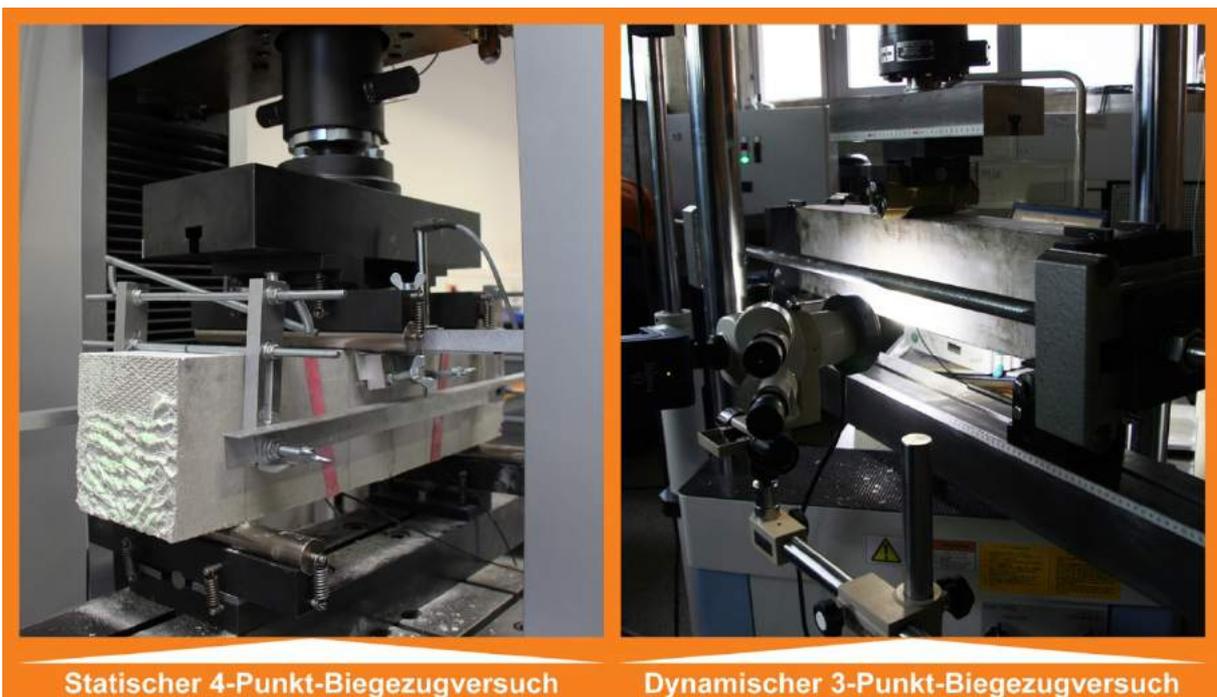


# Entwicklung einer rissfreien Bahnschwelle durch den Einsatz eines kombifaserbewehrten Hochfesten Betons - KOMBIFASERBETON -

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2011  
(VIF2011)

Oktober 2014



Statischer 4-Punkt-Biegezugversuch

Dynamischer 3-Punkt-Biegezugversuch

## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Renngasse 5  
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Universität Innsbruck  
Fakultät für Technische Wissenschaften  
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften  
Arbeitsbereich Materialtechnologie  
Technikerstraße 13  
A – 6020 Innsbruck



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien



# **Entwicklung einer rissfreien Bahnschwelle durch den Einsatz eines kombifaserbewehrten Hochfesten Betons - KOMBIFASERBETON -**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2011)

**Autoren:**

**Dr.- Ing. Sandro WEISHEIT  
Dipl.-Ing. Gregor METZLER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
ÖBB-Infrastruktur AG  
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Universität Innsbruck, Fakultät für Technische Wissenschaften,  
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

## I INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung und Zielsetzung .....	6
1.1	Stand der Technik .....	6
1.2	Problemstellung .....	8
1.3	Ziele des Vorhabens .....	9
1.4	Geplante Arbeitspakete zum Erreichen der Ziele .....	9
2.	Arbeitspaket 1 - Rezeptentwicklung eines SCHPC .....	11
2.1	Ziele und Vorgehensweise .....	11
2.2	Verwendete Materialien .....	11
2.3	Prüfmethoden .....	13
2.4	Ergebnisse - Frischbetonversuche .....	15
2.5	Ergebnisse - Festbetonversuche .....	17
2.6	Fazit aus Arbeitspaket 1 .....	18
3.	Arbeitspaket 2 - Optimierung der Faserkombination .....	20
3.1	Ziele und Vorgehensweise .....	20
3.2	Verwendete Materialien .....	20
3.3	Prüfmethoden .....	22
3.4	Probenherstellung und Lagerung .....	26
3.5	Faserkombinationen .....	28
3.6	Ergebnisse - Frischbetonversuche .....	29
3.7	Ergebnisse - Würfeldruckfestigkeiten .....	32
3.8	Ergebnisse - Äquivalente Biegezugversuche .....	34
3.9	Ergebnisse - Schwindringversuche .....	36
3.10	Fazit aus Arbeitspaket 2 .....	37
4.	Arbeitspaket 3 - Dynamische Versuche an Laborprobekörpern .....	39
4.1	Ziele und Vorgehensweise .....	39
4.2	Prüfmethoden .....	39
4.3	Probenherstellung und Lagerung .....	40
4.4	Versuchsserien .....	41
4.5	Ergebnisse .....	42
4.6	Fazit aus Arbeitspaket 3 .....	47

5.	Zusammenfassung und Ausblick .....	49
II	Abbildungsverzeichnis .....	50
III	Tabellenverzeichnis .....	52
IV	Literaturverzeichnis .....	53
V	Anlage.....	55

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

### 1.1 Stand der Technik

Die Bahnschwelle hat als Teil des Eisenbahnoberbaus die Aufgabe, die Schienen zu tragen und deren Belastungen auf dem Gleis-Unterbau, welcher i.d.R. aus Schotter besteht, zu übertragen und zu verteilen. Des Weiteren muss durch eine Fixierung des Gleises auf der Schwelle die Einhaltung der Spurweite der Schiene gewährleistet werden. Dabei müssen die Eisenbahnschwellen gewissen Anforderungen genügen. Sie müssen vor allem Lasten gut verteilen können, ausreichend maßhaltig sein, ausreichend der Witterung widerstehen und dementsprechend günstig in der Instandhaltung sein.

Bislang wurden verschiedenste Materialien zur Herstellung von Eisenbahnschwellen verwendet. Hier sind zunächst Schwellen aus Hartholz, wie Buchen- oder Eichenholz zu nennen (siehe Abb.1-a), welche bereits vor über 150 Jahren zum Einsatz kamen. Da Holzschwellen weit weniger als andere Materialien Vibrationen übertragen, werden diese bevorzugt in Wohngebieten eingesetzt. Ein wesentlicher Nachteil von Holzschwellen ist, dass sie zum Schutz gegen Pilz-, Bakterien- und Insektenbefall mit Imprägnierölen (Steinkohlenteeröl) getränkt werden müssen. Diese Öle sind allerdings gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe und müssen dementsprechend fachgerecht entsorgt werden.

Des Weiteren werden ebenfalls Schwellen aus Stahl verwendet. Hier unterscheidet man zwischen zwei Bauarten. Da die trogförmige Stahlschwellen-Bauart nicht mechanisiert verlegt werden kann, wird diese heute nicht mehr eingesetzt. Die Y-Stahlschwelle dagegen, ist eine besondere Form der Eisenbahnschwelle, da hier paarweise geschwungen geformte Stahlprofile zusammengefügt werden (siehe Abb. 1-b).



(a)



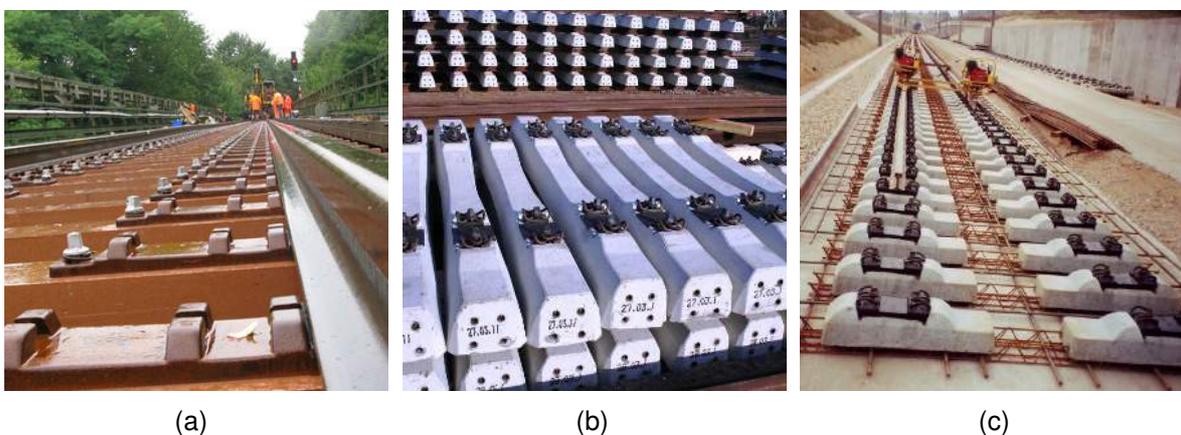
(b)

**Abb. 1:** Beispiele für Schwellenbauarten: Holzschwelle (a) aus <sup>[1]</sup> und Y-Stahlschwelle (b) aus <sup>[2]</sup>

Die Vorteile der Y-Stahlschwellen liegen in der geringen Bauhöhe, der hohen Gleisstabilität und in der gegenüber anderen Schwellenarten hohen Elastizität. Nachteilig sind bei dieser Schwellenart die hohen Kosten. Wegen der geringen Aufstandsfläche ist ebenfalls häufig eine aufwändige Nachregulierung des Gleiskörpers notwendig.

Ein weiteres Alternativmaterial, die sogenannte FFU-Kunstholzschwelle (auch als Kunststoffschwelle bezeichnet), wurde in den 1980er Jahren in Japan entwickelt (siehe Abb. 2-a). Kunststoffschwellen bestehen aus glasfaserverstärkten Polyurethan. Diese Schwellen können bis zu 100% aus Recyclingmaterial bestehen. Sie sind langlebig und witterungsbeständig, zeigten sich aber problematisch bezüglich der UV-Beständigkeit. Des Weiteren sind die Systemkosten sehr hoch und die CO<sub>2</sub>-Bilanz ist bei diesem Material ebenfalls sehr schlecht.

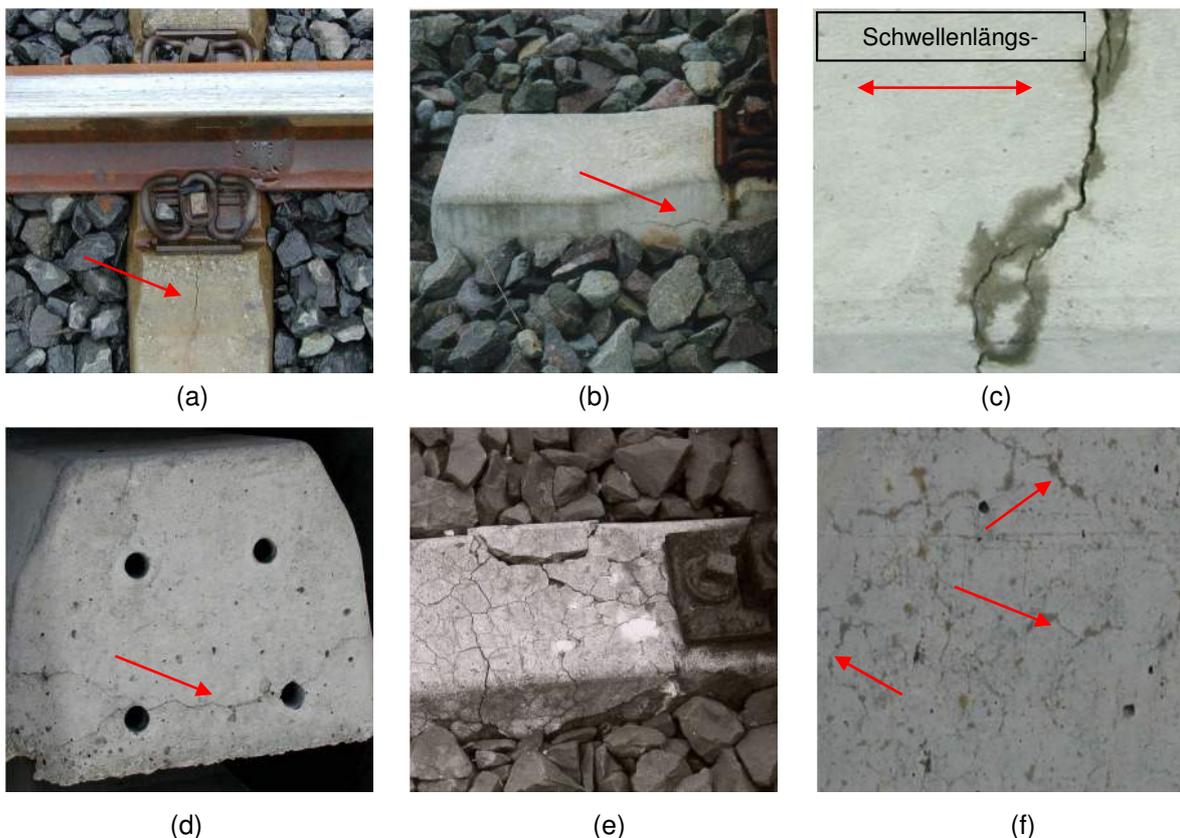
Die ersten Betonschwellen wurden um 1890 eingeführt. In den 1920er Jahren begann in Deutschland die Erprobung von Schwellen aus Beton. Zunächst wurde ein reiner Stahlbeton verwendet. Als es in den 1950er Jahren möglich war, durch die Spannbetontechnologie größere Zugkräfte aufzunehmen, fanden Betonschwellen eine größere Verbreitung. Da die Schwellen ein Gewicht von bis zu 300 kg haben, ist ein Einsatz von Maschinen für den Einbau zwingend erforderlich. Durch das hohe Eigengewicht kann allerdings auch eine bessere Lagesicherheit gewährleistet werden. Beim Material Beton kann zwischen zwei verschiedenen Bauarten unterschieden werden, die Monoblockschwelle (siehe Abb. 2-b) und die Zweiblockschwelle (siehe Abb. 2-c). Letztere besteht aus zwei Betonblöcken, welche mit einem Spurhalter aus einem L- oder T-förmigen Stahlprofil miteinander verbunden sind. Die Zweiblockschwelle kommt vor allem bei Hochgeschwindigkeitsstrecken als „Feste Fahrbahn“ zur Anwendung.



**Abb. 2:** Beispiele für Schwellenbauarten: Kunstholzschwelle (a) aus <sup>[3]</sup>, Spannbeton-Monoblockschwelle (b) aus <sup>[4]</sup> und Zweiblockschwelle (c) aus <sup>[5]</sup>

## 1.2 Problemstellung

In der Praxis traten bislang immer wieder Risse in Spannbetonschwellen auf. Hierbei kann nach dem Katalog für Schäden an Spannbetonschwellen der Deutschen Bahn<sup>[6]</sup> zwischen Längs-, Sicken-, Quer-, Kopf-, Treib- und Schwindrissen (siehe Abb. 3) unterschieden werden. Die Ursachen hierfür sind meistens in Mängeln bei der Herstellung oder beim Einbau der Schwellen zu suchen. Beim Auftreten den ersten vier Rissarten wurde häufig die Spannkraft auf die Fertigteile bei noch ungenügender Betonfestigkeit aufgebracht oder die Spannkraft war allgemein zu niedrig, um die erforderliche Tragfähigkeit zu erreichen. Bei den Treib- und Schwindrissen dagegen liegt der Fehler bei der Mischungszusammensetzung oder bei der Nachbehandlung im Schwellenwerk. Ende der 1990er Jahre traten in Deutschland einige Jahre nach Fertigstellung von Neubaustrecken Risse an wärmebehandelten Bahnschwellen auf. Als Schadensursache konnten damals latente Treiberscheinungen (Spätettringitbildung), welche durch die Wärmebehandlung ausgelöst wurde, nachgewiesen werden.



**Abb. 3:** häufige Rissarten bei Spannbetonschwellen nach <sup>[6]</sup>; Längsriss (a), Sickenriss (b), Querriss (c), Kopfriss (d), Treibriss (e) und Schwindrisse (f)

Bei den auftretenden Rissarten kann grundsätzlich zwischen Makrorissen infolge einer unzureichenden Tragfähigkeit und Mikrorissen infolge von Schwinderscheinungen unterschieden werden. Da infolge auftretender Risse die Dichtheit des Betons erheblich reduziert wird, sinken ebenfalls die Dauerhaftigkeit und damit der Widerstand der Betonschwellen gegenüber schädlichen Umwelteinflüssen und die Lebensdauer nimmt dadurch rapide ab.

### 1.3 Ziele des Vorhabens

Durch die Entwicklung einer Rezeptur für einen kombifaserbewehrten Hochfesten Beton soll die Gefahr der Rissbildung reduziert werden. Dabei sollen zur Reduzierung von Schwindrissen sogenannte Mikrofasern und zur Senkung des Risikos der Rissbildung aus konstruktiven Gründen Makrofasern in Kombination Anwendung finden. Des Weiteren soll der zu entwickelnde Beton der Druckfestigkeitsklasse C80/95 entsprechen und somit ein Hochfester Beton sein. Durch die Verwendung der Fasern kann ebenfalls die i.d.R. geringere Duktilität von Hochfesten Betonen wesentlich verbessert werden.

Durch die wesentlich höheren Druck- und Biegezugfestigkeiten dieses neu entwickelten Betons gegenüber üblichen Rezepturen für Schwellenbetone, soll eine Reduzierung des Querschnitts der Spannstahleinlage und eine Verringerung der für das Erreichen der erforderlichen Tragfähigkeit benötigten Betonschwellenhöhe erwirken. Dadurch wäre eine geforderte Kostenreduzierung möglich. Des Weiteren wird durch die Reduzierung des Rissrisikos durch das Einbringen der Fasern, die Lebensdauer der Betonschwellen wesentlich erhöht.

### 1.4 Geplante Arbeitspakete zum Erreichen der Ziele

Zum Erreichen der genannten Ziele werden im Rahmen von drei Arbeitspaketen (AP) folgende Beiträge geleistet:

**AP 1 Rezepturentwicklung eines SCHPC:** An dieser Stelle sollen noch keine Fasern zum Einsatz kommen. Hier wird lediglich unter der Verwendung von lokalen Ausgangsstoffen eine Rezeptur für einen Beton entwickelt, welcher hochfeste Eigenschaften besitzt und leicht- bzw. selbstverdichtende Eigenschaften aufweist.

**AP 2 Optimierung der Faserkombination:** Hier soll bestimmt werden, wie sich die Verwendung von verschiedenen Mikro- und Makrofasern auf die Frisch- und vor allem auf die Festbetoneigenschaften auswirken. Letztendlich soll festgelegt werden, mit

welcher Kombination an Mikro- und Makrofasern die besten Ergebnisse erreicht werden können.

**AP3 Dynamische Versuche an Laborprobekörpern:** nach erfolgter Festlegung der optimalen Mikro- und Makrofasergehalte sollen Probekörper im verkleinerten Maßstab untersucht werden. Dabei sollen vergleichende Versuche mit Probekörpern angestellt werden, welche aus Standardbeton aus der Spannbetonschwellenproduktion hergestellt werden.

## 2. ARBEITSPAKET 1 - Rezepturentwicklung eines SCHPC

### 2.1 Ziele und Vorgehensweise

Die Zielsetzung dieses Arbeitspaketes bestand darin, unter der Verwendung von lokalen Ausgangsstoffen eine Grundrezeptur für einen Beton zu entwickeln, welcher hochfeste Eigenschaften besitzt, leicht- bzw. selbstverdichtende Eigenschaften aufweist und eine ausreichend lange Verarbeitungszeit im Fertigteilwerk ermöglicht. Dabei soll der Beton eine hohe Viskosität aufweisen, um ein Absinken der Fasern während und nach der Betonage zu verhindern.

Aufgrund umfangreicher Erfahrungen zum Thema Selbstverdichtender Beton, wurde zur Entwicklung der Rezeptur auf die übliche Vorgehensweise nach Okamura<sup>[7], [8]</sup> (aufeinanderfolgende Leim-, Mörtel- und Betonversuche) verzichtet. Vielmehr wurde eine Reihe von Tastversuchen mit unterschiedlichen Ausgangsstoffen und Mischungsrezepturen durchgeführt, um eine stabile und homogene Rezeptur zu finden, welche die oben genannten Anforderungen erfüllt. Im Folgenden sind die einzuhaltenden Mindestanforderungen aufgelistet:

- Setzfließmaß mindestens 700 mm (selbstverdichtende Eigenschaft)
- $T_{500}$ -Zeit im Bereich von 10 s bis 12 s (Viskosität zur Faserstabilität)
- Kein wesentliches Rücksteifen über einen Zeitraum von 30 min
- Kein sichtbares Bluten oder Entmischen (keine Nachverflüssigung)
- Mindestdruckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen C70/85
- Möglichst hohe Frühfestigkeiten im Alter von 7 Tagen (C50/60)

### 2.2 Verwendete Materialien

**Zement:** Es wurden ausschließlich Portlandzemente nach ÖNORM EN 197-1<sup>[9]</sup> verwendet. Zum Erreichen der gewünschten Festigkeiten kamen R-Zemente der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 zur Anwendung. Des Weiteren wurde ein sulfatbeständiger Zement getestet, da diese Zemente in der Regel einen geringeren Wasseranspruch besitzen.

**Gesteinskörnung:** Es wurden ausschließlich im Labor der TVFA gelagerte Zuschlagstoffe der Korngrößen 0/4 mm und 4/8 mm nach ÖNORM EN 12620<sup>[10]</sup> verwendet. Dabei wurde

darauf geachtet, dass die Kornform gerundet, gedungen, sauber und trocken ist. Die Sieblinie wurde so zusammengestellt, dass diese möglichst zwischen den Regelsieblinien A<sub>8</sub> und B<sub>8</sub> liegt (siehe Abbildung 4).

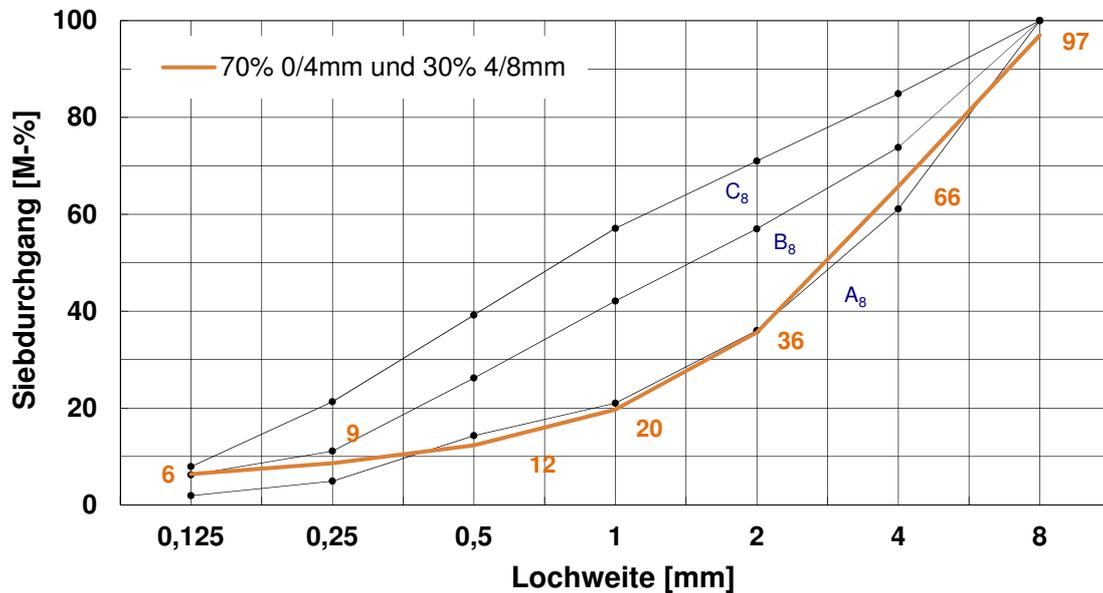


Abb. 4: Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung

**Zusatzstoffe:** Es wurden sowohl puzzolanische als auch inerte Zusatzstoffe angewendet. Zum Erreichen der hohen Festigkeiten wurde zum einen ein Microsilica in Form einer Slurry und zum anderen ein AHWZ (aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff) in Pulverform getestet. Des Weiteren wurde zur Verbesserung der Sieblinie im feinen Bereich ein inertes Kalksteinmehl eingesetzt.

**Zusatzmittel:** Um trotz des gewählten niedrigen w/b-Wertes (zwischen 0,3 und 0,35) eine ausreichende Verflüssigung des Betons zu gewährleisten, wurden verschiedene Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) untersucht. Des Weiteren wurde zur Stabilisierung der Betonrezeptur gegenüber Blutungs- und Entmischungerscheinungen ein Stabilisierer getestet. Um die Verarbeitbarkeit des Betons über einen hinreichend langen Zeitraum gewährleisten zu können, wurde zudem ein Betonverzögerer eingesetzt.

**Wasser:** Als Zugabewasser wurde das im Labor der TVFA zur Verfügung stehende Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Innsbruck verwendet. Negative Eigenschaften des Wassers, welche sich auf den Beton auswirken könnten, sind nicht bekannt.

In untenstehender Tabelle 1 sind die verwendeten Ausgangsstoffe und Ihre jeweiligen internen Bezeichnungen zusammengestellt.

Interne Kennung	Produktbezeichnung	Wirkstoff / Bestandteile	Hersteller
Zement I	CEM I 52,5 R	Portlandzement	Schretter & Cie GmbH
Zement II	CEM I 52,5 R - HS	Portlandzement	Schretter & Cie GmbH
Zusatzstoff I	EMSAC 500 S	Microsilica-Slurry	BASF SE
Zusatzstoff II	Hydraulit M	Hochofenschlacke-Steinkohlenflugasche-Kombination	Schretter & Cie GmbH
Zusatzstoff III	Grundmischung	Hochofenschlacke-Steinkohlenflugasche-Kombination	Schretter & Cie GmbH
Zusatzstoff IV	Saxolith 2HE	Kalksteinmehl	sh minerals GmbH
Gesteinskörnung I	Sand 0/4 mm	Bruchsand 0/4 mm	Ernst Derfesser GmbH
Gesteinskörnung II	Kies 4/8 mm	Kies 4/8 mm	Ernst Derfesser GmbH
Fließmittel I	323 Mix	Hochleistungsfließmittel auf Basis Polycarboxylat	BASF SE
Fließmittel II	Glenium C361	Hochleistungsfließmittel auf Basis Polycarboxylat	BASF SE
Fließmittel III	ACE 430	Fließmittel auf Basis Polycarboxylatether	BASF SE
Fließmittel IV	Glenium Sky 519	Extrem-Konsistenzhalte-Fließmittel auf Basis Polycarboxylat	BASF SE
Verzögerer I	Addiment VZ-2	Verzögerer mit verflüssigender Nebenwirkung	Sika AG
Stabilisierer I	Stream	Viskositätsregler auf Basis synthetischer Makropolymerer	BASF SE

**Tab. 1:** Im Arbeitspaket 1 verwendete Ausgangsstoffe

## 2.3 Prüfmethoden

### *Frischbetonkennwerte:*

Zur Messung der Frischbetonkonsistenz, welche Auskunft über die Steifheit und Verarbeitbarkeit des Frischbetons gibt, wurden im Zuge dieses Arbeitspaketes zwei verschiedene Verfahren herangezogen. Die Konsistenz des Selbstverdichtenden Betons ohne Faserzugabe wurde mittels Setzfließmaß und  $t_{500}$ -Zeit gemäß ÖNORM EN 12350-8<sup>[11]</sup> ermittelt. In einem weiteren Schritt wurde die Konsistenz des Betons nach Zugabe der Fasern (bei den letzten beiden Versuchen in diesem Arbeitspaket) über das Ausbreitmaß gemäß ÖNORM EN 12350-5<sup>[12]</sup> bestimmt. Weiters wurden die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Frischbetontemperatur des Frischbetons dokumentiert.

Beim **Setzfließversuch** wird der Frischbeton in einen Hohlkegelstumpf, welcher mittig auf einer quadratischen Metallplatte (900 mm) mit Kreismarkierungen bei 210 mm und 500 mm steht, eingebracht (siehe Abbildung 5-a). Die Metallplatte und der Kegelstumpf werden dabei vorher angefeuchtet. Der Hohlkegelstumpf mit den Abmessungen  $d_u = (210 \pm 2)$  mm,  $d_o = (100 \pm 2)$  mm,  $h = (300 \pm 2)$  mm, wird an den Handgriffen langsam lotrecht angehoben und der Frischbeton breitet sich kreisförmig aus (siehe Abbildung 5-b). Gemessen werden die  $t_{500}$ -Zeit, bei welcher der Betonkuchen den Durchmesser von 500 mm erreicht, sowie das Setzfließmaß, welches sich aus dem arithmetischen Mittel zweier um 90° gedrehter Messwerte des Außendurchmessers ergibt.



(a)



(b)

**Abb. 5:** Setzfließmaß-Versuch; mit Beton gefüllter Kegelstumpf vor dem Anheben (a) und ausgebreiteter Betonkuchen nach dem Anheben (b) des Hohlkegelstumpfes

Nach Zugabe der Fasern folgt die Messung des **Ausbreitmaßes**. Der Faserbeton wird dazu in einen Hohlkegelstumpf mit den Abmessungen  $d_u = (200 \pm 2)$  mm,  $d_o = (130 \pm 2)$  mm,  $h = (200 \pm 2)$  mm, welcher sich auf einem Tisch (siehe Abbildung 6-a) befindet, eingebracht. Dabei wird der Hohlkegelstumpf zunächst nur bis zur Hälfte gefüllt. Erst nach dem Verdichten durch 10-maliges stampfen mit einem Holzstößel, wird der restliche Teil aufgefüllt und wiederum mittels 10-maligem stampfen verdichtet. Nun wird die Form langsam hochgezogen und beiseite gestellt. Die Tischplatte wird im Intervall von 2 Sekunden, 15-mal ruck- und stoßfrei bis zum Anschlag angehoben und frei fallen gelassen. Die Fallhöhe beträgt dabei  $40\text{ mm} \pm 1$  mm. Der Betonkuchen breitet sich Kreisförmig aus und das arithmetische Mittel zweier um  $90^\circ$  gedrehter Messwerte des Außendurchmessers ergibt das Ausbreitmaß. Mit Hilfe des Ausbreitversuches erhält man einen guten Eindruck bezüglich Homogenität und Zusammenhaltevermögen des Faserbetons.



(a)



(b)

**Abb. 6:** Ausbreitmaß-Versuch; Ausbreittisch mit Kegelstumpf<sup>[13]</sup> (a) und ausgebreiteter Betonkuchen nach dem Abheben der Kegelstumpfform und den 15 Schlägen (b)

### **Festbetonkennwerte:**

Sämtliche Druckfestigkeitsprüfungen wurden im Labor der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA) gemäß ÖNORM EN 12390-3<sup>[14]</sup> durchgeführt. Dabei kamen die zuvor hergestellten Würfel mit 150 mm Kantenlänge zur Verwendung. Die Würfel werden zwischen zwei Stahlplatten in die Prüfmaschine eingelegt. Über die Prüfmaschine (Typ Amsler, maximale Prüflast 5000 KN, siehe Abbildung 7) wird eine sich kontinuierlich steigende Last bis zum Bruch der Würfel aufgebracht. Über die so ermittelte maximale Bruchlast lässt sich die Druckfestigkeitsklasse des Betons, gemäß ÖNORM B4710-1<sup>[15]</sup>, bestimmen. Die Datenaufzeichnung erfolgt dabei mit einem an der Prüfmaschine verbundenen Computer. Während der Prüfung wird durch Abmessung und Wiegen der Probekörper die Festbetonrohddichte bestimmt.



**Abb. 7:** Prüfanordnung zum Druckversuch

## **2.4 Ergebnisse - Frischbetonversuche**

In Tabelle 2 sind die Rezepturen und die dazugehörigen Frischbetoneigenschaften mit den jeweiligen Bemerkungen zur Mischungsstabilität und zum Rücksteifverhalten aus den Tastversuchen zur Festlegung der Betonrezeptur zusammengetragen. Bei den Mischungen M1 bis M13 wurden noch keine Fasern eingesetzt. Bei M14 und M15 dagegen wurden erste Versuche mit Faserzugabe durchgeführt.

Bei den ersten Tastversuchen trat meist nach Mischende ein Bluten auf und bereits 30 min nach Wasserzugabe steifte der Beton sehr stark zurück. Die Versuche mit einem Verzögerer (M2 bis M4) zeigten bezüglich des Rücksteifverhaltens keine positiven Ergebnisse. Bei Mischung M8 und M9 wurden die Sieblinien gezielt verändert und zusätzlich ein Stabilisierer (M7) eingesetzt. Durch diese Variationen konnten allerdings auch keine besseren Ergebnisse erzielt werden.

Schließlich konnte bei den Mischungen M10 bis M13 durch den Einsatz eines zweiten Fließmittels, welches speziell für die Konsistenzhaltung entwickelt wurde, eine Rezeptur gefunden werden, welche sehr stabil gegenüber Bluten und Entmischen ist und gleichzeitig eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit aufweist.

Mischung	Zement		Zusatzstoff				Zuschlag			Zusatzmittel					10 min	30 min	Bemerkung				
	Zement I	Zement II	Zusatzstoff I	Zusatzstoff II	Zusatzstoff III	Zusatzstoff IV	Gesteinskörnung I	Gesteinskörnung II	Wasser	Fließmittel I	Fließmittel II	Fließmittel III	Fließmittel IV	Verzögerer I	Stabilisierer I	w/(z+0,8xZS)		Setzfließmaß	t <sub>90</sub> -Zeit	Setzfließmaß	t <sub>90</sub> -Zeit
	[kg/m <sup>3</sup> ]						[M.-% v.Z.]					[-]	[mm]	[s]	[mm]	[s]	[-]				
<b>M1</b>	400	-	45	100	-	-	1166	500	171	3,9	-	-	-	-	-	0,30	653	-	-	-	Viskosität zu hoch
<b>M2</b>	400	-	45	100	-	-	1138	500	180	3,5	-	-	-	0,5	-	0,32	750	4	548	10	Bluten; starkes Rücksteifen; hohe Viskosität
<b>M3</b>	400	-	35	125	-	-	1127	500	180	-	4,1	-	-	0,5	-	0,32	785	4	720	-	Bluten; Rücksteifen; hohe Viskosität
<b>M4</b>	200	200	-	-	160	-	1147	500	180	-	1,7	-	-	0,5	-	0,34	770	5	643	8	starkes Rücksteifen
<b>M5</b>	400	-	35	125	-	-	1127	500	180	-	-	2,4	-	-	-	0,32	748	5	700	9	Bluten; Rücksteifen
<b>M6</b>	200	200	-	-	160	-	1147	500	180	-	-	1,6	-	-	-	0,34	763	8	675	14	starkes Bluten und Rücksteifen
<b>M7<sup>1)</sup></b>	400	-	-	125	-	-	1238	500	160	-	-	2,8	-	-	0,6	0,32	615	17	-	-	alternative Sieblinie + Stabi; ==> ENTMISCHT
<b>M8<sup>2)</sup></b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	1,4	-	-	-	0,32	760	6	610	14	optimierte Sieblinie; starkes Rücksteifen
<b>M9</b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	1,4	-	-	-	0,32	705	13	610	10	normale Sieblinie; Rücksteifen
<b>M10</b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	1,6	0,6	-	-	0,32	663	14	633	10	zu steif; leichtes Rücksteifen
<b>M11<sup>3)</sup></b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	2,0	1,0	-	-	0,32	758	7	713	10	starkes Bluten; leichtes Rücksteifen
<b>M12</b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	1,8	1,0	-	-	0,32	690	17	695	14	zu steif; kein Rücksteifen
<b>M13</b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	2,0	1,0	-	-	0,32	740	12	715	10	kein Bluten; kein Rücksteifen
<b>M14<sup>4)</sup></b>	-	392	-	-	168	-	1177	500	170	-	-	2,0	1,0	-	-	0,32	785	6	-	-	Feinanteil erhöhen
<b>M15<sup>5)</sup></b>	-	392	-	-	168	100	1104	473	170	-	-	1,85	1,0	-	-	0,32	815	2,8	528	-	Mischung nach Faserzugabe o.k.

1) Kornfraktion < 0,125 mm wurde ausgesiebt      2) optimierte Sieblinie mit Fuller (n=0,7)      3) Sand war feucht  
 4) u. 5) Faserzugabe      4) Ausbreitmaß nach Faserzugabe nicht messbar sehr starkes Bluten; Feinanteil erhöhen!!!

**Tab. 2:** Rezepturen und die dazugehörigen Frischbetoneigenschaften mit den jeweiligen Bemerkungen zur Mischungsstabilität und zum Rücksteifverhalten aus den Tastversuchen

Bei der Mischung M14 konnte nach Zugabe von Fasern kein Ausbreitmaß mehr gemessen werden. Des Weiteren trat ein sehr starkes Bluten auf. Aus diesem Grund wurde der Feinanteil durch die Zugabe von 100 kg/m<sup>3</sup> inertem Kalksteinmehl erhöht. In Mischung M15 konnten letztendlich auch mit Faserzugabe die gewünschten Verarbeitungseigenschaften eingestellt werden.

## 2.5 Ergebnisse - Festbetonversuche

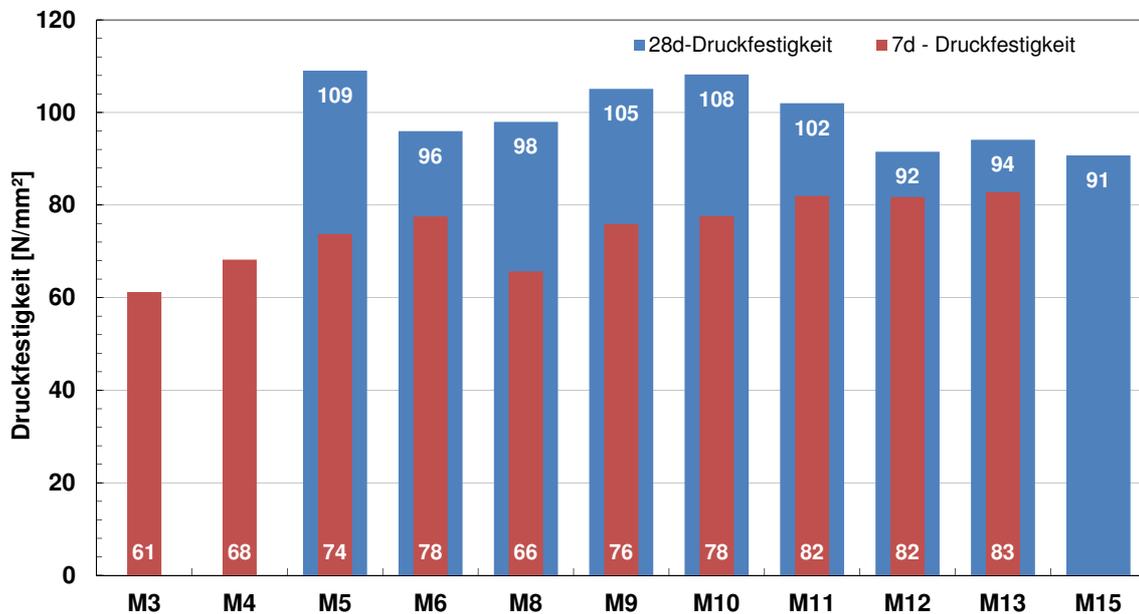
In Tabelle 3 sind die die Festbetonrohddichten und die Druckfestigkeiten aus den Tastversuchen M1 bis M15 im Alter von 7 und 28 Tagen zusammengestellt.

Mischung	7 Tage								28 Tage								
	Rohdichte				Druckfestigkeit				Rohdichte				Druckfestigkeit				
	Probe 1	Probe 2	Mittelwert	Standardabweichung	Probe 1	Probe 2	Mittelwert	Standardabweichung	Probe 1	Probe 2	Mittelwert	Standardabweichung	Probe 1	Probe 2	Mittelwert	Standardabweichung	bei Lagerung nach ÖNORM B 4710-1
	[g/cm <sup>3</sup> ]				[N/mm <sup>2</sup> ]				[g/cm <sup>3</sup> ]				[N/mm <sup>2</sup> ]				
<b>M1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M2</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M3</b>	2,42	2,43	<b>2,43</b>	0,01	64,5	57,9	<b>61</b>	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M4</b>	2,45	2,42	<b>2,44</b>	0,02	64,4	72,0	<b>68</b>	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M5</b>	2,42	2,38	<b>2,40</b>	0,03	71,4	76,0	<b>74</b>	3,2	2,42	2,41	<b>2,42</b>	0,01	101,0	106,1	<b>104</b>	3,6	<b>109</b>
<b>M6</b>	2,44	2,44	<b>2,44</b>	0,00	76,8	78,2	<b>78</b>	1,0	2,42	2,44	<b>2,43</b>	0,01	84,5	97,8	<b>91</b>	9,4	<b>96</b>
<b>M7</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M8</b>	2,44	2,42	<b>2,43</b>	0,01	66,6	64,7	<b>66</b>	1,4	2,44	2,43	<b>2,44</b>	0,01	92,9	93,3	<b>93</b>	0,3	<b>98</b>
<b>M9</b>	2,43	2,43	<b>2,43</b>	0,00	77,6	74,2	<b>76</b>	2,4	2,42	2,43	<b>2,43</b>	0,01	99,8	-	<b>100</b>	-	<b>105</b>
<b>M10</b>	2,46	2,42	<b>2,44</b>	0,03	72,9	82,4	<b>78</b>	6,7	2,44	2,45	<b>2,45</b>	0,01	96,4	109,2	<b>103</b>	9,0	<b>108</b>
<b>M11</b>	2,47	2,46	<b>2,47</b>	0,01	82,3	81,6	<b>82</b>	0,5	2,46	2,46	<b>2,46</b>	0,00	99,2	94,6	<b>97</b>	3,2	<b>102</b>
<b>M12</b>	2,46	2,45	<b>2,46</b>	0,01	81,2	82,3	<b>82</b>	0,7	2,47	2,45	<b>2,46</b>	0,01	94,1	79,8	<b>87</b>	10,1	<b>92</b>
<b>M13</b>	2,48	2,47	<b>2,48</b>	0,01	82,6	82,9	<b>83</b>	0,2	2,46	2,47	<b>2,47</b>	0,01	89,8	88,9	<b>89</b>	0,6	<b>94</b>
<b>M14<sup>1)</sup></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>M15<sup>1)</sup></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2,47	2,43	<b>2,45</b>	0,03	83,8	88,5	<b>86</b>	3,3	<b>91</b>

<sup>1)</sup> mit Faserzugabe

**Tab. 3:** Festbetonrohddichten und Würfeldruckfestigkeiten und dazugehörige Standardabweichungen aus den Tastversuchen im Alter von 7 und 28 Tagen

In Abbildung 8 sind sowohl die 7d-Druckfestigkeiten als auch die Würfeldruckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach der Umrechnung auf die Lagerung nach ÖNORM B 4710-1 dargestellt.



**Abb. 8:** Würfeldruckfestigkeiten der Proben aus den Tastversuchen im Alter von 7 und 28 Tagen

Die Betone der Tastversuche M5 bis M13 lagen bereits nach 7 Tagen über der niedrigsten Druckfestigkeitsklasse (C55/67) für Hochfesten Beton. Die 28d-Werte lagen zwischen den Druckfestigkeitsklassen C70/85 und C80/95. Die Betondruckfestigkeiten der Proben aus den Tastversuchen lagen somit im Bereich der gewünschten Festigkeitsklasse von C80/95. Durch die Zugabe von Fasern bei Mischung M15 sank wie erwartet die Druckfestigkeit minimal auf 91 N/mm<sup>2</sup> ab.

## 2.6 Fazit aus Arbeitspaket 1

Das Ziel des Arbeitspaketes 1 lag darin, unter Verwendung von lokalen Ausgangsstoffen eine Grundrezeptur für einen hochfesten, selbstverdichtenden Beton zu entwickeln. Der Frischbeton sollte zur Vermeidung eines Absinkens der Fasern eine hohe Viskosität besitzen und für die Anwendung im Fertigteilwerk eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit aufweisen.

Mit unten stehender Rezeptur (siehe Tabelle 4) konnten alle gestellten Anforderungen erfüllt werden. Der Beton besitzt eine ausreichende Viskosität, konnte aber nach Zugabe einer sehr hohen Menge an Fasern (M15) auch nach 30 min noch hinreichend verarbeitet werden. Die Druckfestigkeiten dieses Betons lagen im Bereich der Festigkeitsklassen C70/85 bis C80/95. Somit konnte das Ziel aus Arbeitspaket 1 erreicht werden.

Bestandteil	Bezeichnung	Dichte	Volumen/m <sup>3</sup>	Masse/m <sup>3</sup>
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[l/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Zement II	CEM I 42,5 R HS	3,10	126	392
Zusatzstoff III	Grundmischung	2,70	62	168
Zusatzstoff IV	Saxolith 2HE	2,67	37	100
Gesteinskörnung I	Sand 0/4 mm	2,70	409	1104
Gesteinskörnung II	Kies 4/8 mm	2,70	175	473
Wasser (exkl. Fließmittel)		1,00	170	170
Luftporen [angenommen: 2 Vol.-%]		----	20	----
$w/(z+0,8 \times GM) = 0,32$		<b>SUMME:</b>	<b>1000</b>	<b>2407</b>
Zusatzmittel III	ACE 430		1,85 M.-% vom Zement	
Zusatzmittel IV	Glenium Sky 519		1,0 M.-% vom Zement	

**Tab. 4:** Grundrezeptur für den hochfesten, selbstverdichtenden Beton aus Arbeitspaket 1 zur weiteren Anwendung in Arbeitspaket 2

### 3. ARBEITSPAKET 2 - Optimierung der Faserkombination

#### 3.1 Ziele und Vorgehensweise

In Arbeitspaket 2 soll bestimmt werden, wie sich die Verwendung von verschiedenen Mikro- und Makrofasern auf die Frisch- und vor allem auf die Festbetoneigenschaften auswirken. Letztendlich soll bestimmt werden, mit welcher Faserkombination die besten Ergebnisse erreicht werden können. Zum einen soll die Biegezugfestigkeit bis zum Erstriss möglichst hoch sein. Zum anderen soll aber auch das Nachrissverhalten möglichst auf dem gleichen Niveau wie die Erstrissfestigkeit liegen. Des Weiteren soll eine Rissbildung infolge eines Frühschwindens durch die Zugabe von Mikrofasern verhindert oder zumindest minimiert werden.

Die Betonrezeptur für die Grundmischung wurde bereits im Arbeitspaket 1 entwickelt und vorgestellt. Das Nachrissverhalten wird an 28 Tage alten Betonbalken im äquivalenten Biegezugversuch durch Aufzeichnen der Kraft-Durchbiegungskurve nach der ÖVBB-Richtlinie „Faserbeton“<sup>[16]</sup> ermittelt. Dabei werden die Biegezugfestigkeiten bei Auftreten des Erstrisses und die äquivalenten Biegezugfestigkeiten für die Gebrauchstauglichkeit bei Durchbiegung von 0,5 mm und für die Tragsicherheit aus der Fläche zwischen 0,5 bis 3,0 mm Durchbiegung bestimmt.

In einer weiteren Untersuchung wird die Wirksamkeit der Mikrofasern auf die Reduktion einer Frührissbildung im Beton im Schwindringversuch getestet. Dieser Versuch ist ebenfalls in der bereits oben erwähnten Richtlinie<sup>[16]</sup> beschrieben.

#### 3.2 Verwendete Materialien

Die verwendeten Ausgangsstoffe zur Herstellung des Betons wurden bereits im Kapitel 2.2 beschrieben. In diesem Arbeitspaket kamen Fasern aus Stahl, Kunststoff und Glas zum Einsatz. Aus jedem Material wurden jeweils Mikro- und Makrofasern ausgewählt.

##### **Stahlfasern:**

Es kamen ausschließlich Stahldrahtfasern der Firma Krampe Harex mit rundem Querschnitt zum Einsatz. Zur besseren Verankerung der Fasern im Betongefüge besaßen die Makrofasern einen Endhaken (siehe Abbildung 9-a). Es wurden sowohl normalfeste als auch hochfeste Fasern getestet. Die Mikrofasern hatten dagegen keine Aufbiegung an den Enden (siehe Abbildung 9-b).

### Kunststofffasern:

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine bikomponente Kunststoffmakrofaser der Firma Brugg eingesetzt (siehe Abbildung 9-c). Sie ist gekennzeichnet durch eine hohe Zugfestigkeit und bietet gleichzeitig eine hohe Verbundfestigkeit mit der Betonmatrix. Das Kernmaterial hat dank des hohen E-Moduls gute Zugfestigkeitseigenschaften. Das Mantelmaterial stellt durch die Strukturierung der Oberfläche und weiterer oberflächenaktiver Zusatzstoffe die gewünschten Verbundeigenschaften zur Betonmatrix sicher<sup>[17]</sup>. Als Mikrofaser kam eine multifile Mikrofaser aus reinen Polyolefinen (ebenfalls von der Firma Brugg) zur Anwendung (siehe Abbildung 9-d).

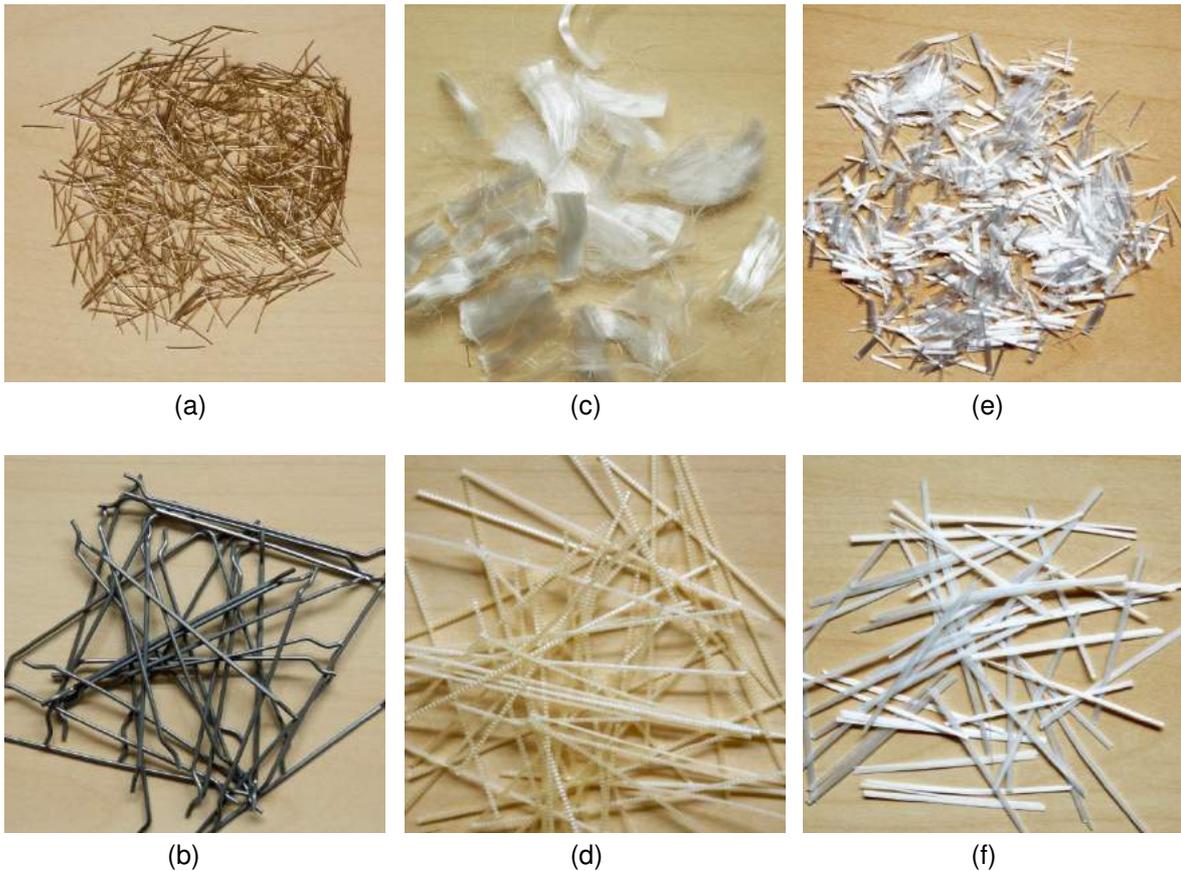
### Glasfasern

Es wurden ausschließlich alkaliresistente Mikro- und Makro-Glasfasern der Firma OCV Reinforcements eingesetzt (siehe Abbildung 9-e,f). Sie beeinflussen nicht nur die Rissbildung durch plastisches, thermisches und Trocknungsschwinden positiv, sondern erhöhen auch die Biegefestigkeit und Duktilität. Zudem verbessern sie die Belastbarkeit, Schlagzähigkeit sowie Ermüdungsbeständigkeit des Betons.

In untenstehender Tabelle (Tab.5) sind die technischen Daten aller verwendeten Fasern zusammenfassend gegenübergestellt.

interne Kurzbezeichnung	Beschreibung	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Schlankheitsgrad [-]
Stahl	SM-N Makro Stahlfaser, normalfest, endverankert	1200	7,85	50	0,8	63
	SM-H Makro-Stahlfaser, hochfest, endverankert	2400	7,85	50	0,8	63
	Sm Mikro-Stahlfaser, hochfest, gerade	2100	7,85	6	0,15	40
Kunststoff	KM Makro-Kunststofffaser	1200	0,91	50	0,5	100
	Km Mikro-Kunststofffaser	300...400	0,91	6,3	0,034	185
Glas	GM Makro-Glasfaser	1700	2,68	36	0,5	72
	Gm Mikro-Glasfaser	1700	2,68	6	0,014	429

**Tab. 5:** Technische Daten der im Arbeitspaket 2 verwendeten Fasern



**Abb. 9:** Verwendete Fasern: Mikro-Stahl (a), Makro-Stahl (b), Mikro Kunststoff (c), Makro-Kunststoff (d), Mikro-Glas (e) und Makro-Glas (f)

### 3.3 Prüfmethoden

#### **Frischbetonkennwerte:**

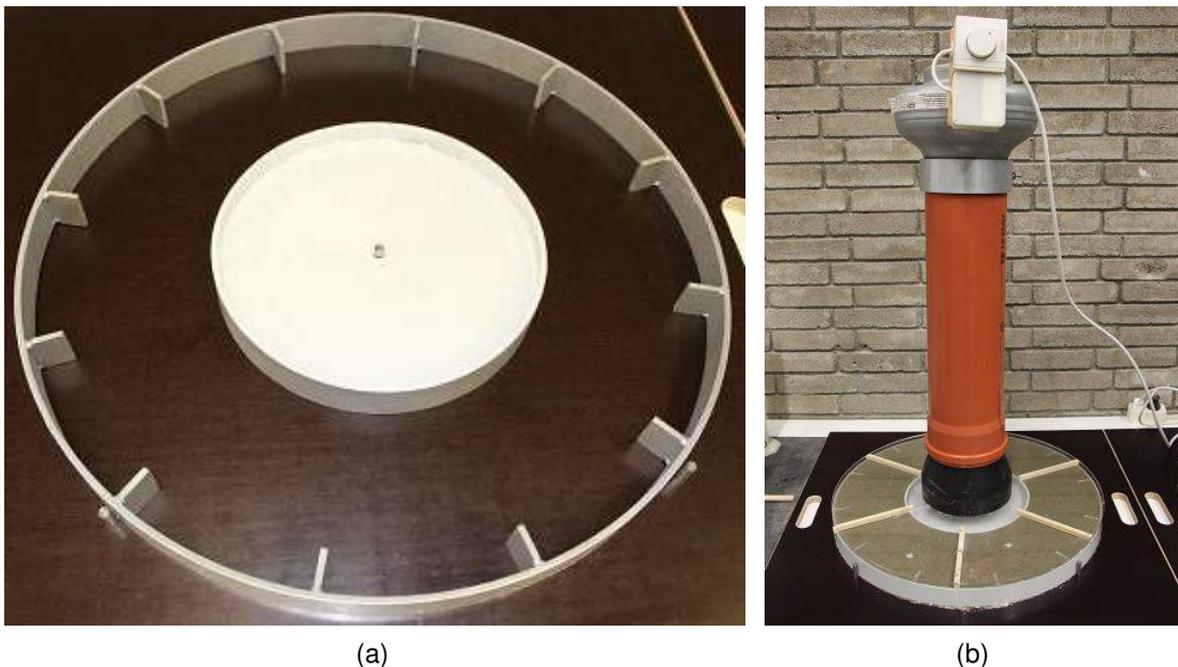
Die Messung der Frischbetonkennwerte erfolgte analog der Beschreibung in Kapitel 2.3.

#### **Festbetonkennwerte:**

Die Messung der **Würfeldruckfestigkeiten** erfolgte ebenfalls analog der Beschreibung in Kapitel 2.3.

Der **Schwindringversuch** ist erforderlich, wenn die Wirksamkeit von Fasern zur Verminderung Schwindrissbildung nachgewiesen werden muss. Die Ermittlung der Schwindrissneigung erfolgt in Anlehnung an Pkt. 10.4 der Richtlinie „Faserbeton“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik<sup>[17]</sup>. Beim Schwindringversuch wird der im Zwangsmischer hergestellte Frischbeton zunächst in vorbereitete Schwindchalungen gegeben. Diese Stahlblechschalungen (St 37, t = 5 mm) haben einen Innendurchmesser von 280

mm, einen Außendurchmesser von 590 mm und eine Höhe von 40mm. Am Außenring sind 12 Rissinitiatoren (30 mm x 40 mm) angeschweißt, welche zur Kerbwirkung in den Beton hineinragen (siehe Abbildung 10-a). Nach dem Betonieren wird auf diesem Ring eine Absaugeinrichtung mit 1 cm Spaltweite aufgesetzt. Sie besteht aus einem Plexiglaskreisring ( $\varnothing_i = 188 \text{ mm}$ ,  $\varnothing_a = 600 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ), 6 Hölzchen als Abstandhalter (10 mm x 10mm x 310mm), einer zentralen PE-HD- Reduktion, einem PVC-Rohr ( $l = 0,5 \text{ m}$ ,  $\varnothing = 150 \text{ mm}$ ) und einem regelbaren Ventilator (Siehe Abbildung 10-b).

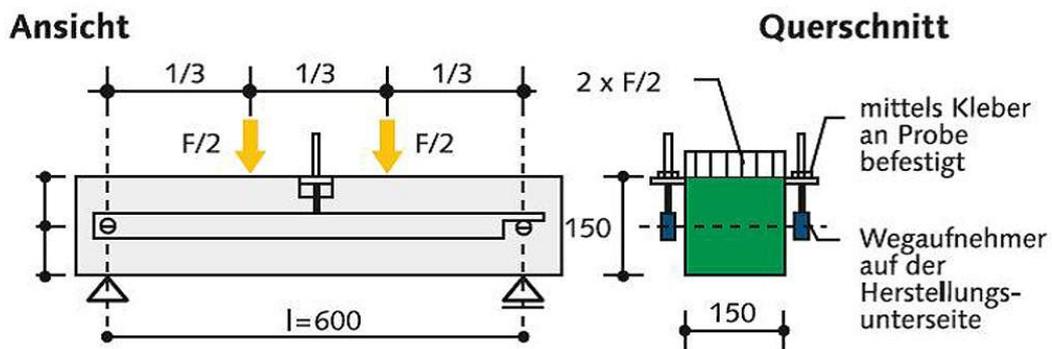


**Abb. 10:** Aufbau Schwundringversuch: innerer und äußerer Schwundring mit Rissinitiatoren (a); Schwundring mit aufgesetztem Gebläse (b)

Der Zeitpunkt der Wasserzugabe zum Frischbeton wird festgehalten. 2,5 Stunden nach diesem Zeitpunkt wird der Ventilator eingeschaltet, welcher über einen Zeitraum von 21 Stunden einen Luftstrom von ca. 4 m/s über der Betonoberfläche erzeugt. Nach dem Versuch werden die erzeugten Risse bezüglich Lage und Länge kartiert. Die Längen und Breiten der festgestellten Risse des Faserbetons werden aufaddiert, und mit den Risslängen des Referenzbetons (Nullbeton) verglichen. Die Wirksamkeit der Fasern gilt als nachgewiesen, wenn die Gesamtrisslänge des Faserbetons um mindestens 80 % gegenüber dem Referenzbeton vermindert wird<sup>[17]</sup>.

Die Ermittlung der **äquivalenten Biegezugfestigkeit** erfolgt in Anlehnung an Pkt. 10.5 der Richtlinie Faserbeton der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik<sup>[17]</sup>. Es handelt sich hierbei um einen 4-Punkt Biegezugversuch, d.h. die Gesamtlast wird in den

Drittelpunkten des Biegebalkens eingeleitet. Vor dem Versuchsbeginn wird auf beiden Seiten des Biegebalkens eine Schiene an zwei Punkten, welche sich genau über den Achsen der Auflager befinden, montiert. Diese Schienen sind jeweils bei beiden Auflagerpunkten drehbar, und auf einer Seite horizontal verschieblich gelagert. Die induktiven Wegaufnehmer (LVDT), welche die Durchbiegung des Balkens aufzeichnen, werden auf diesen Schienen in Balkenmitte angebracht (siehe Abbildung 11).



**Abb. 11:** Aufbau des Versuches zur Bestimmung der äquivalenten Biegezugfestigkeit<sup>[18]</sup>

Die Lasteinleitung muss ohne Exzentrizität und Drehmoment erfolgen. Werden Rollen als Auflager verwendet, müssen diese frei um ihre Achse drehbar sein und dürfen nicht fixiert werden. Die abgezogene Seite des Balkens muss während dem Versuch seitlich liegen.

Die Prüfung muss mit ausreichend steifen Biegeprüfmaschinen der Klasse I, verformungsgesteuert durchgeführt werden. Die Deformationsgeschwindigkeit beträgt bis zu einer Durchbiegung von 0,5 mm 0,1 mm/min ( $\pm 0,05$  mm/min), danach kann die Prüfgeschwindigkeit auf 0,2 mm/min ( $\pm 0,05$  mm/min) erhöht werden. Die Balkendurchbiegung wird als Weg zwischen Balkenmitte und Auflagerpunkten, in der Schwerelinie des Balkens gemessen. Die Datenaufzeichnung muss mit mindestens 10 Hz bis zum stabilen Bereich erfolgen. Danach kann die Aufzeichnungsfrequenz reduziert werden<sup>[17]</sup>.



**Abb. 12:** Prüfanordnung für den Biegezugversuch mit Schiene und LVDT

Die Charakterisierung von Faserbeton erfolgt mithilfe der Daten aus dem 4-Punkt-Biegezug-Versuch. Dabei wird zunächst die Biegezugfestigkeit bei Erstriss und anschließend das Nachrissverhalten (Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit) des Faserbetons berechnet.

#### Biegezugfestigkeit - Erstrissverhalten:

Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit (BZ-Klasse) erfolgt anhand von Balkenprüfungen. Für jeden Balken wird die maximale Last  $P_{fp}$  beim Erstriss bestimmt und daraus die Biegezugfestigkeit  $f_{ft,fl}$  mit

$$f_{ft,fl} = \frac{P_{fp} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

ermittelt. Aus den Einzelwerten  $f_{ft,fl}$  werden Mittelwert  $f_{ftm,fl}$  und Standardabweichung berechnet und damit die charakteristische Biegezugfestigkeit  $f_{ftk,fl}$  als 5%- Fraktile bestimmt. Ist der Variationskoeffizient  $v \leq 0,15$ , dann wird die charakteristische Biegezugfestigkeit  $f_{ftk,fl}$  für den untersuchten Faserbeton mit

$$f_{ftk,fl} = f_{ftm,fl} \cdot 0.71$$

ermittelt. Ist der Variationskoeffizient  $v > 0,15$  muss die 5%-Fraktile gemäß Anhang 4 der Richtlinie Faserbeton ermittelt werden<sup>[17]</sup>.

#### Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit - Nachrissverhalten:

Die Berechnung der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit (G) und Tragsicherheit (T) erfolgt nach den Formeln in Abbildung 13. Wichtig ist dabei zu beachten, dass die Last bei einer Durchbiegung von 3 mm, mindestens ein Drittel der Last bei 0,5 mm beträgt<sup>[17]</sup>.

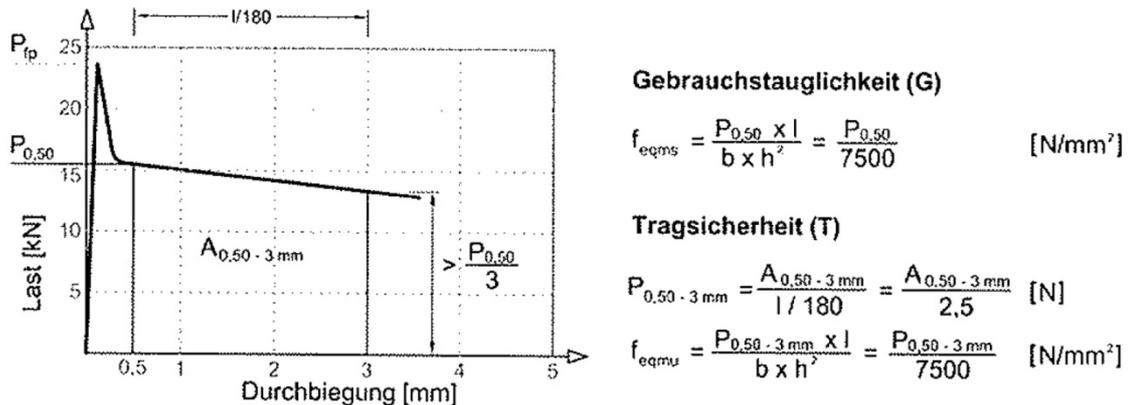
- Die äquivalente Biegezugfestigkeit  $f_{eqs}$  für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit wird für jeden Prüfkörper bei einer Durchbiegung von 0,5 mm bestimmt.
- Die äquivalente Biegezugfestigkeit  $f_{equ}$  für Nachweise der Tragsicherheit wird für jeden Prüfkörper als Flächeninhalt unter der Versuchskurve zwischen 0,5 und 3 mm Durchbiegung, dividiert durch 2,5 mm bestimmt.

Aus den sich ergebenden Einzelwerten  $f_{eqs}$  und  $f_{equ}$  werden die Mittelwerte  $f_{eqms}$  und  $f_{equm}$  und die Variationskoeffizienten gebildet. Ist der jeweilige Variationskoeffizient  $v \leq 0,25$ , dann werden die charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeiten  $f_{eqks}$  und  $f_{eqku}$  für den untersuchten Faserbeton mit den Formeln

$$f_{eqks} = 0.51 \cdot f_{eqms} \text{ und}$$

$$f_{eqku} = 0.51 \cdot f_{eqmu}$$

ermittelt. Ist der jeweilige Variationskoeffizient  $v > 0,25$  muss die 5%-Fraktile gemäß Anhang 4 der Richtlinie Faserbeton ermittelt werden<sup>[17]</sup>.



**Abb. 13:** Ermittlung der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit<sup>[17]</sup>

### 3.4 Probenherstellung und Lagerung

Das Versuchsprogramm umfasste die Herstellung von Balken, Würfeln und Betonringen. Die Abmessungen der Prüfkörper sind der nachfolgenden Tabelle (Tab. 6) zu entnehmen.

Prüfkörper	Abmessungen [cm]
Würfel	15 x 15 x 15
Balken	150 x 150 x 600
Betonringe	$\varnothing_{\text{außen}} = 59$ , $\varnothing_{\text{innen}} = 29$ , $h = 4$

**Tab. 6:** Abmessungen der Proben aus Arbeitspaket 2

Sämtliche Komponenten der Betonmischungen wurden entsprechend der berechneten Mischungsverhältnisse auf 1g genau eingewogen, und im Zwangsmischer nach dem Mischregime entsprechend Tabelle 7 vermischt (siehe Abbildung 14).

Schritt	Zeit		Beschreibung
1	-	-	Gesteinskörnungen eingeben
2	30 s	00:30	trocken mischen
3	15 s	00:45	Zement und Zusatzstoffe zugeben
4	30 s	01:15	trocken mischen
5	15 s	01:30	Wasser zugeben
6	30 s	02:00	mischen
7	4 min	06:00	Fließmittel zugeben und mischen
8	30 s	06:30	Fasern zugeben
9	1 min	07:30	mischen

**Tab. 7:** Mischregime des hergestellten Betons aus Arbeitspaket 2

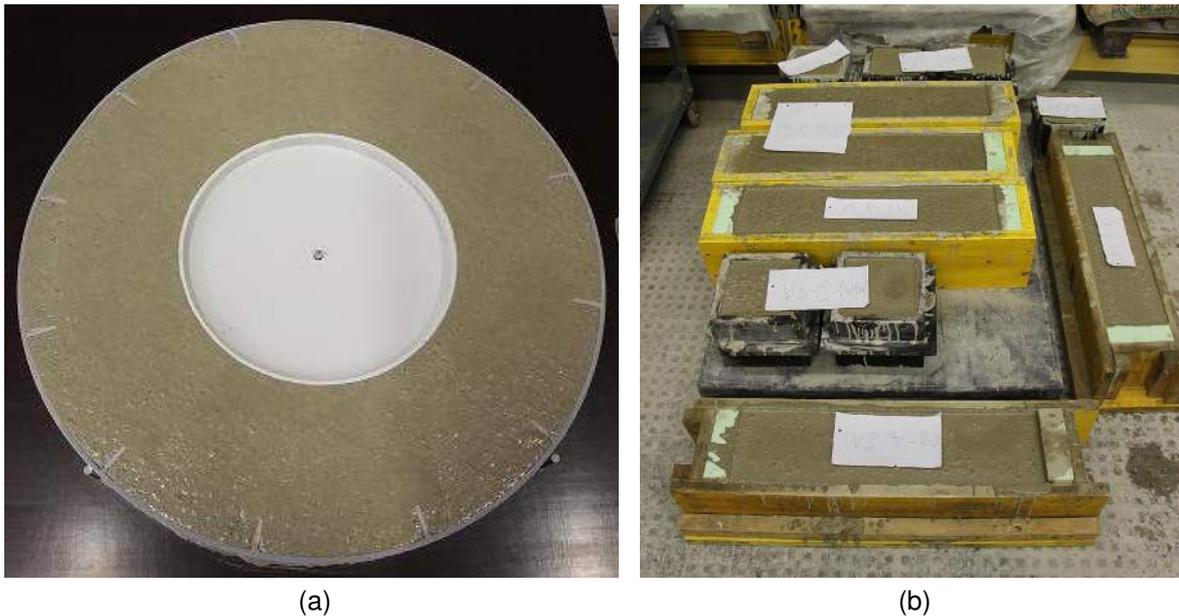


**Abb. 14:** Herstellung der Betonmischungen im Zwangsmischer

Die Fasern wurden händisch hinzugegeben um die Verarbeitbarkeit in höchstem Maße zu gewährleisten und um die problematische „Nesterbildung“ zu vermeiden. Nach den erfolgten Frischbetonprüfungen (siehe Kapitel 3.3), wurden die Betonmischungen in die vorbereiteten Schalungselemente der TVFA gefüllt (siehe Abbildung 15). Eine Verdichtung war dabei nicht notwendig, da der Beton auch nach Faserzugabe noch selbst- bzw. leicht verdichtende Eigenschaften besaß.

Anschließend wurden die Prüfkörper (Balken und Würfel) mit Folie abgedeckt und an einem erschütterungsfreien Ort gelagert. Nach 24 Stunden erfolgte das Ausschalen, und die Proben wurden bis zu deren Prüfung bei 20°C in einem Wasserbecken gelagert.

Die Schwindringe wurden nach deren Herstellung 21 Stunden belüftet und anschließend auf Risse untersucht (siehe Kapitel 3.3).



**Abb. 15:** gefüllte Schalungselemente: Schwindring (a); Balken und Würfel (b)

### 3.5 Faserkombinationen

Die folgenden Tabellen enthalten die Kombinationen und Fasergehalte sowohl der Biegezugserien für die Herstellung der Balken und Würfel (Tabelle 8) als auch der Schwindringserien für die Herstellung der Schwindringe und Würfel (Tabelle 9).

Kurzbezeichnung	Serienbezeichnung	Faserdosierung [kg/m <sup>3</sup> ]				
		SM-N	SM-H	KM	GM	Km
FK0	V0_NULL	-	-	-	-	-
FK1	V1_60SM-N_4KM	60	-	4	-	-
FK2	V2_56SM-N_4KM	56	-	4	-	-
FK3	V3_60SM-N_10GM	60	-	-	10	-
FK4	V4_50SM-N_10GM	50	-	-	10	-
FK5	V5_60SM-N_1Km	60	-	-	-	1
FK6	V6_59SM-N_1Km	59	-	-	-	1
FK7	V7_90SM-N	90	-	-	-	-
FK8	V8_90SM-H	-	90	-	-	-
FK9	V9_40SM-N_20SM-H_4KM	40	20	4	-	-
FK10	V10_20SM-N_40SM-H_4KM	20	40	4	-	-

**Tab. 8:** Faserkombinationen und -gehalte der Biegezugserien aus Arbeitspaket 2

Kurz- bezeichnung	Serienbezeichnung	Faserdosierung [kg/m³]					
		SM-N	SM-H	KM	Sm	Km	Gm
S0	S0_NULL	-	-	-	-	-	-
S1	S1_0,6Gm	-	-	-	-	-	0,6
S2	S2_1Gm	-	-	-	-	-	1
S3	S3_0,6Km	-	-	-	-	0,6	-
S4	S4_1,5Km	-	-	-	-	1,5	-
S5	S5_20Sm	-	-	-	20	-	-
S6	S6_50Sm	-	-	-	50	-	-
S7 - FK10	S7_20SM-N_40SM-H_4KM	20	40	4	-	-	-

**Tab. 9:** Faserkombinationen und -gehalte der Schwindringserien aus Arbeitspaket 2

#### Biegezugserien:

Da die Stahlfaser (SM) das größte Potential bezüglich einer Maximierung der Äquivalenten Biegezugfestigkeiten besitzen, wurde diese sozusagen als „Grundfaser“ in jeder Serie eingesetzt. Diese Stahl-Makro-Faser wurde jeweils mit einer Kunststoff-Makro-Faser (FK1 und FK2), einer Glas-Makro-Faser (FK3 und FK4) und einer Kunststoff-Mikro-Faser (FK5 und FK6) kombiniert. Dabei wurde jeweils einmal die „Zugabefaser“ zur „Grundfaser“ dazugegeben (GF+ZF) und einmal die „Grundfaser“ durch die „Zugabefaser“ substituiert (GF-ZF). Bei FK7 und FK8 wurde versucht, die Menge an Stahl-Makro-Faser möglichst zu erhöhen. Dabei konnten Stahlfasermengen von bis zu 90 kg/m³ erreicht werden. Hier wurde noch zwischen normalfesten (FK7) und hochfesten (FK8) Stahl-Makro-Fasern unterschieden. Zum Schluss wurden in FK 9 und FK10 drei Fasern miteinander kombiniert (Stahl-Makro-Faser normal- / hochfest und Kunststoff-Makro-Faser).

#### Schwindringserien:

Hier wurden die Mikro-Fasern in verschiedenen Gehalten untersucht. Die letzte Serie (S7) entspricht der Serie FK10 aus den Biegezugserien.

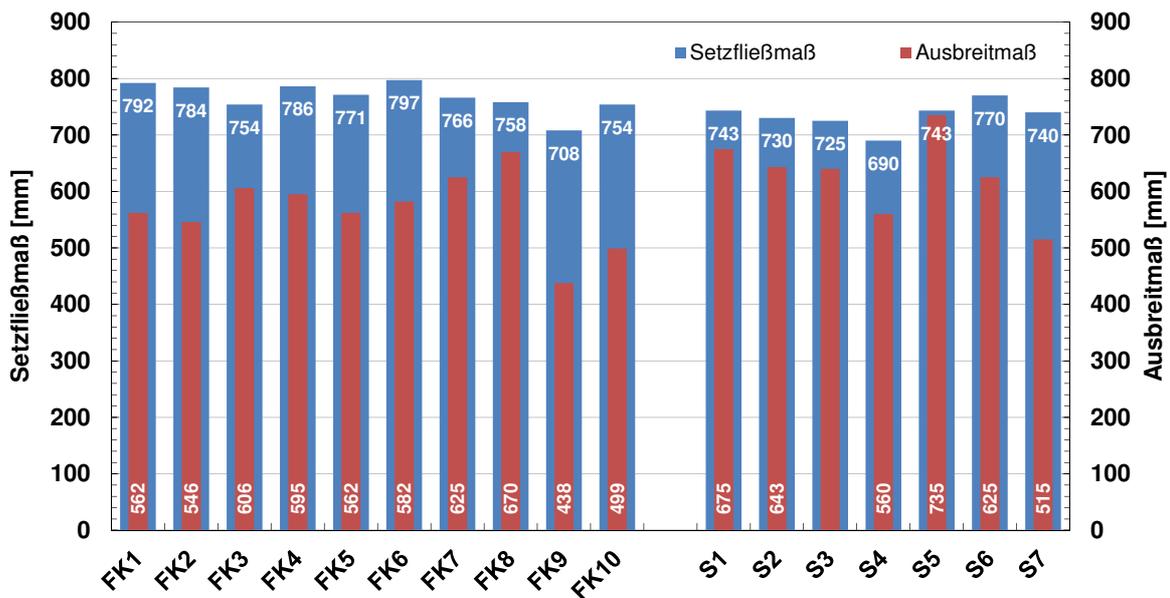
### 3.6 Ergebnisse - Frischbetonversuche

In Tabelle 10 sind die Frischbetoneigenschaften der Betone aus den Biegezug- und den Schwindringserien zusammengestellt. In Abbildung 16 sind die Setzfließmaße vor der Faserzugabe den Ausbreitmaßen nach der Faserzugabe gegenübergestellt.

Kurz- bezeichnung	Mischung	Setzfließmaß	t <sub>500</sub> -Zeit	Ausbreitmaß
		[mm]	[s]	[mm]
FK0	1	755	6	-
	2	785	6	-
	3	765	5	-
FK1	1	843	4	603
	2	768	5	587
	3	765	5	495
FK2	1	770	5	570
	2	833	4	535
	3	748	7	533
FK3	1	773	5	588
	2	733	9	625
	3	755	6	605
FK4	1	780	7	588
	2	778	-	560
	3	800	5	638
FK5	1	755	5	558
	2	763	7	555
	3	795	4	573
FK6	1	805	5	595
	2	823	4	593
	3	763	5	558
FK7	1	760	5	638
	2	780	4	655
	3	758	6	583
FK8	1	728	7	648
	2	785	6	665
	3	760	5	698
FK9	1	683	7	470
	2	715	7	400
	3	725	6	445
FK10	1	740	6	515
	2	753	5	538
	3	768	5	445
S1	1	743	-	675
S2	1	730	-	643
S3	1	725	-	640
S4	1	690	-	560
S5	1	743	-	735
S6	1	770	-	625
S7	1	740	-	515

**Tab. 10:** Frischbetonkennwerte der Betone aus den Biegezug- und Schwindringserien

Die  $t_{500}$ -Zeiten der Betone aus den Biegezugserien lagen im Bereich zwischen 4 und 9 Sekunden. Die Werte lagen etwas unterhalb des angestrebten Bereiches von 10 bis 12 Sekunden. Die Viskosität des Betons war aber trotz der etwas niedrigeren  $t_{500}$ -Zeiten ausreichend, um ein signifikantes Absinken oder Aufsteigen der eingebrachten Fasern zu verhindern.



**Abb. 16:** Gegenüberstellung der Setzfließmaße (vor Faserzugabe) und der Ausbreitmaße (nach Faserzugabe) der Betone aus Arbeitspaket 2

Die Setzfließmaße der Betone lagen zwischen 730 und 800 mm. Lediglich bei Serie FK9 und S4 waren die Setzfließmaße etwas niedriger. Die Stahlfaser bewirkt den geringsten Konsistenzverlust (FK7 und FK8). Die Glas- und Kunststofffasern bewirken dagegen wesentlich höhere Konsistenzverluste (FK1 bis FK6). Hier sind vor allem die Kunststofffasern auffällig (FK1, FK2 und S3, S4). Bei Verwendung von drei Fasern (FK9 und FK10) wurden die größten Konsistenzverluste gemessen. Die Ausbreitmaße lagen dennoch mit ca. 500 mm innerhalb der Ausbreitmaßklasse F3, welche für sehr weiche Betone steht. Anzumerken ist hier auch, dass FK10 und S7 (gleiche Faserkombination) annähernd identische Werte aufweisen, was als eine gute Reproduzierbarkeit der Frischbetoneigenschaften interpretiert werden kann.

Im Anhang (siehe S. 55 ff.) sind Fotografien der „Betonkuchen“ aus den Setzfließmaß- und Ausbreitmaßversuchen der einzelnen Biegezugserien zusammengestellt.

### 3.7 Ergebnisse - Würfeldruckfestigkeiten

In Tabelle 11 sind die mittleren Würfeldruckfestigkeiten und Festbetonrohddichten der Betone der Biegezug- und Schwindringserien im Alter von 7 und 28 Tagen zusammengestellt.

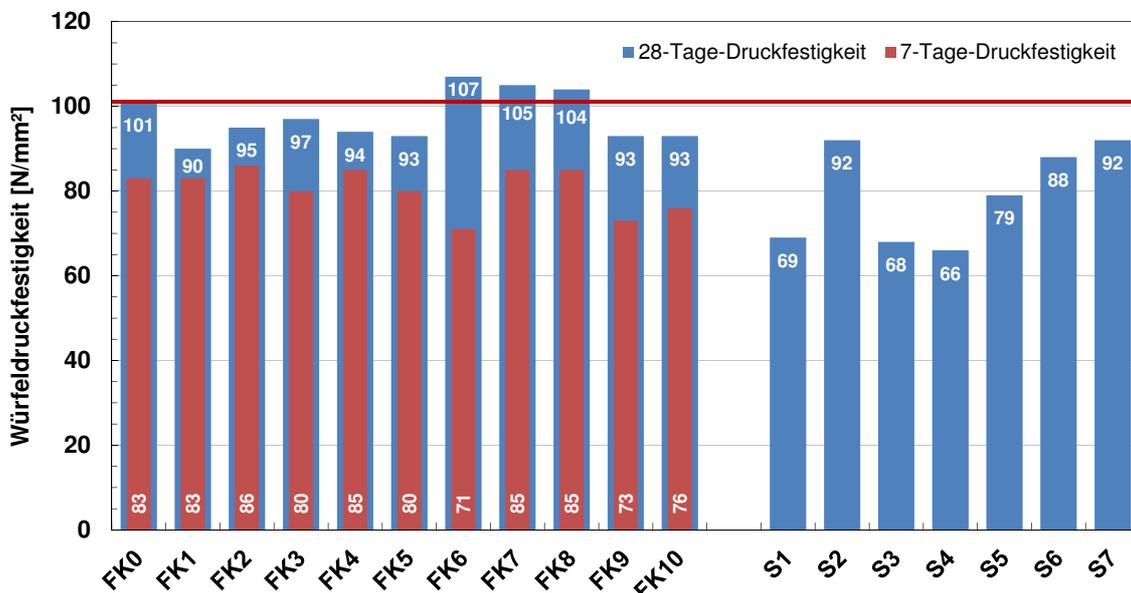
Kurz- bezeichnung	mittlere Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
		7 Tage	28 Tage
FK0	2433	83	-
	2433	-	101
FK1	2457	83	-
	2477	-	90
FK2	2460	86	-
	2463	-	95
FK3	2467	80	-
	2457	-	97
FK4	2453	85	-
	2463	-	94
FK5	2473	80	-
	2477	-	93
FK6	2463	71	-
	2463	-	107
FK7	2477	85	-
	2497	-	105
FK8	2493	85	-
	2470	-	104
FK9	2457	73	-
	2453	-	93
FK10	2463	76	-
	2473	-	93
S1	2363	-	69
S2	2357	-	92
S3	2383	-	68
S4	2350	-	66
S5	2400	-	79
S6	2377	-	88
S7 - FK10	2397	-	92

**Tab. 11:** Festbetonkennwerte der Betone aus den Biegezug- und Schwindringserien

In untenstehender Abbildung 17 sind die Werte der Würfeldruckfestigkeiten im Alter von 7 und 28 Tagen aus Tabelle 11 grafisch dargestellt. Zunächst werden die Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus den Biegezugserien bewertet. Die Festigkeiten streuen kaum signifikant Aufgrund der Faserkombinationen. Einige Werte liegen leicht unterhalb der Nullmischung ohne Fasern (FK0) andere liegen wiederum leicht darüber. Dementsprechend sind nur minimale Einflüsse auf die Druckfestigkeiten infolge der Faserzugaben festzustellen. Es ist anzumerken, dass die Betone bereits nach 7 Tagen ( $89 \text{ N/mm}^2$ ) ca. 83% der 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit ( $107 \text{ N/mm}^2$ ) besaßen. Dies spricht für eine gute Anwendbarkeit der Rezeptur im Fertigteilwerk (kurze Ausschaltfristen).

Bei Zugabe von Mikrofasern (Betone der Schwindringversuche) ist dagegen vor allem bei den Kunststoff- und Glasfasern eine erhebliche Senkung der Druckfestigkeiten auf bis zu  $66 \text{ N/mm}^2$  zu verzeichnen. Hier existiert ein entscheidender negativer Einfluss der Mikrofasern auf die Würfeldruckfestigkeit, welcher nicht vernachlässigt werden darf.

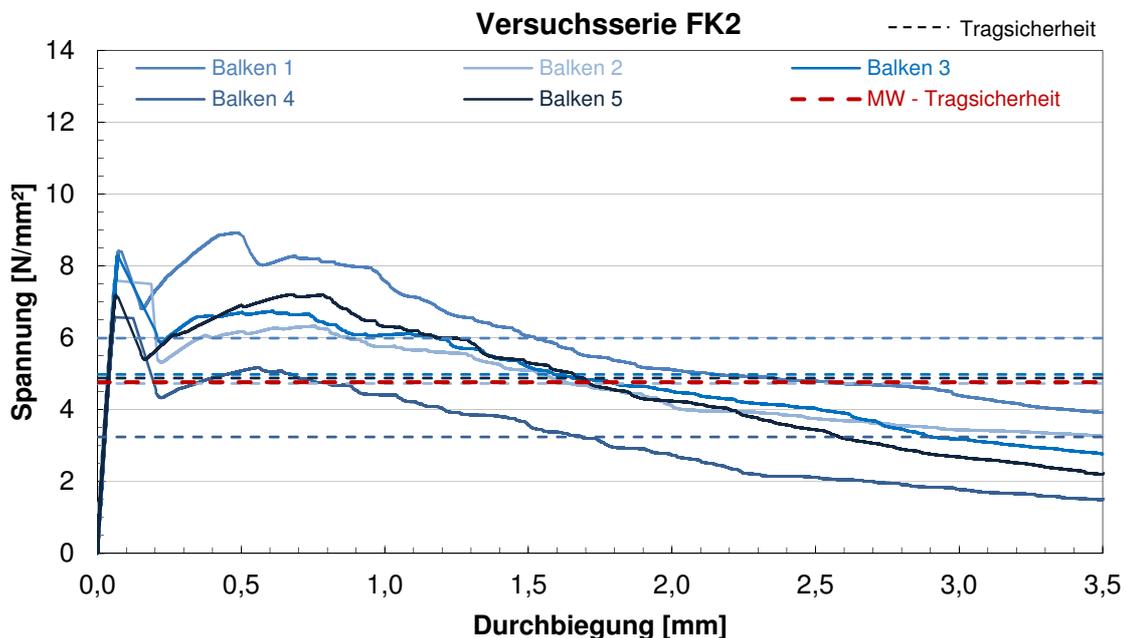
Auch bei den Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus Serie FK10 und S7 (identische Faserkombination) konnten gleiche Werte gemessen werden, was wiederum analog den Frischbetonkennwerten für eine gute Reproduzierbarkeit spricht.



**Abb. 17:** Gegenüberstellung der Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus Arbeitspaket 2 im Alter von 7 und 28 Tagen

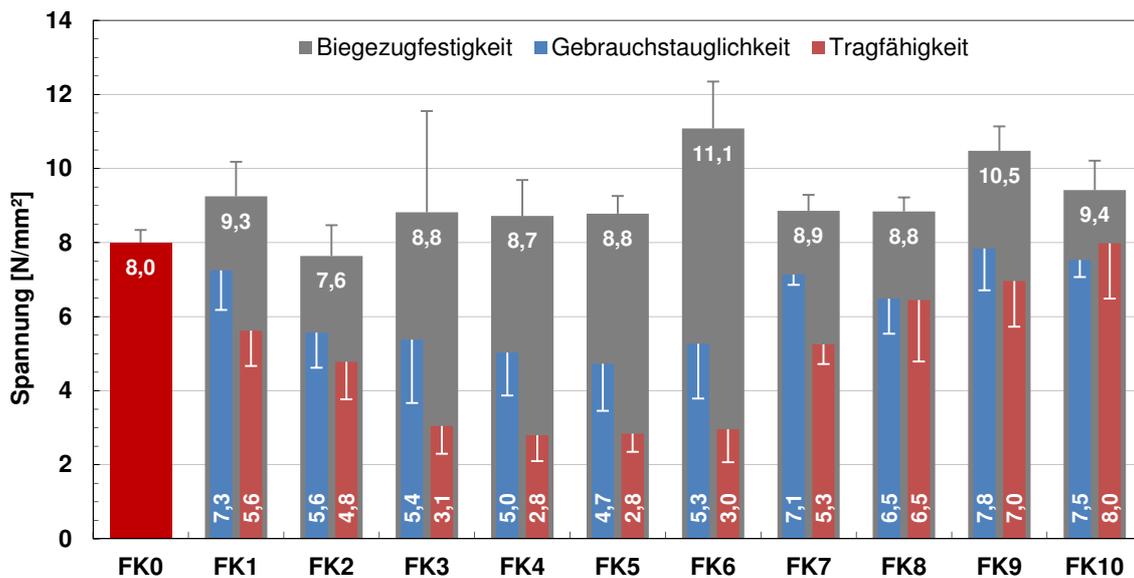
### 3.8 Ergebnisse - Äquivalente Biegezugversuche

Bei den Biegezugversuchen wurden je Faserkombination 5 Balken getestet und aus den jeweiligen Einzelwerten die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen und Variationskoeffizienten ermittelt. Im folgenden Spannungs-Durchbiegungs-Diagramm (Abbildung 18) sind exemplarisch die Ergebnisse aus den 5 Biegezugversuchen für den Faserbeton der FK2 mit 56 kg/m<sup>3</sup> normalfesten Stahlmakrofasern und 4 kg/m<sup>3</sup> Kunststoffmakrofasern dargestellt. Im Anhang (siehe S. 60 ff.) sind die Diagramme mit den dazugehörigen Kennwerten aller untersuchten Betone zusammengestellt.



**Abb. 18:** Spannungs-Durchbiegungs-Kurven der Versuche an den 5 Betonbalken aus FK2

In Abbildung 19 sind die Kennwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen aus den Biegezugversuchen aller untersuchten Faserkombinationen vergleichend gegenübergestellt. Die Biegezugfestigkeit bei Erstriss wird mittels 4-Punkt-Biegezugversuch bestimmt. Sie lässt sich über die Kraft beim Auftreten des Erstrisses gemäß ÖVBB Richtlinie Faserbeton<sup>[17]</sup> errechnen (siehe Kapitel 3.3). Für die äquivalenten Biegezugfestigkeiten beim Nachrissverhalten wird für die Gebrauchstauglichkeit  $G$  ( $f_{eqms}$ ) die Kraft bei einer Durchbiegung von 0,5 mm und für die Tragsicherheit  $T$  ( $f_{eqmu}$ ) das Integral der Kraft-Durchbiegungs-Kurve im Bereich von 0,5 mm bis 3,0 mm Durchbiegung herangezogen (Siehe Kapitel 3.3).



**Abb. 19:** Kennwerte (Biegezugfestigkeit bei Erstriss, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit beim Nachrissverhalten) aus den 4-Punkt-Biegezug-Versuchen an den Betonbalken aus AP 2

Wie in Abbildung 19 ersichtlich, weisen sämtliche Faserbetonserien sehr hohe **Biegezugfestigkeiten** auf. Im Vergleich zur Nullmischung liegen die Biegezugfestigkeiten bei nahezu allen Faserkombinationen (außer FK2) etwas höher. Durch die Zugabe von Fasern kann dementsprechend auch die Erstrissfestigkeit leicht erhöht werden. Allerdings ist es nicht möglich, die Erstrisserhöhungen gezielt einzelnen Fasertypen zuzuordnen. Die geringste Biegezugfestigkeit von 7,6 N/mm<sup>2</sup> wurde bei der Biegezugserie FK2 mit 56 kg/m<sup>3</sup> normalfesten Stahl-Makro-Fasern und 4 kg/m<sup>3</sup> Kunststoff-Makro-Fasern aufgezeichnet. Die höchste Biegezugfestigkeit liegt bei 11,2 N/mm<sup>2</sup> und wurde von der Biegezugserie FK6 mit 59 kg/m<sup>3</sup> normalfesten Stahl-Makro-Fasern und 1 kg/m<sup>3</sup> Kunststoff-Mikro-Fasern erzielt. Allerdings wurden bei dieser und auch bei FK3 die größten Streubandbreiten (Standardabweichungen) gemessen.

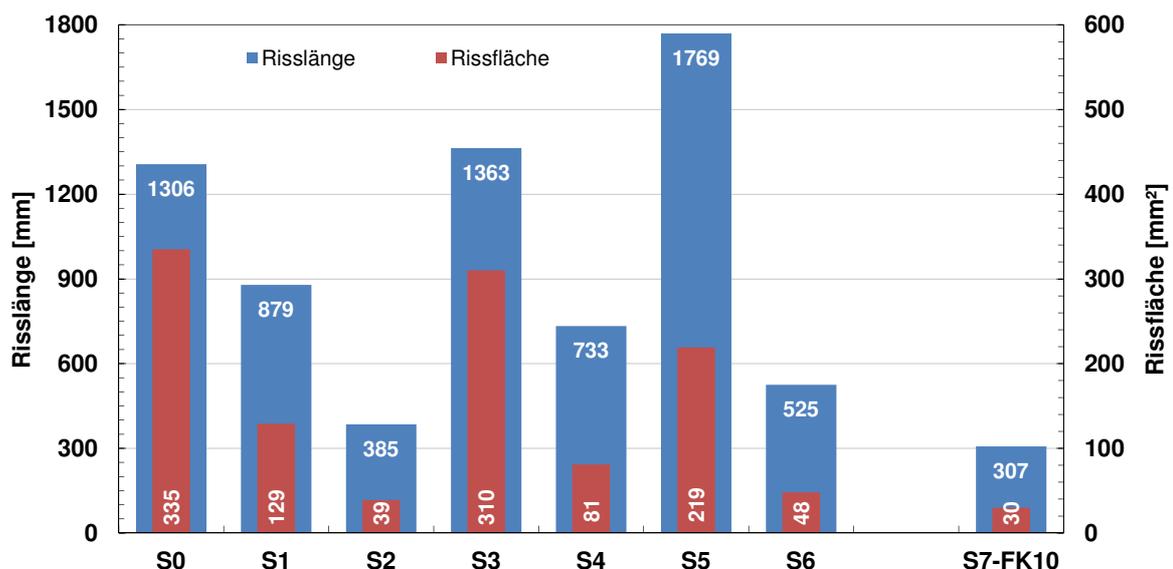
Bei der Beurteilung der **Gebrauchstauglichkeit** und **Tragfähigkeit** im Nachrissverhalten sind deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Fasertypen und der Fasermenge ersichtlich. Die Zugabe von Glas-Mikro- und Kunststoff-Mikro-Fasern zu den Stahl-Makro-Fasern (FK3 bis FK6) bewirken eine starke Verschlechterung des Nachrissverhaltens. Sowohl die Kombination der Makrofasern aus Stahl und Kunststoff (FK1 und FK2) als auch ein erhöhter Anteil an Stahl-Makro-Fasern allein (90kg/m<sup>3</sup>) verbessert das Nachrissverhalten. Wird die Zugfestigkeit der Stahlfaser erhöht (hochfeste Stahlfaser in FK8), dann kann die Tragfähigkeit ebenfalls leicht verbessert werden. Da ein sehr hoher Stahlfasergehalt nicht wirtschaft-

lich ist, wurden in FK9 und FK10 die drei Fasertypen, bei denen das beste Nachrissverhalten beobachtet werden konnte (normal- und hochfeste Stahl-Makro-Faser und Kunststoff-Makro-Faser), nochmals miteinander Kombiniert. Letztendlich konnte mit FK10 ein Faserbeton entwickelt werden, welcher mit  $9,4 \text{ N/mm}^2$  Biegezugfestigkeit bei Erstriss und mit einer Gebrauchstauglichkeit von  $7,5 \text{ N/mm}^2$  und einer Tragfähigkeit von  $8,0 \text{ N/mm}^2$  eine ausgesprochen hohe Leistungsfähigkeit (Performance) aufweist.

### 3.9 Ergebnisse - Schwindringversuche

Die Wirksamkeit der Fasern zur Reduktion der Rissentstehung im jungen Betonalter wird mittels Schwindring-Untersuchungen beurteilt. Der junge Beton der Schwindringserien S0 bis S7 wird dabei einer Luftströmung ausgesetzt, die über die Oberfläche des frischen Betons streift und so zu einer schnellen oberflächennahen Trocknung führt. Im Betonalter von 21 Stunden werden die entstandenen Risslängen und Rissbreiten gemessen, aus denen die Rissfläche berechnet wird. Die Wirksamkeit der Fasern gegenüber Rissbildung im frühen Alter erfolgt durch den Vergleich der Risslängen bzw. Rissflächen des Faserbetons mit dem Nullbeton ohne Faserzugabe (Siehe Kapitel 3.3).

In Abbildung 20 sind die in den Versuchen aus den Schwindringserien ermittelten Risslängen sowie die dazugehörigen Rissflächen dargestellt. Die Einzelwerte aus zwei Messungen je Serie und die jeweiligen Rissbilder sind im Anhang (siehe S. 65 ff.) zusammengefasst.



**Abb. 20:** Kennwerte (Risslänge und Rissfläche) der Versuche an den Betonen der Schwindringserien aus AP 2

Die Schwindringserien S3 mit  $0,6 \text{ kg/m}^3$  Kunststoff-Mikro-Fasern und S5 mit  $20 \text{ kg/m}^3$  Stahl-Mikro-Fasern weisen im Vergleich zur Nullserie eine um 4 % bzw. 35 % höhere Risslänge auf. Die Rissflächen allerdings sind bei S3 um 8 % und bei S5 um 35 % niedriger als bei der Nullserie. Diese Unterschiede in Risslänge und Rissfläche verdeutlichen, dass im Vergleich zur Nullserie die Rissbreiten bei den Mischungen S3 und S5 niedriger sind, woraus sich die niedrigeren Rissflächen ergeben. Dementsprechend wurden bei den in diesem Fall niedrig dosierten Fasermengen zwar nicht die Risslängen aber dennoch die Rissbreiten reduziert. Im Folgenden werden aufgrund des Einflusses der Rissbreiten nur mehr die Rissflächen diskutiert.

Eine Erhöhung der Glas-Mikro-Faser von  $0,6 \text{ kg/m}^3$  (S1) auf  $1 \text{ kg/m}^3$  (S2) führt zu einer deutlichen Reduktion der Rissflächen. Bei letzterer Dosierung wurde im Vergleich zur Nullserie eine Reduktion der Rissfläche von nahezu 90 % erzielt. Bei der Kunststoffmikrofaser ergibt sich erst bei einer Dosierung von  $1,5 \text{ kg/m}^3$  (Serie S4) eine deutliche Reduktion der Rissfläche von 76 % im Vergleich zur Nullmischung. Auch bei der Stahlmikrofaser wird eine Zugabe von  $50 \text{ kg/m}^3$  benötigt, um eine Reduktion der Rissfläche von 86 % zu erzielen.

Die größte Reduktion der Rissfläche konnte bei FK10 aus den Biegezugserien mit  $20 \text{ kg/m}^3$  normalfester- und  $40 \text{ kg/m}^3$  hochfester Stahlmakrofaser und  $4 \text{ kg/m}^3$  Kunststoffmakrofaser erzielt werden (identisch mit S7). Die Abnahme der Rissfläche im Vergleich zur Nullserie beträgt hier rund 92 %. Diese Faserbetonserie erzielte auch bei den äquivalenten Biegezugfestigkeiten die besten Ergebnisse und wurde deshalb bei den Schwindring-Untersuchungen miteinbezogen.

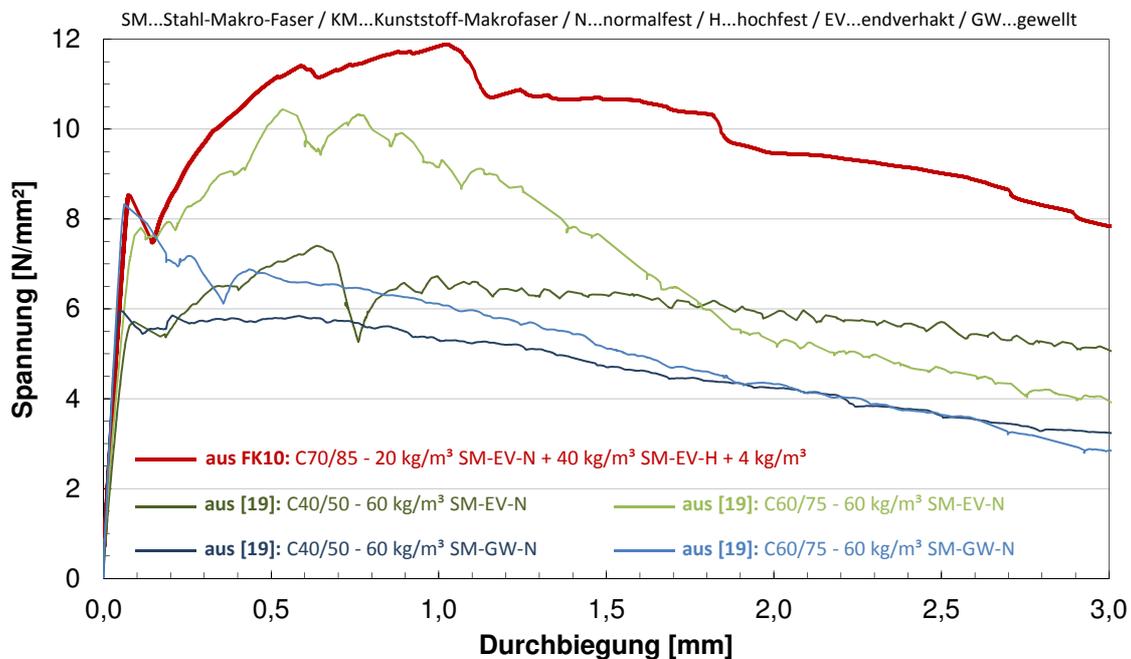
### **3.10 Fazit aus Arbeitspaket 2**

Das Ziel im Arbeitspaket 2 lag in der Untersuchung der Einflüsse von verschiedenen Mikro- und Makrofasern auf die Frisch- und vor allem auf die Festbetoneigenschaften. Es sollte bestimmt werden, mit welcher Faserkombination die besten Ergebnisse bezüglich des Tragverhaltens bei ausreichender Verarbeitbarkeit erreicht werden können. Zum einen soll die Biegezugfestigkeit bis zum Erstriss möglichst hoch sein. Zum anderen soll aber auch das Nachrissverhalten möglichst auf dem gleichen Niveau wie die Erstrissfestigkeit liegen. Des Weiteren sollte eine Rissbildung infolge eines Frühschwindens durch die Zugabe von Mikrofasern verhindert oder zumindest minimiert werden.

Aus den Schwindringversuchen ist zusammenfassend zu sagen, dass die Faserkombination aus normal- und hochfester Stahl-Makro-Faser mit der Kunststoff-Makro-Faser die beste Wirkung zur Vermeidung einer Frührissbildung im Beton besitzt. Ein Einsatz einer Mikro-Faser ist dementsprechend in diesem Fall nicht notwendig.

Aus den Ergebnissen der äquivalenten Biegezugfestigkeiten ist abzuleiten, dass die normalfeste Stahl-Makro-Faser hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit etwas bessere Werte ergibt, während die hochfeste Stahl-Makro-Faser bei der Tragsicherheit Vorteile bietet. Die Verwendung der Kunststoff-Makro-Faser verbessert das Nachrissverhalten nochmals. Die Mischung FK10 mit hoch- und normalfester Stahl-Makro-Faser im Verhältnis 2:1 und zusätzlich Kunststoff-Makro-Faser zeigt von allen untersuchten Faserbetonen das beste Nachrissverhalten.

In Abbildung 21 zeigt der Vergleich der Spannungs-Durchbiegungs-Kurve eines Balkens aus FK10 mit Versuchsergebnissen aus [19] deutlich die Leistungssteigerung des im AP 2 entwickelten kombifaserbewehrten Betons. Die normalfesten Betone (dunkelblaue und dunkelgrüne Kurven) zeigen eine niedrige Erstrissfestigkeit und ein moderates Nachrissverhalten, während die hochfesten Betone (hellblaue und hellgrüne Kurven) eine hohe Erstrissfestigkeit aber dafür ein schlechtes Nachrissverhalten besitzen. Im hochfesten Kombifaserbeton konnten beide positiven Aspekte in einer Rezeptur vereint werden.



**Abb. 21:** Spannung-Durchbiegungs-Kurve eines Balkens aus FK10 im Vergleich zu Messungen an hochfesten und normalfesten Betonbalken aus [19]

## 4. ARBEITSPAKET 3 - Dynamische Versuche an Laborprobekörpern

### 4.1 Ziele und Vorgehensweise

In Arbeitspaket 3 sollen an kombifaserbewehrten Betonbalken aus der Mischungsrezeptur von AP1 und der festgelegten Faserkombination von AP2 dynamische Versuche durchgeführt werden. Dabei sollen vergleichende Versuche in Anlehnung an EN 13230-1 bis 5<sup>[20]</sup> mit Probekörpern angestellt werden, welche aus Standardbeton (nach Vorgaben der ÖBB) aus der Spannbetonschwellenproduktion hergestellt werden.

### 4.2 Prüfmethoden

#### ***Festbetonkennwerte:***

Die Messung der **Würfeldruckfestigkeiten** erfolgte analog der Beschreibung in Kapitel 2.3.

Die **dynamischen Versuche** wurden in Anlehnung an die EN 13230<sup>[20]</sup> mit dem in Abbildung 22-a dargestellten Prüfstand durchgeführt. Die Dreipunkt-Biege-Vorrichtung wurde so eingestellt, dass der Abstand zwischen den beiden Auflagern 60 cm betrug, dementsprechend beträgt der Überstand auf beiden Seiten 5 cm. Daraus ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von aufgebrachtener Kraft (kN) auf größte Biegezugspannung (N/mm<sup>2</sup>) im Querschnitt von 0,4.

Die Belastung wurde kraftgesteuert in Form einer sinusförmigen Welle aufgebracht. Die Unterlast wurde mit 3 kN, die Amplitude für die erste Belastungsstufe mit 1 kN gewählt. Während jeder Belastungsstufe wurden 5000 Sinuswellen mit einer Frequenz von 5 Hz durchlaufen. Die Brucherkennung der Balken erfolgte optisch per Lichtmikroskop (siehe Abbildung 22-a) und durch Auswertung der dissipierten Energie (siehe Energiediagramme in Kapitel 4.5) während und nach Durchlauf einer Belastungsstufe. Konnte eine Belastungsstufe ohne Riss durchlaufen werden, wurde die Amplitude um 1 kN erhöht.

Um die Lagerungsverhältnisse der Balken möglichst unbeeinflusst zu halten, wurden jene Bereiche, an denen die Lagerrollen der Dreipunkt-Biegezug-Vorrichtung angreifen mit einer Metallfeile gefast (45°, ca. 5 mm). Zur besseren Detektion der Risse erwies es sich des Weiteren als zweckmäßig, die sich seitlich befindliche Fläche im Bereich des zu erwartenden Risses zu polieren und ein Raster aufzuzeichnen.



(a)



(b)

**Abb. 22:** Prüfstand der dynamischen Dreipunkt-Biegezug-Versuche mit Lichtmikroskop zur Rissdetektion (a); Vorrichtung zur Aufbringung der externen Vorspannkraft (b)

Ein Großteil der Balken wurde vorgespannt getestet. Die Vorspannung wurde extern aufgebracht (siehe Abbildung 22-b). Dazu wurden an den Stirnenden (10 x 15 cm) der Balken Stahlplatten mit einem auf beiden Seiten überstehenden Joch angebracht. Diese Joche wurden nun mit Gewindestangen zusammengezogen bis die per Kraftmessring gemessene Vorspannkraft den gewünschten Wert erreichte. Es wurden Versuche mit einer Vorspannung von 50 kN bzw. 75 kN durchgeführt. Bezogen auf die Querschnittsfläche ergeben sich somit Spannungen von 3,33 N/mm<sup>2</sup> bzw. 5 N/mm<sup>2</sup>.

### 4.3 Probenherstellung und Lagerung

Pro Mischung von etwa 47 Liter Frischbeton wurden drei Versuchskörper mit Querschnittsabmessungen von 10 x 15 cm<sup>2</sup> und einer Länge von 70 cm sowie zumindest drei Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm zwecks Bestimmung der Druckfestigkeit zur Qualitätskontrolle hergestellt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Planparallelität der im Zuge der Dreipunkt-Biegeversuche belasteten Oberflächen gelegt. Da die Belastung um die starke Achse erfolgte, sind dies jene Oberflächen, welche 70 x 10 cm<sup>2</sup> messen. Im Anschluss an die

Ausschalung (einen Tag nach Befüllung der Schalungen) wurden die Proben bis unmittelbar vor dem Versuch im Wasserbad bei ungefähr 20°C gelagert. Einzelne Proben wurden in einem auf 60°C geheiztem Wasserbad gelagert, um Auswirkungen einer beschleunigten Reife in Relation zu den 28 Tage alten Proben untersuchen zu können. Der Großteil der Proben wurde bereits nach sieben Tagen getestet.

#### 4.4 Versuchsserien

Die folgende Tabelle (Tab 12) enthält die Parameter der insgesamt 10 Serien aus den dynamischen Versuchen. In Serie DYN1 wurden zunächst 3 Balken im Alter von 28 Tagen ohne Vorspannung getestet. Aus Zeitgründen erfolgten alle weiteren Versuche in einem Alter von 7 Tagen. In den Serien DYN2 bis DYN4 wurden die Balken mit 0 kN, 50 kN und 75 kN vorgespannt. In den Serien DYN5 und DYN6 wurden die Versuche an Referenzbalken aus dem von der ÖBB vorgegebenen Standardbeton (CEM I;  $z \geq 300 \text{ kg/m}^3$ ;  $w/z < 0,45$ ; C50/60) bei den beiden Vorspannungskräften durchgeführt. In den Serien DYN7 und DYN8 wurden die Balken bei 60°C im Wasserbad gelagert, um ein beschleunigtes Reifen zu erzeugen. Letztendlich wurden in den Serien DYN 9 und DYN10 Versuche an Balken aus dem reinen hochfesten Selbstverdichtenden Beton ohne Zugabe von Fasern bei den beiden Vorspannkraften durchgeführt.

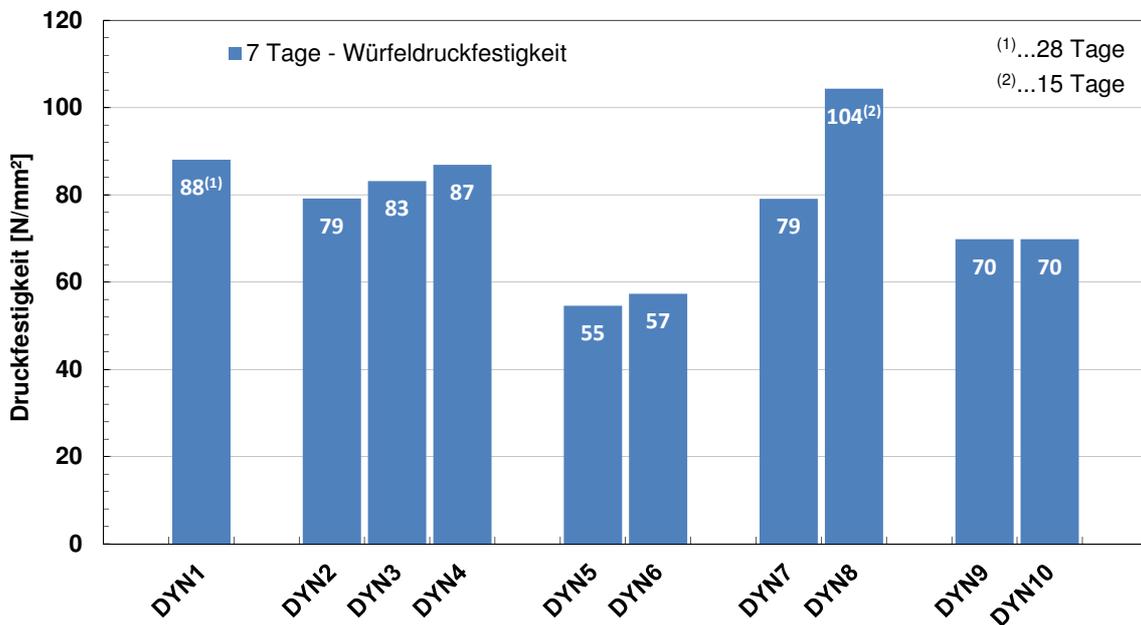
Kurzbezeichnung	Serienbezeichnung	Probenanzahl	Probenalter	Vorspannkraft	Wasserslagerung bei ...	Bemerkung
DYN1	FK10_00kN_NWL_28d	3	28d	0 kN	20°C	FK10 aus AP2
DYN2	FK10_00kN_NWL_07d	7	7d	0 kN	20°C	FK10 aus AP2
DYN3	FK10_50kN_NWL_07d	3	7d	50 kN	20°C	FK10 aus AP2
DYN4	FK10_75kN_NWL_07d	3	7d	75 kN	20°C	FK10 aus AP2
DYN5	REF_50kN_NWL_07d	1	7d	50 kN	20°C	Referenzbeton
DYN6	REF_75kN_NWL_07d	2	7d	75 kN	20°C	Referenzbeton
DYN7	FK10_00kN_WWL_07d	1	7d	0 kN	60°C	FK10 aus AP2
DYN8	FK10_00kN_WWL_15d	3	15d	0 kN	60°C	FK10 aus AP2
DYN9	FK0_50kN_NWL_07d	1	7d	50 kN	20°C	FK0 aus AP2 (ohne Fasern)
DYN10	FK0_75kN_NWL_07d	2	7d	75 kN	20°C	FK0 aus AP2 (ohne Fasern)

**Tab. 12:** Versuchsserien der dynamischen Versuche aus AP3

## 4.5 Ergebnisse

### **Würfeldruckfestigkeit:**

In Abbildung 23 sind die Würfeldruckfestigkeiten der Balken aus den dynamischen Versuchen zusammengestellt. Die Würfeldruckfestigkeiten der Serien DYN2-DYN4 liegen im Mittel mit 83 N/mm<sup>2</sup> im Alter von 7 Tagen bei ca. 94% der 28-Tage-Druckfestigkeit aus DYN1 (88 N/mm<sup>2</sup>). Die 7-Tage-Druckfestigkeiten der Referenzserien (DYN5 und DYN6) liegen im gewünschten Bereich von ca. 55 N/mm<sup>2</sup>. Wird der Beton für 7 Tage im 60°C heißen Wasserbad gelagert (DYN7), so ergibt sich keine Verbesserung der Würfeldruckfestigkeit gegenüber dem Beton aus DYN2 bis DYN4. Erst bei einer Lagerung von 15 Tagen bei höheren Temperaturen (DYN8) kann eine wesentliche Steigerung der Würfeldruckfestigkeit (104 N/mm<sup>2</sup>) von ca. 20% gegenüber der Druckfestigkeit des normalgelagerten Betons im Alter von 28 Tagen (DYN1) beobachtet werden. Die betone der Serien ohne Faserzugabe (DYN9 und DYN10) lagen mit 70 N/mm<sup>2</sup> etwas unterhalb der Druckfestigkeiten des entwickelten Betons aus AP1 (ca. 80 N/mm<sup>2</sup>).



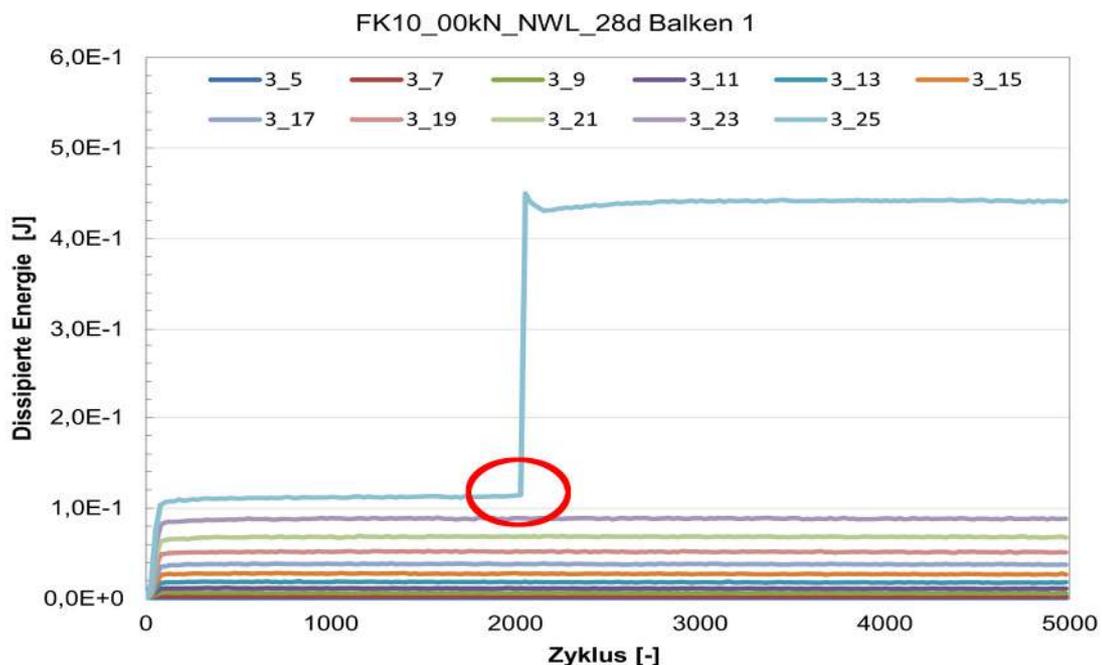
**Abb. 23:** Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus AP3

### **Dynamische Versuche:**

Durch Aufbringung der Kraft auf den Balken und der daraus folgenden Durchbiegung des Balkens nimmt dieser Energie auf. Bei der darauffolgenden Entlastung wird diese Energie teilweise wieder freigesetzt. Der nicht wieder freigesetzte (dissipierte) Anteil wird zum einen

Teil in Wärme umgewandelt, zum anderen Teil verursacht er Schädigung im Versuchskörper. Während des Durchlaufens einer Sinusschwingung werden Kraft, Weg und zugehöriger Zeitpunkt mit einer Auflösung von 500 Datenpunkten (pro Sinuswelle, zeitlich gleichverteilt) aufgezeichnet. Durch Multiplikation der zugehörigen Kraft- und Wegwerte erhält man die im Balken zum jeweiligen Zeitpunkt gespeicherte Energie. Durch numerische Integration über die gesamte Sinuswelle erhält man den dissipierten Anteil der Energie.

Für jede Kraftstufe werden die Versuchskörper 5000 Mal be- und entlastet. Aus messtechnischen Gründen war es nicht möglich, mehr als 1000 dieser Zyklen aufzuzeichnen. Ob umfangreicherer Möglichkeiten beispielsweise zur Glättung, Mittelwertbildung oder Kontrolle wurde nicht jeder fünfte, sondern immer 5 aufeinanderfolgende Zyklen aufgezeichnet. Zwischen den Fünferblöcken wurden folglich 20 Zyklen nicht aufgezeichnet. Um die Energiediagramme zu erhalten (siehe Abbildung 24 - Balken 1 aus Serie DYN1), wurde die dissipierte Energie für alle 1000 einer Kraftstufe aufgezeichneten Zyklen ermittelt.

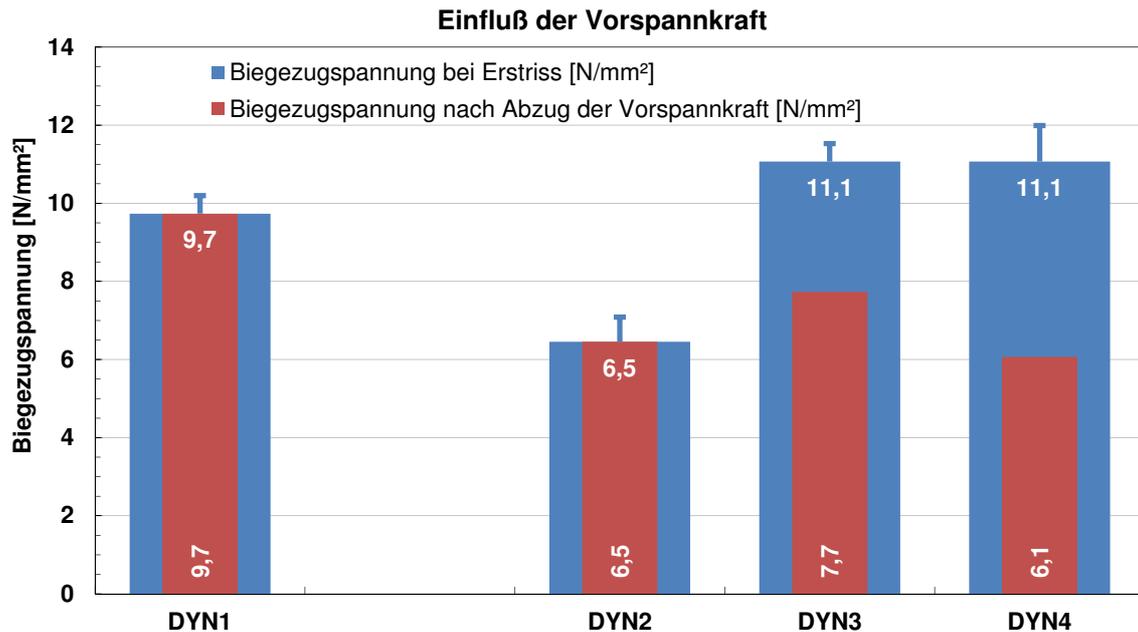


**Abb. 24:** Energiediagramm des Balken 1 aus Versuchsserie DYN1; der Riss tritt bei dem sprunghaften Anstieg der dissipierten Energie auf

Als Kompromiss zwischen einer wirksamen Glättung und einer möglichst unbearbeiteten Darstellung der Versuchsdaten wurde der Mittelwert eines Fünferblockes hintereinander aufgezeichneter Zyklen gebildet und für die Darstellung in einem Energiediagramm herangezogen. In einem Diagramm werden so alle Kraftstufen, die ein Balken durchlaufen hat, dargestellt. Diese Energiediagramme sind ein Mittel zur Risskennung – einerseits durch die

Zunahme der dissipierten Energie im Zug eines Risses. Andererseits kann der Verlauf Hinweise auf bevorstehende Risse geben. Die Energiediagramme der einzelnen Balken aus den Versuchsserien sind im Anhang (siehe S. 69 ff.) zusammengestellt.

In Abbildung 25 sind die Biegezugspannungen bei Erstriss und die dazugehörigen Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien DYN1 bis DYN4 zusammengestellt.

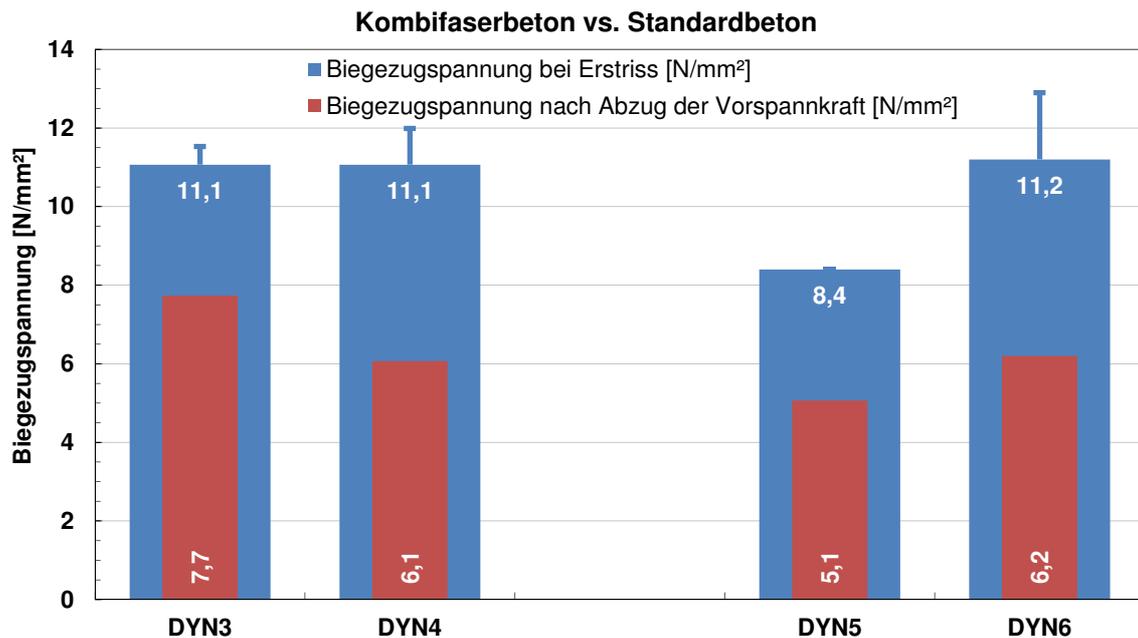


**Abb. 25:** Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien DYN1 bis DYN4

Bei einer Vorspannkraft von 50 kN (DYN3) kann die Biegezugfestigkeit um 70% gegenüber keiner Vorspannung (DYN2) gesteigert werden. Eine Erhöhung der Vorspannkraft auf 75 kN bewirkt dagegen keine weitere Steigerung der Biegezugfestigkeit bei Erstriss (DYN4). Der Wert für die Biegezugspannung nach Abzug der Spannung durch die aufgebrachte Vorspannkraft fällt sogar mit 6,1 N/mm<sup>2</sup> unter den Wert ohne eine Vorspannung (6,5 N/mm<sup>2</sup>). Der Vergleich von DYN1 und DYN2 zeigt, das zwischen einem Probenalter von 7 und 28 Tagen noch eine erhebliche Steigerung der Biegezugspannungen um ca. 50% möglich ist. Da die anderen Versuche in einem Probenalter von 7 Tagen durchgeführt wurden, ist dies bei der Bewertung der Ergebnisse zu beachten. Weiters ist anzumerken, das die Biegezugspannungen bei Erstriss bei den statischen und dynamischen Versuchen in den gleichen Größenbereich zwischen 9,4 N/mm<sup>2</sup> und 9,7 N/mm<sup>2</sup> (Vgl. mit Abbildung 19, FK10) liegen. Hier wurde eine Verringerung der Spannungen bei den dynamischen Versuchen auf ca. 80% der Biegezugspannung aus den statischen Versuchen erwartet. An dieser Stelle

wird wiederum die hohe Leistungsfähigkeit der entwickelten Rezeptur für einen kombifaserbewehrten, hochfesten Beton ersichtlich.

In Abbildung 26 sind die Biegezugspannungen bei Erstriss und die dazugehörigen Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Referenzserien aus dem Standardbeton (DYN5 und DYN6) den gleichwertigen Serien aus dem kombifaserbewehrten Beton (DYN3 und DYN4) gegenübergestellt.

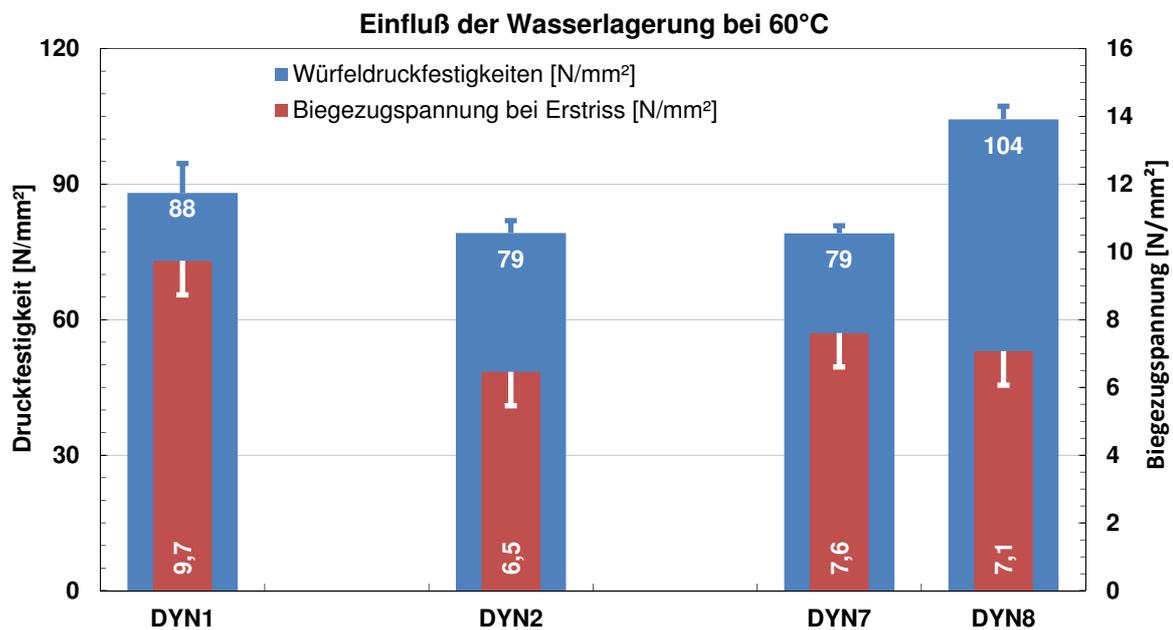


**Abb. 26:** Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien aus kombifaserbewehrtem Beton (DYN3 und DYN4) und aus Standardbeton (DYN5 und DYN6)

In obiger Abbildung zeigt sich deutlich der starke Einfluss der Vorspannkraft auf die zu erreichenden Biegezugfestigkeiten. Während bei einer Vorspannkraft von 50 kN beim kombifaserbewehrten Beton (DYN3) gegenüber dem Referenzbeton (DYN5) eine deutliche Steigerung der Biegezugspannungen von ca. 32% zu beobachten war, ist diese Leistungssteigerung bei einer Vorspannkraft von 75 kN nicht mehr zu erkennen. Hier liegen die Werte bei beiden Betonsorten bei ca. 11 N/mm<sup>2</sup>.

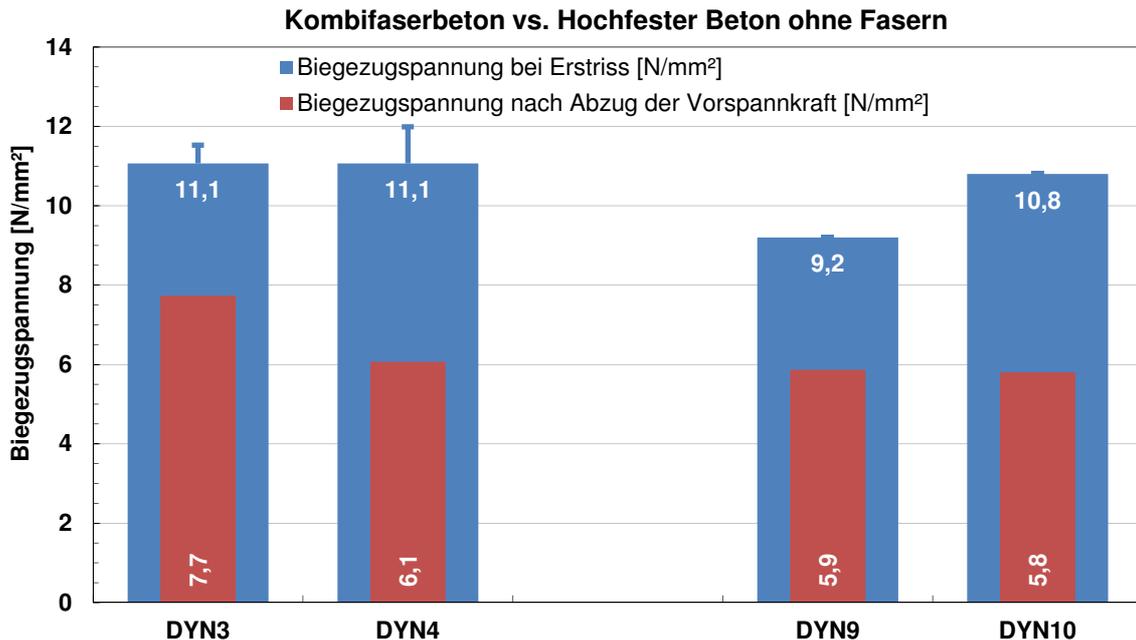
In Abbildung 27 sind die Einflüsse einer beschleunigten Reifung des Betons durch eine Wasserlagerung bei 60°C dargestellt. Zu diesem Zweck sind die Biegezugspannungen bei Erstriss und die dazugehörigen Würfeldruckfestigkeiten der Serien DYN1, DYN2, DYN7 und DYN8 zusammengestellt. Diese Versuche wurden ohne Vorspannung der Balken

durchgeführt. Hier zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten im Vergleich zu den Würfeldruckfestigkeiten. Werden die Balken für 7 Tage im Warmwasserbecken bei 60°C (DYN7) gelagert, so ist eine leichte Steigerung der Biegezugspannung im Vergleich zu den bei 7 Tage bei 20°C im Wasser gelagerten Balken (DYN2). Die für 15 Tage im Warmwasserbecken gelagerten Balken zeigen dagegen keine weitere Steigerung der Biegezugspannungen (DYN8). Während also durch die beschleunigte Reife die Druckfestigkeiten gegenüber einer 28 Tage alten Probe um 20% steigen, sinken dagegen die Biegezugfestigkeiten um ca. 27%.



**Abb. 27:** Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Würfeldruckfestigkeiten der Serien der bei 20°C (DYN1 und DYN2) und bei 60°C (DYN7 und DYN8) gelagerten Proben

In Abbildung 28 sind zur Beurteilung des Einflusses der Fasern auf die dynamische Beanspruchung die Biegezugspannungen bei Erstriss und die dazugehörigen Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien mit Fasern (DYN3 und DYN4) und ohne Fasern (DYN9 und DYN10) zusammengestellt. Auch hier wird wiederum der große Einfluss der Vorspannkraft deutlich. Bei ausreichender Höhe (hier 75 kN) sind die Leistungssteigerungen aufgrund einer verbesserten Betonrezeptur nicht mehr zu beobachten (DYN4 und DYN10). Werden die Fasern bei der hochfesten Betonrezeptur nicht zugegeben, dann liegt die Biegezugspannung bei 50 kN Vorspannkraft um ca. 17% niedriger als bei den Balken mit Faserzugabe. Bei niedrigeren Vorspannkraften wirken sich die Fasern dementsprechend positiv auf die Biegezugspannungen bei Erstriss aus.



**Abb. 28:** Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien aus kombifaserbewehrtem Beton (DYN3 und DYN4) und Hochfestem Beton ohne Faserzugabe (DYN9 und DYN10)

#### 4.6 Fazit aus Arbeitspaket 3

Das Ziel im Arbeitspaket 2 lag darin, dynamische Versuche an kombifaserbewehrten Betonbalken aus der Mischungsrezeptur von AP1 und der festgelegten Faserkombination von AP2 durchzuführen und zu bewerten. Dabei sollten vergleichende Versuche mit Probekörpern angestellt werden, welche aus Standardbeton nach Vorgaben der ÖBB aus der Spannbetonschwellenproduktion hergestellt werden.

Die dynamischen Versuche zeigten deutlich den starken Einfluss der Vorspannkraft auf die zu erreichenden Biegezugfestigkeiten der kombifaserbewehrten Betone. Weiters zeigten die Ergebnisse, dass zwischen einem Probenalter von 7 und 28 Tagen noch eine erhebliche Steigerung der Biegezugspannungen um ca. 50% möglich ist. Da ein Großteil der Versuche in einem Probenalter von 7 Tagen durchgeführt wurde, ist dies bei der Bewertung der Ergebnisse zu beachten.

Weiters ist anzumerken, dass die Biegezugspannungen bei Erstriss bei den statischen und dynamischen Versuchen identisch waren. Eine zu erwartende Verringerung der Spannungen bei den dynamischen Versuchen auf ca. 80% der Biegezugspannung aus den statischen Versuchen, konnte nicht beobachtet werden, was wiederum für eine hohe Leistungsfähigkeit der entwickelten Rezeptur spricht.

Die Versuche an dem wärmebehandelten Betonbalken zeigten, dass durch die beschleunigte Reife die Druckfestigkeit gegenüber einer 28 Tage alten Probe um 20% steigt, die Biegezugfestigkeiten allerdings um ca. 27% fallen. Diese Erkenntnis ist bei der Beurteilung zur Wärmebehandlung von biegebeanspruchten Bauteilen nicht zu vernachlässigen.

Untersuchungen an Betonbalken aus dem Hochfesten selbstverdichtenden Beton aus AP1 ohne Zugabe des Fasercocktails zeigten die positive Wirkung der Fasern auf die Biegezugspannungen bei Erstriss bei niedrigen Vorspannkraften.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Spannbetonschwellen auftretende Risse reduzieren wesentlich die Dichtheit des Betons. Dabei sinken ebenfalls die Dauerhaftigkeit und damit der Widerstand der Betonschwellen gegenüber schädlichen Umwelteinflüssen. Die Lebensdauer nimmt infolgedessen rapide ab. Durch die Entwicklung einer Rezeptur für einen kombifaserbewehrten Hochfesten Beton sollte die Gefahr der Rissbildung erheblich reduziert werden. Des Weiteren sollte durch die höheren Druck- und Biegezugfestigkeiten dieses neu entwickelten Betons gegenüber üblichen Rezepturen für Schwellenbetone eine Reduzierung des Querschnitts der Spannstahleinlage und eine Verringerung der für das Erreichen der erforderlichen Tragfähigkeit benötigten Betonschwellenhöhe bewirkt werden.

Im Arbeitspaket 1 konnte unter Verwendung von lokalen Ausgangsstoffen eine Grundrezeptur für einen hochfesten, selbstverdichtenden Beton entwickelt werden. Der Frischbeton besaß zur Vermeidung eines Absinkens der Fasern eine hohe Viskosität. Für die Anwendung im Fertigteilwerk wies der Beton eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit auf.

Im Arbeitspaket 2 konnte experimentell eine Faserkombination bestimmt werden, welche in Verbindung mit der Betonrezeptur aus AP1 eine sehr starke Performance bezüglich des Erst- und Nachrissverhaltens aufwies. Der Vergleich der Spannungs-Durchbiegungs-Kurve mit Versuchsergebnissen aus früheren Arbeiten zeigte deutlich die Leistungssteigerung des im AP 2 entwickelten kombifaserbewehrten Betons.

Die dynamischen Versuche aus Arbeitspaket 3 zeigen den immensen Einfluss der aufgebrauchten Vorspannkraft auf die erreichbaren Biegezugspannungen bei Erstriss. Eine beschleunigte Reifung des Betons durch Lagerung bei 60°C wirkte sich zwar positiv auf die Druckfestigkeit aus, die Biegezugspannungen bei dynamischer Belastung sanken infolgedessen allerdings.

Die dynamischen Versuche an Proben aus dem entwickelten kombifaserbewehrten Beton im verkleinerten Maßstab zeigen eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei niedrigen Vorspannkraften. Inwieweit eine Anwendung in der Praxis zielführend ist, muss anhand von weiterführenden Untersuchungen an Bahnschwellen im Maßstab 1:1 abgeklärt werden.

## II ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abb. 1:</b>	Beispiele für Schwellenbauarten: Holzschwelle (a) und Y-Stahlschwelle (b).....	8??
<b>Abb. 2:</b>	Beispiele für Schwellenbauarten: Kunstholzwelle (a), Spannbeton-Monoblockschwelle (b) und Zweiblockschwelle (c).....	9
<b>Abb. 3:</b>	häufige Rissarten bei Spannbetonschwellen; Längsriss (a), Sickenriss (b), Querriss (c), Kopfriss (d), Treibriss (e) und Schwindrisse (f) .....	10
<b>Abb. 4:</b>	Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung .....	14
<b>Abb. 5:</b>	Setzfließmaß-Versuch; mit Beton gefüllter Kegelstumpf vor dem Anheben (a) und ausgebreiteter Betonkuchen nach dem Anheben (b) des Hohlkegelstumpfes.....	16
<b>Abb. 6:</b>	Ausbreitmaß-Versuch; Ausbreittisch mit Kegelstumpf (a) und ausgebreiteter Betonkuchen nach dem Abheben der Kegelstumpfform und den 15 Schlägen (b) .....	16
<b>Abb. 7:</b>	Prüfanordnung zum Druckversuch .....	17
<b>Abb. 8:</b>	Würfeldruckfestigkeiten der Proben aus den Tastversuchen im Alter von 7 und 28 Tagen .....	20
<b>Abb. 9:</b>	Verwendete Fasern: Mikro-Stahl, Makro-Stahl, Mikro Kunststoff, Makro-Kunststoff, Mikro-Glas und Makro-Glas.....	24
<b>Abb. 10:</b>	Aufbau Schwindringversuch: innerer und äußerer Schwindring mit Rissinitiatoren; Schwindring mit aufgesetztem Gebläse .....	25
<b>Abb. 11:</b>	Aufbau des Versuches zur Bestimmung der äquivalenten Biegezugfestigkeit .....	26
<b>Abb. 12:</b>	Prüfanordnung für den Biegezugversuch mit Schiene und LVDT ...	26
<b>Abb. 13:</b>	Ermittlung der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit .....	28
<b>Abb. 14:</b>	Herstellung der Betonmischungen im Zwangsmischer.....	29
<b>Abb. 15:</b>	gefüllte Schalungselemente: Schwindring; Balken und Würfel.....	30
<b>Abb. 16:</b>	Gegenüberstellung der Setzfließmaße (vor Faserzugabe) und der Ausbreitmaße (nach Faserzugabe) der Betone aus Arbeitspaket 2.....	33

<b>Abb. 17:</b>	Gegenüberstellung der Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus Arbeitspaket 2 im Alter von 7 und 28 Tagen.....	35
<b>Abb. 18:</b>	Spannungs-Durchbiegungs-Kurven der Versuche an den 5 Betonbalken aus FK2 .....	36
<b>Abb. 19:</b>	Kennwerte (Biegezugfestigkeit bei Erstriss, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit beim Nachrissverhalten) aus den 4-Punkt-Biegezug-Versuchen an den Betonbalken aus AP 2.....	37
<b>Abb. 20:</b>	Kennwerte (Risslänge und Rissfläche) der Versuche an den Betonen der Schwindringserien aus AP 2 .....	38
<b>Abb. 21:</b>	Spannung-Durchbiegungs-Kurve eines Balkens aus FK10 im Vergleich zu Messungen an hochfesten und normalfesten Betonbalken aus [19] .....	22
<b>Abb. 22:</b>	Prüfstand der dynamischen Dreipunkt-Biegezug-Versuche mit Lichtmikroskop zur Rissdetektion; Vorrichtung zur Aufbringung der externen Vorspannkraft.....	23
<b>Abb. 23:</b>	Würfeldruckfestigkeiten der Betone aus AP3 .....	24
<b>Abb. 24:</b>	Energiediagramm des Balken 1 aus Versuchsserie DYN1; der Riss tritt bei dem sprunghaften Anstieg der dissipierten Energie auf .....	25
<b>Abb. 25:</b>	Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien DYN1 bis DYN4 ....	26
<b>Abb. 26:</b>	Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien aus kombifaserbewehrtem Beton (DYN3 und DYN4) und aus Standardbeton (DYN5 und DYN6).....	27
<b>Abb. 27:</b>	Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Würfeldruckfestigkeiten der Serien der bei 20°C (DYN1 und DYN2) und bei 60°C (DYN7 und DYN8) gelagerten Proben.....	28
<b>Abb. 28:</b>	Biegezugspannungen bei Erstriss und dazugehörige Biegezugspannungen nach Abzug der jeweiligen Spannungen aus der eingeleiteten Vorspannkraft der Serien aus kombifaserbewehrtem Beton (DYN3 und DYN4) und Hochfestem Beton ohne Faserzugabe (DYN9 und DYN10).....	29

### III TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tab. 1:</b>	Im Arbeitspaket 1 verwendete Ausgangsstoffe .....	15
<b>Tab. 2:</b>	Rezepturen und die dazugehörigen Frischbetoneigenschaften mit den jeweiligen Bemerkungen zur Mischungsstabilität und zum Rücksteifverhalten aus den Tastversuchen .....	18
<b>Tab. 3:</b>	Festbetonrohrichten und Würfeldruckfestigkeiten und dazugehörige Standardabweichungen aus den Tastversuchen im Alter von 7 und 28 Tagen .....	19
<b>Tab. 4:</b>	Grundrezeptur für den hochfesten, selbstverdichtenden Beton aus Arbeitspaket 1 zur weiteren Anwendung in Arbeitspaket 2 .....	21
<b>Tab. 5:</b>	Technische Daten der im Arbeitspaket 2 verwendeten Fasern .....	23
<b>Tab. 6:</b>	Abmessungen der Proben aus Arbeitspaket 2 .....	28
<b>Tab. 7:</b>	Mischregime des hergestellten Betons aus Arbeitspaket 2 .....	29
<b>Tab. 8:</b>	Faserkombinationen und -gehalte der Biegezugserien aus Arbeitspaket 2 .....	30
<b>Tab. 9:</b>	Faserkombinationen und -gehalte der Schwindringserien aus Arbeitspaket 2 .....	31
<b>Tab. 10:</b>	Frischbetonkennwerte der Betone aus den Biegezug- und Schwindringserien .....	32
<b>Tab. 11:</b>	Festbetonkennwerte der Betone aus den Biegezug- und Schwindringserien .....	34
<b>Tab. 12:</b>	Versuchsserien der dynamischen Versuche aus AP3 .....	35

#### IV LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bild am 18.01.2012 heruntergeladen @ <http://www.lokrundschau.de/inhalt/Magazin/250/007.html>
- [2] Bild am 19.01.2012 heruntergeladen @ <http://www.gleisbauwelt.de/site/material/materialstahlschwellen.html>
- [3] Bild am 19.01.2012 heruntergeladen @ <http://www.sekisuibahntechnik.de/ffu/technologie/>
- [4] Bild am 19.01.2012 heruntergeladen @ <http://familie-tara.de/detarapages/gleisanlagen.php>
- [5] Bild am 19.01.2012 heruntergeladen @ <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/381085>
- [6] **Deutsche Bahn:** Katalog für Schäden an Spannbetonschwellen, Juli 2002, heruntergeladen am 19.01.2012 @ <http://www.themos-sa.gr/sleepercracks.pdf>
- [7] **Okamura, H.; Ozawa, K.:** Mix Design for Self-Compacting Concrete, Concrete Library of JSCE No. 25, S. 107-120, 1995.
- [8] **Okamura, H.; Ozawa, K.:** Self-Compactable High Performance Concrete in Japan, International Workshop on High Performance Concrete (HPC), ACI SP-159, S. 31-45, 1994.
- [9] **ÖNORM EN 197-1:** „Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“, Austrian Standards, 2011.
- [10] **ÖNORM EN 12620:** „Gesteinskörnungen für Beton“, Austrian Standards, 2014.
- [11] **ÖNORM EN 12350-8:** „Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Setzfließversuch“, Austrian Standards, 2010.
- [12] **ÖNORM EN 12350-5:** „Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß“, Austrian Standards, 2009.
- [13] **Hueber, G.:** „Untersuchung zu den Einflüssen von Mikro- und Makrofasern auf die Eigenschaften eines selbstverdichtenden, Hochfesten Betons“, Diplomarbeit an der Fakultät für Technische Wissenschaften, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2014.
- [14] **ÖNORM EN 12390-3:** „Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (konsolidierte Fassung)“, Austrian Standards, 2012.

- [15] **ÖNORM B 4710-1:** „Beton - Teil 1: Herstellung Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton)“, Austrian Standards, 2010.
- [16] **ÖVBB-Richtlinie:** „Faserbeton“, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2008.
- [17] **Datenblatt Brugg:** „Die neue Bi-komponente Faser Concrix“, Brugg Contec AG, Romanshorn (Schweiz).
- [18] **Böing, R.; Guirguis, P.; Müller, M.; Schultz, M.:** „Detailinformationen zu Stahlfaserbeton für Planer und Verarbeiter“, Informationsblatt Heidelberg Cement Group.
- [19] **As'Ad, S.:** „Equivalent flexural strength of steel fibre reinforced concrete and its modelling from fibre distribution and fibre pull-out load“, Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwissenschaften der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck, 2006.
- [20] **ÖNORM EN 13230-1 bis 5:** „Bahnanwendungen – Oberbau – Gleis- und Weichenschwellen“, Austrian Standards, 2009.

## V Anhang

FK 1	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	25,3	843	3,9	603
Betonage 2	25,6	768	5,2	587
Betonage 3	26,6	765	4,7	495
Mittelwert:	25,8	792	4,6	562



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

FK 2	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	26	770	5	570
Betonage 2	26	833	4	535
Betonage 3	25,2	748	7,2	533
Mittelwert:	25,7	784	5,4	546



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

FK 3	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	25,1	773	5,4	588
Betonage 2	26,2	733	8,8	625
Betonage 3	25,4	775	6,3	605
<b>Mittelwert:</b>	<b>25,6</b>	<b>760</b>	<b>6,8</b>	<b>606</b>



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

FK 4	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	24,4	780	7,2	588
Betonage 2	21,4	778	4,4	560
Betonage 3	22,1	800	4,5	638
<b>Mittelwert:</b>	<b>22,6</b>	<b>786</b>	<b>5,4</b>	<b>595</b>



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

FK 5	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	22,3	755	5,2	558
Betonage 2	23,9	763	7,2	555
Betonage 3	23,2	795	4,4	573
<b>Mittelwert:</b>	<b>23,1</b>	<b>771</b>	<b>5,6</b>	<b>562</b>



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

FK 6	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	22,8	805	5,2	595
Betonage 2	22,4	823	3,9	593
Betonage 3	21,7	763	5,2	558
<b>Mittelwert:</b>	<b>22,3</b>	<b>797</b>	<b>4,8</b>	<b>582</b>



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

<b>FK 7</b>	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	21,6	760	4,6	638
Betonage 2	20,2	780	4,1	655
Betonage 3	22,6	758	6,3	583
<b>Mittelwert:</b>	<b>21,5</b>	<b>766</b>	<b>5,0</b>	<b>625</b>


**SFM ohne Fasern**

**ABM mit Fasern**

<b>FK 8</b>	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	24,2	728	6,9	648
Betonage 2	22,7	785	5,5	665
Betonage 3	21,5	760	5,2	698
<b>Mittelwert:</b>	<b>22,8</b>	<b>758</b>	<b>5,9</b>	<b>670</b>


**SFM ohne Fasern**

**ABM mit Fasern**

FK 9	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	23,6	683	7,0	470
Betonage 2	23,3	715	6,9	400
Betonage 3	21,9	725	6,4	445
<b>Mittelwert:</b>	<b>22,9</b>	<b>708</b>	<b>6,8</b>	<b>438</b>



**SFM ohne Fasern**



**ABM mit Fasern**

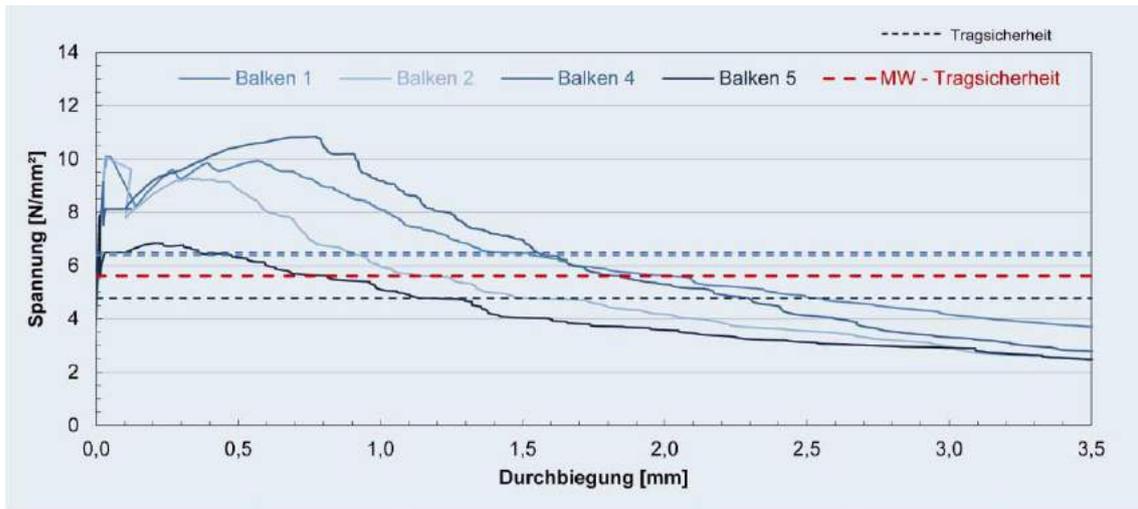
FK 10	Frischbetontemperatur [°C]	ohne Fasern		mit Fasern
		Setzfließmaß [mm]	t <sub>500</sub> - Zeit [s]	Ausbreitmaß [mm]
Betonage 1	21,7	740	6,3	515
Betonage 2	22,3	753	5,3	538
Betonage 3	23,3	768	5,4	445
<b>Mittelwert:</b>	<b>22,4</b>	<b>754</b>	<b>5,7</b>	<b>499</b>



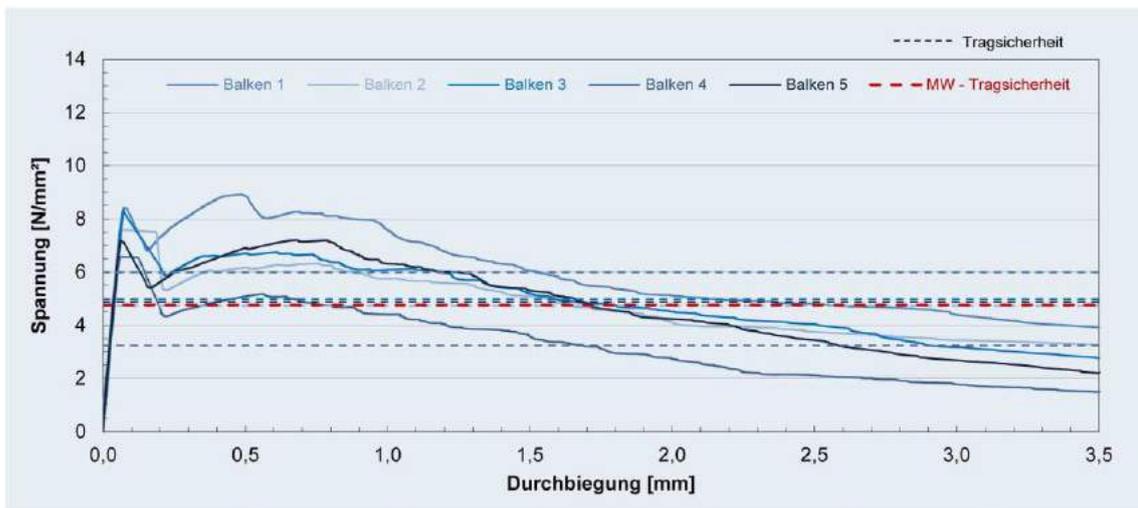
**SFM ohne Fasern**



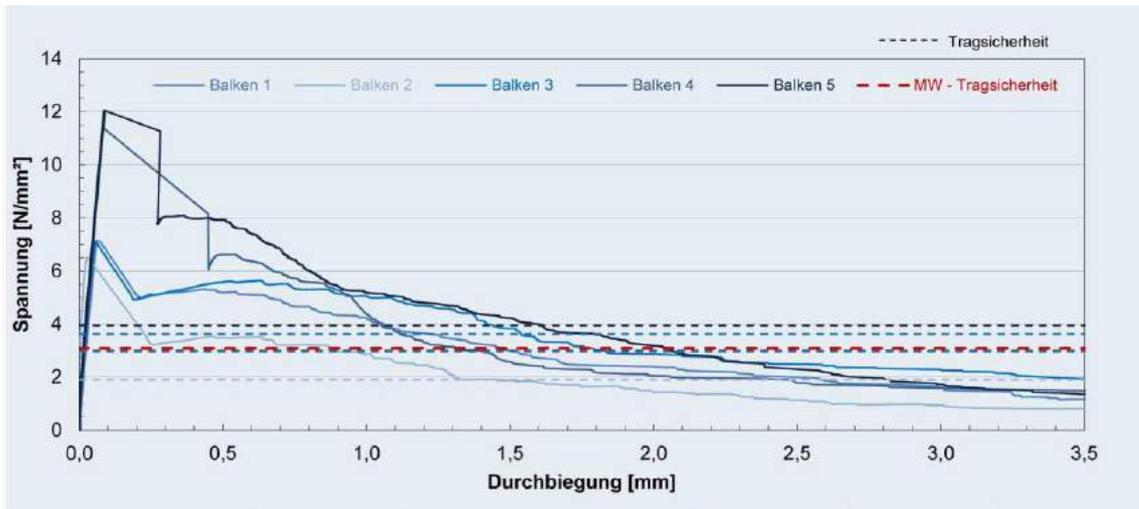
**ABM mit Fasern**



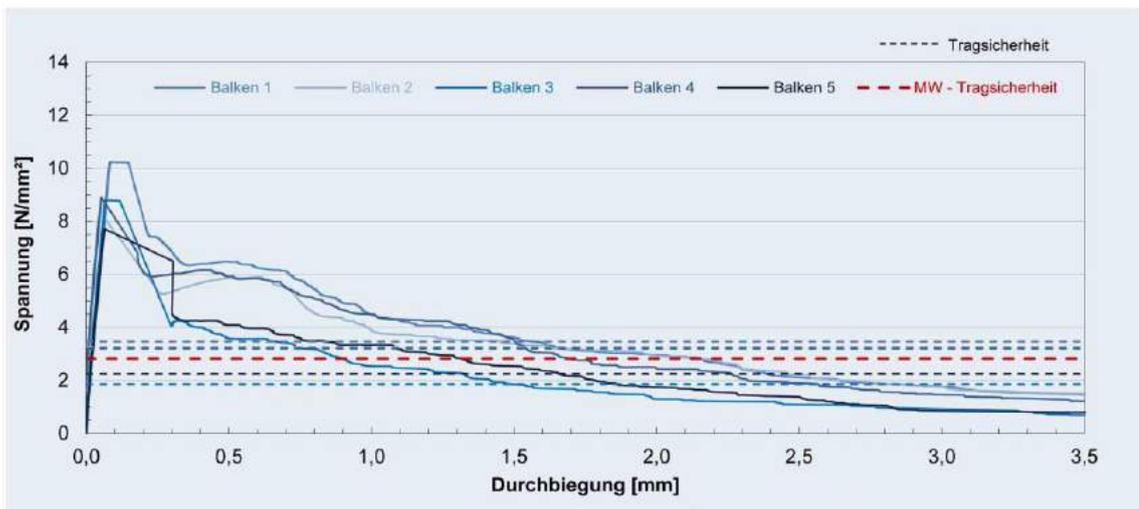
FK1	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
FK1 B1	2,45	78,83	89,39	9,81	7,97	6,23
FK1 B2	2,43			9,94	7,67	4,81
FK1 B4	2,46	86,52	82,43	9,34	7,69	6,64
FK1 B5	2,46	83,87	98,82	7,91	5,65	4,81
<b>Mittelwert</b>	<b>2,45</b>	<b>83,07</b>	<b>90,21</b>	<b>9,25</b>	<b>7,25</b>	<b>5,62</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,01	3,91	8,23	0,93	1,07	0,95
Variationskoeffizient	0,01	0,05	0,09	0,10	0,15	0,17



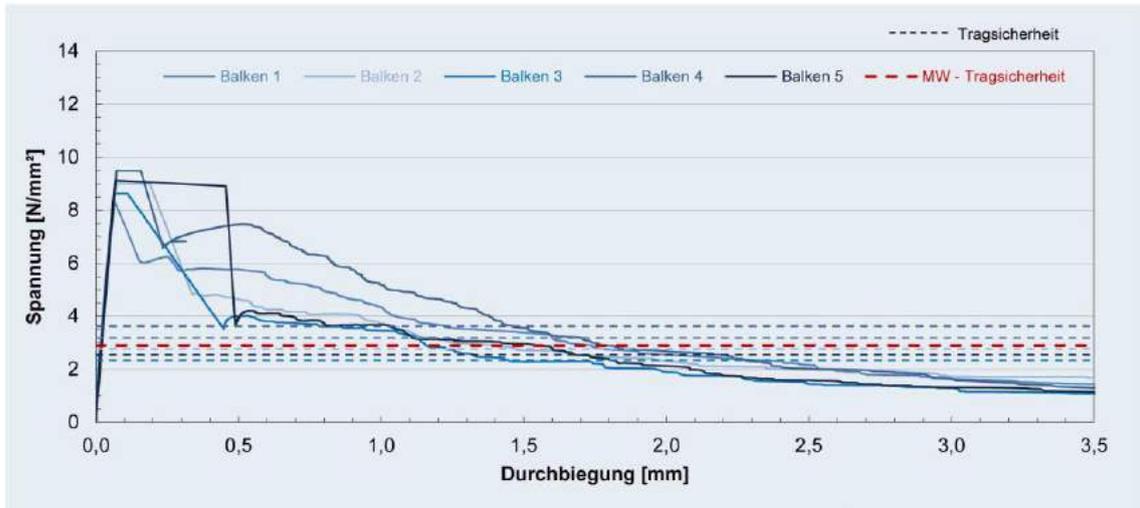
FK2	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
FK2 B1	2,46	87,27	98,65	8,56	6,92	6,07
FK2 B2	2,47	84,83	88,53	7,59	5,32	4,74
FK2 B3	2,47	84,83	88,53	8,37	5,93	5,02
FK2 B4	2,45	85,64	98,88	6,60	4,34	3,25
FK2 B5	2,44	85,64	98,88	7,09	5,33	4,81
<b>Mittelwert</b>	<b>2,46</b>	<b>85,91</b>	<b>95,35</b>	<b>7,64</b>	<b>5,57</b>	<b>4,78</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,01	1,24	5,91	0,83	0,95	1,01
Variationskoeffizient	0,01	0,01	0,06	0,11	0,17	0,21



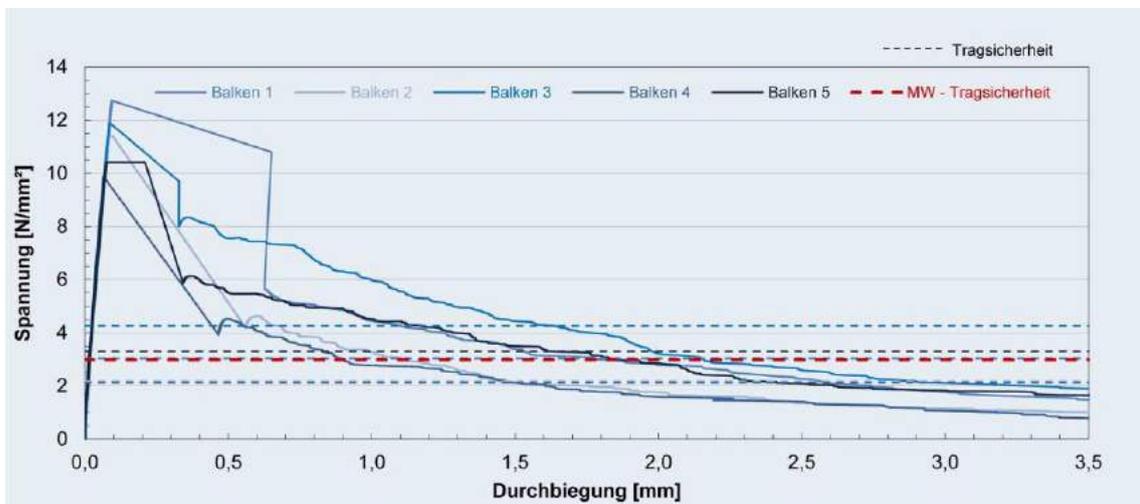
FK3	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK3 B1	2,47	75,45	99,84	7,21	5,06	2,98
FK3 B2	2,48			6,52	3,22	1,90
FK3 B3	2,48	81,65	102,47	6,82	4,71	3,47
FK3 B4	2,49			11,44	6,08	3,00
FK3 B5	2,47	82,31	88,82	12,13	7,83	3,92
<b>Mittelwert</b>	<b>2,48</b>	<b>79,80</b>	<b>97,04</b>	<b>8,82</b>	<b>5,38</b>	<b>3,05</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,01	3,78	7,24	2,73	1,71	0,75
Variationskoeffizient	0,00	0,05	0,07	0,31	0,32	0,25



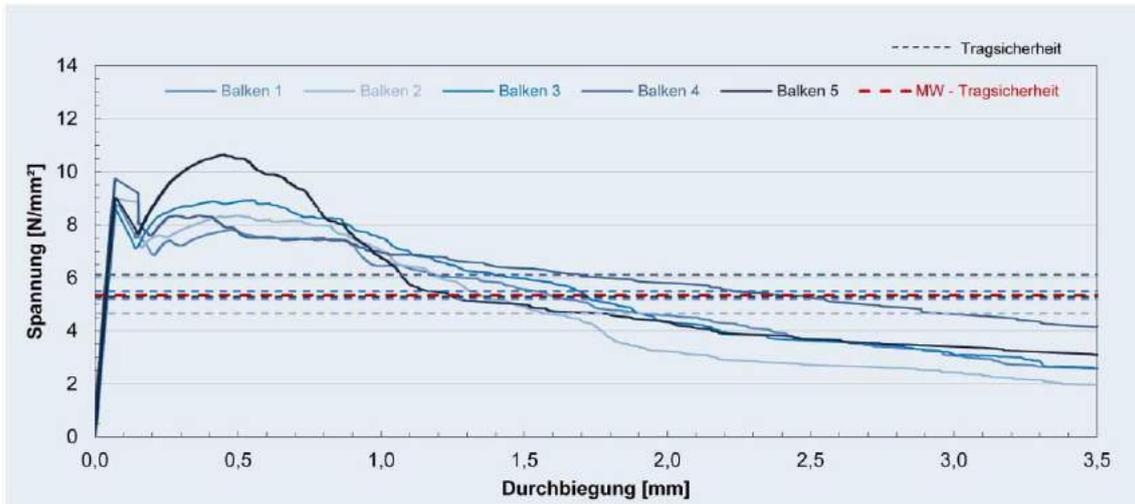
FK4	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK4 B1	2,47	85,74	92,78	10,31	6,39	3,49
FK4 B2	2,47			8,09	5,29	3,28
FK4 B3	2,46	86,04	90,72	8,75	3,56	1,85
FK4 B4	2,46			8,66	5,76	3,11
FK4 B5	2,47	84,37	97,86	7,80	4,14	2,28
<b>Mittelwert</b>	<b>2,47</b>	<b>85,38</b>	<b>93,79</b>	<b>8,72</b>	<b>5,03</b>	<b>2,80</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,01	0,89	3,67	0,97	1,16	0,70
Variationskoeffizient	0,00	0,01	0,04	0,11	0,23	0,25



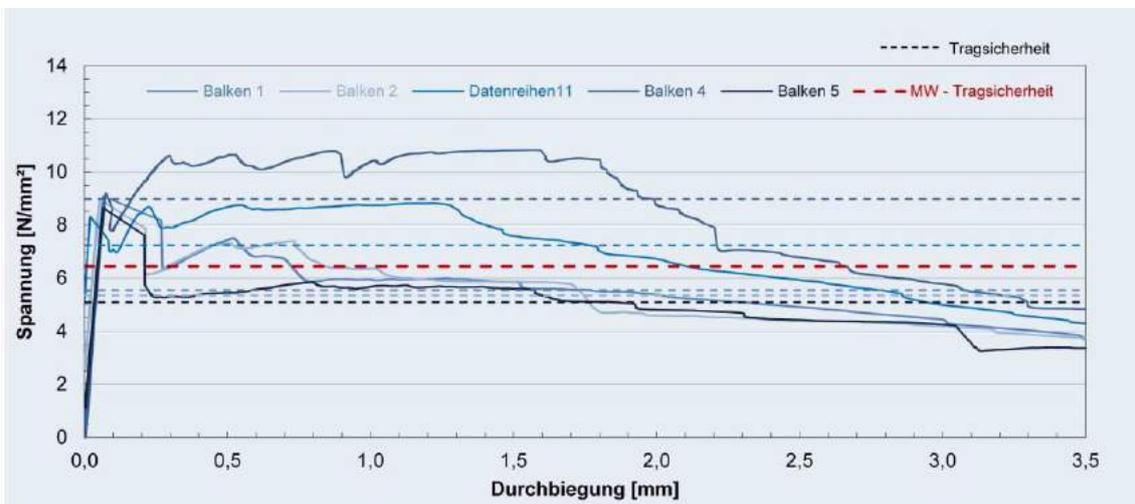
FK5	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
		[g/cm³]	[N/mm²]			
FK5 B1	2,49	80,78	100,08	8,04	5,48	3,04
FK5 B2	2,46			8,93	4,60	2,74
FK5 B3	2,46	76,66	91,61	8,76	3,57	2,37
FK5 B4	2,49	83,52	88,25	9,36	6,48	3,57
FK5 B5	2,47			8,83	3,51	2,46
<b>Mittelwert</b>	<b>2,47</b>	<b>80,32</b>	<b>93,31</b>	<b>8,78</b>	<b>4,73</b>	<b>2,84</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,02	3,45	6,10	0,48	1,27	0,49
Variationskoeffizient	0,01	0,04	0,07	0,05	0,27	0,17



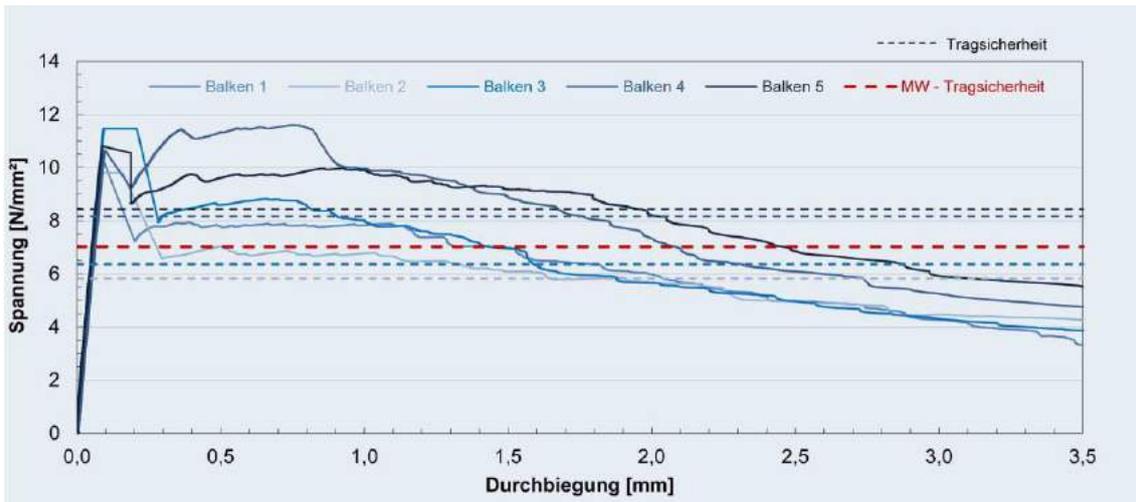
FK6	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
		[g/cm³]	[N/mm²]			
FK6 B1	2,46	85,15	109,52	12,76	5,67	3,15
FK6 B2	2,48			11,06	4,04	2,14
FK6 B3	2,47	67,59	104,48	11,87	7,53	4,24
FK6 B4	2,46	61,29	107,31	9,72	3,85	2,09
FK6 B5	2,44			10,00	5,28	3,18
<b>Mittelwert</b>	<b>2,46</b>	<b>71,34</b>	<b>107,10</b>	<b>11,08</b>	<b>5,27</b>	<b>2,96</b>
Standardabweichung $\sigma$	0,01	12,36	2,53	1,27	1,48	0,89
Variationskoeffizient	0,01	0,17	0,02	0,11	0,28	0,30



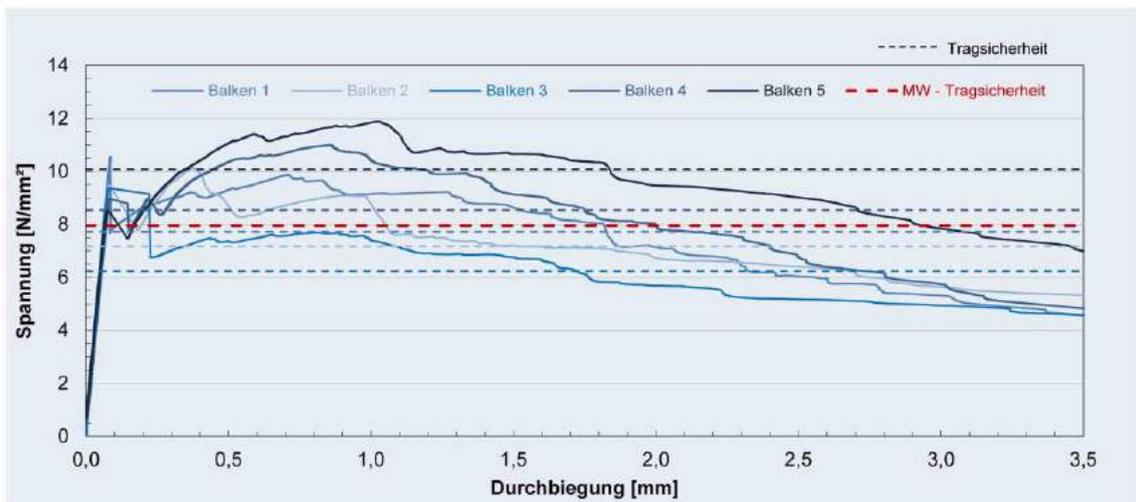
FK7	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK7 B1	2,48	82,54	106,06	8,70	6,82	5,16
FK7 B2	2,51			8,80	7,00	4,56
FK7 B3	2,51	83,86	105,04	8,53	7,00	5,40
FK7 B4	2,52	87,14	104,50	9,61	7,49	6,03
FK7 B5	2,49			8,67	7,38	5,08
<b>Mittelwert</b>	<b>2,50</b>	<b>84,51</b>	<b>105,20</b>	<b>8,86</b>	<b>7,14</b>	<b>5,25</b>
<b>Standardabweichung <math>\sigma</math></b>	0,02	2,37	0,79	0,43	0,28	0,53
<b>Variationskoeffizient</b>	0,01	0,03	0,01	0,05	0,04	0,10



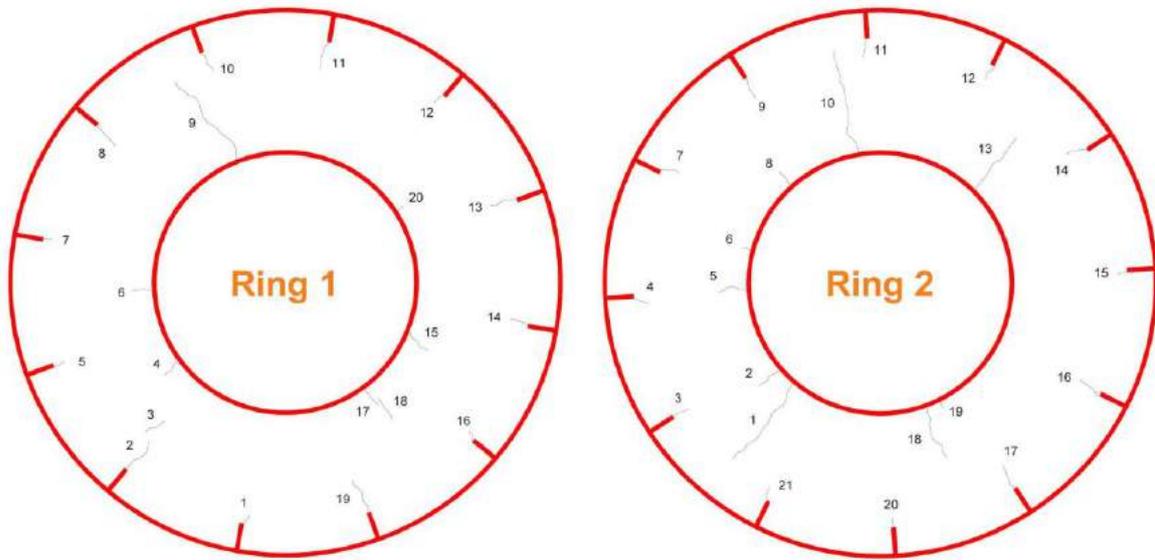
FK8	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK8 B1	2,50	85,07	104,05	9,08	6,29	5,53
FK8 B2	2,49			8,98	6,15	5,39
FK8 B3	2,49	86,31	105,63	8,29	6,94	7,20
FK8 B4	2,52	84,58	103,52	9,22	7,81	9,02
FK8 B5	2,50			8,63	5,26	5,09
<b>Mittelwert</b>	<b>2,50</b>	<b>85,32</b>	<b>104,40</b>	<b>8,84</b>	<b>6,49</b>	<b>6,45</b>
<b>Standardabweichung <math>\sigma</math></b>	0,01	0,89	1,10	0,38	0,95	1,66
<b>Variationskoeffizient</b>	0,00	0,01	0,01	0,04	0,15	0,26



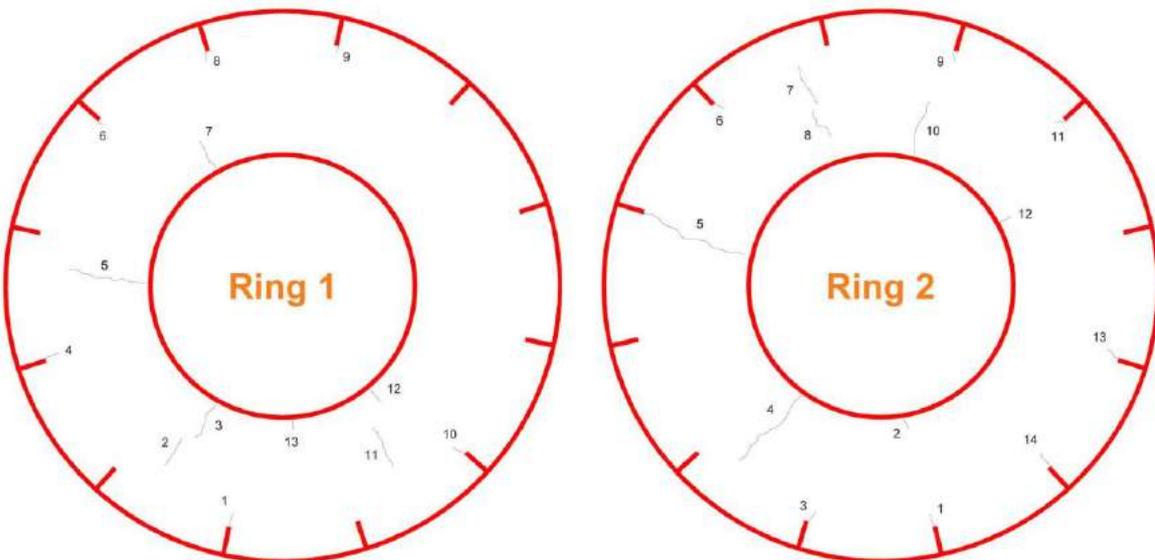
FK9	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK9 B1	2,44	75,20	91,01	9,98	7,00	6,14
FK9 B2	2,43	75,20	91,01	9,69	6,50	5,75
FK9 B3	2,44	76,49	89,86	11,35	7,86	6,34
FK9 B4	2,46	68,12	96,99	10,70	9,29	8,24
FK9 B5	2,43	68,12	96,99	10,69	8,55	8,34
<b>Mittelwert</b>	<b>2,44</b>	<b>73,27</b>	<b>92,62</b>	<b>10,48</b>	<b>7,84</b>	<b>6,96</b>
<b>Standardabweichung <math>\sigma</math></b>	0,01	4,51	3,83	0,66	1,13	1,23
<b>Variationskoeffizient</b>	0,01	0,06	0,04	0,06	0,14	0,18



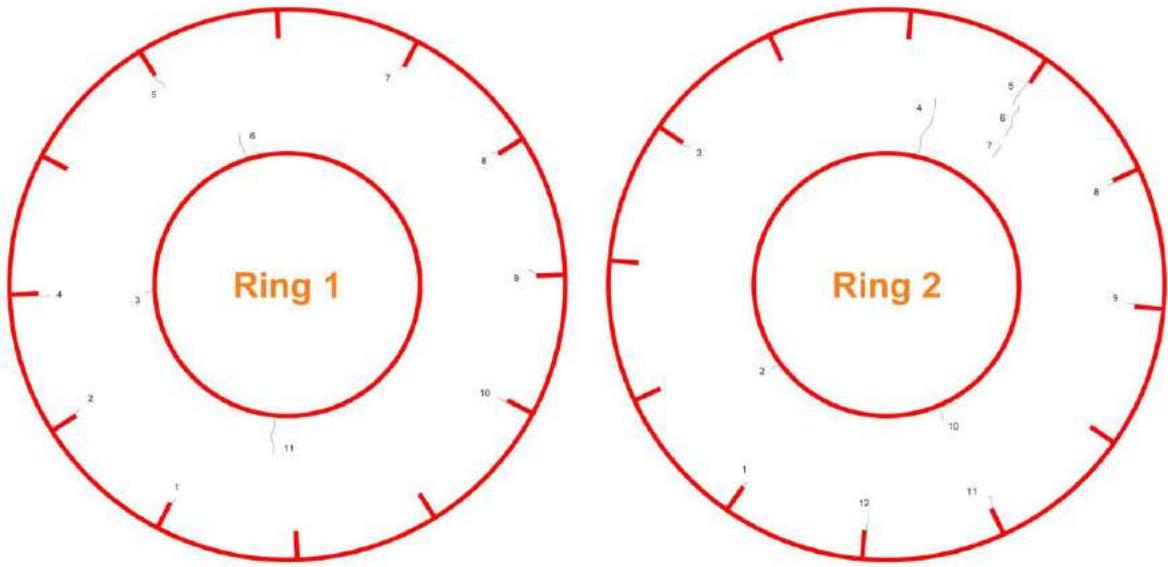
FK10	Festbeton- rohdichte	Würfel-Druckfestigkeit		Biegezug- festigkeit	Gebrauchs- tauglichkeit	Trag- sicherheit
		7d	28d			
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
FK10 B1	2,50	---	95,20	10,68	7,77	7,81
FK10 B2	2,47	---	95,20	9,53	7,81	7,22
FK10 B3	2,45	---	90,04	9,34	6,73	6,20
FK10 B4	2,45	---	94,27	8,95	7,78	8,53
FK10 B5	2,45	---	94,27	8,61	7,54	10,16
<b>Mittelwert</b>	<b>2,46</b>	<b>---</b>	<b>93,17</b>	<b>9,42</b>	<b>7,53</b>	<b>7,98</b>
<b>Standardabweichung <math>\sigma</math></b>	0,02	---	2,75	0,79	0,46	1,49
<b>Variationskoeffizient</b>	0,01	---	0,03	0,08	0,06	0,19



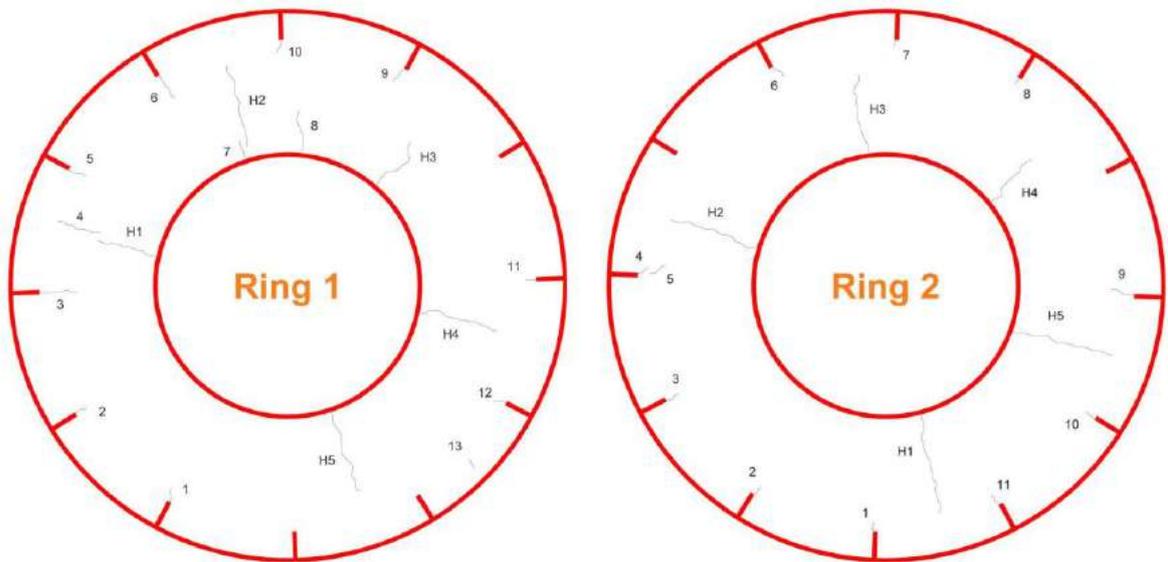
<b>S0</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	735	-	20	554	144	0,5
Ring2			21	752	191	0,5
<b>Σ Summe</b>			<b>41</b>	<b>1306</b>	<b>335</b>	



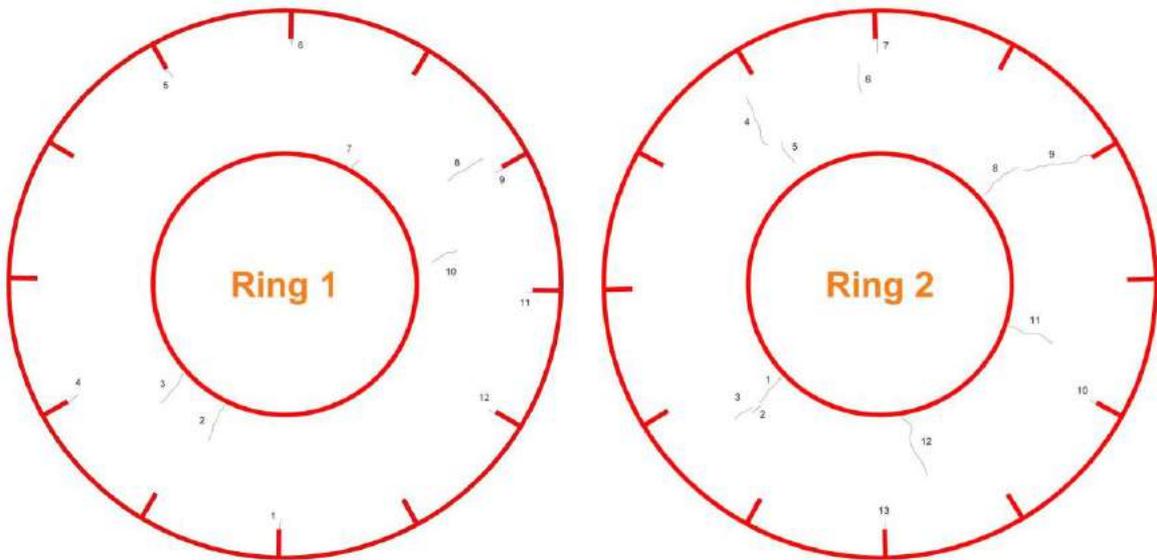
<b>S1</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	743	675	13	362	57	0,3
Ring2			14	517	71	0,3
<b>Σ Summe</b>			<b>27</b>	<b>879</b>	<b>129</b>	



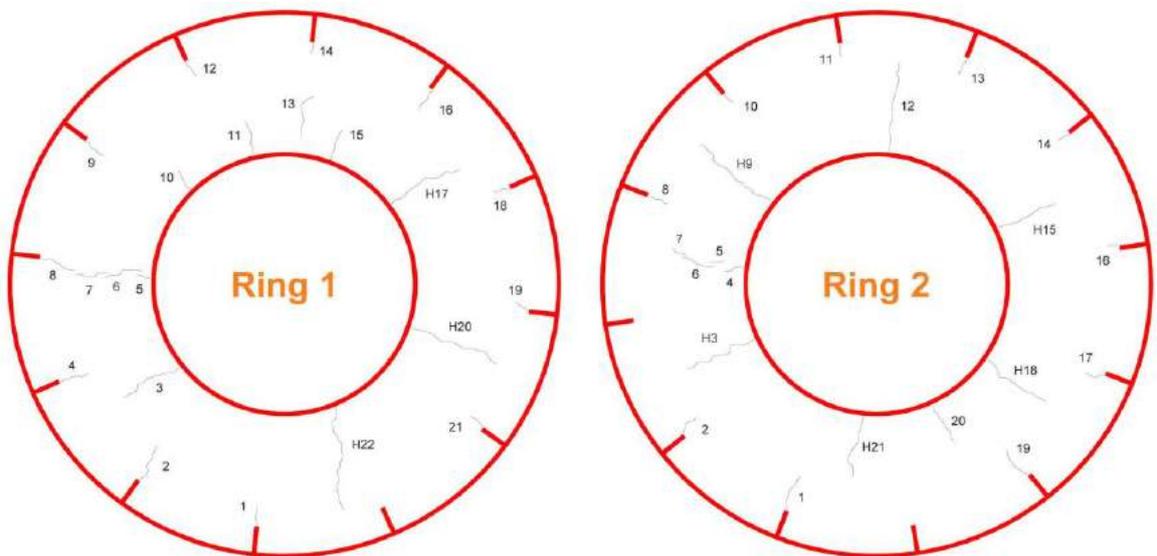
<b>S2</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	730	643	11	150	13	0,15
Ring2			12	235	26	0,2
<b>Σ Summe</b>			<b>23</b>	<b>385</b>	<b>39</b>	



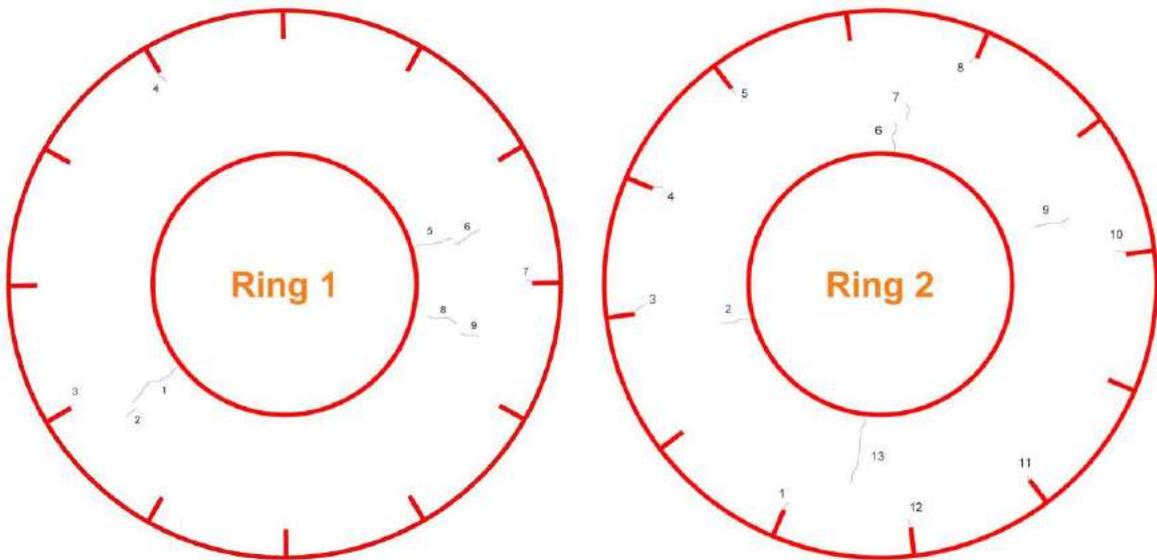
<b>S3</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	725	640	18	724	128	0,3
Ring2			16	639	182	0,5
<b>Σ Summe</b>			<b>34</b>	<b>1363</b>	<b>310</b>	



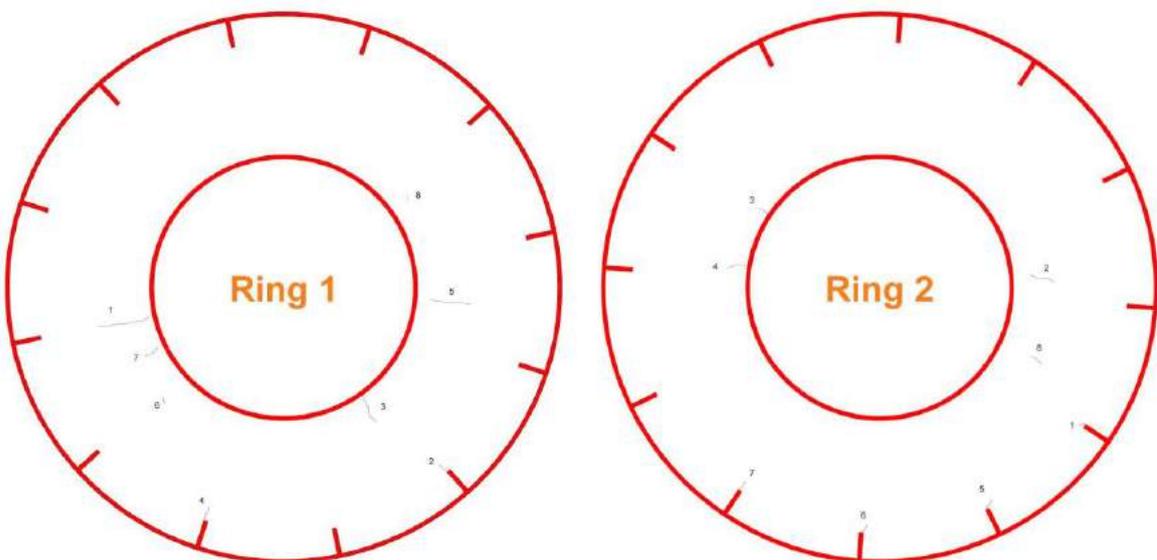
<b>S4</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	690	560	12	247	24	0,2
Ring2			13	486	57	0,2
<b>Σ Summe</b>			<b>25</b>	<b>733</b>	<b>81</b>	



<b>S5</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	Σ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	743	735	22	897	101	0,2
Ring2			21	872	118	0,3
<b>Σ Summe</b>			<b>43</b>	<b>1769</b>	<b>219</b>	

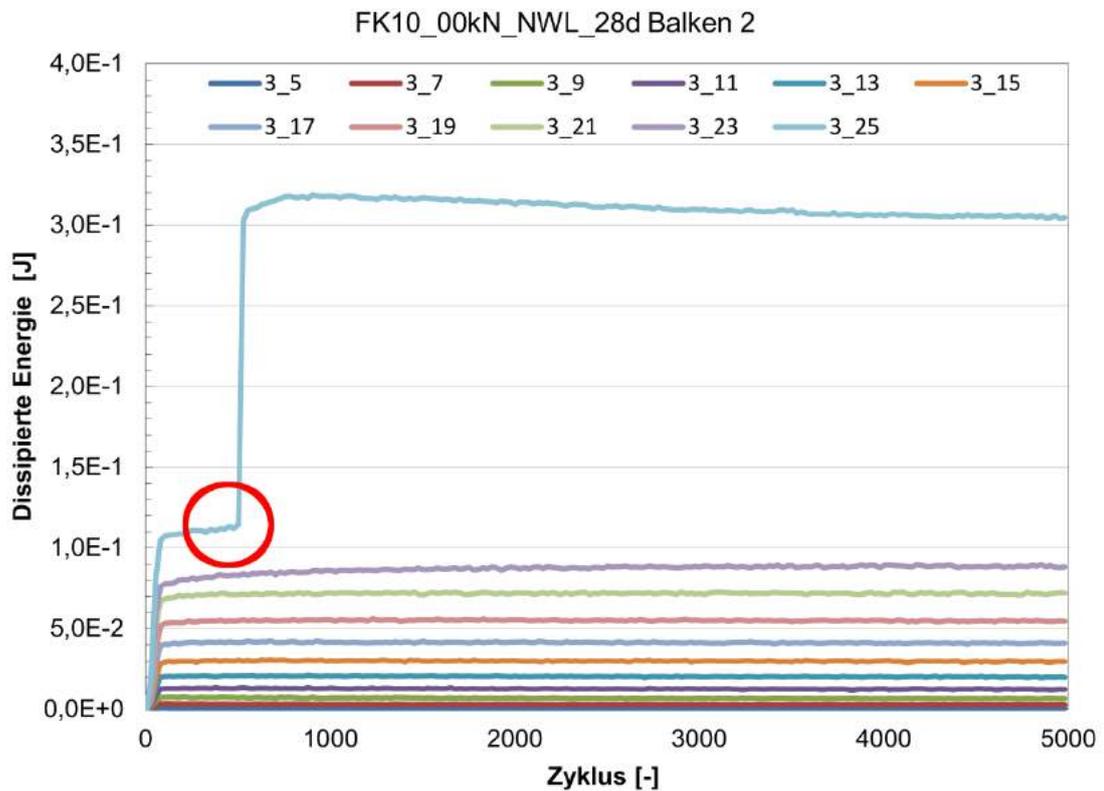
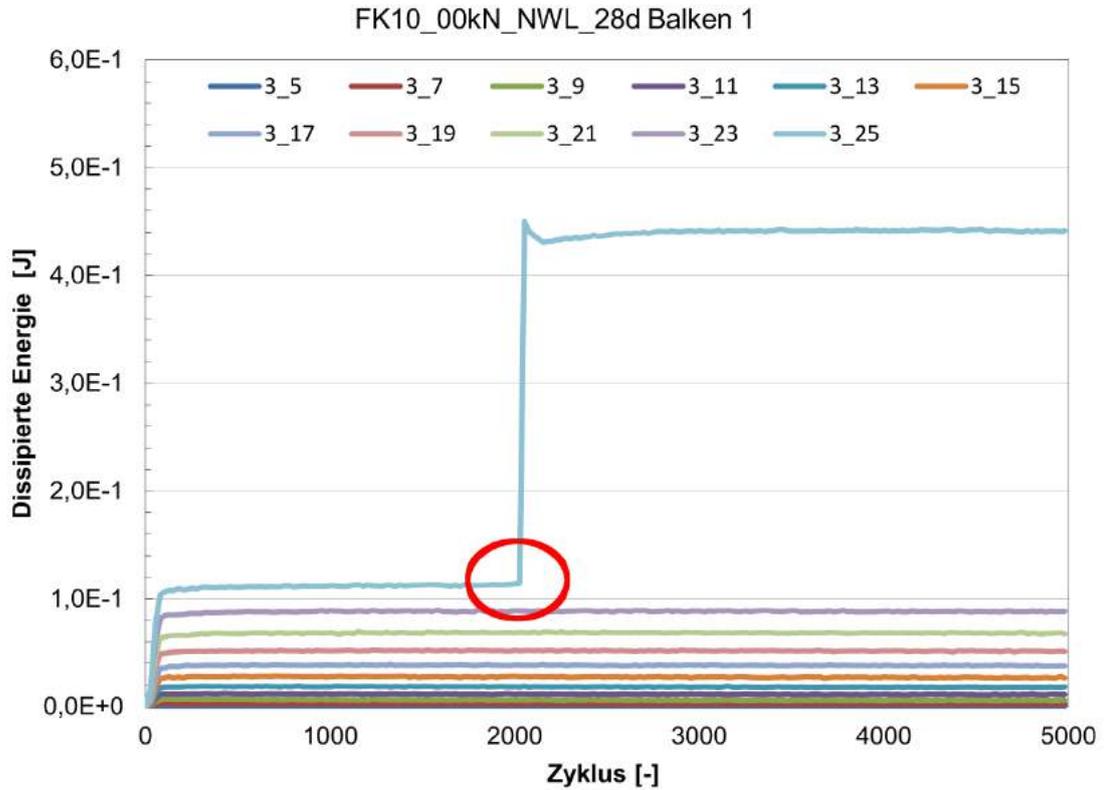


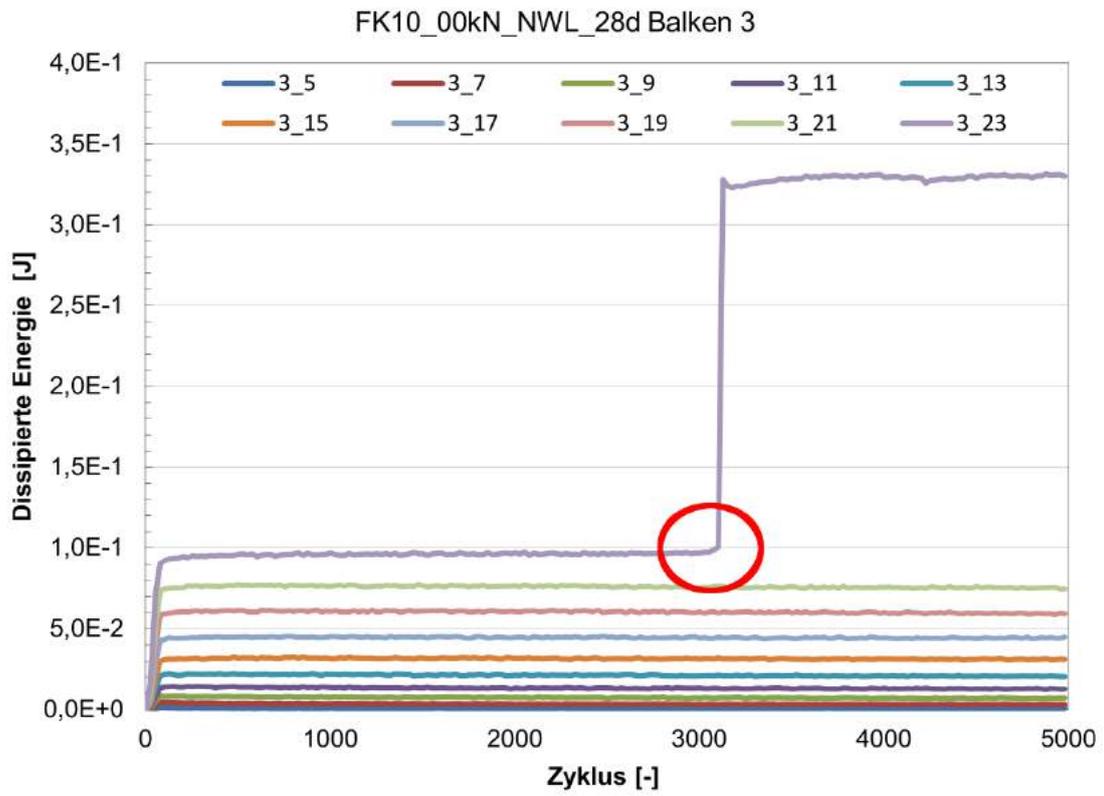
<b>S6</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	$\Sigma$ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	770	625	9	246	27	0,2
Ring2			13	279	21	0,1
$\Sigma$ Summe			<b>22</b>	<b>525</b>	<b>48</b>	



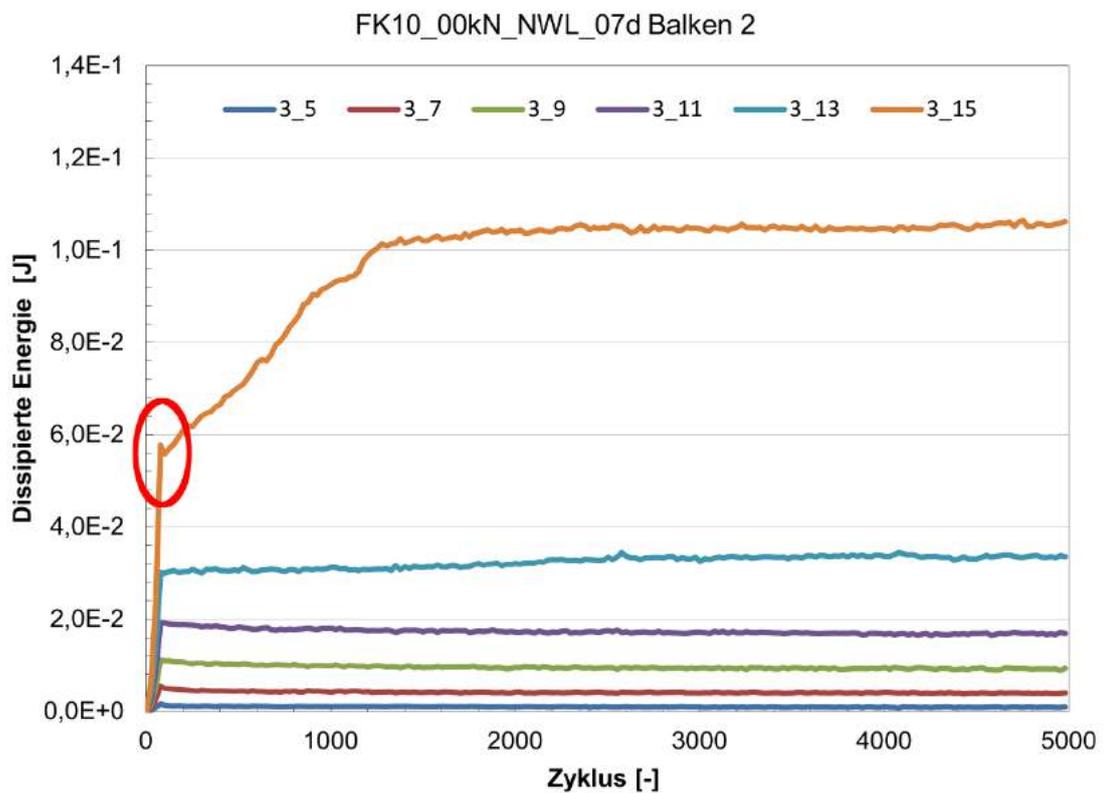
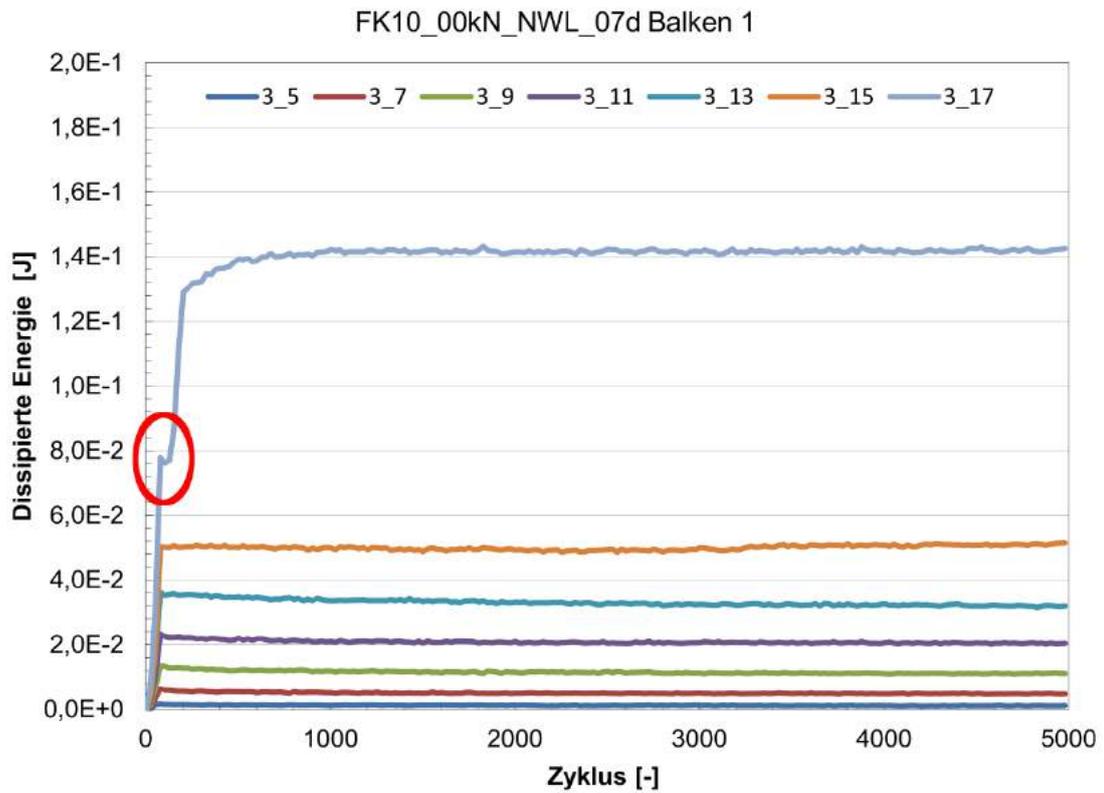
<b>S7</b>	Setzfließmaß	Ausbreitmaß	Anzahl Risse	$\Sigma$ Risslängen	Rissfläche	max. Rissbreite
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]
Ring1	740	515	8	187	20	0,3
Ring2			8	120	10	0,1
$\Sigma$ Summe			<b>16</b>	<b>307</b>	<b>30</b>	

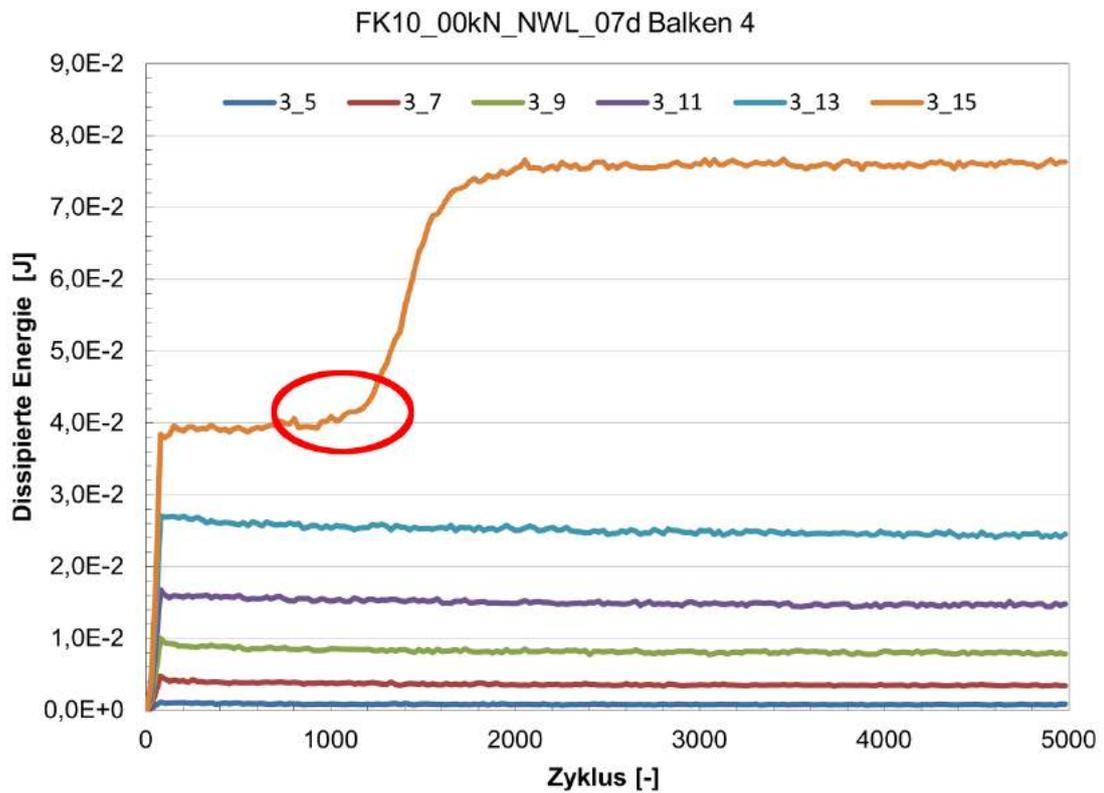
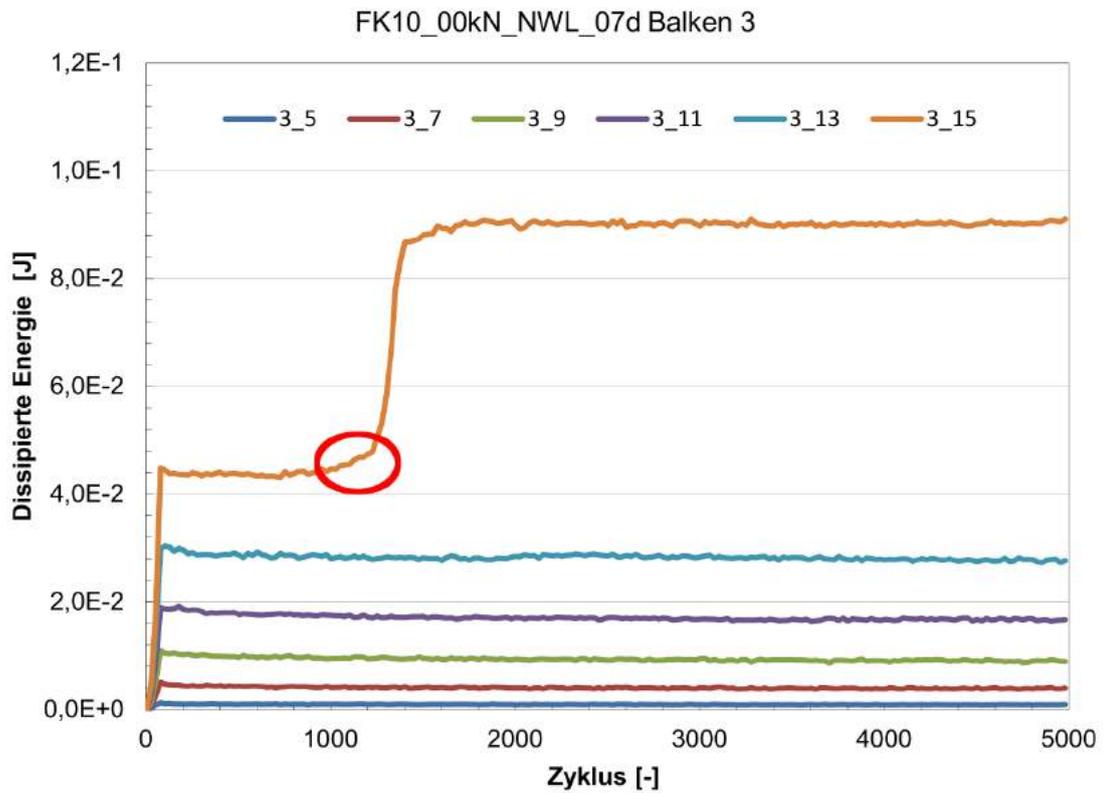
Serie **DYN1** / FK10\_00kN-NWL-28d / 3 Balken

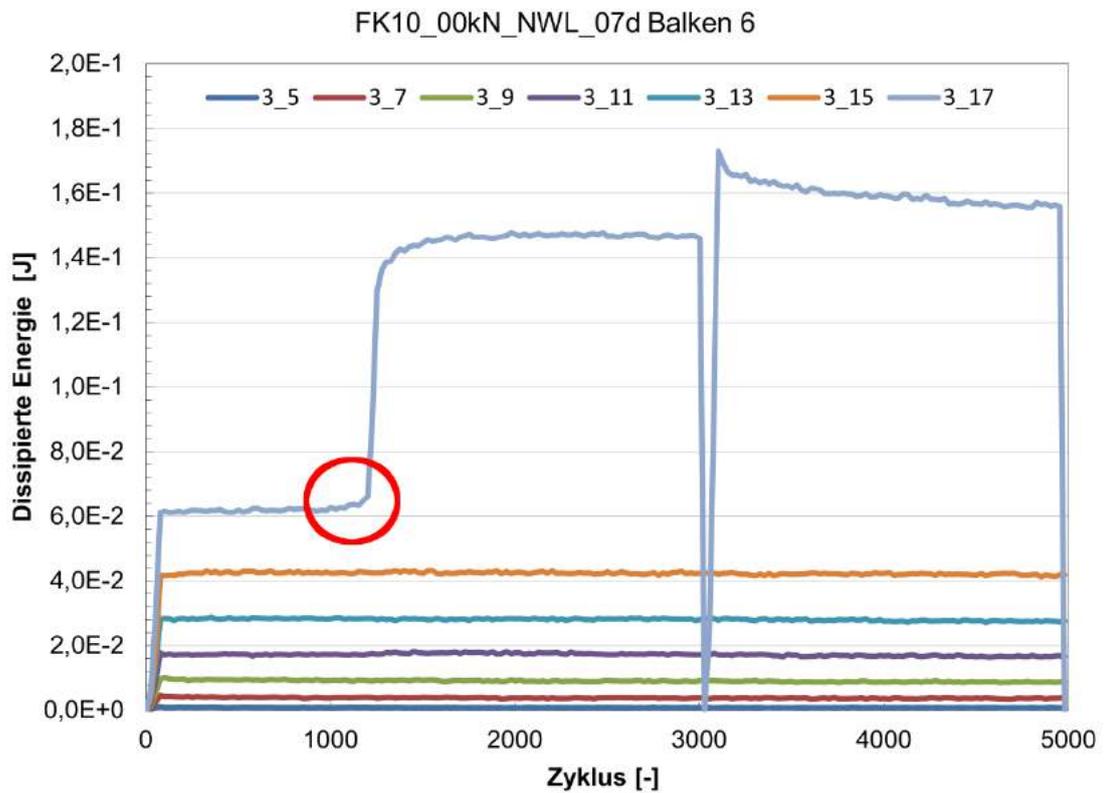
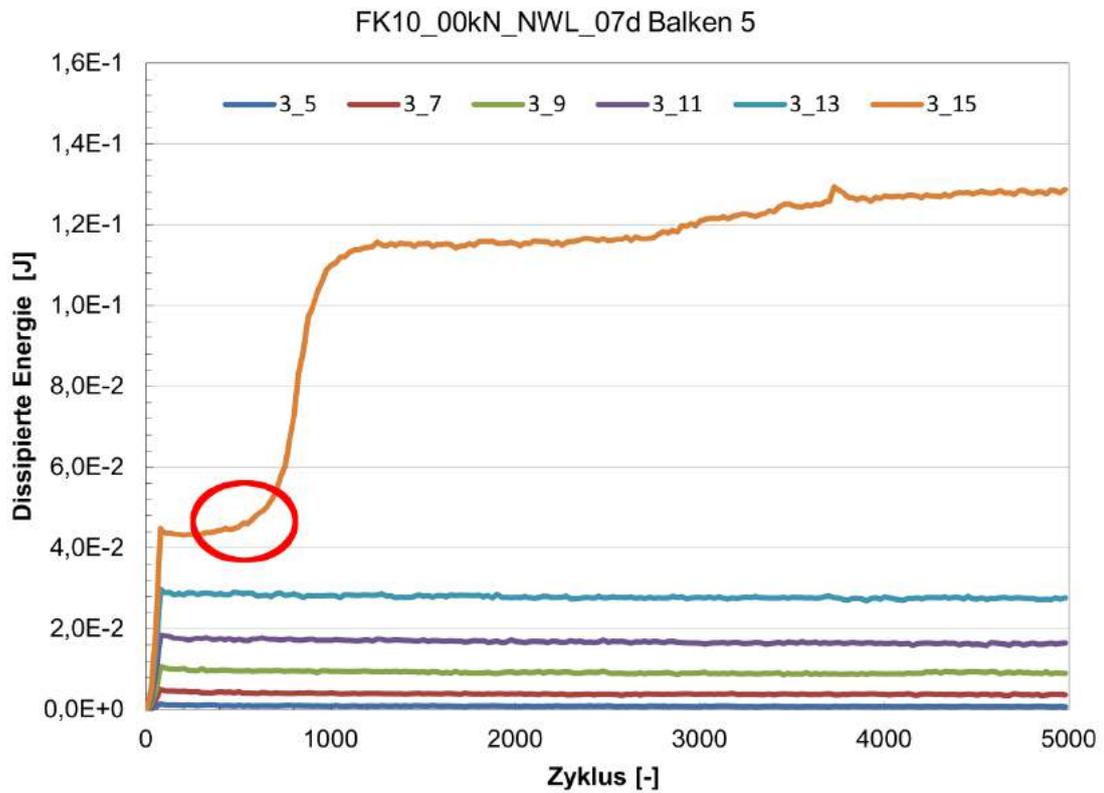


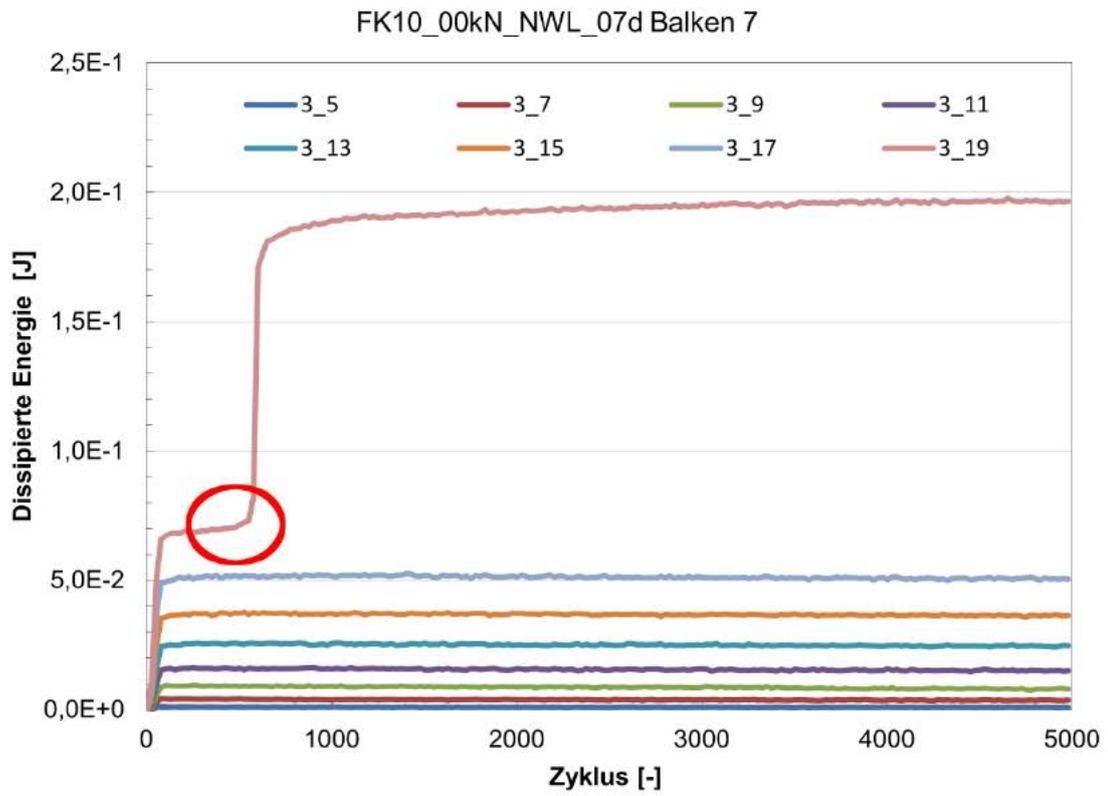


**Serie DYN2 / FK10\_00kN-NWL-7d / 7 Balken**

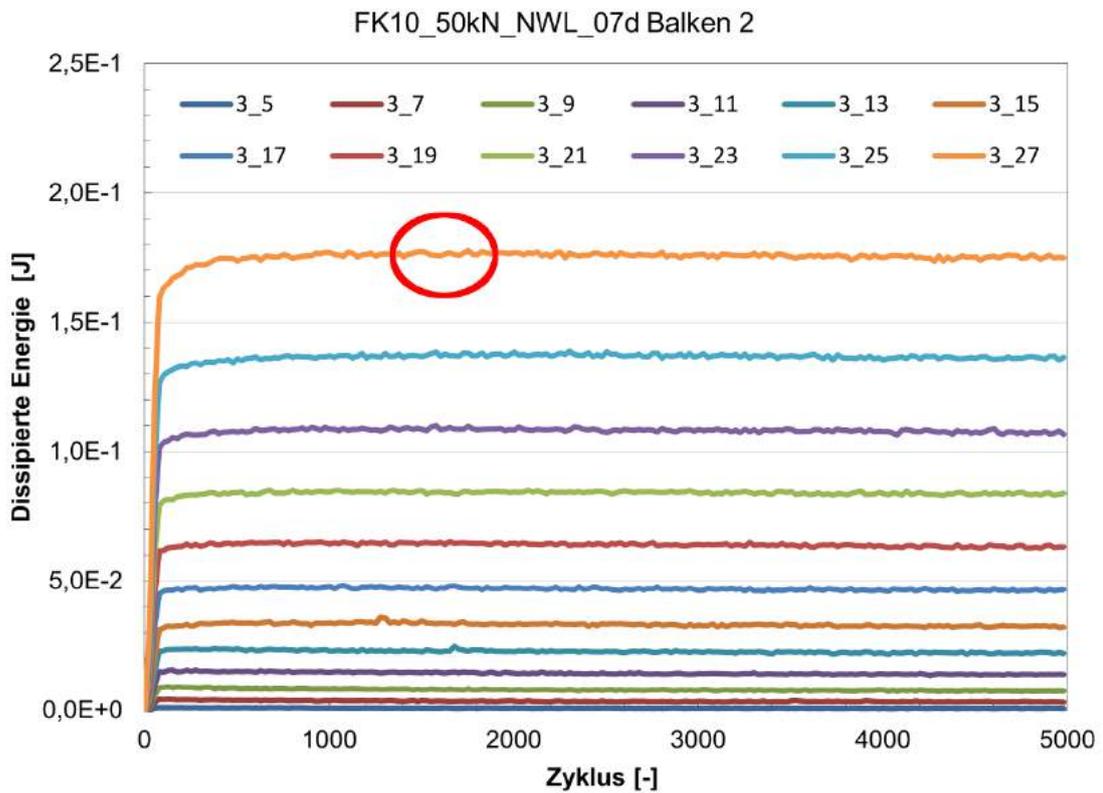
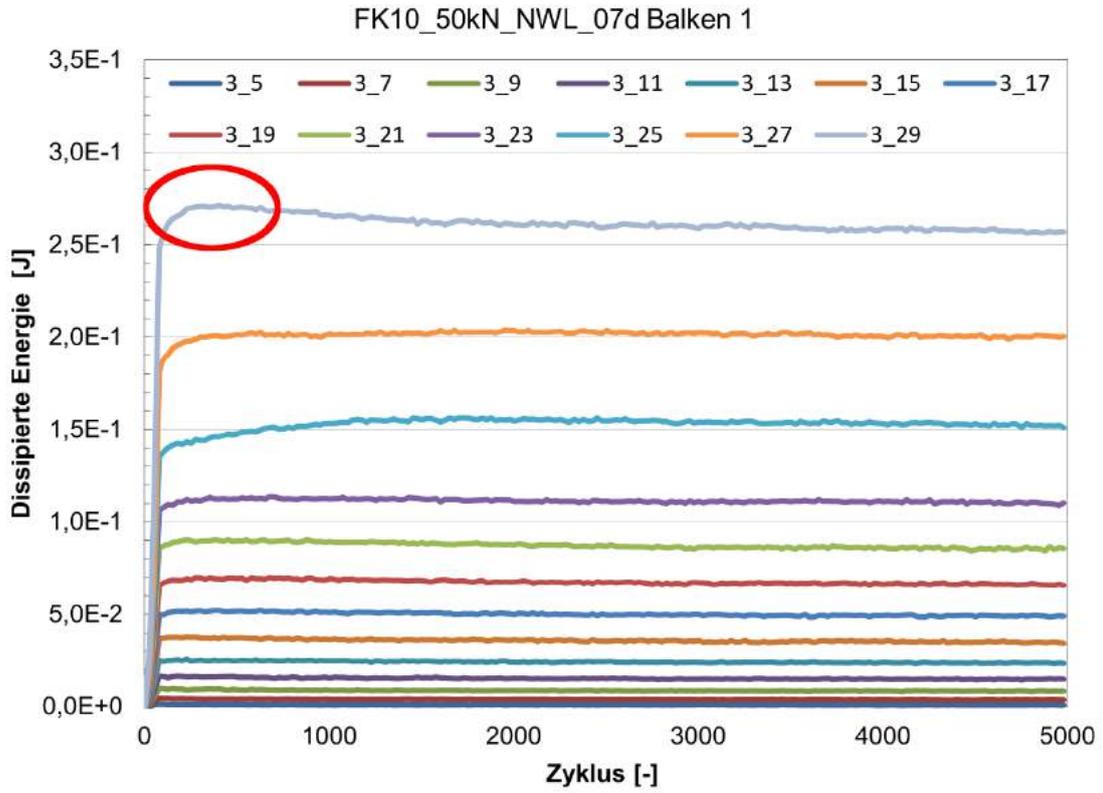


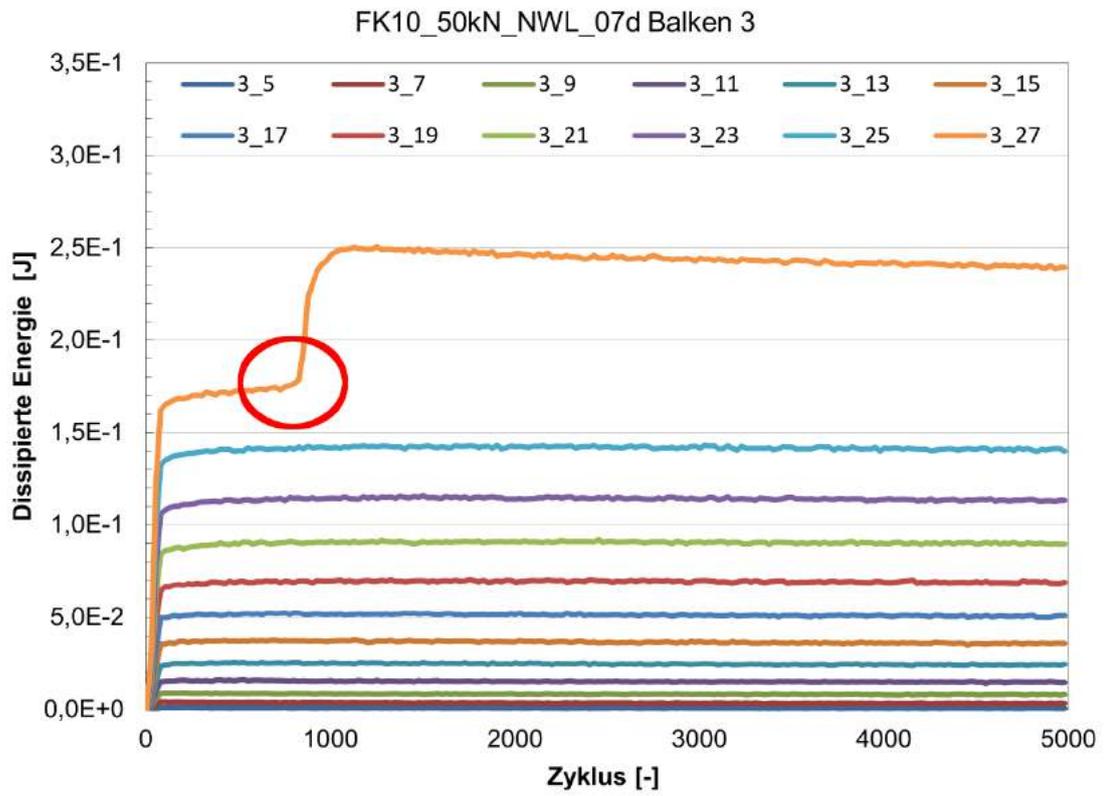




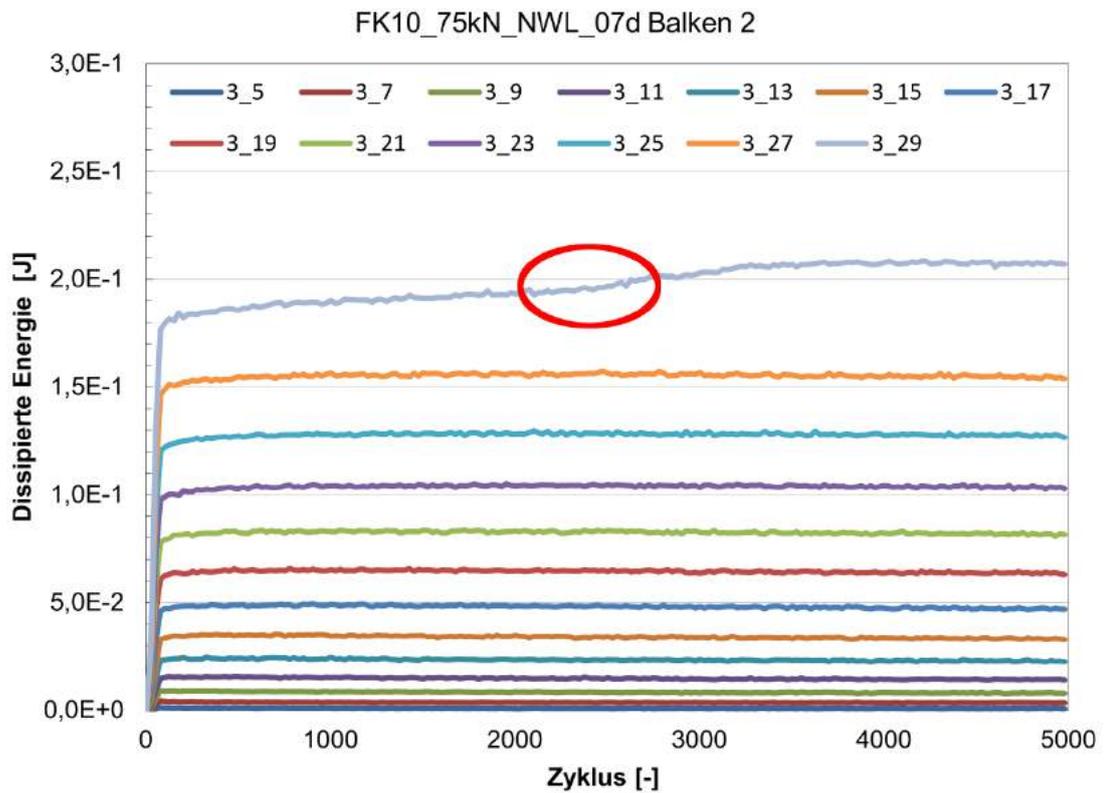
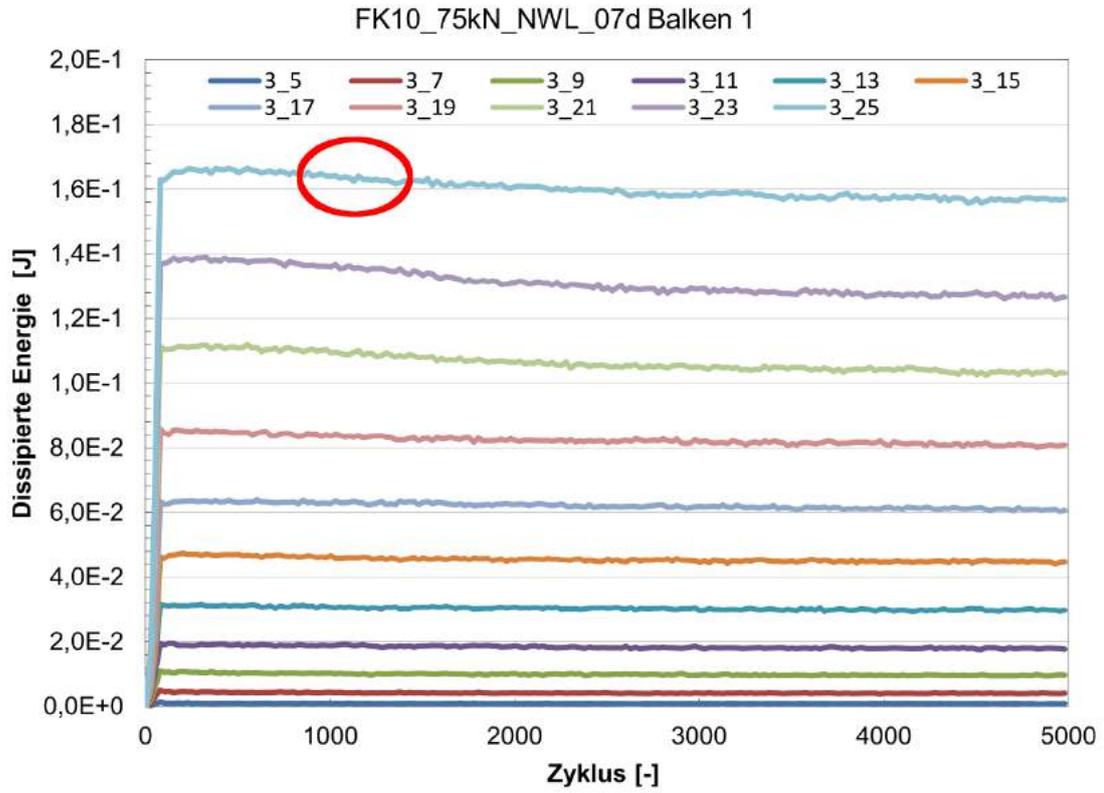


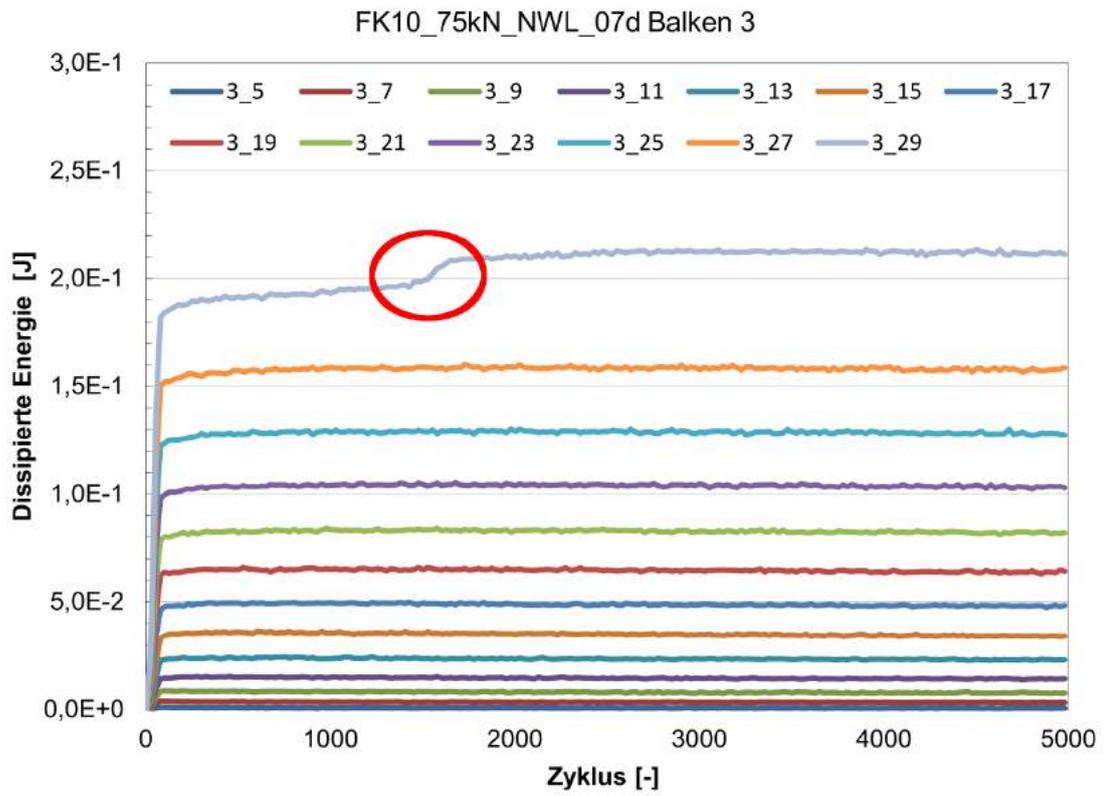
**Serie DYN3 / FK10\_50kN-NWL-7d / 3 Balken**



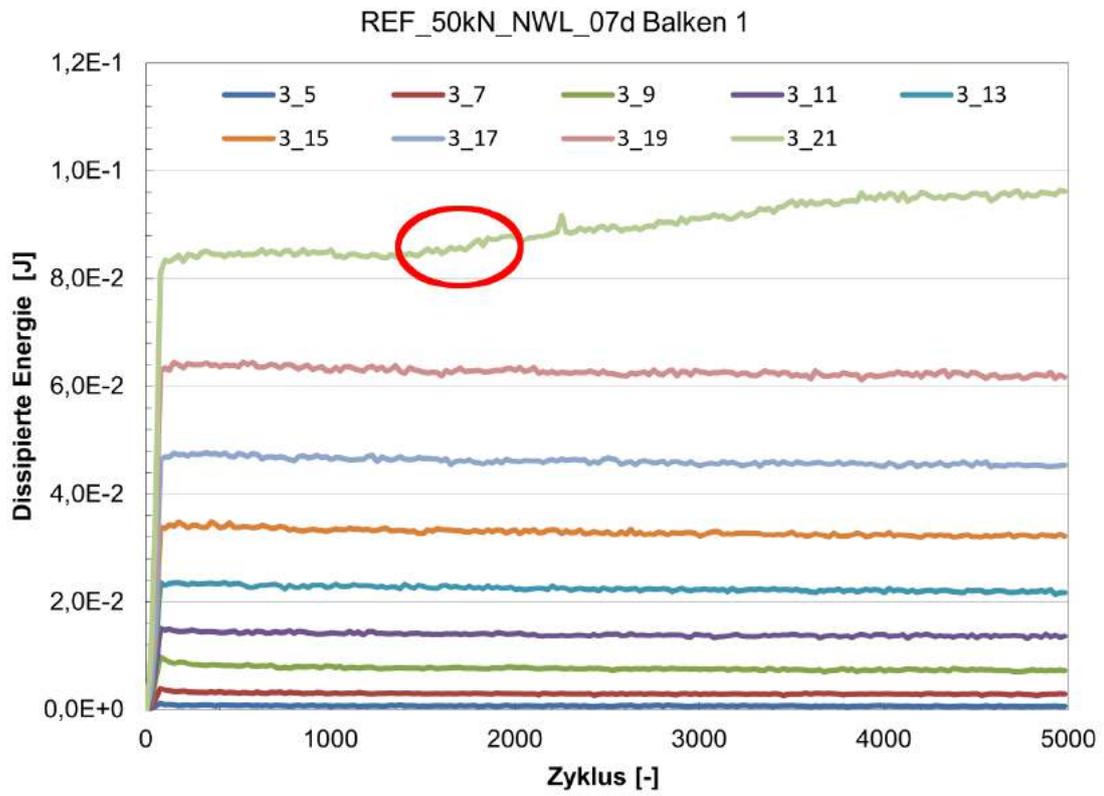


Serie DYN4 / FK10\_75kN-NWL-7d / 3 Balken

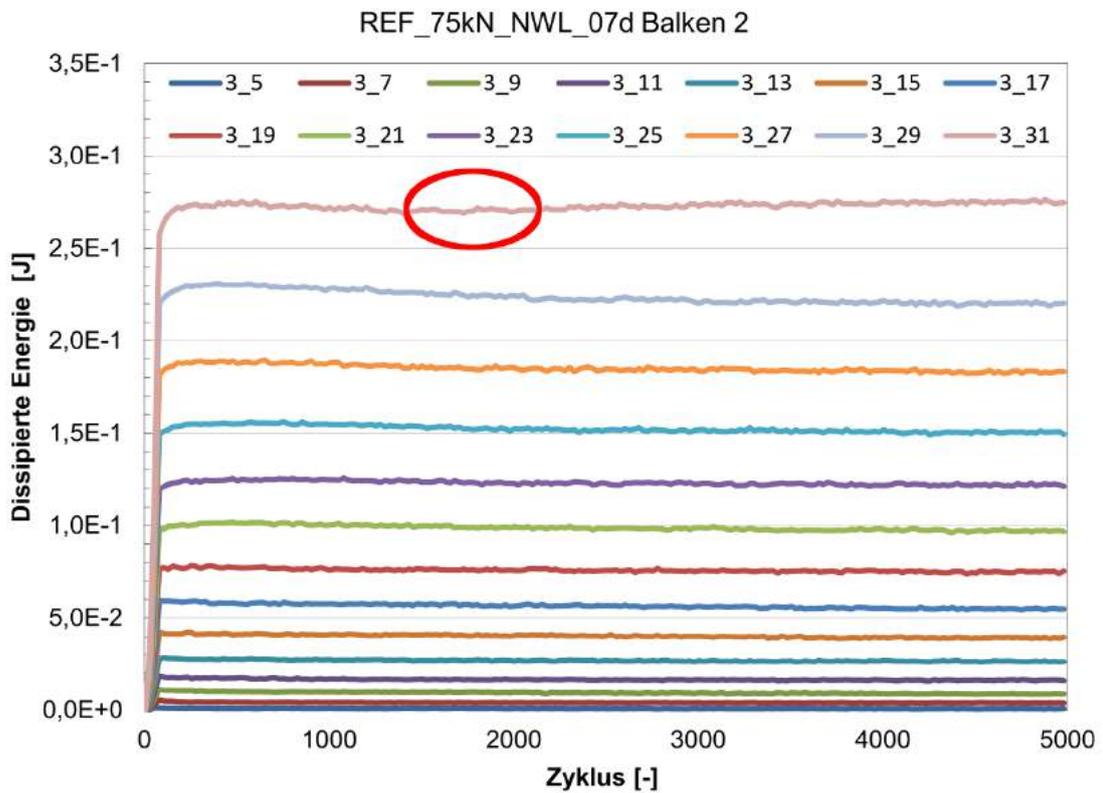
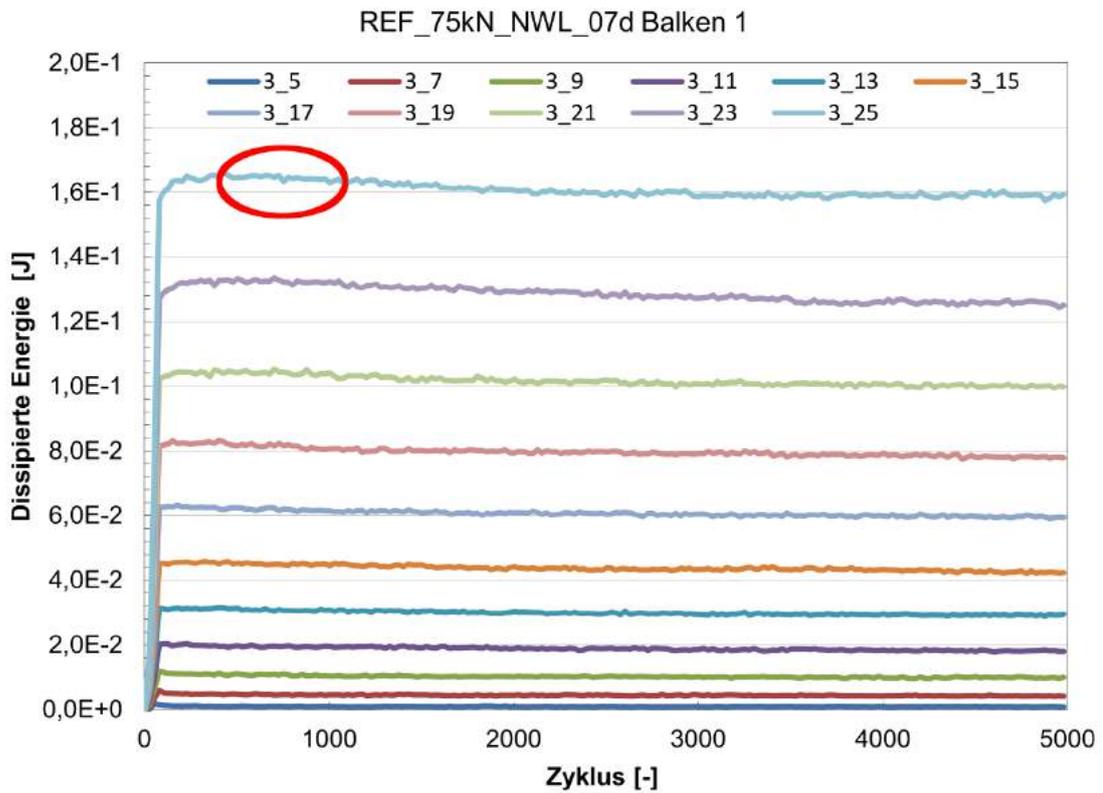




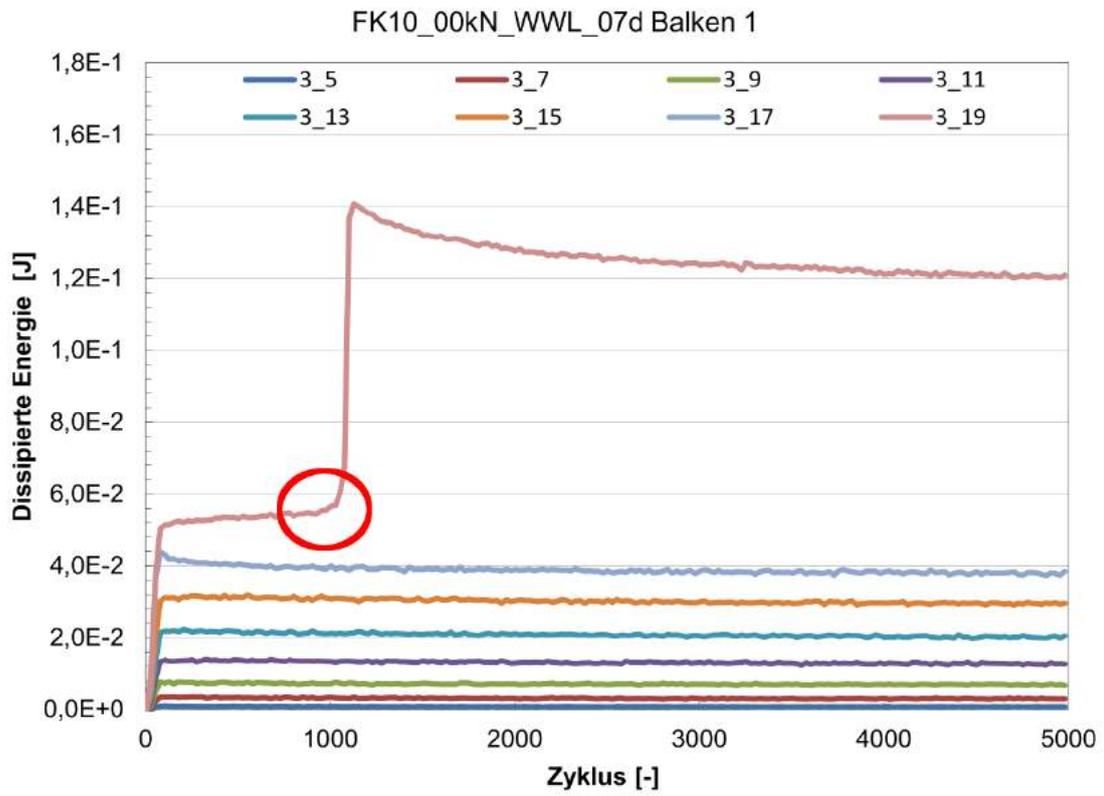
Serie DYN5 / REF\_50kN-NWL-7d / 1 Balken



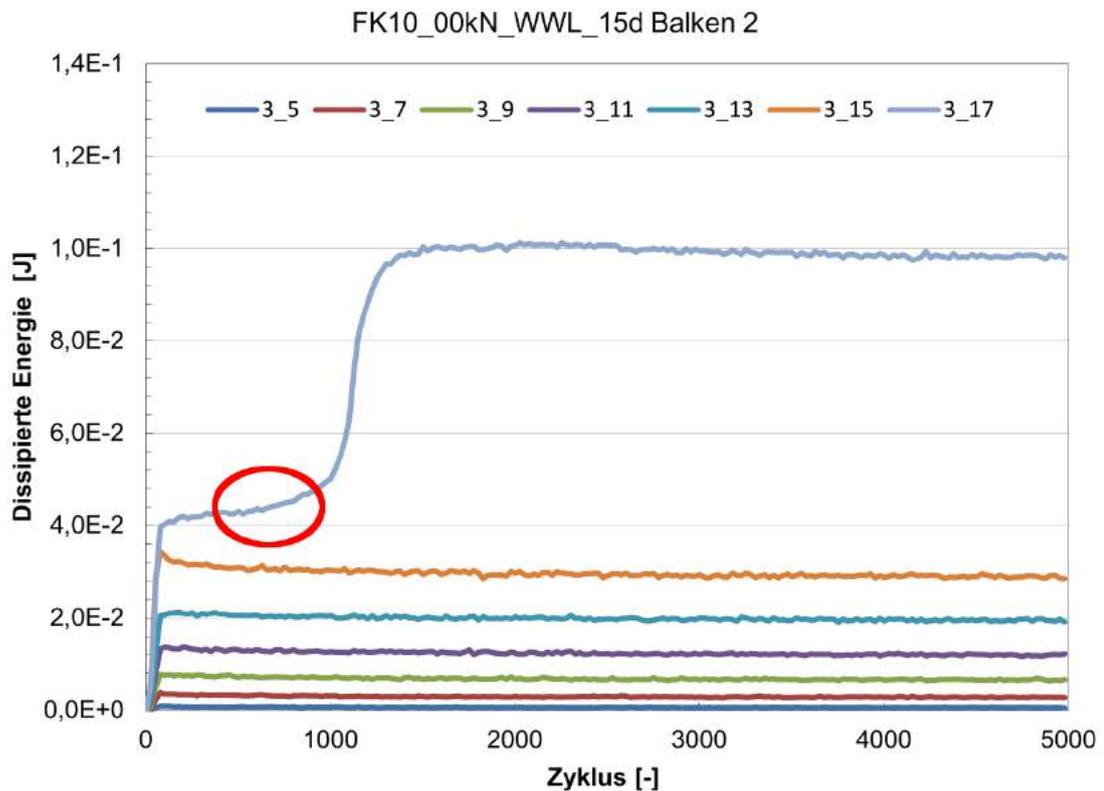
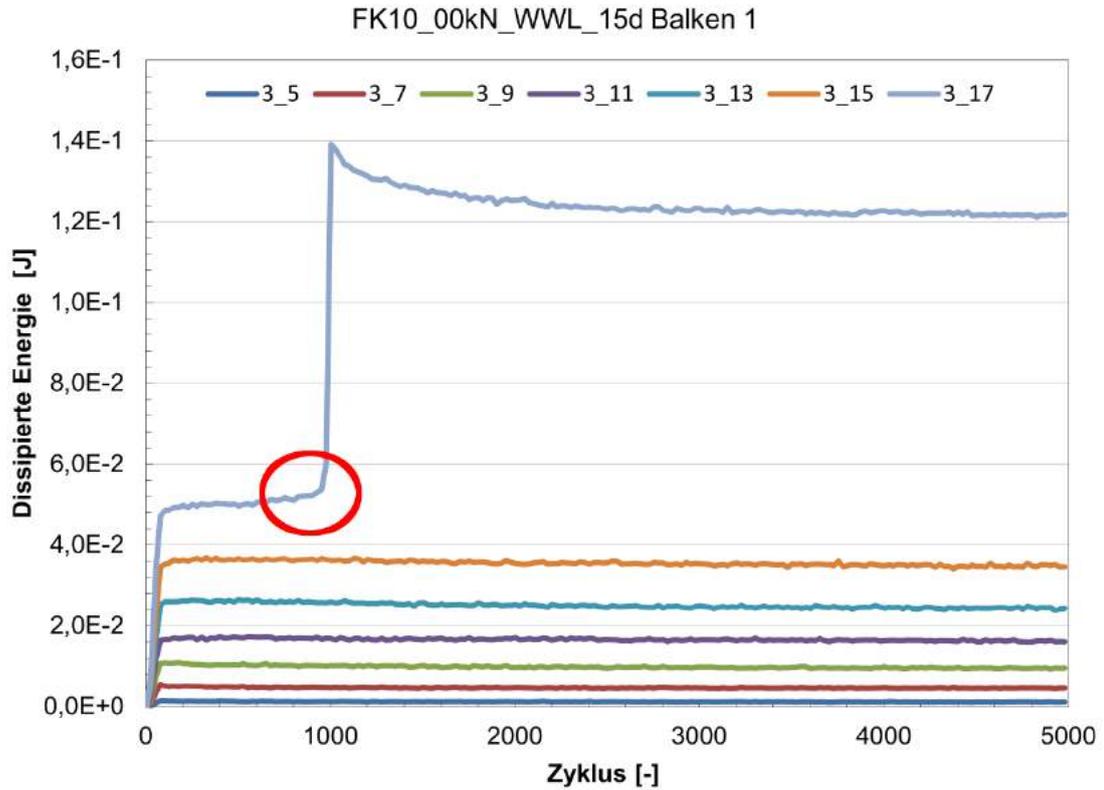
Serie DYN6 / REF\_75kN-NWL-7d / 2 Balken

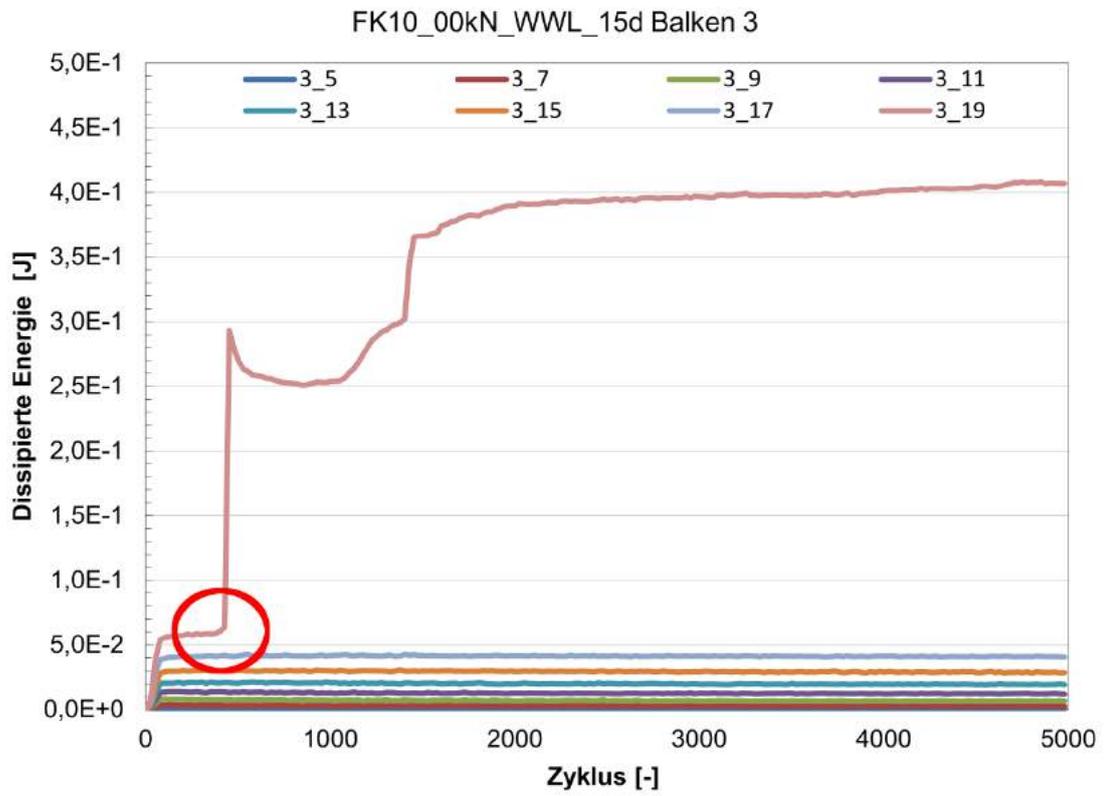


Serie DYN7 / FK10\_00kN-WWL-7d / 1 Balken

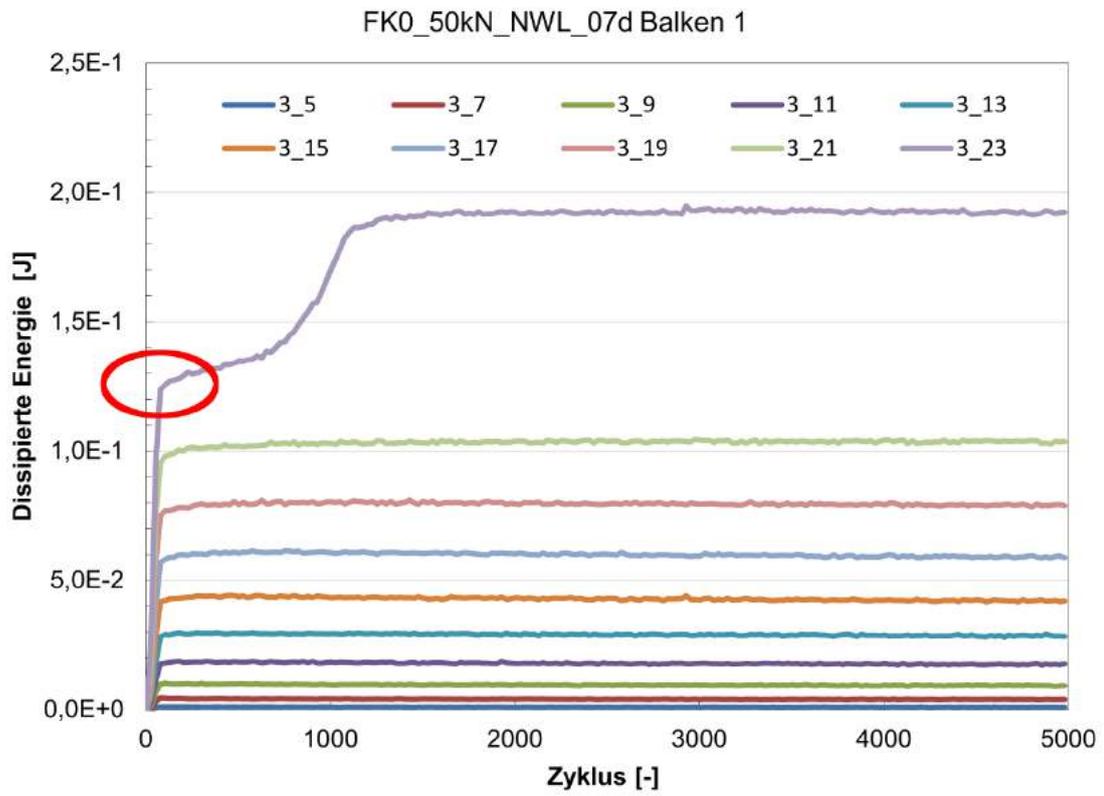


Serie DYN8 / FK10\_00kN-WWL-15d / 3 Balken





Serie DYN9 / FK0\_50kN-NWL-07d / 1 Balken



Serie **DYN10** / FK0\_75kN-NWL-07d / 2 Balken

