

# **Transport von Flüssigkeiten und Gasen in Textilbeton**

## **Transport of liquids and gases in Textile Reinforced Concrete**

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
eingereichte

### **DISSERTATION**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Matthias Lieboldt  
aus Dresden

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. V. Mechtcherine,  
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. H.-W. Reinhardt.

### **Kurzfassung und Thesen Abstract and Theses**

# Kurzfassung

Textilbewehrter Beton (engl. Textile Reinforced Concrete – TRC) ist ein Verbundwerkstoff, bestehend aus textilen Gelegen mit hochleistungsfähigen Multifilamentgarnen, die in eine feinkörnige zementgebundene Betonmatrix eingebettet sind. Die Anwendungsgebiete sind die Verstärkung und Instandsetzung bestehender Beton- und Stahlbetonkonstruktionen sowie die Herstellung von dünnwandigen und leichten Bauelementen. Bei Aktivierung der außerordentlichen Tragwirkung der Textilbewehrung weisen Bauteile und Verstärkungsschichten aus TRC ein multiples Rissbild auf. Die sehr feinen Rissweiten im Gebrauchszustand können hinsichtlich der Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit von Vorteil sein. Werden jedoch auch die geringen Dicken der Bauteile und Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton, die hohe Sprödigkeit der Matrix und mögliche Transportvorgänge in den Multifilamentgarnen berücksichtigt, muss diese Erwartungshaltung hinterfragt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die grundlegenden Mechanismen des Feuchte- und Gastransportes durch TRC mit Hinblick auf typische betriebsbedingte Expositionen untersucht. Besondere Beachtung galt dem Stofftransport in den zahlreichen, feinen Rissen auf Zug belasteter TRC-Schichten unter Berücksichtigung von Selbstheilungseffekten der Matrix. Es sollte hierbei die Frage beantwortet werden, in wie weit durch das Aufbringen einer TRC-Schicht bei bautechnischen Instandsetzungen und Verstärkungen von Beton- und Stahlbetonbauteilen das Durchdringen von Flüssigkeiten und Gasen vermindert werden kann. Mit den gewählten Variationsparametern konnte ein umfassendes Bild über das spezifische Materialverhalten gewonnen werden. Sie schlossen die Art der textilen Bewehrung, die Matrixzusammensetzung sowie die Rissbreite und -verteilung ein.

An vorbelasteten Verbundkörpern, welche entsprechend ihres Aufbaues einen typischen Anwendungsfall für eine TRC-Verstärkung darstellen, wurde das Verhalten gegenüber ausgewählten Expositionen untersucht. Dies hatte zum Ziel das Frost-Tausalzverhalten, den Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chlorid- und Sulfationen sowie den Kapillartransport durch Risse zu beurteilen. Der Frost-Tausalzwiderstand erwies sich mit den gewählten Matrixzusammensetzungen ohne Luftporenbildner als unzureichend und erfordert eine noch entsprechende Optimierung. Indessen konnte bei den Untersuchungen zum Penetrationsverhalten gegenüber Schadionen selbst nach Einlagerungszeiten von bis zu neun Monaten keine bedeutsame Erhöhung der Schadionenkonzentration im verstärkten Bauteil festgestellt werden. Mit Hilfe der Neutronenradiographie wurde an vorgeschädigten Normalbetonproben und an TRC verstärkten Verbundproben die Feuchtebewegung mit hoher Ortsauflösung im kapillaren Saugversuch qualitativ und quantitativ als Funktion der Zeit verfolgt. Hierbei wurde deutlich, dass die im Altbeton des verstärkten Bauteils vorhandenen Risse kaum Bedeutung für den Saugvorgang besitzen. Das wesentlich feinere Riss- und Porensystem der überdeckenden TRC-Schicht unterbindet das kapillare Saugvermögen der großen Risse im Untergrund, da nicht hinreichend Wasser durch die Verstärkungsschicht zur Verfügung gestellt wird. Die feine Risscharakteristik führt in Verbindung mit den vorliegenden Matrixzusammensetzungen bei Wasserbeaufschlagung zu ausgeprägten Selbstheilungseffekten. Die Risse werden vorwiegend durch Neubildung von Calcit verschlossen, so dass erneuter bzw. weiterer Wasserzutritt erheblich erschwert wird. Trotz lastbedingter Rissbildung kann TRC die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen verbessern, da er Transportprozesse in das Bauteilinnere erheblich vermindert.

# Abstract

Textile reinforced concrete (TRC) is a composite material consisting of fine-grained concrete and embedded textile reinforcement made of high-performance filament yarns (e.g., glass, carbon). This material can be used both for new structures and for the strengthening or repair of structural elements made of concrete or reinforced concrete. Layers made of TRC form multiple cracks if the extraordinary tensile strength of the textile reinforcement is activated. The fine crack distribution in the reinforcing TRC layer under service conditions leads to higher tightness and durability in comparison with cracked ordinary concrete. However, the small thickness of both structural components and strengthening layers made of TRC, the high brittleness of the matrix, and possible transport processes in the multifilament yarns must be considered. This assertion of durability has to be proven.

In this thesis the basic mechanisms of moisture and gas transport through textile-reinforced concrete with a view to typical operational exposures were examined. Particular attention was paid to mass transport through the numerous fine cracks of textile-reinforced concrete under load, taking into account the self-healing effects in the matrix. It should answer the question as to whether penetration by liquids and gases can be reduced by the application of a TRC-layer in the case of repair and strengthening of concrete structures. A comprehensive view of the specific material behavior could be obtained with selected variation parameters. They included the type of the textile reinforcement (alkali-resistant glass, carbon, textile coating), the matrix composition, and the crack width and distribution.

Material behavior in relation to selected exposures was examined on preloaded composite specimens of ordinary concrete and TRC, which because of their makeup constitute typical applications for TRC-strengthening. The aim was to assess the freeze-thaw behavior, the resistance to penetration of chloride and sulfate ions, and the capillary transport through the cracks. In freeze-thaw-tests with a selected matrix composition, an insufficient resistance was observed and an appropriate optimization was required. However, in the investigations on penetration of harmful ions such as chloride and sulfate, no significant increase in the ion concentration in the reinforcement layer was recorded after a storage period of up to nine months in an aggressive solution. The movement of moisture was determined with a high spatial resolution both qualitatively and quantitatively as a function of time by using neutron radiography in a capillary suction test. It was found that the high crack widths in the interior of aged concrete were of no significant importance to the capillary transport processes. The much finer cracks and pore system of the protective TRC-layer suppress the capillary suction capacity of large cracks in the ground. This is laid to the fact that no sufficient amount of water can be transported through the protection reinforcement layer. The fine crack pattern in combination with the matrix composition can facilitate a distinctive self-healing effect under exposure to water. The cracks are mostly closed by the formation of calcite, so that further water absorption is significantly impeded. Despite load-induced or system-related cracking, TRC can improve the durability of concrete structures since it reduces mass transport processes in structural components considerably.

# Thesen

- Textilbeton ist ein Verbundmaterial, das sich im Vergleich zu konventionell bewehrten Bauteilen (Bsp. Stahlbeton) von einer multiplen Rissbildung mit sehr geringen Rissbreiten gekennzeichnet ist.
- Die Risscharakteristika von textilbewehrten Betonen können sich in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen des Bauteils, je nach Art und Höhe der rissinduzierenden Beanspruchung und den eingesetzten Materialien deutlich voneinander unterscheiden.
- Die dehnungsabhängige Entwicklung der Rissweite und der Rissanzahl wird primär durch die Textilfeinheit bestimmt. Hohe Feinheiten implizieren einen hohen Bewehrungsgehalt und haben somit eine deutlich feinere Risscharakteristik zur Folge. Eine Beschichtung der Textilien verbessert zusätzlich den Faser-Matrix-Verbund und trägt ebenfalls zu einer feineren Rissbildung bei.
- Die Zugabe von Kurzfasern zur Feinbetonmatrix kann die Gebrauchstauglichkeit und das Tragverhalten von textilbewehrtem Beton erheblich verbessern. Mit Zunahme des Kurzfaseranteils und Verteilung (Fasertyp integral / dispers) sowie in Abhängigkeit der Kurzfaserlänge erfolgt eine Anhebung der Erstrissspannung und des Rissbildungsplateaus (Zustand IIa). Weitere Effekte sind ein verstärktes dehnungsverfestigendes Verhalten und eine feinere Risscharakteristik infolge des rissüberbrückenden Verhaltens der Fasern.
- Mit zunehmendem Volumenanteil an Kurzfasern und feinerer Dispergierung in der Matrix wird das kapillare Wasseraufnahmevermögen reduziert. Mögliche Ursachen sind vermutlich die Verminderung der Mikrorissbildung beim Trocknungsprozess sowie die Veränderung der Porenradialstruktur im kapillaren Strömungsweg durch die Faserzugabe (Unterbrechung bzw. Verminderung der Kapillarkapazität). Diese Tendenz muss in Abhängigkeit des Verarbeitungseinflusses durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.
- Höhere Garnfeinheiten der Textilien führen bei unbeschichteten und bei beschichteten Bewehrungstextilien mit jeweils ähnlichen Beschichtungsanteilen zu einer Zunahme des kapillaren Saugverhaltens.
- Eine Polymerbeschichtung der Textilien bewirkt eine deutliche Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme, da das polymere Beschichtungsmaterial das Porenvolumen (Zwickelvolumen) in den Garnen reduziert.
- Die Leistungsfähigkeit des Kapillartransportes durch Risse hängt wesentlich von deren Breite ab und bestimmt damit die Zugänglichkeit des Wassers zu den Multifilamentgarnen. Dies ist eine essentielle Voraussetzung für die kapillare Weiterleitung und Speicherung des Wassers im Textil.
- Das Diffusionsverhalten gegenüber Wasserdampf von ungerissenem Textilbeton wird im Wesentlichen von dem verwendeten Matrixsystem (Bindemittelbasis) beeinflusst.
- Das Verhalten gegenüber Karbonatisierung wird maßgeblich durch die Bindekapazität (Bindemittelbasis bzw.  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalt) bestimmt.

- Die Zunahme des Volumenanteils von Kurzfasern bewirkt eine Absenkung des Diffusionswiderstandes gegenüber Wasserdampf und Kohlendioxid. Ein steigender Bewehrungsanteil (Garnfeinheit der Textilien) verringert den Diffusionswiderstand. Durch eine Textilbeschichtung wird der Diffusionswiderstand gegenüber den gasförmigen Medien erhöht.
- Die Permeabilität gegenüber Sauerstoff und Wasser von Dehnkörpern wird mit zunehmendem Bewehrungsgehalt (Feinheit), dem Einsatz einer Textilbeschichtung sowie einer Kurzfasernzugabe vermindert. Durch die Steigerung der Rissanzahl wird eine Verringerung der Rissbreiten erreicht und daraus resultiert eine merkliche Verminderung der Transportraten von Sauerstoff und Wasser.
- Die wasserbeaufschlagten gerissenen Dehnkörper aus TRC weisen ausgeprägte Selbstheilungseffekte auf. Die dominierende Ursache der Selbstabdichtung ist die irreversible Querschnittsreduzierung der Risse durch die Neubildung kristalliner Strukturen, vorwiegend bedingt durch die Bildung von Calciumcarbonat.
- Bei der Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem CDF-Verfahren an ungerissenen und gerissenen Verbundprüfkörpern mit CEM I-Matrix und Carbondtextil wurde der in Deutschland für herkömmlichen Beton geltende Grenzwert von 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Zyklen überschritten. Ablösungen oder Gefügelockerungen innerhalb der Verstärkungsschicht konnten nicht beobachtet werden.
- Das Penetrationsverhalten von Schadionen (Chlorid, Sulfat) in wassergesättigten, ungerissenen und gerissenen Verbundprüfkörpern, bestehend aus konventionellem Beton mit TRC Verstärkung, zeigt keinen bedeutsamen Einfluss von Rissen auf eine Erhöhung des Schadionengehaltes in der Verstärkungsschicht im Vergleich zur unbelasteten Proben.
- Die Barriere-Wirkung der textilen Verstärkungsschicht reduziert das Eindringen von Chloridionen in den angrenzenden Normalbeton. Die Eindringtiefe in den Normalbeton nach 6 Monaten Einlagerungsdauer in 3%iger NaCl-Lösung kann durch Aufbringen einer 12 mm dicken TCR-Schicht (vorbelastet und gerissen) um 2/3 reduziert werden.
- Die photometrische Bestimmung der wasser- und säurelöslichen Sulfatanteile nach 9 Monaten Einlagerungsdauer in einer Sulfatlösung (6 g/l Sulfat) ergab keine Veränderung der Sulfatkonzentration in den Matrices gegenüber dem Ausgangszustand.
- Die Feuchtebewegung mit hoher Ortsauflösung wurde im kapillaren Saugversuch an vorgeschädigten Normalbetonproben und an mit TRC verstärkten Verbundproben qualitativ und quantitativ als Funktion der Zeit sowie mit Hilfe der Neutronenradiographie zeit- und ortsaufgelöst verfolgt. Die im Untergrund der Verbundproben vorhandenen Risse des Normalbetons besitzen kaum Bedeutung für den Saugvorgang. Das kapillare Saugvermögen der großen Risse im Normalbeton kann nicht aktiviert werden, da nicht hinreichend Wasser durch die Verstärkungsschicht zur Verfügung gestellt wird.
- In den gerissenen Verbundproben konnte eine erhebliche Zeitverzögerung der kapillaren Saugprozesse und eine Verringerung der Transportraten in den angrenzenden Referenzbeton nachgewiesen werden.

# Theses

- Textile reinforced concrete (TRC) is a composite material. It forms multiple cracks with relatively small crack widths in comparison to conventional, steel reinforced concrete.
- The crack characteristics of textile reinforced concrete can vary significantly depending on the geometry of the structural component, type and level of the crack inducing loads, and the material used.
- The strain-dependent development of the width and number of cracks is primarily determined by the fineness of the fabric. Higher finenesses imply higher reinforcement content and lead to a finer cracking pattern. A coating of the textiles further improves the bonding behavior of fiber-matrix composite and also results in a finer crack pattern.
- The addition of short fibers to the fine concrete matrix can improve the applicability and the load-bearing behavior of TRC significantly. With an increase in short fiber content and fiber distribution (fiber type: integral/dispersed) and the short fiber length, an increase in first-crack stresses and crack formation plateaus (State IIa) occurs. Other effects are increased strain-hardening behavior and finer crack characteristic as a result of the crack-bridging behavior of the short fibers.
- With increasing short fiber content and fiber dispersion in the matrix, capillary water absorption capacity is reduced. Possible causes are the reduction of micro-cracking during the drying process and the change in pore structure in the capillary flow path (interruption or reduction of the capillary action). This trend needs to be confirmed by further investigations depending on the influence of processing (specimen production).
- Higher yarn fineness of the textiles results in the case of uncoated and coated reinforcement fabrics (each with similar coating content) in an increase in the capillary suction behavior.
- Polymer coating of textiles causes a significant reduction in capillary water absorption since the polymeric coating material reduces the capillary pore volume in the yarn.
- The performance of capillary transport through the cracks depends essentially on crack width and thus characterizes/determines the accessibility of water to the multifilament yarns. This is an essential requirement for the capillary transmission and storage of water in the textile reinforcement.
- The diffusion of water vapor in uncracked, textile-reinforced concrete is influenced mainly by the matrix system used (binder).
- Carbonation is mainly determined by the binding capacity (type of binder or  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content).
- The increase in the volume content of short fibers causes a decrease in the diffusion resistance to water vapor and carbon dioxide. Increasing reinforcement content (fineness of the fabrics) reduces diffusion resistance. The diffusion resistance to the gaseous media is increased by coating the textile.

- The oxygen and water permeability of TRC is reduced by increasing reinforcement content (fineness), the use of a fabric coating, and adding short fiber. A higher number of cracks cause smaller crack widths, and this result in a noticeable reduction in the transport rates of oxygen and water.
- Self-healing of fine cracks in TRC in contact with water lead to a considerable reduction of the transport rates of water over time. The predominant cause of self-sealing is the irreversible closing of cracks by deposits of calcium carbonate (calcite).
- The freeze-thaw resistance (CDF method) after 28 freeze-thaw cycles of crack-free and cracked composite specimens consisting of conventional concrete and a TRC-layer made with CEM I-matrix and carbon fabric was insufficient. The German threshold of surface disaggregation ( $\leq 1,500 \text{ g/m}^2$ ) was slightly exceeded. Delaminating or deterioration of the microstructure within the reinforcement layer could not be observed.
- Compared to the unloaded specimens, the penetration behaviour of harmful ions (chloride, sulfate) in water-saturated, crack-free, and cracked composite specimens has no significant influence on cracks with regard to an increase in the concentration of harmful ions in the reinforcement layer.
- The barrier effect of the textile-reinforced concrete layer reduced the penetration of chloride ions in the subjacent normal concrete. The depth of penetration into normal concrete after a storage period of 6 months at 3% NaCl solution can be reduced by approximately 2/3 by applying a 12 mm thick layer of TRC in the preloaded and cracked states.
- The photometric determination of water-soluble and acid-soluble sulfate fractions after a storage period of 9 months in sulfate solution (6 g/l sulfate) showed no change in sulfate concentration in the matrices with comparison with the initial state.
- The moisture movement was determined with high spatial resolution both qualitatively and quantitatively as a function of time by using neutron radiography in a capillary suction test. Large cracks in the ground (normal concrete) have no significant influence on capillary suction. The much finer cracks and pore system of the protective TRC-layer suppresses the capillary suction capacity of large cracks in the ground. This can be attributed to the fact that an insufficient amount of water can be transported through the protection reinforcement layer.
- In the cracked composite samples a significant time delay of the capillary suction processes and a reduction in the transport rates to the subjacent normal concrete were demonstrated.