

Systematische betontechnologische Einflüsse auf die Faserrückgewinnungsrate

## Betontechnologische Einflüsse auf die Faserrückgewinnungsrate von PP-Faserfrischbetonen nach der ÖBV-Richtlinie

David Alós Shepherd, Karlsruhe, Johanna Renner, Zürich, Frank Dehn, Karlsruhe

Zur Bestimmung des PP-Fasergehalts im Frischbeton wird in Deutschland gemäß ZTV-ING, Teil 5, auf den Auswaschversuch nach der ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ (2015) zurückgegriffen. In dem Beitrag werden systematisch betontechnologische Einflüsse bzgl. der Faserrückgewinnungsrate und Auswaschbarkeit von PP-Faserfrischbetonen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswaschbarkeit der Betone unterschiedlicher Zusammensetzung teilweise erheblich beeinflusst wird. Es zeigt sich auch, dass das Verfahren nach der ÖBV-Richtlinie zwar grundsätzlich geeignet ist, um den PP-Fasergehalt zu überprüfen, jedoch im Hinblick auf eine ziel sicherere, reproduzierbare und effektivere Durchführung und Auswertung überarbeitet und konkretisiert werden sollte.

### 1 Einleitung

Das stetig ansteigende Verkehrsaufkommen, verbunden mit der voranschreitenden Urbanisierung, haben in den vergangenen Jahren in Deutschland zu einer deutlichen Zunahme der Errichtung von Straßentunnelbauwerken geführt [1]. Seit 2013 gelten hierbei verschärfte Brandschutzanforderungen für neu zu errichtende Tunnelbauwerke, die in Deutschland in den „Zusätzliche[n] Technische[n] Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ (ZTV-ING), Teil 5, Abs. 1 (2018) [2], geregelt sind. So sind die einem möglichen Brand ausgesetzten Tunnelwände und -decken mit Polypropylen-Faserbeton (kurz: PP-Faserbeton) auszuführen. Der Beton soll hierbei mit Mikro-PP-Fasern nach DIN EN 14889-2 [3] in einer Menge  $\geq 2,0$  kg pro  $m^3$  Beton vergütet werden, wobei eine Reduzierung des PP-Fasergehaltes durch den Nachweis eines erhöhten Brandwiderstands des PP-Faserbetons durch Brandversuche möglich ist (vgl. [4]). Ebenfalls in den ZTV-ING [2] wird die Konformitätsprüfung des PP-Faserbetons geregelt, wobei hier auf den PP-Faserauswaschversuch am Frischbeton gemäß der Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdischer Verkehrsbauwerke aus Beton“ der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) aus dem Jahr 2015 verwiesen wird [5].

PP-Faserbetone weisen gegenüber herkömmlichen Betonen aufgrund der Zugabe von Polypropylen-Fasern zumeist einen erhöhten Luftgehalt sowie eine schlechtere Verarbeitbarkeit auf [6, 7]. Zudem scheint die Zugabe von bestimmten Betonzusatzmitteln erheblichen Einfluss auf die Auswaschbarkeit zu haben. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der PP-Faserbetone im gesamten

Ingenieurbau, und der damit einhergehenden Verbreitung des PP-Faserauswaschversuchs nach ÖBV-Richtlinie (im folgenden ÖBV-Versuch genannt), ist es das Ziel dieses Beitrags, betontechnologische Einflüsse auf die Faserrückgewinnungsrate und die Auswaschbarkeit von PP-Faserfrischbetonen im ÖBV-Versuch zu untersuchen. Hierfür wird zuerst ein kurzer Einblick zur Methode der PP-Faserrückgewinnung gegeben und die für die Herstellung von PP-Faserbeton gebräuchlichen Betonzusatzmittel kurz vorgestellt. Im Anschluss werden die durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend beschrieben sowie die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 2 Literatur und Normen

#### 2.1 Methoden zur PP-Faserrückgewinnung am Frischbeton

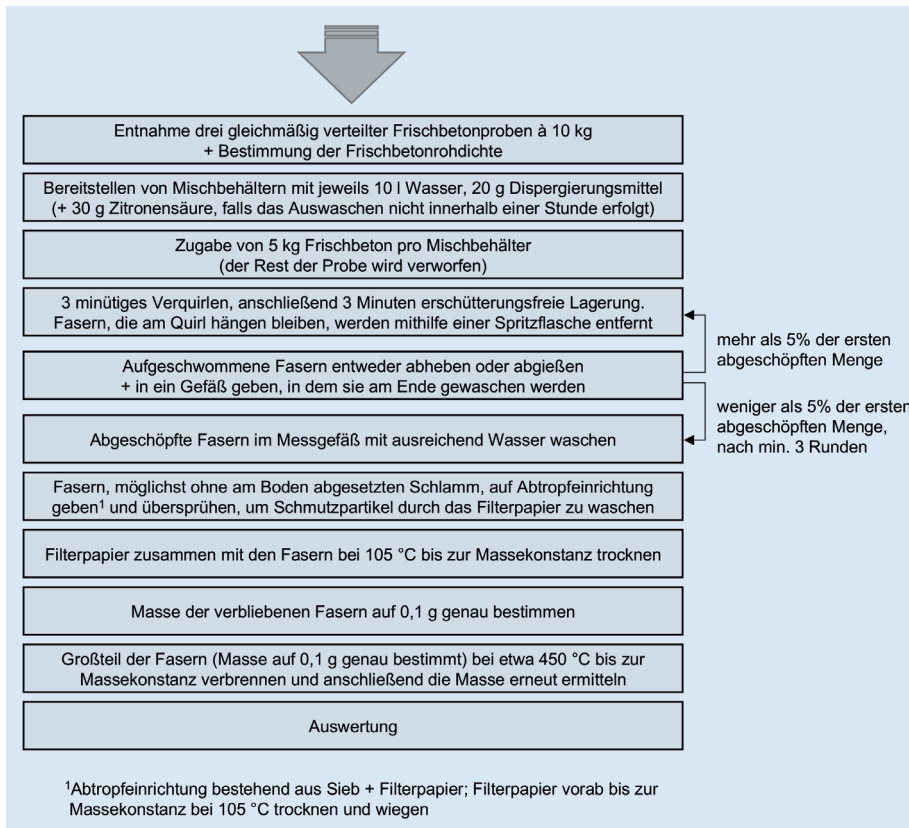
Die Rückgewinnung von Polymerfasern aus Frischbeton ist bisher nicht weit etabliert, weshalb hierzu nur wenige Methoden entwickelt wurden. Die bekannten Verfahren zur Polymerfaserrückgewinnung basieren darauf, dass eine Frischbetonprobe mit Wasser (oder Alkohol) vermischt wird und das Aufschwimmen der leichteren Polymerfasern mechanisch (z.B. durch Rühren oder Rütteln) unterstützt wird [8]. In Deutschland hat sich hingegen das in Österreich entwickelte und standardisierte Verfahren zur PP-Faserrückgewinnung gemäß Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdischer Verkehrsbauwerke aus Beton“ der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) aus dem Jahr 2015 etabliert [5]. Für das Prüfverfahren sind die in der Richtlinie beschriebenen Schritte durchzuführen [5], die schematisch in Bild 1 dargestellt sind.

#### Die Autoren:

**M.Sc. David Alós Shepherd** studierte Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt konstruktiver Ingenieurbau und Geotechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er ist aktuell Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) des KIT. Sein Tätigkeitsschwerpunkt liegt im Bereich der betontechnologischen Beratung der öffentlichen Hand insbesondere bei der Verwendung von Sonderbetonen (PP-Faserbeton, HFB). Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich geotechnischer Betone und Hochleistungsbetone.

**B.Sc. Johanna Renner** studierte Bauingenieurwesen (Bachelor) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). In dieser Zeit war sie als wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Betonbau (IMB) tätig. Aktuell studiert sie Bauingenieurwesen (Master) mit den Schwerpunkten konstruktiver Ingenieurbau und Geotechnik an der ETH Zürich.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn** studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH) und promovierte an der Universität Leipzig. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Baustoffe und Betonbau am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) sowie Direktor der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Professor Dehn ist Mitglied in nationalen und internationalen technisch-wissenschaftlichen Gremien und Sachverständigenausschüssen des Betonbaus.



**Bild 1: Ablaufschema des PP-Faserauswaschversuchs nach ÖBV-Richtlinie [5]**

Bei der Auswertung des Versuchs fließen diverse Faktoren ein, die sowohl den Glührückstand bzw. Glührückstand (d.h. die Massendifferenz der Polymerfasern vor und nach dem Verglühen) als auch die Masse des verwendeten Filterpapiers berücksichtigen. Zudem wird das Ergebnis anhand der verwendeten Betonmenge sowie der ermittelten Frischbetonrohddichte auf 1 m<sup>3</sup> Frischbeton skaliert. Die Auswertung des Versuchs erfolgt anhand nachfolgender Formel [5]:

$$GFA = (m_{Fap} - m_p) \cdot \frac{(m_{FA105} - m_{FA500})}{m_{FA105}} \cdot \frac{\rho_{FB}}{m_B}$$

Dabei gilt:

- $m_B$  Masse des für die Prüfung verwendeten Betons auf g genau
- $m_{Fap}$  Masse des getrockneten Filterpapiers mit den getrockneten Fasern auf 0,1 g genau
- $m_p$  Masse des getrockneten Filterpapiers auf 0,1 g genau
- $m_{FA105}$  Masse der trockenen Fasern, die anschließend bei 105 °C verglüht werden
- $m_{FA500}$  Masse der Fasern, nach dem Verglühen bei 450 °C
- GFA Fasergehalt (getrocknete Faser) je m<sup>3</sup> Beton in kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_{FB}$  Rohddichte des Frischbetons in kg/m<sup>3</sup> lt. Bestimmung auf der Baustelle

Bereits an dieser Stelle ist anzumerken, dass die ÖBV-Richtlinie [5] an vielen Stellen nur sehr unpräzise Angaben zum Vorgehen macht, sodass sich ein deutlicher Spielraum

bei der Durchführung des PP-Faserauswaschversuchs ergibt. Auch außerhalb Österreichs und Deutschlands findet das Verfahren Anwendung, wenn der PP-Fasergehalt im Frischbeton nachgewiesen werden muss, sofern die Nachweise der Dosiermenge und Dosiergenauigkeit einer möglicherweise eingesetzten, automatischen Faserdosieranlage nicht ausreichen. Es ist daher von zentraler Bedeutung, die wesentlichen betontechnologischen Einflüsse auf den PP-Faserauswaschversuch nach ÖBV-Richtlinie [5] zu verstehen, um etwaige Abweichungen analysieren und beurteilen zu können.

## 2.2 Wesentliche Betonzusatzmittel im PP-Faserbeton

Bei Verwendung von PP-Faserbetonen im Tunnelbau stehen insbesondere die Betonzusatzmittel im Vordergrund, die eine gute Verarbeitbarkeit und somit einen guten Einbau des Betons ermöglichen. Neben Fließmitteln werden zudem oft Stabilisierer hinzugegeben, die insbesondere das Pumpen über lange Strecken ermöglichen und einem Entmischen des Frischbetons aufgrund der PP-Faserzugabe entgegenwirken sollen. Da die PP-Fasern Rüttelenergie absorbieren, wird für ein optimales Verdichtungsergebnis meist eine fließfähige Konsistenz angestrebt [9]. Zur Verwendung kommen auch speziell für Unterwasserbeton entwickelte, stabilisierende Betonzusatzmittel, die in der Regel noch weitere Bestandteile (wie z.B. Fließmittel) enthalten und als „UW-Compounds“ bezeichnet werden.

Zur Durchführung des PP-Faserauswaschversuchs nach ÖBV-Richtlinie werden

20 g Dispergierungsmittel (genauer: Tetranatriumdiphosphat) und 30 g Zitronensäure als Verzögerer (falls das Auswaschen nicht innerhalb einer Stunde erfolgt) benötigt [5]. Dispergierungsmittel zählen nicht zu den klassischen Betonzusatzmitteln, die in der Betonindustrie verwendet werden. Jedoch lassen sich Fließmittel, die eine physische Separation der Zementpartikel bewirken, indem sie deren abstoßende Wechselwirkungen beeinflussen, als eine Art Dispergierungsmittel einordnen [10]. Bei dem PP-Faserauswaschversuch nach der ÖBV-Richtlinie [5] wird ein Dispergierungsmittel zugegeben, um eine einfachere Auswaschung der PP-Fasern aus dem Wasser-Betongemisch zu ermöglichen. Gleichzeitig soll dadurch die Menge des an den PP-Fasern haftenden Zementleims reduziert werden.

Falls der Beton nicht innerhalb einer Stunde ausgewaschen wird, ist die Zugabe eines Verzögerers nach der Probenahme bzw. Probenvorbereitung nötig, um den Erstarrungsprozess zu verzögern [5]. Allerdings ist davon auszugehen, dass neben der Zitronensäure auch die zugegebene Wassermenge von 10 l den Erstarrungsprozess erheblich verlangsamt. Eine Angabe dazu, wie lange die Zeitspanne zwischen Probenahme bzw. Probenvorbereitung und Durchführung der Prüfung maximal sein darf, findet sich in den Vorgaben der Richtlinie nicht.

Ziel der in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen ist es daher, neue Erkenntnisse über betontechnologische Einflüsse auf die Auswaschbarkeit und die Faserrückgewinnungsrate der PP-Faserbetone für den PP-Faserauswaschversuch nach ÖBV-Richtlinie [5] zu erlangen. Hierfür wurden verschiedene Betonzusatzmittel, sowohl im Mischungsentwurf als auch bei der Auswaschung, systematisch eingesetzt und die PP-Faserbetone dem ÖBV-Versuch unterzogen. In den folgenden Abschnitten werden das durchgeführte Versuchskonzept sowie die hierfür gewählten Ausgangsstoffe näher beschrieben.

## 3 Experimentelle Untersuchungen

### 3.1 Versuchskonzept

Für die experimentelle Untersuchung wurde ein dreistufiger Aufbau gewählt. In der ersten Runde (R1) wurde allein der Einfluss verschiedener Betonzusammensetzungen und Betonzusatzmittel auf die Wiederfindungsrate der PP-Fasern und die Auswaschbarkeit des Frischbetons untersucht. Hierzu wurde der ÖBV-Versuch [5] pro Mischung jeweils zwei Mal (anstatt drei Mal) durchgeführt.

In der zweiten Runde (R2) wurde der ÖBV-Versuch geringfügig modifiziert. Dabei kamen Chemikalien zum Einsatz, die ein besseres Auswaschen versprochen. Es wurden für den Betonbau üblicherweise verfügbare Betonzusatzmittel, die in ihrer Wirkungsweise an die in der ÖBV-Richtlinie vorgeschriebenen Chemikalien angelehnt sind, verwendet. In der zweiten Versuchsrunde wurden pro ausgewähltem Versuchsbeton drei Versuche durchgeführt. Einer mit einem leistungsfähigeren Dispergierungsmittel, ein weiterer mit einem stärkeren Verzögerer und schließ-

lich einer mit der Kombination der beiden. Im Grundsatz wurde jedoch auch in Runde 2 nicht von dem in der ÖBV-Richtlinie vorgeschriebenen Versuchsaufbau abgewichen.

Zusätzlich wurden in der dritten Runde (R3) Versuche durchgeführt, in denen auch der vorgegebene Ablauf geringfügig modifiziert wurde. Hierbei wurden in der dritten Runde die Fasern vor dem ersten Aufrühren abgeschöpft, da sich im Rahmen von Vorversuchen gezeigt hatte, dass bereits vor dem ersten Aufrühren der Betonprobe teilweise mehr PP-Fasern an der Oberfläche schwimmen als nach dem ersten Aufrühren. Abschließend erfolgte das Verglühen der PP-Fasern und die Auswertung in allen Versuchsrunden nach den Vorgaben der ÖBV-Richtlinie [5].

Für alle hergestellten Betone wurden zusätzlich Frischbetonprüfungen (Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [11], Rohdichte nach DIN EN 12350-6 [12] und Luftgehalt nach DIN EN 12350-7 [13]) durchgeführt,

**Tafel 1: Ansatz des Mischungsentwurfes gemäß ÖBV-Richtlinie [5] (links), Skalierung auf 1 m<sup>3</sup> (mitte) und gewählter Mischungsentwurf des Referenzbetons (rechts)**

Ausgangsstoff	Ansatz ÖBV		Skalierung auf 1 m <sup>3</sup>		Referenzbeton	
	kg	Vol [l]	kg	Vol [l]	kg	Vol [l]
Zement	0,870	0,280	386,700	124,740	400,000	129,000
Wasser	0,440	0,440	195,570	195,570	200,000	200,000
Luftporen	–	–	–	–	–	20,000
Fasern	0,005	0,010	2,247	2,470	2,000	2,200
Gesteinskörnung	3,700	1,520	1752,300	677,220	1678,690	648,970
<b>Summe</b>	<b>5,015</b>	<b>2,250</b>	<b>2336,817</b>	<b>1000,000</b>	<b>2280,690</b>	<b>1000,170</b>

um so Aussagen über die Verarbeitbarkeit und Qualität der hergestellten PP-Faserbetone treffen zu können.

### 3.2 Versuchsbetone und Ausgangsstoffe

Für die durchgeführten Versuche wurde zunächst ein an den in der ÖBV-Richtlinie zur

Prüfvalidierung vorgegebenen Beton [5] angelehnter Referenzbeton verwendet. Bei der Skalierung auf einen m<sup>3</sup> (die Richtlinie gibt lediglich ein 5 kg-Ansatz vor) wurden einige Anpassungen vorgenommen, um einen möglichst für den deutschen Straßentunnelbau repräsentativen PP-Faserbeton zu erhal-

**Tafel 2: Übersicht der Zusammensetzung aller geprüften Versuchsbetone**

Zusammensetzung												
Erste Runde												
Betonsorte	Zement		Fasern		Zusatzmittel	Wasser		Luft	Gesteinskörnung			
	Zementart	[kg/m <sup>3</sup> ]	Art	[kg/m <sup>3</sup> ]	[M.-% v.Z.]	[kg/m <sup>3</sup> ]	w/z Wert	[Vol.-%]	0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	Art	2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]
R1-Ref	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R1-gebrochen	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	565,6	gebrochen	981,5	194,0
R1-1,5 Faser	CEM I 42,5 R	400	6/18	1,5	–	200	0,5	2	588,0	rund	672,0	420,0
R1-3 mm	CEM I 42,5 R	400	3/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R1-0,6	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	240	0,6	2	552,8	rund	631,8	394,9
R1-0,4	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	160	0,4	2	625,3	rund	714,6	446,6
R1-CEM II	CEM II A-LL 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,2	rund	671,0	419,4
R1-CEM III	CEM III A 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	584,0	rund	667,5	417,2
R1-320	CEM I 42,5 R	320	6/18	2	–	160	0,5	2	648,3	rund	740,9	463,1
R1-Hersteller	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R1-Transport	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R1-PCE	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	1,25	200	0,5	2	586,6	rund	670,4	419,0
R1-PNS	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	1,50	200	0,5	2	586,4	rund	670,2	418,9
R1-Stabi	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	0,20	200	0,5	2	587,6	rund	671,5	419,7
R1-UW Comp.	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	0,20	200	0,5	2	587,0	rund	670,8	419,3
R1-KA	Baustellenbeton											
R1-KN	Baustellenbeton											
Zweite Runde												
Betonsorte	Zement		Fasern		Zusatzmittel	Wasser		Luft	Gesteinskörnung			
	Zementart	[kg/m <sup>3</sup> ]	Art	[kg/m <sup>3</sup> ]	[M.-% v.Z.]	[kg/m <sup>3</sup> ]	w/z Wert	[Vol.-%]	0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	Art	2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]
R2-Ref	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R2-3mm	CEM I 42,5 R	400	3/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R2-PCE	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	1,25	200	0,5	2	586,6	rund	670,4	419,0
R2-KA	Baustellenbeton											
Dritte Runde												
R3-Ref	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	–	200	0,5	2	587,5	rund	671,5	419,7
R3-PCE	CEM I 42,5 R	400	6/18	2	1,25	200	0,5	2	586,6	rund	670,4	419,0



ten. Hierbei wurde der PP-Fasergehalt auf  $2,0 \text{ kg/m}^3$  reduziert, eine B16- statt B22-Sieblinie bzw. Gesteinskörnung verwendet, der w/z-Wert auf 0,5 angepasst und der Luftgehalt in der Stoffraumgleichung berücksichtigt. Die Skalierung sowie der genaue Mischungsentwurf des Referenzbetons sind in Tafel 1 dargestellt. Anschließend wurde von diesem Referenzbeton (R1-Ref) jeweils nur ein Parameter der Zusammensetzung für jeden Versuchsbeton verändert.

Zunächst erfolgte ein Versuch, bei dem die runde Gesteinskörnung durch gebrochene (R1-gebrochen) ersetzt wurde. Aufgrund der aktuellen Tendenzen, den PP-Fasergehalt zu reduzieren, wurde eine Mischung mit einem reduzierten Fasergehalt von  $1,5 \text{ kg/m}^3$  Frischbeton (R1-1,5 Faser) untersucht. Im Anschluss wurde der Einfluss der PP-Fasertlänge beleuchtet und mit 3 mm langen Fasern (R1-3 mm) gearbeitet, sowie ein weiterer Versuch mit den 6 mm Fasern eines anderen Herstellers (R1-Hersteller) durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde der Einfluss des w/z-Werts durch jeweils eine Variation nach oben (R1-0,6) und eine nach unten (R1-0,4) überprüft.

Weiterhin wurden die Zementart variiert (R1-CEM II; R1-CEM III) und der Leimgehalt verändert (R1-320). Außerdem wurde für den Referenzbeton zusätzlich ein Transport der Betonproben ins Prüflabor nachgestellt (R1-Transport), indem die Versuchseimer über einen Zeitraum von 4 h bei einer Frequenz von 30 Hz mithilfe von Spanngurten auf einem Rütteltisch befestigt wurden. Zum Abschluss der ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss verschiedener Betonzusatzmittel untersucht. Hierbei wurden der Mischung nacheinander zwei Fließmittel (R1-PCE auf Polycarboxylatether-Basis; R1-PNS auf Polynaphthalinsulfonat), Stabilisierer (R1-Stabi) und UW Compound (R1-UW Comp.) hinzugegeben.

Ergänzend wurden in der ersten Runde die Ergebnisse der Auswaschungen zweier

Baustellenbetone herangezogen, die für neu zu errichtende Tunnelbauwerke in Konstanz (R1-KN) und Karlsruhe hergestellt und eingebaut werden (R1-KA).

In der zweiten und dritten Versuchsreihe, in der es um die Verbesserung des Prüfverfahrens ging, wurden nur fünf Betone selbst hergestellt (R2-Ref, R2-3mm, R2-PCE, R3-Ref, R3-PCE) und der Karlsruher Baustellenbeton (R2-KA) angeliefert. Die Mischungsentwürfe entsprachen dabei denen aus der ersten Runde (R1).

Eine zusammenfassende Übersicht aller Versuchsbetone findet sich in Tafel 2. Genauere Angaben zum Versuchsprogramm und zur Durchführung können [14] entnommen werden.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Frischbetonprüfung

Für alle Versuchsbetone wurden Ausbreitmaß [11], Rohdichte [12] und Luftgehalt [15] bestimmt.

Bei der Betrachtung des Ausbreitmaßes (Bild 2) zeigt sich, dass alle hergestellten Betone steif bis sehr steif sind. Allein für die Mischung R1-0,6 lässt sich eine weiche Konsistenz beobachten. Die beiden mit Fließmittel versetzten Betone können als plastisch eingeordnet werden. Die niedrigen Konsistenzklassen lassen sich auf die Zugabe der Fasern zurückführen [8]. Die Baustellenbetone aus Karlsruhe bzw. Konstanz sind aufgrund ihrer Zusammensetzung deutlich fließfähiger und lassen sich als sehr weich bzw. fließfähig charakterisieren. Im direkten Vergleich durch eine Prüfung am Referenzbeton und am mit PCE versetzten Beton vor und nach der PP-Faserzugabe lässt sich der Effekt der Fasern erkennen, da diese zu einer erheblichen Reduktion der Verarbeitbarkeit führen und der Beton vor PP-Faserzugabe (RX-Ref un, RX-PCE un) ein deutlich höheres Ausbreitmaß als danach aufweist. Auch die Ergebnisse der Runden 2 und 3 weisen vergleichbare Ergebnisse zur Runde 1 auf.

Bei der Bestimmung der Rohdichte (Bild 3) lassen sich für alle Versuchsbetone ähnliche Werte im Bereich  $2200 \text{ kg/m}^3$  bis  $2400 \text{ kg/m}^3$ , die typisch für einen Normalbeton sind, erkennen. Der Ausreißer nach unten im Falle des R1-UW Comp. lässt sich auf den höheren Luftgehalt zurückführen.

Der Luftgehalt (Bild 4) zeigt große Schwankungen in Abhängigkeit von dem jeweiligen Mischungsentwurf. Auffallend ist insbesondere der sehr hohe Luftgehalt des R1-UW Comp., der mit der geringen Rohdichte und dem geringen Ausbreitmaß dieses Betons korreliert. Auch die Betone R1-0,4 und R1-320 mit geringem w/z-Wert bzw. vermindertem Leimgehalt weisen höhere Luftgehalte auf. Ebenso weisen die Referenzbetone hohe Luftgehalte auf, die zu der steifen Konsistenz passen. Auch hier lässt sich im direkten Vergleich durch eine Prüfung vor und nach der PP-Faserzugabe der Effekt der PP-Fasern erkennen, da diese zu einem Lufteintrag führen. Niedrige Luftgehalte weisen allein die Baustellenbetone sowie R1-gebrochen und R1-0,6 auf. Im Falle des R1-0,6 lässt sich dies durch den hohen Wassergehalt erklären. Der R1-gebrochen weist gegenüber den anderen Betonen neben dem geringen Luftgehalt auch eine höhere Rohdichte auf, was auf eine bessere Verdichtbarkeit hindeutet. Die Ergebnisse der Runden 2 und 3 weisen ebenfalls vergleichbare Ergebnisse zur Runde 1 auf und bestätigen eine reproduzierbare Herstellung der Betone.

### 4.2 Ergebnisse der ÖBV-Versuche (Runde 1)

Zur Beurteilung des PP-Faserauswaschversuchs nach ÖBV-Richtlinie [5] werden zwei Kriterien herangezogen. Zum einen wird die Auswaschbarkeit, gemessen in der benötigten Anzahl an Auswaschrunden bis zum Erreichen des sog. 5 %-Kriteriums (vgl. Bild 1), beurteilt. Zum anderen wird die Wiederfindungsrate der PP-Fasern, als Kriterium für die Konformitätsbeurteilung des Betons, betrachtet.

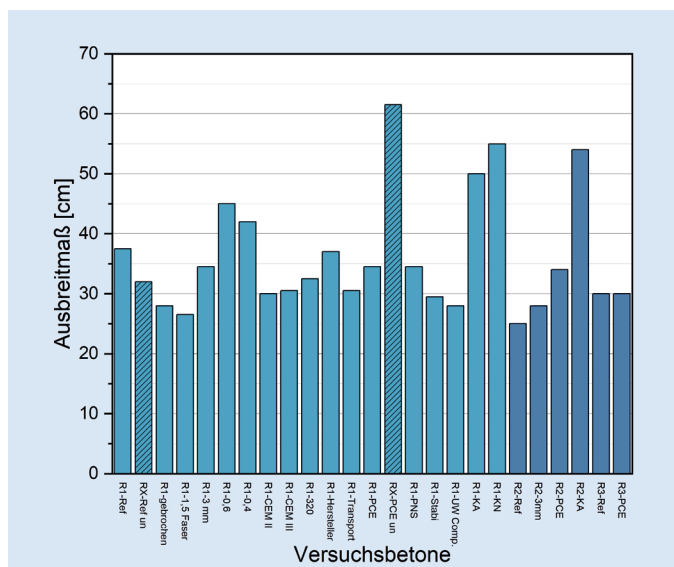


Bild 2: Ergebnisse des Ausbreitmaßversuchs nach [11] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton

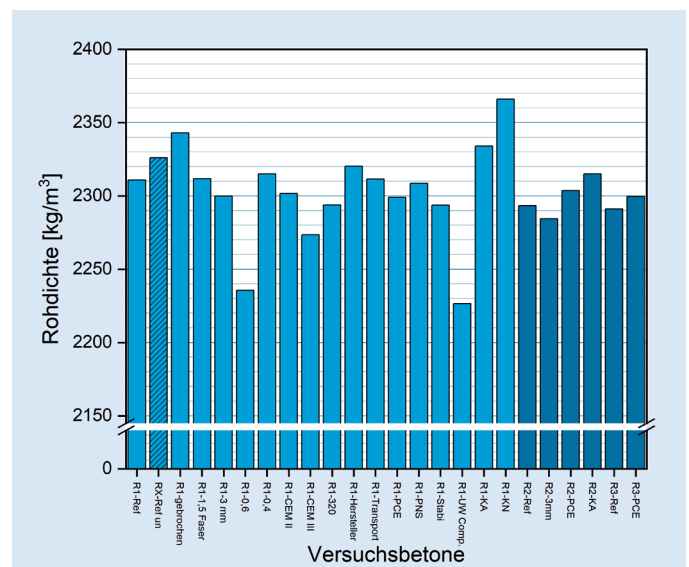


Bild 3: Ergebnisse der Frischbetonrohichte nach [12] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton

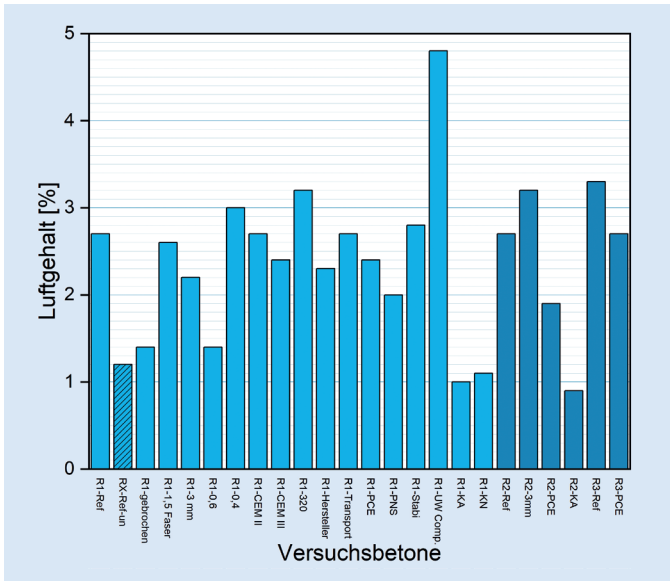


Bild 4: Ergebnisse des Luftgehalts nach [15] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton

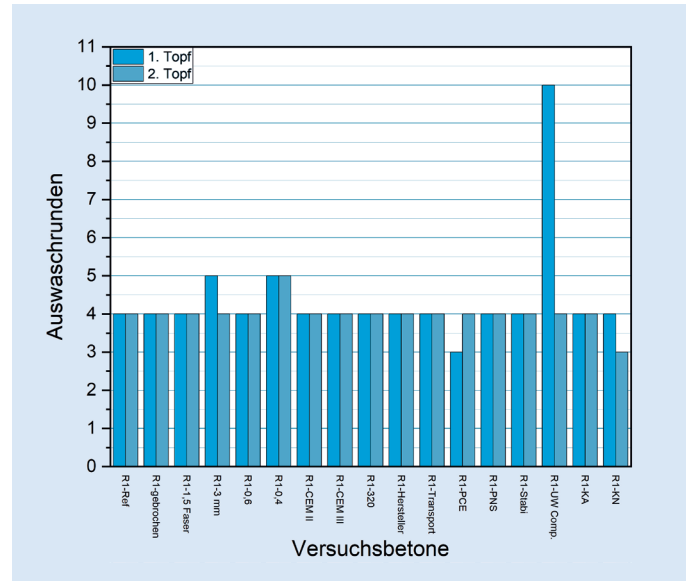


Bild 5: Erforderliche Auswaschrunden nach [5] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton

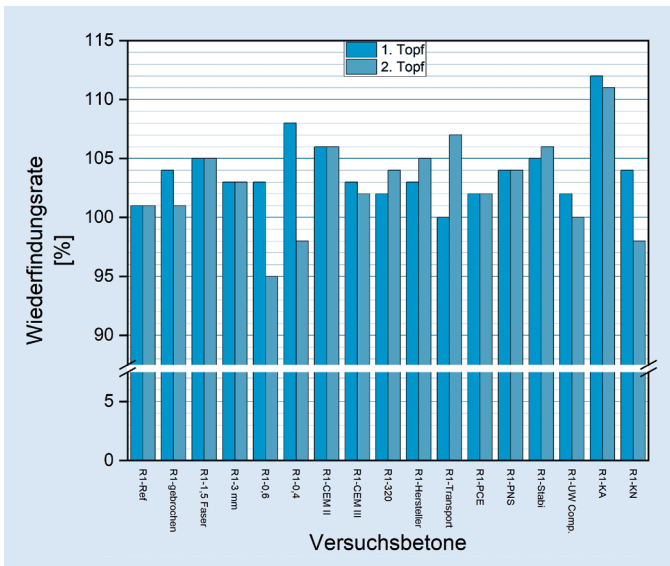


Bild 6: Ergebnisse der Wiederfindungsrate der PP-Fasern nach [5] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton

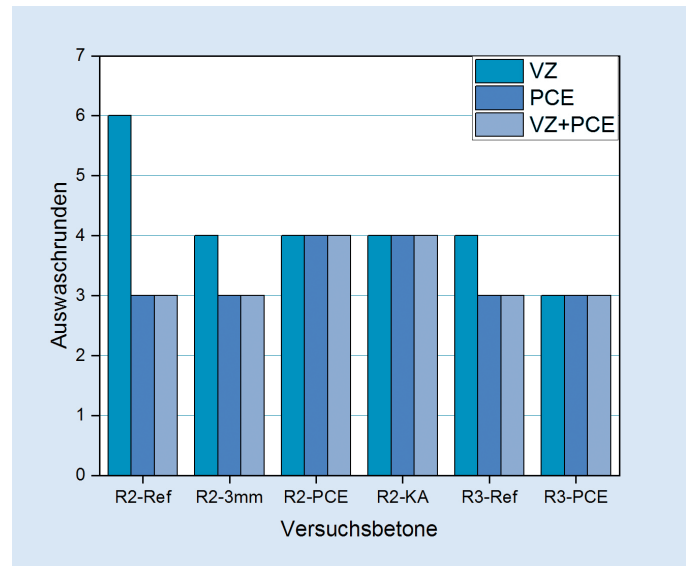


Bild 7: Erforderliche Auswaschrunden nach [5] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton sowie der gewählten Veränderung des Dispergierungs- bzw. Verzögerungsmittels

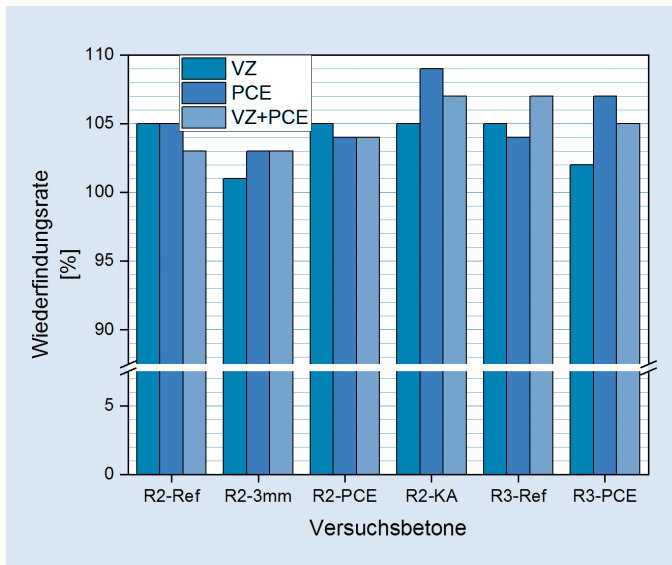
Die Auswaschbarkeit der Frischbetone (Bild 5) scheint größtenteils unabhängig von ihrer Zusammensetzung zu sein. Der signifikante Ausreißer des R1-UW Comp. bei der Anzahl der Auswaschrunden liegt an der Zugabe des UW-Compounds, wodurch die PP-Fasern kaum an die Oberfläche aufschwimmen, sondern unterhalb dieser im Wasser gelieren. Hierzu wurde in den vorliegenden Versuchen das Abschöpfsieb bei der zweiten Durchführung unterhalb der Oberfläche eingetaucht und die PP-Fasern abgeschöpft. Dies ist nicht mit den Vorgaben der ÖBV-Richtlinie konform, ist jedoch erforderlich, da die ÖBV-Richtlinie für solche Fälle keine Angaben macht. Bei den Versuchen R1-PNS mit Fließmittel auf PNS-Basis konnten zu keinem Zeitpunkt PP-Fasern an der Oberfläche abgeschöpft werden, da sich

diese ausschließlich unterhalb der Oberfläche befanden. Vereinfacht wurde das Auswaschen vor allem dann, wenn der Frischbeton Fließmittel auf PCE-Basis enthielt.

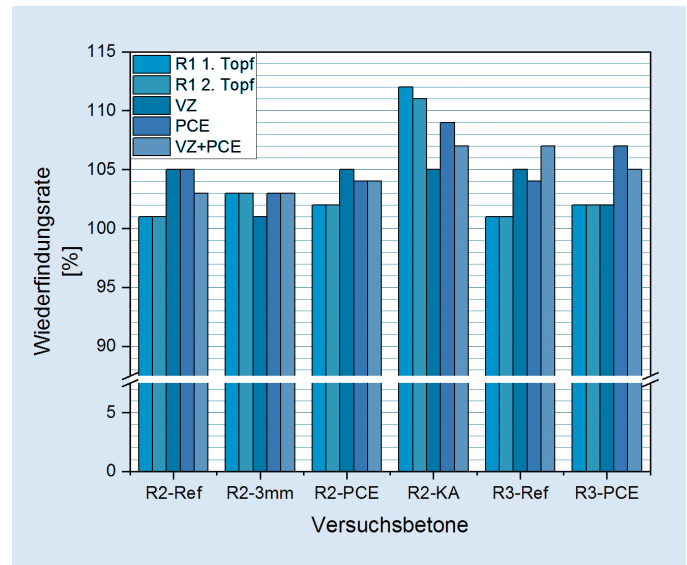
Die Wiederfindungsrate liegt bei der Mehrzahl der Versuche über 100 % (Bild 6) und erfüllt immer die Anforderungen der ZTV-ING, Teil 5 [2]. Dies ist theoretisch eigentlich nicht möglich, da dies bedeuten würde, dass der Frischbeton mehr PP-Fasern enthält, als zugegeben wurden. Eine mögliche Erklärung ist eine ungleiche Verteilung der PP-Fasern im Frischbeton, jedoch müssten in diesem Fall sowohl Abweichungen nach unten als auch nach oben vorliegen. Dennoch können hierdurch Schwankungen zwischen den unterschiedlichen Versuchen ein und desselben Versuchsbetons erklärt werden. Eine weitere Möglichkeit ist, dass beim Abschöpfen der PP-Fasern auch andere

Bestandteile (z.B. organische und mineralische Verunreinigungen) mit abgeschöpft werden, die beim Verglühen und bei der Auswertung fälschlicherweise als PP-Fasern mit eingerechnet werden (s. Abschnitt 2.1).

Die Streuung der Wiederfindungsraten ist insgesamt gering, jedoch unterscheidet sich der Aufwand für die Versuchsdurchführung zum Teil erheblich. Bei den Baustellenbetonen muss auch in Betracht gezogen werden, dass eine Überdosierung der PP-Fasern möglich ist oder evtl. durch die automatische Dosieranlage der PP-Fasern zu Streuungen in der Zugabe kommt [4]. Durch die kontrollierten Laborbedingungen bei den selbst hergestellten Versuchsbetonen weisen diese kaum Streuungen in der PP-Faserdosierung auf, da die Dosierung per Hand als sehr genau eingestuft werden kann.



**Bild 8:** Ergebnisse der Wiederfindungsrate der PP-Faser nach [5] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton sowie der gewählten Veränderung des Dispergierungs- bzw. Verzögerungsmittels



**Bild 9:** Ergebnisse der Wiederfindungsrate der PP-Faser nach [5] in Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsbeton sowie der gewählten Veränderung des Dispergierungs- bzw. Verzögerungsmittels, im Vergleich

### 4.3 Ergebnisse der ÖBV-Versuche (Runde 2 und 3)

Bild 7 zeigt im direkten Vergleich mit den Versuchen der ersten Runde, dass die Versuche vor allem bei der Verwendung des leistungsfähigeren Dispergierungsmittels in der Regel nach weniger Auswaschrunden beendet werden können, da das 5 %-Kriterium schneller erreicht wird. Das hat eine wesentliche Zeitersparnis zur Folge. Noch deutlicher ist das bei den Versuchen der dritten Runde (R3), bei denen bereits vor dem ersten Rühren PP-Fasern abgeschöpft wurden. Diese führen zu einer schnelleren Versuchsdurchführung, da weniger Auswaschrunden benötigt werden. Bei den letzten beiden Versuchen war das 5 %-Kriterium durch das vorherige Abschöpfen so hoch, dass der Versuch theoretisch bereits nach zweimaligem Rühren hätte abgebrochen werden können. Da dies aber nicht der ÖBV-Richtlinie entspricht, wurde in allen Fällen dennoch dreimal gerührt.

Bild 8 zeigt, dass die Wiederfindungsraten der zweiten und dritten Versuchsrunde im Allgemeinen hoch sind, insbesondere, wenn unter der Verwendung von PCE-basiertem Fließmittel ausgewaschen wird.

In Bild 9 sind, als Vergleich zu den Ergebnissen aus Runde zwei und drei, die Ergebnisse der ersten Runde an einem Beton gleicher Zusammensetzung dargestellt. Beide Versuchsrunden weisen die Problematik auf, dass die Werte der Wiederfindungsrate über 100 % liegen, was theoretisch nicht möglich sein sollte, jedoch aus den zuvor genannten Gründen dennoch eintritt. Deutlich wird

jedoch auch, dass die Runde 2 und 3 in der Regel höhere Wiederfindungsraten aufweisen, was auf eine bessere Auswaschbarkeit der Betone hindeutet. Die unklare Tendenz beim R2-KA ist hierbei auf die Streuung der werkseitigen, automatischen Faserdosieranlage zurückzuführen [4].

### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Mischungszusammensetzung der Betone auf die tatsächliche PP-Faserwiederfindungsrate keinen signifikanten Einfluss hat, jedoch die Auswaschbarkeit dieser Betone durch Verwendung von Betonzusatzmitteln im Mischungsentwurf (insb. UW-Compound) teilweise erheblich beeinflusst wird. Bei der Durchführung des PP-Faserauswaschversuchs nach ÖBV-Richtlinie [5] wird jedoch deutlich, dass die abweichende Verwendung eines leistungsfähigeren Dispergierungsmittels (z.B. Fließmittel auf PCE-Basis) sowohl die Auswaschbarkeit der Betone erleichtert, als auch zu einer höheren Wiederfindungsrate führt. Zusammen mit den teilweise unpräzisen Angaben zur Durchführung in der ÖBV-Richtlinie [5] wird ersichtlich, dass die Richtlinie zwar den Stand der Technik widerspiegelt und für die Bestimmung der Faserückgewinnungsrate von PP-Faserfrischbetonen grundsätzlich geeignet ist, jedoch im Hinblick auf eine zielsicherere, reproduzierbare und effektivere Durchführung und Auswertung überarbeitet und konkretisiert werden sollte. Hierfür sollte eine nationale Richtlinie oder Norm angestrebt werden.

### Literatur

- [1] Verkehr in Zahlen 2019/2020. 48. Aufl., Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Flensburg 2019
- [2] ZTV-ING, Teil 5: „Tunnelbau, Abschnitt 2: Offene Bauweise“. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2018
- [3] DIN EN 14889-2:2018-09 „Fasern für Beton – Teil 2: Polymerfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität“
- [4] Alós Shepherd, D.; Helbig, I.; Kühn, R.; Dehn, F.: Neue Erkenntnisse zur Qualitätssicherung von PP-Faserbetonen am Beispiel des Straßentunnels Kriegsstraße. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) H. 10, S. 801–810
- [5] Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien 2015
- [6] Grünwald, S.: Fibre reinforcement and the rheology of concrete. Understanding the rheology of concrete. Woodhead Publishing, Cambridge 2012, S. 229–256
- [7] Orgass, M.; Dehn, F.; Rammelt, M.; Friebel, W.-D.: Qualitätssicherung für den Einsatz von PP-Faserbeton zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens von Straßentunnelschalen. Taschenbuch für den Tunnelbau 2020, 44. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin 2020, S. 124–154
- [8] Neuhaus, C.: Untersuchungen zur quantitativen Detektion von Kunststofffasern im Beton. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe 2017
- [9] Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis. 2. Aufl., Beuth Verlag, Berlin 2018
- [10] Aïtcin, P.-C.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Science and technology of concrete admixtures. Woodhead Publishing (Elsevier), Cambridge 2016
- [11] DIN EN 12350-5:2019-09 „Prüfung von Frischbeton, Teil 5: Ausbreitmaß“
- [12] DIN EN 12350-6:2011-03 „Prüfung von Frischbeton, Teil 6: Frischbetonrohddichte“
- [13] DIN EN 206:2017-01 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [14] Renner, J.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Faserückgewinnungsrate von PP-Faserfrischbetonen. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019
- [15] DIN EN 12350-7:2019-09 „Prüfung von Frischbeton, Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren“