

## Einfluss von Rissen auf den Feuchtetransport in textilbewehrtem Beton

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

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag wird die Wasserabsorption und die Wasserpermeabilität von axial vorbelasteten Prüfkörpern aus textilbewehrtem Beton (TRC) und biegebelasteten Verbundprüfkörpern (Normalbeton + TRC) im gerissenen Zustand untersucht. Durch in situ Permeabilitätsmessungen wird das dehnungsabhängige Transportverhalten im einaxialen Zugversuch beobachtet und mittels eines analytischen Modells beschrieben. Es besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit der Transportraten von Flüssigkeiten zu relevanten Risscharakteristika (Rissanzahl, Rissbreite). Weiterhin wurden Selbstheilungseffekte von feinen Rissen infolge einer zyklischen Wasserbeaufschlagung beobachtet. Die Feuchteverteilung in einer gerissenen Normalbetonprobe und einer Verbundprobe (Normalbeton + TRC) wird mit Hilfe der Neutronenstrahlradiographie zeit- und ortsaufgelöst dargestellt. Das Eindringen von Wasser wird anhand der Messungen qualitativ vorgestellt und diskutiert.

**Summary:** In this study water absorption and water permeability were tested on uniaxially preloaded, cracked specimens made of textile reinforced concrete (TRC) and cracked composite specimens (ordinary concrete + TRC) preloaded in bending. The influence of imposed strain on the permeation of water was observed in-situ by using uniaxial tensile tests and described by an analytical model. The transport values for the cracked material correlated with the cracks' characteristics (number of cracks, crack width). Furthermore, the effect of self-healing phenomena on the transport properties of TRC was considered. The distribution of water in cracked ordinary concrete and cracked composite specimens was studied by means of neutron radiography which provided with a high spatial and temporal resolution. The penetration of water is presented qualitatively and discussed.

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

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

## 1 Einleitung

Bei der Planung von Sanierungs- und Verstärkungsmaßnahmen für Beton- und Stahlbetonbauteile mit textilbewehrtem Beton sind neben Nachweis der Tragfähigkeit sowohl die lastunabhängigen als auch die lastabhängigen Einwirkungen auf die TRC-Schicht, den Altbeton sowie die im Altbeton vorliegende Stahlbewehrung zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen. Als maßgebliche Parameter sind die Beständigkeit der zementgebundenen Matrix und des Bewehrungsmaterials sowie mögliche Transportwege schadauslösender Medien in und durch die Verstärkungsschicht zu beachten. Sowohl für gerissene als auch ungerissene Bereiche der textilbewehrten Verstärkungsschicht liegen weder zum Permeations- und Diffusionsverhalten gegenüber Flüssigkeiten und Gasen noch zur Wasseraufnahme sowie zum Eindringen bzw. zur Bindung von Chloriden und Sulfaten hinreichende Erkenntnisse vor. Die bisherigen Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von TRC beschränkten sich auf die Beständigkeit von AR-Glasfasern im alkalischen Milieu und auf die Dauerhaftigkeit des Faser-Matrix-Interfaces sowie deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes, siehe z. B. BUTLER ET AL [1]. Zur Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems, bestehend aus textilbewehrter Verstärkungsschicht und zu verstärkendem Beton- bzw. Stahlbetonbauteil, sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen notwendig. Mit den folgenden ausgewählten Arbeiten sollen auszugweise die wesentlichen Transporteigenschaften von Flüssigkeiten in TRC unter der besonderen Berücksichtigung des charakteristischen Rissbildes am Beispiel von in situ Permeabilitätsmessungen und Wasserabsorptionsmessungen mittels Neutronenstrahlradiographie aufgezeigt werden.

## 2 Prüfkörperherstellung

### 2.1 Feinbetonmatrix

Bei den durchgeführten Versuchsreihen fanden zwei verschiedene Feinbetonmatrices M1 und M7 Verwendung (Tabelle 1), die im Rahmen des SFB 528 entwickelt wurden, siehe BUTLER ET AL [2]. Die Zusammensetzung resultiert aus den Dauerhaftigkeitsanforderungen der verwendeten Varianten der textilen Bewehrung. Bei Einsatz von alkaliresistentem Glas wird eine notwendige Reduzierung des pH-Wertes der Porenflüssigkeit im Feinbeton (M1) durch einen hohen Anteil an puzzolanischen Zusatzstoffen bewirkt und somit die Dauerhaftigkeit der Glasfilamentgarne und die Langzeiteigenschaften des Faser-Matrix-Verbundes positiv beeinflusst. Bei Bewehrungsmaterialien aus Carbon ist nach derzeitigem Wissensstand die Alkalität der Matrix nicht von Bedeutung. Für die Auswahl des Matrixsystems sind hier die Anforderungen gegenüber den äußeren Einwirkungen (Bsp. Frost) und verarbeitungstechnische Eigenschaften relevant. Der Matrixtyp M7 auf Basis von Portlandzement wird vorzugsweise für Verstärkungsmaßnahmen in Verbindung mit Carbonbewehrung verwendet.

Entsprechend der geometrischen Charakteristik der verwendeten Bewehrungsstrukturen kommt Feinsand mit einem Größtkorn von 1 mm zur Anwendung.

**Tabelle 1:** Zusammensetzung der Feinbetone

**Table 1:** Mix proportions of the fine concrete

Bestandteil	M1		M7	
	Massen- verhältnis [-]	Masseanteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Massen- verhältnis [-]	Masseanteil [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 32,5 R	-	-	3,00	861
CEM III B 32,5 NW-HS-NA	2,00	550	-	-
Steinkohlenflugasche	0,90	248	-	-
Mikrosilika-Suspension	0,20	55	-	-
Sand 0/1	3,00	1101	4,00	1148
Zugabewasser	0,90	248	1,00	287
Fließmittel	0,03	3,36	0,03	4,78
Summe der Stoffmassen	-	2.158	-	2.227

## 2.2 Verstärkungstextilien

Zur Bewehrung der Prüfkörper werden vier verschiedene biaxiale Textilien aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) und ein Textil aus Carbon verwendet, siehe Tabelle 2. Die Fasermenge (Bewehrungsgehalt) von Kett- und Schussfäden ist in beiden Richtungen identisch. Variable Parameter sind die Feinheit und der Beschichtungsanteil auf Basis von Styrol-Butadien. Um eine hinreichende Einbettung und Verteilung der Bewehrung zu ermöglichen, beträgt die Öffnungsweite der Gitterstrukturen in Abstimmung mit dem Größtkorn in beiden Richtungen 7,2 mm.

**Tabelle 2:** Bewehrungstextilien

**Table 2:** Textile reinforcements

Material		alkaliresistentes Glas (AR-Glas)			Carbon
Garnfeinheit / Titer	[tex]	1280	2400	2400	800
Filamentdurchmesser	[µm]	14	27	27	7
Filamentanzahl	[-]	3200	1600	1600	12000
Gitterabstand	[mm]	7,2	7,2	7,2	7,2
Flächengewicht	[g/m <sup>2</sup> ]	374	676	707	257
Polymeranteil	[M.-%]	2,7	-	4,6	9,8

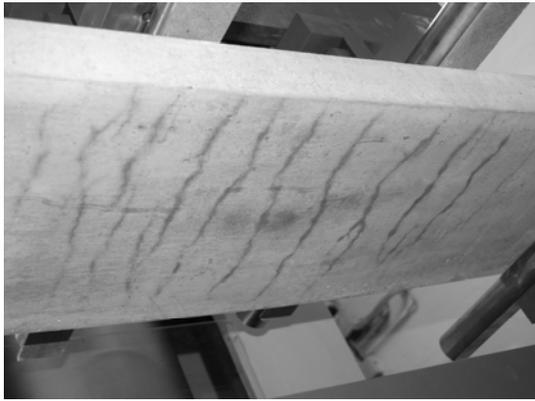
### 2.3 Plattenprüfkörper

Die Geometrie der plattenförmigen Probekörper (Dehnkörper) wurde von dem charakteristischen Schichtenaufbau üblicher Verstärkungsmaßnahmen sowie von üblichen Bauteilen aus textilbewehrtem Beton abgeleitet und bildet somit den flächigen Charakter der Textilien ab. Damit eine sichere und zerstörungsfreie Handhabung der Proben sichergestellt ist, werden alle Varianten mit 4 Verstärkungslagen bei einer mittleren Dicke von ca. 14 mm und dem minimalen herstellungsbedingten Lagenabstand hergestellt.

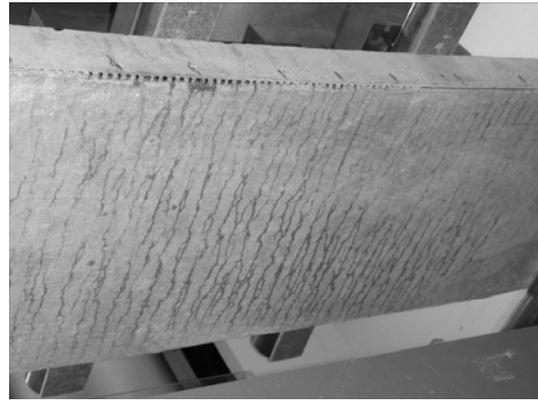
Eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung der Permeabilitätsversuche unter Last sind planebene Prüfkörper mit beidseitig definierter Oberflächenqualität und hinreichender Formstabilität, an denen das Rissbildungsverhalten untersucht sowie planmäßig Risse eingestellt werden können. Dazu werden mittels einer speziellen Laminiertechnik rechteckige Platten mit einer Länge von 600 mm und einer Breite von 100 mm hergestellt. Die Anordnung der Bewehrung erfolgt symmetrisch und parallel zur Grund- und Deckfläche. Details zum Herstellungsverfahren und zur Probenpräparation werden von LIEBOLDT ET AL [3] beschrieben.

### 2.4 Verbundprüfkörper

Zur Untersuchung des Wassertransportverhaltens an mit TRC verstärkten Stahlbetonbauteilen wurden Verbundkörper mit 4lagiger Bewehrung (hier Carbon) analog dem Aufbau der Dehnkörper für die Permeabilitätsuntersuchungen gefertigt. Hierzu wurden stahlstabbewehrte Betonplatten aus Normalbeton mit 300 mm Breite, 1000 mm Länge und einer Dicke von 60 mm im 4-Punkt-Biegezugversuch durch eine gezielte Überdehnung vorgeschädigt, so dass sich nach dem Entlasten der Platten eine für Stahlbeton typische Rissöffnung von 100 bis 200  $\mu\text{m}$  bei einem Abstand von 60 bis 75 mm auf der Zugseiten einstellte (Bild 1a). Anschließend erfolgten die Vorbereitung des Untergrundes mittels Trockenfeststoffstrahlen und der Auftrag der Verstärkungsschicht im Handlaminierverfahren. Durch die Freilegung des Korngerüsts im Altbeton konnte ein ausreichender Kraftübertrag in der Fuge zwischen Alt- und Feinbeton gewährleistet werden. Nach einer Erhärtungszeit von 28 Tagen wurden die verstärkten Platten erneut einer Biegebelastung unterzogen und somit ein charakteristisches Rissbild eingestellt. Dabei wiesen die Risse im entlasteten Zustand in der Verstärkungsschicht eine Breite von unter 20  $\mu\text{m}$  auf. Der Abstand von 7 bis 14 mm entspricht dabei weitgehend dem Gitterabstand (Schussfäden) der Textilien (Bild 1b). Nachfolgend wurden aus diesen Verbundplatten prismatische Prüfkörper für weitere Untersuchungen zum Transportverhalten gewonnen.



(a) Erstbelastung der Stahlbetonplatte  
(a) Preloading of RC slab



(b) Belastung der TRC-verstärkten,  
vorbelasteten Stahlbetonplatte  
(b) Loading of preloaded RC slab  
subsequently reinforced with a TRC layer

**Bild 1:** Erzeugung der Risse im 4-Punkt-Biegezugversuch

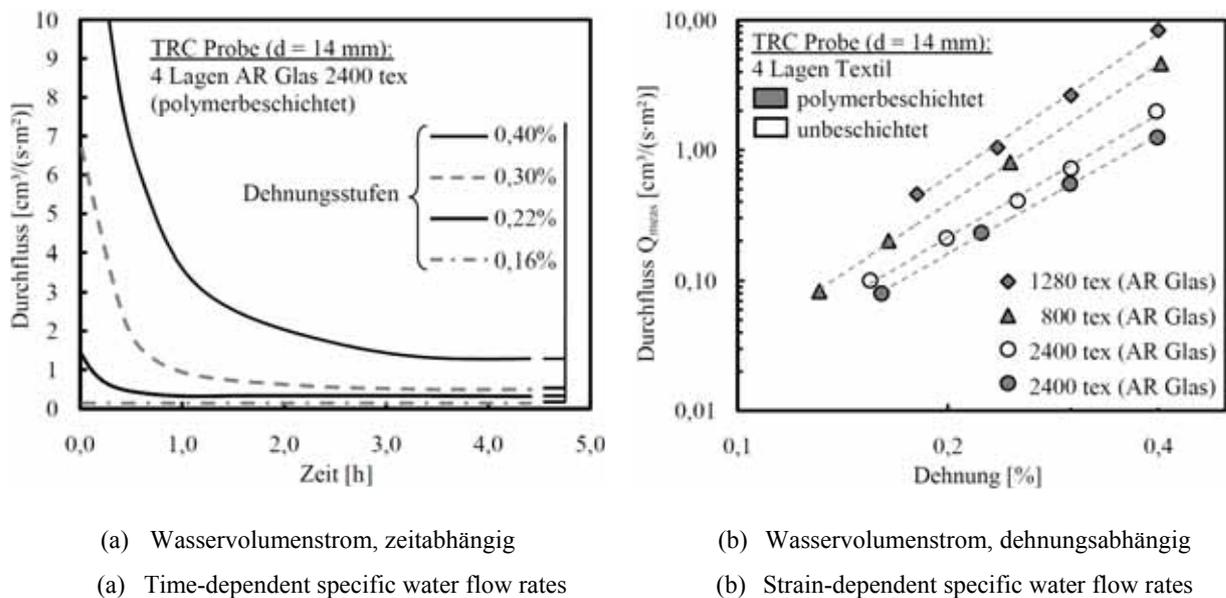
**Fig. 1:** Inducing cracks in the four-point bending test

### 3 Permeabilitätsuntersuchungen unter einaxialer Zugbelastung

Die in situ Permeabilitätsmessungen an Dehnkörpern werden ab einem Alter von 56 Tagen ausgeführt, damit die Hydratation des Bindemittels mit dem Anmachwasser weitgehend erfolgt ist. Eine Vergleichbarkeit der Proben, insbesondere bei den Selbstheilungsprozessen, wird somit gewährleistet. Die speziell entwickelte Messzelle umschließt den Dehnkörper vollständig und bildet dadurch zwei druckdichte Kammern aus. Die Abdichtung des Dehnkörpers erfolgt allseitig mit einer elastischen Dichtfuge (Silikon) von 3 bis 4 mm Dicke und bietet damit eine hinreichende Scherverformung bei vernachlässigbarer Dehnungsbehinderung. Die Messfläche im abgedichteten Zustand beträgt ca. 80 x 280 mm<sup>2</sup> bei einer Querschnittsbreite der Probe von 100 mm und einer Probendicke 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 Stahllaschen an den Stirnkanten der Probe werden mit Kunstharz vergossen und die Fuge zur Messkammer zusätzlich mit Dichtmaterial umschlossen. Damit ist eine vollständige Abdichtung des Dehnkörpers sichergestellt. Ein Stofftransport durch das Textil nach außen über die Stirnseiten der Probe ist ausgeschlossen. Weitere Details können [4] entnommen werden.

Durch Vorbelastung des Dehnkörpers bis 0,5 % Dehnung wird zunächst ein weitgehend abgeschlossenes und für das jeweilige Textil charakteristisches Rissbild erzeugt. In einem weiteren Belastungszyklus erfolgt die Bestimmung des Wasservolumenstroms durch die Probe unter Last zu verschiedenen Dehnungsstufen bei einer Druckdifferenz von 100 kPa. Damit kann die Abhängigkeit der Wasserpermeabilität von der Dehnung bei konstanter Rissanzahl

beurteilt werden. Eine Steigerung der Dehnung bewirkt somit nur eine Aufweitung der bereits vorhandenen Risse. Die Risscharakteristik wird nach der Vorbelastung (Rissanzahl) sowie Abschluss der Messung (Rissanzahl, Rissweite) aufgenommen. Zur Erreichung eines weitgehend stationären Wasservolumenstroms wird infolge fortschreitender Sättigung und Quellprozesse der Zementsteinmatrix eine Vorsättigung der Probe unter Druck für 24 Stunden sowie eine weitere Anpassungszeit von 2 bis 4 Stunden in den jeweiligen Dehnungsstufen erforderlich. Hierbei werden mit zunehmender Dehnung auch längere Anpassungszeiten notwendig (siehe Bild 2a).



**Bild 2:** Wasservolumenstrom durch TRC-Probe bei 100 kPa für verschiedene textile Bewehrungen

**Fig. 2:** Water flow rates of TRC with different textile reinforcements, induced pressure 100 kPa

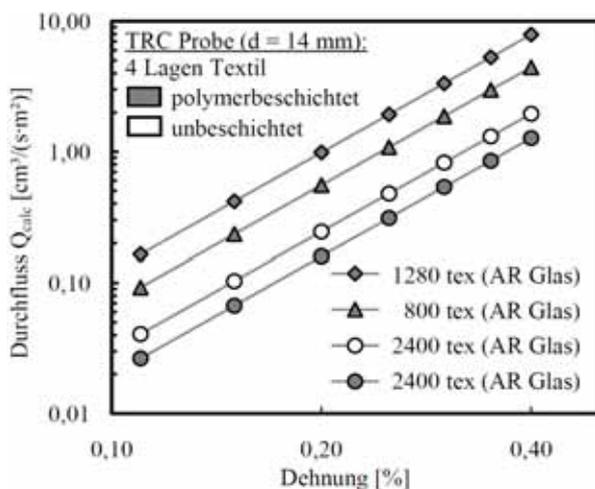
Bild 2b zeigt den Einfluss der Dehnung auf die Wassertransportraten in TRC mit verschiedenen Verstärkungstextilien. Grundsätzlich bewirkt eine Dehnungssteigerung (Rissweitung) eine überproportionale Zunahme der Permeabilität. Die Proben mit einer feineren Risscharakteristik (Bsp. bei TRC-Proben mit 2400 tex), hervorgerufen durch einen höheren Bewehrungsgehalt und besseren Faser-Matrix-Verbund (Textilbeschichtung), weisen geringere Durchflussraten bei gleicher Dehnung auf. Infolge der höheren Rissanzahl werden die mittleren Rissweiten stark reduziert. Dies wirkt sich bedeutsam auf die Verringerung des Volumenstroms aus, da die Rissweite einen maßgeblichen Einfluss (durch die 3. Potenz) gegenüber den anderen Parametern (Bsp. Probendicke) besitzt.

Eine Quantifizierung der Durchlässigkeit von TRC in Abhängigkeit der Dehnung bzw. mittleren Rissweite kann mit Hilfe eines analytischen Modells beschrieben werden. Das Modell basiert auf der Annahme einer laminaren Strömung zwischen zwei glatten parallelen Wan-

dungen (Gleichung (1)). Infolge von Mikro- und Makrorauigkeiten der Risswandungen, Unstetigkeiten der Rissweite sowie Hindernissen im Fließquerschnitt (Bruchpartikel, Faserbewehrung etc.) und ggf. fortschreitender Sättigung (Quellung) unter Druck ist der tatsächliche Durchfluss  $Q_{meas}$  jedoch wesentlich kleiner als der theoretisch berechnete Durchfluss  $Q_{calc,th}$ . Zur Erfassung der Einflüsse des charakteristischen Fließquerschnittes wird der Durchflussbeiwert  $\xi$  eingeführt. Dieser Kennwert wurde für jede Bewehrungskonfiguration bestimmt und bildet das Verhältnis  $Q_{meas}/Q_{calc,th}$  ab. Er variiert zwischen  $0,28 \cdot 10^{-3}$  und  $0,75 \cdot 10^{-3}$ . Der Volumenstrom kann wie folgt nach Gleichung (2) beschrieben werden:

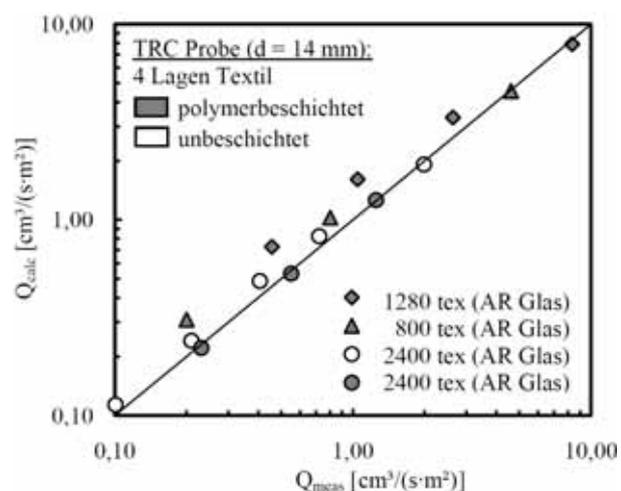
$$q = \frac{\Delta p \cdot b \cdot w^3}{12 \cdot \eta \cdot d} \quad (1) \quad Q_{calc} = \xi \cdot \frac{\Delta p \cdot b \cdot n \cdot (\varepsilon \cdot l_s)^3}{12 \cdot \eta \cdot d \cdot n^3 \cdot A} \cdot 10^6 \quad (2)$$

$q$ :	Durchfluss (idealisiert)	[m <sup>3</sup> /s]	$d$ :	Dicke der Probe	[m]
$Q_{calc}$ :	berechneter Durchfluss	[cm <sup>3</sup> /(s·m <sup>2</sup> )]	$\varepsilon$ :	Dehnung	[-]
$\Delta p$ :	Druckgradient	[N/m <sup>2</sup> ]	$l_s$ :	Länge des Verformungsbereiches	[m]
$b$ :	Risslänge	[m]	$n$ :	Rissanzahl	[-]
$b \cdot n$ :	Risslänge summiert	[m]	$\eta$ :	Viskosität (Wasser)	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$w$ :	Rissweite	[m]	$A$ :	Prüffläche	[m <sup>2</sup> ]
			$\xi$ :	Durchflussbeiwert	[-]



**Bild 3:** Berechneter dehnungsabhängiger Wasserdurchfluss bei 100 kPa

**Fig. 3:** Calculated strain-dependent specific water flow, pressure 100 kPa



**Bild 4:** Vergleich zwischen  $Q_{meas}$  und  $Q_{calc}$

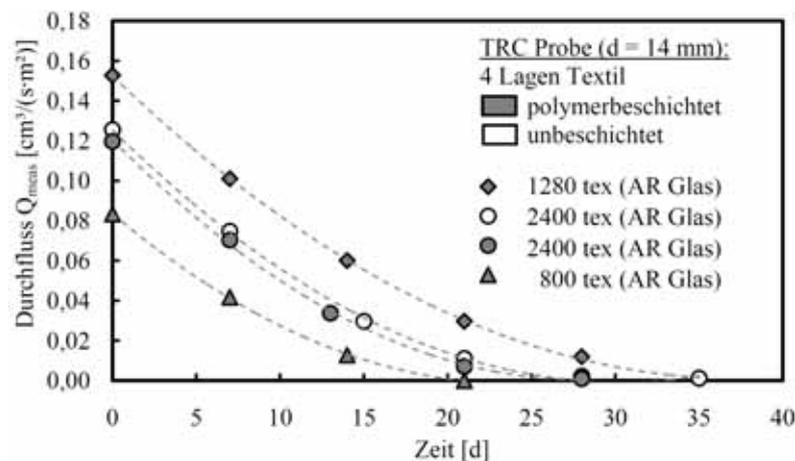
**Fig. 4:** Relationship between  $Q_{meas}$  and  $Q_{calc}$

Bild 3 zeigt die berechneten und mit  $\xi$  angepassten Wasservolumenströme  $Q_{calc}$  als eine Funktion der Dehnung für die verschiedenen TRC-Prüfkörper. Der Vergleich zwischen den gemessenen Volumenströmen  $Q_{meas}$  und den berechneten Volumenströmen  $Q_{calc}$  in Bild 4 weist

eine gute Übereinstimmung auf. Auf Grund den Annahmen (Bsp. mittlere Rissbreite) kann dennoch keine vollständige Übereinstimmung erreicht werden (siehe Werte für die 1280 tex Variante). Eine wesentliche Ursache besteht in den Streuungen der tatsächlichen Rissbreiten der Probe und ebenso in der ungleichen Rissbreitenentwicklung bei Dehnungssteigerung.

#### 4 Wechselwirkung zwischen Matrix und Wasserbeanspruchung

Im Anschluss an die Wasserpermeabilitätsuntersuchungen in Abschnitt 3 wurden die Proben im gesättigten Zustand in der Messzelle belassen und in Zeitschritten von 7 Tagen erneut einer Wasserdruckbeaufschlagung von 100 kPa ausgesetzt. Bild 5 zeigt die Reduzierung der Wassertransportraten der gerissenen TRC-Proben mit fortschreitender Zeit. Bereits nach 14 Tagen wurde bei allen Proben der Volumenstrom auf unter 50 % des Ausgangswertes herabgesetzt und nach 21 bis 35 Tagen konnte kein Durchfluss mehr bestimmt werden. Die Proben mit einer niedrigeren Textilfeinheit (1280 tex) sowie auch jene Proben ohne Beschichtung wiesen anfänglich größere Rissbreiten auf und benötigten zur Selbstheilung mehr Zeit. Bedingt durch die im Vergleich geringsten Rissbreiten zeigte die mit Carbondtextil bewehrte Probe die schnellste Selbstabdichtung.



**Bild 5:** Zeitabhängige Reduzierung der Wassertransportraten durch gerissenen TRC

**Fig. 5:** Time-dependent reduction of the water transport trough cracked TRC

Die dominierende Ursache der Selbstabdichtung ist irreversible Querschnittsreduzierung der Risse durch die Neubildung kristalliner Strukturen. Größere Risse werden vorwiegend durch die Bildung von Calciumcarbonat gefüllt. Weiterhin sind infolge des hohen Anteils von Zement und puzzolanischen Zusatzstoffen sowie des niedrigen Wasserzementwerts in der Matrix noch unhydratisierte Bindemittelbestandteile vorhanden, die durch die Mikrorissbildung freigelegt werden. Bei Wasserzufuhr erfolgt eine Nachhydratation und das Gefüge wird ver-

dichtet. Diese Ursache der Abdichtung scheint vor allem bei Mikrorissen mit Weiten  $< 10 \mu\text{m}$  bedeutsam. Zur Verifikation der Selbstheilung und Ausschluss von Quelleffekten der Matrix wurden abschließend Sauerstoffpermeabilitätsmessungen an den getrockneten Proben durchgeführt und die Durchflussraten mit denen vor Erstbelastung verglichen. Die Volumenströme reduzierten sich auf ein Minimum, vergleichbar mit den Werten der jeweils ungerissenen Probe vor dem ersten Belastungszyklus, siehe Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Spezifische Sauerstoffpermeabilität  $k$  von ungerissenen TRC-Proben sowie gerissenen TRC-Proben nach Wasserbeaufschlagung

**Table 3:** Specific oxygen permeability  $k$  of uncracked TRC specimens and cracked TRC specimens after water treatment

Garnmaterial		AR-Glas			Carbon
Garn / Textilfeinheit	[tex]	1280 P*	2400 P*	2400	800
k – ungerissen	$[\cdot 10^{-17} \text{ m}^2]$	2,42	1,64	4,70	2,06
k – nach Wasserlagerung	$[\cdot 10^{-17} \text{ m}^2]$	2,72	1,82	5,32	2,27

\*mit Polymerbeschichtung

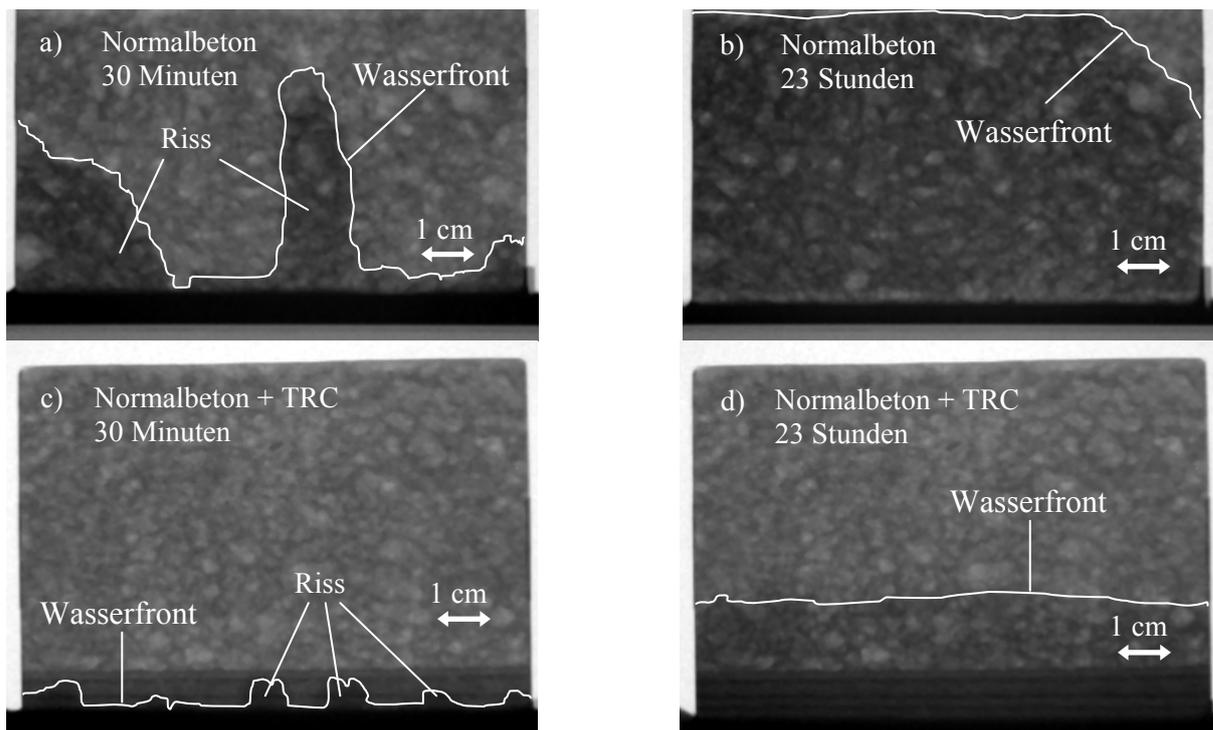
## 5 Kapillare Wasseraufnahme an Verbundproben

Der effektivste Transportmechanismus für schadauslösende Medien ist der Kapillartransport in Rissen sowie in den Garnzwischenräumen der Verstärkungstextilien. Dieser Einfluss wurde am Beispiel von gerissenen vorbelasteten TRC-Prüfkörpern im kapillaren Saugversuch orthogonal zur Plattenoberfläche von LIEBOLDT ET AL [5] aufgezeigt. Bei gleichartig konfigurierten Plattenprüfkörpern führte eine Polymerbeschichtung von ca. 5 M.-% zu einer Halbierung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten. Bei Proben mit einer bleibenden Dehnung von 1,1 ‰ bis 1,3 ‰ (100 bis 117 Risse/Meter) im gerissenen Zustand wurde eine Erhöhung der Wasseraufnahme um das 1,8-Fache im Vergleich zur unbelasteten Probe festgestellt.

Zum Nachweis der Feuchtebewegung am typischen Beispiel eines mit TRC verstärkten Stahlbetonelementes wurde mit Hilfe der Neutronenradiographie am PAUL-SCHERRER-INSTITUT das kapillare Eindringen von Wasser qualitativ und quantitativ als Funktion der Zeit an Verbundproben (siehe Abschnitt 2.4) verfolgt. WITTMAN ET AL [6] hatte bereits früher nachgewiesen, dass die Neutronenradiographie eine besonders leistungsstarke und empfindliche Methode mit hoher Ortsauflösung zum Nachweis des Feuchtigkeitsgehaltes und der Feuchtigkeitsbewegung ist. Die experimentellen Grundlagen werden von ZHANG ET AL [7] beschrieben.

Im Folgenden soll der kapillare Feuchte-transport in einer gerissenen Normalbetonprobe und einer verstärkten und vorbelasteten (gerissenen) Verbundprobe (Normalbeton + TRC) gegenüber gestellt werden. In Bild 6a wird deutlich, dass das Wasser sehr schnell in die großen

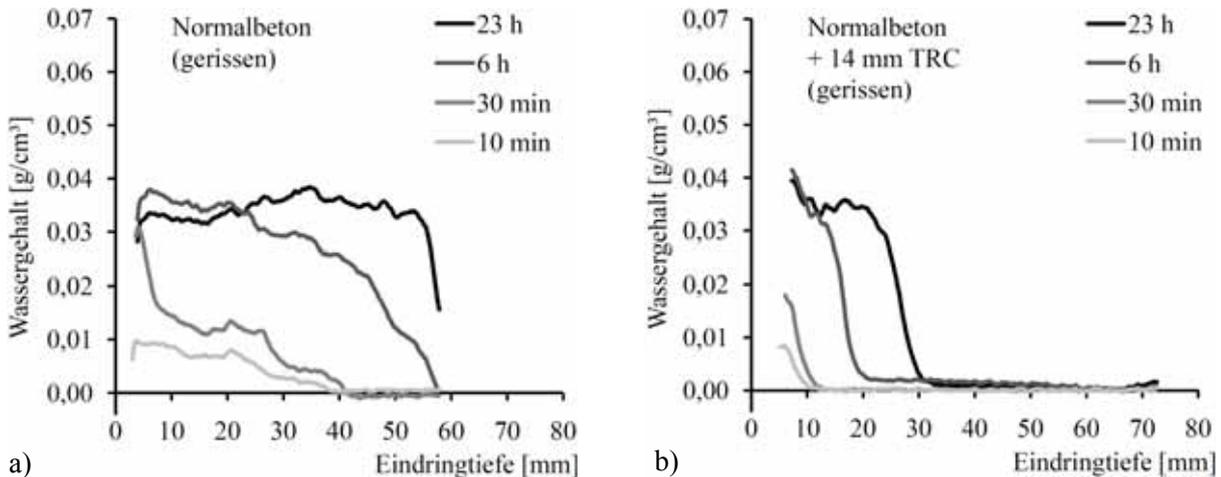
Risse (ca.  $100\ \mu\text{m}$ ) der Normalbetonprobe eindringt und von dort aus eine weitere Ausbreitung über das Porensystem in kurzer Zeit erfolgt. Nach 23 Stunden (Bild 6b) ist die Normalbetonprobe fast vollständig über die Höhe von 60 mm gesättigt. In der gerissenen Verbundprobe hingegen ist das Rissystem der TRC-Verstärkungsschicht ( $< 20\ \mu\text{m}$ ) und ebenso das Porensystem in der Matrix wesentlich feiner. Daraus resultiert eine Verlangsamung der kapillaren Saugvorgänge. Zunächst werden die feinen Risse gefüllt und die TRC-Finbetonmatrix über die Saugfläche und vom Riss aus (horizontal) mit Wasser kapillar gefüllt (Bild 6c). Nach ca. 6 Stunden erreicht die Wasserfront mit einer Höhe von 14 mm die Grenzfläche zum Normalbeton. Dort findet hauptsächlich eine Ausbreitung über das Porensystem statt. Die vorhandenen Risse im Normalbeton besitzen für den Saugvorgang in der Verbundprobe kaum Bedeutung. Das kapillare Saugvermögen der großen Risse kann nicht aktiviert werden, da nicht hinreichend Wasser durch die Verstärkungsschicht zur Verfügung gestellt wird. Insgesamt wird in der gerissenen Verbundprobe der kapillare Saugprozess bzw. Sättigungsvorgang durch die TRC-Schicht deutlich verzögert. Nach 23 Stunden erreicht die Wasserfront in Bild 6d eine Höhe von ca. 1,5 cm im Normalbeton. Damit beträgt die Saughöhe nur ein Viertel in Relation zur unverstärkten Normalbetonprobe.



**Bild 6:** Wasseraufnahme von gerissenen Normalbeton (a, b) und einer TRC-verstärkten gerissenen Normalbetonprobe (c, d)

**Fig. 6:** Water uptake of cracked ordinary concrete (a, b) and cracked ordinary concrete specimen strengthened with a TRC layer (c, d)

Die quantitative Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Feuchteprofile als Mittelwert über die Probenbreite von 100 mm zeigt Bild 7. Hier werden die qualitativen Aussagen des Bildmaterials bestätigt. Auffällig in Bild 7a ist, dass die Wasserfront der gerissenen Normalbetonprobe bereits nach 6 Stunden fast die Oberseite der Probe erreicht und bereits nach 23 Stunden nahezu eine Sättigung der gesamten Probe eingetreten ist.



**Bild 7:** Feuchteprofile von Normalbeton (a) und TRC verstärkten Normalbeton (b) – gerissene Proben

**Fig. 7:** Progress of water front through RC (a) and RC covered with TRC (b) – cracked specimens

## 6 Schlussfolgerungen

Der Transport von Flüssigkeiten durch die Risse und das Porensystem der Zementsteinmatrix besitzt eine wesentliche Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen. Insbesondere bei Einsatz von TRC zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung muss dies Beachtung finden. Aus den voran betrachteten Untersuchungen kann folgendes zusammenfassend festgehalten werden:

- Durch den Einsatz von TRC kann eine im Vergleich zum Normalbeton feinere Rissverteilung erzielt werden, die eine Reduzierung der Feuchtetransportraten zur Folge hat.
- Durch in situ Wasser-Permeabilitätsmessungen an TRC unter einaxialer Zugbelastung wurde gezeigt, dass bei einer Dehnungssteigerung eine überproportionale Zunahme der Permeabilität infolge der Rissaufweitung stattfindet. Die Erhöhung der Textilfeinheit (Bewehrungsgrad) und die Steigerung des Faser-Matrix-Verbundes durch eine Polymerbeschichtung der Textilien führen zu einem feineren charakteristischen Rissbild. Durch eine Erhöhung der Rissanzahl in der Verstärkungsschicht werden die Rissbreiten reduziert und daraus resultierend die Transportraten merklich verringert. Ein analytisches Modell erlaubt die Beschreibung des Einflusses der Dehnung auf die Wassertransportraten.

- Durch Selbstheilung von Rissen im TRC bei Wasserbeaufschlagung werden die Transportraten stark vermindert. Nach spätestens 7 Wochen Wasserkontakt konnte kein Volumenstrom mehr gemessen werden. Begünstigend sind die sehr feinen Rissweiten und das für TRC typische hohe Bindemittelvolumen.
- Neutronenstrahluntersuchungen an gerissenen Verbundproben (Normalbeton + TRC) zur zeitlichen Entwicklung der Feuchteverteilung zeigten eine Verzögerung der Wasseraufnahme im Vergleich zum unverstärkten Normalbeton. Bedingt durch die kleineren Rissweiten und die feinere Porenstruktur der TRC-Schicht wird die Saugwirkung der angrenzenden Risse im Normalbeton durch die TRC-Schicht unterbrochen.

## 7 Literatur

- [1] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Durability of textile-reinforced concrete made with AR glass fibre - Effect of the matrix composition. *Materials and Structures* 43 (2010), pp. 1351 – 1368
- [2] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) pp. 221-231
- [3] LIEBOLDT, M., BARHUM, R., MECHTCHERINE, V.: Effect of cracking on transport of water and gases in textile reinforced concrete. In: TANABE ET.AL. (Hrsg.): *Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures – CONCREEP-8*, Taylor & Francis Group, London, 2008, pp. 199-205
- [4] MECHTCHERINE, V., LIEBOLDT, M.: Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* (2011), doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.04.001 (in print)
- [5] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Multiple cracking in textile reinforced Concrete and its effect on the transport of water and gases. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructure – SLD 2010*, 4-6 October 2010, Delft, The Netherlands, RILEM Publications S.A.R.L., 2010, pp.107-114
- [6] WITTMANN, F. H., ZHANG, P., ZHAO, T.: Eine zerstörungsfreie Messmethode zum Studium des Eindringens von Flüssigkeiten in den Beton. In: *Tagungsbericht der 17. Internationalen Baustofftagung (ibaustil)*, F.A. Fingerinstitut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2009, Bd. 1, pp. 1-0969 – 1-0974
- [7] ZHANG, P., WITTMANN, F. H., ZHAO, T., LEHMANN, E. H.: Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete. *Physica B* 405 (2010), pp. 1866-1871