
RINGVERSUCHE ZUR PRÜFUNG DER BIEGEFESTIGKEITEN VON STAHLFASERSPRITZBETONEN

ROUND-ROBIN TESTS ON TESTING THE FLEXURAL STRENGTHS OF STEEL FIBER REINFORCED SPRAYED CONCRETE

Sven **Plückelmann** und Rolf **Breitenbücher**

Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Im Zuge der Überarbeitung der europäischen Spritzbetonnorm wurden im Rahmen von TC104/WG10 Ringversuche zur Prüfung der Biegefestigkeiten von Stahlfaserspritzbeton durchgeführt. Gemäß der aktuell gültigen Norm [1] werden die Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug-, und Restfestigkeit) von faserverstärkten Spritzbetonen durch einen Vier-Punkt-Biegeversuch an Balken bestimmt. Kontrovers zu diesem Prüfverfahren wird in einer von EFNARC ausgearbeiteten Richtlinie [2] ein Drei-Punkt-Biegeversuch an gekerbten Platten empfohlen. Ziel der durchgeführten Ringversuche war es zum einen die Vergleichbarkeit und Korrelation zwischen beiden Prüfverfahren zu ermitteln, zum anderen die Präzision beider Prüfverfahren (d.h. die Reproduzierbarkeit und Prüfstreuung innerhalb sowie zwischen verschiedenen Labors) zu erfassen.

Within the revision of the European standard for sprayed concrete by TC 104/WG10, round-robin tests on testing the flexural strengths of steel fiber reinforced sprayed concrete were performed. According to the currently valid standard [1] the flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fiber reinforced sprayed concrete are determined through a four-point bending test on beam specimens. Controversial to this test method, a three-point bending test on square panels with notch is recommended in a guideline [2] elaborated by EFNARC. The aim of the performed round-robin tests was to investigate the comparability and correlation between the two test methods. Furthermore, the precision of both test methods (i.e. the reproducibility and scatter between and within different labs) was assessed.

1. Einleitung

Die Spezifikation der Duktilität faserbewehrter Spritzbetone erfolgt gemäß der aktuell gültigen Spritzbetonnorm EN 14487-1 [3] durch die Klassifizierung der Restfestigkeit und/oder das Energieabsorptionsvermögen. In der Regel wird die Restfestigkeit für den Fall bestimmt, dass die Materialeigenschaften des Betons im Rahmen von Nachweisverfahren benötigt werden. Die Klassifizierung der Restfestigkeit wird dabei durch die Festlegung eines Festigkeitsniveaus bzw. einer Mindestfestigkeit bei einem bestimmten Verformungsbereich vorgenommen. Bei der nach [3] festgelegten Prüfmethode zur Bestimmung der Restfestigkeit handelt es sich um einen Vier-Punkt-Biegeversuch an balkenförmigen Prüfkörpern gemäß EN 14488-3 [1]. Um die Struktureigenschaften faserbewehrter Spritzbetone für deren Hauptanwendungsgebiet im Tunnelbau möglichst realitätsnah erfassen zu können, wurde von der „National Railway Company (SNCF)“ in Frankreich eine weitere Prüfmethode entwickelt, die sowohl in die Empfehlungsrichtlinien von EFNARC als auch in [3] durch die EN 14488-5 [4] aufgenommen wurde. Diese Prüfmethode dient zur Bestimmung der absorbierten Energie von quadratischen, plattenförmigen Prüfkörpern, die allseitig gelagert und mittig durch eine Punktlast beansprucht werden. Auf diese Weise soll die im Tunnelausbau charakteristische

Beanspruchung durch biaxiale Biegung auf realitätsnah abgebildet werden. Die Klassifizierung anhand des Energieabsorptionsvermögens erfolgt mittels der in [3] definierten Mindestwerte für die Energieabsorption bei einer bestimmten Durchbiegung. In [3] wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Arten zur Spezifikation der Verformbarkeit von faserbewehrten Spritzbetonen durch die Restfestigkeit und das Energieabsorptionsvermögen nicht möglich ist. In Abhängigkeit der projektspezifischen Anforderungen an den Spritzbeton kann es daher notwendig sein, beide Prüfmethode durchzuführen. In diesem Fall müssen folglich zwei verschiedene Arten von Probekörper hergestellt und unter diversen Prüfbedingungen getestet und ausgewertet werden.

In Anlehnung an EN 14651 [5] („Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)“) wird in einer 2011 veröffentlichten EFNARC-Richtlinie [2] eine alternative Prüfmethode zu EN 14488-3 [1] zur Bestimmung der Biegefestigkeiten faserbewehrter Spritzbetone empfohlen. Bei dieser Prüfmethode handelt es sich um einen Drei-Punkt-Biegeversuch an gekerbten Platten. Der hauptsächliche Vorteil dieser Prüfmethode liegt darin, dass die Geometrie und Abmessungen der Platten mit denen für die Prüfung der Energieabsorption nach [4] übereinstimmen, sodass für eine Klassifizierung durch die Restfestigkeit und das Energieabsorptionsvermögen nur eine Art von Probekörper notwendig ist. Des Weiteren werden in [2] folgende weitere Vorteile angegeben:

- Die Geometrie und Abmessungen der Probekörper sowie die das angewandte Spritzverfahren stellen eine möglichst ähnliche Faserverteilung in der Betonmatrix sicher, wie sie bei realen Spritzbetonkonstruktionen vorzufinden ist;
- Die Abmessungen der Probekörper sind akzeptabel für das Handling im Labor (keine übermäßigen Gewichte oder Abmessungen);
- Die Prüfmethode kann ohne erheblichen zusätzlichen Aufwand in den meisten Labors mit üblicher Ausstattung durchgeführt werden (keine unnötigen technischen Raffinessen erforderlich);
- Die Probekörper (Platten) können auf der Baustelle hergestellt werden;
- Die Probekörper (Platten) müssen nicht gesägt werden, wodurch das Ergebnis beeinflusst werden könnte;
- Die Streuung der Ergebnisse sollte geringer ausfallen, als für die Prüfung an Balken nach [1];
- Die Kerbe führt zu einer langsameren Rissbildung, wodurch das Risiko eines abrupten Lastabfalls reduziert wird;
- In Analogie zu EN 14651 [5] werden die Restfestigkeiten ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$) in dieser Prüfmethode in Übereinstimmung mit der überarbeiteten internationalen Richtlinie „RILEM – fib Model Code 2010“ definiert.

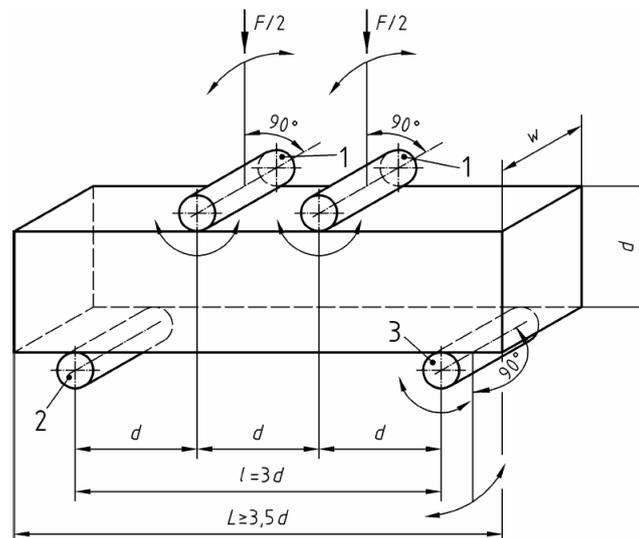
Einige der aufgeführten Vorteile sind sicherlich zunächst kritisch zu hinterfragen, zumal sie als Vorteile in Bezug auf die aktuell gültige Prüfmethode an Balken nach [1] genannt werden. Insbesondere im Hinblick auf das Handling der Probekörper sowie die erforderliche Laborausstattung ist die aktuell gültige Prüfmethode mindestens gleichwertig zu beurteilen. Der zuletzt aufgeführte Punkt bezüglich der Definition der Restfestigkeiten stellt für den Anwender aus normativen Gründen sogar eher einen Nachteil dar, da wie zuvor beschrieben für die Klassifizierung der Restfestigkeit nach [3] auf die Prüfung an Balken nach [1] verwiesen wird und die dort definierten Restfestigkeiten gänzlich anders definiert sind. Eine Klassifizierung nach [3] ist mit der von EFNARC empfohlenen Prüfmethode an gekerbten Platten daher nicht möglich. Des Weiteren bleibt zu überprüfen, ob die Streuung der Ergebnisse bei der Prüfung nach [2] tatsächlich geringer ausfällt als bei der Prüfung nach [1]. Ohne umfangreiche Untersuchungen diesbezüglich hat der in [2] als Vorteil betitelte Punkt eher einen Behauptungscharakter, zumal sowohl in [1] als auch [2] angegeben wird, dass gegenwärtig keine anerkannten Angaben zur Präzision der Prüfmethode vorliegen.

Im Zuge der Überarbeitung der europäischen Spritzbetonnorm durch TC104/WG10 wurde dieser Aussage im Rahmen von europäisch durchgeführten Ringversuchen zur Prüfung der Biegefestigkeiten von Stahlfaserspritzbetonen nachgegangen. Ziel der vom Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum koordinierten Ringversuche war es, zum einen die Vergleichbarkeit und Korrelation zwischen beiden Prüfverfahren zu ermitteln, zum anderen die Präzision beider Prüfverfahren (d.h. die Reproduzierbarkeit und Prüfstreuung innerhalb sowie zwischen verschiedenen Labors) zu erfassen.

2. Prüfmethoden

2.1 Biegefestigkeiten nach EN 14488-3 [1]

Zur Ermittlung der Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug-, und Restfestigkeit) nach [1] werden balkenförmige Prüfkörper mit Abmessungen von 75 mm Höhe \times 125 mm Breite und mindestens 500 mm Länge aus einer separat hergestellten Spritzbetonplatte herausgeschnitten. Die so hergestellten Balken werden in einem Vier-Punkt-Biegeversuch geprüft (Bild 1). Der Abstand der Auflagerschnitten beträgt 450 mm, der Abstand der Lastschneiden 150 mm. Gemessen werden die aufgebrachte Last sowie die Durchbiegung in Feldmitte.



Legende

- | | | | |
|-----|--|-----|-----------------------|
| 1 | Lastschneide (dreh- und neigungsfähig) | w | mittlere Balkenbreite |
| 2 | Auflagerschneide | d | Balkenhöhe |
| 3 | Auflagerschneide (dreh- und neigungsfähig) | L | Balkenlänge |
| F | Last (P_{fp} oder P_{ult}) in Newton | | |
| l | Spannweite | | |

Bild 1: Prüfanordnung gemäß EN 14488-3 [1]

Die Biegezugfestigkeit f_{ult} wird aus der aufgezeichneten Höchstlast P_{ult} berechnet. Für die Ermittlung der Erstrissfestigkeit f_{fp} wird eine Gerade durch den anfänglich linearen Teil der Last-Durchbiegungskurve gelegt und parallel bis zu einer Balkendurchbiegung von 0,1 mm verschoben. Die Erstrissfestigkeit f_{fp} wird dann aus der Erstrisslast P_{fp} errechnet, die sich aus dem Höchstwert P_{fp} beim Eintreten des ersten Risses bzw. dem Schnittpunkt der Last-Durchbiegungskurve mit der um 0,1 mm verschobenen Parallellinie ergibt (Bild 2, links). Entsprechend den in [3] festgelegten Restfestigkeitsklassen werden die Restfestigkeiten (f_{r1} , f_{r2} , f_{r4}) aus den minimalen Lasten (P_{r1} , P_{r2} , P_{r4}) der Last-Durchbiegungskurve in den Intervallen $D1$ (0,5 mm – 1 mm), $D2$ (0,5 mm – 2 mm) und $D3$ (0,5 mm – 4 mm) berechnet (Bild 2, rechts).

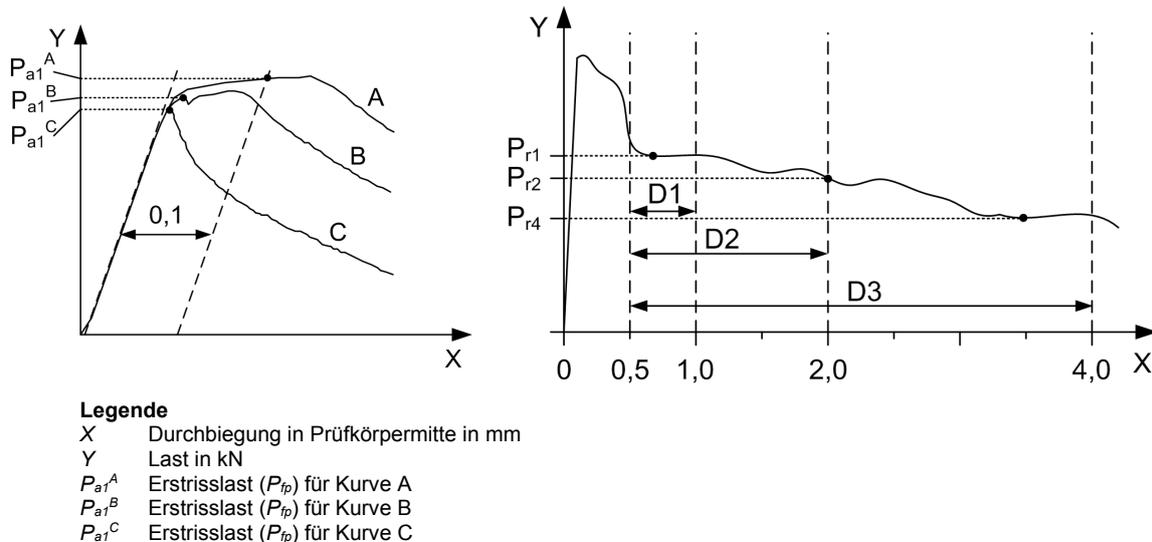


Bild 2: Erstrisslast P_{fp} (links) und Lasten P_{ri} zur Ermittlung der Restfestigkeiten gemäß [1]

2.2 Biegefestigkeiten nach EFNARC-Richtlinie [2]

In Anlehnung an das Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern nach EN 14651 [5] (Drei-Punkt-Biegeversuch an gekerbten Balken) werden die Biegefestigkeiten gemäß [2] an gekerbten Platten mit Abmessungen von 600 mm Breite \times 600 mm Länge und 100 mm Höhe in einem Drei-Punkt-Biegeversuch ermittelt (Bild 3). Die Kerbe hat eine Tiefe von 10 mm, sodass sich die effektive Querschnittshöhe unter der Lastschneide (h_{sp}) zu 90 mm ergibt. Der Abstand der Auflagerschneiden beträgt 500 mm. Die Platten sollten bei projektbezogenen Untersuchungen auf der Baustelle in entsprechenden Schalungen (Spritzkisten) hergestellt werden. In der Regel wird die aufgebrachte Last und die Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung ($CMOD$: Crack Mouth Opening Displacement) gemessen. Alternativ kann die Durchbiegung in Feldmitte gemessen und über die $CMOD$ -Durchbiegungs-Beziehung nach [2] umgerechnet werden.

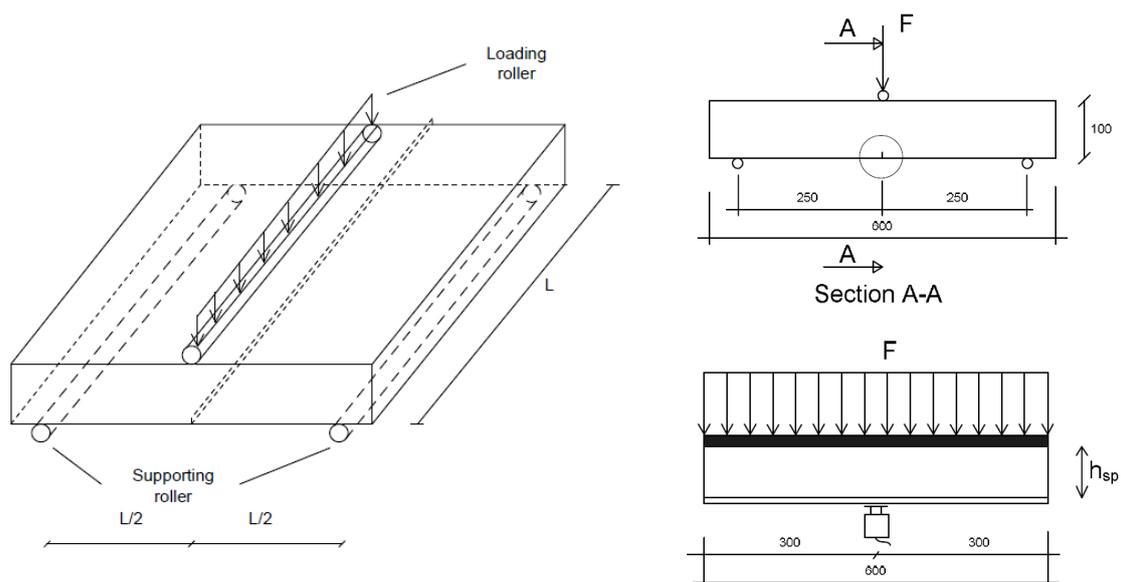


Bild 3: Prüfanordnung gemäß EFNARC [2]

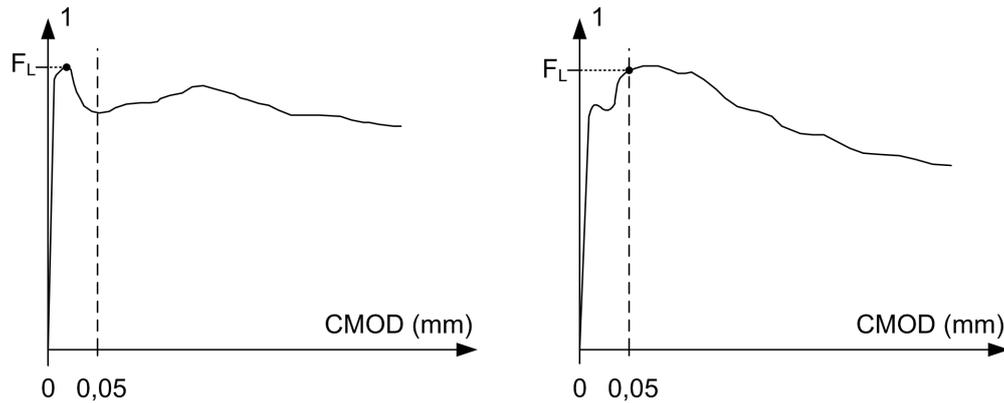


Bild 4: Last F_L zur Ermittlung der Proportionalitätsgrenze (LOP) gemäß [2]

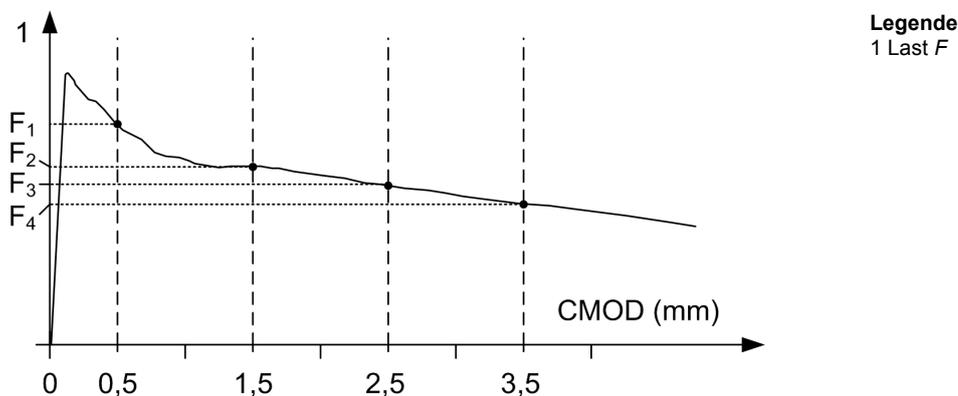


Bild 5: Lasten F_j zur Ermittlung der residuellen Biegefestigkeiten gemäß [2]

Aus der gemessenen Höchstlast F_{ult} wird die Biegezugfestigkeit f_{ult} berechnet. Anhand der Last-CMOD-Kurve wird in Analogie zu [5] die Proportionalitätsgrenze $f_{ct,L}$ (LOP: Limit Of Proportionality) bestimmt, welche sich aus der Höchstlast F_L im Intervall zwischen 0 mm und 0,05 mm ergibt (Bild 4). Die Restfestigkeiten (residuelle Biegezugfestigkeiten: f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4}) sind aus den zu $CMOD_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$) korrespondierenden Lasten F_j ($j = 1, 2, 3, 4$) zu bestimmen (Bild 5).

3. Ringversuche

3.1 Allgemeines

Für einen Vergleich zwischen den zwei verschiedenen Prüfverfahren und zur Eruierung derer Präzision wurden im Rahmen von TC104/WG10 Ringversuche auf europäischer Ebene durchgeführt. Die Ringversuche wurden vom Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum (RUB) organisiert, durchgeführt und ausgewertet. Neben der RUB waren folgende weitere Labors an der Durchführung der Prüfungen beteiligt:

- 1) Belgian Building Research Institute (BBRI), Belgien
- 2) Sigma béton, Frankreich
- 3) Global Product Innovation Italcementi S.p.A- Heidelberg Cement Group, Italien
- 4) Technische Universität München (TUM), Deutschland

3.2 Materialien

Zur Herstellung der Probekörper im Nassspritzverfahren wurde die in Tabelle 1 aufgelistete Betonrezeptur mit einer Festigkeitsklasse C30/37 verwendet. Der Fasergehalt wurde im

Rahmen der Untersuchungen von TC104/WG10 auf 50 kg/m^3 festgelegt und liegt damit an der oberen Grenze der für Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau üblichen Fasergehalte. Die charakteristischen Eigenschaften der verwendeten Stahlfasern sind in Tabelle 2 aufgezeigt. Als Gesteinskörnung wurde Sand und Rheinkies mit einem Größtkorn von 8 mm verwendet. Aus projektspezifischen Gründen (vgl. Abschnitt 3.3) betrug die Dosierung des an der Spritzdüse injizierten Beschleunigers (BE) 5,5 %.

Tab. 1: Spritzbetonrezeptur

Ausgangsstoffe		
Zement (CEM I 42,5 R)	[kg/m ³]	450
Gesteinskörnung (Sand, Kies) (Sieblinie ~ B8)	[kg/m ³]	1.600
Stahlfasern (DRAMIX 3D 65/35 BG)	[kg/m ³]	50
Wasser	[kg/m ³]	202,5
w/z-Wert	[-]	0,45
Fließmittel (PCE)	[% v.Z.]	0,56
Verzögerer	[% v.Z.]	0,4
<u>Injektion an der Spritzdüse:</u> Beschleuniger (Alkali-frei)	[% v.Z.]	5,5

Tab. 2: Eigenschaften der Stahlfasern

Eigenschaften		DRAMIX 3D 65/35 BG
Form	[-]	endverhakt
Länge	[mm]	35
Durchmesser	[mm]	0,55
Schlankheit (l/d)	[-]	65
Zugfestigkeit f_t	[N/mm ²]	1.345

3.3 Herstellung und Präparation der Probekörper

Alle Probekörper wurden im Nassspritzverfahren mit einem im Labor der RUB vorhandenen Spritzroboter hergestellt. Dadurch sollten möglichst realistische und praxisnahe Randbedingungen, ähnlich wie sie z.B. bei realen Tunnelbauprojekten vorliegen, sichergestellt werden. Der Spritzstand ermöglicht eine Minimierung der manuellen Einflüsse auf die Qualität des Spritzbetons, wodurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse negativ beeinflusst werden könnte. In Bild 6 ist der Spritzstand schematisch dargestellt.

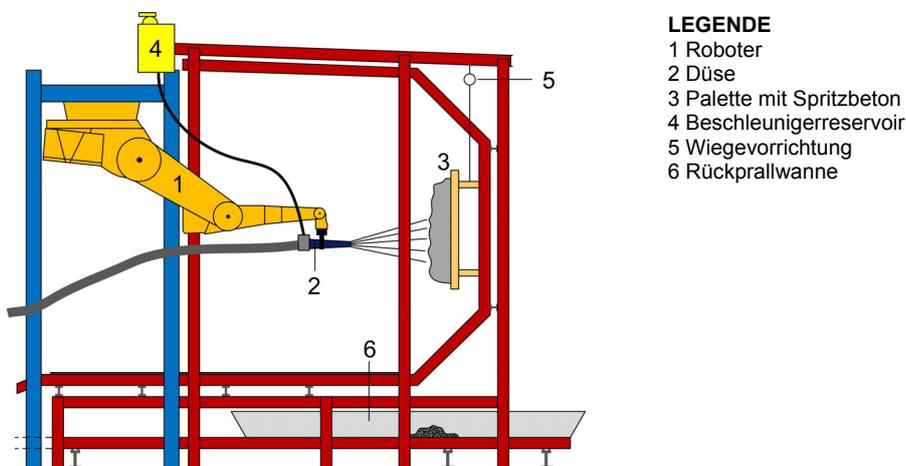


Bild 6: Schematische Darstellung des Spritzbetonstands

Der Ablauf bei der Herstellung der Probekörper war wie folgt:

- 1) Eine mit Siebdruckplatten beplankte Holzpalette wurde matt befeuchtet und in vertikaler Position vor der Düse des Spritzroboters fixiert;
- 2) Der frische Beton (Tabelle 1) wurde von einem lokalen Transportbetonwerk zum Labor der RUB geliefert (Fahrzeit des Betonmischers ca. 25-30 min);
- 3) Unmittelbar nach der Anlieferung des Betons wurde dieser hinsichtlich seiner Verarbeitbarkeit und Pumpfähigkeit im Rahmen von Konsistenzprüfungen und visueller Begutachtung beurteilt. Ebenfalls wurde die Verteilung der im Transportbetonwerk bereits beigemischten Stahlfasern zunächst visuell geprüft. Neben der Konsistenz (Ausbreitmaß nach EN 12350-5 [6]) wurden zur Ermittlung relevanter Frischbetoneigenschaften die Dichte (EN 12350-6 [7]) und der Luftporengehalt (EN 12350-7 [8]) der Ausgangsmischung bestimmt. Des Weiteren wurden Würfel ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) zum Nachweis der Konformität sowie zur Ermittlung des tatsächlichen Fasergehaltes hergestellt;
- 4) Der Beton wurde zum Spritzroboter gepumpt und durch die Düse ($\varnothing 42 \text{ mm}$) auf die vorbefeuchtete Palette gespritzt, wobei der Beschleuniger an der Düse injiziert wurde. Der Roboter führte die Düse nach einem programmierten Bewegungsablauf in horizontaler und vertikaler Richtung sowie einschließlich einer rotierenden Bewegung mit einem Abstand zur Palette von ca. 1,0 m. Dadurch sollte ein möglichst homogenes Gefüge des Spritzbetons erreicht werden;
- 5) Für die Herstellung der Platten für das Prüfverfahren nach [2] wurde im Rahmen von TC104/WG10 festgelegt, die erforderliche Schichtdicke von 100 mm unmittelbar nach dem Spritzvorgang durch das Abziehen der Spritzbetonoberfläche mit einem Stahlprofil sicherzustellen, um eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung des erhärteten Spritzbetons (z.B. durch Schneiden, Schleifen o.Ä.) zu vermeiden. Auf Grund dessen war es notwendig die BE-Dosierung so einzustellen, dass der Erstarrungsprozess des Betons nach dem Spritzvorgang gerade soweit fortgeschritten war, dass dieser einerseits formstabil in mehreren Lagen auf der vertikalen Palette haftete, andererseits das Abziehen der spritzrauen Oberfläche noch möglich war. In Vorversuchen hat sich bei der verwendeten Spritzbetonrezeptur (vgl. Tabelle 1) eine BE-Dosierung von 5,5 % als optimal herausgestellt. Bei der Herstellung der Balken war das Abziehen der Spritzbetonoberfläche nicht erforderlich, da diese gemäß [1] inklusive der Oberseiten aus der Spritzbetonpalette gesägt wurden. Bild 7 zeigt zwei verschiedene Paletten mit Spritzbeton zur Herstellung der Platten und Balken;
- 6) Nach dem Spritzen (und Abziehen) wurde der Spritzbeton mit feuchter Jute und Plastikfolie abgedeckt und für 24 h nachbehandelt. Anschließend wurden aus den Spritzpaletten die Balken ($125 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$) und Platten ($600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) gesägt (Platten seitlich gesägt, keine Verwendung von Spritzkisten). Die Platten wurden zusätzlich gekerbt. Zur Ermittlung der Druckfestigkeit des erhärteten Spritzbetons wurden Bohrkerne ($\varnothing 100 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$) aus den Spritzbetonplatten entnommen;
- 7) Die präparierten Probekörper wurden in Anlehnung an EN 12390-2 [9] in einer Nebelkammer (relative Luftfeuchte $\geq 95 \%$; Temperatur: $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 7 Tage lang nachbehandelt. Anschließend wurden die Probekörper bei einer Temperatur von $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $65 \% \pm 5 \%$, bis zum Transport zu den teilnehmenden Labors gelagert.

Insgesamt wurden an 3 Tagen 9 Paletten (3 Paletten pro Betoncharge) an der RUB gespritzt und daraus 16 Balken (8 pro Palette) und 21 Platten (3 pro Palette) hergestellt und präpariert. Davon erhielt jedes der 5 Labors 3 zufällig ausgewählte Balken und 4 Platten.



Bild 7: Paletten mit Spritzbeton zur Herstellung der Platten (links) und der Balken (rechts)

3.4 Prüfung der Biegefestigkeiten

Die Probekörper wurden 1 Woche vor und bis zum Prüfbeginn im jeweiligen Labor unter Wasser gelagert (Vorgabe gemäß [1] bzw. [2]: min. 3 Tage). Pro Labor wurden 3 Balken nach [1] und 4 Platten nach [2] geprüft (insgesamt: 15 Balken / 20 Platten). Das Betonalter der Probekörper zum Prüfzeitpunkt betrug 60 ± 2 Tage. Der Prüfzeitpunkt wurde festgelegt, um einen möglichst identischen Hydratationsgrad aller Probekörper voraussetzen zu können. Alle Labors waren angehalten die normativen Prüfvorschriften möglichst exakt einzuhalten.

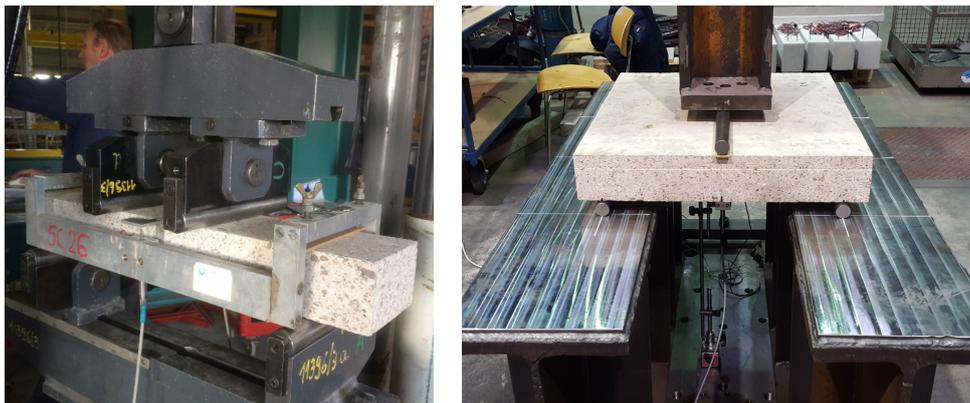


Bild 8: Biegeprüfung an Balken nach [1] (links) und an Platten nach [2] (rechts)

4. Ergebnisse

4.1 Frisch- und Festbetoneigenschaften des Spritzbetons

Zur Gewährleistung der Pumpbarkeit war eine sehr weiche bis fließfähige Konsistenz des Transportbetons erforderlich. Diese wurde durch die werkseitige Zugabe des PCE-Fließmittels sichergestellt (vgl. Tabelle 1). In Abhängigkeit der tatsächlichen Fahrtzeit des Mixers sowie der Standzeit bis zum jeweiligen Spritzvorgang variierte das Ausbreitmaß (Ermittlung jeweils unmittelbar vor dem Spritzvorgang) zwischen 620 mm (obere Grenze F5) und 540 mm (obere Grenze F4). Die Frischbetoneigenschaften der Ausgangsmischung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Frischbetoneigenschaften

Eigenschaften		Prüfmethode	Mittelwerte
Konsistenz	[mm]	EN 12350-5 [6]	580
Dichte	[kg/dm ³]	EN 12350-6 [7]	2,301
Luftporengehalt	[Vol.-%]	EN 12350-7 [8]	2,1

Der Fasergehalt wurde zerstörungsfrei mittels elektromagnetischer Induktion [10] bestimmt und lag zwischen 46 und 53 kg/m³. Der Konformitätsnachweis nach EN 206 [11] bzw. DIN 1045-1 [12] an den aus der Ausgangsmischung jeder Betoncharge (ohne BE) hergestellten Würfeln ergab eine Betonfestigkeitsklasse von C30/37 ($f_{cm} = 46 \text{ N/mm}^2$). Im Mittel lag die Druckfestigkeit des Spritzbetons, ermittelt an denen den Spritzbetonpaletten entnommenen Bohrkern, zum Prüfzeitpunkt bei 55 N/mm².

4.2 Biegefestigkeiten nach EN 14488-3 [1] und EFNARC [2]

In Bild 9 und 10 sind die Spannungs-Durchbiegungskurven bzw. die Spannungs-CMOD-Kurven aller im Rahmen der Ringversuche und im jeweiligen Labor (Lab A-E) geprüften Probekörper (Balken nach [1]: PK1-15; Platten nach [2]: PK1-20) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Struktursteifigkeiten der Balken und Platten im Anfangsstadium der Belastung jeweils annähernd übereinstimmen (Bild 9 und 10, rechts). Die Spannungs-Verformungskurven zeigen einen für Faserbeton charakteristischen Verlauf unter Biegebeanspruchung (Bild 9 und 10, links). Nach Erreichen des ersten Spannungsmaximums (Erststissspannung f_{fp} bzw. Proportionalitätsgrenze $f_{ct,L}$) ist ein abrupter Spannungsabfall der jeweiligen Kurve zu beobachten. Mit zunehmender Verformung werden die Biegezugspannungen – zumindest teilweise – durch die rissüberbrückenden Stahlfasern über die Rissflanken hinweg übertragen. Dieses duktile Nachrissverhalten ist durch die mehr oder weniger horizontal verlaufenden Spannungs-Verformungskurven im Nachrissbereich gekennzeichnet. Bei den Spannungs-CMOD-Kurven der Platten ist deutlich eine weitere Spannungszunahme im Nachrissbereich zu erkennen. Diese führt zu einem weiteren Spannungsmaximum im Bereich zwischen $0,5 \text{ mm} \leq \text{CMOD} \leq 2,0 \text{ mm}$. Anschließend folgt mit zunehmender Verformung eine sukzessive Spannungsabnahme. Die Spannungs-Durchbiegungskurven der Balken zeigen teilweise ebenfalls weitere Spannungszunahmen im Nachrissbereich. Im Vergleich zu den Spannungs-CMOD-Kurven der Platten sind die Spannungs-Durchbiegungskurven der Balken allerdings größtenteils durch einen sehr unstetigen und sprunghaften Verlauf im Nachrissbereich charakterisiert, sodass ein eindeutiger Bereich des Spannungsmaximums im Nachrissbereich nicht für alle Balken lokalisiert werden kann. Global betrachtet, ist im Nachrissbereich ebenfalls eine sukzessive Spannungsabnahme festzustellen. Der wesentlich gleichmäßigere Kurvenverlauf der Platten im Nachrissbereich kann auf die aus der Kerbe resultierende langsamere und lokal vorbestimmte Rissentwicklung zurückgeführt werden.

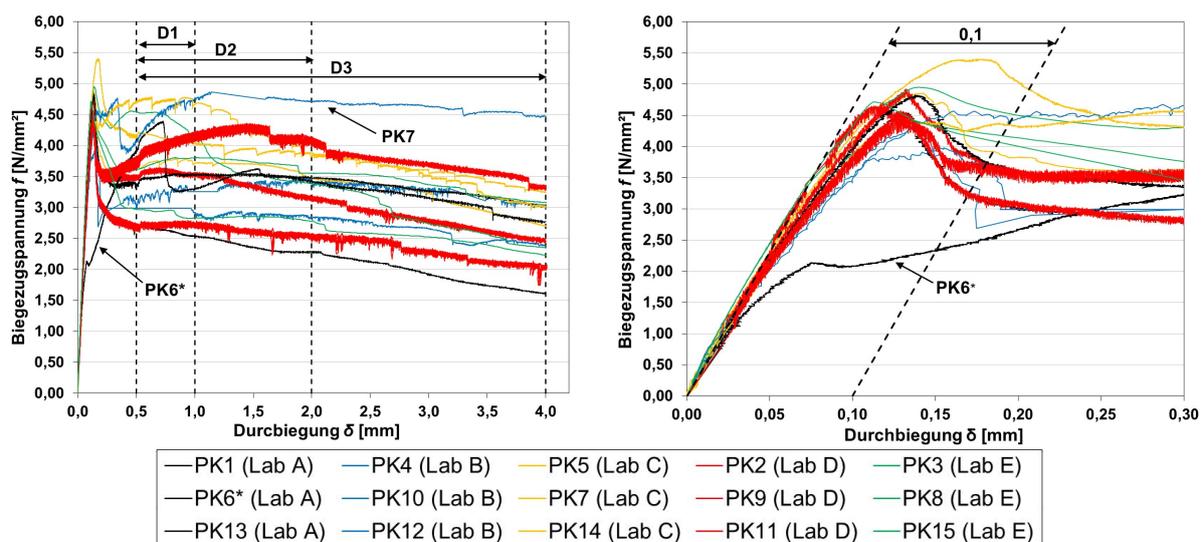


Bild 9: Spannungs-Durchbiegungskurven ermittelt an Balken nach [1] im Intervall [0 mm – 4,0 mm] (links) und [0 mm – 0,30 mm] (rechts)

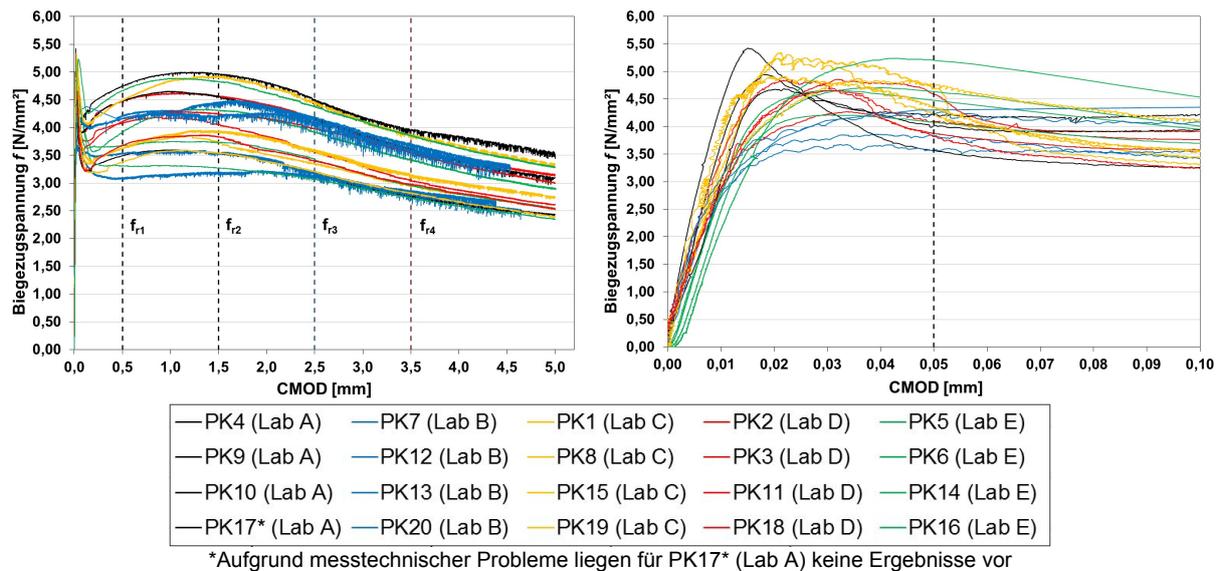


Bild 10: Spannungs-CMOD-Kurven ermittelt an Platten nach [2] im Intervall [0 mm – 5,0 mm] (links) und [0 mm – 0,10 mm] (rechts)

Aus den Last- bzw. Spannungs-Verformungskurven der Balken und Platten wurden die Biegefestigkeiten ermittelt (vgl. Abschnitt 2). Des Weiteren wurden für die jeweiligen Biegefestigkeiten die laborspezifischen und gesamtheitlichen Mittelwerte MV , Standardabweichungen s und Variationskoeffizienten v berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 11 und 12 dargestellt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Balken-„PK6“ aus nicht eindeutig geklärten Gründen ein stark abweichendes Spannungs-Verformungsverhalten bereits im Anfangsstadium der Belastung aufzeigt (Bild 9, rechts). Aus diesem Grund wurde für Balken „PK6“ ausschließlich die Biegezugfestigkeit f_{ult} ermittelt. Für die weitere Berechnung der Streuungen der Erst- und Nachrissbiegefestigkeiten wurde PK6* nicht berücksichtigt.

Trotz stark voneinander abweichender Probekörpergeometrien und Prüfbedingungen ergeben sich für beide Prüfverfahren im Mittel mit $f_{ult,Balken} = 4,68 \text{ N/mm}^2$ und $f_{ult,Platten} = 4,70 \text{ N/mm}^2$ quasi identische Biegezugfestigkeiten (Bild 11 a und 12 a). Auch die Streuung innerhalb der einzelnen Labore liegt in der gleichen Größenordnung ($0,22 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{ult,Balken,Lab.i}) \leq 0,44 \text{ N/mm}^2$; Platten: $0,22 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{ult,Platten,Lab.i}) \leq 0,42 \text{ N/mm}^2$). Bei der Betrachtung der Gesamtstreuung der Biegezugfestigkeiten ist festzustellen, dass diese für das Prüfverfahren an Balken etwas geringer ausfällt ($s(f_{ult,Balken,Gesamt}) = 0,33 \text{ N/mm}^2$) als für das Prüfverfahren an Platten ($s(f_{ult,Balken,Gesamt}) = 0,48 \text{ N/mm}^2$).

Sowohl die absoluten Werte, als auch die Streuung der Erstrissfestigkeiten f_{fp} bzw. der Proportionalitätsgrenzen $f_{ct,L}$ unterscheiden sich von denen der Biegefestigkeiten f_{ult} nur marginal (vgl. Bild 11 a mit 11 b bzw. 12 a mit 12 b). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Spannungen im Nachrissbereich die Erstrissfestigkeiten bzw. die Proportionalitätsgrenzen – bedingt durch den unterkritischen Fasergehalt von 50 kg/m^3 – in der Regel nicht überschreiten, sodass gilt $f_{ult} = f_{fp}$ bzw. $f_{ct,L}$. In einzelnen Ausnahmefällen (Balken: 2/14; Platten 3/19) ergeben sich für f_{ult} – allerdings nur sehr geringfügig – größere Werte als für f_{fp} bzw. $f_{ct,L}$ ($\Delta_{max,Balken} = f_{ult} - f_{fp} = 0,40 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\Delta_{max,Platten} = f_{ult} - f_{ct,L} = 0,20 \text{ N/mm}^2$). In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass eine vergleichsweise günstige Faserverteilung und/oder Faserorientierung im Rissbereich der Probekörper vorlag.

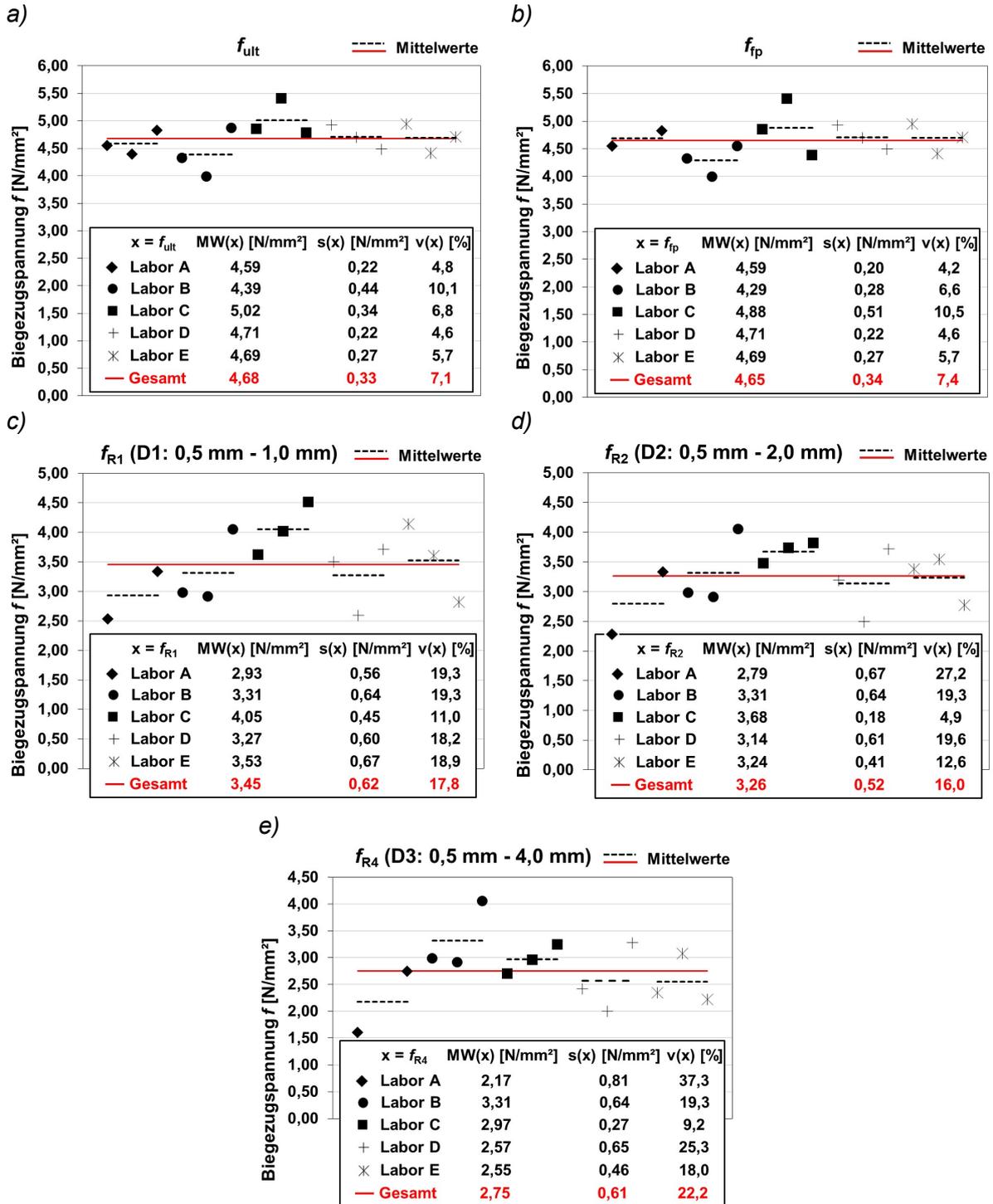


Bild 11: Biegefestigkeiten der Balken nach [1]

Die gemittelten Restfestigkeiten $f_{R,i}$ der Balken (Bild 11 c-e) liegen unter der Biegezug- und Erstrissfestigkeit und nehmen der Reihenfolge nach (d.h. mit größerem Durchbiegungsintervall) ab ($f_{R1} = 3,45 \text{ N/mm}^2 > f_{R2} = 3,26 \text{ N/mm}^2 > f_{R4} = 2,75 \text{ N/mm}^2$). Die Gesamtstreuungen der Restfestigkeiten sind dabei signifikant größer als die Gesamtstreuung der Biegezug- und Erstrissfestigkeiten ($0,52 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{Ri,Gesamt}) \leq 0,62 \text{ N/mm}^2$). Auch die Streuungen der Restfestigkeiten innerhalb der verschiedenen Labors liegen fast ausschließlich deutlich über den der Biegezug- und Erstrissfestigkeiten.

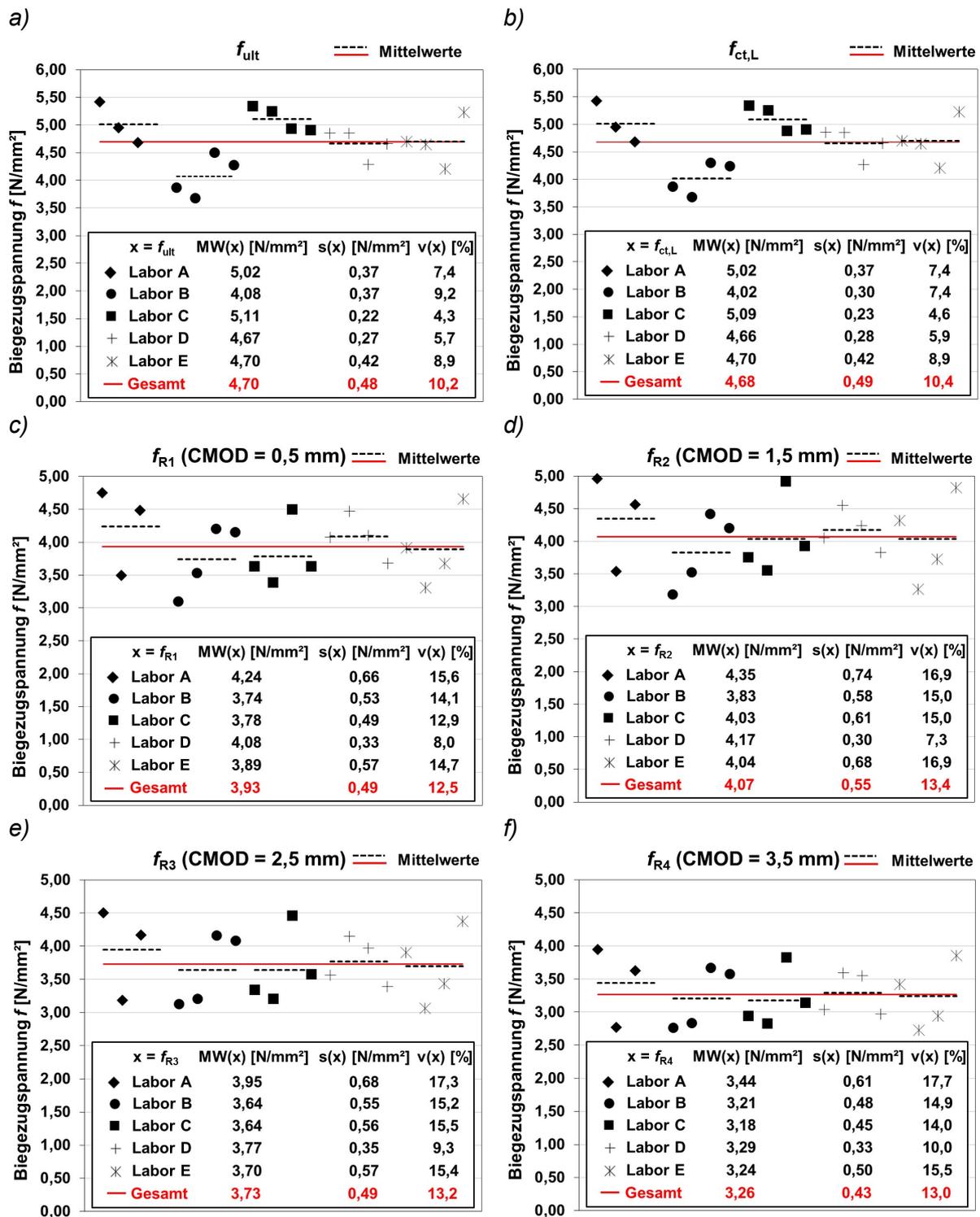


Bild 12: Biegefestigkeiten der Platten nach [2]

Für die Platten liegen die gemittelten Restfestigkeiten $f_{R,i}$ ebenfalls unter der Biegezugfestigkeit und Proportionalitätsgrenze (Bild 12 c-f). Wie anhand Bild 10 (links) bereits zu vermuten ist, ergeben sich für die Restfestigkeiten f_{R1} und f_{R2} ähnliche Mittelwerte. Dabei liegt f_{R2} mit 4,07 N/mm² sogar geringfügig über f_{R1} mit 3,93 N/mm². Ab f_{R2} nehmen die Restfestigkeiten ebenfalls der Reihenfolge nach (d.h. mit größerem CMOD) ab ($f_{R2} = 4,07$ N/mm² > $f_{R3} = 3,73$ N/mm² > $f_{R4} = 3,26$ N/mm²). Im Gegensatz zu den Prüfergebnissen der Balken, liegen die

Gesamtstreuungen der Nachrissfestigkeiten der Platten in derselben Größenordnung wie die Gesamtstreuungen der Biegezugfestigkeiten und Proportionalitätsgrenzen ($0,43 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{Ri,Gesamt}) \leq 0,55 \text{ N/mm}^2$). Innerhalb der einzelnen Labore sind allerdings teils deutlich größere Streuungen zu vermerken.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse zwischen Balken und Platten ist festzustellen, dass sich für die Prüfmethode an Platten nach [2] im Mittel geringfügig kleinere Streuungen der Restfestigkeiten ergeben, als für die Prüfmethode an Balken nach [1] ($0,43 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{Ri,Platten,Gesamt}) \leq 0,55 \text{ N/mm}^2$; $0,52 \text{ N/mm}^2 \leq s(f_{Ri,Balken,Gesamt}) \leq 0,62 \text{ N/mm}^2$). Dahingegen fallen die sich auf die Mittelwerte der Restfestigkeiten beziehenden Variationskoeffizienten $v(f_{Ri,Gesamt})$ aufgrund der vergleichsweise größeren Mittelwerte für die Prüfmethode an Platten nach [2] deutlich geringer aus als für die Prüfmethode an Balken nach [1] ($12,5 \% \leq v(f_{Ri,Platten,Gesamt}) \leq 13,4 \%$; Balken: $16,0 \% \leq v(f_{Ri,Balken,Gesamt}) \leq 22,2 \%$). Wie in diesem Beitrag einleitend allerdings ausdrücklich klargestellt, ist ein direkter Vergleich der Restfestigkeiten zwischen den angewandten Prüfmethoden aufgrund der unterschiedlichen Definitionen nicht möglich. Die etwas geringeren Werte und größeren Streuungen der Nachrissfestigkeiten bei dem Prüfverfahren an Balken nach [1] sind hauptsächlich dadurch bedingt, dass die Restfestigkeiten nach [1] definitionsgemäß aus dem Minimum der gemessenen Biegezugspannungen in einem bestimmten Verformungsintervall ermittelt werden. Die Restfestigkeiten der Platten hingegen werden nach [2] per Definition bei einer exakt festgelegten Verformung punktuell ermittelt (vgl. Abschnitt 2).

4.3 Präzision der Prüfmethoden

Die Präzision beider im Rahmen der Ringversuche untersuchten Prüfmethoden wurde nach ISO 5725-2 [14] ermittelt. Gemäß [14] wird die Präzision dabei über die Wiederholstandardabweichung s_r und Vergleichsstandardabweichung s_R abgeschätzt. Diese werden aus den korrespondierenden Varianzen berechnet. Die Vergleichsvarianz s_R^2 setzt sich aus der Wiederholvarianz s_r^2 und der Varianz zwischen den verschiedenen Labors s_L^2 zusammen (Gl. 1 nach [14]).

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (1)$$

mit:

s_L^2	<i>die Varianz zwischen den Labors;</i>
s_W^2	<i>die Varianz innerhalb eines Labors;</i>
s_r^2	<i>der arithmetische Mittelwert von s_W^2 und zugleich die Wiederholvarianz; dieser Mittelwert ist über alle Labors zu erstrecken, die sich am Ringversuch beteiligen und nach dem Ausscheiden von Ausreißern verbleiben;</i>
s_R^2	<i>die Vergleichsvarianz gemäß Gl. 1</i>

Vor der Ermittlung der Varianzen nach [14] ist es statistisch von Bedeutung, Ausreißer zu identifizieren und von der Berechnung auszuschließen. Die Ergebnisse der Biegefestigkeiten der Balken und Platten wurden mithilfe zweier verschiedener und in [14] vorgeschlagener Test-Methoden (Cochran-Test und Grubbs-Test) auf mögliche Ausreißer überprüft. Sowohl für die Balken als auch für die Platten wurden keine Ausreißer detektiert. Auch die Restfestigkeiten für Balken-„PK7“ sind gemäß den angewandten Tests nicht als Ausreißer zu werten, obwohl die Last-Durchbiegungskurve im Nachrissbereich deutlich von denen der anderen Probekörper abweicht (vgl. Bild 9, links).

In Tabelle 4 und 5 sind die Ergebnisse der Präzisionsermittlung für alle Biegefestigkeiten beider Prüfmethode aufgelistet. Zusätzlich zu den Varianzen s_i^2 und Standardabweichungen s_i wurden die zugehörigen Variationskoeffizienten v_i , bezogen auf den Gesamtmittelwert der jeweiligen Biegefestigkeit, ermittelt.

Tab. 4: Präzisionskenngrößen nach [14] für Prüfmethode an Balken nach [1]

	f_{ult}	f_{fp}	f_{R1}	f_{R2}	f_{R4}
$s^2_L [(N/mm^2)^2]$	0,019	0,014	0,035	(-0,011) 0,0	0,062
$s^2_r [(N/mm^2)^2]$	0,095	0,106	0,349	0,283	0,321
$s^2_R [(N/mm^2)^2]$	0,115	0,120	0,384	0,283	0,383
$s_L [N/mm^2]$	0,14	0,12	0,19	0,0	0,25
$s_r [N/mm^2]$	0,31	0,33	0,59	0,53	0,57
$s_R [N/mm^2]$	0,34	0,35	0,62	0,53	0,62
$v_L [\%]$	3,0	2,5	5,5	0,0	9,1
$v_r [\%]$	6,6	7,0	17,1	16,3	20,6
$v_R [\%]$	7,2	7,4	17,9	16,3	22,5

Tab. 5: Präzisionskenngrößen nach [14] für Prüfmethode an Platten nach [2]

	f_{ult}	$f_{ct,L}$	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
$s^2_L [(N/mm^2)^2]$	0,136	0,155	(-0,030) 0,0	(-0,057) 0,0	(-0,064) 0,0	(-0,049) 0,0
$s^2_r [(N/mm^2)^2]$	0,113	0,105	0,266	0,346	0,297	0,222
$s^2_R [(N/mm^2)^2]$	0,250	0,260	0,266	0,346	0,297	0,222
$s_L [N/mm^2]$	0,37	0,39	0,0	0,0	0,0	0,0
$s_r [N/mm^2]$	0,34	0,32	0,52	0,59	0,55	0,47
$s_R [N/mm^2]$	0,50	0,51	0,52	0,59	0,55	0,47
$v_L [\%]$	7,9	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0
$v_r [\%]$	7,2	6,9	11,0	12,6	11,7	10,1
$v_R [\%]$	10,6	10,9	13,1	14,5	14,6	14,4

Wie in Tabelle 4 und 5 zu erkennen ist, ergeben sich für mehrere Varianzen zwischen den Labors s^2_L bei der Berechnung nach [14] negative Werte. Dieses inkonsistente Ergebnis ist dem in [14] zugrundeliegenden statistischen Modell „ANOVO“ geschuldet und hat zu bedeuten, dass die Streuung zwischen den Labors in diesen Fällen statistisch nicht signifikant ist. Da eine Varianz per Definition keinen negativen Wert annehmen kann, wird s^2_L in diesen Fällen zu Null gesetzt [15].

Übereinstimmend mit den in Abschnitt 4.2 dargelegten Ergebnissen der Gesamtstreuungen ergeben sich für die Vergleichsstandardabweichungen s_R der Biegezugfestigkeit f_{ult} und Erststissfestigkeit f_{ft} bei der Prüfmethode an Balken nach [1] etwas geringere Werte als für die Vergleichsstandardabweichungen s_R der Biegezugfestigkeit f_{ult} und Proportionalitätsgrenze f_{fp} bei der Prüfmethode an Platten nach [2] ($s_R(f_{ult,Balken}) = 0,34 \text{ N/mm}^2 < s_R(f_{ult,Platten}) = 0,50 \text{ N/mm}^2$; $s_R(f_{fp}) = 0,35 \text{ N/mm}^2 < s_R(f_{ct,L}) = 0,51 \text{ N/mm}^2$). Anhand der Präzisionskenngrößen in Tabelle 4 und 5 wird allerdings deutlich, dass die Wiederholstandardabweichungen (gemittelte Streuung innerhalb der Labore) dieser Biegefestigkeiten in etwa übereinstimmen ($s_r(f_{ult,Balken}) = 0,31 \text{ N/mm}^2 \approx s_r(f_{ult,Platten}) = 0,34 \text{ N/mm}^2$; $s_r(f_{fp}) = 0,33 \text{ N/mm}^2 \approx s_r(f_{ct,L}) = 0,32 \text{ N/mm}^2$). Die größeren Werte der Vergleichsstandardabweichungen s_R resultieren aus der vergleichsweise größeren Streuung zwischen den Labors ($s_L(f_{ult,Balken}) = 0,14 \text{ N/mm}^2 < s_L(f_{ult,Platten}) = 0,37 \text{ N/mm}^2$; $s_L(f_{fp}) = 0,12 \text{ N/mm}^2 < s_L(f_{ct,L}) = 0,39 \text{ N/mm}^2$).

Die Vergleichsstandardabweichungen s_R der Restfestigkeiten liegen ebenfalls übereinstimmend von Abschnitt 4.2 für beide Prüfmethode in der gleichen Größenordnung ($0,53 \text{ N/mm}^2 \leq f_{Ri,Balken} \leq 0,62 \text{ N/mm}^2$; $0,47 \text{ N/mm}^2 \leq f_{Ri,Platten} \leq 0,59 \text{ N/mm}^2$). Dabei ist auch hier zu erkennen, dass die relativen Vergleichskoeffizienten v_R für die Prüfmethode an Platten nach [2] aufgrund der vergleichsweise größeren Mittelwerte der Restfestigkeiten signifikant kleiner sind als für die Prüfmethode an Balken nach [1] ($13,1 \% \leq v_{Ri,Platten} \leq 14,6 \%$; $16,3 \% \leq v_{Ri,Balken} \leq 22,5 \%$). Ein direkter Vergleich zwischen den Restfestigkeiten und deren Präzisionskenngrößen ist allerdings auch an dieser Stelle nicht möglich, sodass diesbezüglich keine fundierten Aussagen getroffen werden können.

Hervorzuheben ist, dass die Anzahl der geprüften Probekörper im Rahmen der durchgeführten Ringversuche zu gering war, um die Präzision der Prüfverfahren mit einer ausreichend hohen Genauigkeit feststellen zu können. Des Weiteren wären zusätzliche Untersuchungen u.a. im Hinblick auf andere Betonzusammensetzungen, Fasergehalte, Fasertypen etc. notwendig, um allgemeingültige Aussagen zur Präzision der Prüfmethoden zu treffen.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse liegt dennoch die Vermutung nahe, dass kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf die Präzision zwischen den zwei Prüfmethode besteht. Für die Biegezugfestigkeit f_{ult} sowie Erstrissfestigkeit f_{ft} bzw. Proportionalitätsgrenze $f_{ct,L}$ konnte eine etwas höhere Präzision für das Prüfverfahren an Balken nach [1] festgestellt werden. Dahingegen wurde für die Restfestigkeiten eine geringfügig höhere Präzision für das Prüfverfahren an Platten nach [2] ermittelt. Trotz dieser Unterschiede liegen die Präzisionskenngrößen der Biegefestigkeiten beider Prüfverfahren in ähnlicher Größenordnung. Eine signifikant geringere Streuung der Ergebnisse durch die Anwendung der Prüfmethode an Platten nach [2] im Vergleich zur Prüfmethode an Balken nach [1] (vgl. Abschnitt 1) konnte im Rahmen der hier beschriebenen Ringversuche nicht festgestellt werden.

5. Zusammenfassung

Gemäß der aktuell gültigen europäischen Spritzbetonnorm [3] sind die Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug-, und Restfestigkeit) faserbewehrter Spritzbetone durch einen Vier-Punkt-Biegeversuch an Balken nach [1] zu ermitteln. In [2] wird eine alternative Prüfmethode empfohlen, bei welcher die Biegefestigkeiten in einem Drei-Punkt-Biegeversuch an gekerbten Platten ermittelt werden. Ein hauptsächlicher Vorteil dieser Prüfmethode ist, dass die Geometrie und Abmessungen der Platten mit den Vorgaben der Prüfmethode zur Ermittlung der Energieabsorption nach [4] übereinstimmen, sodass für beide Prüfungen nur eine Art von Probekörper notwendig ist. Des Weiteren wird in [2] eine geringere Streuung der Ergebnisse als Vorteil dieser Prüfmethode genannt.

Im Rahmen von TC104/WG10 wurden Ringversuche auf europäischer Ebene durchgeführt, um beide Prüfmethoden vergleichend gegenüber zu stellen und deren Präzision (d.h. die Reproduzierbarkeit und Prüfstreuung innerhalb sowie zwischen verschiedenen Labors) zu erfassen. Dazu wurden vom Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum stahlfaserbewehrte Spritzbetonprobekörper (Balken nach [1] und Platten nach [2]) mithilfe eines im Labor der RUB vorhandenen Spritzroboters hergestellt. Die Probekörper wurden an insgesamt 5 teilnehmenden europäischen Labors geprüft.

Eine allgemeingültige Aussage über die Präzision der Prüfmethoden kann anhand der durchgeführten Ringversuche nicht getroffen werden, da eine zu geringe Anzahl von Probekörpern geprüft und ausschlaggebende Parameter wie z.B. die Betonzusammensetzung, der Fasergehalt und Fasertyp nicht variiert wurden. Bei der Ermittlung der Biegezugfestigkeit und Erstrissfestigkeit bzw. Proportionalitätsgrenze ergaben sich für beide Prüfmethoden im Hinblick auf die absoluten Werte annähernd identische Ergebnisse, wobei die Streuung für die

Prüfmethode an Balken nach [1] minimal geringer ausfiel. Ein direkter Vergleich zwischen den Prüfmethode im Hinblick auf die Restfestigkeiten und deren Streuungen ist aufgrund der unterschiedlichen Definitionen der Restfestigkeiten nicht möglich. Basierend auf den im Rahmen der Ringversuche generierten Ergebnisse sowie der ermittelten Präzisionskenngrößen ist jedoch festzuhalten, dass keine signifikanten Unterschiede in der Präzision bzw. Streuung zwischen beiden Prüfmethode festgestellt werden konnten.

Die aktuelle Normsituation führt zu der Schlussfolgerung, dass die Prüfmethode an Platten nach [2] zurzeit keine gleichwertige Alternative zur Prüfmethode an Balken nach [1] darstellt, da die Spezifikation der Duktilität faserbewehrter Spritzbetone gemäß der aktuell gültigen Spritzbetonnorm [3] über die Klassifizierung der Restfestigkeiten auf den in [1] definierten Restfestigkeiten beruht. Eine Klassifizierung nach [3] ist aufgrund der abweichenden Definitionen zur Ermittlung der Restfestigkeiten mit der Prüfmethode nach [2] daher nicht möglich.

6. Literatur

- [1] EN 14488-3:2006
Testing sprayed concrete – Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fibre reinforced beam specimens. Deutsche Fassung: DIN EN 14487-1:2006, September 2006.
- [2] EFNARC
Testing sprayed concrete – EFNARC three point bending test on square panel with notch – Flexural tensile strength of fibre reinforced concrete on sprayed test specimen. June 2011;
Deutsche Fassung: DIN EN 14487-1:2006, März 2006.
- [3] EN 14487-1:2005
Sprayed concrete – Part 1: Definitions, specifications and conformity. Deutsche Fassung: DIN EN 14487-1:2006, März 2006.
- [4] EN 14488-5:2006
Testing sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens. Deutsche Fassung: DIN EN 14487-1:2006, August 2006.
- [5] EN 14651:2005+A1:2007
Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Deutsche Fassung: DIN EN 14651:2005+A1:2007, Dezember 2007.
- [6] EN 12350-5:2009
Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test. Deutsche Fassung: DIN EN 12350-5, August 2009.
- [7] EN 12350-6:2009
Testing fresh concrete – Part 6: Density. Deutsche Fassung: DIN EN 12350-6, März 2011.
- [8] EN 12350-7:2009
Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods. Deutsche Fassung: DIN EN 12350-7, August 2009.
- [9] EN 12390-2:2009
Testing hardened concrete – Part 2: Making and curing specimens for strength tests. Deutsche Fassung: DIN EN 12390-2, August 2009.
- [10] Breitenbücher, R.; Rahm, H.:
Zerstörungsfreie Bestimmung des Stahlfasergehalts und der Stahlfaserorientierung im Frisch- und festbeton: Neues Prüfverfahren – Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Beton, Jg. 58, Nr. 3 (2009), S. 88-93.
- [11] EN 206:2013+A1:2016
Concrete – Specification, performance, production and conformity. Deutsche Fassung: DIN EN 206, Januar 2017.
- [12] DIN 1045-1
Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 1: Design and construction. Deutsche Fassung: DIN 1045-1, August 2009.
- [13] EN 12390-3:2009
Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. Deutsche Fassung: DIN EN 12390-3, Juli 2009.

[14] ISO 5725-2:1994

Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Deutsche Fassung: DIN ISO 5725-2:2002, Dezember 2002.

[15] Ellison, S. L. R. et. al.:

Practical Statistics for the Analytical Scientist: A Bench Guide. 2nd Edition, RSC Publishing, 2009.

Zu den Autoren

M.Sc. Sven Plückelmann

Studium des Bauingenieurwesens bis 2015 an der Ruhr-Universität Bochum; seit 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum

Sven.Plueckelmann@rub.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Studium und Promotion an der TU München; Leiter des Zentralen Baustofflabors der Philipp Holzmann AG und gleichzeitig Geschäftsführer der Philipp Holzmann Bautechnik GmbH; seit 2003 Inhaber des Lehrstuhls für Baustofftechnik an der Ruhr-Universität Bochum

Rolf.Breitenbuecher@rub.de