

Statistische Auswertung der Bruchspannung einaxialer Zugversuche an Textilbeton – Vorschläge für Teilsicherheitsbeiwerte

Jan-Uwe Sickert¹, Katrin Schwiteilo², Frank Jesse³

Zusammenfassung: Im Rahmen umfangreicher experimenteller Untersuchungen wurden die Bruchspannungen für Textilbeton unter einaxialer, einsinniger Zugbelastung ermittelt. Im Ergebnis liegen variierende Daten vor, die auf eine nichtdeterministische (unscharfe) Bruchspannung hinweisen. Die Versuchsergebnisse stellen eine moderate Datenbasis für eine statistische Auswertung und Quantifikation der Unschärfe dar. Zur Berücksichtigung der unscharfen Bruchspannung bei der Bemessung mittels einfacher Handrechnungen muss ein deterministischer Sicherheitsabstand eingeführt werden. Der Sicherheitsabstand wird in den derzeit gültigen Normen mit Teilsicherheitsbeiwerten festgelegt, die ein ebenso normativ vorgegebenes Sicherheitsniveau gewährleisten sollten. In diesem Kontext werden im Beitrag auf der Basis von Zuverlässigkeitsbetrachtungen ermittelte Teilsicherheitsbeiwerte für Textilbeton mit AR-Glas- und Carbon-Bewehrung vorgeschlagen.

Summary: In the framework of a comprehensive experimental program the ultimate strength of textile reinforced concrete has been determined under consideration of uniaxial tensile load. In result varying data are available which indicate a non-deterministic (uncertain) strength. The experimental results provide a moderate basis for statistical evaluations and the quantification of uncertainty. Furthermore, manual calculation in structural design requires a certain safety distance. For this task, partial safety factors have been defined and incorporated in the design codes to ensure a predefined safety level. In this context, this paper gives suggestions for the definition of partial safety factors for textile reinforced concrete with AR glass and carbon reinforcement.

¹ Dr.-Ing., Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, TU Dresden

² Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

³ Gastprof. Dr.-Ing., Lehrstuhl Massivbau, BTU Cottbus

1 Einleitung

Für Bauteile aus Textilbeton wurden bereits Modelle für die Querschnittsbemessung entwickelt, die mit Hilfe weniger Gleichungen Aussagen zur erforderlichen Textilbewehrungsmenge liefern. Beispiele sind die Bemessungsvorschläge für Zug von MOLTER [1], für Biegung und Querkraft von MOLTER [1] und VOSS [2] und deren Anwendung durch HEGGER ET AL. [3], [4], [5] sowie im Bereich der Tragwerksverstärkung die Bemessungsvorschläge zur Biegeverstärkung von BÖSCHE [6] und WEILAND [7], zur Torsionsverstärkung von SCHLADITZ [8], zur Querkraftverstärkung von BRÜCKNER ET AL. [9], [10] oder zur Normalkraftverstärkung von ORTLEPP ET AL. [11], [12]. Für die Anwendung dieser Bemessungsvorschläge in der Baupraxis wird deren Einbettung in das semiprobabilistische Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN EN 1990 angestrebt. Bei allen Bemessungsvorschlägen müssen für den Versagensfall Garnzugbruch charakteristische Werte für die Garnzugfestigkeit und der zugehörige Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsseite festgelegt werden.

Die Textilien werden in Textilbetonbauteilen in der Regel so angeordnet, dass sie als Bewehrung die bei Rissbildung des Betons frei werdenden Zugkräfte aufnehmen. Die Zugtragfähigkeit bzw. Zugfestigkeit der textilen Bewehrung ist deshalb eine wesentliche Materialkenngröße für die rechnerische Beurteilung der Tragfähigkeit von Textilbetonbauteilen. Bei der Festlegung der Bemessungswerte der Textilzugfestigkeit müssen zahlreiche Einflussgrößen, wie z.B. die Abhängigkeit vom Winkel zwischen Beanspruchung und Faserrichtung, Maßstabeffekte und Langzeiteffekte, mittels geeigneter deterministischer Beiwerte berücksichtigt werden. Die in Kurzzeitversuchen an standardisierten Prüfkörpern im Dehnkörperversuch experimentell ermittelten Festigkeiten werden durch Multiplikation mit den Beiwerten reduziert. Bisher noch nicht untersucht wurde die Fragestellung, wie aus einer wirtschaftlich motivierten, möglichst geringen Anzahl solcher Prüfungen ein charakteristischer Wert und ein Rechenwert für die Querschnittsbemessung festgelegt werden kann, der auch die Unsicherheiten beinhaltet, die sich aus der langfristigen Variationsbreite der Materialqualität im Produktionsprozess ergibt. Bei der Anwendung als Verstärkung steht zudem die Frage, wie sich aus einer Eignungsprüfung unter Laborbedingungen Bemessungswerte für Baustellenbedingungen ableiten lassen.

Dieser Beitrag diskutiert die Festlegung von charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten anhand von Ergebnissen von Dehnkörperversuchen, die über größere Zeiträume und größere Materialmengen stichprobenartig ermittelt wurden. Versuchsdaten liegen für die Materialien AR-Glas und Carbon sowie unterschiedliche Verarbeitungsrichtungen innerhalb des Textils (Kett- und Schussfaden) vor.

2 Experimentelle Untersuchungen

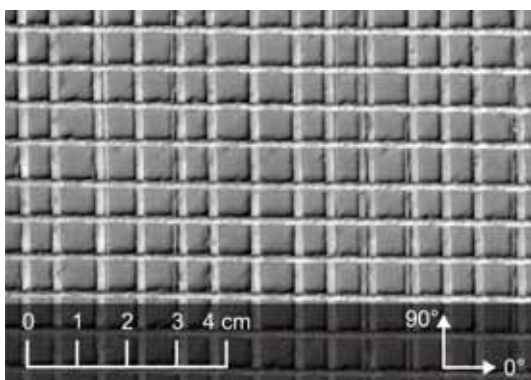
2.1 Materialien der Stichproben

Für die statistische Auswertung wurden Textilien mit praktisch relevanten Garnmaterialien und typischer geometrischer Anordnung gewählt. Eingesetzt wurden Multifilamentgarne der Feinheit 1200 tex aus alkali-resistentem Glas (AR-Glas) und der Feinheit 800 tex aus Carbon. Auf einer Kettenwirkmaschine wurden daraus nähverwirkte Gelege mit dem Bindungstyp Trikot-gegenlegig und einer Stichlänge von 2 mm hergestellt. Kett- und Schussrichtung sind biaxial in einem Winkel von 90° angeordnet. Tabelle 1 gibt eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Garne und den geometrischen Aufbau der Textilien, s.a. Bild 1. Alle Textilien sind mit einer Imprägnierung auf Styrol-Butadien-Basis beschichtet.

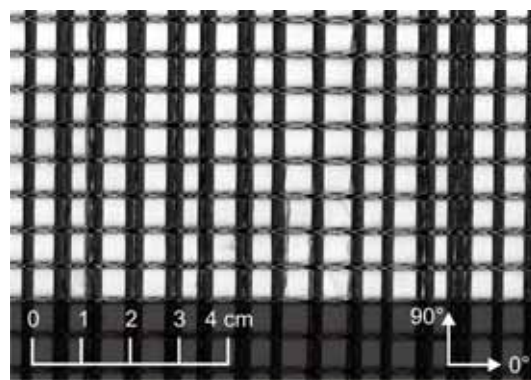
Tabelle 1: Eigenschaften und Aufbau der verwendeten Textilien

Table 1: Properties and structure of the used textiles

Richtung	Winkel [°]	Garnmaterial [-]	Feinheit [tex]	Raster [mm]
Textil 1 (AR-Glas)				
Kettrichtung	0	AR-Glas	1200	10,2
Schussrichtung	90	AR-Glas	1200	10,8
Textil 2 (Carbon)				
Kettrichtung	0	Carbon	800	10,2
Schussrichtung	90	Carbon	800	10,8



(a) Textil 1 (AR-Glas)



(b) Textil 2 (Carbon)

Bild 1: Ansicht der verwendeten Textilien [13]

Fig. 1: View of the used textiles [13]

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Zugfestigkeit der Textilien wurde mit einem Dehnkörperversuch am Verbundwerkstoff bestimmt. Probengeometrie und Versuchsdurchführung orientieren sich am Typ 2 der im Entwurf vorliegenden Empfehlung des RILEM TC TDT [14]. Die Proben sind im vorliegenden Fall 30 mm oder 60 mm breit, ca. 500 mm bis 600 mm lang, enthalten zwei Lagen textiler Bewehrung und werden an beiden Enden auf einer Länge von ca. 125 mm zwischen starren Stahlplatten mit einer Gummizwischenlage geklemmt. Die Prüfung erfolgte weggesteuert in einer hydraulischen Prüfmaschine mit einer Belastungsgeschwindigkeit von ca. 1 mm/min. Während des Versuches wurden die Kraft und die Probenverformungen im mittig angeordneten Messbereich auf einer Länge von 200 mm mit einem anklemmbaren Extensiometer erfasst.

2.3 Versuchsprogramm

Die Proben sind Teil der Routineprüfungen im Rahmen eines größeren Versuchsprogramms [13] und entsprechen weitgehend gleichmäßig verteilten Stichproben in Gruppen von zwei bis vier Proben je Betoniercharge. Die im Folgenden verwendeten Daten nach Tabelle 2 repräsentieren einen Ausschnitt von ca. 1 % der im Versuchsprogramm verarbeiteten Textilmenge (ca. 100 m² je Material).

Tabelle 2: Versuchsprogramm

Table 2: Experimental program

Datensatz	Material	Richtung	Probenbreite	Probenanzahl
AR-K-30	Textil 1	Kette	30 mm	45
AR-K-60	Textil 1	Kette	60 mm	57
AR-S-60	Textil 1	Schuss	60 mm	102
C-K-60	Textil 2	Kette	60 mm	69
C-S-60	Textil 2	Schuss	60 mm	69

Aus den Messdaten bzw. den Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten wurden für diese Auswertung die Faserfestigkeit im Verbundbaustoff ermittelt. Dabei kamen zwei Varianten zur Anwendung. Bei der ersten Variante ergibt sich die Faserfestigkeit

$$\sigma_{fu} = F_u \cdot b / (n \cdot a_f) \quad (1)$$

aus der Bruchkraft im Versuch F_u , der Probenbreite b , der Faserquerschnittsfläche pro Meter a_f und der Lagenanzahl n . Alternativ kann die jeweilige Faserquerschnittsfläche der Probe durch das Auszählen der Faserbündel in der Bruchfläche ermittelt werden. Im Versuchsprogramm kamen beide Varianten zur Anwendung.

Liegen Informationen über die Faseranzahl in der Bruchfläche vor, kann die Unschärfe bezüglich der Faserquerschnittsfläche reduziert werden. Dagegen steigt der mögliche Fehler bei geringen Probenbreiten stark an, wenn nur die geometrischen Angaben zum Textil und der Probenbreite betrachtet werden. Bei üblichen Garnabständen von 7 mm bis 15 mm kann der Fehler bis zu 30 % ($b = 30$ mm) bzw. 15 % ($b = 60$ mm) betragen, je nachdem, ob ein Garn gerade noch im Probenquerschnitt liegt oder nicht mehr.

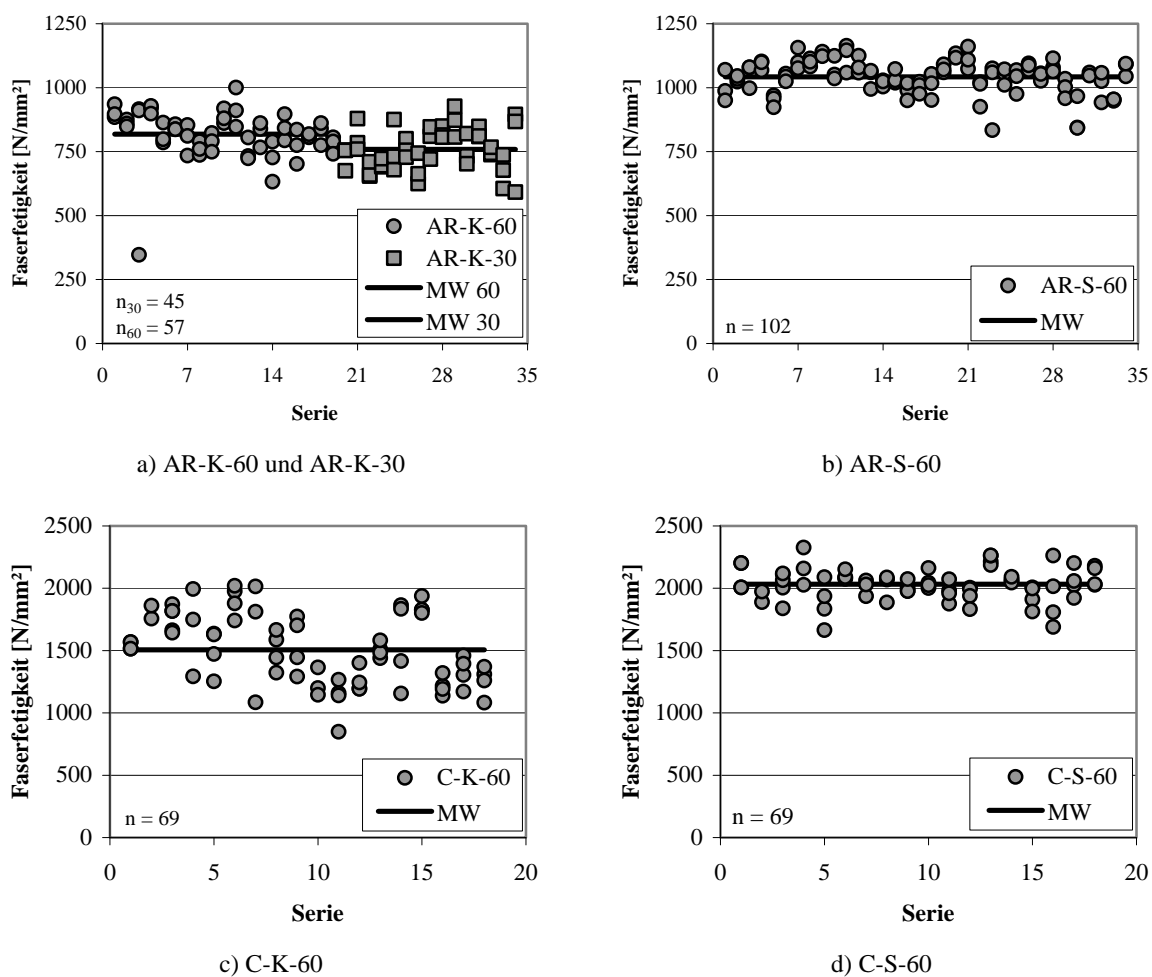


Bild 2: Variation der Festigkeiten über die Herstellungschargen des Verbundwerkstoffs

Fig. 2: Variation of the strength of the production batches of the composite

Bild 2 zeigt die Variation der gemessenen Festigkeiten über alle Herstellungschargen (Serien). In den Daten ist die Variation der Festigkeiten erkennbar. In Teilbild a) sind die Ergeb-

nisse der Serie mit AR-Glas (Kettrichtung) dargestellt. Die Probenbreite 30 mm und 60 mm wurden zusammengefasst. Die Festigkeiten für die schmalere Proben liegen geringfügig niedriger als bei den 60 mm Proben, die Streubreite ist vergleichbar. Für die Schussrichtung der AR-Glas-Proben sind die Werte in Teilbild b) angegeben, sowie in Teilbild d) für die Schussrichtung der Carbon-Proben. Für beide liegen die Streubereiche in vertretbarem Maß. Für die Kettrichtung der Carbon-Proben in Teilbild c) ist die Streuung größer. Die Ursachen der unterschiedlich großen Streuungen sind bisher nicht bekannt.

3 Textilbeton und Unschärfe

3.1 Ursachen der Unschärfe

Die Unschärfe der Festigkeit resultiert aus (a) den Materialeigenschaften der Einzelkomponenten, (b) dem Verarbeitungsprozess bei der Herstellung des Verbundwerkstoffes und (c) dem internen Lastabtragungsmechanismus (Verbund). Die Festigkeit der AR-Glas- und Carbonfasern streut in Folge nichtkonstanter Bedingungen während des Herstellungsprozesses[15]. Während der Verarbeitung der Garne zu Textilien verursachen unterschiedliche Faserspannungen sowie nichtkonstante Beschichtungskonzentrationen und Trockenbedingungen je nach Position des Garns innerhalb der Maschine weitere Streuungen. In der Herstellung und den Eigenschaften des Verbundwerkstoffes Textilbeton sind weitere Ursachen für Variabilität identifizierbar. Insbesondere wurde ein ausgeprägter Chargeneffekt der Betonagen beobachtet. Während der Belastungssteigerung beeinflussen die Rissbildung, lokale Verbundeigenschaften und lokale Materialsteifigkeiten die Lastverteilung in den Fasern und folglich die Bruchkraft. Der Versuchsaufbau führt in geringem Umfang zu Einspann- und Kerbeffekten, die wegen der guten Reproduzierbarkeit lediglich eine vernachlässigbare systematische Verschiebung der Festigkeit verursachen [16].

Die Phänomene sind deterministisch nicht beschreibbar – sie sind unscharf. Die Spezifikation der Unschärfe bezogen auf die einzelnen Phänomene ist jedoch nicht möglich. Die Unschärfe der Faserfestigkeit ist derzeit nur integral quantifizierbar. In den vorliegenden Daten dominieren vermutlich die Ursachen (a) und (c). Die Dehnkörper wurden den Routineprüfungen eines größeren Versuchsprogramms unter Laborbedingungen entnommen. Deshalb wird angenommen, dass Ursache (b), also Variationen in der Herstellungstechnologie des Verbundwerkstoffes, nur geringen Einfluss hat. Für eine erste Abschätzung von charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten bieten die vorliegenden Daten trotzdem eine Grundlage, da sie die wesentlichen Einflüsse abbilden. Nicht enthalten sind unter praktischen Bedingungen zu erwartende Variationen der Erhärtingsbedingungen des Feinbetons und der Einfluss der Herstellungschargen der textilen Bewehrungen, da hier alle Textilien eines Typs aus einer Produktionscharge stammen. Mit der Erweiterung der Datenbasis um diese Effekte können charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte festgelegt werden.

Zur Bewertung des Chargeneffektes der Betonage wurde eine Korrelationsanalyse zwischen den Kennwerten der Betonmatrix (Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit) und der Faserzugfestigkeit im Verbundwerkstoff durchgeführt. Die ermittelten Korrelationen zwischen den Betonfestigkeiten einer Charge und den Faserzugfestigkeiten sind sehr gering, so dass kein direkter Zusammenhang detektierbar ist.

Die weitere Ursachenzuordnung und die Quantifizierung der Unschärfe sind insbesondere für die weitere Optimierung des Produktionsprozesses vom Filament zum Textilbeton essentiell, um wirtschaftliche und zuverlässige Tragwerke planen und herstellen zu können.

3.2 Modelle

Traditionell wird Unschärfe mit Zufallsgrößen quantifiziert. Entsprechend der Ursache von Unschärfe sollten jedoch unterschiedliche Modelle gewählt werden, siehe SICKERT [17] und MÖLLER & BEER [18]. Materialinhärente Variationen sind zufällig und mit wahrscheinlichkeitsbasierten Modellen adäquat abbildbar. Das durch die ungenaue Kenntnis des Zusammenwirkens der Komponenten im Verbundwerkstoff und der Versagensmechanismen verursachte Informationsdefizit führt zu subjektiven Bewertungen der Messergebnisse. Die Quantifizierung der daraus resultierenden Ungenauigkeit mit dem Maß Wahrscheinlichkeit impliziert einen Informationsgehalt, der nicht verfügbar ist. Die Zuverlässigkeit einer Struktur aus Textilbeton ist dann nur mit generalisierten Unschärfemodellen möglich. Für die Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten werden im Folgenden nur die materialinhärenten Variationen betrachtet.

4 Teilsicherheitsbeiwerte auf Basis der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung

Der Teilsicherheitsbeiwert (TSB) für Textilbeton soll die Unschärfe der Baustoffeigenschaften abdecken. Neben den Streuungen, die unter Laborbedingungen auftreten, soll auch die Unschärfe der im Bauwerk realisierten Festigkeiten erfasst werden. Der TSB für Textilbeton ist folglich ein Materialfaktor zur Gewährleistung des Sicherheitsabstandes auf der Widerstandsseite. Dem Nachweiskonzept der Eurocodes folgend sind in den Materialfaktoren weitere unscharfe Phänomene enthalten. Zu diesen Phänomenen gehören Sicherheitszuschläge für Abweichungen der analytischen Modelle von der Realität und Geometrieabweichungen. Die Strenge der Qualitätssicherungsmaßnahmen und der Überwachung sowie die Vorankündigung des Bruchs beeinflussen den Wert der Materialfaktoren ebenfalls. Unter Vernachlässigung eventuell vorhandener Interaktionen lässt sich ein Materialfaktor

$$\gamma_m = \prod_i \gamma_{mi} \quad (2)$$

als Produkt der einzelnen Sicherheitsabstände γ_{mi} berechnen.

Ein Materialfaktor kann definitionsgemäß mit

$$\gamma_m = \frac{R_k}{R_d} \quad (3)$$

berechnet werden, wenn der charakteristische Wert R_k und der Bemessungswerte R_d bekannt sind. Die Werte R_k und R_d sind spezifische Realisierungen eines unscharfen Parameters, z.B. der Festigkeit. Unter Voraussetzung zufälliger Einflüsse wird die Unschärfe dieses Parameters mit Wahrscheinlichkeitsmodellen bewertet. Der charakteristische Wert R_k wird für Materialeigenschaften i.d.R. als 5 %-Quantil der Zufallsgröße festgelegt. Ausgangspunkt ist eine Stichprobe „zufälliger“ Messwerte.

Bemessungswerte können mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung ermittelt werden [19]. Bei diesem Verfahren werden alle Zufallsvariablen in den Raum der normierten Normalverteilung (y -Raum) transformiert, in dem der Sicherheitsindex β und die Sensibilitätsfaktoren α_i ermittelt werden, siehe Bild 3. Die dargestellten Kreise repräsentieren die Höhenlinien der Verbunddichte $\varphi(\underline{y}) = \prod_i \varphi(y_i)$ mit der Dichtefunktionen $\varphi(y_i)$ der Zufallsgrößen y_i . Die transformierte Grenzzustandsfunktion $h(\underline{y}) = 0$ wird im nichtlinearen Fall im Bemessungspunkt linearisiert, so dass der kürzeste senkrechte Abstand zum Koordinatenursprung berechnet werden kann.

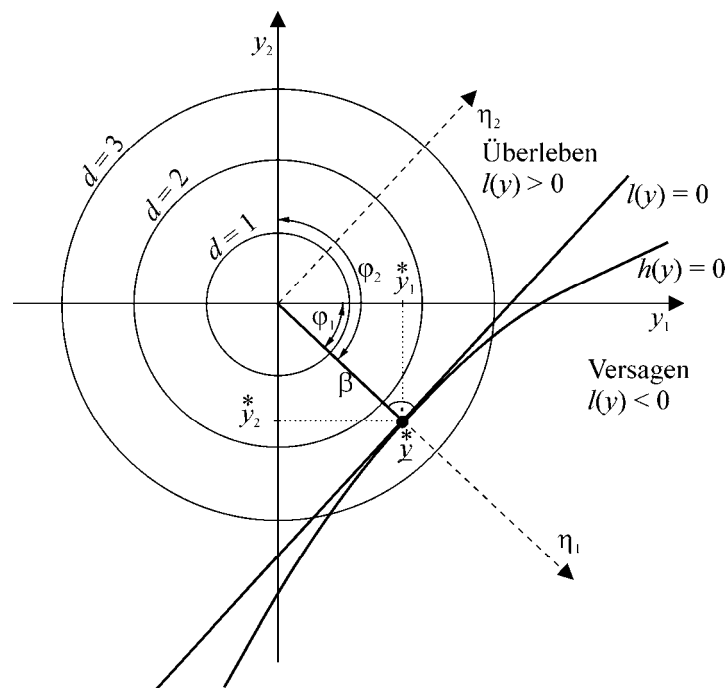


Bild 3: Bemessungspunkt und Sensibilitätsfaktoren im Raum der normierten Normalverteilung [20]

Fig. 3: Design point and sensitivity factors in the space of standard normal distribution [20]

Der Bemessungspunkt im y -Raum ergibt sich aus $\underline{y}^* = \beta \cdot \underline{\alpha}$. Die Koordinaten des Bemessungspunktes im x -Raum und damit die Bemessungswerte werden nach Rücktransformation mit den Verteilungsfunktionen aller Zufallsvariablen erhalten. Die kurze Darstellung zeigt, dass der Bemessungspunkt und damit die TSB von

1. dem erforderlichen Sicherheitsindex β ,
2. dem Typ der Verteilungsfunktion,
3. dem charakteristischen Wert $R_{k,i}$ und
4. dem Sensibilitätsfaktor α_i

abhängen.

Die ersten drei Listeneinträge können für den Textilbeton unter separater Betrachtung der vorhandenen Unschärfe festgelegt werden. Dagegen hängen die Faktoren α_i auch von den statistischen Werten der übrigen Zufallsvariablen eines Bemessungsmodells ab. Sie können nur mit der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung berechnet werden. Unter Verzicht auf diese Berechnungen wird eine konservative Abschätzung der Sensibilitätsfaktoren verwendet. Für Widerstandsgrößen wird $\alpha = -1$ gesetzt. Das bedeutet, dass die Streuungen der Versagenslasten ausschließlich von den Streuungen der einen betrachteten Größe abhängen. Der Eurocode EN 1990 erlaubt die Anwendung von $\alpha = -0,8$, wenn $0,16 < \sigma_E/\sigma_R < 7,6$ gilt. Maßgebend ist das Verhältnis der Standardabweichungen σ_E und σ_R der Einwirkung und des Widerstandes. Auf diese Abminderung wird hier verzichtet, da die Einwirkungen nicht betrachtet werden. Für den erforderlichen Sicherheitsindex $\beta = 3,8$ (siehe EN 1990) wird der Bemessungswert mit

$$R_d = F^{-1}\left(\Phi^{NN}(-1 \cdot 3,8)\right) = F^{-1}\left(7,2348 \cdot 10^{-5}\right) \quad (4)$$

berechnet [20]. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für R_d ist bei dieser Abschätzung bereits so klein, dass die Zielversagenswahrscheinlichkeit ohne Betrachtung der weiteren zufälligen Größen im Bemessungsmodell gewährleistet ist.

Alternativ kann der Bemessungswert auch pragmatisch als Quantilwert abgeschätzt werden. Für diese Abschätzung wird häufig die 3- σ -Regel angewendet. Der Bemessungswert wird mit dem Mittelwert μ_x und der Standardabweichung σ_x durch

$$R_d = \mu_x - 3\sigma_x \quad (5)$$

definiert. Unter Voraussetzung einer normalverteilten Zufallsgröße kann der TSB

$$\gamma_m = \frac{R_k}{R_d} = \frac{\mu_x - 1,64\sigma_x}{\mu_x - 3\sigma_x} = \frac{1 - 1,64v}{1 - 3v} \quad (6)$$

in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v = \sigma_x / \mu_x$ berechnet werden. Der Faktor 1,64 führt auf das 5 %-Quantil für den charakteristischen Wert. Beispielartig ergibt sich für $v = 0,1$ ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 1,194$. Der mit Gleichung (5) berechnete Bemessungs-

wert wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,00135 unterschritten. Im Vergleich zu Gleichung (4) ist die Versagenswahrscheinlichkeit demnach ca. eine Zehnerpotenz größer.

Nach Gleichung (6) ist der Teilsicherheitsbeiwert als Funktion des Variationskoeffizienten darstellbar. Die Auswertung der Funktion ist in Bild 4 als gestrichelte Linie eingetragen. Die durchgezogene Linie ergibt sich bei Anwendung von Gleichung (4) für den Bemessungswert. Bild 4 zeigt den rapiden Anstieg des Teilsicherheitsbeiwertes mit steigendem Variationskoeffizient.

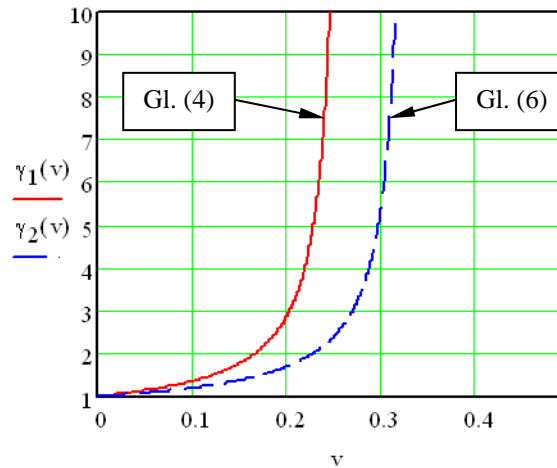


Bild 4: Abhängigkeit zwischen Variationskoeffizient und Teilsicherheitsbeiwert

Fig. 4: Dependency between coefficient of variation and partial safety factor

5 Beispiele

Im Beispiel werden Teilsicherheitsbeiwerte für die Faserzugfestigkeit von Textilbeton berechnet, die als ein Faktor γ_{mi} nach Gleichung (2) ein Bestandteil des TSB der Widerstandsseite sind. Ausgangspunkt der Berechnung ist die in den Bildern 2 a-d dargestellte statistische Untersuchung von Messergebnissen. Mit Punkt- und Intervallschätzern werden die Parameter für angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen ermittelt [20]. Die Wahl der Verteilungsfunktionen wird mit statistischen Tests [21] unterstützt. Der KS-Test und der χ^2 -Test schließen trotz der vergleichsweise großen Datenbasis weder die Normal- noch die logarithmischen Normalverteilung aus. Die Ergebnisse der Punktschätzer und der Intervallschätzer mit einem Konfidenzniveau von 95 % sind in Tabelle 3 bis 6 zusammengefasst. Die geschätzten Parameter bilden die Basis für die Berechnung charakteristischer Werte und der Teilsicherheitsbeiwerte. Die Berechnung wird für unterschiedliche Kombinationen dieser Parameter durchgeführt. Die Abhängigkeit der Parameter wird berücksichtigt. Entsprechend werden entweder der kleinste Mittelwert mit der mittleren Varianz oder ein mittlerer Mittelwert mit der maximalen Standardabweichung kombiniert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengefasst. Der Bemessungswert wird nach Gleichung (4) ermittelt. Der

Einfluss des Variationskoeffizienten C.O.V. ist in den ermittelten Teilsicherheitsbeiwerten deutlich erkennbar. Die berechneten Werte hängen außerdem stark vom gewählten Verteilungstyp und von den Parametern ab.

Tabelle 3: Statistische Auswertung der Bruchspannung (AR-Glass, Schussrichtung)

Table 3: Statistical evaluation of ultimate strength (AR glass, weft thread direction)

Normalverteilung		log. Normalverteilung			
Punktschätzer					
μ	1048,85			μ_u	6,9532
σ	70,88			σ_u	0,0675
C.O.V.	0,067				
Intervallschätzer					
μ_{min}	1036,78	μ_{max}	1060,91	$\mu_{u,min}$	6,9405
				$\mu_{u,max}$	6,9655
σ_{min}	63,17	σ_{max}	80,52	$\sigma_{u,min}$	0,0574
				$\sigma_{u,max}$	0,0765

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Bruchspannung (AR-Glas, Kettrichtung)

Table 4: Statistical evaluation of ultimate strength (AR glass, warp thread direction)

Normalverteilung		log. Normalverteilung			
Punktschätzer					
μ	818,16			μ_u	6,7006
σ	93,35			σ_u	0,1137
C.O.V.	0,114				
Intervallschätzer					
μ_{min}	793,39	μ_{max}	842,92	$\mu_{u,min}$	6,6636
				$\mu_{u,max}$	6,7286
σ_{min}	78,81	σ_{max}	114,51	$\sigma_{u,min}$	0,0687
				$\sigma_{u,max}$	0,1615

Tabelle 5: Statistische Auswertung der Bruchspannung (Carbon, Schussrichtung)

Table 5: Statistical evaluation of ultimate strength (Carbon, weft thread direction)

Normalverteilung		log. Normalverteilung			
Punktschätzer					
μ	2013,61			μ_u	7,6146
σ	128,28			σ_u	0,0631
C.O.V.	0,063				
Intervallschätzer					
μ_{min}	2000,79	μ_{max}	2062,42	$\mu_{u,min}$	7,6006
				$\mu_{u,max}$	7,6301
σ_{min}	109,87	σ_{max}	154,14	$\sigma_{u,min}$	0,0497
				$\sigma_{u,max}$	0,0744

Tabelle 6: Statistische Auswertung Bruchspannung (Carbon, Kettrichtung)**Table 6:** Statistical evaluation of ultimate strength (Carbon, warp thread direction)

Normalverteilung		log. Normalverteilung					
Punktschätzer							
μ	1503,47	μ_u	7,2982				
σ	282,39	σ_u	0,1862				
C.O.V.	0.188						
Intervallschätzer							
μ_{min}	1435,64	μ_{max}	1571,31	$\mu_{u,min}$	7,2505	$\mu_{u,max}$	7,3437
σ_{min}	241,88	σ_{max}	339,34	$\sigma_{u,min}$	0,1629	$\sigma_{u,max}$	0,2073

Tabelle 7: Teilsicherheitsbeiwerte für Kurzzeitbelastung bei Normalverteilung**Table 7:** Partial safety factors for short-term loading using normal distribution

Normalverteilung	μ, σ_{max}	μ_{min}, σ	μ, σ	μ, σ_{min}	μ_{max}, σ
AR-Glas, Schussrichtung					
5%-Quantil	916,41	920,19	932,26	944,99	944,32
Designwert	742,87	767,44	779,51	808,92	791,57
TSB	1,23	1,20	1,20	1,17	1,19
AR-Glas, Kettrichtung					
5%-Quantil	629,81	639,84	664,61	688,53	689,37
Designwert	383,02	438,66	463,43	518,68	488,19
TSB	1,64	1,46	1,43	1,33	1,41
Carbon, Schussrichtung					
5%-Quantil	1778,07	1789,79	1820,61	1850,89	1851,42
Designwert	1445,88	1513,33	1544,15	1614,10	1574,96
TSB	1,23	1,18	1,18	1,15	1,18
Carbon, Kettrichtung					
5%-Quantil	945,31	971,15	1038,98	1105,61	1106,82
Designwert	213,98	362,56	430,39	584,33	498,23
TSB	4,42	2,68	2,41	1,89	2,22

Infolge dieser Ungewissheit ergeben sich für die Teilsicherheitsbeiwerte Intervalle. Ein Beispiel ist die Kettrichtung des Carbon-Textils mit $\gamma_m = [1,89; 4,42]$. Aus den Messergebnissen von Bild 2 c) sind unter Zugrundelegung einer Normalverteilung keine praxisrelevanten Teilsicherheitsbeiwerte ableitbar, die gleichzeitig die Zuverlässigkeit und die Wirtschaftlichkeit befriedigen. Bei Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung ergeben sich dagegen Werte im Intervall $[1,42; 1,56]$. Dieser Unterschied dokumentiert den Einfluss des gewählten

Verteilungstyps deutlich. Die Anwendung dieser Ergebnisse wird jedoch nicht empfohlen, da der Typ der Verteilung ungewiss ist.

Tabelle 8: Teilsicherheitsbeiwerte für Kurzzeitbelastung bei logarithmischer Normalverteilung

Table 8: Partial safety factors for short-term loading using logarithmic normal distribution

log. Normalverteilung	$\mu_{u,min}$	$\sigma_{u,max}$	μ_u	σ_u	$\mu_{u,min}$	$\sigma_{u,max}$
AR-Glas, Schussrichtung						
5%-Quantil	911,11		936,52		963,99	
Designwert	772,63		809,73		851,82	
TSB	1,18		1,16		1,13	
AR-Glas, Kettrichtung						
5%-Quantil	600,62		674,24		746,65	
Designwert	424,07		527,71		643,90	
TSB	1,42		1,28		1,16	
Carbon, Schussrichtung						
5%-Quantil	1769,09		1827,69		1897,61	
Designwert	1507,01		1595,30		1704,86	
TSB	1,17		1,15		1,11	
Carbon, Kettrichtung						
5%-Quantil	1001,77		1087,82		1182,93	
Designwert	640,83		728,25		832,71	
TSB	1,56		1,49		1,42	

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Beitrag werden die Ergebnisse einaxialer Zugversuche vorgestellt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine statistische Auswertung und die Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Basis der Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung. Die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen die Unschärfe bei Kurzzeitbelastung und repräsentieren konservative Werte, da mit dem Sensibilitätsfaktor $\alpha = -1$ der volle Sicherheitsabstand dem Textil zugewiesen wurde.

Ziel der weiteren Materialentwicklung sollte aus wirtschaftlichen Überlegungen ein Variationskoeffizient der Bruchspannung unter 12 % sein. Mit der Weiterentwicklung der Textilherstellung zeichnet sich eine Entwicklung in dieser Richtung ab. Besonderes Potential zeigt die in LORENZ ET AL. [20] vorgestellte Nadelversatztechnik.

Für die Ermittlung zuverlässiger, integraler Sicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite ist die Erfassung weitere wesentlicher Einflüsse, wie der Dauerstandsfestigkeit und der Dauer-

haftigkeit mit ihrer Unschärfe sowie der herstellungsbedingten Streuungen der Geometrie erforderlich.

7 Literatur

- [1] MOLTER, M.: *Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. RWTH Aachen, Fakultät Bauingenieurwesen, 2005 – Dissertationsschrift
- [2] VOSS, S.: *Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von Textilbewehrtem Beton*. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät Bauingenieurwesen, 2008 – Dissertationsschrift
- [3] HEGGER, J; KULAS, C.; SCHNEIDER, H.N.; BRAMESHUBER, W.; HINZEN, M.; RAUPACH, M.; BÜTTNER, T.: TRC Pedestrian Bridge - Design, Load-bearing Behavior and Production Processes of a Slender and Light-weight Construction. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): *International RILEM Conference on Material Science - 2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete*. RILEM pro075, 2010, S. 353-364
- [4] HEGGER, J; HORSTMANN, M.; FELDMANN, M.; PYSCHNY, D.; RAUPACH, M.; BÜTTNER, T.; FEGER, C.: Sandwich Panels Made of TRC and Discrete and Continuous Connectors. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): *International RILEM Conference on Material Science - 2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete*. RILEM pro075, 2010, S. 381-392
- [5] HEGGER, J; SCHNEIDER, M.; KULAS, C.: *Dimensioning of TRC with Application to Ventilated Façade Systems*. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): *International RILEM Conference on Material Science - 2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete*. RILEM pro075, 2010, S. 393-403
- [6] BÖSCHE, A.: *Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrungen - Ansatz für ein Bemessungsmodell*. Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, 2007 – Dissertationsschrift
- [7] WEILAND, S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, 2009 – Dissertationsschrift
- [8] SCHLADITZ, F.: Textilbetonverstärkte Stahlbetonbauteile unter Torsionsbelastung. In: Breit, W.; Kurz, W.; Schell, J.; Kohlmeyer, C. (Hrsg.): *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Beiträge zum 51. Forschungskolloquium des DAfStb, Kaiserslautern, 11.-12.11.2010*. Technische Universität Kaiserslautern, 2010, S. 423-434
- [9] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Anchoring of shear strengthening for T-beams made of TRC. In: *Materials and Structures* 41 (2008), Nr. 2, S. 407–418 – doi: 10.1617/s11527-007-9254-9

- [10] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete for Strengthening in Bending and Shear. In: *Materials and Structures* 39 (2006), Nr. 8, S. 741–748 – doi: 10.1617/s11527-005-9027-2
- [11] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Umschnürungswirkung textilbewehrter Verstärkungen im Lasteinleitungsbereich von Stützen in Abhängigkeit von der Geometrie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 7, S. 490–500 – doi: 10.1002/best.201100018
- [12] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Column strengthening with TRC: Influences of the column geometry onto the confinement effect. In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2009, Article ID 493097 – doi:10.1155/2009/493097
- [13] JESSE, D.: *Tragverhalten von textilbewehrtem Beton unter zweiaxialer Zugbeanspruchung*. Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, 2011– Dissertationsschrift
- [14] BRAMESHUBER, W. ET AL.: *Uniaxial tensile test – Test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete*. RILEM, TC TDT, Entwurf, 2010, 7 S.
- [15] ABDKADER, A.; GRAF, W.; MÖLLER, B.; OFFERMANN, P.; SICKERT, J.-U.: Fuzzy-Stochastic Evaluation of Uncertainties in Material Parameters of Textiles. In: *AUTEX Research Journal* 2 (2002), Nr. 3, S. 115–125
- [16] HARTIG, J.; JESSE, F.; HÄUBLER-COMBE, U.: Evaluation of Experimental Setups for Determining the Tensile Strength of Textile Reinforced Concrete. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): *International RILEM Conference on Material Science - 2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete*. RILEM pro075, 2010, S. 117–127
- [17] SICKERT, J.-U.: *Fuzzy-Zufallsfunktionen und ihre Anwendung bei der Tragwerksanalyse und Sicherheitsbeurteilung*. Technische Universität Dresden: Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 9, 2005 – Dissertationsschrift
- [18] MÖLLER, B.; BEER, M.: Engineering Computation under Uncertainty - Capabilities of Non-Traditional Models. *Special Issue of Computers & Structures*, 86 (2008), S. 1024–1041
- [19] SPÄTHE, G.: *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*. 2., neubearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1992
- [20] BOSCH, K.: *Statistik-Taschenbuch*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 1998
- [21] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 1, S. 21–30 - doi: 10.1002/best.201000072

