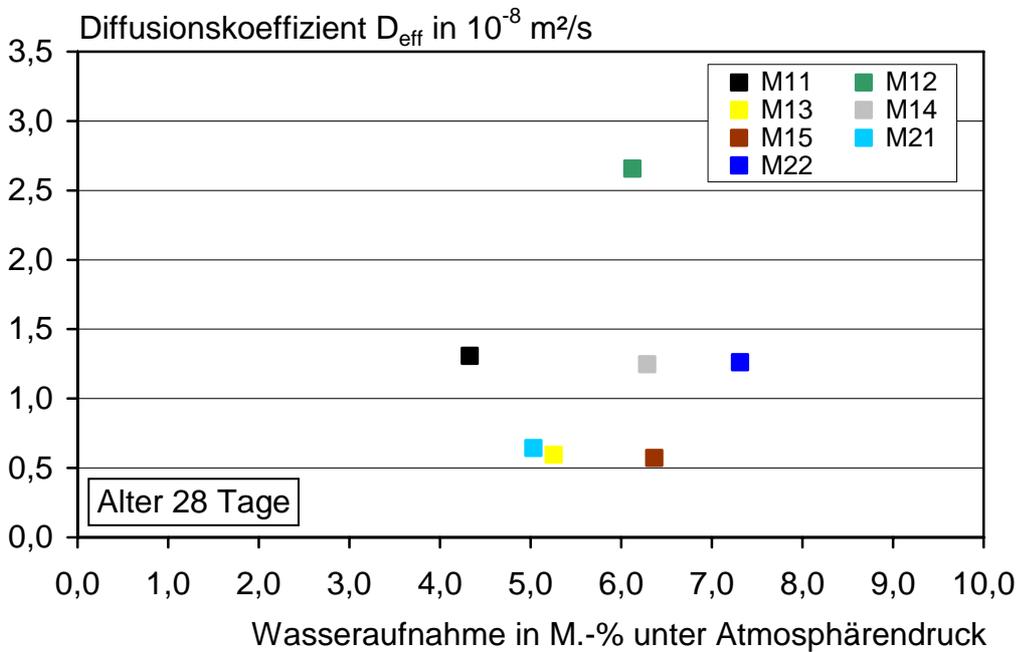


Bild B4 Diffusionskoeffizient aufgetragen über die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

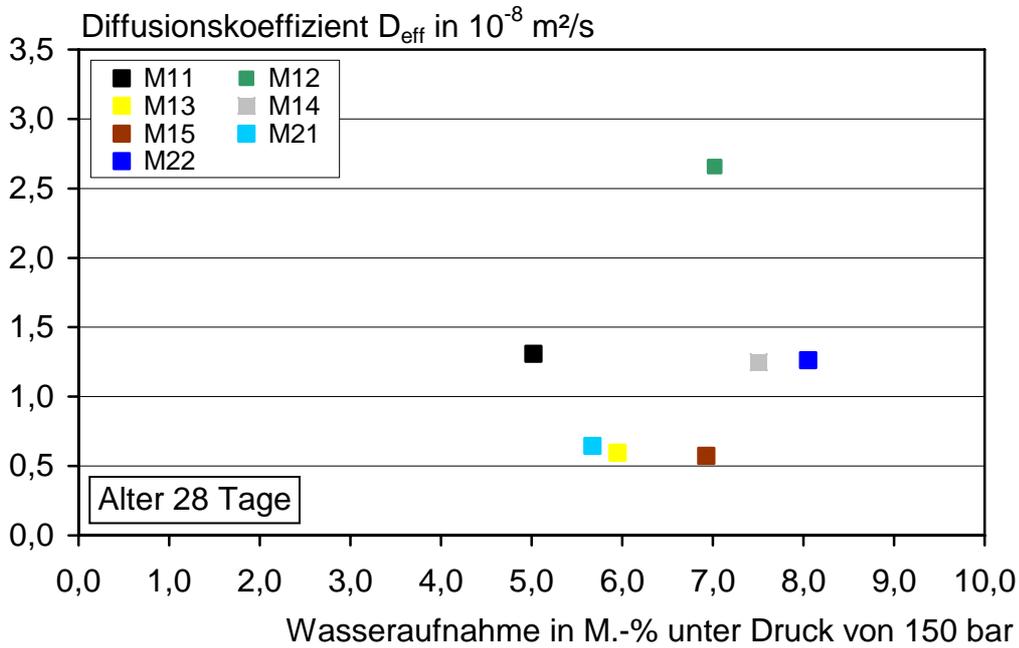


Bild B5 Diffusionskoeffizient aufgetragen über die Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

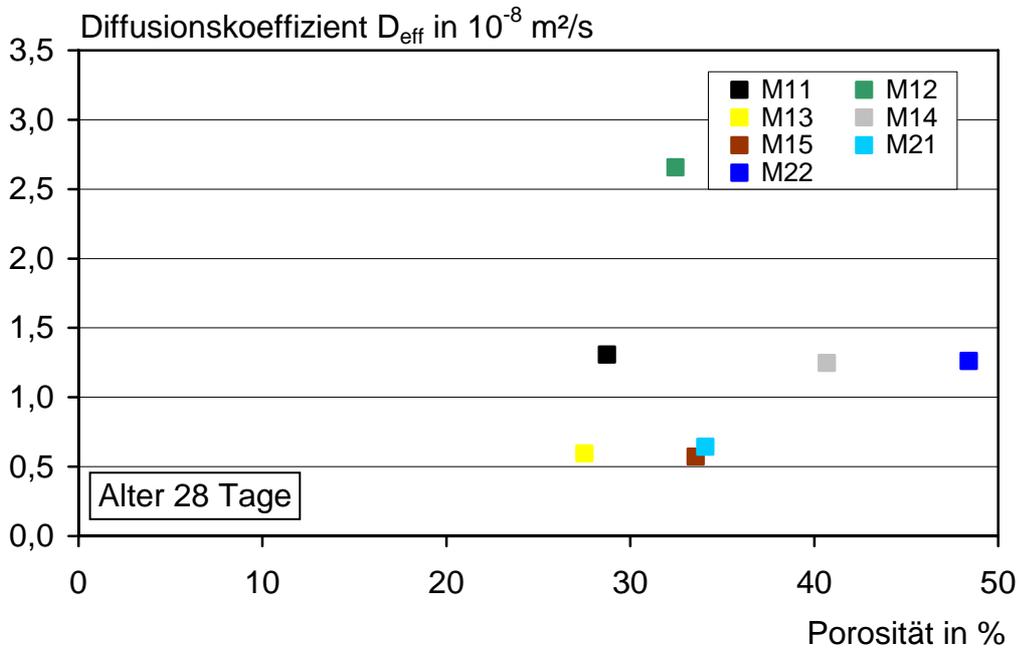


Bild B6: Diffusionskoeffizient aufgetragen über die Porosität der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

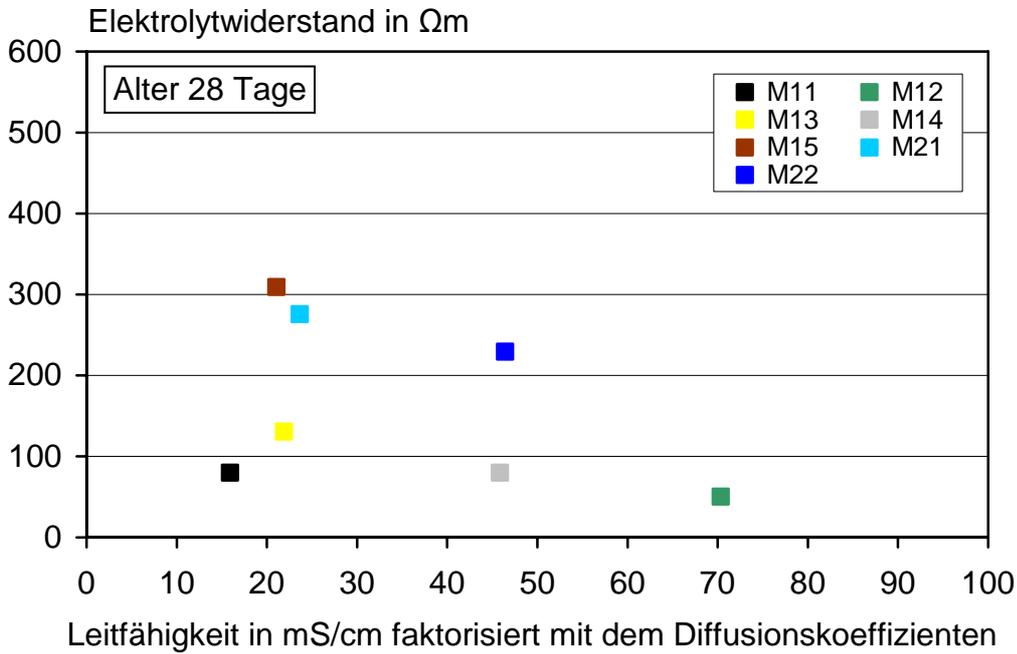


Bild B7: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösung multipliziert mit dem Diffusionskoeffizienten der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

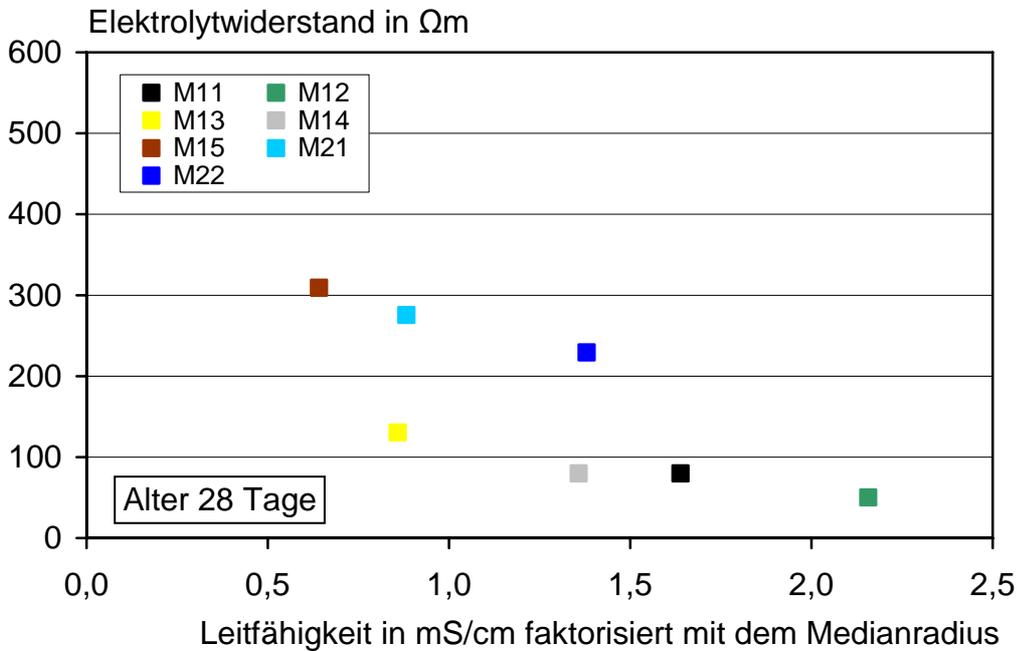


Bild B8: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösung multipliziert mit dem Medianradius der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

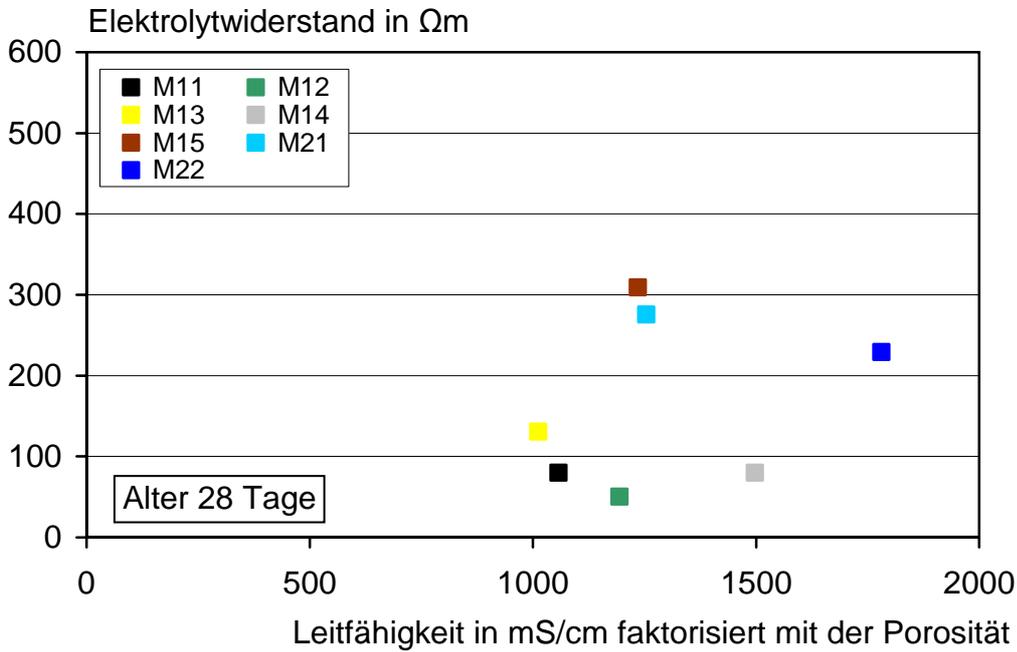


Bild B9: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösung multipliziert mit der Porosität der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

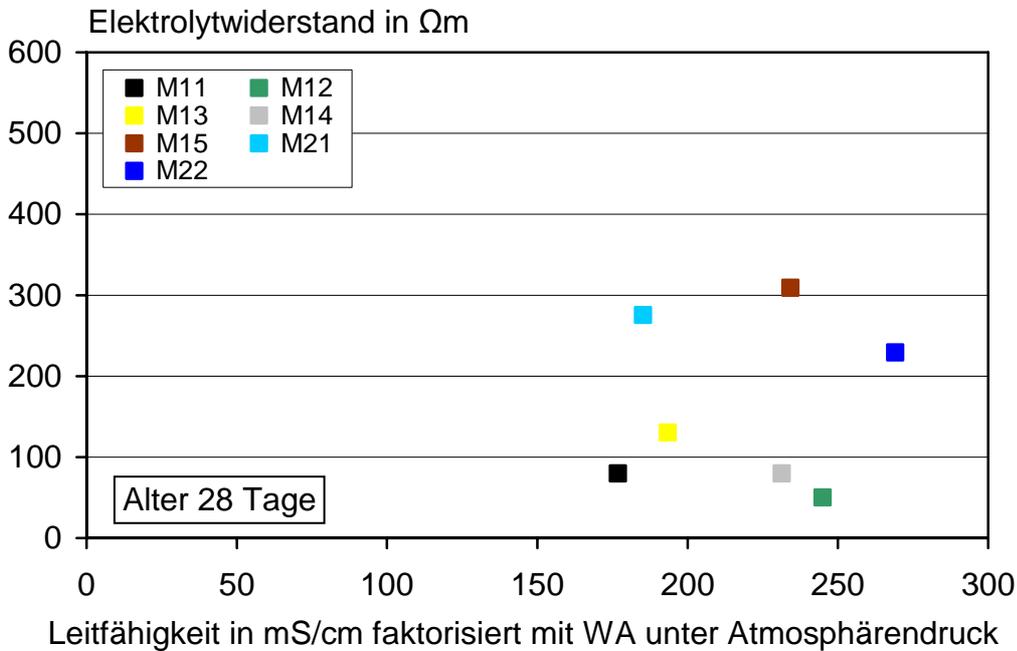


Bild B10: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösung multipliziert mit der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen

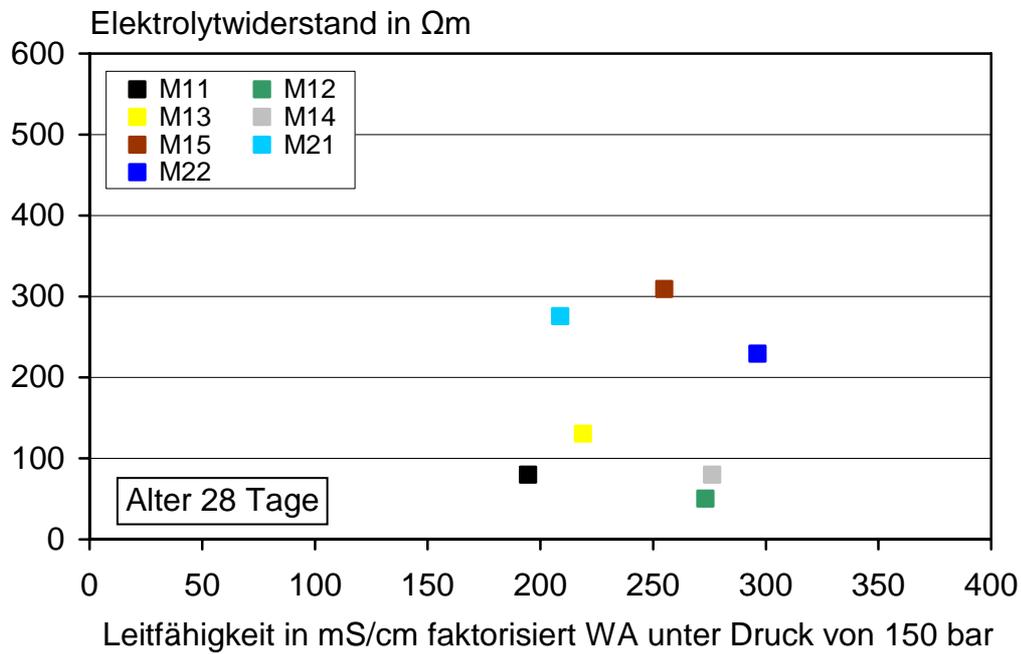


Bild B11: Elektrolytwiderstand aufgetragen über die Leitfähigkeit der Porenlösung multipliziert mit der Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar der Mischungen M11 bis M22 im Alter von 28 Tagen