

Vortrag, gehalten auf der 15. Internationalen Baustofftagung ibausil, 24.-27. September 2003, Bauhaus-Universität Weimar

Schorn, H.; Hempel, R.; Butler, M.; Schiek, M.

Dauerhaftigkeit von textildbewehrtem Beton mit AR-Glas-Multifilamentgarn aus physiko-chemischer Sicht

1 Einleitung

Alkali resistente Glasfasern (AR-Glasfasern) der zweiten Generation zeichnen sich durch Zirkondioxidgehalte im Glas von 17 bis 24 % aus [1, 2]. Die Stabilität der zirkondioxydhaltigen Systeme im alkalischen Milieu wird durch die Bildung von thermodynamisch stabilen Zirkonoxidhydraten gesehen, die als Diffusionsbarriere wirken und einen weiteren Alkaliangriff verzögern [3]. Die Beständigkeit der AR-Glasfasern im Beton wird in Mischungen mit silikatischen Zementen, die alkaligepuffert sind, als überwiegend gut eingeschätzt. Als Zeitraffer-Prüfmethode zur Beurteilung der Beständigkeit werden vorzugsweise der „Strand-in-Cement-(SIC)-Test“ [4] und der „Klimazyklustest“ [5] angewendet. Der Festigkeitsverlust der exponierten Proben gegenüber einer Vergleichsprobe soll Ausdruck nachlassender Dauerhaftigkeit sein.

Als Resultat eigener Untersuchungen in Anwendung der oben genannten Zeitraffermethoden wurden keine Korrosionserscheinungen an den Glaskörpern der in Beton eingebetteten AR-Glasfilamentgarne gefunden, obwohl z.B. bei Mischungen mit Portlandzement ohne Puzzolanzusatz (hohe Alkalität der Porenlösung) starke Festigkeitsverluste registriert wurden [6]. Hingegen wurden bei Einlagerung von entschlichteten Fasern in 5 %-iger Natronlauge bei 80 °C Korrosionsdefekte am Glaskörper festgestellt [7].

Zur weiteren Aufklärung dieser Phänomene wurden vergleichende Versuche mit Bewehrungen aus E- und AR-Glasfilamentgarnen im Beton durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in eine Nebelkammer bei 40 °C und annähernd 100 % relativer Feuchte eingelagert. Die Prüfungen auf Biegezug und die Bemusterung im ESEM fanden nach einer Einlagerungsdauer von 28, 56, 90, 180 und 360 Tagen statt. Über die Resultate dieser Untersuchungen wird im folgenden berichtet.

2 Charakterisierung der Versuchsbedingungen

Als Prüfkörper dienten Plattenstreifen mit einer Länge von 260 mm und einem Querschnitt von 60 mm x 14 mm. Die Bewehrung aus unidirektional eingebetteten Glas-Rovings lag im Abstand von 10 mm unter der Oberkante (siehe Bilder 1 u. 2).

Die Prüfung der Plattenstreifen erfolgte im 4-Punkt-Biegezugversuch. Der Versuch wurde weggesteuert mit 3 mm/min bis zu einer Durchbiegung von 12 mm gefahren. Während des Versuches wurden die Kraft und die Verformungen in Plattenmitte sowie den Drittelpunkten aufgezeichnet.

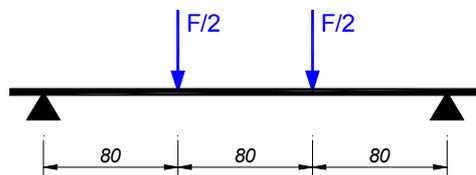


Bild 1: Versuchsaufbau

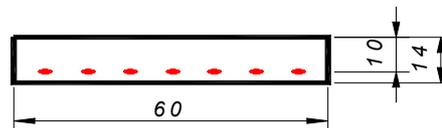


Bild 2: Querschnitt Probekörper

Als Matrix kamen 2 Feinbetone zum Einsatz, die sich hinsichtlich ihrer Bindemittelzusammensetzung und damit bezüglich Alkalität, Hydratationskinetik und Granulometrie unterschieden. Nach dem Alkalitätsniveau erfolgte ihre Bezeichnung als „alkalireich“ (CEM I) und als „alkaliarm“ (CEM III/B + Puzzolan).

Die Zusammensetzung der Mischungen ist im folgenden wiedergegeben:

CEM I (alkalireich):	CEMI 32,5 R	3,5 MT
	Sand 0-1	3,0 MT
	Wasser	1,0 MT
CEM III B + Puzz (alkaliarm):	CEM III/B 32,5	2,0 MT
	Ergelit (Durapact-Konzentrat)	1,0 MT
	Sand 0-1	3,0 MT
	Wasser	1,0 MT

Als Bewehrungsmaterialien kamen AR-Glas-Rovings des Herstellers NEG in 2 Feinheiten (155 tex und 1100 tex) und zum Vergleich E-Glas-Rovings (900 tex) zum Einsatz. Die Plattenstreifen wurden planmäßig unterbewehrt, damit keine Mehrfachrißbildung stattfindet, sondern das Verformungsverhalten an nur einem Riß abgebildet wird und beobachtet werden kann. Die Bewehrungsvarianten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Art der Rovings	Anzahl der Rovings	Glasquerschnittsfläche in mm ²	Bewehrungsgehalt in Vol.-%
AR-Glas 155 tex, NEG	21	1,20	0,14
AR-Glas 1100 tex, NEG	7	2,85	0,34
E-Glas 900 tex	7	2,33	0,28

Tabelle 1: Bewehrungskonfiguration der Plattenprüfkörper

Zusätzlich zu den Biegezugproben erfolgte die Herstellung von Mörtelprismen der Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, an denen relevante mechanische Kenngrößen für die Matrix wie Biegezug- und Druckfestigkeit, E-Modul sowie chemische Kenngrößen (pH-Wert des Porenwassers, pH-Wert aus Aufschlämmungen der zerkleinerten Prismen, Anionenkonzentration) bestimmt wurden.

Zur Beurteilung der möglichen Veränderungen insbesondere an den Glasoberflächen wurden entsprechende elektronenmikroskopische Untersuchungen im REM (ESEM-Modus) durchgeführt. Der ESEM-Modus ist eine Betriebsweise, die ohne die sonst üblichen Beschichtungen mit Kohlenstoff oder Gold auskommt und damit eine Betrachtung der Proben im naturbelassenen Zustand erlaubt.

3 Ergebnisse

3.1 Veränderung der Alkalität der Porenlösungen

Zur Charakterisierung des Alkalitätsniveaus und seiner Veränderung über die Zeit wurden die pH-Werte der ausgepressten Porenlösungen sowie von Aufschlämmungen aus zerkleinerten Prismen der jeweiligen Mischungen bestimmt (s. Bild 3).

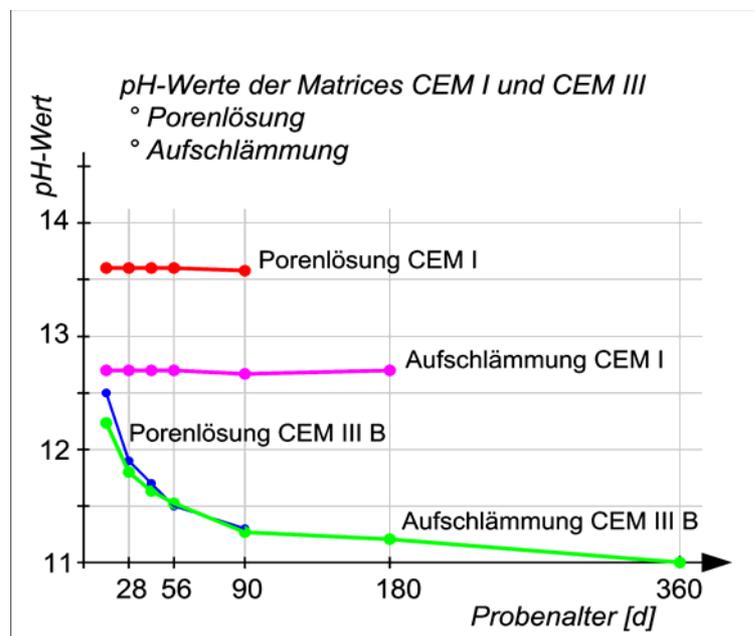


Bild 3: pH-Werte der Porenlösung (ausgepresst und aufgeschlämmt) der verwendeten Feinbeton-Mischungen

Aus Bild 3 ist ein deutlicher Unterschied der beiden Mischungen in ihrer Alkalität und der Veränderung über die Zeit zu sehen. Für die alkalireiche Mischung

(CEM I ohne Puzzolanzusatz) bleibt der pH-Wert der Porenlösung bis zum Alter von 90 Tagen fast unverändert auf dem hohen Niveau von etwa 13,6. Der entsprechende Wert der alkaliarmen Mischung (CEM III B mit Puzzolanzusatz) ist mit 12,5 zu Beginn deutlich geringer als der der alkalireichen Mischung und fällt kontinuierlich bis zum 90. Tag auf 11,3 ab.

3.2 Verhalten von Prüfkörpern mit E-Glasbewehrung in alkaliarmer Matrix

Die Resultate der Biegezugprüfungen an Proben aus alkaliarmen Mischungen sind im Bild 4 dargestellt. Die Kurvenverläufe für die angegebenen Altersstufen von 90, 180 und 360 Tagen unterscheiden sich nicht wesentlich, die LOP-Werte (Proportionalitätsgrenze) und das Nachrißverhalten sind nahezu identisch. Nach erfolgter Reißbildung ist nur noch eine sehr geringe Tragfähigkeit vorhanden.

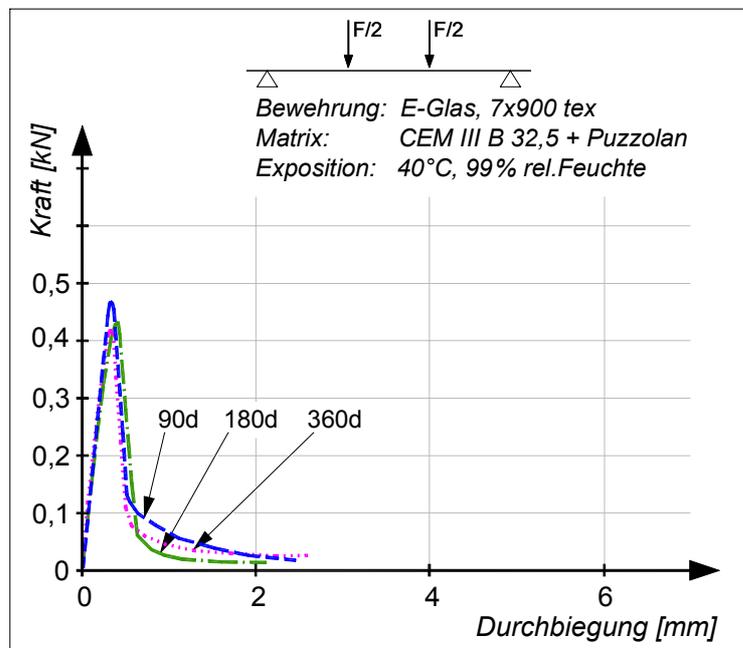
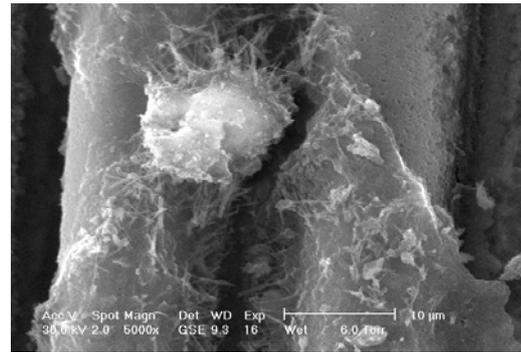
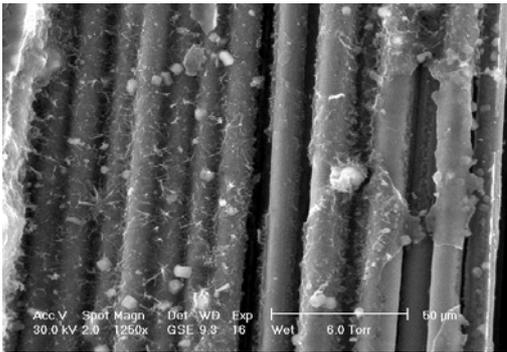


Bild 4: Kraft-Mittendurchbiegung von Probekörpern mit E-Glas, CEM III/B + Puzzolan

Den Zustand der eingebetteten E-Glasfilamente nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung sollen beispielhaft die Bilder 5 (Vergrößerung 1250-fach) und 6 (Detail aus Bild 5, Vergrößerung 5000-fach) veranschaulichen.

Die Filamente sind von schalenartigen Reaktionsprodukten umgeben, auf denen wiederum CSH-Phasen sichtbar sind. Aus den Bildern 5 und 6 kann nicht eindeutig erkannt werden, inwieweit das wenig alkalibeständige E-Glas an der Bildung der schalenartigen Überzüge selbst durch die puzzolanische Reaktion zwischen Glas und Zementklinker beteiligt ist.



Bilder 5 und 6: Zustand eingebetteter E-Glasfilamente nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung, CEM III/B + Puzzolan, Bild 6 (rechts) zeigt ein Detail aus Bild 5.

Aus dem Detailbild ist allerdings deutlich zu entnehmen, daß das rechte Filament eindeutige Zersetzungs- bzw. Korrosionserscheinungen aufweist. Die nach dem Riß praktisch nicht mehr vorhandene Tragfähigkeit ist trotz alkaliärmer Mischung also auf das Freilegen von Primärdefekten an der Glasoberfläche und durch fortgeschrittene Glaskorrosion verursacht. Diese Befunde bilden eine wichtige Vergleichsbasis für das Verhalten von AR-Glasfilamenten unter analogen Bedingungen.

3.3 Verhalten von Prüfkörpern mit AR-Glasbewehrung in alkaliärmer Matrix

Im Bild 7 sind die Resultate der Biegezugprüfung für Prüfkörper aus alkaliärmer Matrix, die mit AR-Glasfilamentgarn bewehrt wurden, dargestellt.

Aus Bild 7 ist zu erkennen, daß nach der Rißbildung gegenüber E-Glasbewehrung ein deutliches Resttragvermögen vorhanden ist. Trotz der aggressiven Exposition, wie sie diese Nebelkammerlagerung darstellt, sind keine signifikanten Festigkeitsverluste in Abhängigkeit vom Alter festzustellen. Wäre eine nennenswerte Glaskorrosion wie bei der oben beschriebenen E-Glas-Bewehrungsvariante eingetreten, hätte sich ein (ebenso) niedriges Resttragvermögen ergeben müssen.

Bild 8 zeigt ein AR-Glas-Filamentbündel, das teilweise in Matrix (alkaliarm) eingebettet ist, im Zustand nach einer 360-tägigen Nebelkammerlagerung in einer 1250-fachen Vergrößerung.

Es sind viele Matrixbestandteile und Reaktionsprodukte, die als „Haftbrücken“ wirken, zu erkennen. Die Konturen der Filamente sind als „scharf“ einzustufen. Die Detailaufnahme im Bild 9 (aus der Mitte von Bild 8) mit 5000-facher Vergrößerung zeigt wenige Aufwachsungen und eine partiell ausgeprägte, sehr dünne

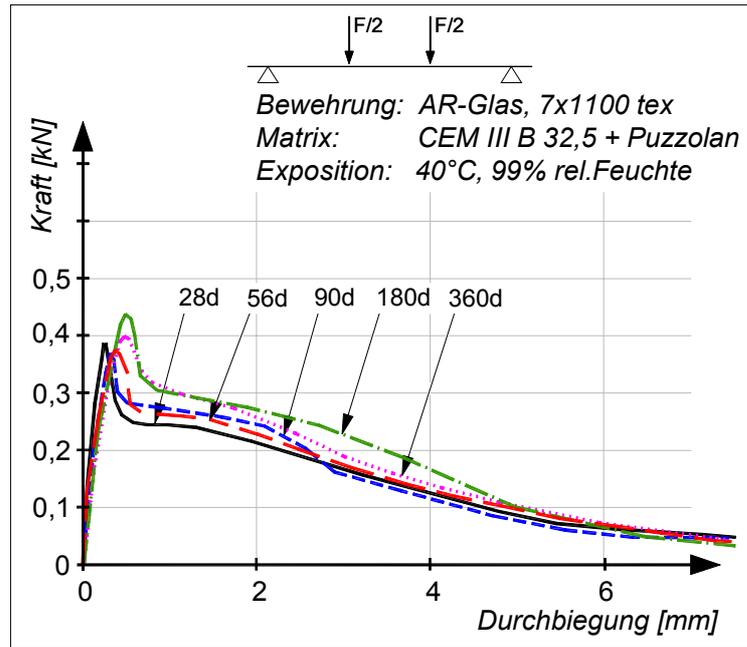
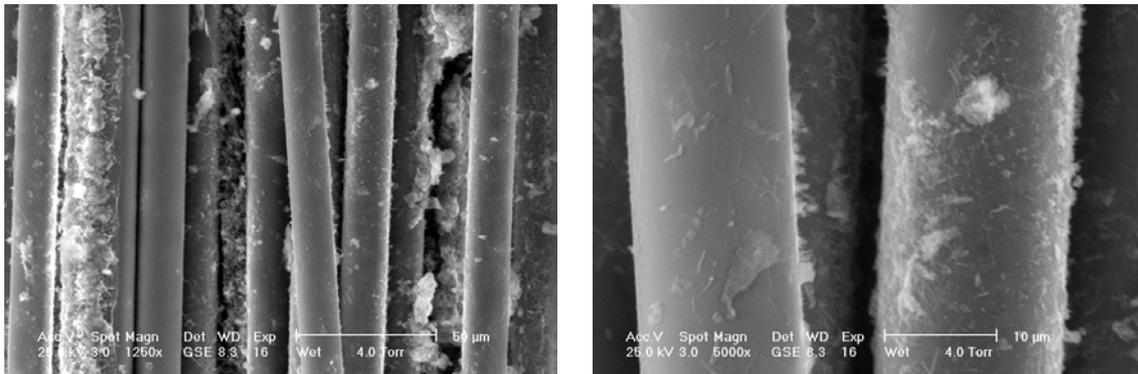


Bild 7: Kraft-Mittendurchbiegung von Probekörpern mit AR-Glas, CEM III/B plus Puzzolan



Bilder 8 und 9: Zustand eingebetteter AR-Glasfilamente nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung, CEM III/B + Puzz. Bild 9 (rechts) zeigt ein Detail aus Bild 8.

schalenartige Ummantelung der Filamente. Eine korrosive Oberflächenveränderung kann jedoch im Gegensatz zum E-Glas nicht festgestellt werden.

Die hier eingesetzte Matrix entspricht in ihrer Zusammensetzung einer Produktionsrezeptur aus der Glasfaserbeton-Industrie. Die AR-Glas-Filamentgarne und ihre Schlichte sind also in dieser Umgebung ausreichend korrosionsbeständig. Die Abpufferung der Alkalität hat sich bewährt.

3.4 Verhalten von Prüfkörpern mit AR-Glasbewehrung in alkalireicher Matrix

Die Ergebnisse der Biegezugprüfungen für Prüfkörper mit alkalireicher Matrix, die mit AR-Glasfilamentgarn bewehrt wurden, sind im Bild 10 dargestellt.

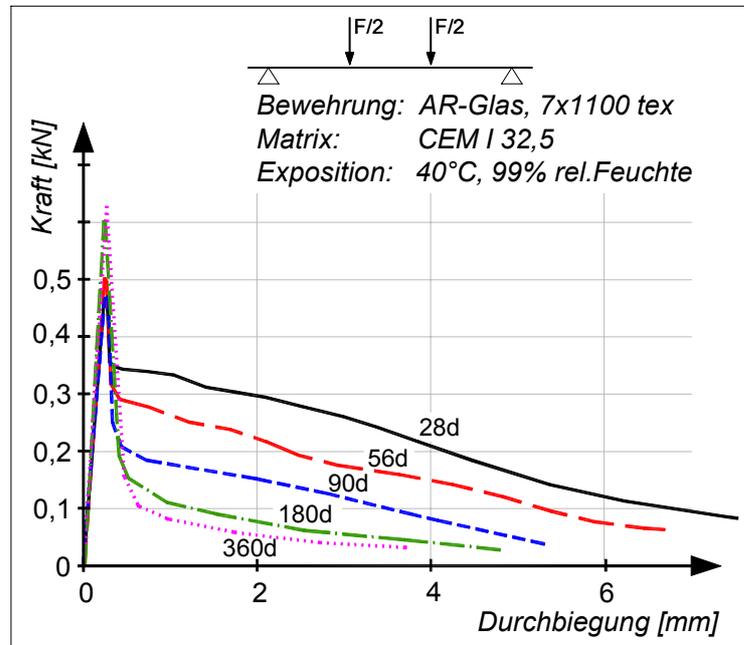


Bild 10: Kraft-Mittendurchbiegung von Probekörpern mit AR-Glas, CEM I ohne Puzzolan

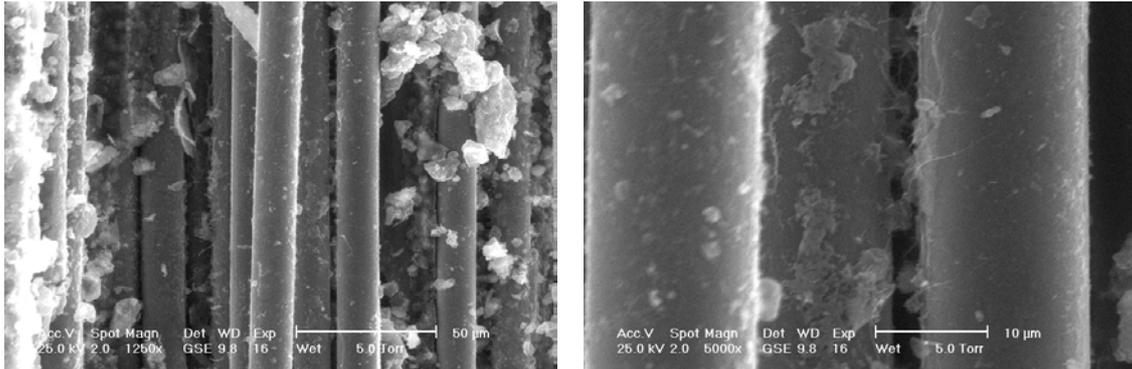
Durch die Verwendung von Portlandzement ohne Zugabe von Puzzolanen resultiert ein sehr hohes alkalisches Niveau in der Porenflüssigkeit des Feinbetons im Unterschied zu den vorn beschriebenen Untersuchungen. Durch die Rezepturgestaltung und die Nebelkammerlagerung (kein Verbrauch bzw. Abbau von Calciumhydroxid durch puzzolanische Reaktion und/oder Karbonatisierung) wird dieses hohe Niveau von $\text{pH} \geq 13,5$ durch ständige Neubildung von Calciumhydroxid über den Prüfzeitraum aufrecht erhalten.

Diese Versuchsbedingungen stellen einen ungünstigen Grenzwert einer aggressiven Beanspruchung unter realen Migrationsbedingungen im Beton dar.

Im Bild 10 ist zu erkennen, daß sich bei ausschließlichem Einsatz von Portlandzement als Bindemittel im Gegensatz zur Variante mit CEM III/B und Puzzolan eine deutliche Abnahme der Nachriß-Tragfähigkeit mit der Einlagerungszeit in der Nebelkammer ergibt. Sowohl die aufnehmbare Kraft nach dem Riß als auch die Duktilität der Proben verringern sich. Als Ursachen hierfür sind das gleichbleibend hohe Niveau der Alkalität der Porenlösung und seine Wirkung auf die AR-Glasfilamente sowie das veränderte Gefüge insbesondere im Matrix-Faser-Interface zu sehen.

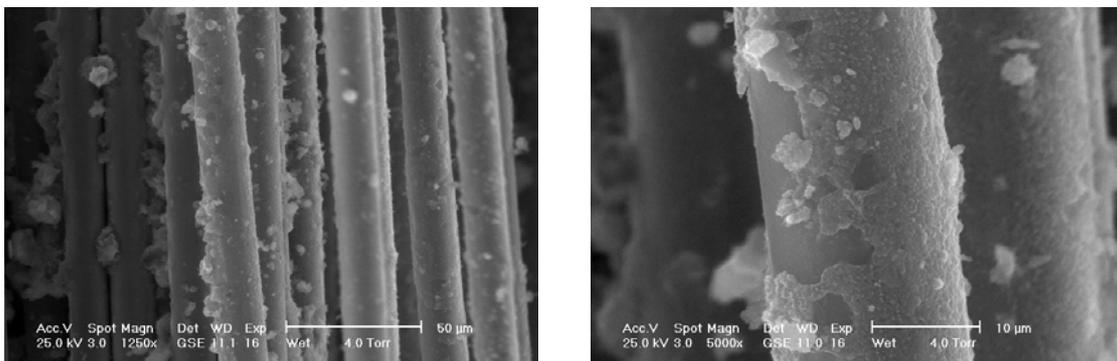
Das Tragvermögen nach 28-tägiger Expositionsdauer der alkalireichen Mischung ist hier höher als das der alkaliarmen Variante. Nach 56 Tagen ist bereits ein deutlicher Abfall der Tragfähigkeit zu konstatieren. In ihrem Niveau und Verlauf entspricht die Arbeitskennlinie im Alter von 56 Tagen dem des relativ zeitunabhängigen Resultates der alkaliarmen Betonzusammensetzung.

Im Bild 11 ist zu sehen, daß die Einbindung der Randfilamente in die Matrix unregelmäßig ausgeprägt ist. Die rauhe, etwas porös wirkende Oberfläche kann als feiner, hauchdünner Reaktionsbelag, bestehend aus unterschiedlich hydratisierten Bindemittelkomponenten, gedeutet werden, Bild 12.

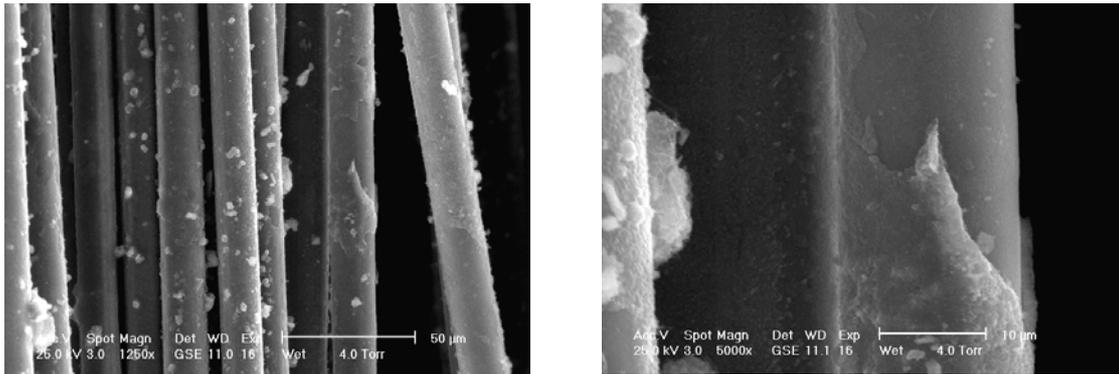


Bilder 11 und 12: Zustand eingebetteter AR-Glasfilamente nach 56 Tagen Nebelkammerlagerung, alkalireiche Mischung. Bild 12 (rechts) zeigt ein Detail aus Bild 11.

Aus den für den Zustand nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung typischen Bildern ist zu erkennen, daß gegenüber dem Zustand nach 56 Tagen vor allem die flächige Ausdehnung und die Dicke der die Fasern umhüllenden Reaktionsschichten zugenommen hat. Am mittleren Filament in Bild 13, Detail Bild 14 ist zu sehen, daß die freiliegende Glasoberfläche unbeschädigt ist. Am rechten Filament in Bild 15, Detail Bild 16 kann die Dicke der schalenartigen Umhüllung mit etwa 1 µm bestimmt werden.



Bilder 13 und 14: Zustand eingebetteter AR-Glasfilamente nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung, CEM I. Bild 14 (rechts) zeigt ein Detail aus Bild 13.



Bilder 15 und 16: Zustand eingebetteter AR-Glasfilamente in einem weiteren Prüfkörper nach 360 Tagen Nebelkammerlagerung, CEM I. Bild 16 (rechts) zeigt ein Detail aus Bild 15.

Offensichtlich ist sie teilweise durch die Prüfbelastung von der darunterliegenden Filamentoberfläche abgeplatzt. Die Filamentoberfläche selbst erscheint ebenfalls glatt, und der Glaskörper ist unversehrt geblieben. Bei den Bildern mit E-Glasfilamenten (Bilder 5, 6) heben sich die Schalen hingegen deutlich vom Untergrund ab. Die freiliegende Oberfläche ist jedoch porig-voluminös korrodiert.

Der schalenartige Überzug der AR-Glasfilamente kann damit nicht als Ergebnis einer Glaskorrosion interpretiert werden, zumal auch die ursprüngliche Filamentdicke noch vorhanden ist. Für die Tragfähigkeitsverluste von Prüfkörpern mit Portlandzement ohne Puzzolanzusatz, die einer Nebelkammerlagerung unterworfen wurden (s. Bild 10), werden auch unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse des SFB 528 [6] folgende Ursachen gesehen:

- Die durch die Versuchsbedingungen hervorgerufene hohe Alkalität der Porenlösung des Feinbetons und ihre Aufrechterhaltung über die Zeit sowie die erhöhte Temperatur und das ständige Feuchteangebot in der Nebelkammer führen zur relativ schnellen Auflösung der Schichte auf den Glasfilamenten. Infolge dessen werden Primärdefekte, die bei der Herstellung der Filamente unvermeidlich sind, auf den Filamentoberflächen freigelegt. Sie wirken tragfähigkeitsmindernd.
- Mit fortschreitender Einlagerungsdauer wird dieser Prozeß durch die zunehmende schalenartige Umhüllung der Filamente aus Hydratationsprodukten des Portlandzementes überlagert.
- Mit wachsender Schalendicke der Umhüllungen wird die Dehnbarkeit und Biegefähigkeit der Filamente eingeschränkt. Wäre die Schichte nicht be-

reits weitestgehend aufgelöst, so könnte sie als Gleitschicht zwischen Glasoberfläche der Filamente und ihren schalenartigen Umhüllungen wirken. Dies ist hier offensichtlich nicht der Fall. Schon bei geringer Belastung versagen die spröden Schalen. Das unter dem Schalenbruch lokal freigelegte Filament wird dort übermäßig stark belastet. Die starken lokalen Dehnungen führen zum Bruch dieser umhüllten Filamente.

- Die bei der Anwendung von nicht abgepufferten Matrixsystemen aus Portlandzement gemessenen massiven Tragfähigkeitsverluste sind anhand der vorliegenden Befunde nicht als Ergebnis einer Glaskorrosion zu bewerten. Sie sind das Resultat von Schlichteaufösungen und den sich daraus ergebenden Folgewirkungen sowie von zunehmenden Versprödungen durch relativ dickwandige, schalenartige und starre Umhüllungen der Filamente. Eine Glaskorrosion müßte sich an den nicht umhüllten Oberflächen der Filament-Glaskörper wie beim E-Glas in Form partieller Auflösungen zeigen, was bisher nicht gefunden wurde.

Da es bisher nicht möglich war, die schalenartigen Umhüllungen der Filamente zu isolieren und auf ihre Zusammensetzung zu untersuchen, kann eine direkte Beweisführung zur Zeit noch nicht realisiert werden.

- Eine Glaskorrosion an einzelnen Stellen (z.B. durch Unstetigkeiten der Zirkondioxid-Verteilung im Filament) wird zum gegenwärtigen Stand nicht gänzlich ausgeschlossen, Anhaltspunkte dafür wurden allerdings noch nicht gefunden. Ihr Einfluß auf das zeitabhängige Tragverhalten wird als marginal eingeschätzt, denn Fehlstellen an einzelnen, wenigen Filamenten beeinträchtigen die Tragwirkung des Multifilamentgarnes in dieser Umgebung nicht signifikant. Das resultiert aus der Kraftumleitungsfunktion der Haftbrücken. Diese Mechanismen werden in [8] näher beschrieben.

4 Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen von Biegezugprüfkörpern mit einer Bewehrung aus Glas-Multifilamentgarnen, die bis zu einem Jahr in einer Nebelkammer mit einer Temperatur von 40 °C bei annähernd 100 % relativer Feuchte eingelagert wurden, lassen sich folgende zusammengefaßten Resultate herausheben:

- Das Festigkeitsverhalten der Prüfkörper über die Zeit wird signifikant vom Glastyp, der Schlichte und der Betonzusammensetzung beeinflusst.
- Im Feinbeton eingebettete E-Glasfasern zeigen auch bei Mischungen mit stark reduzierter Alkalität nach kurzer Zeit Korrosionsschäden, die mit hohen Festigkeitsverlusten verbunden sind. Solche Fasern sind für die Bewehrung zementgebundener Mörtel oder Betone nicht geeignet. Dahingegen weisen in vergleichbaren Mischungen eingebettete Multifilamentgarne aus AR-Glas bei einer Einlagerungsdauer bis zu einem Jahr in einer Nebelkammer weder Festigkeitseinbußen noch Korrosionserscheinungen auf.
- Wird die Alkalität nicht abgepuffert (Feinbeton mit Portlandzement ohne Puzzolanzusatz), so resultieren auch bei AR-Glasfasern deutliche Festig-

keitsverluste der Verbundprüfkörper über die Zeit. Dieses Phänomen wird jedoch nicht durch eine Glaskorrosion verursacht.

- Als Ursache für diese Festigkeitsminderungen wird einerseits die weitgehende Auflösung der Schlichte gesehen. Sie fällt als mögliche Gleitschicht in der Kontaktzone zur Matrix und zwischen den Fasern weg, und es wird die Freilegung der bei der Herstellung der Fasern unvermeidbar entstehenden Primärdefekte an den Glasoberflächen der Filamente bewirkt, die zur Minderung der Tragfähigkeit beitragen. Andererseits wird dieser Prozeß durch die Ausbildung schalenartiger Umhüllungen der Filamente in der „fill-in-Zone“ mit im Vergleich zur alkaliarmen Mischung relativ dicken Schichtstärken überlagert. Diese starken Umhüllungen aus Zementstein, die zu großen Teilen direkt auf die freigelegten Glasoberflächen treffen, schränken die Verformungsfähigkeit der Filamente ein und führen so zu Festigkeitsverlusten.
- Trotz bisheriger negativer Befunde ist eine Glaskorrosion bei AR-Glasfasern infolge von lokalen Inhomogenitäten in der Glaszusammensetzung nicht gänzlich auszuschließen. Ihr ist jedoch nur eine marginale Bedeutung beizumessen, da bei intakten Haftbrücken eine Kraftumleitung über die Nachbarfilamente ohne nennenswerten Festigkeitsabfall stattfinden wird.
- Die mehrmonatige Einlagerung von faserbewehrten Betonproben in eine Nebelkammer bei 40 °C und annähernd 100 % relativer Feuchte, die anschließende Prüfung auf Festigkeit und die Bemusterung der Interfaces „Faser-Matrix“ und Faser-Faser“ im ESEM bezüglich Schlichtezustand, Umhüllungsbildung um die Fasern und Faserkorrosion hat sich als Zeitraffermethode zur Beurteilung des zeitabhängigen Tragfähigkeitsverhaltens und der Erkundung seiner Ursachen bewährt. Zur Ableitung verlässlicher Aussagen sollte die Einlagerungsdauer dabei 6 Monate nicht unterschreiten.
- Durch entsprechende stofflich-technologische Maßnahmen kann bei AR-Glasbewehrungen im Beton eine hohe Dauerhaftigkeit erreicht werden. Eine Anpassung an die verschiedensten für Beton üblichen Expositionen ist einstellbar.

Danksagung

Die dargelegten Ergebnisse wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“, Teilprojekt A 2, erarbeitet. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung.

Literatur

- [1] Maddalena, A. et al.: Interactions with portland cement paste of glass fibres coated by the sol-gel method. *Solids* 82 (1986), p 356-365.
- [2] Grassi, G. et al: E-glass fibres with a surface coating: reaction to alkaline attack. *Silic. Ind.* 50 (1985), p 143-148.

- [3] Wilde, P. et al: Untersuchungen zur Korrosion von Silikatgläsern nach Langzeiteinlagerung in einem wässrigen, basischen, zementanalogen Medium bei Raumtemperatur mittels Anwendung der Elektronenstrahlmikroanalyse. Silikattechnik 38 (1987), p 183-186.
- [4] GRCA Glasfibre Reinforcement Cement Association, Newport, UK: Method of test for strength retention of glassfibre in cements and mortars. GRCA-Heft S 0104/0184, Januar 1984.
- [5] ENV 1170-8 Vorgefertigte Betonerzeugnisse – Prüfverfahren für Glasfaserbeton, Teil 8: Prüfung der Dauerhaftigkeit im Klimazyklustest.
- [6] Schorn, H. et al: Grundlagen für die Gefüge- und Verbundoptimierung der Matrices von textildbewehrten Betonen. Teilprojekt A 2, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999-I/2002 zum SFB 528, Technische Universität Dresden, Dezember 2001.
- [7] Offermann et al: Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke. Zwischenbericht zum SFB 528, Teilprojekt A 1, Technische Universität Dresden, Juni 2003 (unveröffentlicht).
- [8] Schorn, H. et al: Beständigkeit und Verbundverhalten von Beton mit AR-Glasfilament-Bewehrung. Tagungsmaterialien 12. Internationales Textild-Symposium Frankfurt/M., Frankfurt/M., 09.04.2003, Vortrag 4.11.

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn
Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Baustoffe
D-01062 Dresden
Tel.: (0351) 463 36311
Fax: (0351) 463 37268

Dipl.-Ing. Rainer Hempel
Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Baustoffe
D-01062 Dresden
Tel.: (0351) 4731 353
Fax: (0351) 471 51 69

Dr. rer. nat. habil. Michael Schiekol
Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Baustoffe
D-01062 Dresden
Tel.: (0351) 463 36309
Fax: (0351) 463 37268

Dipl.-Ing. Marko Butler
Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Baustoffe
D-01062 Dresden
Tel.: (0351) 4731 356
Fax: (0351) 471 51 69