

Orgass, Marko  
Dehn, Frank

# Verwendung von PP-Faserbeton für den baulichen Brandschutz im Tunnelbau - Praxiserfahrungen

## 1 Einleitung

Tunnelbauwerke sind während der Nutzung verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt. Neben den dauerhaften bzw. häufig wiederkehrenden Einwirkungen kann es auch zu außergewöhnlichen Belastungssituationen kommen. Dazu zählt u.a. der Brandfall. Auch bei dieser enormen Beanspruchung muss die Sicherheit im und am Bauwerk über eine ausreichend lange Zeit gewährleistet werden. Aus Brandunfällen in Tunneln, experimentellen Untersuchungen und numerischen Simulationen ist bekannt, dass sich extrem schnelle Temperaturanstiege und somit sehr hohe Temperaturgradienten im Bauwerk einstellen können. Aufgrund der Vielzahl von Bauteilen im Tunnelquerschnitt, muss das Brandverhalten daher differenziert betrachtet werden.

Das Verhalten von Beton im Brandfall wird prinzipiell von zwei Phänomenen geprägt:

- Änderung des mechanischen Materialverhaltens;
- Eine nicht ausreichende Permeabilität des Betons führt zur Abplatzung des Betons.

Zur Erhöhung der Permeabilität des Betons im Brandfall werden zunehmend PP-Fasern zugegeben. Dabei wird die Wirkung der PP-Fasern dem Schmelzen und Zersetzen (Schmelzpunkt der PP-Fasern bei ca. 160 °C) zugeschrieben, wodurch Mikrokanäle im Beton gebildet werden, die zur Minderung des Sättigungsdampfdrucks im Porengefüge des Betons beitragen. Zusätzlich kommt es durch das Zersetzen der PP-Fasern infolge der fortschreitenden Temperatureinwirkung zu einer verstärkten Mikrorissbildung im Beton, die einen Abbau von temperaturbedingten Eigen- und Zwangsspannungen ermöglicht.

Im Folgenden wird von den betontechnologischen Erfahrungen bei erfolgreichen Erstanwendungen von PP-Faserbetonen für Straßentunnelbauprojekte in offener und geschlossener Bauweise berichtet. Die Erstanwendung in der offenen Bauweise fand beim Tunnel Westtangente Bautzen (B96) statt, in der geschlossenen Bauweise beim Bühlertunnel im Zuge des Neubaus der B62n in Siegen. Die Erfahrungen bei anderen Tunnelbauprojekten, bspw. beim Tunnel Luise-Kiesselbach-Platz in München (fertiggestellt), Tunnel Hirschhagen im Zuge der BAB A44 (in der Bauausführung) und dem Katzenbergtunnel im Zuge der BAB A3 (in der Bauaus-

führung), fließen zusätzlich in diesen Bericht ein.

## 2 Wirkungsweise von PP-Fasern für den passiven Brandschutz

Infolge des sehr schnellen Temperaturanstiegs und der vergleichsweise sehr hohen Endtemperaturen während eines Tunnelbrandes, was mit dem standardisierten Temperatur-Zeit-Szenario nach der ZTV-ING [1] modellhaft dargestellt wird, können bei Tunnelbetonen ohne PP-Fasern erhebliche Abplatzungen auftreten, die unter ungünstigen Umständen sogar bis zum Verlust der Tragfähigkeit bzw. Standsicherheit der Tunnelkonstruktion oder entsprechender Tunnelbauteile führen können.

Basierend auf den Erkenntnissen von BASt-Forschungsvorhaben (siehe [3] und [4]) und experimentellen Nachweisen [2] kann mittlerweile als allgemeingültig festgehalten werden, dass die Zugabe einer ausreichenden Menge an PP-Fasern, das Abplatzverhalten von Tunnelbetonen signifikant reduzieren kann.

Es hat sich u.a. in [3] gezeigt, dass sich insbesondere PP-Fasern mit einem Durchmesser von 16 bis 20 µm, einer Länge von 6 mm und einer Dosierung von 2,0 kg/m<sup>3</sup> positiv auf das Brand- und Abplatzverhalten von Tunnelbetonen gemäß ZTV-ING, Abschnitt 5 [1], auswirken.

Sollen PP-Fasern mit anderen geometrischen Abmessungen oder mit einem anderen Gehalt wie oben genannt verwendet werden, so ist nach gegenwärtiger Festlegung für den Straßentunnelbau, die gleiche Wirksamkeit zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens des PP-Faserbetons durch Brandversuche an einem statisch belasteten Bauteil repräsentativer Geometrie unter Berücksichtigung der Temperatur-Zeit-Kurve der ZTV-ING nachzuweisen (siehe [3]).

## 3 PP-Faserbeton für den Tunnelbau

Der PP-Faserbeton muss hinsichtlich seiner Eigenschaften und Zusammensetzung innerhalb der gültigen normativen Grenzen liegen. Neben den statisch-konstruktiven Anforderungen bilden die Grundlage für die Konzeptionierung eines PP-Faserbetons für den Tunnelbau die Angaben in ZTV-ING [1] in Verbindung mit dem DIN Fachbericht 100 [11]. Die zum Einsatz kommenden PP-Fasern müssen einen Verwendbar-

keitsnachweis zur Erhöhung des Brandwiderstandes im Beton besitzen. Dies bedeutet, dass die PP-Faser zum einen der DIN EN 14889-2 [5] nachweislich entsprechen muss und eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt.

**4 Herstellung von PP-Faserbeton**

Die Auswahl der Betonausgangsstoffe richtet sich neben den Auswirkungen auf die (rheologischen) Eigenschaften des Frischbetons auch nach den projektspezifischen Anforderungen.

Bei der Entwicklung des PP-Faserbetons ist zu berücksichtigen, dass die Zugabe von PP-Fasern in den Frischbeton die rheologischen Eigenschaften (Viskosität / Fließfähigkeit) verändern kann. Vereinzelt wurde festgestellt, dass sich durch die Zugabe der PP-Fasern der Luftgehalt im Frischbeton erhöht. Zudem erhöht sich die Gefahr des Blutens. Diese Aspekte müssen durch geeignete betontechnologische Maßnahmen, wie bspw. eine angepasste Sieblinie, Erhöhung des Bindemittelgehaltes oder verlängerte Mischzeiten kompensiert werden.

Die Brandschutzeigenschaft des Betons ist im Wesentlichen in der Wirkung der PP-Fasern begründet, so dass bei der Herstellung des PP-Faserbetons besonderes Augenmerk auf die homogene Verteilung der PP-Fasern sowie die sichere Einhaltung des erforderlichen PP-Fasergehaltes im Frisch- und Festbeton zu legen ist. Die homogene PP-Faserverteilung und Einhaltung des erforderlichen PP-Fasergehaltes im Frischbeton wird sowohl vom Betonmischer des Mischwerks, dem festgelegten Mischregime als auch der Dosierung der PP-Fasern beeinflusst. Bislang wurden mit der Dosierung der PP-Fasern auf das Trockengemisch gute Erfahrungen gemacht.

**5 Qualitätssicherung für den PP-Faserbeton**

Zur qualitätssicheren Umsetzung einer Baumaßnahme mit PP-Faserbeton hat sich die Erstellung von Qualitätssicherungsplänen (QS-Plan) als unerlässlich herausgestellt. Auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen aus Vor- und Verarbeitungsversuchen bzw. der Erstprüfung ist von dem Transportbetonwerk und der bauausführenden Firma ein QS-Plan zu erstellen. Ziel dieses betontechnologischen Gesamtkonzeptes (QS-Plan) ist die Sicherstellung der geforderten Eigenschaften des zu erstellenden Tunnelbauwerks aus PP-Faserbeton. Besonderheiten im QS-Plan beim Einsatz von PP-Faserbeton sind die Herstellung, der PP-Fasergehalt des Betons, der Bauablauf, die Verarbeitung des PP-Faserbetons sowie der Prüf- und Überwachungsumfang im Transportbetonwerk sowie auf der Baustelle. Der QS-Plan beinhaltet u.a. die zum Einsatz kommende, durch den großmaßstäblichen Verarbeitungsversuch verifizierte PP-Faserbetonrezeptur, die Ergebnisse der Erstprüfung, Arbeitsanweisungen zum Herstellungsprozess des PP-Faserbetons im Transportbetonwerk (Mischregime, PP-Faserdosierung, etc.), Grenzwerte für die Betonannahme sowie Maßnahmen

bei Nichtkonformitäten. Des Weiteren gibt er Anweisungen zum Prüfumfang des PP-Faserbetons im Transportbetonwerk und auf der Baustelle (Konformitäts- und Identitätsprüfungen) sowie Anleitungen zur sachgerechten Herstellung des Bauwerks (Einbau, Verdichtung, Nachbehandlung des Betons). Außerdem sind die durchgeführten Verarbeitungsversuche zur Verifizierung der PP-Faserbetonrezeptur unter Baustellenbedingungen im QS-Plan zu dokumentieren.

Der Ablauf der Betongänge ist zwischen der Baustelle und dem Transportbetonwerk im Vorfeld so abzustimmen, dass während des gesamten Betonvorganges im Transportbetonwerk keine anderen Betone gemischt werden, um somit die Qualität des PP-Faserbetons nicht zu gefährden.

Bei der Verarbeitung von PP-Faserbeton sind dessen materialspezifische (rheologischen) Eigenschaften zu berücksichtigen. Diese haben Einfluss auf die erforderliche Verdichtungsenergie, die zulässige Betonfallhöhe und die zulässige Dicke der einzelnen Einbaulagen. Das Baustellenpersonal ist dahingehend vor Beginn der Baumaßnahme gesondert zu schulen.

Der Prüf- und Überwachungsaufwand im Transportbetonwerk und auf der Baustelle ist im Vergleich zu Transportbeton nach ZTV-ING [1] bzw. DIN-Fachbericht 100 [11] zu erhöhen. In Tabelle 1 sind die zusätzlichen qualitätssichernden Prüfungen zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusätzlicher Prüfumfang bei PP-Faserbeton

Kennwert	Prüfumfang
PP-Fasergehalt im Frischbeton nach [7]	<u>Transportbetonwerk:</u> je 200 m <sup>3</sup> PP-Faserbeton oder zweimal pro Produktionswoche <u>Baustelle:</u> für höchstens 300 m <sup>3</sup> oder je drei Betoniertage
PP-Fasergehalt im Festbeton nach [7]	Verarbeitungsversuch oder bei negativen Ergebnis im Rückgewinnungsversuch im Frischbeton
Blutneigung des PP-Faserbetons mittels Eimerverfahren nach [8]	Erstprüfung und Verarbeitungsversuch
Konsistenz vor und nach dem Pumpen	Verarbeitungsversuch
Luftgehalt im Frischbeton	Erstprüfung und Verarbeitungsversuch

Darüber hinaus hat sich eine auf den PP-Faserbeton abgestimmte Nachdosierungstabelle für die Baustelle bewährt. Zur zielsicheren Einstellung der Konsistenz auf der Baustelle ist vom Transportbetonwerk eine temperaturabhängige Fließmittel-Nachdosierungstabelle als Arbeitsanweisung für die Baustelle zu erstellen. Diese Nachdosierungstabelle wird erfahrungsgemäß bei der Erstprüfung und dem Verarbeitungsversuch erarbeitet. Zusammenfassend sollte folgender Mindestinhalt in einem QS-Plan für die Betonarbeiten aufgeführt werden:

- Allgemeines:  
Baubeschreibung, Auftraggeber/Auftragnehmer, Zugänglichkeit zur Baustelle, etc.;
- Verantwortliches Personal;
- Zum Einsatz kommende PP-Faserbetonrezeptur(en), inkl.: Transportbetonwerke, Unterlagen zu den verwendeten Beton-Ausgangsstoffen, Mischungsrechnungen und Ergebnisse der Erstprüfungen, Übersichtsplan, wo welche Betonrezeptur eingebaut wird;
- Arbeitsanweisungen (AA) mit der Angabe von: Prüfumfang, Soll- und Grenzwerte des PP-Faserbetons, Nachdosieren von Fließmittel auf der Baustelle (temperaturabhängig), Betonierkonzept, Nachbehandlungskonzept;
- Formblätter, die für die Dokumentation verwendet werden;
- Versuche zur Leistungsfähigkeit des PP-Faserbetons:  
Verarbeitungsversuche am PP-Faserbeton, ggf. Brandprüfung am PP-Faserbeton.

## 6 Prüfverfahren für PP-Faserbeton

### 6.1 Ermittlung des PP-Fasergehaltes im Frischbeton

Der Nachweis des PP-Fasergehaltes im Frischbeton wird nach dem in [7], Anhang 4, beschriebenen Verfahren durchgeführt. Dieses Verfahren basiert auf der geringen Rohdichte der PP-Fasern (ca.  $0,9 \text{ kg/dm}^3$ ) gegenüber Wasser. Durch das Aufmischen des PP-Faserbetons mit zusätzlichem Wasser schwimmen die PP-Fasern auf und können an der Oberfläche abgeschöpft werden. Die genaue Verfahrensanweisung kann der Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [7] entnommen werden. Damit die Schwankung des Verfahrens verringert wird, müssen abweichend zu den Angaben in [7], mehr als 3-mal die aufschwimmenden PP-Fasern abgeschöpft werden. Es hat sich gezeigt, dass der Vorgang mindestens 5-mal durchgeführt werden muss. Das Abschöpfen der PP-Fasern wird exemplarisch in Bild 1 gezeigt.



Bild 1: Durchmischung und Abschöpfung der PP-Fasern

Um einen Beton, der einem Temperatur-Zeit-Szenario nach der ZTV-ING [1] ausgesetzt wird, unter brandschutztechnischen Aspekten als funktionsfähig sicher einstufen zu können, wird in Deutschland eine Unterschreitung des PP-Fasergehaltes beim Mittelwert aus 3

Proben von höchstens 5 % zugelassen, bei den Einzelwerten höchstens um 10 %. Diese Grenzwerte beziehen sich auf einen PP-Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  und sind bei der Konformität- und Identitätsprüfung anzuwenden. Bei niedrigeren PP-Fasergehalten, wo die Wirksamkeit der PP-Fasern zur Erhöhung des Brandwiderstandes ermittelt wurde, können andere Grenzwerte durch einen Gutachter mit nachgewiesenen brandschutztechnischen und betontechnologischen Erfahrungen festgelegt werden.

### 6.2 Ermittlung des PP-Fasergehaltes im erhärteten Beton

Die Prüfung bietet die Möglichkeit zur Bewertung des Betonbauteils nach Schadenseintritt, nach negativen Ergebnissen bei den Frischbetonuntersuchungen oder bei Zweifel an einer mangelfreien Bauausführung. Die Rückgewinnung der PP-Fasern wird nach dem Verfahren der ÖVBB-Richtlinie, Anhang 5 [7], durchgeführt.

Als Versuchskörper sollten vorzugsweise Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm verwendet werden. Zur Prüfung ist der PP-Faserbeton aus dem Bereich der Betondeckung zu verwenden. Eine Prüfung an Rückstellproben, die baubegleitend hergestellt wurden, bspw. Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm, können zur Qualitätskontrolle ebenso geprüft werden.

Nach der ÖVBB-Richtlinie [7] wird bei Validierungsversuchen (inkl. Alternativverfahren), eine Wiederfindungsrate der PP-Fasern im Festbeton von mind. 68 % mit einer Standardabweichung von 7 % vorausgesetzt.

## 7 Besonderheiten bei der Betonzusammensetzung

Die Zugabe von PP-Fasern bewirkt eine deutliche Verringerung der Ausgangskonsistenz gegenüber der faserlosen Basismischung. Durch die relativ große PP-Faseroberfläche wird Wasser durch die Benetzung der Oberfläche vom Zugabewasser gebunden. Dieses gebundene Wasser kann zu einem späteren Zeitpunkt zu einem ausgeprägten Bluten des Frischbetons führen, wenn die Betonrezeptur nicht optimal konzipiert ist. Um das Bluten und die Verarbeitungseigenschaften zu optimieren, hat sich bei der Gesteinskörnungszusammensetzung eine Sieblinie A/B, bei der der feinkörnige Bereich bis 2 mm nahe bei B und der grobkörnige Bereich nahe bei A verläuft, bislang als günstig erwiesen.

Die Zugabe von PP-Fasern kann somit die Verarbeitungseigenschaften verändern und die Verdichtungswilligkeit des PP-Faserbetons beim Einbau beeinflussen. Außerdem kann die Zugabe von PP-Fasern einen leicht erhöhten Luftgehalt im Frischbeton bewirken.

Zum Erreichen einer ausreichenden Verarbeitungskonsistenz des Frischbetons wird bei einer PP-Faserzugabe ggf. ein erhöhter Bindemittelgehalt notwendig, der die Verformungseigenschaften (Schwinden und Kriechen) des PP-Faserbetons verändern kann. Dies muss bei verformungsempfindlichen Bauteilen

beachtet und untersucht werden.

### 8 Praxistest für den PP-Faserbeton

Der unter Laborbedingungen entwickelte PP-Faserbeton ist hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit (Pump- und Verdichtungswilligkeit, Verarbeitbarkeit) in mindestens einem Verarbeitungsversuch unter den voraussichtlichen Baustellenbedingungen zu testen. Am Ort des späteren Tunnelbauwerks ist ein großformatiger Betonprobekörper mit den Mindestabmessungen von Länge 4,5 m, Dicke 0,35 m und Höhe 3,0 m herzustellen. Den Beton hat das später zum Einsatz kommende Transportbetonwerk zu liefern. Der Versuchskörper spiegelt dabei den Aufbau des späteren Bauwerkes (gleicher Bewehrungsgehalt und -führung) wider. Er ist mit der Technologie herzustellen, die während des Tunnelbauprojektes zum Einsatz kommen soll, d.h. der Beton muss gepumpt werden. Hierbei kann sowohl die Schalung von oben befüllt werden, aber auch seitlich über Einfüllstutzen, die in der Schalung eingelassen sind. Beim Einbringen und Verdichten des Frischbetons ist darauf zu achten, dass der PP-Faserbeton aufgrund bspw. spezifischer (rheologischer) Eigenschaften zum Entmischen neigen kann. Auf eine homogene Verteilung der PP-Fasern im Beton ist zu achten.

Am PP-Faserbeton sind im Zuge des Verarbeitungsversuches auf der Baustelle durch die vorgesehene ständige Betonprüfstelle mindestens folgende Prüfungen durchzuführen:

- Prüfung der Konsistenz vor und nach der Pumpe;
- Prüfung der Frischbetontemperatur;
- PP-Fasergehaltbestimmung am Frischbeton nach [7];
- Prüfung der Frischbetonrohichte;
- Ermittlung des Luftgehaltes im Frischbeton;
- Ermittlung der Blutneigung des PP-Faserbetons mittels Eimerverfahren nach [8].

Bei dem Pilotprojekt in Bautzen [9] in offener Bauweise wurden in zwei Verarbeitungsversuchen die Verarbeitungseigenschaften des PP-Faserbetons unter den voraussichtlichen Baustellenbedingungen untersucht. Die zweite Wand, an der Bohrkern u.a. für die Untersuchung des Festbetons hinsichtlich PP-Fasergehaltes entnommen wurden, zeigt Bild 2. An acht Bohrkernen, verteilt in vier horizontalen und zwei vertikalen Ebenen wurde der Rückgewinnungsgrad der PP-Fasern (hinsichtlich PP-Faserverteilung und -gehalt) im Festbeton ermittelt. Die Probenpräparation und Versuchsdurchführung erfolgte entsprechend [7].

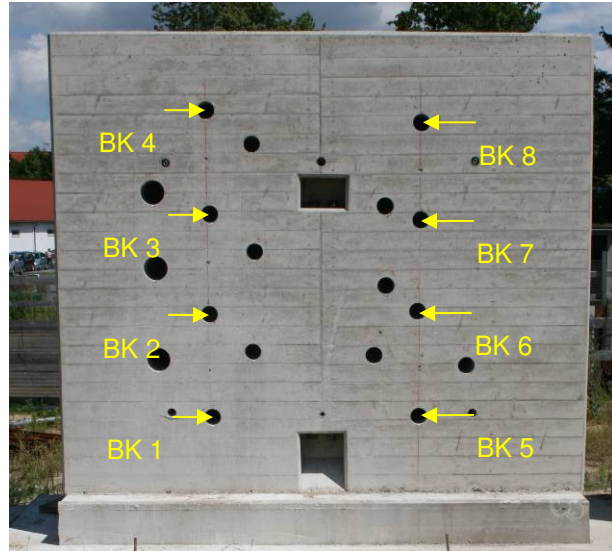


Bild 2: Verarbeitungsversuch

Die Untersuchungen hatten zum Ergebnis, dass die PP-Fasern in der Versuchswand gleichmäßig verteilt waren. Der kleinste Wert bei den Rückgewinnungsversuchen am Festbeton betrug 75 % und war somit deutlich höher, als in [7] gefordert. Eine Übersicht über die Prüfergebnisse der Faserrückgewinnungsversuche gibt Bild 3.

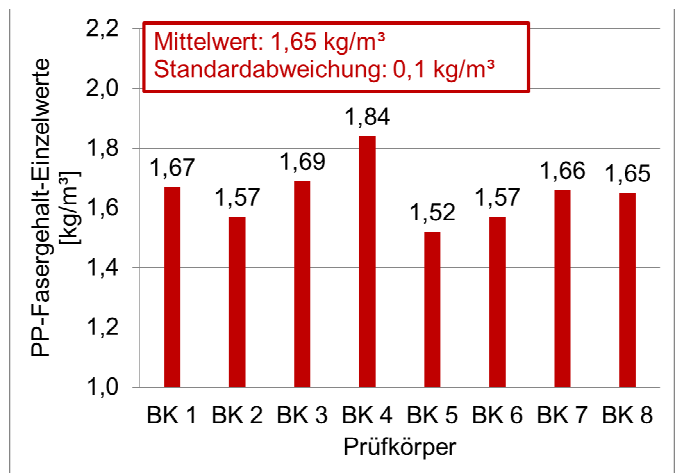


Bild 3: Rückgewonnene Werte des PP-Fasergehalte am Festbeton

Auch bei dem zweiten Pilotprojekt in Siegen (der Bühlentunnel in geschlossener Bauweise) wurde ein Verarbeitungsversuch durchgeführt. Hier wurde ein Wandabschnitt von ca. 4,0 m Höhe, Breite von ca. 2,2 m und einer Tiefe von 1,1 m unter Baustellenbedingungen hergestellt. Aus dem Festbeton der Wand wurden acht Bohrkern zur Rückgewinnung des PP-Fasergehaltes entnommen. Anhand der Rückgewinnungsversuche konnte der PP-Faserbeton in seiner Gesamtheit unter brandschutztechnischen Aspekten als funktionsfähig eingestuft werden. Allerdings war festzustellen, dass die PP-Fasergehalte über die Höhe schwankten: jeweils in der unteren Lage einer Lieferung war der wiedergefundene PP-Fasergehalt geringer als in der oberen Lage. Dies deutet darauf hin, dass bei der Herstellung der Probewand möglicherweise eine zu hohe Verdichtungs-

energie in das Bauteil eingebracht wurde, die zu einem Aufschwimmen der PP-Fasern führte.

Abgeleitet aus den Erfahrungen der beiden Pilotprojekte, aber auch aus weiteren Verarbeitungsversuchen von Tunnelbauprojekten mit PP-Faserbeton, Tunnel Hirschhagen und Katzenbergtunnel, wird empfohlen, mindestens sechs Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm aus der Musterwand zur Ermittlung des PP-Fasergehaltes am Festbeton zu entnehmen. Hierbei sind die Bohrkern in drei horizontalen Ebenen, verteilt auf zwei vertikale Ebenen, zu entnehmen (siehe Bild 4). Für die Rückgewinnungsversuche nach [7] sind die ersten sechs Zentimeter der Betondeckung zu verwenden.

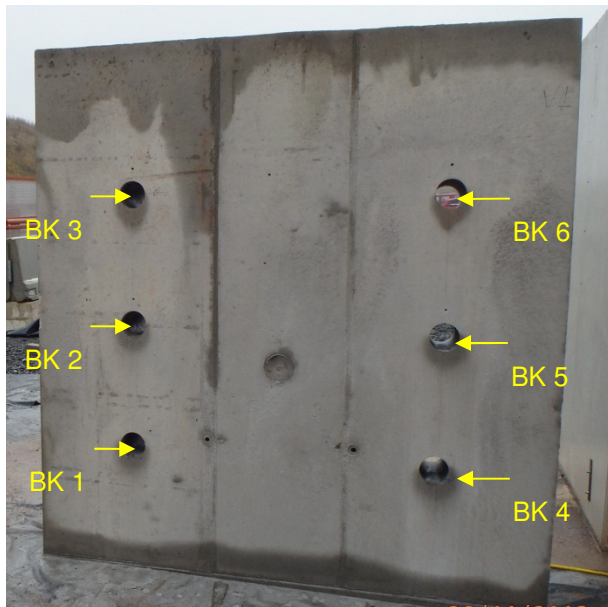


Bild 4: Verarbeitungsversuch – Tunnel Hirschhagen

## 9 Betontechnologische Praxiserfahrungen mit PP-Faserbeton

### 9.1 Westtangente Bautzen

Im Zuge des Neubaus der B96n / B6n Westtangente Bautzen war im Bereich der Querung B96n und Daimlerstraße ein Tunnel erforderlich. Dieses Bauwerk wurde als Tunnel in offener Bauweise mit PP-Faserbeton für das Rahmenbauwerk ausgeführt.

Der PP-Faserbeton sollte zum Einbauzeitpunkt eine Konsistenz nach DIN EN 12350-5 [6] von  $480 \pm 20$  mm, den aus brandschutztechnischen Gründen erforderlichen PP-Fasergehalt von  $2,0 \text{ kg/m}^3$  und eine homogene Faserverteilung aufweisen sowie die Festigkeitsanforderungen eines C35/45 erfüllen.

Im Rahmen der Erstprüfung wurde das Mischregime festgelegt. Die PP-Faserzugabe erfolgte im konkreten Fall anlagenspezifisch händisch auf das Trockengemisch. Die Trockenmischzeit betrug 30 s, die anschließende Nassmischzeit 60 s.

Die zum Einsatz gekommene PP-Faserbetonzusammensetzung kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2. Betonzusammensetzung Tunnel Bautzen

Druckfestigkeitsklasse	C35/45
CEM III/A 42,5 N	350 $\text{kg/m}^3$
Kalksteinmehl	50 $\text{kg/m}^3$
w/z-Wert	0,49
Fließmittel	ca. 1,7 % bez. auf Zementgehalt
Gesteinskörnung	Sieblinie AB 16 Rundkorn; quazitisch
Polypropylenfasern (l = 6 mm; 2,8 dtex)	2,0 $\text{kg/m}^3$

Der PP-Faserbeton wurde auf der Baustelle durch die ständige Betonprüfstelle hinsichtlich Konsistenz, PP-Fasergehalt, Betontemperatur und Frischbetonrohddichte geprüft. Zusätzlich wurde an drei Betoniertagen die Blutneigung mit dem Eimerverfahren ermittelt. In Bild 5 werden die ermittelten Blutwassermengen dargestellt. Alle ermittelten Blutwassermengen unterschreiten den empfohlenen Maximalwert von  $1,0 \text{ kg/m}^3$  gemäß DBV-Merkblatt [8] für die Charakteristik A. Die Entnahme des Betons für die Prüfungen erfolgte vor der Pumpe.

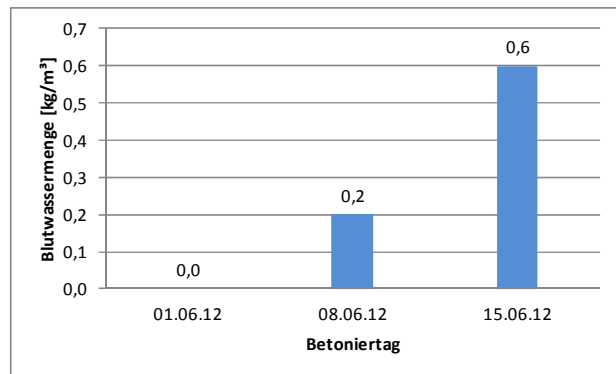


Bild 5: Blutneigung – Baustelle

Die PP-Faserbetone wiesen überwiegend die geforderte Konsistenz auf. Lediglich 4 % der gelieferten Betone waren etwas fließfähiger. Die Abweichungen in der Konsistenz wirkten sich aber nicht negativ auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bzw. das Erscheinungsbild der Betonoberfläche aus. Weitere Differenzen gab es in einigen wenigen Fällen bei der Rohddichte. Bei diesem Kennwert waren im QS-Plan keine Grenzen festgelegt worden, allerdings sollte der gemessene Wert mit dem der Erstprüfung korrelieren. In wenigen Fällen wurden deutlich niedrigere Rohdichten ermittelt. Allerdings konnte auch an diesen Betonen die erforderliche Festigkeit nachgewiesen werden.

Eine Übersicht über die Prüfergebnisse zu den Ausbreitmaßen im Transportbetonwerk und auf der Baustelle zeigen die Bilder 6 bis 8. Im Bild 6 wird exemplarisch das Ergebnis einer Ausbreitmaßprüfung gezeigt. So

wohl mittels des Eimerverfahrens als auch nach visueller Eischätzung des Frischbetons wurde kein Bluten des Frischbetons festgestellt.

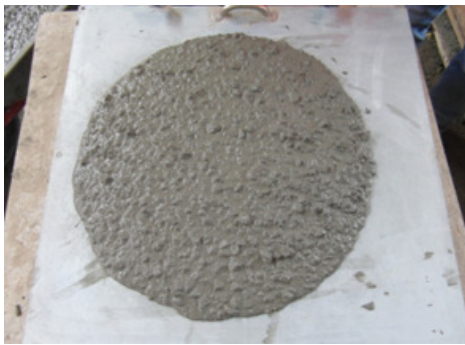


Bild 6: Ausbreitmaß, a= 490 mm

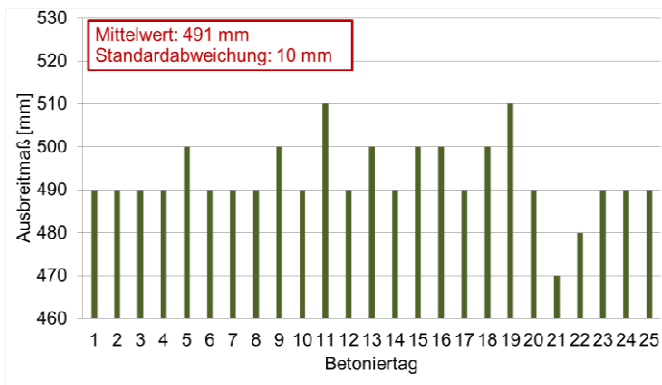


Bild 7: Mittelwerte Ausbreitmaß je Betoniertag – Transportbetonwerk

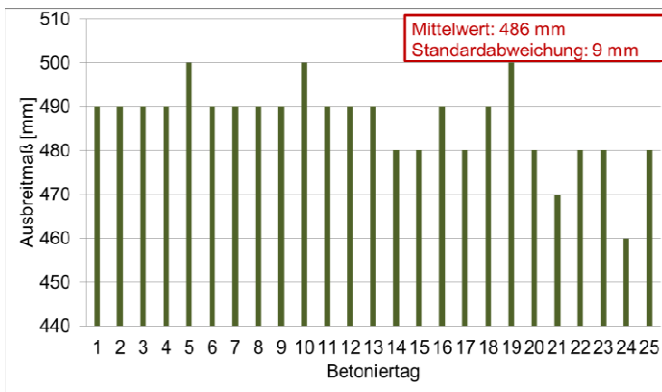


Bild 8: Mittelwerte Ausbreitmaß je Betoniertag - Baustelle

Wie in den obigen Grafiken zu erkennen ist, verlor der PP-Faserbeton durch den Transport im Mittel 10 mm an Konsistenz. Der maximal ermittelte Konsistenzrückgang lag bei 30 mm. Dieser Extremalwert wurde nur einmal gemessen. Die Transportzeit des PP-Faserbetons im Fahrmischer betrug etwa 30 min. Der PP-Faserbeton wurde mit langsam drehender Trommel transportiert.

Die Ergebnisse der Rückgewinnung der PP-Fasern im Frischbeton wird in Bild 9 dargestellt. Es wird deutlich, dass es über die gesamte Bauzeit keine Unterschreitung des kritischen PP-Fasergehaltes von 95 %

(1,9 kg/m<sup>3</sup>) beim Mittelwert gab. Das gleiche trifft auf die Einzelwerte zu, wo kein Ergebnis unter der Grenze von 90 % lag.

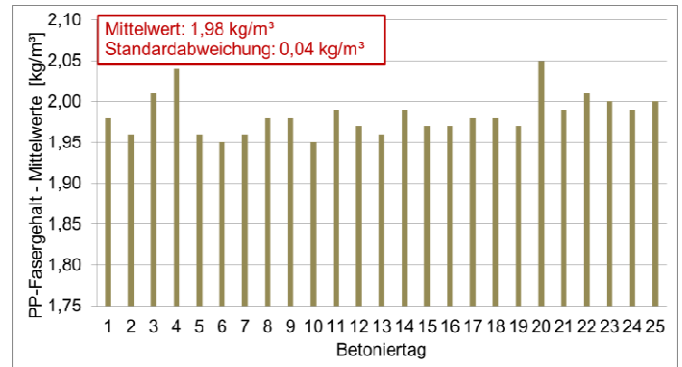


Bild 9: Mittelwerte des PP-Fasergehalte – Baustelle

Bei Projekten, bei den besonders massive Bauteildicken im Sinne von [14] vorhanden sind, muss besonderes Augenmerk bei der Wahl der Betonzusammensetzung auf eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung im Bauteil geachtet werden. In dem abgeschlossenen Projekt in Bautzen, aber auch bei den aktuellen Projekten Katzenbergtunnel und BAB A66/A661 Autobahndreieck Erlenbruch wurde dem genüge getragen, indem man als Zement einen CEM III/A 42,5 N verwendet.

## 9.2 Bühlertunnel in Siegen

Im Zuge des Neubaus der B54/B62n (Hüttentalstraße) ist südwestlich der Stadt Siegen, im Ortsteil Niederschelden, der Bühlertunnel gebaut worden. Das Bauwerk untertunnelt den Bühlrücken auf einer Gesamtlänge von 525 m. Ausgeführt wurde der Tunnel als Gegenverkehrstunnel. Im gesamten Bauwerk wurden dem Beton für die offene wie auch für die Deckel- und bergmännische Bauweise zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens PP-Fasern zugegeben.

Bei der Wahl der Art und Menge der zuzugebenden PP-Fasern sollten die Hinweise zu ZTV-ING [1] beachtet werden, d.h., ein PP-Fasergehalt von 2,0 kg/m<sup>3</sup> sowie eine PP-Faser mit einer Länge von 6 mm und einer Dicke zwischen 16 und 20 µm sollte eingesetzt werden. Seitens des AN wurde allerdings von den Angaben im Hinweisblatt [1] abgewichen und ein geringerer PP-Fasergehalt (1,4 kg/m<sup>3</sup>) unter Verwendung einer PP-Faser mit einer Länge von 6 mm und einer Dicke von 15,4 µm (1,7 dtex) angesetzt. Um die Gleichwertigkeit der PP-Faser - sowie des damit hergestellten PP-Faserbetons - gegenüber einer PP-Faser gemäß [1] hinsichtlich des Brand- und Abplatzverhaltens nachzuweisen, wurden zusätzliche Brandversuche erforderlich. Nach erfolgreicher Durchführung der Brandversuche, der Erstprüfung sowie von großformatigen Verarbeitungsversuchen wurde der Beton mit einem PP-Fasergehalt von 1,4 kg/m<sup>3</sup> für den Beton für die offene sowie Deckel- und bergmännische Bauweise des Projekts BW 53 Bühlertunnel festgelegt und daraufhin die Qualitätssicherungspläne (QS-Pläne) abgestimmt.

Auf der Baustelle wurde der PP-Faserbeton u.a. hinsichtlich Konsistenz, PP-Fasergehalt, Betontemperatur und Frischbetonrohddichte geprüft. Zusätzlich wurde exemplarisch die Blutneigung mit dem Eimerverfahren und parallel mit einer Betonfilterpresse (siehe Bild 11) ermittelt. Der PP-Faserbeton zeigte mit der gewählten Zusammensetzung (siehe Tabelle 3) einen stabilen Zusammenhalt (vergleiche Bild 10). Die Entnahme des Betons für die Prüfungen erfolgte vor der Pumpe.

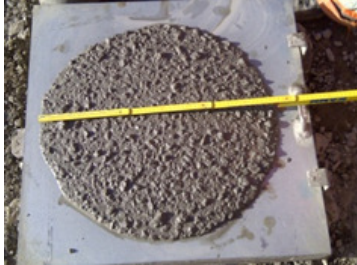


Bild 10: Ausbreitmaß  
a = 570 mm



Bild 11: Betonfilterpresse

Tabelle 3. Betonzusammensetzung Bühlertunnel

Druckfestigkeitsklasse	C30/37
CEM II/A-LL 42,5 N	350 kg/m <sup>3</sup>
Flugasche	130 kg/m <sup>3</sup>
(w/z) <sub>equ</sub> -Wert	0,49
Fließmittel	ca. 1,4 % bez. auf Zementgehalt
Gesteinskörnung	Sieblinie AB 16 gebrochenes Material; kalzitisch
Polypropylenfasern (l = 6 mm; 1,7 dtex)	1,4 kg/m <sup>3</sup>

Wie in den folgenden Grafiken zu erkennen ist, verlor der PP-Faserbeton durch den Transport im Mittel 30 mm an Konsistenz. Die Transportzeit des PP-Faserbetons im Fahrmischer betrug etwa 45 min.

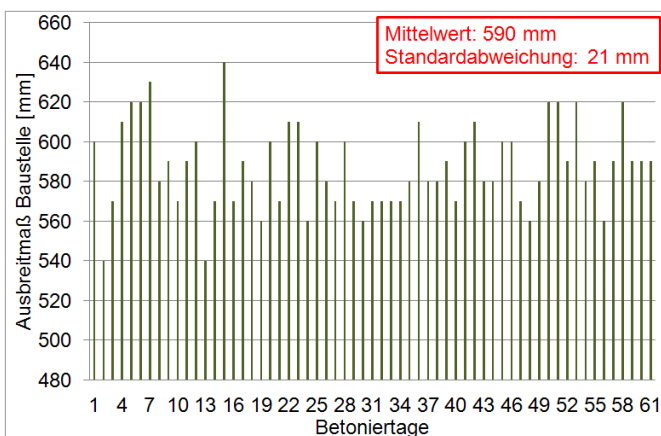


Bild 12: Mittelwerte des Ausbreitmaßes je Betoniertag – Transportbetonwerk

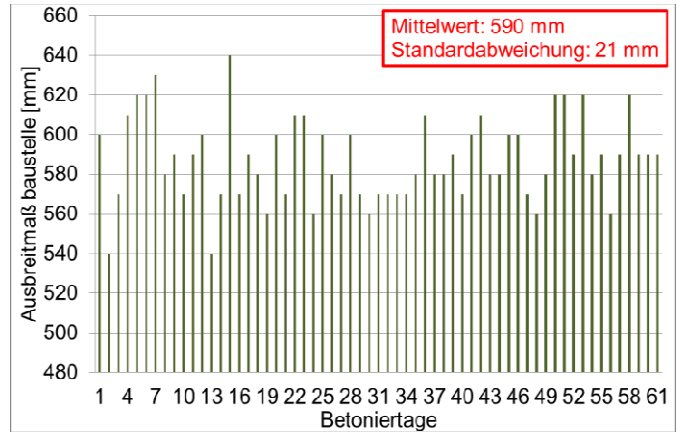


Bild 13: Mittelwerte des Ausbreitmaßes – Baustelle

Die Ergebnisse zur Rückgewinnung der PP-Fasern im Frischbeton sind in Bild 14 dargestellt. Im Gegensatz zum Projekt in Bautzen wurde der Grenzwert des kritischen PP-Fasergehaltes von 95 % (1,3 kg/m<sup>3</sup>) beim Mittelwert während der Bauzeit zweimal unterschritten. Das Gleiche trifft auch auf die Einzelwerte zu, wo zweimal die Einzelwerte unterhalb der Grenze von 90 % lagen.

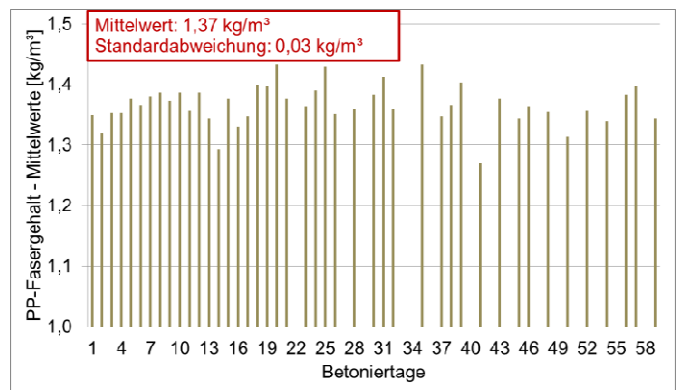


Bild 14: Mittelwerte des PP-Fasergehaltes – Baustelle

Ein Beispiel für einen PP-Faserbeton mit 2 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern für die geschlossene Bauweise stellt derzeit das Bauvorhaben BAB A44 Tunnel Hirschhagen dar. Die Zusammensetzung für den Innenschalenbeton des Tunnels Hirschhagen zeigt Tabelle 4. Mit dieser Zusammensetzung wird zielsicher eine Konsistenzklasse im oberen Bereich von F5 erreicht.

Tabelle 4. Betonzusammensetzung Tunnel Hirschhagen

Druckfestigkeitsklasse	C35/45
CEM II/AS 42,5 R	390 kg/m <sup>3</sup>
Kalksteinmehl	80 kg/m <sup>3</sup>
w/z-Wert	0,50
Fließmittel	1,4 % bez. auf Zement
Gesteinskörnung	Sieblinie AB 16 gebrochenes Material; quarzitisch
Polypropylenfasern (l = 6 mm; 2,8 dtex)	2,0 kg/m <sup>3</sup>

## 10 Zusammenfassung

Mit den gemachten Erfahrungen im Rahmen der Pilotanwendungen am Tunnel Westtangente Bautzen und Bühlertunnel in Siegen, aber auch bei den Projekten Luise-Kieselbach-Platz in München, Tunnel Hirschhagen an der BAB A44 und dem Katzenbergtunnel bei Würzburg, konnte gezeigt werden, dass die grundsätzlich positiven Erfahrungen mit PP-Faserbeton aus dem Ausland auch für den Straßentunnelbau in Deutschland übertragen werden können. Die spezifischen Anforderungen an den PP-Faserbeton für Straßentunnel in Deutschland sind dabei:

- Verwendbarkeitsnachweis für die PP-Fasern nach DIN EN 14889-2 [5] und im Rahmen einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung, die den grundsätzlichen Nachweis deren Wirksamkeit zur Verbesserung des Brandverhaltens bestätigt.
- Betonzusammensetzung i.d.R. gemäß den Expositionsclassen XF2 und XD2 bzw. XD1 nach DIN 1045-2 [12] und ZTV-ING [1]. Dies bedingt einen höchstzulässigen Wasserzementwert von 0,50.
- Wenn eine andere PP-Fasergeometrie oder -dosierung als in [13] angegeben eingesetzt werden soll, ist die Wirksamkeit der PP-Fasern und die Eignung des damit hergestellten PP-Faserbetons zur Verbesserung des Brand- und Abplatzverhaltens unter Einwirkung der ZTV-ING-Temperatur-Zeit-Kurve anhand von statisch-belasteten Brandversuchen nachzuweisen.

Mit den bislang in Deutschland gemachten Erfahrungen mit Beton unter Verwendung 2,0 kg/m<sup>3</sup> PP-Fasern (Durchmesser 0,016 bis 0,020 mm und Länge 6 mm) im Tunnel Bautzen konnte gezeigt werden, dass eine Konsistenz bis zu 500 mm Ausbreitmaß in der Baupraxis mit sehr guten Ergebnissen am Frisch- und Festbeton realisiert werden kann. In geschlossener Bauweise wird bei dem Projekt Tunnel Hirschhagen bei gleicher PP-Fasergeometrie und gleichem -gehalt eine Konsistenzklasse im oberen Bereich von F5 zielsicher erreicht, ohne dass der Beton zum Bluten neigt.

Derzeit geht man in Deutschland davon aus, dass ZTV-ING-konforme PP-Faserbetone sich im Langzeitverhalten, z.B. im Sprühnebelbereich von taumittelbeanspruchten Bauteilen, ähnlich verhalten, wie faserlose ZTV-ING-konforme Betone. Diese Annahme ist zukünftig mittels Langzeituntersuchungen zu bestätigen. Ein erstes Langzeitmonitoring ist im Katzenbergtunnel, BAB A 3, geplant. Auch sind bekannte Prüfverfahren zur Dauerhaftigkeitsuntersuchung von Beton, z.B. modifiziertes CDF-Verfahren, zu validieren ggf. weiterzuentwickeln. Die Weiterentwicklung bzw. Validierung der Prüfverfahren betrifft auch andere Eigenschaften. Dies sind z.B. zeitaufwendige Prüfverfahren, wie die Bestimmung des PP-Fasergehaltes und der Blutneigung. Es sollte zukünftig z.B. untersucht werden, ob neben der Bestimmung der Blutneigung nach [8], auch Alternativverfahren, wie die Bestimmung der Menge an Wasserabsonderung mittels Filterpresse, sinnvoll sind.

## Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 Tunnelbau inkl. Hinweisblätter, Ausgabe 08/2013
- [2] Dehn, F. et. al.: Grundsätzliche Überlegungen zur Brandprüfung von Tunnelbauteilen, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/2009, S. 869 – 875
- [3] Dehn, F. et al.: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“, Heft B 73, Wirtschaftsverlag NW GmbH, Bremerhaven, 2010
- [4] Heunisch, M. et. al.: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau. Teil 1: Anwendung von Selbstverdichtendem Beton (SVB) im Tunnelbau. Teil 2: Brandschutzverhalten von Selbstverdichtendem Beton (SVB) im Straßentunnelbau. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“, Heft B 63, Wirtschaftsverlag NW GmbH, Bremerhaven, 2008
- [5] DIN EN 14889-2: Fasern für Beton - Teil 2: Polymerfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität; Ausgabe 2006-11
- [6] DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß, Ausgabe 2009-08
- [7] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB): Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“, Ausgabe 2005-07
- [8] DBV-Merkblatt Besondere Eigenschaften zur Prüfung von Frischbeton. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV), Berlin, 2007-06
- [9] Friebe et al.: Erfolgreicher Einsatz von PP-Faserbeton am Tunnel Westtangente Bautzen. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2014. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. 10.2013
- [10] DIN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Ausgabe 2001-07 + Berichtigung 1, Ausgabe 2004-10 + Berichtigung 2, Ausgabe 2005-09
- [11] DIN-Fachbericht 100: Beton - Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Ausgabe 2010-03
- [12] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Ausgabe 2008-08
- [13] Leitfaden für die Verwendung von PP-Faserbeton für den baulichen Brandschutz im Tunnelbau. 2014
- [14] DAfStb-Richtlinie - Massige Bauteile aus Beton - Teil 1: Ergänzungen zu DIN 1045-1 - Teil 2: Änderungen und Ergänzungen zu DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 - Teil 3: Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-3. Ausgabe 2010-04