

## Medientransport durch Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton \*

Matthias Lieboldt<sup>1</sup>, Viktor Mechtcherine<sup>2</sup>

**Zusammenfassung.** In den durchgeführten Versuchsreihen wurden die Wasserabsorption sowie die Gas- und Wasserpermeabilität sowohl an gerissenen als auch rissfreien Prüfkörpern aus textilbewehrtem Beton (TRC) untersucht. Eine deutliche Steigerung der Wasseraufnahme bei Proben mit unbeschichteten Textilien konnte mit Zunahme der Garnfeinheit beobachtet werden. Bei den gerissenen Proben besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit der Transportraten von Flüssigkeiten und Gasen zu den relevanten Risscharakteristika (kumulative Risslänge, Rissbreite). Weiterhin sind Selbstheilungseffekte von feinen Rissen infolge einer zyklischen Wasserbeaufschlagung beobachtet worden. Hierbei kam es zu einer deutlichen Reduzierung der Transportraten sowohl für Wasser als auch für Gase. Eine speziell entwickelte Permeabilitätsmesskammer zur Durchführung von In-Situ-Messungen ermöglicht Untersuchungen zum Stofftransport unter axialer Zugbelastung bei verschiedenen Dehnungszuständen.

**Summary:** In this study water absorption as well as gas and water permeability were tested on specimens made of textile reinforced concrete using both crack-free and cracked specimens. The results show in the case of uncoated textile that an increase in the fineness of yarns leads to a considerable increase in water absorption. The transport values for cracked material correlated with the characteristics of cracks (cumulative crack length, crack width). Furthermore, the effect of self-healing phenomena on the transport properties of TRC was considered. The self-healing of fine cracks leads to a considerable reduction of the transport rates of water and gas over time. The development of a special measuring chamber for permeability measurement offers possibilities for analysis under uniaxial tension at several strain levels.

---

\* Dies ist keine begutachtete Veröffentlichung./This is not a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244045285527-10721](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244045285527-10721)

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Institut für Baustoffe, TU Dresden

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing., Institut für Baustoffe, TU Dresden

## 1 Einleitung

Eine charakteristische Eigenschaft des textilbewehrten Betons ist sein ausgeprägtes quasi-duktilen Verhalten. Mit der feinen, oberflächennahen textilen Bewehrung lässt sich unter anderem eine sehr gute Rissverteilung erreichen. Im Gebrauchszustand weist der Verbundwerkstoff dadurch geringere Rissbreiten als Stahlbetonbauteile auf. Für eine zielsichere Dauerhaftigkeitsbewertung von Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen mit TRC sind Kenntnisse über die maßgebliche Transportmechanismen von flüssigen und gasförmigen schadensauslösenden Medien in und durch die textile Verstärkungsschicht unabdingbar. Der Stand der Forschung zur Dauerhaftigkeit des textilbewehrten Betons konzentrierte sich bisher im Wesentlichen auf die Beständigkeit der AR-Glasfilamente im alkalischen Milieu der Feinbetonmatrix und auf die zeitliche Entwicklung des Faser-Matrix-Verbundes. Durch eine geeignete Matrixzusammensetzung unter Verwendung von Hochofenzementen mit Puzzolanzusatz konnte mit den durchgeführten Untersuchungen eine ausreichend lange Nutzungsdauer vorhergesagt werden, siehe BUTLER ET AL [1]. In den fortlaufenden Untersuchungen werden zunächst grundlegende Zusammenhänge des Transports von Flüssigkeiten und Gasen (kapillare Wasseraufnahme, Wasser- und Gaspermeabilität) in Abhängigkeit des Bewehrungstextils sowie der erzeugten Risszustände (Rissweite, -länge) erfasst. Zusätzlich wird auch der Effekt der Selbstheilung von feinen Rissen betrachtet. Mit Hilfe einer speziell entwickelten Permeabilitätsmesskammer werden zusätzlich die Durchlässigkeiten durch In-Situ-Messungen unter axialer Zugbelastung bei verschiedenen Dehnungszuständen verifiziert.

## 2 Herstellung der Prüfkörper

### 2.1 Feinbetonmatrix

Die verwendete Matrixzusammensetzung wurde im Rahmen des SFB 528 entwickelt, siehe BUTLER [1]. Als Bindemittel wird zumahlstoffreicher Zement (CEM III) mit 2 Massenteilen (MT) in Verbindung mit einer Zugabe von Puzzolanen (1 MT) genutzt. Als Zuschlag (3 MT) kommt Feinsand mit Größtkorn von 1 mm zur Anwendung. Der hohe Anteil an puzzolanischen Zusatzstoffen bewirkt eine Reduzierung des pH-Wertes der Porenflüssigkeit im Feinbeton. Damit wird die Dauerhaftigkeit der Glasfilamentgarne positiv beeinflusst. Weithin besitzen die puzzolanischen Zusätze eine große Bedeutung in Bezug auf die Ausbildung der Interfacezone zwischen Filament und Matrix. Bei einer reinen Portlandzementmatrix bilden sich filmartige Umhüllungen, die von CH und CSH-Phasen dominiert werden. Mit Hilfe der puzzolanischen Zusätze erfolgt ein Abbau der großvolumigen und alkalischen CH-Phasen in feinere CSH-Phasen. Diese CSH-Phasen reduzieren die lokalen Spannungsspitzen an der Oberfläche der Filamente und gewährleisten somit einen gleichförmigeren Kraftübertrag.

## 2.2 Verstärkungstextilien

Zur Bewehrung der plattenförmigen Prüfkörper werden vier verschiedene biaxiale Textilien aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) verwendet. In Tabelle 1 sind die Feinheiten von Kett- und Schussfaden sowie die Maschenweiten angegeben. Die Fasermenge in Beanspruchungsrichtung wird zwischen 640 und 2400 tex variiert. Um eine feine Verteilung der Bewehrung zu ermöglichen, beträgt die Öffnungsweite der gewählten Gitterstrukturen 7,2 mm. Weitere Einzelheiten zur Produktion und den Eigenschaften der verwendeten Textilien werden ausführlich in HAUSDING ET AL. [2] erläutert.

**Tabelle 1:** Verstärkungstextilien

**Table 1:** Reinforcement Textiles

Strukturtyp	Kettfaden		Schussfaden	
	Feinheit [tex]	Abstand [mm]	Feinheit [tex]	Abstand [mm]
008	2 x 640	7,2	2 x 640	7,2
010	2 x 640	7,2	1200	7,2
016	640	7,2	1200	7,2
019	2400	7,2	2 x 640	7,2

## 2.3 Methode der Probenfertigung

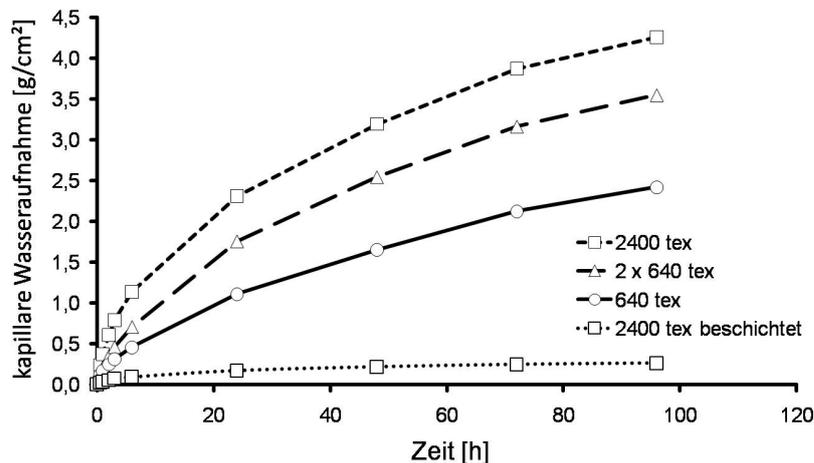
Eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung der Versuche sind planebene plattenförmige Prüfkörper. Dazu werden mittels einer speziellen Laminiertechnik rechteckige Platten mit einer Länge von 600 mm und einer Breite von 120 mm hergestellt. Abhängig von den Prüfmethode und der erforderlichen Lagenanzahl variiert die Plattenstärke zwischen 6, 12 und 20 mm. Damit keine unerwünschte Verformung (Krümmung) der Platte infolge Schwindvorgänge während der Erhärtung auftritt, werden eine exakte symmetrische Anordnung der Textillagen sowie auch eine „symmetrische“ Herstellungstechnik verwendet. Hierzu wird in zwei Formhalbschalen jeweils die gleiche Textillagenanzahl laminiert und anschließend unter Druck zusammengefügt. Dabei entweicht seitlich das überschüssige Material. Im Alter von 2 Tagen nach der Herstellung werden die Platten der Form entnommen und bis zum 7. Tag im Wasser gelagert. Anschließend erfolgt bis zum Prüfzeitpunkt eine Lagerung im Normklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte.

## 2.4 Erzeugung des Rissbildes

Zur Einstellung definierter Riss- bzw. Dehnungszustände werden die Platten einer axialen Zugbeanspruchung im Alter von 28 Tagen unterzogen. Die Last wird dabei mittels aufgeklebten Stahlplatten auf die Probe übertragen. Die Kontrolle der Verformung innerhalb des Untersuchungsbereiches von 400 mm erfolgt zusätzlich mit zwei induktiven Wegaufnehmern. Durch eine gezielte „Überdehnung“ der Platten soll sich nach Entlastung eine Rissbreite einstellen, die vergleichbar ist mit denen unter Gebrauchslast. Die mittlere Rissbreite der Probe wird berechnet in dem die bleibende Verformung auf die Anzahl der entstandenen sichtbaren Risse bezogen wird, siehe auch LIEBOLDT ET AL. [3]. In Ergänzung erfolgt eine mikroskopische Untersuchung ausgewählter Risse.

## 3 Einfluss des Textils auf die kapillare Wasseraufnahme

Das verwendete Verstärkungstextil beeinflusst im hohen Maß die kapillare Wasseraufnahme, bedingt durch das Hohlräumvolumen (Zwickel) zwischen den Filamenten innerhalb des Multifilamentgarnes. Besonders ausgeprägt ist diese Eigenschaft bei unbeschichteten Strukturen. Zur Bestimmung des Textileinflusses werden prismatischen Prüfkörper (100 mm x 50 mm) aus den 12 mm dicken Platten mit 4 Bewehrungslagen heraus geschnitten. Zunächst erfolgt eine Trocknung bei 50 °C bis zur Massekonstanz und anschließender Lagerung bei 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte für mind. 2 Tage. Im Alter von 28 Tagen wird die flächenbezogene kapillare Wasseraufnahme in Richtung des Bewehrungstextils (parallel zu Plattenoberfläche) erfasst.



**Bild 1:** Kapillare Wasseraufnahme (parallel) in Abhängigkeit der Garnfeinheit und Beschichtung

**Fig. 1:** Influence of yarn fineness and coating on capillary water absorption (parallel to the yarn)

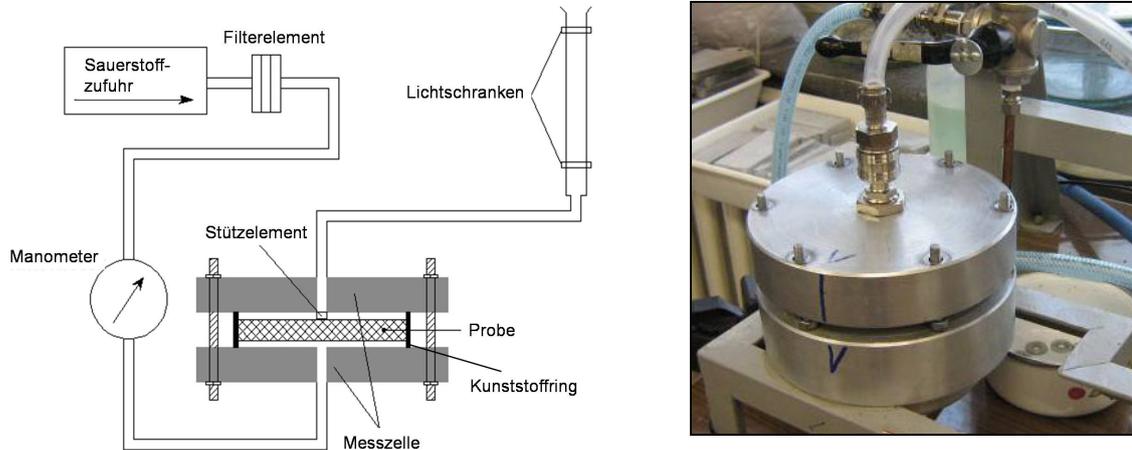
Die Erfassung der zeitabhängigen Massenzunahme erfolgt durch 5 mm tiefes Eintauchen der Saugfläche (100 mm x 12 mm) in ein Wasserbad. Die Mantelflächen werden mit einer dünnen Wachsschicht abgedichtet, um eine definierte Saugfläche zu gewährleisten. Bild 1 zeigt einen ausgeprägten Einfluss der Garnfeinheit auf die Versuchsergebnisse. Eine Steigerung der Feinheit von 640 auf 2400 tex führt bei unbeschichteten Strukturen zu einer deutlichen Erhöhung der kapillaren Wasseraufnahme. Eine Polymerbeschichtung der 2400 tex Struktur hat dagegen eine ausgeprägte Reduzierung der Wasseraufnahme zur Folge, da die kapillaren Garnzwischenräume mit dem Beschichtungsmaterial gefüllt sind. Durch die Beschichtung der Textilien kann die Wasseraufnahme auf weniger als 1/10 reduziert werden.

#### 4 Permeabilität gegenüber Sauerstoff

Die Bestimmung der Sauerstoffpermeabilität erfolgt in Anlehnung an das von GRÄF und GRUBE [4] beschriebene Prüfverfahren. Aus den bereits planmäßig vorgedehnten und gerissenen Zugplatten (Abschnitt 2.4) werden runde Prüfkörper mit einem Durchmesser von ca. 100 mm gewonnen. Die Platten sind mit 4 Textillagen (Textil 008 aus Tabelle 1) bewehrt und besitzen eine Dicke von 12 mm. Die Anzahl der durchgehenden Risse und deren Breite sowie die kumulative Risslänge werden für jeden Prüfkörper erfasst. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Permeabilität von der Materialfeuchte, erfolgt eine Vorkonditionierung durch Trocknung bis zur Massekonstanz und anschließender Lagerung im Normklima (20 °C / 65 % r. F.). Um eine korrekte Abdichtung in der Messzelle der Prüfeinrichtung zu gewährleisten, müssen die Scheiben in einen 20 mm hohen Kunststoffring mit niederviskosem Harz eingegossen werden. Damit kein Eindringen des Gießharzes in die Risse stattfindet, wird zuvor die Mantelfläche mit einem pastösen Harz beschichtet. Nach Einstellung der Ausgleichsfeuchte im Normklima erfolgt die Bestimmung des Volumenstroms bei 20 °C im Betonalter von 42 Tagen bei verschiedenen Druckstufen (10 bis 100 kPa) unter Verwendung einer Meßbürette (Gasblasenzähler). Hierzu erfolgt jeweils nach Erreichen eines stationären Zustandes (lineares Druckgefälle über die Probendicke) eine elektronische Laufzeitbestimmung einer Gasblase innerhalb einer vorgegebenen Distanz (definiertes Volumen) (Bild 2).

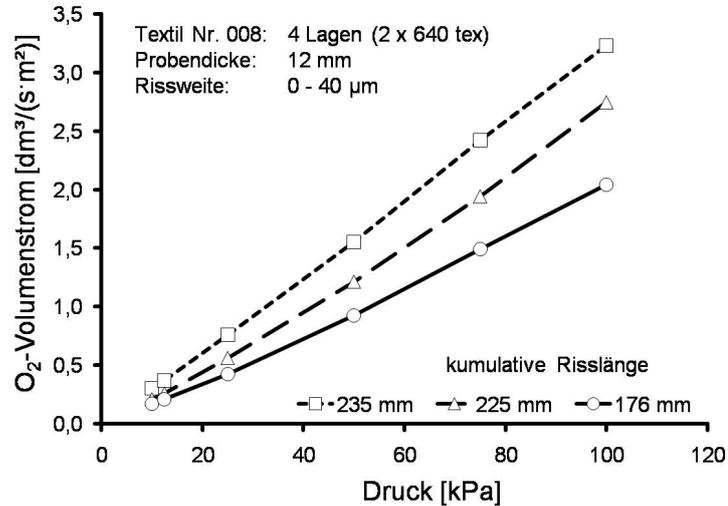
Bei den ungerissenen Prüfscheiben kann mit der Versuchseinrichtung bei einer Stärke von 12 mm keine Sauerstoffpermeabilität bestimmt werden. Durch Verringerung der Probendicke auf 6 mm (2 Textillagen) und Erhöhung des Prüfdruckes auf 250 kPa kann jedoch ein geringer Volumenstrom gemessen werden. Damit ist es möglich einen Permeabilitätskoeffizienten  $k$  der rissfreien Proben nach Hagen-Poiseuille unter den genannten Randbedingungen zu ermitteln. Für die unbewehrte Matrix beträgt dieser im Mittel  $1,00 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  und bei 2lagiger Bewehrung  $4,68 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , siehe LIEBOLDT ET AL. [3]. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille besitzt nur Gültigkeit für laminare Strömungsverhältnisse innerhalb einer rissfreien Matrix. Für eine Gegenüberstellung der vorbelasteten gerissenen Prüfscheiben ist es sinnvoll den flächenbezogenen Volumenstrom  $V/(t \cdot A)$  bei den jeweiligen Druckverhältnissen zu vergleichen, da innerhalb der Risse die Strömungsverhältnisse nicht definierbar sind. Bild 3 zeigt

eine lineare Steigerung des Sauerstoffvolumenstroms bei Erhöhung des Druckes. Mit Zunahme der kumulative Risslänge (Strömungsquerschnitt) der Prüfscheiben erfolgt ebenso eine erhebliche Steigerung des Volumenstromes.



**Bild 2:** Schematischer Versuchsaufbau (links) und Messzelle (rechts) zur Bestimmung der Gaspermeabilität

**Fig. 2:** Schematic view of testing device (left) und test cell (right) for gas permeability measurements



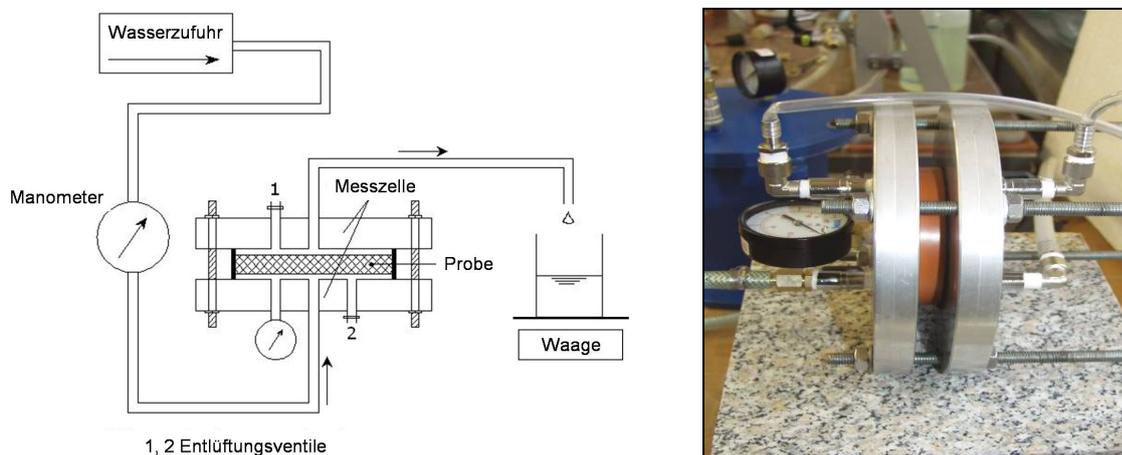
**Bild 3:** Einfluss des Druckes und der kumulativen Risslänge auf die Sauerstoffpermeabilität

**Fig. 3:** Effect of applied pressure and cumulative crack length on the oxygen volume flow rate

## 5 Permeabilität gegenüber Wasser

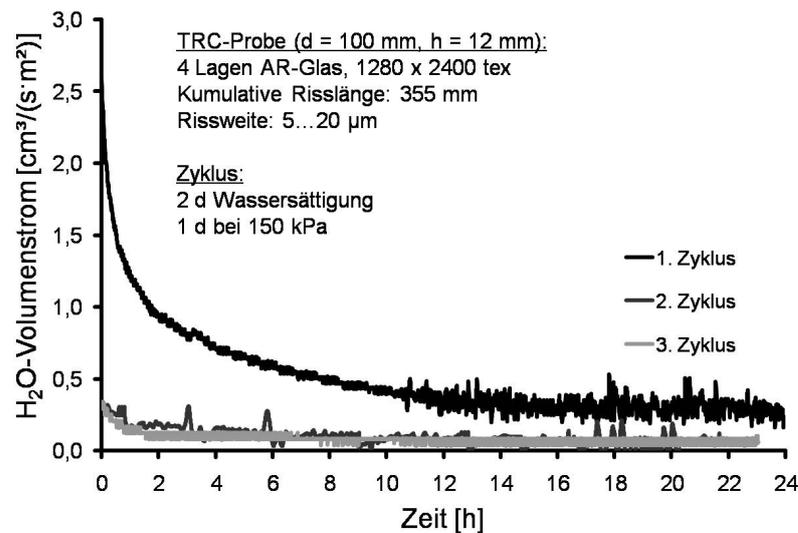
Die zur Messung der Gaspermeabilität verwendeten Prüfkörper werden nach Abschluss der Versuche auch zur Bestimmung der Wasserpermeabilität verwendet. Damit ein stationärer Zustand schneller erreicht wird, müssen die Prüfscheiben vor Versuchsbeginn unter Vakuum (48 Stunden) wassergesättigt werden. Die Prüfanordnung (Bild 4) ist vergleichbar mit der Messeinrichtung zur Gaspermeabilität. Der Versuchsaufbau stellt auf der Druckseite einen konstanten Wasserdruck zur Verfügung, während auf der gegenüberliegenden Probenseite atmosphärischer Druck herrscht. Als Medium wird destilliertes Wasser verwendet.

Die Wassermenge, welche infolge des Überdruckes von 150 kPa durch die Probe strömt, wird in einem gegen Verdunstung geschützten Gefäß aufgefangen und automatisch in frei definierbaren Zeitintervallen (gewählt 5 Minuten) bei 20 °C gemessen. Die Messung der Wasserpermeabilität wird in 3 Zyklen durchgeführt. Nach der Vorsättigung erfolgt zunächst eine Druckbeaufschlagung für 24 Stunden. Während des 1. Zyklus ist ein starker Abfall des Volumenstromes zu verzeichnen (vgl. Bild 5). Dies ist auf eine weitere Sättigung unter Druck und auf Quelleffekte der Zementsteinmatrix sowie voraussichtlich auch auf eine beginnende Selbstheilung der feinen Risse zurückzuführen. Im Anschluss erfolgt eine Lagerung für 48 Stunden ohne Druck unter Wasser. Im folgenden 2. und 3. Zyklus wird das Beanspruchungsregime entsprechend wiederholt. Dabei zeigt sich nur zu Beginn der Druckzyklen ein moderater Abfall des Volumenstromes. Erst am Ende des 2. bzw. 3. Druckzyklus tritt ein weitgehend stationärer Zustand ein (Bild 5).



**Bild 4:** Schematischer Versuchsaufbau (links) und Messzelle (rechts) zur Messung der Wasserpermeabilität

**Fig. 4:** Schematic view of testing device (left) and test cell (right) for water permeability measurements

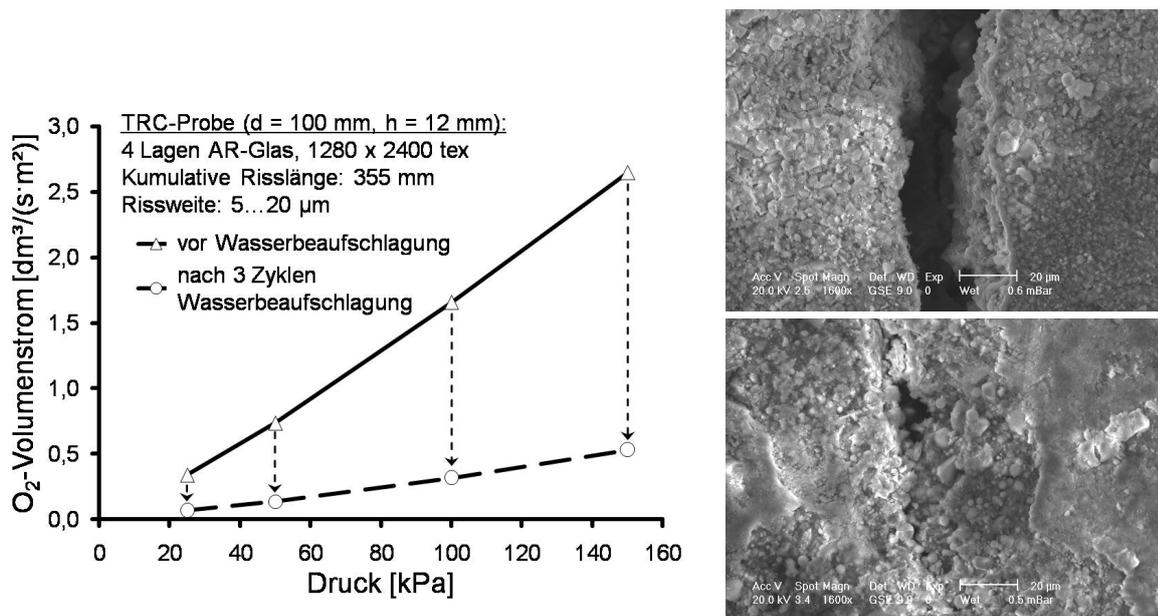


**Bild 5:** Wasservolumenstrom durch eine TRC-Probe bei 150 kPa in Abhängigkeit der Zeit

**Fig. 5:** Water flow rate through TRC under pressure of 150 kPa

## 6 Selbstheilung von Rissen

Um den Einfluss der Selbstheilungseffekte von Rissen auf die Stofftransporteigenschaften im TRC von den Quelleffekten bei der Wasserbeaufschlagung zu differenzieren, werden die Prüfscheiben nach drei Zyklen Druckwasserbeaufschlagung erneut einer Gaspermeabilitätsmessung unterzogen. Damit eine Gegenüberstellung der Transportraten vor und nach Wasserbeaufschlagung sinnvoll möglich wird, müssen die Prüfkörper durch Trocknung (siehe Abschnitt 4) erneut vorkonditioniert werden. Bild 6 zeigt im Ergebnis eine deutliche Reduzierung des  $O_2$ -Volumenstromes im Mittel auf ca. 1/5 über alle vier geprüften Druckstufen von 25 bis 150 kPa. Begleitende Untersuchungen im ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) bestätigen, dass sich neue kristalline Formationen ( $CaCO_3$ ) in den feinen Rissen mit einer Weite von 5 bis 20  $\mu m$  gebildet haben. Durch diese nachträgliche Gefügeveränderung wird der durchströmbare Rissquerschnitt verringern oder vollständig verschlossen. Dieser Effekt ist vorwiegend auf das junge Probenalter von 52 Tagen sowie auf den hohen Bindemittelgehalt in Kombination mit einem niedrigen Wasser-Bindemittel-Wert zurückzuführen. Das Bildungspotential für  $CaCO_3$  ist in der zumahlstoffreichen Matrix auf CEM III-Basis jedoch eingeschränkt. Weitere Untersuchungen von möglichen Selbstheilungseffekten bei textildbewehrtem Beton mit einem hohen Probenalter sind Gegenstand der aktuellen Forschung und liegen derzeit noch nicht vor.



**Bild 6:** Einfluss der Selbstheilung auf die Sauerstoffpermeabilität (oben: Riss vor Wasserbeaufschlagung; unten: Riss nach Wasserbeaufschlagung)

**Fig. 6:** Effect of self healing on the oxygen volume flow rate (crack before (above) and after water treatment (below))

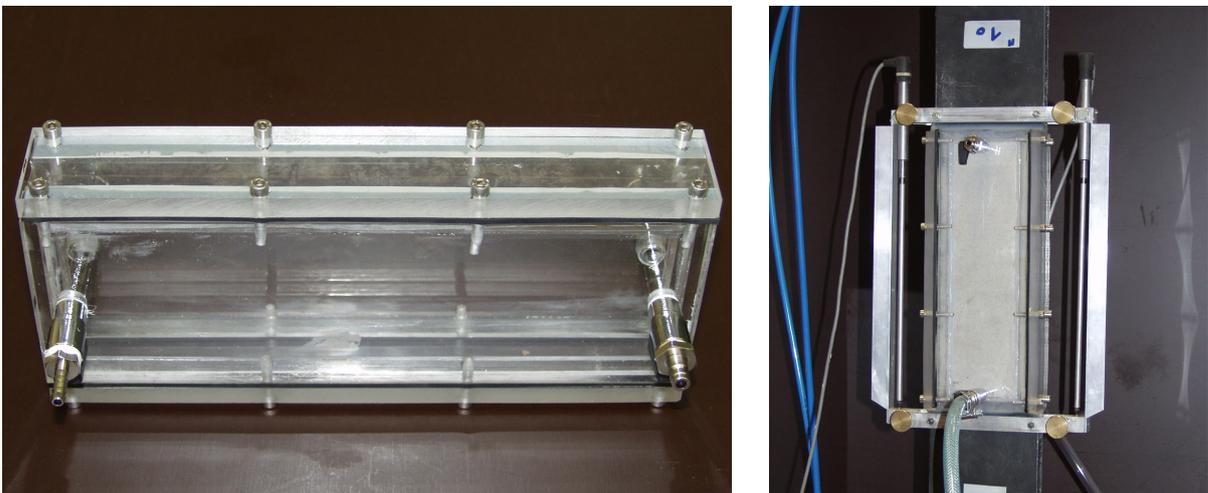
## 7 Permeabilitätsmessung unter axialer Zugbeanspruchung

Die bisherigen Voruntersuchungen zum Stofftransport fanden an gezielt vorgedehnten Prüfkörpern im entlasteten Zustand statt. Es wurde davon ausgegangen, dass sich bei entsprechender Überdehnung der Prüfkörper Risszustände einstellen, die Risszustände im typischen Gebrauchszustand zutreffend nachbilden. Der Nachweis, dass diese Annahme stimmt, ist jedoch noch zu erbringen. Des Weiteren ist der Untersuchungsbereich der Bohrkern mit 100 mm Durchmesser verhältnismäßig klein. Die Erfassung bezieht sich somit nur auf wenige Risse und führt zu unerwünschten Streuungen der Messwerte der einzelnen Proben untereinander. Gegenwärtig wird daher eine Messzelle entwickelt und getestet, die die Bestimmung der Permeabilität eines Plattenprüfkörpers direkt (in-situ) unter axialer Zugbeanspruchung gestattet (Bild 7). Damit ist es möglich zu beliebigen Dehnungszuständen den Volumenstrom während einer Belastung bzw. Verformung integral über eine größere Probenfläche (freier Verformungsbereich von ca. 300 mm) zu messen. Hierbei kann die Entwicklung der Risse und deren Aufweitung bei Erstbelastung sowie auch nach Abschluss der Rissentwicklung bei Entlastung gesondert berücksichtigt werden. Hier sollen die Versuchsanordnung und erste Messergebnisse vorgestellt werden.

## 7.1 Versuchsanordnung

Die Messzelle bildet in Verbindung mit der eingebauten Zugprobe zwei druckdichte Kammern aus. Die Kammern werden erzeugt, indem zwei Halbschalen mit elastischem Dichtmaterial (Silikon) an dem Zugprüfkörper fixiert werden. Der seitliche Abschluss wird durch zwei Laschen hergestellt. Damit ist eine kraftschlüssige Verbindung zwischen der druckbeaufschlagten Seite und der drucklosen Seite (atmosphärischer Druck) der Kammer gegeben. Die Dicke der elastischen Dichtfuge beträgt ca. 3 bis 4 mm und bietet damit eine hinreichende Scherverformung bei vernachlässigbarer Dehnungsbehinderung der Zugprobe. Die Messfläche im abgedichteten Zustand beträgt  $80 \times 280 \text{ mm}^2$  bei einer Querschnittsbreite der Probe von 100 mm und einer Probedicke von 12 bis 14 mm. Die Lasteinleitung erfolgt an den Enden der Zugprobe über aufgeklebte Stahlbleche, die unmittelbar neben der Messkammer anschließen. Die offenen Bereiche zwischen den Stahlflaschen an den Stirnkanten der Probe werden mit Kunstharz vergossen und die Fuge zur Messkammer zusätzlich mit Dichtmaterial umschlossen. Damit ist eine vollständige Abdichtung der Probe sichergestellt. Ein Stofftransport durch das Textil nach außen über die Stirnseiten der Probe ist ausgeschlossen.

Vor Einbau der Probe in die Zugprüfmaschine erfolgt eine Dichtheitsprüfung. Die Vorkonditionierung und die Bestimmung des Volumenstroms sowie der schematische Versuchsaufbau sind identisch mit der in Abschnitt 4 erläuterten Vorgehensweise (vgl. Bild 2). Die Messungen werden im üblichen Laborklima ( $20 \text{ °C} / 65 \% \text{ r. F.}$ ) durchgeführt. Als Medium wird für die Versuche Sauerstoff verwendet, damit eine Veränderung der Probe durch Karbonatisierung ausgeschlossen werden kann.



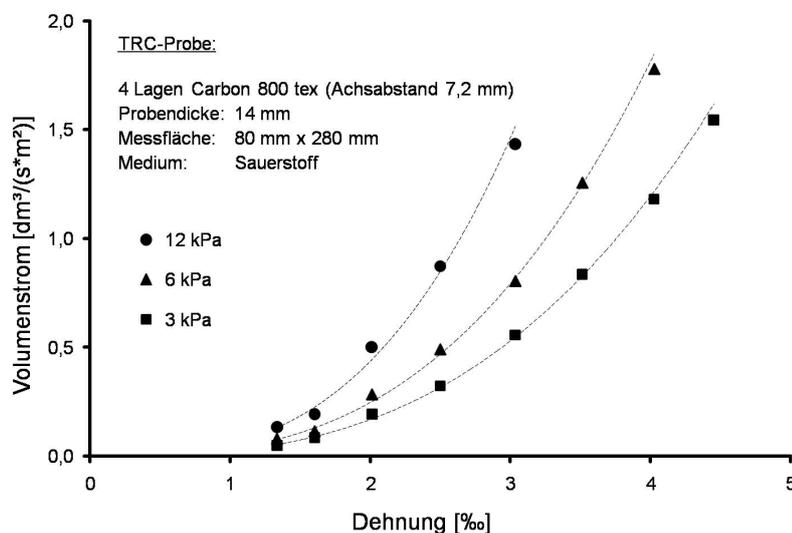
**Bild 7:** Links: Permeabilitätsmesskammer; rechts: Versuchsanordnung

**Fig. 7:** Left: Permeability measuring chamber; right: test setup

## 7.2 Auswertung der In-situ Messungen

Bild 8 zeigt die Steigerung des Sauerstoffvolumenstromes in Abhängigkeit von der Dehnung bei Relativdrücken von 3, 6 und 12 kPa am Beispiel einer Zugprobe mit 4 Lagen Carbonbewehrung. Die Kett- und Schussfäden im verwendeten Bewehrungstextil besitzen jeweils eine Garnfeinheit von 800 tex mit einem Achsabstand von 7,2 mm. Zur Verbesserung der Verbundeigenschaften ist das Textil zusätzlich mit einem Polymerbeschichtungsanteil von 30 M.-% versehen.

Die in Bild 8 dargestellten Volumenströme sind nach Abschluss der Rissbildung (Zustand IIa) ermittelt worden. Zur Einstellung des Risszustandes erfolgte zuvor eine Vorbelastung bis ca. 4,5 % Dehnung mit anschließender Entlastung. Unter Berücksichtigung der bleibenden Dehnung wurde einer zweiten Belastungszyklus ausgeführt, bei dem die Bestimmung der jeweiligen Volumenströme erfolgte. Damit ist eine Gegenüberstellung der Durchlässigkeiten bei den verschiedenen Druckstufen in Abhängigkeit der Dehnung und gleicher Rissanzahl möglich, da der zusätzlich Einfluss der Rissentstehung bei Erstbelastung weitgehend ausgeschlossen werden kann. Vor der Ermittlung der Volumenströme erfolgt die Aufbringung der Zugbeanspruchung weggesteuert mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,3 mm/min. Nach Erreichen jeder Dehnungsstufe werden mehrere Messungen des Volumenstromes in den einzelnen Druckstufen durchgeführt bis sich jeweils ein stationärer Zustand einstellt.



**Bild 8:** Sauerstoffpermeabilität in Abhängigkeit von Dehnung und Druck

**Fig. 8:** Oxygen permeability versus strain at different pressure levels

Nach Beginn der Rissbildung durch Zugbeanspruchung tritt eine ausgeprägte Erhöhung der Permeabilität ein. Mit zunehmender Dehnung sowie Steigerung des Gasdruckes erfolgt eine

potentielle Anhebung des Gasvolumenstromes. Im unbelasteten, rissfreien Zustand kann mit den im Diagramm dargestellten Druckstufen zunächst keine Permeabilität bestimmt werden. Erst durch Erhöhung des Relativdruckes auf 75 kPa ist die Ermittlung eines geringen Gasdurchflusses in Höhe von  $0,002 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  möglich. Dies entspricht einem Permeabilitätskoeffizienten  $k$  nach Hagen-Poiseuille von  $10,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  und kennzeichnet ein dichtes Betongefüge.

Weitere systematische Untersuchungen sollen Aufschluss über den Zusammenhang der Permeabilität von der dehnungsabhängigen Risscharakteristik geben. Mit einer dynamischen Rissdetektion durch Anwendung der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie soll es möglich werden eine Korrelation zwischen den Messwerten der Permeabilität für definierte Dehnungs- bzw. Risszustände herzustellen. Das Verfahren bietet neben der Erfassung des Rissbildes auch die Möglichkeit der statistischen Rissauswertung über die gesamte Probenoberfläche. Einzelheiten hierzu werden von HAMPEL und MAAS [5] in diesem Tagungsband ausführlich dargestellt.

## 8 Literatur

- [1] BUTLER, M.: *Zur Dauerhaftigkeit von Verbundwerkstoffen aus zementgebundenen Matrices und alkaliresistenten Glasfaser-Multifilamentgarnen*. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Institut für Baustoffe, 2009
- [2] HAUSDING, J.; LIEBOLDT, M.; FRANZKE, G.; HELBIG, U.; CHERIF, CH.: Compressed-loaded multi-layer composite tubes. *Composite Structures* 76 (2006), p. 47-51
- [3] LIEBOLDT, M.; BARHUM, R.; MECHTCHERINE, V.: *Effect of cracking on transport of water and gases in textile reinforced concrete*. In: T. Tanabe et.al. (eds.): *Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures – CONCREEP-8*, Taylor & Francis Group, 2009, pp. 199-205
- [4] GRÄF, H.; GRUBE, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. *beton* 36 (1986) H. 5, pp. 184-187, H. 6, pp. 222-226
- [5] HAMPEL, U.; MAAS, H.-G.: *Dynamische Rissdetektion mittels photogrammetrischer Verfahren – Entwicklung und Anwendung optimierter Algorithmen*. In Tagungsband: 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken – CTRS4, Dresden, 2009