



SIKA FASERBETON

HANDBUCH

BUILDING TRUST



Herausgeber
Sika Schweiz AG
Tüffenwies 16
CH-8048 Zürich

Autoren
David Taylor Beng, Sika Services AG
Dr. Carsten Rieger, Sika Services AG
Trevor Atkinson, Sika Europe Management AG (im Ruhestand)
Ayça Kavas, Produktingenieurin, Technical Departement, Sika Schweiz AG
(Übersetzung und Domesticizierung)

Layout
Sika Schweiz AG
Marketing & Kommunikation

© 2024 Sika AG
Alle Rechte vorbehalten

Sika Faserbeton Handbuch

VORWORT

Dieses Handbuch soll eine Anleitung zu den praktischen und technischen Vorteilen der Verwendung von Faserverstärkung in einer Vielzahl von Betonanwendungen geben.

Beton gilt nach Wasser als die am häufigsten verwendete Substanz auf der Erde und zudem als äusserst kosteneffizientes, vielseitiges Material, das für den Wohnungsbau, Gebäude für das Gesundheitswesen, das Bildungswesen sowie in den Bereichen Verkehr, Energieversorgung, Industrie und vielen weiteren Anwendungen eingesetzt wird.

Ohne Beton wäre die Errichtung vieler Bauwerke schlichtweg unmöglich. Ungeachtet seiner Vielseitigkeit ist Beton mit einigen Nachteilen behaftet, die sich aus seiner Zusammensetzung ergeben. Wenngleich er eine sehr hohe Druckfestigkeit aufweist, hat Beton nach allgemein anerkannten technischen Standards eine deutlich geringere Zugfestigkeit und gilt als relativ spröde und wenig biegezugfest. Darüber hinaus neigt Beton sowohl im plastischen (frühen) als auch im ausgehärteten (langfristigen) Zustand zu Rissen.

Frühschwindrisse sind definiert als Risse, die sich im Allgemeinen innerhalb der ersten Stunden und Tage nach dem Einbringen des Betons entwickeln und plastisches Schwinden und plastische Setzungsrisse umfassen. Die langfristige Rissbildung wird hingegen zum Teil durch das Schwinden verursacht, das sich über mehrere Monate, gegebenenfalls sogar Jahre der anschliessenden Trocknung vollzieht. In beiden Fällen können diese Risse die Gesamtintegrität des Betons gefährden und verhindern, dass er seine maximale Leistungsfähigkeit beibehält oder gar erreicht.

Die Einführung der Faserverstärkung verbessert nicht nur die Biegezugfestigkeit und Zähigkeit des Betons, sondern bietet auch einen aussergewöhnlichen Widerstand gegen frühe und Langzeitrisse, so dass der Beton eine lange Haltbarkeit erreichen kann.

Wenngleich Faserbeton in der Bau- und Transportbetonindustrie inzwischen weithin verbreitet ist, müssen noch Viele von seinen praktischen, technischen und wirtschaftlichen Vorteilen überzeugt werden. Vielleicht betrachten einige die Faserverstärkung immer noch als eine neue und unerprobte Technologie, auch wenn sie eigentlich schon seit vielen Jahrhunderten verwendet wird. In der Tat

waren unsere Vorfahren die ersten, die eine ähnliche Technik anwandten, indem sie Stroh in Tonblöcke und Tierhaare in Gips/Mörtel einarbeiteten, um Risse während des Trocknungsprozesses zu verhindern.

Die Fasertechnologie wurde in den 1950er Jahren auf Beton angewandt und basierte auf der Idee, die Stahlbewehrung in den Betonmischer zu geben, anstatt sie in der Schalung zu befestigen. Die Stahlbewehrung wurde in separate, diskontinuierliche Stücke zerschnitten, damit sie in den Mischer passte, was als Stahlfaserbewehrung bekannt wurde.

Seit den 1950er Jahren wurden zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt, um neue Arten von Faserverstärkungen zu entwickeln. Die auf dem heutigen Markt am häufigsten verwendeten Materialien für Fasern in Beton sind Stahl, Polypropylen und weitere Materialien wie Glas und natürlich vorkommende Materialien wie Zellulose.

Erfreulicherweise gibt es inzwischen mehr Bemessungsnormen, die es erlauben, die herkömmliche Stahlbewehrung durch Faserbeton zu ersetzen, und zahlreiche Online-Dokumente behandeln die Vorzüge von Faserbeton, was die Akzeptanz bei Ingenieuren, Bauunternehmen und Eigentümern erhöht. In den Bauingenieurschulen wird vor allem die herkömmliche Methode der Bewehrung von Beton mit Bewehrungsstäben gelehrt, aber es gibt zweifellos ein wachsendes Interesse und eine zunehmende Forschung in Bezug auf die Vorzüge von Faserbeton.

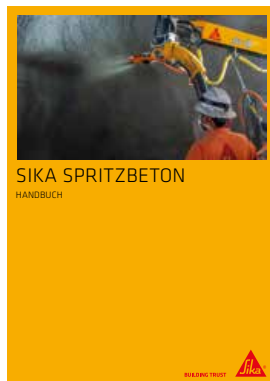
Gleichwohl ist der Einsatz von Faserbeton noch gering, was bedeutet, dass der Markt für Faserbeton ein enormes Wachstumspotenzial aufweist.

Mit diesem Handbuch erhält der Leser einen Leitfaden zu den wichtigsten Themen im Zusammenhang mit Faserbeton. Damit sollen Fragen zur Auswahl, zum Nutzen und zur Verwendung von Fasern beantwortet werden, ohne dabei zu sehr in die jeweiligen wissenschaftlichen Details zu gehen.

Ebenfalls in dieser Reihe von Sika Handbüchern erhältlich:



Sika Beton-Handbuch



Sika Spritzbeton-Handbuch

INHALT

VORWORT	2
1 GRUNDLAGEN ZUM FASERBETON	7
1.1 Was ist Faserbeton?	7
1.2 Eigenschaften der Fasern	8
1.2.1 Materialien	9
1.2.2 Geometrie	10
1.2.3 Form	11
1.2.4 Verankerung	12
1.2.5 Verteilung	14
1.2.6 Zementmatrix	16
2 NACHHALTIGKEIT	19
2.1 Nachhaltigkeit	19
2.2 Lebenszyklusanalyse	20
2.3 Überschüssiges Material	22
2.4 Dauerhaftigkeit	23
2.5 Verbände	24
2.5.1 FSHBZ	24
2.5.2 EFCA	24
2.5.3 MSFA	24
2.5.4 FRCA	24
3 NORMEN	25
3.1 Orientierungshilfen	26
3.2 Zertifizierung	28
3.2.1 EN 14889: Teil 1 und 2	28
4 FASEREIGENSCHAFTEN	33
4.1 Terminologie	33
4.2 Klassifizierung	35
4.3 Physikalische Eigenschaften	35
4.3.1 Länge	35
4.3.2 Durchmesser	35
4.3.3 Querschnittsfläche	36
4.3.4 Dichte	36
4.4 Festigkeit	37
4.4.1 Zugfestigkeit	37
4.4.2 E-Modul	38
4.4.3 Bruchdehnung	39
4.4.4 Kriechen	39
4.5 Chemische Eigenschaften von synthetischen Fasern	39
4.5.1 Temperaturen	39

4.5.2	Feuchtigkeit / Absorption	40
4.5.3	Chemikalienbeständigkeit	40
4.5.4	UV-Beständigkeit	40
4.5.5	Tensidbeschichtungen	40

5	FASERTYPEN	41
----------	-------------------	-----------

5.1	Mikrofasern	41
------------	--------------------	-----------

5.1.1	Arten von synthetischen Mikrofasern	42
-------	-------------------------------------	----

5.1.2	Auswirkungen auf Frischbeton	42
-------	------------------------------	----

5.1.3	Einfluss auf die Rissbildung	44
-------	------------------------------	----

5.2	Vorteile von PP-Mikrofasern	45
------------	------------------------------------	-----------

5.2.1	Verringerung der Senkungsrisse von Kunststoffen	45
-------	---	----

5.2.2	Verringerung der plastischen Schwindrissbildung	46
-------	---	----

5.2.3	Widerstandsfähigkeit gegen explosionsartige Abplatzungen	47
-------	--	----

5.2.4	Durchlässigkeit vermindern	50
-------	----------------------------	----

5.2.5	Abriebfestigkeit	50
-------	------------------	----

5.2.6	Schlag-/Splitterfestigkeit	50
-------	----------------------------	----

5.3	PP-Makrofasern	51
------------	-----------------------	-----------

5.3.1	Plastische Schwindrissbildung	52
-------	-------------------------------	----

5.3.2	Auswirkungen auf Frischbeton	52
-------	------------------------------	----

5.4	Makrofasern aus Stahl	53
------------	------------------------------	-----------

5.4.1	Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften eines Referenzbetons	54
-------	--	----

5.4.2	Auswirkungen auf die Festigkeit eines Referenzbetons	54
-------	--	----

5.5	Vorteile von Makrofasern	55
------------	---------------------------------	-----------

5.5.1	Erhöhung der mechanischen Festigkeit	55
-------	--------------------------------------	----

5.5.2	Erhöhung der Duktilität des Betons	56
-------	------------------------------------	----

5.5.3	Ersetzen / Teilersatz der traditionellen Bewehrung	56
-------	--	----

5.5.4	Verkürzung der Bauzeit	56
-------	------------------------	----

5.6	Leitfaden zur Anwendung von Fasern	57
-----	------------------------------------	----

5.7	Minimale Faserdosierung	58
-----	-------------------------	----

6	FASERBETON	61
----------	-------------------	-----------

6.1	Start	61
-----	-------	----

6.2	Philosophie	62
------------	--------------------	-----------

6.2.1	Entfestigung und Verfestigung	63
-------	-------------------------------	----

6.3	Mechanische Eigenschaften	66
------------	----------------------------------	-----------

6.3.1	Statisch wirksam und statisch nicht wirksam	66
-------	---	----

6.3.2	Statisch wirksam nach Europäischer Norm	66
-------	---	----

6.4	Bemessungskonzepte	67
------------	---------------------------	-----------

6.4.1	Bemessung von Stahlbeton	67
-------	--------------------------	----

6.5	SikaFiber® Software	70
-----	---------------------	----

INHALT

7	ANWENDUNG VON FASERBETON	75
7.1	Fundament-/Bodenplatten	75
7.2	Tunnelauskleidungen	79
7.3	Felssicherung	84
7.4	Herstellung von Betonfertigteilen	90
7.5	Pumpbeton	92
7.6	Ultrahochleistungsfaserbeton	93
8	TESTS	95
8.1	Balkenprüfung	95
8.1.1	Europäische Balkenprüfung	95
8.2	Energieabsorption	113
8.2.1	Prüfung quadratischer Platten	114
8.3	Faserfestigkeit	117
9	VERPACKUNG UND DOSIERUNG	121
9.1	Verpackung	121
9.2	Dosierung	124
9.2.1	Manuelle Dosierung	124
9.2.2	Automatische Dosieranlagen	124
10	OBERFLÄCHENGÜTE DES BETONS	127
10.1	Gute Betonpraxis	127
10.2	Methoden der Endbearbeitung	129
11	INDEX	132

1 GRUNDLAGEN ZUM FASERBETON

1.1 WAS IST FASERBETON?

Faserbeton ist ein Verbundwerkstoff, der Beton und diskontinuierliche, separate Fasern kombiniert, die gleichmässig im Beton verteilt sind, um ein drei-dimensionales Bewehrungssystem zu bilden. Die Zugabe von Fasern zu Beton und anderen zementgebundenen Materialien wie Mörtel und Putz verbessert viele Materialeigenschaften, darunter:

- Duktilität
- Zähigkeit
- Rissfestigkeit
- Festigkeit
- Verringerung explosionsartiger Abplatzungen
- Verminderte Durchlässigkeit
- Schlag- / Splitterfestigkeit
- Ermüdungsfestigkeit



Die für Faserbeton hauptsächlich verwendeten Materialien sind Stahl, Polypropylen, Glas und Naturfasern.

Auf dem heutigen Baumarkt ist Faserbeton oft die erste Wahl für viele wichtige Anwendungen, wie z. B. Fundamentplatten, Stahlverbunddecken und Tunnelauskleidungen. Es wird häufig als kostengünstige, einfach zu verwendende Alternative zu herkömmlicher Stahlbewehrung oder zur Verbesserung anderer Eigenschaften eingesetzt.

Die Fasern werden dem Beton / Mörtel entweder in der Dosieranlage oder auf der Baustelle zugesetzt. Wenn Faserbeton als Ersatz für Stahlbewehrung verwendet wird, entfällt die Notwendigkeit, Stahlstäbe oder -matten zu bestellen und gleichzeitig diese sperrigen Materialien auf der Baustelle zu lagern. Faserbeton verringert auch den arbeitsintensiven Prozess des Schneidens, Verlegens und Befestigens der Bewehrung. Insgesamt ist der Betoneinbau mit Fasern schneller, sicherer und kostengünstiger.

Faserbeton ist für Bauherren von Infrastrukturen von wachsendem Interesse, um eine höhere Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit des Betons zu erreichen, und immer mehr Projekte gehen zur Verwendung von Hochleistungsbeton (HPC) und Ultrahochleistungsbeton (UHPC) über.

Die Verwendung von HPC / UHPC birgt ein zusätzliches Risiko explosionsartiger Abplatzungen im Falle eines schweren Brandes. Insbesondere in Tunneln wurden Polypropylen-Mikrofasern als wirksame Massnahme zur Verringerung gefährlicher explosiver Abplatzungen erkannt. Dieses wachsende Interesse hat viele Ingenieure dazu veranlasst, die verbesserten Dauerhaftigkeitsvorteile von Faserbeton entweder in Kombination mit herkömmlicher Stahlbewehrung oder als Ersatz für bestimmte Anwendungen ernsthaft in Betracht zu ziehen.

1.2 EIGENSCHAFTEN DER FASERN

Es gibt mehrere grundlegende Eigenschaften, die das Verhalten von Fasern in Beton beeinflussen.

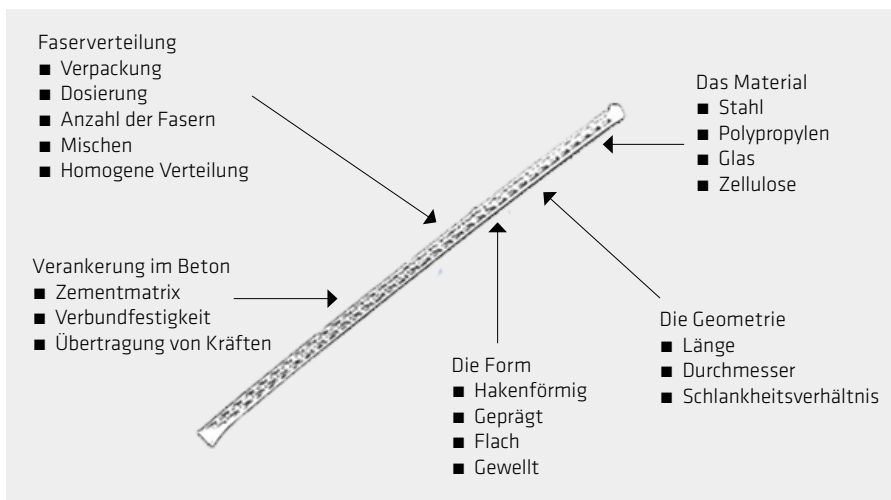


Abb. 1.2: Die grundlegenden Eigenschaften einer Faser, welche die Leistung bei Faserbeton bestimmen.

Es ist dabei wichtig zu verstehen, dass die Leistung von Faserbeton nicht nur von einer Fasereigenschaft, wie der Zugfestigkeit, abhängt, sondern auch von der Qualität des Zementleims und der Anzahl der Fasern je Volumeneinheit des Materials. Zusammengefasst kann man sagen, die Leistung des Verbundwerkstoffs und nicht einfach eine Fasereigenschaft sind die entscheidenden Kriterien.

1.2.1 MATERIALIEN

Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl von Fasern aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Geometrien. Die am häufigsten verwendeten Materialien für Fasern in Beton sind Stahl, Polyolefin (Polypropylen, Polyethylen oder eine Kombination daraus) oder andere synthetische Materialien, Glas (alkalibeständig) und natürliche Materialien wie Zellulose. Die wichtigsten Materialien, auf die in diesem Handbuch Bezug genommen wird, sind synthetische Polypropylenfasern und Stahl.

Table 1.2.1.1: Haupteigenschaften von Materialien, die üblicherweise zur Herstellung von Fasern in Beton verwendet werden.

Fasermaterial	E-Modul [kN / mm ²]	Zugfestigkeit [N / mm ²]	Bruchdehnung [%]	Dichte [g / cm ³]
Stahl (normal)	210	400 - 2'500	3 - 4	7.8
Stahl (nicht korrosiv)	170	2'100	3	7.8
Polypropylen (PP)	1 - 8	165 - 600	20	0.9 - 0.91
Polyvinylalkohol (PVA)	30	880 - 1'600	6	1.31
Naturbelassener Sisal	9 - 38	400 - 700	4	1.3 - 1.5
Pflanzliche Fasern	4 - 40	0 - 1'000	5 - 10	1.5
Glasfasern	80	2'500	5	2.7
Kohlenstofffasern	300	450 - 400	1.5	1.7

Polypropylen wird manchmal auch als Polyolefin bezeichnet. Polyolefine ist ein allgemeiner Begriff für Polypropylene und Polyethylene. Nach EN 14889-2 ist ein Polyolefin ein langkettiges synthetisches Polymer aus Ethylen-, Propylen- oder anderen Olefineinheiten (Monomeren) besteht.

Table 1.2.1.2: Haupteigenschaften des Fasermatrixmaterials

Matrixmaterial	E-Modul [kN / mm ²]	Zugfestigkeit [kN / mm ²]	Bruchdehnung [%]	Dichte [g / cm ³]
Zementstein	7 - 28	< 8	0.04	2.0
Mörtel	20 - 45	< 6	0.01	2.3
Beton	20 - 45	< 4	0.01	2.4

Grundsätzlich sollte das Material, das zur Verstärkung eines anderen Materials verwendet wird, einen höheren Elastizitätsmodul, eine höhere Zugfestigkeit und eine höhere Bruchdehnung aufweisen. Bei Faserbeton muss dies jedoch aus den folgenden Gründen nicht unbedingt der Fall sein:

- Die für normalen Faserbeton verwendeten Faserdosierungen sind im Allgemeinen zu gering, um die Zugfestigkeit oder den Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffs zu beeinflussen.
- Die Fasern wirken in verschiedenen Stadien des Aushärtungsprozesses des Betons. Der Beton hat in den ersten Stunden nach dem Einbau eine viel geringere Zugfestigkeit und einen viel geringeren Elastizitätsmodul als nach einigen Tagen.
- Fasern für Beton sind so konzipiert, dass sie aus der Betonmatrix herausgezogen werden und den Widerstand des Faserbetons im gerissenen Zustand erhöhen.

1.2.2 GEOMETRIE



Die Geometrie der Faser spielt eine wichtige Rolle für die Verankerung der Faser, insbesondere das Verhältnis zwischen der Länge und dem Durchmesser der Faser, das so genannte Schlankheitsverhältnis.

$$\text{Schlankheitsverhältnis} = \frac{l_f}{d_f}$$

Die Erfahrung zeigt, dass Schlankheitsverhältnisse zwischen 40 und 80 eine gute Leistung erbringen.

Das Schlankheitsverhältnis ist ein wichtiger Faktor für das Verhalten der Fasern im frischen und im ausgehärteten Zustand des Betons. Beispielsweise würde eine sehr lange und dünne Faser (hohes Schlankheitsverhältnis) im Allgemeinen eine bessere Leistung im Festbeton aufweisen, da sie eine grössere eingebettete Länge und mehr Fasern über dem Riss hat. Dies kann jedoch zu Schwierigkeiten bei der Durchmischung der Fasern führen und sie können dazu neigen, sich zu verklumpen und somit eine schlechte Verteilung zur Folge haben. Das andere Extrem wären Fasern mit einem zu kleinen Schlankheitsverhältnis. So kann beispielsweise eine sehr kurze und dicke Faser zwar eine gute Verteilung im Zementleim aufweisen, sich aber nicht gut in die Matrix einbetten, so dass die Leistung im ausgehärteten Zustand des Betons beeinträchtigt wäre.

1.2.3 FORM

Viele verschiedene Arten von Fasern können für Faserbeton verwendet werden, die wichtigsten sind:

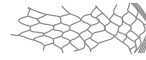
1. Synthetische Mikrofasern

- Gerade Monofilamentfasern
- Fibrillierte Fasern

Polypropylen (PP) Monofilament-Mikrofasern



Polypropylen (PP) fibrilliert



2. Synthetische Makrofasern

- Gerade geprägte steife Fasern
- Gewellte steife Fasern mit glatter Oberfläche
- Weiche, flache oder ovale Fasern
- Weiche, dünne, gedrehte Fasern

Geprägte PP-Makrofasern



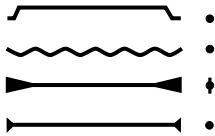
Gewellte PP-Makrofasern



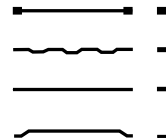
3. Stahl-Makrofasern

- Hakenförmiges Ende
- Flaches Ende
- Wellenförmig (Kontinuierlich verformt)
- Gerade Fasern

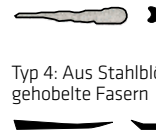
Typ 1:
Gezogener Draht



Typ 2:
Aus Blech
geschnittene Fasern



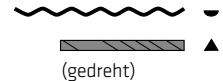
Typ 3:
Aus Schmelzglas
extrahierte Fasern



Typ 4: Aus Stahlblöcken
gehobelte Fasern



Typ 5:
Modifizierter gezogener
Draht



(gedreht)

1.2.4 VERANKERUNG

Um Kräfte zwischen dem gerissenen Beton und den Fasern zu übertragen, ist es wichtig, dass eine ausreichende Verankerung oder Bindung zwischen den Fasern und dem Matrixmaterial vorhanden ist.

Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen:

- eine raue, geprägte Oberfläche
- starre wellenförmige Formen
- weich und flexibel
- hakenförmiges Ende

Auf die Oberfläche der PP-Fasern kann ein chemischer Haftverbund aufgebracht werden, um die chemische Wechselwirkung mit dem Beton zu fördern. Typischerweise haben viele Stahlfasern hakenförmige oder flache Enden, um eine bessere Verankerung zu ermöglichen, oder sie können gewellt (kontinuierlich verformt) sein, um einen höheren Ausziehungswiderstand zu erreichen.

Für eine gute Verankerung und eine gute Leistung im Festbeton wäre eine lange und dünne Faser ideal. Die Faser wäre gut eingebettet und würde nicht herausrutschen. Ist die Bindung zwischen Faser und Matrix hingegen zu gut, kann es zu Faserbrüchen kommen. Ein Faserbruch ereignet sich, wenn die Zugfestigkeit der Faser überschritten wird.

Bei Kenntnis des Verhältnisses der Verbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix kann die kritische Länge der Faser in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Zugfestigkeit der Faser berechnet werden. Die kritische Länge ist die Länge der Faser, bei der die Verbundfestigkeit gleich der Zugfestigkeit der Faser ist. Bei der Überbrückung eines Risses wird erwartet, dass maximal die Hälfte der Faserlänge im Beton eingebettet ist.

Die kritische Faserlänge von glatten Fasern kann zu Faserlängen führen, die nicht in den Beton eingemischt werden können, da sie ab einem Schlankheitsverhältnis von über 100 dazu neigen, zu verklumpen. Eine Verringerung der Faserlänge trägt dazu bei, dass sich die Fasern leichter verteilen.

$$l_{kritisch} = \frac{d_f}{4} \times \frac{f_{tf}}{\tau_{fm}}$$



f_{tf} = Zugfestigkeit der Faser (MPa)

τ_{fm} = Scherfestigkeit zwischen Faser und Matrix (MPa)

Abb. 1.2.4.1 Berechnung der kritischen Länge

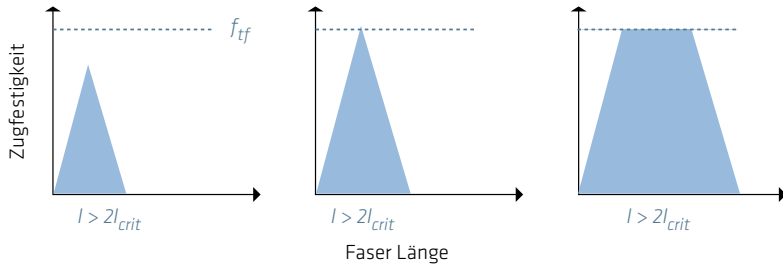


Abb. 1.2.4.2 Die kritische Länge der Faser hängt von der Zugfestigkeit des Fasermaterials ab.

1.2.5 VERTEILUNG

Neben einer guten Verankerung im Festbeton ist es wichtig, eine vollständige Verteilung der Fasern zu erreichen, um eine homogene Mischung zu erhalten und die Leistungsvorteile von Faserbeton voll auszuschöpfen. Die vollständige Dispersion der Fasern kann durch die richtige Auswahl der Fasern entsprechend der Beton / Mörtelmischung und dem Mischverfahren beeinflusst werden. Die Zugabe / Mischung von Fasern kann je nach verwendetem Fasertyp, d. h. Stahlfasern, synthetische Mikro- oder Makrofasern, sowie bei losen und geklebten Fasern variieren.



Lange und dünne Fasern können dazu neigen, sich zu verklumpen und Probleme beim Mischen verursachen, was zu einer schlechten Verteilung und wesentlich schlechteren Leistungseigenschaften führt. Kurze und dicke Fasern haben in der Regel weniger Probleme beim Mischen und weisen bessere Dispersionseigenschaften auf, wenngleich die Gesamtleistung beeinträchtigt wird, da die Faser wahrscheinlich viel kürzer als die kritische Länge ist. Fasern weisen eine gute Leistung in Festbeton mit einem Schlankheitsverhältnis zwischen 40 und 80 auf. Das vorrangige Ziel besteht darin, die Fasern so schnell wie möglich vollständig im Ausgangsmaterial zu dispergieren, ohne Zusammenballen (Faserigel).



Auch die Verpackung ist für eine schnelle und gleichmässige Verteilung der Fasern von grosser Bedeutung. Viele Hersteller geben an, dass die Fasern als erstes Material in den Mischer gegeben werden sollten. Werden die Fasern jedoch in kleinen Pucks geliefert, die mit einer wasserlöslichen Folie zusammengehalten werden, können die Pucks in den Mischer gegeben werden, sobald alle anderen Materialien (einschliesslich Wasser) hinzugefügt wurden.

1

Die Fasern können in wasserlöslichen Säcken oder in Kartons geliefert werden. Die in wasserlöslichen Säcken verpackten Fasern werden direkt und nach und nach in die Mischung gegeben. Werden die Fasern lose in Kartons geliefert, so ist der Inhalt langsam und gleichmässig in den Beton zu entleeren, und die Kartons sind zu entsorgen.

Die Mischzeit für Faserbeton hängt letztlich von der Effizienz und der Scherwirkung des Betonmischers ab. Hochwertige Zwangstellermischer bieten kürzere Mischzeiten. Das Mischen mit dem Betonmischfahrzeug ist manchmal weniger effizient, und als allgemeine Richtlinie sollte Faserbeton mindestens 5 Minuten lang bei voller Mischgeschwindigkeit gemischt werden, sobald alle Betonbestandteile hinzugefügt wurden. Oder man verlängert die Mischzeit um 1 Minute pro Kubikmeter, wenn die Fasern nach dem Mischen des Betons hinzugefügt werden.

Die Leistung wasserlöslicher Säcke kann durch bestimmte Betonzusatzmittel, z.B. flüssiges Mikrosilika, beeinträchtigt werden. Daher ist es wichtig, die Kompatibilität vom Hersteller bestätigen zu lassen.

In allen Fällen ist es wichtig, dass die Empfehlungen des Herstellers für die Zugabe und das Mischen von Fasern genau eingehalten werden. Sollten bei der Befolgung dieser Anweisungen Schwierigkeiten auftreten, ist es ratsam, den Faserhersteller um Hilfe und weitere Informationen zu bitten.



1.2.6 ZEMENTMATRIX

Die Qualität der Zementmatrix ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Verbundfestigkeit mit den Fasern und letztlich für die Leistungsfähigkeit von Faserbeton. Die gleiche Faser kann bei der Einbettung in eine poröse Matrix eine ganz andere Leistung aufweisen als bei der Einbettung in eine dichte Matrix.

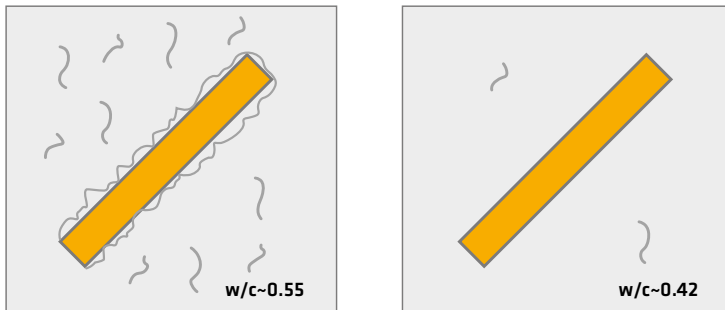


Abb. 1.2.6: Fasern im Verhältnis zum Matrixmaterial

Die Betonfestigkeit ist im Wesentlichen ein Maß für die Porosität, die auch mit der Faserverbundfestigkeit des Betons in Verbindung gebracht werden kann. Das bedeutet, dass eine bestimmte Faser in verschiedenen Betonsorten nicht unbedingt die gleiche Leistung bietet. Normalerweise hat eine Faser eine optimale Leistung bei einer bestimmten Betonfestigkeit, und es ist durchaus möglich, dass die gleiche Faserleistung bei Verwendung eines Betons mit höherer Festigkeit geringer ist.

Wenn die Betonfestigkeit abnimmt, verringert sich auch die Verankerung der Fasern in der Matrix, so dass die Fasern leichter herausgezogen werden können. Wenn die Betonfestigkeit zunimmt, kann die Faserverankerung zu gut sein und die Faser reißt, bevor sie herausgezogen werden kann. Beides führt zu einer geringeren Leistungsfähigkeit des Faserbetons.



2 NACHHALTIGKEIT

2.1 NACHHALTIGKEIT

Angesichts der Tatsache, dass die ökologische Nachhaltigkeit immer wichtiger und dringlicher wird, befasst sich auch die Bauindustrie mit diesem Thema, indem sie in den folgenden Schlüsselbereichen effizienter wird:

- Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz
- Verringerung des Wasserbedarfs
- Bau effizienter Gebäude und Infrastrukturen
- Verwendung von gefahrlosen und sicheren Produkten

Die in diesem Kapitel vorgestellte LCA-Studie kommt zu dem Schluss, dass Faserbeton im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton mit Baustahlgewebe Vorteile in Bezug auf die Nachhaltigkeit bietet.

Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment – LCA) ist eine Methode zur Quantifizierung und Bewertung potenzieller Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts. In dieser Studie wurden die Ausgangsstoffe von zwei Mischungen für Betonplatten untersucht. Darin sind die Auswirkungen nach dem Ansatz “Cradle to Gate” für jede Komponente des Mischungsentwurfs enthalten. Die Auswirkungen der Betonmischung und -anwendung sind von der Studie ausgenommen, ebenso wie die Auswirkungen der Nutzungsphase, der Behandlung am Ende des Lebenszyklus, des Recyclings und der endgültigen Entsorgung

Produktprüfung

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine standardisierte Methode zur Bewertung und zum Vergleich der Inputs, Outputs und der potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen über ihre gesamte Lebensdauer hinweg. Lebenszyklusanalysen sind als geeignete Methode zur Bewertung der Nachhaltigkeit anerkannt.

Die von Sika durchgeführten Lebenszyklusanalysen werden gemäss ISO 14040 durchgeführt. Für die Folgenabschätzung wurde die Methodik CML 2001 verwendet. Die Daten für die Lebenszyklusanalysen von Sika basieren auf öffentlichen Datenbanken wie ecoinvent, GaBi von Sphera und spezifischen Daten, die in den Sika-Produktionsstätten und bei Sika-Produkten gesammelt wurden.

Software und Datenbank: GaBi 10 Software, ecoinvent 3.7.1 und Sphera CUP2021.2

Wirkungsabschätzungsmethode: CML 2001 Methode (CML 2001 – Aug. 2016)

2.2 LEBENSZYKLUSANALYSE

Für das Beispiel des Faserbetons werden drei Wirkungskategorien als Indikatoren für die Bewertung der Umweltauswirkungen verwendet:

- Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP, 100 Jahre)
- Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)

In diesem Beispiel wird eine Fundamentplatte aus Faserbeton mit leichter Belastung und guter lasttragenden Schicht mit einer traditionellen Stahlbewehrungslösung aus Matten oder Mattenbahnen verglichen. Es werden nur die Rohstoffe für die einzelnen Betonplatten bewertet, und die Auswirkungen der Anwendung werden nicht berücksichtigt.

Die Grösse der Betonplatte ist für beide Szenarien gleich und wird als rechteckige oder quadratische Fläche von 1'000 m² x 150 mm Dicke angenommen. Das grundlegende Verfahren zum Giessen der Platte besteht darin, zunächst den Boden vorzubereiten und die Nebenleistungen usw. zu installieren. In diesem Beispiel werden Durchführungen, einspringende Ecken usw. nicht berücksichtigt. Für die Zwecke der LCA wird der Beton in diesem Beispiel mit zwei Techniken auf den Boden gegossen:

1. Beton mit 4 kg / m³ SikaFiber® Force-50
2. Der Beton ist mit einer leichten Matte im oberen Teil der Platte verstärkt.

“Leichte Matten” bietet Spielraum für Interpretationen. Für dieses Beispiel wird ein Gewicht von 3.0 kg / m² angenommen, mit einem Zuschlag von 10% zum Überlappen, also 3.10 kg / m². Für die Abschätzung der Auswirkungen der Stahlmatte wurde ein Datensatz für Walzdraht verwendet.

Die Leistung des Betons ist die gleiche, mit der Ausnahme, dass im Fall von Faserbeton das Fließmittel so angepasst wurde, dass es die gleiche Verarbeitbarkeit wie eine faserfreie Betonlösung hat.

Tabelle 2.2.1: Betonrezepturen für die LCA-Analyse

Parameter	Faserbeton		Herkömmliche Stahlbewehrung	
Betonrezeptur	Zement	350 kg / m ³	Zement	350 kg / m ³
	Wassergehalt	182 Liter	Wassergehalt	182 Liter
	Sand	857 kg / m ³	Sand	857 kg / m ³
	Kies	1'007 kg / m ³	Kies	1'007 kg / m ³
	Sika® ViscoCrete®	4.2 kg / m ³	Sika® ViscoCrete®	2.8 kg / m ³
Zusatzstoffe	SikaFiber® Force-50	4 kg / m ³	Keine	
	Gesamtmenge	600 kg		



Treibhauspotenzial [kg CO₂-eq.], CML 2001

Potenzieller Beitrag zum Klimawandel durch die Emission von Treibhausgasen

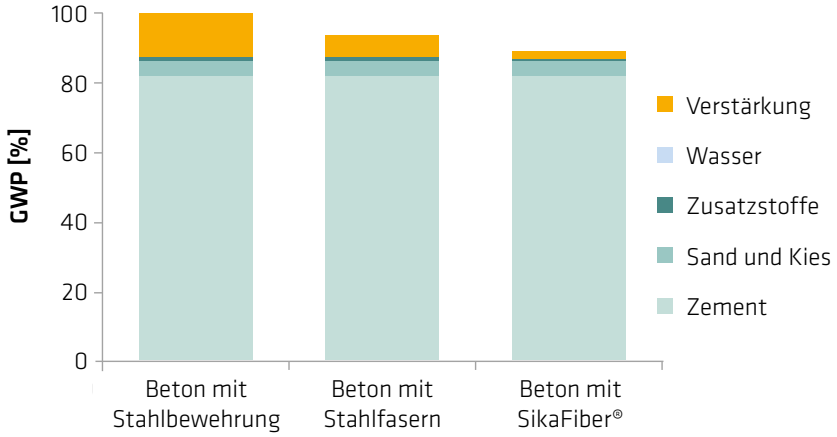


Abb. 2.2.1: Treibhauspotenzial mit und ohne SikaFiber®

2.3 ÜBERSCHÜSSIGES MATERIAL

Überschüssiges Material darf nicht in Gewässer, Abflüsse oder Abwasserkanäle eingeleitet werden, sondern muss verantwortungsbewusst über ein zugelassenes Abfallentsorgungsunternehmen in Übereinstimmung mit den relevanten Rechtsvorschriften und den Anforderungen der lokalen/regionalen Behörden entsorgt werden.

Fasern können aus überschüssigem Frischbeton mit geeigneten Filtergeräten extrahiert werden. Polypropylenfasern schwimmen auf dem Wasser und können entfernt werden, während sich die schwereren Partikel nach unten absetzen. Polypropylenfasern sind ungefährliche Materialien und können theoretisch wie Kunststoffe recycelt werden, wenn sie sauber sind und von dem entsprechenden Recycler akzeptiert werden. Stahlfasern können mit magnetischen Geräten entfernt werden. Stahlfasern können ebenfalls recycelt werden, wenn sie von der entsprechenden Recyclinganlage angenommen werden.

2.4 DAUERHAFTIGKEIT



Dauerhaftigkeit kann als die Fähigkeit definiert werden, eine lange Zeit ohne wesentliche Verschlechterung Widerstandsfähigkeit gegenüber äusseren Einflüssen zu bleiben. Im Laufe der Geschichte hat sich Beton als ein äusserst flexibles und dauerhaftes Baumaterial erwiesen. Moderne Hoch- und Tiefbauprojekte sind in hohem Masse von der Verwendung von Beton abhängig. Herkömmlicher Beton ist jedoch anfällig für Risse, da er eine geringe Zugfestigkeit und Duktilität aufweist.

2

Risse sind Wege für Gase, Flüssigkeiten und schädliche Lösungen, die in den Beton eindringen und zu einer frühzeitigen Beschädigung und Verfall des Betons und des gegebenenfalls vorhandenen Bewehrungsstahls führen.

Das wichtigste Merkmal zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Faserbeton ist seine Fähigkeit, Rissbildung zu minimieren und zu kontrollieren. Dadurch wird die Geschwindigkeit, mit der schädliche Substanzen wie Wasser, Chloride und Kohlendioxid in die Betonelemente eindringen können, wirksam begrenzt, was die Nutzungsdauer des Bauwerks erhöht. Mikro- und Makrofasern sind beide bestens geeignet, um diese langfristige Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Ein Vorteil der synthetischen Fasern ist ihre hohe Beständigkeit gegenüber sauren und alkalischen Umgebungen, weshalb sie von den Alkalien im Zementleim nicht beeinträchtigt werden. Sie werden von Salzen oder Chloriden in aggressiven Umgebungen nicht angegriffen und sind daher korrosionsfrei. Synthetische Fasern werden bei hohen Temperaturen um 150 bis 160°C weich und schmelzen, wodurch sie ihre mechanischen Eigenschaften verlieren. Während dies für synthetische Makrofasern bei strukturellen Anwendungen, bei denen Brandgefahr besteht, ein Problem darstellen kann, wurde festgestellt, dass synthetische Mikrofasern dazu beitragen, das Potenzial für explosionsartige Ablplatzungen zu verringern. Dies wird später in diesem Handbuch beschrieben.

Stahl ist bekanntermassen anfällig für Korrosion. Wenn Stahlfaserbeton in einer korrosiven Umgebung eingebaut wird, muss der Beitrag der an der Oberfläche befindlichen Fasern in der Regel vernachlässigt werden. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn der Einsatz von Stahlfasern in sehr korrosiven Umgebungen, z. B. bei Kontakt mit Meerwasser oder Tausalzen, in Betracht gezogen wird oder wenn der Beton Risse bekommen kann, z. B. bei Spritzbeton. Der Korrosionsprozess wird besonders beschleunigt, wenn der Beton unter Spannung steht. In manchen Fällen ist der wichtigste Faktor die Fleckenwirkung der korrodierenden Fasern auf der Oberfläche, die ästhetisch unangenehm auffallen kann. Im Allgemeinen werden die Stahlfasern durch die hohe Alkalität des Zementleims geschützt, wie die traditionelle Stahlbewehrung. Im Gegensatz zur Stahlbewehrung ist es unwahrscheinlich, dass das geringe Volumen der Fasern ausreichende Spannungen erzeugt, um grössere Rissprobleme zu verursachen, ausgenommen sehr dünne Betonabschnitte. Bei der Karbonatisierung des Betons muss berücksichtigt werden, dass die Stahlfasern in einer passiven Umgebung nicht mehr geschützt sind. In Anwesenheit von Luft und Wasser können auch diese Fasern korrodieren. Da die Fasern diskontinuierlich sind, sollte galvanische Korrosion kein Problem darstellen.

2.5 VERBÄNDE

Sika arbeitet weltweit mit verschiedenen Beton- und Zusatzmittelverbänden zusammen, um eine zunehmend nachhaltige Entwicklung beim Einsatz von Betonzusatzmittel-Technologien zu unterstützen und zu fördern.

2.5.1 FSHBZ



FSHBZ Steht für Fachverband Schweizerische Hersteller und Betonzusatzmittel. Rezepturen von Betonzusatzmitteln, die den strengen Kriterien genügen, dürfen mit dem Gütesiegel des FSHBZ ausgezeichnet werden. Sie stellen bei vorschriftsmässiger Anwendung keine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Die Evaluationskriterien und die Beurteilung der einzelnen Produkte können beim FSHBZ eingesehen werden. Das FSHBZ-Gütesiegel gibt Bauherren, Planern und Unternehmen die nötige Sicherheit im umweltkonformen Umgang mit Betonzusatzmitteln

2.5.2 EFCA



Sika ist Mitglied der EFCA, des Europäischen Verbands der Hersteller von Betonzusatzmittel. Die EFCA wurde 1984 aus einer Partnerschaft von 12 nationalen Zusatzmittelverbänden gegründet und vertritt heute alle wichtigen Hersteller von Zusatzmitteln. Die EFCA vertritt die Interessen ihrer Mitglieder bei der zunehmenden europäischen Baugesetzgebung und Normung.

2.5.3 MSFA



MSFA steht für Macro Synthetic Fibre Association und ist eine Gruppe von Unternehmen, die sich zusammengeschlossen haben, um das Wissen über die Betonbewehrung mit synthetischen Makrofasern zu fördern. Seit den Anfängen haben sich zwei verschiedene Gruppen herausgebildet, die durch die MSFA zusammengeführt wurden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die Faserhersteller und die verschiedenen Fasernutzergruppen. Ziel ist es, die Vorteile sowie den sicheren und verantwortungsvollen Einsatz von synthetischen Makrofasern zu fördern und entsprechende Normen, Kodizes und Leitlinien zu entwickeln.

2.5.4 FRCA



Die Fiber Reinforced Concrete Association (FRCA) konzentriert sich auf die Förderung der Entwicklung, des Wissens und des Marktes von Faserbeton, sowohl mit synthetischen als auch mit Stahlfasern. Sie besteht aus bedeutenden Herstellern, Anbietern und Vermarktern der weltweit beliebtesten Faserbetonlösungen für die Betonindustrie.

3 NORMEN

In diesem Abschnitt werden viele der verfügbaren Leitfäden zum Verständnis von Fasern und Faserbeton aufgeführt.

Die wichtigsten Normen, auf die in diesem Handbuch Bezug genommen wird, sind die der Europäischen Union.

Referenzdokument	Herausgeber	Titel	Verwendung
EN 14889-1	Europäische Norm	Fasern für Beton - Teil 1- Stahlfasern	Begriffe, Festlegungen und Konformität
EN 14889-2	Europäische Norm	Fasern für Beton - Teil 2- Polymerfasern	



3.1 ORIENTIERUNGSHILFEN

Es gibt zahlreiche weitere Dokumente, die für Fasern und Faserbeton relevant sind. Einige Dokumente wurden ursprünglich für Stahlfasern verfasst, sind aber inzwischen für Kunstfasern übernommen worden. Auf einige dieser Dokumente wird auch in diesem Handbuch Bezug genommen.

Ziel dieser Dokumente ist es, praktische Ratschläge zu den Fasertypen, den Materialeigenschaften, den Prüfmethoden zur Charakterisierung, den Baukonzepten, dem Mischen, dem Einbau und der Anwendung zu geben. Bei der Verwendung dieser Dokumente sollte der Leser Erfahrung mit konventioneller Stahlbewehrung haben.

Nationale Normen

Referenz-dokument	Herausgeber	Titel	Verwendung
DAfStB	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton	Teil 1: Bemessung und Konstruktion Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität Teil 3: Hinweise für die Ausführung	Bemessung von Faserbeton mit Stahlfasern
SIA 162 / 6	Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein (SIA)	Grundlagen der Prüfung und Gestaltung	Bemessung von Stahlfaserbeton
Merkblatt SIA 2064	Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein (SIA)	Faserbewehrter Beton - Baustoffe, Bemessung und Ausführung	Bemessung und Ausführung von Faserbewehrtem Beton

Europäische Referenzen

Referenz-Dokument	Herausgeber	Titel	Verwendung
Eurocode 2: EN 1992-1-1:2004	Europäische Norm	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1 – 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau	Grundsätze der Betonbemessung
Eurocode 2: EN 1992-1-2:2004	Europäische Norm	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1 – 2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall	Passiver Brandschutz durch Fasern
EN 14487-1	Europäische Norm	Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität	Fasern für Spritzbeton

Zusätzlicher Leitfaden

Referenz-Dokument	Herausgeber	Titel	Verwendung
<i>fib</i> Model Code for Concrete Structures	International Federation of Structural Concrete (Internationaler Verband für Konstruktionsbeton)	Kapitel 5 Materialien: 5.6 Fasern / Faserbeton	Bemessung von Faserbeton
ITAtech-Bericht Nr. 7 / April 2016	Die International Tunneling and Underground Space Association	Leitfaden für Tübbinge aus Faserbeton – Band 1 Konstruktionsaspekte	Faserbeton für Tübbinge
RILEM TC 162-TDF	The International Union of laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (Die Internationale Vereinigung der Laboratorien und Sachverständigen für Baustoffe, -systeme und -konstruktionen)	Stahlbeton – Prüf- und Bemessungsverfahren für Stahlfasern	Bemessung und Prüfung von Faserbeton

3.2 ZERTIFIZIERUNG

Seit 1985 steht die europäische CE-Kennzeichnung für die Erklärung des Herstellers, dass das in einem EU-Land in Verkehr gebrachte Produkt einer EU- Richtlinie entspricht. Das Zeichen "Conformité Européenne" (CE) wurde von der Europäischen Union (EU) zur Regulierung von Waren eingeführt, die innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) verkauft werden.



Alle definierten Waren, die hergestellt oder in den Verkehr gebracht werden, müssen mit einer obligatorischen Konformitätskennzeichnung versehen sein, bevor sie verkauft werden dürfen.

Mit dem CE-Logo bestätigt der Hersteller die Konformität der Ware mit den europäischen Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltschutznormen.

3.2.1 EN 14889: TEIL 1 UND 2

EN 14889-1 und EN 14889-2 wurden 2006 genehmigt und veröffentlicht. Beide Normen beziehen sich auf die strukturelle und nicht-strukturelle Verwendung von Fasern in Beton, Mörtel oder Vergussmörtel. In Teil 1 wurden die Anforderungen für Stahlfasern und in Teil 2 die für Polymerfasern festgelegt. Die Struktur der Norm gliedert sich in Definitionen, Anforderungen und Konformität.

Tabelle 3.2.1.1: Die wichtigsten Inhalte der EN 14889: Teil 1 und 2

Abschnitt	Inhalt	Beschreibung
	Vorwort	Informationen für die Mitgliedstaaten
1	Geltungsbereich	Inhalt der Norm
2	Normative Referenzen	Querverweise auf andere relevante Normen
3	Begriffe	Klärung von spezifischen Formulierungen
4	Symbole	Klärung von Abkürzungen
5	Anforderungen	Definition der Fasergruppe, Geometrie, Leistung und Sicherheit
6	Bewertung der Konformität	Festlegung der Ersttypprüfung und der werkseigenen Produktionskontrolle
Anhang ZA	Informativ	Beziehung zur EU-Bauproduktenrichtlinie (89 / 106 / EWG)

Die Normen, auf die in EN 14889-1 / -2 verwiesen wird, sind für die Zwecke des CE-Zeichens erforderlich.

Standard	Titel	Stahl	Polymer
EN 10002-1 ^[1]	Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur	■	■
EN 10218-1	Stahldraht und Drahterzeugnisse – Allgemeines – Teil 1: Prüfverfahren	■	
EN 12350-3	Prüfung von Frischbeton – Teil 3: Vébé-Prüfung	■	■
EN 13392	Textilien – Monofilamente – Bestimmung der Feinheit		■
EN 14845-1	Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 1: Referenzbeton	■	■
EN 14845-2	Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 2: Einfluss auf den Beton	■	■
EN ISO 2062	Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten – Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung (ISO 2062:1993)		■
EN ISO 6892 ^[2]	Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892:2019)	■	■
ISO 11357-3	Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 3: Bestimmung der Temperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie		■

^[1] Diese Norm wurde zurückgezogen, in EN 14889-1:2006 und EN 14889-2:2006 wird jedoch noch auf diese verwiesen und wird durch EN ISO 6892:2016 ersetzt.

^[2] Wird die EN 10002-1 in der nächsten Aktualisierung der EN 14889-1 und 2 ersetzen.

Darüber hinaus ist das erforderliche Prüfverfahren in EN 14845-1 festgelegt

Standard	Titel	Stahl	Polymer
EN 14651	Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)	■	■

Systeme

Fasern in EN 14889 Teil 1 und 2 werden gemäss Tabelle ZA.2 als AVCP-System 1 oder 3 bezeichnet.

System 1 wird als statisch wirksame Fasern definiert, und der Hersteller muss eine benannte Stelle beauftragen, die Leistungen der Ersttypprüfung, der werkseigenen Produktionskontrolle und der laufenden Überwachung des Prozesses zu bewerten.

Statisch nicht wirksame Fasern werden als System 3 definiert. Eine benannte Stelle ist für die Bewertung der Leistungen der Ersttypprüfung zuständig, während der Hersteller für die werkseigene Produktionskontrolle und die fortlaufende Bewertung verantwortlich ist.

Tabelle ZA.2 aus EN 14889:1 und 2

Produkt(e)	Verwendungszweck(e)	Stufe(n) bzw. Klasse(n)	System(e) zur Bescheinigung der Konformität
Polymer-/Stahlfasern	Für strukturelle Anwendungen in Betonmörtel oder Vergussmörtel	Siehe Tabelle ZA.1	1
Polymer-/Stahlfasern	Für andere Verwendungen in Betonmörtel oder Vergussmörtel	Siehe Tabelle ZA.1	3

System 1: siehe Richtlinie 89 / 106 EWG (BPR) Anhang III.2.(i), ohne Folgeprüfung von Probekörpern

System 3: siehe Richtlinie 89 / 106 EWG (BPR) Anhang III.2.(ii), Zweite Möglichkeit

Tabelle ZA.1 einer Norm fasst den Anwendungsbereich und die Merkmale des Produkts zusammen, die für die CE-Kennzeichnung relevant sind, und listet die wesentlichen Merkmale und die relevanten Klauseln auf. Es gibt drei Hauptprüfungen, die für die CE-Kennzeichnung erforderlich sind.

Beschreibung	Einschlägige Normen	Fasertyp
Zugeigenschaften (Zähigkeit) und Elastizitätsmodul	EN ISO 2062	Klasse I – Mikro
	EN 10002-1 (evt. EN ISO 6892)	Klasse II – Makro
Auswirkungen auf die Konsistenz (Vébé-Prüfung)	EN 14895-2	Klasse I und II
Auswirkungen auf die Festigkeit von Beton (Balkenprüfung)	EN 14845-1 / -2 EN 14651	Klasse II

Tabelle ZA.1 aus EN 14889 Teil 2 Anwendungsbereich und relevante Abschnitte

Produkt	Polymerfasern in Betonmörtel oder Vergussmörtel		
Verwendungszweck			
Wesentliche Merkmale	Anforderungsklauseln in dieser oder einer anderen Europäischen Norm. (Diese Norm, sofern nicht anders angegeben)	Vorgeschriebene Stufe(n) und / oder Klasse(n)	Notizen
Zugeigenschaften / Elastizitätsmodul	5.4 und 5.5	keine	angegebene Werte
Auswirkungen auf die Konsistenz (Verarbeitbarkeit) von Beton	5.7	keine	angegebener Wert
Auswirkungen auf die Festigkeit von Beton	5.2, 5.3 und 5.8	keine	angegebene Werte
Freisetzung gefährlicher Stoffe	5.10 und ZA.1	keine	die Anforderungen sind abhängig von den Vorschriften des Einsatzortes
Dauerhaftigkeit	-	-	die Dauerhaftigkeit bezieht sich auf den faserhaltigen Beton

Toleranzen

Toleranzen sind ein wichtiger Aspekt für Fasern, um ein Qualitätsniveau aufrechtzuerhalten. Tabelle 1 der EN 14889 legt Toleranzen für Länge und (äquivalenten) Durchmesser fest, die nicht vom angegebenen Wert abweichen dürfen. Für die Ersttypprüfung und die werkseigene Produktionskontrolle werden Probekörper aus der Produktion entnommen, wobei der Faserhersteller die Anforderungen erfüllen muss.

Wenn die Anforderungen des Anhangs der Normen erfüllt sind, kann der Hersteller für das System 3 eine Leistungserklärung (Declaration of Performance - DoP) erstellen und das Produkt gemäss ZA 2.2 und ZA.3 mit einer CE-Kennzeichnung versehen. Für Produkte des Systems 1 stellt die Zertifizierungsstelle dem Hersteller eine Konformitätsbescheinigung aus, die ihn berechtigt, die CE-Kennzeichnung anzubringen und eine DoP zu erstellen.



PRODUKTDATENBLATT
SikaFiber® Force-50

Synthetische Makrofasern für Beton



PRODUKTBEZEICHNUNG

Meine Kunststofffasern für die Kombination und einwirkungsform von Betonarbeiten.

ANWENDUNG

- Estrichunterputz liegt bei folgenden Anwendungsfällen:
- Estrich oder Teilstrich aus Substratmörteln
- Sperrschichten und Klebmittelschichten
- Fundamente mit Faserbeton
- Deckenplatten, Verankerungsbereiche
- Oberflächen mit hoher Abriebfestigkeit
- Tragende Bauteile an Hoch- und Vorkriegsbauwerken

VORTEILE

- Durch die Ballung von SikaFiber® Force-50 können Risse vermieden werden, die normalerweise bei ungeklärtem Beton anfallen werden
- Erhöht die Schlagempfindlichkeit, insbesondere bei grossen Beanspruchungen
- Erhöht die Verformbarkeit
- Erhöht die Oberflächenqualität
- Beseitigt die Oberflächenrisse
- Erhöht die Flexibilität
- Erhöht die Flexibilität
- Erhöht die Flexibilität
- Erhöht die Flexibilität

PRÜFZEICHNISSE

CE-Kennzeichnung und Leistungsangabe nach EN 14889-2. Prüfverfahren zur Verankerung in Beton sind Gegenstand des FPMs für dieses Polymerfasern.

PRODUKTINFORMATIONEN

Chemische Natur	Polyester						
Gewicht	5 kg (bevorzugte Bündel in verschiedenen Packungen)						
Lebensdauer	Im empfindlichen Organismus: 24 Monate im Produktionsdatum.						
Lagerungsbedingungen	Lagerungstemperatur zwischen 0 °C und +35 °C. Abfall und Verluste liegen vor direkter Sonneneinstrahlung. Von Wasser und Feuchtigkeit fernhalten.						
Anwendungsbereich	Weitere, gerade Fasern mit Tragung						
Abmessungen	<table border="1"> <tr> <td>Stärke</td> <td>110 µm</td> </tr> <tr> <td>Stärke</td> <td>110 µm</td> </tr> <tr> <td>Stärke</td> <td>110 µm</td> </tr> </table>	Stärke	110 µm	Stärke	110 µm	Stärke	110 µm
Stärke	110 µm						
Stärke	110 µm						
Stärke	110 µm						
Dichte	~ 0,91 g/l						
Stabilitätsklasse	~ +16 °C						

1/1

TECHNISCHE INFORMATIONEN

Zugfestigkeit	~ 480 N/mm ² (MPa)	(EN 14889-2)
Stärke (Dg)	~ 9,2 N/mm ² (GPa)	(EN 14889-2)
Modul	Um eine homogene Verteilung der Fasern im Beton zu gewährleisten, kann es notwendig sein, die Mischung zu verfestigen, insbesondere bei hohen Dosenraten für Fasern (≥ 4 kg/m ³)	

ANWENDUNGSPERFORMANCE

Verpackung	3 ~ 5 kg/m ³
Verfügbare	SikaFiber® Force-50 ist kompatibel mit anderen Sika® Betonzusatzmitteln.

MESSWERTE

Alle in diesem Produktdatenblatt angegebenen technischen Daten basieren auf Laborprüfungen. Mögliche Abweichungen können durch Umwelteinflüsse entstehen, die ausserhalb unserer Einflussbereiche liegen.

WEITERE HINWEISE

Zur Sicherung einer optimalen Verarbeitung und Durchdringung des Betons sollte die richtige Massnahme gemäss SIA 262 zu treffen. Laborversuche müssen vor dem Setzen von Dm durchgeführt werden, insbesondere bei der Verwendung eines neuen Modells oder bei der Herstellung neuer Betonarbeiten.

Frischer Beton muss so früh wie möglich geschüttet werden.

ÖKOLOGIE, GESUNDHEIT UND ARBEITSSCHUTZ

VERPACKUNG (EN) NR. 5002/2006 - BEZUG

Dieses Produkt ist ein Gegenstand nach Art. 2 Abs. 2 Dg, an dem die Beschäftigtenverordnung (Dg) von 2011 (11) anzuwenden ist. Die Beschäftigten sind vor dem Einsatz des Produkts zu warnen. Ein Sicherheitsdatenblatt nach Artikel 15 der gleichen Verordnung ist nicht erforderlich, um dieses Produkt auf dem Markt zu bringen, in Transporten oder zu verwenden. Bei der sicheren Nutzung befolgen Sie die Anweisungen im Produktdatenblatt. Nach dem in der obigen Tabelle angegebenen Inhalt dieses Produkts kann eine Dosis, die dem toxischen Äquivalent (Stoff) in Anhang 1 der CLP Richtlinie, und der von der Europäischen Chemikalien-Agentur (ECHA) veröffentlichten Karzinogenitäts in Kombination über 0,1 % betragen.

VERARBEITUNGSANWEISUNG

BEWEIS

SikaFiber® Force-50 wird zusammen mit dem Zuschlag sofort direkt im Betonmischer dosiert.

SikaFiber® Force-50 kann auch in den Fahrzeugen eingesetzt werden. In diesem Fall ist eine zusätzliche Mischung von mindestens 1 Minute pro m³ erforderlich.

Eine Zugabe von SikaFiber® Force-50 kann im Frischbeton eine Reduktion der Konsistenz bewirken. Es wird empfohlen, diesen Verlust mit ein bisschen Wasser abzuwehren zu korrigieren, sondern durch eine geeignete Dosierung der Flüssigkeit, die pro Kubikmeter Konsistenz.

LÄNDERSPECIFISCHE DATEN

Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Daten für dieses Produkt aufgrund spezifischer nationaler Vorschriften von Land zu Land unterschieden sein können. Die genaue Produktanwendung ist immer dem für das jeweilige Land gültigen Produktdatenblatt.

Beispiel DoP SikaFiber® Force-50

18	
Sika Services AG, Zurich, Switzerland	
DoP No. S1668212	
EN 14889-2:2006	
Notified Body 0716	
Polymer Fibers for use in concrete mortar or grout	
Tensile strength	450 N/mm ²
Modulus of elasticity	73,5 N/mm ²
Effect on consistence (workability) of concrete	8 sec
Effect on strength of concrete	4 kg/m ³

* Fiber specification: length 90 mm, diameter 0,110 mm, taper diameter

17	
Sika Services AG, Zurich, Switzerland	
4045166	
EN 14889-2:2006	
Notified Body 1116	
Polymer Fibers in concrete mortar or grout	
Tensile properties	30 cN/tax
Effect on consistence (workability)	8 sec

Beispiel für die CE-Kennzeichnung von SikaFiber® Force-50 und SikaFiber® PPM-12

4 FASEREIGENSCHAFTEN

4.1 TERMINOLOGIE

Fasertypen

Monofilament- / Multifilamentfasern	Einzelner Faserstrang, der im Querschnitt rund oder unregelmässig sein kann
Geprägte Fasern	Fasern, die mit Eindrücken in die Oberfläche gepresst wurden
Fibrillierte Fasern	Gedehnte Fasern haben eine verzweigte oder netzartige Struktur

Eigenschaften der Fasern

Länge	Abstand zwischen den äusseren Enden oder Länge einer verformten Faser nach dem Richten ohne Verformung des Querschnitts	mm
Äquivalenter Durchmesser	Durchmesser eines Kreises mit einer Fläche, die dem mittleren Querschnitt entspricht	mm
Schlankheitsverhältnis	Länge / äquivalenter Durchmesser	Verhältnis
Feinheit	Masse pro Längeneinheit Faden 1 Denier = 1 g / 9'000 m	Denier
Feinheit	Masse pro Längeneinheit Faden 1 tex = 1 g / 1'000 m	Tex
Bruchkraft	Maximale Kraft, die eine Faser aushalten kann	kN
Zugfestigkeit	Maximale Kraft geteilt durch die mittlere Querschnittsfläche	MPa
Zähigkeit	Bruchkraft geteilt durch Feinheit	cN / tex
Bruchdehnung	Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge	%
E-Modul	Anfangssteigung der Zugfestigkeits- / Bruchdehnungs-Kurve oder Steigung der Zugspannungs-Dehnungs-Kurve	GPa

Faserprüfung

Spitzenwert der Biegezugfestigkeit oder des Bruchmoduls	Die maximale Biegezugspannung bei einer Balkenprüfung	MPa
Proportionalitätsgrenze	Der Punkt, an dem die Kurve im Last-Durchbiegungs- oder Spannungs-Dehnungs-Diagramm von der ursprünglichen linearen Reaktion abweicht.	MPa
Residuelle Biegezugfestigkeit	Die bei einer Biegeprüfung gemessene Nachrissfestigkeit, nachdem der Spitzenwert der Biegezugfestigkeit überschritten wurde	MPa
R_{es3}	Das Verhältnis der äquivalenten Biegezugfestigkeit, ermittelt aus einer Balkenprüfung bis zu einer Durchbiegung von 3 mm	%
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement – Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung, wird aus Balkenprüfungen ermittelt. Es ist der Öffnungsabstand zwischen den gegenüberliegenden Flächen einer Kerbe, die in die Unterseite eines Balkens geschnitten wird.	mm
Energieabsorption	Fähigkeit eines Faserbetons, Belastungen nach einem Riss standzuhalten, ermittelt durch eine Last-Durchbiegungsprüfung an einer Betonplatte	Joule
Durchbiegung	Die Messung der linearen Verschiebung eines Probekörpers, der einer Belastung ausgesetzt ist	mm

Anwendung von Fasern

Zusammenballen	Faserklumpen oder -nester, die sich aus verschiedenen Gründen gebildet haben
Anzahl der Fasern	Die Anzahl der Fasern in einer Volumeneinheit Beton



Abb. 4.1.1: Frischbeton ohne Zusammenballen



Abb. 4.1.2: Frischbeton mit Igel-Bildung

4.2 KLASSIFIZIERUNG

EN 14889 Teil 1 und 2

In der Europäischen Norm EN 14889-Teil 2 werden Fasern nach ihrem Durchmesser charakterisiert. Die Länge der Faser wird bei der Klassifizierung nicht berücksichtigt.

Klasse Ia Mikrofasern:	< 0.30 mm im Durchmesser; Monofilament
Klasse Ib Mikrofasern:	< 0.30 mm im Durchmesser; fibrilliert
Klasse II Makrofasern:	> 0.30 mm im Durchmesser

Mikrofasern mit einem Durchmesser von weniger als 0.3 mm werden weiter nach ihrer Form unterteilt, d. h. monofil oder fibrilliert. Makrofasern der Klasse II werden nicht weiter unterteilt.

4.3 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

4.3.1 LÄNGE

Die Länge der Faser muss angegeben werden und wird von Ende zu Ende gemessen.

4.3.2 DURCHMESSER

Der Querschnitt einer Faser kann rund, elliptisch, rechteckig oder unregelmässig sein. Die kreisförmigen, elliptischen oder rechteckigen Querschnitte werden bei Faserdurchmessern unter 0.3 mm mit optischen Messgeräten und bei Fasern über 0.3 mm mit einem Mikrometer auf 0.001 mm genau bestimmt.

Bei Fasern mit unregelmässigem Querschnitt spricht man von einem **äquivalenten Durchmesser**, der aus der Faserlänge, dem Gewicht und der Materialdichte ermittelt werden muss.

EN 14889-2 Methode zur Bestimmung des äquivalenten Durchmessers

Verfahren zur Bestimmung eines äquivalenten Durchmessers:

1. Die Masse des Strangs ist mit einer Genauigkeit von 0.001 g zu bestimmen
2. Die Länge des Strangs ist mit einer Genauigkeit von 0.01 mm zu bestimmen
3. Der äquivalente Durchmesser wird anhand der folgenden Gleichung [1] bestimmt
4. Die Querschnittsfläche wird nach der Gleichung [2] bestimmt

Gleichung [1]
$$d_e = \sqrt{\frac{4 m_f \cdot 10^3}{\pi \cdot l_d \cdot \rho}}$$
 Äquivalenter Durchmesser

$\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$

$m_f = \text{Masse (g)}$

$l_d = \text{entwickelte Länge in mm}$

Gleichung [2] – siehe 4.3.3

4.3.3 QUERSCHNITTFLÄCHE

Gleichung [2]
$$\pi \times d / 4$$
 Querschnittsfläche

4.3.4 DICHTE

Die Nenndichte von Polypropylen beträgt 0.905 g/cm^3 , und für Stahl wird sie im Allgemeinen vom Stahlfaserlieferanten in kg/m^3 angegeben.

4.4 FESTIGKEIT

Die wichtigsten Festigkeitsprüfungen für Fasern sind die Zugfestigkeit und der E-Modul.

Abschnitt	Standard	Prüfnormen
5.3 und 5.4	EN 14889-1 (Stahl)	EN 10002-1 ^[1]
5.4 und 5.5	EN 14889-2 (Kunststoff)	EN ISO 2062 / EN 10002-1 ^[1]

^[1] Zurückgezogene Norm, auf die aber noch in EN 14889:2006 Teil 1 und 2 verwiesen wird

Die in diesen Normen verwendeten Methoden zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des E-Moduls sind sehr unterschiedlich und lassen Raum für Interpretationen. Infolgedessen testen nahezu alle Faserhersteller ihre Produkte mit unterschiedlichen Prüfmethode und Maschineneinstellungen. Aus diesem Grund sind die in den Produktdatenblättern angegebenen Werte für Zugfestigkeit und E-Modul nicht immer vergleichbar. Ebenso spiegelt ein angegebener Wert nicht immer die Qualität der Faser oder die Leistung im Beton wider.

4.4.1 ZUGFESTIGKEIT



Abb. 4.4.1: Universalprüfmaschine mit Flachklemmensystem und taktilem Dehnungsmesser für eine sehr genaue Bestimmung der Dehnung

Die Zugfestigkeit einer Mikro- oder Makrofaser ist die maximale Spannung, die sie bei Dehnung oder Zug aushalten kann, bevor sie bricht. Dieser Wert wird durch die Querschnittsfläche der Faser geteilt und als Kraft pro Flächeneinheit (N / mm) gemessen. Häufig sind Fasern nicht perfekt rund, quadratisch oder rechteckig. Daher muss die äquivalente Querschnittsfläche anhand des Gewichts, der Länge und der Dichte der Faser bestimmt werden.

Die Zugfestigkeit wird normalerweise mit einer Universalprüfmaschine geprüft. Um ein Verrutschen zu verhindern, kann das Gerät mit Klemmen ausgestattet werden, die aus zwei flachen Backen bestehen.

Diese werden auf die Faserlänge eingestellt werden und eine Spannung ausüben, bis der Probekörper reißt. (Abb. 4.4.1). Es gibt auch selbstspannende Klemmvorrichtungen wie in Abbildung 4.4.2 dargestellt. Um die Ungenauigkeit der Bruchdehnung zu korrigieren, empfiehlt sich die Verwendung einer Flachklemme mit taktilem Dehnungsmesser oder einer selbstspannenden Klemmvorrichtung.

Die Flachklemmen werden oft mit der Prüfung dünner Fasern in Verbindung gebracht, während die selbstspannenden Klemmvorrichtungen bei dickeren Fasern mit hoher Bruchkraft verwendet werden können, um ein Abrutschen zu verhindern.

Es ist wichtig, die spezifischen Parameter vor der Prüfung festzulegen und sicherzustellen, dass diese in den Prüfbericht aufgenommen werden.

- Dehnungsrate (% / min) ^[1]
- Prüfgeschwindigkeit (mm / min)
- Länge des Messgeräts (mm)

^[1] Ergibt sich aus der Prüfgeschwindigkeit geteilt durch die Messlänge multipliziert mit 100%



Abb. 4.4.1.2: Selbstspannende Klemmvorrichtung gemäss ASTM D 2256-02

In der Regel werden mindestens 30 Stränge geprüft. Anhand der Streuung der Ergebnisse kann der Hersteller entscheiden, welcher Wert angegeben werden soll, auch wenn die relevanten Normen (EN 14889-1 / -2) eine maximal zulässige Differenz zwischen dem angegebenen Wert und den oberen und unteren Werten festlegen. Der Hersteller legt auch fest, an welcher Stelle des Produktionsprozesses die Stränge für die Prüfung entnommen werden. Beispielsweise werden Zugprüfungen in der Regel an der geprägten Faser (dem Endprodukt) durchgeführt, während bei gewellten oder gekräuselten Fasern die Prüfung besser an der Faser vor der Bearbeitung vorgenommen wird. Der Grund dafür ist, dass die anfängliche Bruchdehnung zum Richten einer gewellten oder gekräuselten Faser die Interpretation des Ergebnisses beeinflusst.

4.4.2 E-MODUL

Der E-Modul ist ein Mass für die Steifigkeit eines Materials. Bei Spannungen und Dehnungen nahe Null ist die Spannungs-Dehnungs-Kurve linear, was bedeutet, dass die Spannung proportional zur Dehnung ist. Je höher der E-Modul ist, desto mehr Spannung ist erforderlich, um den gleichen Grad an Bruchdehnung in diesem Bereich zu erreichen.

Bei der Zugprüfung von Kunststoffen wird der E-Modul normalerweise als Sekantenmodul bestimmt. Das bedeutet, dass eine Linie durch die Punkte bei 0.05% und 0.25% Bruchdehnung auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve gezogen wird und der E-Modul aus der Steigungslinie bestimmt wird. Die beiden Punkte bei 0.05% und 0.25% Bruchdehnung auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve gezogen wird und der E-Modul aus der Steigungslinie bestimmt wird. Die beiden Punkte bei 0.05% und 0.25% Bruchdehnung werden für die Bestimmung des Sekantenmoduls gewählt, da die Kunststoffe in diesem Verformungsbereich ein linear-viskoelastisches Verhalten aufweisen. Linear-viskoelastisches Verhalten bedeutet, dass die Dehnung reversibel ist. Die meisten Kunststoffe zeigen ein nichtlinear-viskoelastisches Verhalten mit irreversiblen Verformungen bei einer Dehnung von mehr als 0.3%.

4.4.3 BRUCHDEHNUNG

Die Bruchdehnung von Fasern ist ein Mass für die Verformung, die auftritt, bevor das Material bei einer Zugbelastung schliesslich bricht. Die Bruchdehnung wird als Prozentsatz (%) der Dehnung von der ursprünglichen Länge des Materials bis zum Versagen gemessen. Man kann mit Fug und Recht behaupten, dass Polymerfasern im Vergleich zu Stahlfasern im Allgemeinen eine höhere Bruchdehnung aufweisen. Die Auswahl des Faserverstärkungsmaterials sollte jedoch nicht allein auf dieser Eigenschaft beruhen.

4.4.4 KRIECHEN

Normalerweise zeigen Stahlfasern bei normalen Betriebsbedingungen unter 370 °C kein Kriechverhalten. Synthetische Fasern sind viskoelastisch und können daher aufgrund hoher Spannungen auf Dauer kriechen. Bei Fundament- / Bodenplatten oder bei Spritzbeton, wo die Spannungen geringer sind, und eine kontinuierliche Unterstützung gegeben ist, wurde das Kriechen jedoch nicht als entscheidender Faktor für synthetische Fasern angesehen.

4.5 CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN VON SYNTHETISCHEN FASERN

4.5.1 TEMPERATUREN

Der **Schmelzpunkt** von handelsüblichem homopolymerem Polypropylen (PP) liegt im Allgemeinen im Bereich von 160 °C bis 165 °C. Polypropylenfasern erweichen unter Wärmeeinwirkung bei etwa +140 bis +150 °C, und bei Temperaturen bis +120 °C behalten PP-Fasern meist alle ihre normalen mechanischen Eigenschaften.

Der **Schmelzindex** ist die Geschwindigkeit der Extrusion von Thermoplasten durch eine bestimmte Öffnung / Düse bei einer vorgegebenen Temperatur und Last. Der Schmelzindex hat einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Herstellung von extrudierten Kunststofffasern als auf ihre Verwendung als Betonbewehrung. Er ermöglicht die Messung des Durchflusses von geschmolzenem Material und kann Qualitätsunterschiede von Polypropylen oder anderen Kunststoffen unterscheiden. Der Schmelzindex bezieht sich auf die Menge des Polymers, die durch die angegebene Öffnung / Düse extrudiert wird, und wird als Menge in Gramm / 10 Min. angegeben. Schwankungen in den Flieseigenschaften der Schmelze können sich nachteilig auf die Produktivität und die Endqualität der Fasern auswirken.

Die **Zersetzungstemperatur**, die oft als thermischer Abbau bezeichnet wird, ist die Aufspaltung der chemischen Verbindung in kleine Komponenten infolge von Erhitzung, die sich beim Abkühlen nicht wieder zusammensetzen. Je nach Produkt und Umgebung hat Polypropylen eine Zersetzungstemperatur im Bereich von 250 – 425 °C.

Bei **kalten Temperaturen** behalten Polypropylenfasern ihre Flexibilität bis zu einer Temperatur von 5 °C. Bei anhaltenden Temperaturen unter 0 °C werden die exponierten Fasern spröde.

4.5.2 FEUCHTIGKEIT / ABSORPTION

Polypropylen (PP) ist ein hydrophobes Polymer, was die vernachlässigbare Menge an Wasser widerspiegelt, die von PP-Fasern aufgenommen wird. Da PP-Fasern keine Feuchtigkeit aufnehmen, verändern sie ihr Volumen oder ihre Abmessungen bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit oder im nassen Zustand nicht. In einem 24-Stunden-Wassertest absorbiert das Material weniger als 0.01% seines Gewichts an Wasser.

4.5.3 CHEMIKALIENBESTÄNDIGKEIT

Polypropylen (PP) ist beständig gegen alle nicht oxidierenden Säuren, Lösungsmittel und Chemikalien auf anorganischer Basis und somit auch gegen Laugen. PP ist nicht dauerhaft beständig gegen Kraftstoffe und einige organische Lösungsmittel, aber beständig gegen viele polare Flüssigkeiten wie Alkohole, organische Säuren, Ester, Ketone und wässrige Lösungen anorganischer Salze.

4.5.4 UV-BESTÄNDIGKEIT

Polypropylen (PP) ist nicht UV-beständig und muss vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt gelagert werden. UV-Strahlen können PP zersetzen, wenn es direktem Sonnenlicht ausgesetzt ist. Bei synthetischen Makro- und Mikro-PP-Fasern sind die Materialien jedoch vollständig in den Beton eingebettet, so dass UV-Licht nicht eindringen kann und UV-Zersetzung kein Thema ist. Darüber hinaus enthalten Kunstfasern guter Qualität in der Regel einen UV-Stabilisator, so dass selbst oberflächennahe Fasern nicht beschädigt werden.

4.5.5 TENSIDBESCHICHTUNGEN

Eine Tensidbeschichtung ist ein Mittel, das bei der Herstellung von synthetischen Fasern verwendet wird und im Wesentlichen die Oberflächenspannung zwischen den geschmolzenen Polymeren und der Extrusionsanlage herabsetzt und so die Kontinuität und Qualität des Extrusionsprozesses sicherstellt.

Eine Tensidbeschichtung ist ein Mittel, das bei der Herstellung von synthetischen Fasern verwendet wird und im Wesentlichen die Oberflächenspannung zwischen den geschmolzenen Polymeren und der Extrusionsanlage herabsetzt und so die Kontinuität und Qualität des Extrusionsprozesses sicherstellt.

Eine Tensidbeschichtung kann auch die Dispersionseigenschaften der Fasern verbessern, wenn sie in eine Beton- oder Zementmischung eingebracht werden. Bei der Herstellung von synthetischen Fasern ist eine sorgfältige Auswahl der Grenzflächenaktive Beschichtung erforderlich, da einige Typen dafür bekannt sind, dass sie einen höheren gemischten Beton mit sich führen.

5 FASERTYPEN

5.1 MIKROFASERN

Synthetische Mikrofasern werden schon seit vielen Jahren im Bauwesen verwendet und stammen ursprünglich aus der Teppichindustrie. Es wurde festgestellt, dass sich diese Fasern positiv auf die Eigenschaften von Frischbeton auswirken und die Dauerhaftigkeit erhöhen, was dazu führte, dass die Verwendung dieser Art von Fasern schon früh stark zunahm. Synthetische Mikrofasern gehören heute oft zum Standardangebot von Transportbetonlieferanten.

Bei der Auswahl von Mikrofasern ist oft das Preis-Leistungs-Verhältnis ausschlaggebend, daher ist das gängigste Material Polypropylen (PP).

Die beiden wichtigsten Arten von synthetischen Mikrofasern:

Monofilamentfasern ^[1]



Fibrillierte Fasern



^[1] In der Textilindustrie manchmal als Multifilament bezeichnet, weil die Fasern durch eine mehrsträngige Düse extrudiert werden

5.1.1 ARTEN VON SYNTHETISCHEN MIKROFASERN

Zahlreiche Arten von synthetischen Mikrofasermaterialien sind heute auf dem Markt erhältlich, darunter Acryl, Aramid, Carbon, Nylon, Polyester, Polyethylen und Polypropylen. Darüber hinaus gibt es viele natürlich vorkommende Produkte wie Kokosnuss, Sisal, Jute und Bambus, die auf Interesse stossen. Die Auswahl der Materialien kann von der spezifischen Anwendung, den gewünschten Vorteilen und natürlich der Verfügbarkeit des Materials abhängen.

Wenn es darum geht, das plastische Schwinden und die Senkungsrisse in Beton zu verringern, wird meist Polypropylen verwendet. Das liegt vor allem daran, dass das Material leicht verfügbar und kommerziell nutzbar ist. Zur Rissüberbrückung und Lastabtragung ist ein Fasertyp mit höherer Zugfestigkeit und E-Modul erforderlich, z. B. Glas, Basalt oder Kohlenstoff. Für den Brandschutz und die Verringerung der explosionsartigen Abplatzungen ist ein Fasermaterial mit einem niedrigen Schmelzpunkt erforderlich, z. B. Polypropylen oder PVA.

5.1.2 AUSWIRKUNGEN AUF FRISCHBETON

Mikrofasern beeinflussen die Verarbeitbarkeit von Frischbeton, je nach Fasertyp und -dosierung. Das Einbringen von Fasern vergrössert die Oberfläche, die vom Zementleim bedeckt werden muss. Wenn an der ursprünglichen Rezeptur nichts geändert wird, erscheint der Beton im Allgemeinen kohäsiver. Diese Kohäsion kann zwar das Ausbreitmass des Betons verringern, ist aber nicht unbedingt ein Anzeichen für eine verringerte Verarbeitbarkeit, sondern ein rein thixotroper Effekt, der durch die Fasern verursacht wird und durch die Verwendung von Zusatzmitteln korrigiert werden kann.

In Tabelle 5.1.2.1 wird die Anzahl der Fasern pro kg mit der Länge und dem äquivalenten Durchmesser der PP-Fasern verglichen. Die in dieser Tabelle verwendeten Denier-Werte Tabelle 5.1.2.1: Monofilamentfasern pro kg Dosierung je nach Faserlänge und Denier-Wert der Fasern entsprechen den am häufigsten auf dem Markt erhältlichen Produkten. Normalerweise werden die Fasern nach Gewicht pro m³ Beton oder Mörtel dosiert. Je nach Fasergeometrie kann das gleiche Dosiergewicht zu unterschiedlichen Betoneigenschaften führen.

Tabelle 5.1.2.1: Monofilamentfasern pro kg Dosierung je nach Faserlänge und Denier-Wert

Faserlänge (mm)	Anzahl der Fasern / kg			
	18 Mikrometer	22 Mikrometer	32 Mikrometer	34 Mikrometer
	2.1 Denier	3.1 Denier	6.6 Denier	7.4 Denier
6	718.349.627	480.878.676	227.290.312	201.336.747
12	344.867.821	230.821.764	109.099.350	96.641.638
19	226.847.251	151.856.424	71.775.888	63.580.025



Die Faser mit dem geringsten Durchmesser und der geringsten Länge liefert die höchste Faseranzahl pro kg Dosierung. Dies kann eine Schlüsseleigenschaft der synthetischen Mikrofaser sein, wenn sie zur Vorbeugung gegen frühzeitige Rissbildung eingesetzt wird, und kann daher in niedrigeren Dosierungen verwendet werden. Auch wenn dies ein vernünftiges Argument zu sein scheint, muss der Planer auch die Auswirkungen sehr feiner Fasern auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons berücksichtigen.

Der Grund hierfür ist, dass eine höhere Faseranzahl die Gesamtoberfläche der Fasern vergrößert und dass die Fasern vollständig mit Zementleim bedeckt sein müssen, damit sie in der Mischung richtig funktionieren.

Daraus folgt, dass sehr feine Materialien einen höheren Wasser-Zementleim-Bedarf haben. Die Auswirkung auf den Luftgehalt sollte ebenfalls geprüft werden, da Fasern mit hoher Faseranzahl und damit grosser Oberfläche einen Einfluss auf die eingeschlossene Luft in der Mischung haben können, was die Zielfestigkeiten des Betons beeinflussen kann.

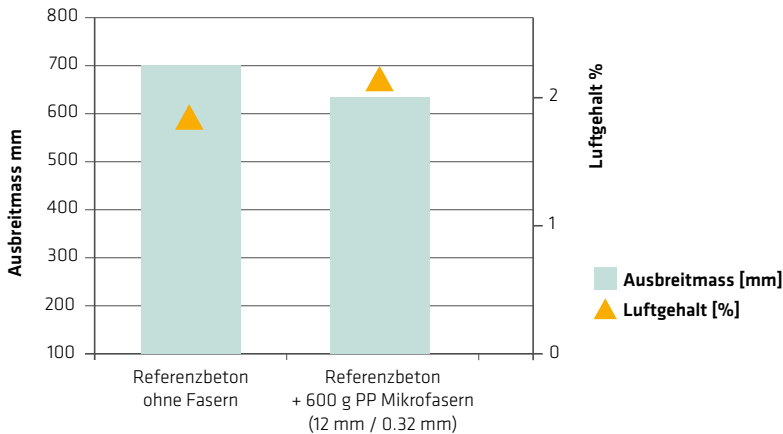


Abb. 5.1.2.1: Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften eines Referenzbetons mit Zusatz von PP-Mikrofasern

In einem Ausbreitversuch nach EN 12350-5 verringerte die Zugabe von 600 g von 12 mm langen x 32 μ m starken Fasern die Verarbeitbarkeit eines Referenzbetons um 10%. Der Luftgehalt desselben Referenzbetons stieg um 30%, von 1.75% auf 2.3%. Dies mag zwar nicht spektakulär erscheinen, zeigt aber, warum es empfehlenswert ist, diese Parameter vorab zu überprüfen.

Wenn der Beton gerüttelt wird, neigen die Fasern dazu, ihren Halt am Zementleim zu verlieren, und der Beton fließt normal. Dieser Kohäsionseffekt wird von Betonverarbeitern häufig missverstanden und kann fälschlicherweise dazu führen, dass dem Beton zusätzliches Wasser zugeführt wird. Dies sollte vermieden werden, da es die mechanischen Kräfte verringert und zu Bluten führen kann. Wenn es zu einem unerwarteten Verlust der Verarbeitbarkeit kommt, sollten Anpassungen bei der Rezeptur vorgenommen werden.

5.1.3 EINFLUSS AUF DIE RISSBILDUNG

Die Neigung von Beton zur Rissbildung wird seit Jahren als natürliche Eigenschaft akzeptiert. Der Hauptgrund für das Auftreten von Rissen im Beton sind innere Spannungen, die die Betonfestigkeit übersteigen. Spannungen durch äussere Kräfte können durch höhere Druckfestigkeiten ausgeglichen werden. Eigenspannungen, die durch chemische Reaktionen / Schwinden im frisch eingebrachten Beton selbst verursacht werden, waren jedoch in der Vergangenheit aufgrund ihrer Unvorhersehbarkeit schwierig zu kontrollieren.

Tabelle 5.1.3.1: Schwindungsphasen können zu Rissen führen

Eigenspannungen, die Risse im Beton verursachen		
Typ	Primäre Ursache (ausgenommen Zwangsspannung)	Zeitpunkt des Erscheinens
Plastisches Setzen	Übermässiges Bluten / Volumenveränderung	10 Min. bis 3 Std.
Plastisches Schwinden	Schnelles frühzeitiges Austrocknen	30 Min. bis 6 Std.
Frühe Wärmeschumpfung	Überschüssige Wärme und Temperaturgradienten	1 Tag bis 2 oder 3 Wochen
Langfristiges Trocknungsschwinden	Ineffiziente Verbindungen	Mehrere Wochen oder Monate

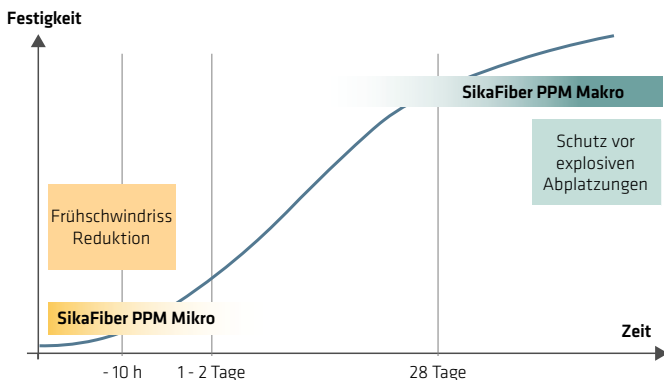


Abb. 5.2.1: Aufzeigen der Vorteile der Verwendung von Mikrofasern in Bezug auf Zeit und Festigkeitsentwicklung

5.2 VORTEILE VON PP-MIKROFASERN

PP-Mikrofasern beeinflussen die Betoneigenschaften in den frühen Phasen der Festigkeitsentwicklung, wenn der Beton aushärtet, zudem bieten sie auch passiven Brandschutz.

5.2.1 VERRINGERUNG DER SENKUNGRISSE VON KUNSTSTOFFEN

lastische Senkungsrisse werden durch eine Volumenänderung eines Betonabschnitts verursacht und durch den Grad des Blutens beeinflusst, der bei einer bestimmten Betonmischung auftreten kann. Unter Bluten versteht man das Aufsteigen von Wasser an die Oberfläche des Betons kurz nach dem Einbringen und wird dadurch verursacht, dass schwerere Partikel nach unten wandern und feine Partikel und Wasser verdrängen. Auslaufendes Wasser ist nur dann auf der Betonoberfläche zu sehen, wenn die Verdunstungsrate geringer ist als die Blutungsrate.

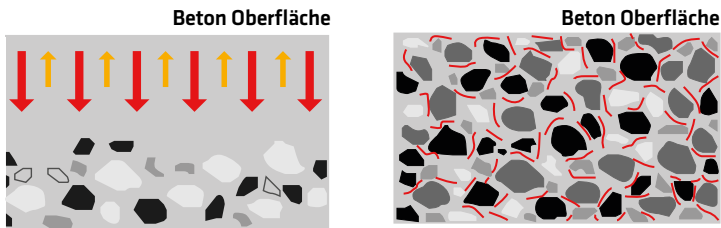


Abb. 5.2.1.1: Verringerung des Blutens von Beton durch synthetische Mikrofasern

Das Bluten kann durch eine geeignete Betonrezeptur mit einer ausgewogenen Siebkurve der Gesteinskörnung und / oder durch die Verwendung der richtigen Zusatzmitteltechnologie zur Stabilisierung der Betonmischung verringert werden. Synthetische Mikrofasern haben jedoch auch einen erheblichen Effekt auf die Verringerung des Blutens, da sie als internes Suspensionssystem fungieren, das die groben Gesteinskörnungen in der Mischung wirksam stützt und so das Bluten und Absetzen verhindert.

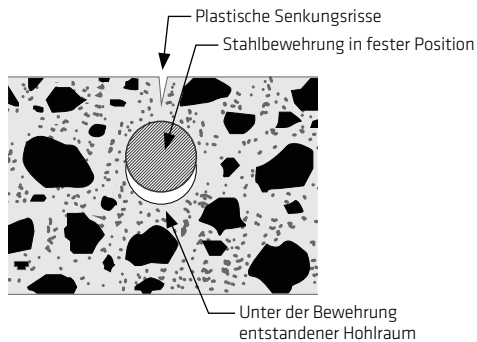
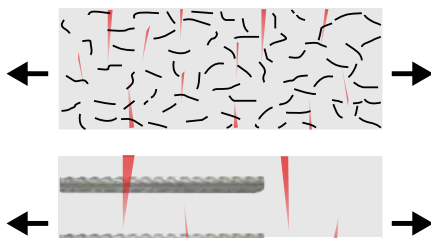


Abb. 5.2.1.2: Plastische Senkungsrisse unter einem Bewehrungsstab



Senkungsrisse bilden sich unweigerlich über der Bewehrung in der Nähe der Betonoberfläche. Diese Risse wirken sich nachteilig auf die langfristige Dauerhaftigkeit der Stahlbewehrung und des Betons selbst aus.

5.2.2 VERRINGERUNG DER PLASTISCHEN SCHWINDRISSBILDUNG

Plastische Schwindrisse entstehen innerhalb weniger Stunden nach dem Einbringen des Betons, obwohl sie möglicherweise erst am nächsten Tag bemerkt werden. Sie sind am häufigsten in Bodenplatten zu finden, können aber auch in anderen Sichtbetonflächen auftreten. Wengleich Kunststoffrisse an der Oberfläche breit sein können, werden sie mit zunehmender Tiefe schnell kleiner. Plastische Risse ziehen sich jedoch im Allgemeinen durch die gesamte Tiefe der Bodenplatte.

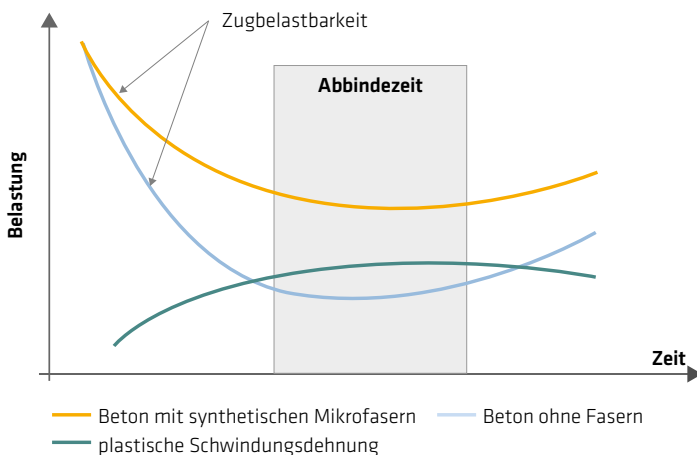


Abb. 5.2.2.1: Zugbeanspruchung in jungem Beton

Der Hauptgrund für die Bildung von plastischen Rissen ist, dass der Beton mehrere Stunden nach dem Einbau keine oder nur eine geringe Zugfestigkeit aufweist. Wenn die Betonoberfläche einer schnellen Trocknung ausgesetzt ist, verdunstet die Feuchtigkeit an der Oberfläche schnell, was zu einer Zugdehnung an der Betonoberfläche führt. Risse entstehen, wenn diese Spannungen die Zugfestigkeit des Betons übersteigen.

Wenn plastische Risse in Beton mit Stahlbewehrung auftreten, können Luft und Feuchtigkeit sowie andere aggressive Stoffe wie Chloride und andere schädliche lösliche Substanzen durch die offenen Risse eindringen. Dies führt unweigerlich zu Stahlkorrosion und verringert die Dauerhaftigkeit des Betons.

Ein grosser Vorteil der Verwendung synthetischer Mikrofasern in Beton ist die Möglichkeit, die Zugfestigkeit des Betons im frühen Alter zu erhöhen. Das bedeutet, dass Zugbelastungen an der Betonoberfläche, die durch Trocknung oder schnelle Verdunstung von Feuchtigkeit entstehen, im Allgemeinen die Zugfestigkeit des Faserbetons nicht überschreiten. Der Vorteil der Verwendung von Mikrofasern besteht darin, dass die plastischen Schwindrisse verringert oder beseitigt werden.

Tabelle 5.2.2.1: Beispiel für die Dosierung von Mikrofasern zur Verringerung des plastischen Schwindens.

	Referenzbeton	Beton zur Verringerung des plastischen Schwindens
Zement	320 kg / m ³	320 kg / m ³
w / z-Wert	0.5	0.5
Gesteinskörnungen	0 – 32 mm	0 – 32 mm
Sika® ViscoCrete®	0.8%	0.9 – 1.1%
SikaFiber® PPM	–	0.6 – 0.9 kg/m ³

5.2.3 WIDERSTANDSFÄHIGKEIT GEGEN EXPLOSIONSARTIGE ABPLATZUNGEN



DOSIERUNG

PP-Mikrofasern hemmen die plastischen Fröhschwindrisse und werden im Allgemeinen zwischen 0.6 und 0.9 kg/m³ dosiert. Dieser Dosierbereich ist abhängig von dem Denier-Wert der Faser, der Sandkörnung und den Umgebungsbedingungen. Beton, der hohen Temperaturen und trocknendem Wind ausgesetzt ist, ist einem grösseren Risiko ausgesetzt, plastische Fröhschwindrisse zu bekommen. In diesen Fällen ist es ratsam, eine höhere Dosierung zu verwenden. Dementsprechend ist Beton, der niedrigen Temperaturen und mässigem Wind ausgesetzt ist, weniger gefährdet und kann eine niedrigere Dosierungsmenge erfordern.

Rezepturen mit einer höheren Anzahl kleiner Fraktionen, wie Mörtel und Nassestriche, erfordern eine höhere Faserdosierung von etwa 0.9 – 1.8 kg/m³. Bei der Verwendung von Mikrofasern in hoher Dosierung ist stets eine Vorprüfung der Frischbetoneigenschaften erforderlich.

Die Zugabe geeigneter Monofilament-Mikrofasern aus Polypropylen (PP) in Beton ist heute weithin anerkannt, um explosionsartige Abplatzungen in Giessbeton / Betonfertigteilen und Spritzbeton zu kontrollieren. Diese Art des Schutzes wird als "passiver Brandschutz" bezeichnet, was bedeutet, dass er ein integraler Bestandteil der Betonstruktur ist und im Falle eines Brandes nicht von aussen aktiviert werden muss. Seit dem ersten Einsatz von PP-Mikrofasern im High Speed 1 Projekt (2007) wurde die Technologie in

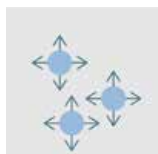
Mechanismus, der zu explosionsartigen Abplatzungen in einem hochdichten Beton führt



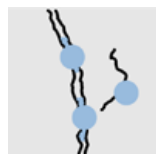
Im Beton vorhandene Feuchtigkeit



Bei schnell ansteigenden Temperaturen versucht die Feuchtigkeit im Beton zu entweichen.
Bei Beton mit hoher Dichte wird das Wasser daran gehindert und es verwandelt sich in überhitzten Dampf.

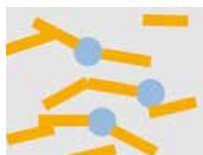


Dies führt zu einem erheblichen Aufbau von inneren Spannungen.



Wenn die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird, kommt es unweigerlich zu Abplatzungen des Betons.

Mechanismen des passiven Brandschutzes



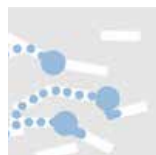
Feuchtigkeit im Beton und eine gut verteilte Dosierung von PP-Mikrofasern



Wenn die Temperatur 160 °C (360 °F) erreicht, schmelzen die PP-Mikrofasern.



Über die neuen Wege werden Feuchtigkeit und überhitzter Dampf freigesetzt.



vielen Tunnelprojekten weltweit eingesetzt: Gotthard-Basistunnel, Schweiz; Doha Metro, Katar; London Crossrail, Vereinigtes Königreich; Kopenhagen Metro, Dänemark; Los Angeles Metro System und Hong Kong MTR.

Explosionsartige Abplatzungen können ein ernsthaftes Risiko für die strukturelle Integrität eines Bauwerks darstellen, weil der Betonquerschnitt abnimmt und / oder die eingebettete Stahlbewehrung nachgibt, wenn sie hohen Temperaturen ausgesetzt ist. In allen Fällen besteht die Möglichkeit, dass explosionsartige Abplatzungen zu einem vollständigen Versagen der Struktur führen.

Es gibt eine einfache Theorie, warum PP-Mikrofasern explosionsartige Abplatzungen im Falle eines Brandes verhindern. Dies liegt daran, dass gut verteilte PP-Mikrofasern bei einer Temperatur von 160 °C schmelzen und winzige Kanäle im Beton bilden, durch die überhitzte Feuchtigkeit entweichen kann. Dadurch werden die Innendrucke reduziert und die Schäden durch explosionsartige Abplatzungen minimiert.

Jüngste Forschungen haben jedoch gezeigt, dass dies eine zu starke Vereinfachung der wahren Mechanismen ist, die zum Einfluss der PP-Mikrofasern auf explosionsartige Abplatzungen beitragen.

Alternative Theorie zum passiven Brandschutz

Im Jahr 2001 hat Prof. P. J. E. Sullivan, City University London, eine alternative Theorie präsentiert, die auf der unterschiedlichen Wärmeausdehnung von synthetischem Polymeren und Beton beruht. Die Studie kam zu dem Schluss, dass sich die PP- Mikrofasern bei erhöhter Temperatur zunächst ausdehnen und Spannungen auf die Zementmatrix ausüben, was die Bildung von Mikrorissen auslöst.

Wärmeausdehnungskoeffizient für Beton = 6 bis $12 \times 10^{-6} / \text{K}$

Wärmeausdehnungskoeffizient für Polypropylen = $86 \times 10^{-6} / \text{K}$

Die thermische Ausdehnung von Polypropylen wurde auf das 7- bis 14-fache von Beton geschätzt, und auch Saka et al. berichteten 2009, dass eine einzelne Polypropylenfaser, die in eine Mörtelmatrix eingebettet ist, bei einem Temperaturanstieg von 140°C erheblichen Spannungen ausgesetzt ist.

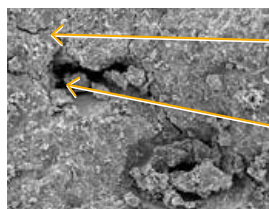


Netz von Mikrorissen, die durch die Ausdehnung der Fasern verursacht wurden

Nachfolgende Kanäle, die durch geschmolzene PP-Mikrofasern entstanden sind

Abb. 5.2.3.1: Netz aus Mikrorissen

Wenn die Temperatur weiter ansteigt, schmelzen die Fasern und bilden weitere kleine Kanäle, die zusammen ein Druckentlastungssystem bilden, und so das Potenzial für explosionsartige Abplatzungen verringern.



Mikrorisse

Faserkanäle

Abb. 5.2.3.2: Mikroskopische Aufnahme, die die Bildung von Kanälen und Mikrorissen nach einem Brand zeigt

Ein von Dehn & Willie in Leipzig 2004 ausgeführtes Gewerk bestätigt das Vorhandensein von Mikrorissen und Faserkanälen, nachdem es einer Hochtemperatur-Brandprüfung ausgesetzt wurde.

5.2.4 DURCHLÄSSIGKEIT VERMINDERN



Synthetische Mikrofasern können die Bildung interner Mikrorisse verhindern, die, wenn sie nicht beherrscht werden, die Feuchtigkeitsaufnahme erhöhen können. Die Verringerung dieser Mikrorisse durch Fasern bedeutet, dass der Beton weniger durchlässig wird. Dies kann auch dazu beitragen, die Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton in Aussenanwendungen zu verbessern.

5.2.5 ABRIEBFESTIGKEIT



Die Verringerung des Blutens und der Setzungen, die mit PP-Mikrofasern erreicht wird, bedeutet, dass mehr grobe Gesteinskörnungen an der Oberfläche und in der Nähe der Oberfläche zurückgehalten werden. Der erhöhte Anteil an groben Gesteinskörnungen an der Oberfläche sorgt für eine längere Haltbarkeit und Abriebfestigkeit.

5.2.6 SCHLAG- / SPLITTERFESTIGKEIT



PP-Mikrofasern, insbesondere die fibrillierten Typen, sind ausserordentlich gut in der Lage, lokale Spannungen zu verteilen, da sie wie winzige Stossdämpfer im Beton wirken. Wenn der Beton Stossbelastungen ausgesetzt ist, verteilen die Fasern die Belastung auf eine grössere Fläche und verringern somit die Stossschäden erheblich. Fibrillierte Fasern sind auch sehr gut in der Lage, Beton nach der Entstehung von Rissen zusammenzuhalten.

5.3 PP-MAKROFASERN

PP-Makrofasern sind seit mehr als 20 Jahren auf dem Markt erhältlich. Die Hauptanwendungsgebiete für diesen Fasertyp sind Spritzbeton, Fundamentplatten und Betonfertigteile. Im Gegensatz zu synthetischen Mikrofasern, die ihre Hauptvorteile/ Einflüsse im plastischen Zustand des Betons haben, werden synthetische Makrofasern und sogar Stahlfasern in erster Linie verwendet, um Vorteile im ausgehärteten Zustand des Betons zu erzielen.

Synthetische Makrofasern können aus denselben Materialien wie Mikrofasern hergestellt werden, sind aber in der Regel gröber und steifer. Die am häufigsten verwendeten synthetischen Makrofasern bestehen aus Polypropylen, da dieses Material die besten Eigenschaften in Bezug auf Dauerhaftigkeit und Beständigkeit gegen eine alkalische Umgebung, wie z. B. Beton, aufweist.

Synthetische Makrofasern sind aktuell in verschiedenen Geometrien erhältlich; die wichtigsten Fasertypen in Bezug auf die Form sind folgende:

- Gerade geprägte Fasern
- Gewellte Fasern
- Weiche, flache Fasern
- Verdrehte Fasern



Abb. 5.3.1: a) Gerade geprägte Fasern b) Gewellte Fasern c) Weiche, flache Fasern

Die gerade geprägten Fasern gelten als vorteilhafter für hochfesten Beton, da die Porosität um die Faser herum geringer ist und die Prägung zu einem höheren Auszieh Widerstand führt. Da die Fasern gerade sind, ist die Tendenz zum Zusammenballen beim Mischen mit hohen Faserdosierungen deutlich geringer.

Gewellte Fasern werden manchmal als vorteilhafter für Beton mit niedriger Festigkeit angesehen, da die grosse Porosität um die Faser herum durch die Wellenform überwunden wird, was zu einem grösseren Auszieh Widerstand führt.

Der Vorteil einer weichen Faser ist die hohe Faseranzahl, insbesondere bei niedrigen Dosierungen kann die Leistung besser sein als bei den anderen Fasergeometrien. Weiche Fasern verformen sich beim Mischen, verdrehen sich um die Gesteinskörnungen und erhöhen so zusammen mit einer hohen Faseranzahl die Rissfestigkeit. Weiche Fasern werden in der Regel niedrig dosiert, da bei hohen Dosierungen die Verarbeitbarkeit des Betons abnimmt.

5.3.1 PLASTISCHE SCHWINDRISSBILDUNG

Synthetische Makro- und Stahlfasern können zwar die plastischen Frühschwindrisse reduzieren, sind aber nicht in ausreichender Zahl vorhanden, um eine ähnlich hohe Reduktion zu bewirken wie PP-Mikrofasern.

5.3.2 AUSWIRKUNGEN AUF FRISCHBETON

PP-Makrofasern beeinflussen die Verarbeitbarkeit von Beton wie Mikrofasern, je nach Fasertyp und Dosierung. Der Bedarf an Zementleim macht den Beton im Allgemeinen kohäsiver. Diese Kohäsion kann das Ausbreitmass des Betons verringern. Ein Verlust an Ausbreitmass ist jedoch nicht notwendigerweise ein Anzeichen für eine verminderte Verarbeitbarkeit, sondern ein durch die Fasern verursachter thixotroper Effekt.

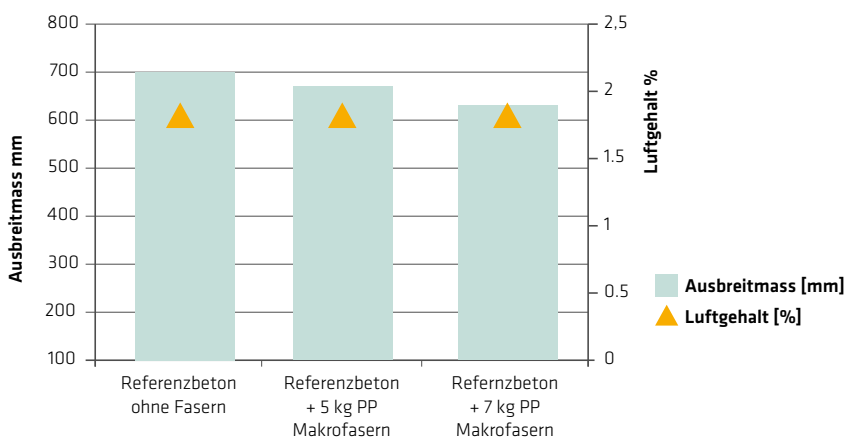


Abb. 5.3.2: Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften eines Referenzbetons mit Zusatz von PP-Makrofasern

In einem Ausbreitversuch nach EN 12350-5 verringerte die Zugabe von 5 kg / 8.4 lb PP-Makrofasern die Verarbeitbarkeit eines Referenzbetons um 4%. Durch die Zugabe von 7 kg / 11.8 lb PP-Makrofasern verringerte sich die Verarbeitbarkeit im Vergleich zur Referenz um 11%. Der Luftgehalt blieb bei der Zugabe von PP-Makrofasern praktisch gleich.

5.3.3 EINFLUSS AUF DIE FESTIGKEIT

Synthetische Makrofasern erhöhen bei normaler Dosierung normalerweise nicht die Druckfestigkeit von Beton. Sie wirken sich auf die Kohäsion des Betons aus, was zu einer Verbesserung der Dichte und einer leichten Erhöhung der Endfestigkeit führen kann.

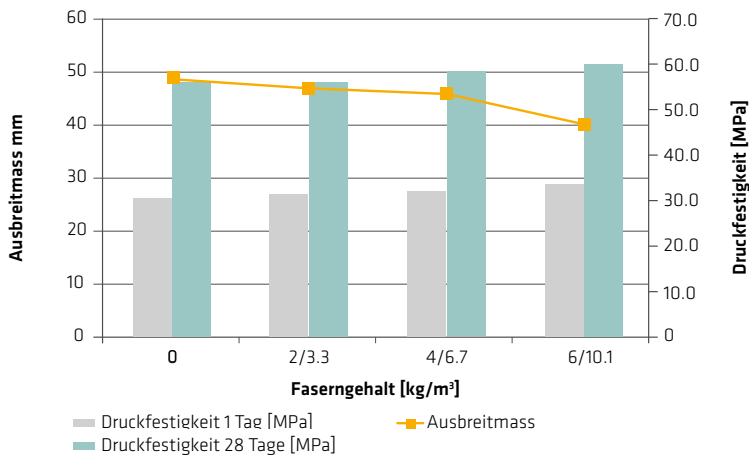


Abb. 5.3.3: SikaFiber® Force-60 - 320 kg/m³ CEM i 42.5 - w/z: 0.46 - 0/32

5.4 MAKROFASERN AUS STAHL

Stahlfasern sind auf dem Markt durchaus bekannt und werden seit über 40 Jahren in der Bauindustrie verwendet. Stahlfasern werden hauptsächlich für Fundamentplatten oder Spritzbeton verwendet, kommen aber auch häufig in anderen Anwendungen wie Betonfertigteilen, Bauteilen, Fundamenten und anderen zum Einsatz.

Für einige Ingenieure mag der Wechsel von herkömmlichen Bewehrungsmatten aus Stahl zu Stahlfasern ein leichter Schritt sein als der von Bewehrungsmatten zu synthetischen Fasern, obwohl sowohl Stahl- als auch synthetische Fasern in Beton sehr ähnlich funktionieren und beide unter die Leistungsanforderungen der Europäischen Norm fallen.

Die EN 14889-1 teilt Stahlfasern in fünf Gruppen ein:

- Gruppe I: Kalt gezogener Stahldraht
- Gruppe II: Aus Blech geschnittene Fasern
- Gruppe III: Aus Schmelzgut extrahierte Fasern
- Gruppe IV: Von kalt gezogenem Draht gespannte Fasern
- Gruppe V: Von Stahlblöcken gehobelte Fasern

Hauptgruppen

Fasern der Gruppe I sind die am häufigsten verwendeten Stahlfasern in Beton. Diese Fasern werden häufig in gerader oder verformter Form und in loser oder geklebter Form geliefert. Von Kalt gezogenem Draht gespannte Fasern können zum Schutz vor Korrosion auch beschichtet werden, was jedoch häufig zu höheren Kosten führt.

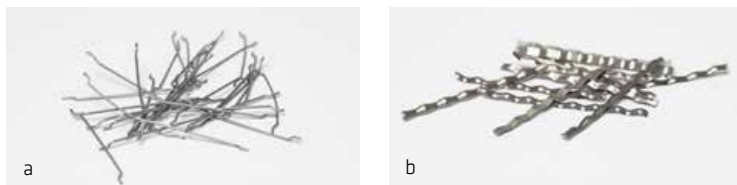


Abb. 5.4: a) Gruppe I: kaltgezogener Draht b) Gruppe V: modifizierter kaltgezogener Draht

5.4.1 AUSWIRKUNGEN AUF DIE FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN EINES REFERENZBETONS

Wie bei synthetischen Mikro- und Makrofasern sollte der Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und den Luftgehalt von Stahlfaserbeton vor der Lieferung sorgfältig geprüft werden.

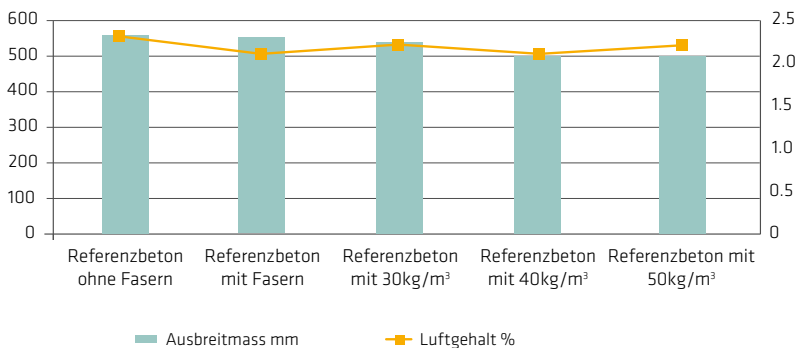


Abb. 5.4.1.1: Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften eines Referenzbetons unter Verwendung von SikaFiber®-Stahlfasern in unterschiedlichen Dosierungen

5.4.2 AUSWIRKUNGEN AUF DIE FESTIGKEIT EINES REFERENZBETONS

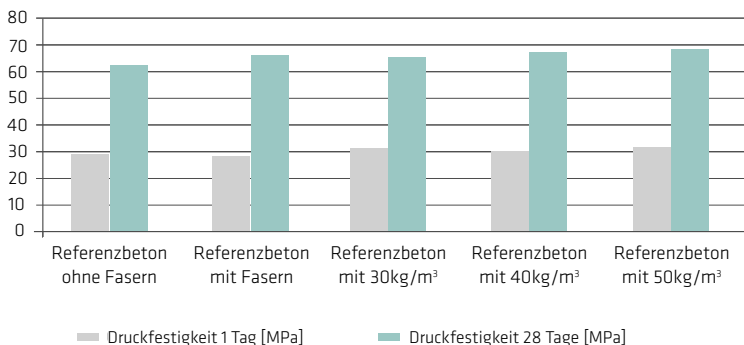


Abb. 5.4.1.2: Auswirkungen auf die Festigkeit eines Referenzbetons unter Verwendung von SikaFiber®-Stahlfasern in verschiedenen Dosierungen.

5.5 VORTEILE VON MAKROFASERN

Makrofasern beeinflussen vor allem die Betoneigenschaften im Festbeton, wie z. B. die Erhöhung der mechanischen Festigkeit, die Duktilität und die Verkürzung der Bauzeit.

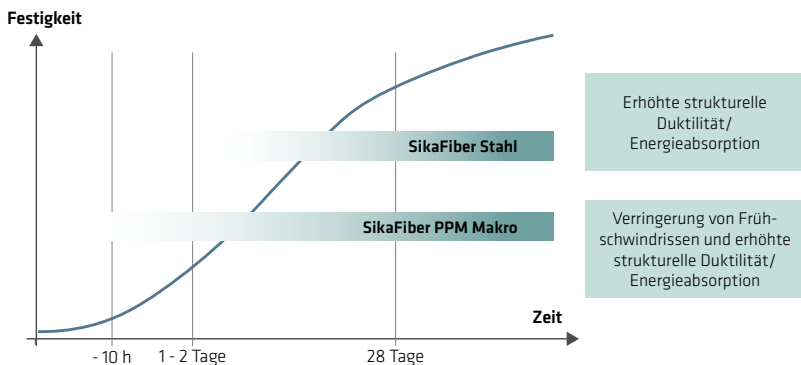


Abb. 5.5.1: Einflüsse durch Makrofasern

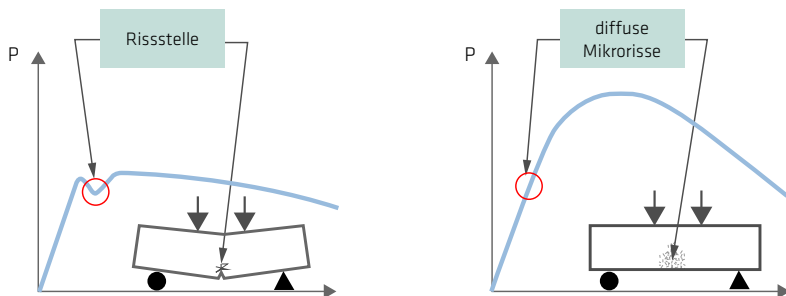
5.5.1 ERHÖHUNG DER MECHANISCHEN FESTIGKEIT



Der Zusatz von Makrofasern zu Beton kann die Duktilität und Biegefähigkeit (Zähigkeit) von Beton erheblich verbessern. Ein 3- oder 4-Punkt-Balken wird auf Biegung geprüft, um das Nachrissverhalten, die so genannte residuelle Biegezugfestigkeit, zu ermitteln. Diese Daten werden zur Charakterisierung der Leistung von Faserbeton verwendet.

Die Zähigkeit des Betons wird durch die Zugabe von Fasern verbessert.

Für eine optimale Effizienz muss die Verbundfestigkeit zwischen der Faser und der Betonmatrix so nahe wie möglich an der Zugfestigkeit der Faser liegen. Es ist besser, wenn sich die Fasern aus der Matrix herausziehen lassen, als wenn sie brechen. Wenn Fasern brechen, ist die Verankerung zu stark.



5.5.2 ERHÖHUNG DER DUKTILITÄT DES BETONS



Duktilität ist die Fähigkeit eines Materials, Energie zu absorbieren und Belastungen über die Streckgrenze hinaus standzuhalten, die das elastische Verhalten definiert. Dies ist auch der Punkt, an dem sich Risse im Beton bilden. Unbewehrter Beton ist spröde und verliert nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze vollständig an Festigkeit.

Synthetische Makro- und Stahlfasern können die Schlagzähigkeit und Splittersicherheit von Beton erheblich erhöhen, da sie in der Lage sind, lokale Spannungen zu verteilen und zu absorbieren.

5.5.3 ERSETZEN / TEILERSATZ DER TRADITIONELLEN BEWEHRUNG



Ein grosser Vorteil von Makrofasern ist, dass sie bestimmte Stahlbewehrungen ersetzen können. Die Stahlbewehrung hat einen konstruktiven Zweck, und auch bei Faserbeton kann rechnerisch nachgewiesen werden, dass er die gleiche Aufgabe erfüllt.

5.5.4 VERKÜRZUNG DER BAUZEIT



Das Hantieren mit schwerer Stahlbewehrung, das Heben, Verlegen und Befestigen in der richtigen Position ist oft eine mühsame und gefährliche Arbeit.

Wenn Fasern die Stahlbewehrung ersetzen können, lässt sich im Bauprozess viel Zeit sparen. Die Fasern werden dem Beton einfach in der Dosieranlage beigemischt und fertig gemischt auf die Baustelle geliefert. Wenn Faserbeton als Alternative zur Stahlbewehrung verwendet wird, gibt es keine Zugangsprobleme für die Betonfahrzeuge, was eine viel schnellere Abwicklung auf der Baustelle ermöglicht, und die Notwendigkeit von Pumpanlagen wird oft vermieden.

5.6 LEITFADEN ZUR ANWENDUNG VON FASERN

Verschiedene Fasertypen können für unterschiedliche Anwendungen verwendet werden. Die folgende Tabelle zeigt, wo PP-Mikro- und Makrofasern, Stahlfasern und Glasfasern üblicherweise eingesetzt werden.

Anwendung / Fasertyp	Stahlfaser < 35 mm	Stahlfaser > 50 mm	Makrofaser < 48 mm	Makrofaser > 48 mm	Monofilament-Mikrofaser	Fibrillierte Mikrofaser	Glasfaser	Mischung
Spritzbeton	■			■		■ ^[1]		
Fundamentplatten		■	■		■	■		
Strassen		■	■		■	■		■
Frühschwinden			■		■	■		
Brandschutz					■			
Betonfertigteile	■		■	■	■	■		
Estriche						■	■	
Mörtel					■	■	■	
Whitetopping-Platten	■		■					

^[1] Rückprallkontrolle

Faserverstärkung wird häufig in viele andere Arten von Produkten und Anwendungen eingebaut, um die Rissbildung zu begrenzen und die Haltbarkeit des Ausgangsmaterials zu verbessern. Dazu gehören:

- Mörtel und Putze
- Sand- / Zementestriche
- Zementgebundene Pump-Estriche
- Feuerfeste Produkte
- Gartenprodukte (Töpfe und Zierrat)
- Architekturbeton
- Dekorativer Stempelbeton
- Waschbeton
- 3D-Betondruck
- Sehr dünne Whitetopping-Schichten

5.7 MINIMALE FASERDOSIERUNG

Die Faserdosierung ist auf dem Produktdatenblatt des Herstellers anzugeben. Es gibt jedoch eine Mindestmenge, um die Duktilität zu gewährleisten oder die Rissbildung zu kontrollieren, auf die in EN 14487-1 verwiesen wird.

Eine minimale Faserdosierung wurde nach den theoretischen Ansätzen von McKee zum durchschnittlichen Faserabstand vorgeschlagen.

Die dreidimensionale Darstellung zeigt eine einzelne Faser in einem Einheitsvolumen. Die Theorie besagt, dass die Anzahl von Würfeln mit der Abmessung s in einem Einheitsvolumen von Beton der Anzahl der Fasern im Gesamtvolumen entspricht. Wenn der Würfel, der eine Faser enthält, verkleinert wird, kommt es zu einer Überlappung der Fasern.

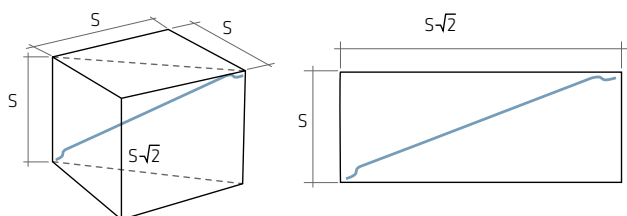


Abb. Mindestfaserdosierung auf der Grundlage eines Überlappungskonzepts

Der durchschnittliche Abstand zwischen den Fasern s , kann geschätzt werden, wobei l_f die Länge der Faser, d_f der Durchmesser der Faser und ρ_f der prozentuale Anteil der Faser am Volumen ist.

$$s = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot d_f^2 \cdot l_f}{4 \rho_f}}$$

d_f = äquivalenter Durchmesser in mm
 l_f = Länge in mm
 ρ_f = Faseranteil in Prozent des Volumens

Die Formel kann umgestellt werden, um die Dosierung auf der Grundlage der Fasergeometrie, des Schlankheitsverhältnisses und des Volumenanteils des Faserbetons zu bestimmen.

$$\text{Dosierung (min)} = \left[\frac{1}{\left(\frac{l_f}{\nu \sqrt{3}} \right)^3} \right] / \left[\frac{4}{\pi d_f^2 l_f \rho_f} \right]$$

Beispiel mit SikaFiber® Force-50:

Faserlänge	= 50 mm
Äquivalenter Faserdurchmesser	= 0.72
Schlankheitsverhältnis	= 0.69
Materialdichte	= 910 kg / m ³

Y	Minimale Dosierung	
1	$s < 0.58 l_f$	1 kg / m ³ / 2 pcy
1.35	$s < 0.45 l_f$	2 kg / m ³ / 3 pcy
1.45	$s < 0.40 l_f$	3 kg / m ³ / 5 pcy
1.70	$s < 0.29 l_f$	4 kg / m ³ / 7 pcy

Für Spritzbeton schlägt EN 14487-1 vor, dass der durchschnittliche Abstand s zwischen den Fasern, weniger als $0.45 l_f$ betragen sollte, und für Anwendungen kann vorgeschlagen werden, dass der Abstand s weniger als 0.4 betragen sollte.



6 FASERBETON

6.1 START



Die Konstruktion von Faserbeton ist oft eine Nischentechnologie und wird möglicherweise nicht in den Lehrplänen berücksichtigt. Derzeit gibt es keine harmonisierten globalen Standards für Faserbeton, was bedeutet, dass die Entwurfsmethoden aus verfügbaren pränormativen Veröffentlichungen wie dem fib Model Code 2010, Abschnitt 5.6 und dem RILEM TC 162-TDF stammen: Prüf- und Bemessungsverfahren für Stahlfaserbeton.

Für die Bemessung wird das Material im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) betrachtet. In zahlreichen Studien und veröffentlichten Berichten wurde versucht, das Zug- und Biegeverhalten im Nachrissbereich zu korrelieren. Dies ist nicht Gegenstand dieses Handbuchs; weitere Informationen finden Sie in den folgenden Dokumenten.

Es gibt verschiedene Ansätze für die Bemessung von Faserbeton, die sich jedoch nicht auf die folgenden Beispiele beschränken:

- The Concrete Society Technical Report 63 – Guidance for the Design of Steel-Fibre Reinforced Concrete (Leitfaden für die Bemessung von Stahlfaserbeton)
- The Concrete Society Technical Report 65 – Guidance for the Design of Steel-Fibre Reinforced Concrete (Leitfaden für die Bemessung von Stahlfaserbeton)

Spezifisch für Tübbings:

- Die International Tunnelling and Underground Space Association ITAtech Bericht Nr. 7 / April 2016

Für Fundamentplatten / Bodenplatten:

- American Concrete Institute ACI 360R – Guide to Design of Slabs-on-Ground (Leitfaden für die Planung von Fundamentplatten)
- The Concrete Society Technical Report 34 – Concrete Industrial Ground Floors (Industriefussböden aus Beton)

Kapitel 3 dieses Handbuchs enthält einige weitere Verweise.

6.2 PHILOSOPHIE

Bauingenieure konstruieren Stahlbeton in der Regel so, dass alle Zugkräfte von einer durchgehenden Stahlstab- oder Mattenbewehrung aufgenommen werden. Es wird immer davon ausgegangen, dass die Stahlbewehrung fest in ihrer Position fixiert ist und sich nicht bewegen kann. Die Stahlbewehrung kann jedoch nachgeben, obwohl sie nicht dafür ausgelegt ist, aus dem Beton herauszurutschen. Die Tragwerksplanung für Beton liefert eine detaillierte Spezifikation der Betongeometrie, der Materialeigenschaften, der Grösse und der Lage der Stahlbewehrung. Diese werden in der Regel in Form eines Biegeplans und detaillierter Zeichnungen dargestellt.

Im Vergleich dazu wird bei Faserbeton das "Herauszurutschen" als Teil der Entwurfsphilosophie verwendet, wobei der Schwerpunkt auf der Berechnung der Zugfestigkeit liegt. Das bedeutet, dass Faserbeton-Elemente auf der Nachrissfestigkeit beruhen. Im Allgemeinen haben Fasern, die in der üblichen Dosierung verwendet werden, keinen direkten Einfluss auf die Zug- oder Biegefestigkeit des Betons, anders als eine Stahlbewehrung. Jedoch nur so lange, bis der Beton reisst und die Fasern die Grösse der Rissöffnung begrenzen. Sobald ein Riss entstanden ist, übernehmen die Fasern die Aufgabe und tragen die einwirkenden Kräfte. Es heisst, dass Fasern das Verhalten im GZG durch die Verringerung der plastischen Schwindrissbildung und das Verhalten im GZT verbessern, wo sie die traditionelle Stahlbewehrung teilweise oder ganz ersetzen können. Ein Vorteil von Faserbeton ist, dass der Abstand zwischen den Fasern sehr gering ist und dass die Fasern Ecken und Kanten ausfüllen. Die Stahlstäbe erfordern einen gewissen Abstand zur Betonoberfläche und eine Überdeckung.

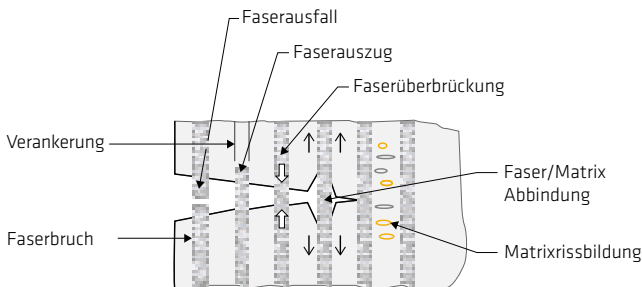


Abb. 6.2.1: Prinzip der rissüberbrückenden Fasern im Beton, die ihn von einem spröden zu einem duktilen Material machen

Prinzip der Rissüberbrückung

Die Phasen des Faserbeton-Versagens oder der Eigenspannung beginnen mit der Rissbildung in der Zementmatrix. Wenn sich der Riss öffnet, kommt es zu einer Ablösung zwischen der Faser und der Zementmatrix. Wenn die Faser den Riss überbrücken kann, kommt es zu keinem Versagen, aber mit zunehmender Belastung oder Spannung vergrössert sich der Riss und es kommt zu einem Reibungsgleiten entlang der Faser oder zu einer Verformung der Verankerung. Bei höheren Spannungen reisst die Faser schliesslich aus der Zementmatrix heraus oder es kommt zu einem Faserbruch unter Spannung.



Die wichtigste Eigenschaft von Faserbeton bei der Betrachtung eines Strukturelements ist die Nachriss- und Restzug- oder Biegezugfestigkeit. Die Fasern beginnen zu arbeiten, sobald sich der erste Mikroriss im Beton bildet. Wenn sich die Rissöffnung aufweitet, beginnen die Fasern, den Zugkräften zu widerstehen, indem sie die Spannungen über den Riss hinweg überbrücken und weiterleiten. Auf diese Weise verhindern die Fasern, dass sich der Riss vergrößert und durch den Beton verläuft. Das bedeutet, dass der Beton nicht versagen wird und nach dem Auftreten des ersten Risses noch eine gewisse Restfestigkeit im Beton vorhanden ist.

Das wichtigste Kriterium bei der Konstruktion ist die Leistungsfähigkeit des Verbundwerkstoffs, die als Restzugfestigkeit gemessen wird. Die Parameter werden aus Balkenprüfungen ermittelt, um die residuelle Biegezugfestigkeit bei definierten Balkendurchbiegungen zu bestimmen. Diese Ergebnisse werden in Gleichungen eingesetzt, um die Tragfähigkeit des betrachteten Elements zu bestimmen.

6.2.1 ENTFESTIGUNG UND VERFESTIGUNG

Wenn ein Material verstärkt wird, bedeutet dies im Allgemeinen, dass die Festigkeit verbessert wird. Da Beton bereits eine hohe Druckfestigkeit aufweist, liegt die Verbesserung in den schwächeren Eigenschaften wie einer Erhöhung der Zugfestigkeit, der Zugspannung, des Elastizitätsmoduls oder einer Kombination dieser Einflüsse. Die Konstruktion von statisch wirkenden Fasern unterscheidet sich von der herkömmlichen Stahlmatten- / Stabbewehrung und geht davon aus, dass die Fasern bei anhaltender Belastung aus dem Beton herausrutschen.

In Normalbeton erhöhen Faserdosierungen von 4 – 8 kg/m³ PP-Makrofasern oder 20 – 40 kg/m³ Stahlfasern nicht die Zug- oder Biegefestigkeit des Betons. Darüber hinaus haben Fasern in dieser Dosierung keinen Einfluss auf die Spitzenbelastung des Verbundwerkstoffs, sondern überbrücken Risse, sobald sie entstanden sind. Dies wird als das Nachrissverhalten des Betons beschrieben, was zu einer erhöhten Zähigkeit und zu verbesserten Energiedissipations- / Absorptionseigenschaften führt.

Während Faserbeton das Potenzial hat, mit einer viel höheren Dosierung von hochfesten Stahlfasern einen Verfestigungseffekt zu erzeugen, führt die Leistung der Fasern in den meisten Fällen zu einem Entfestigungsverhalten. Dies bedeutet einfach eine Verringerung der Spannung über den Spitzenwert hinaus mit einer Zunahme der Verformung.

Bei einem Verfestigungsverhalten ist der Anstieg der Zugfestigkeit auf die Verstärkung zurückzuführen. Mit zunehmender Dehnung kann eine höhere Spannung aufgebracht werden, bevor die Spitzenlast erreicht wird. Wenn die Spitzenlast erreicht ist, wird in der Regel wieder eine verteilte Rissbildung beobachtet, die zu einer Risslokalisierung mit einem Entfestigungsverhalten führt.

Ein Beispiel für Verfestigung ist Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC oder UHPFRC) mit Stahlfasern oder Engineered Cementitious Composite (ECC) mit synthetischen Fasern.

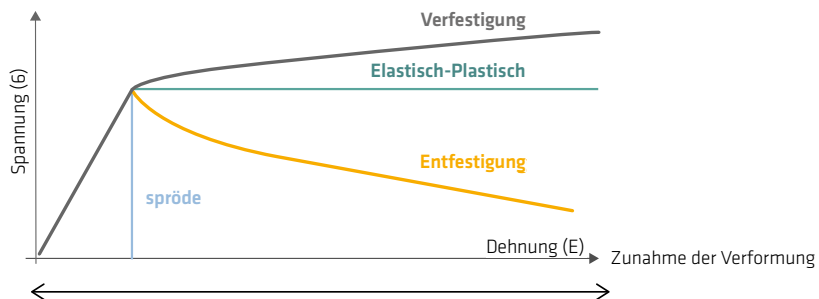


Abb. 6.2.1.1: Veranschaulichung von Entfestigung gegenüber Verfestigung

Der Mechanismus des Faserverhaltens kann anhand eines 3-Punkt-Biegeversuchs veranschaulicht werden (Abb. 6.2.1.2). Auf einen Betonbalken wird in der Mitte eine Last aufgebracht und die Spannung erhöht (1), bis ein Punkt erreicht wird, an dem die Last-Durchbiegungskurve von der ursprünglichen linearen Reaktion abweicht. Dies wird als Proportionalitätsgrenze (LOP) bezeichnet. Bis zu diesem Punkt wirkt die Beanspruchung auf einen ungerissenen Teil in der Mitte der Spannweite. Wenn der Balken unbewehrt ist und die Belastung anhält, bricht der Balken (4).

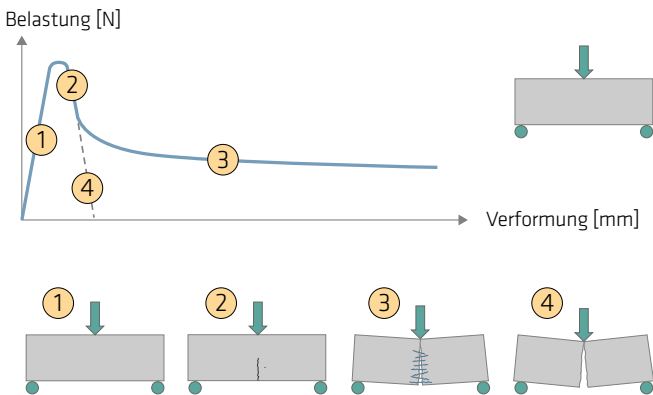


Abb. 6.2.1.2: Leistung eines Faserbetonträgers im 3-Punkt-Biegeversuch im Vergleich zu unbewehrtem Beton

Wenn der Beton mit Makrofasern bewehrt ist, überbrücken die Fasern den Riss und zeigen ein Entfestigungsverhalten. Die Nachrissfestigkeit ist geringer als die Erstrissfestigkeit (2), und da die Fasern den Riss überbrücken, tragen sie auch die aufgebrachte Last (3). Hier spielen nun das Fasermaterial, die Geometrie, die Form, die Verankerung, die Dispersion und das Matrixmaterial eine entscheidende Rolle.

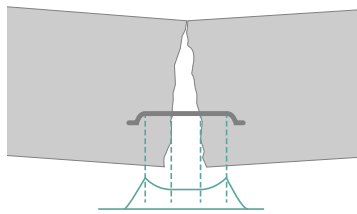


Abb. 6.2.1.3: Spannungsverteilung einer Stahlfaser, die einen Riss in einer zementgebundenen Matrix überbrückt

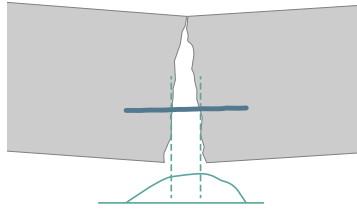


Abb. 6.2.1.4: Spannungsverteilung einer synthetischen Makrofaser, die einen Riss in einer zementgebundenen Matrix überbrückt

Eine Faser mit einer zu hohen Zugfestigkeit, einem zu hohen Elastizitätsmodul oder einer schlechten Verankerung kann die Kraft des Betons nicht auf die Faser übertragen und reisst schliesslich aus. Dies führt zu einem schlechten strukturellen Verhalten des Faserbetons.

Um die hohe Festigkeit und das hohe Elastizitätsmodul zu nutzen, werden Stahlfasern normalerweise mit hakenförmigen Enden hergestellt. Die Haken verhindern ein zu frühes Herausrutschen der Fasern und tragen dazu bei, dass möglichst viele Kräfte vom Beton auf die Faser übertragen

werden, bevor die Fasern herausrutschen.

Es ist wünschenswert, dass die Verankerung versagt, bevor die Zugfestigkeit der Fasern erreicht ist, da es sonst zu einem Faserbruch und einem plötzlichen Versagen des Betons kommen würde.

Die Verankerung von synthetischen Makrofasern funktioniert anders. Makrofasern werden in der Regel mit einer gewellten oder geprägten Oberfläche hergestellt, was zu einem konstanten Widerstand beim Herausziehen der Faser aus dem Beton führt. Das unterschiedliche Verankerungsverhalten kann mit dem Einzelfaser-Auszugsversuch beobachtet werden. Dabei handelt es sich um eine einzelne Faser, die in eine zementgebundene Matrix eingebettet und dann in Faserrichtung herausgezogen wird.



6.3 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

6.3.1 STATISCH WIRKSAM UND STATISCH NICHT WIRKSAM

Synthetische Mikrofasern bieten entscheidende Vorteile im plastischen Zustand von Beton und werden in relativ geringer Dosierung eingesetzt. Als solche haben diese Fasern keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Druck-, Zug- oder Biegezugfestigkeit von Festbeton und werden im Allgemeinen als statisch nicht wirksame Fasern bezeichnet. Synthetische Makro- und Stahlfasern sind so konzipiert, dass sie im ausgehärteten Zustand des Betons die beste Leistung zeigen. Das bedeutet, dass die Leistung von Faserbeton in der Regel nach 28 Tagen geprüft wird. In der EN 14889 werden statisch wirksame Fasern als solche beschrieben, die dem Beton hinzugefügt werden, um zur Tragfähigkeit eines Betonelements beizutragen.

6.3.2 STATISCH WIRKSAM NACH EUROPÄISCHER NORM

Fasern, die nach EN 14889 als statisch wirksam eingestuft werden, müssen nachweislich bestimmte Leistungskriterien in Balkenprüfungen erfüllen. Zur Bestimmung der Restbiegezugfestigkeit des Balkens wird eine 3-Punkt-Balkenprüfung durchgeführt. Die Leistungsanforderungen sind in Abschnitt 5.8 von EN 14889-1 und EN 14889-2 definiert. Der Referenzbeton ist in einer anderen Norm, der EN 14845-1, definiert und dient im Grossen und Ganzen dazu, die Leistungen der Fasern auf ähnliche Weise zu vergleichen. Der Referenzbeton unterscheidet sich in der Regel vom Projektbeton. In solchen Fällen kann die Balkenprüfung wiederholt werden, um die Anforderungen des Projekts zu berücksichtigen und den Entwurf zu optimieren.

ABSCHNITT 5.8 AUSWIRKUNGEN AUF DIE FESTIGKEIT VON BETON

Der Einfluss auf die Festigkeit wird gemäss EN 14845-2 mit einem Referenzbeton nach EN 14845-1 bestimmt. Der Hersteller gibt das Faservolumen in kg / m^3 an, um eine durchschnittliche Restbiegezugfestigkeit von mindestens 1.5 MPa bei einer Rissverbreiterung von 0.5 mm (was einer mittigen Durchbiegung von 0.47 mm entspricht) und eine mittlere Festigkeit von mindestens 1 MPa bei einer Rissverbreiterung von 3.5 mm (was einer mittigen Durchbiegung von 3.02 mm entspricht) zu erreichen.

6.4 BEMESSUNGSKONZEPTE

6.4.1 BEMESSUNG VON STAHLBETON

Die Bemessung von Stahlbeton für Biegebeanspruchung mithilfe der Spannungsblocktheorie zeigt, dass bei Rissen im Beton die Druckkraft vom Beton und die Zugkraft vom Bewehrungsstab getragen wird. Die Zugtragfähigkeit von unbewehrtem Beton wird nicht berücksichtigt. Die Bemessungsmomentkapazität des verstärkten Abschnitts muss grösser sein als das berechnete Moment des Abschnitts.

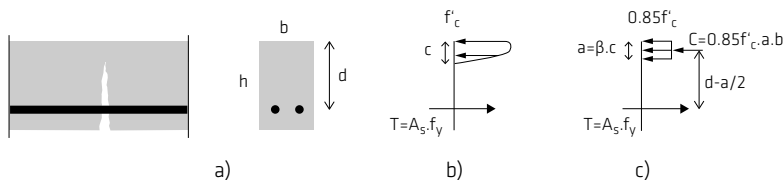


Abb. 6.4.1.1: Schematische Darstellung des Spannungsblocks für ein gerissenes Stahlbeton-Biegeelement ohne Fasern: a) Querschnitt eines Stahlbetonträgers; b) Tatsächliche Verteilung der Normalspannungen; c) Vereinfachte Verteilung der Normalspannungen.

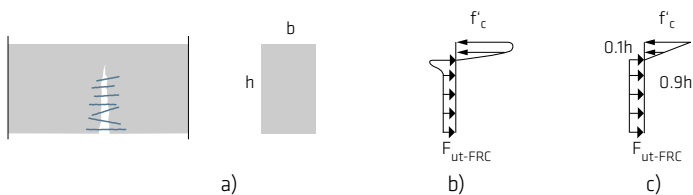


Abb. 6.4.1.2: Schematische Darstellung des Spannungsblocks für ein gerissenes Faserbeton-Biegeelement: a) Querschnitt eines Faserbetonträgers; b) Tatsächliche Verteilung der Normalspannungen; c) Vereinfachte Verteilung der Normalspannungen.

Tübbinge

Tübbings können mit der Finite-Elemente-Methode nach den Empfehlungen des fib Model Code 2010 bemessen werden. Eine weitere verfügbare Bemessungshilfe ist die ITAtech Guideline for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments - Volume 1: Design Aspects (ITAtech-Leitfaden für Tübbings aus Faserbeton - Band 1: Gestaltungsaspekte) (ISBN: 978-2-9701013-2-1). Ziel des ITAtech-Dokuments ist es, Tunnelbauingenieure, Bauunternehmer und Bauherren dabei zu unterstützen, die Vorteile und Grenzen des Einsatzes von Faserbeton für Tübbings besser zu verstehen.

Tübbings sind in der Regel für die Aufnahme von Druckbelastungen ausgelegt. Dies liegt daran, dass die Tübbings im Betrieb im Wesentlichen unter Druck stehen, es sei denn, die Bodenverhältnisse erfordern Zug- oder Biegemomente. Bei reiner Kompression wird in der Regel eine Stahlbewehrung verwendet, um die Schwindrissbildung zu kontrollieren und das Ausschalen, den Transport und den Einbau des Tübbings zu vereinfachen.

Vorteile für den Fertigteilhersteller bei der Herstellung der Tübbings ohne Stahlmattenbewehrung:

- Es sind keine detaillierten Zeichnungen oder Biegepläne erforderlich
- Keine Herstellung der Stahlbewehrung
- Keine sperrige Lagerung
- Geringeres Verletzungsrisiko bei der Handhabung
- Zeiteinsparung durch Wegfall der Befestigung der Bewehrung
- Schnellere Produktion der Tübbings
- Weniger Rütteln erforderlich
- Eine gute Oberflächenbeschaffenheit



Für die Verwendung von Faserbeton als Tragwerk in Tübbings muss dieser mehrere Kriterien erfüllen, die auf der Proportionalitätsgrenze und den Restbiegezugfestigkeiten basieren. Diese Werte sind den Balkenprüfungen nach EN 14651 entnommen.

$$f_{R1k}/f_{Lk} > 0.4 \quad \text{und} \quad f_{R3k}/f_{R1k} > 0.5$$

Wenngleich es nicht möglich ist, die Stahlbewehrung vollständig durch Fasern zu ersetzen, können 1:1-Tests in vollem Umfang zur Überprüfung eines Strukturentwurfs verwendet werden. Tests haben gezeigt, dass eine reduzierte Stahlbewehrung in Kombination mit Fasern zu einer Erhöhung der Duktilität im Vergleich zu einer reinen Bewehrungsvariante führt.

Darüber hinaus bietet die Verwendung von PP-Makrofasern als teilweiser Ersatz mit einer geringeren Menge an Verstärkung mehrere Vorteile:

- Steigerung der strukturellen Leistungsfähigkeit durch die Kombination von PP-Makrofasern und herkömmlicher Stahlbewehrung
- Schnellere Formfüllung und einfachere Verdichtung insbesondere in der Mitte des Tübbings
- Besserer Schutz der Kanten beim Transport der Tübbings
- Keine signifikante Auswirkung auf die Oberflächenbehandlung

Fundamentplatten

Traditionell wurden Bodenplatten mit elastischen Methoden entworfen, wobei Gleichungen verwendet wurden, die von Westergaard in den 1920er Jahren entwickelt wurden, und dies ist immer noch weit verbreitet. Diese Bemessungsmethoden sind in der Regel konservativ und führen zu relativ dicken Platten, was bedeutet, dass eine Bewertung von Durchbiegungen und anderen Anforderungen im Betrieb möglicherweise nicht als notwendig erachtet wird.

Mit der Entwicklung plastischer Analysemethoden sind die Platten dünner geworden, so dass neben der Tragfähigkeit der Platte auch andere Faktoren wie Durchbiegung, Lastübertragung über Fugen und Risskontrolle berücksichtigt werden müssen.

Der 162/6 und Eurocode 2 / EN 1992-1 enthalten präzise Anleitungen für die Bemessung von Bodenplatten, aber im Allgemeinen hängt die Bemessung solcher Platten in erster Linie von folgenden Faktoren ab:

- Bodenbeschaffenheit (k-Wert)
- Platteneigenschaften (Geometrie, Fugen, Materialeigenschaften)
- Belastungen (statisch, dynamisch, gleichmässig verteilt, punktförmig)

Eine Betonplatte, die auf einem festen Untergrund ruht, muss viel weniger statische Momente übertragen als eine Platte, die auf einem weichen Untergrund ruht. Eine übliche Voraussetzung für eine Bodenplatte ist ein gut verdichteter Boden, der zu einer erhöhten Steifigkeit führt. Dies führt zu einer geringeren Anzahl an Rissen, die durch einwirkende Lasten verursacht werden, berücksichtigt jedoch nicht die Schwindung, die Temperatur oder die Position der Fugen.

6.5 SikaFiber® SOFTWARE

Tool für Fundamentplatten

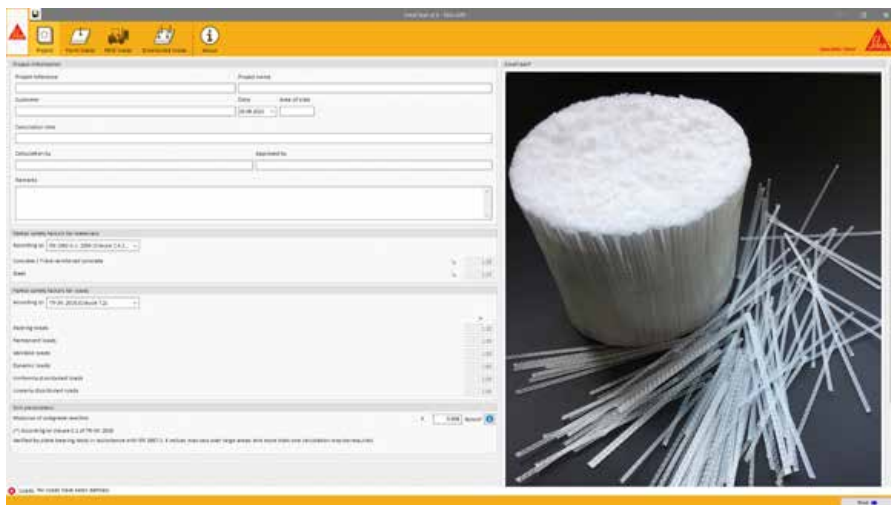
Sika® bietet ein eigenes Software-Tool für die Bemessung von mit Kunststoff- oder Stahlfasern bewehrten Bodenplatten. Die Software wurde in Übereinstimmung mit zwei Veröffentlichungen entwickelt.

- The Concrete Society Technical Report 34 Concrete Industrial Ground Floors – A guide to design and construction (Technischer Bericht 34 Industriefussböden aus Beton – Ein Leitfaden für Planung und Bau)
- The American Concrete Institute ACI 360R – Guide to Design of Slabs-on-Ground (Leitfaden für die Planung von Fundamentplatten)

Nach Eingabe der Projektinformationen, der Bodenbeschaffenheit und der Belastungen hilft das Software-Tool dem Planer, die optimale Faserdosierung für die erforderliche Plattendicke und Betongüte zu ermitteln.

Too – Funktionen

- Einfaches Schritt-für-Schritt-Verfahren
- Globale SikaFiber®-Auswahl
- Mehrere Sprachen
- Hilfreiche Grafiken
- Anzeige nützlicher Informationen
- Ausdruck in kurzer oder ausführlicher Form



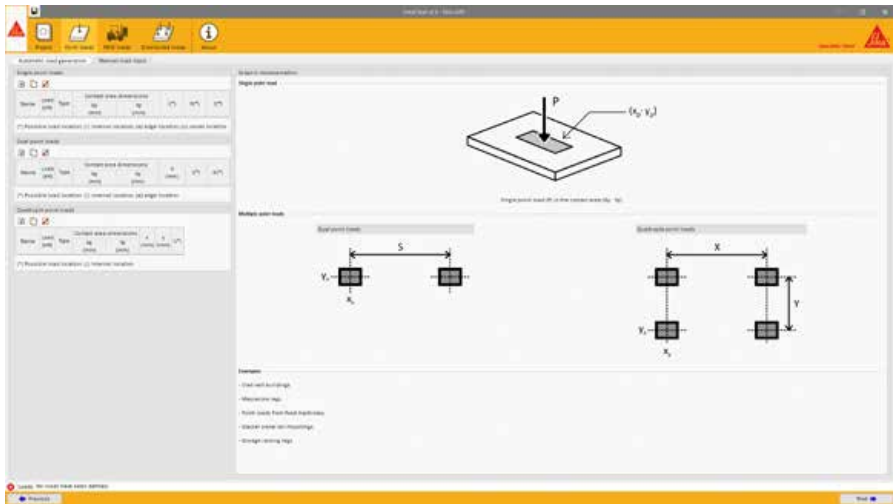
Tool - Optionen

Es gibt mehrere Optionen, die es dem Benutzer ermöglichen, spezifische Entwürfe zu erstellen:

- Standard- oder benutzerdefinierte Teilsicherheitsfaktoren
- Einstellbarer Bodenbeschaffenheit (k-Faktor)
- Lastkontrolle in der Nähe einer Fuge oder einer freien Kante
- Veränderbare Lastabtragungswerte an Rand- und Eckverbindungen
- Optionale Prüfung der Fugenabstände
- Benutzerdefinierte Betonklasse
- Option zum Hinzufügen einer leichten Verstärkung
- Option zum Ausdruck einer Zusammenfassung oder eines langen Ausdrucks

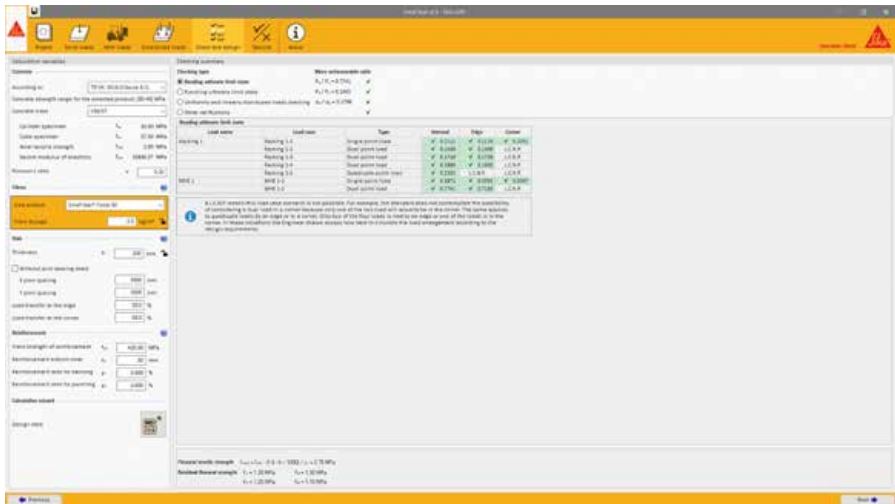
Lasten

Wählen Sie zwischen mehreren Punktlasten, Materialhandlungsausrüstungen, gleichmässig verteilten oder Linienlasten mit der zusätzlichen Option, eine Last in der Nähe einer Verbindung zu definieren.

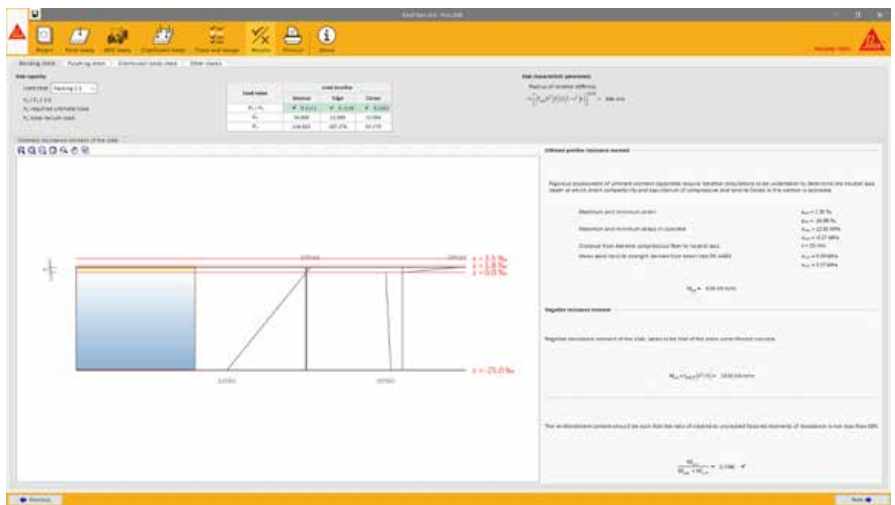


Prüfungszusammenfassung

Der Bildschirm mit der Prüfungszusammenfassung bietet einen schnellen und einfachen Überblick über die Ergebnisse und zeigt deutlich an, wo die Platte die Bemessungskapazität überschreitet (rot) oder wo der Entwurf die Bemessungskriterien erfüllt (grün).



Der Benutzer kann den Plattenentwurf optimieren, indem er die Entwurfsparameter wie Plattendicke, Betonqualität, Lastabtragung oder Fasertyp und -dosierung anpasst.




Ergebnisse

Bei einem gültigen Entwurf stehen die Ergebnisse zur Ansicht oder zum Ausdruck zur Verfügung, und die Zahlen für jeden Lastfall können detaillierter betrachtet werden.

Ausdruck

Das Software-Tool bietet die Möglichkeit, eine zusammengefasste oder detaillierte Version des Entwurfs auszudrucken. Angezeigt werden die

- Projektinformationen
- Eingangsbelastungen
- Berechnungen für den ungünstigsten Lastfall
- SikaFiber® Typ und Dosierung



SIKAFIBER® Product Proposal

FOR FIBER REINFORCED CONCRETE SLABS ON GROUND

PROJECT INFORMATION	
Project reference	ARC / 244810
Project name	New Multi-Purpose Warehouse
Customer	Your Customer Ltd
Date	20/02/2020
Calculation No.	Warehouse A - Zone 1
Calculation by	DTI
Approved by	
Remarks	General loading + forklift + racking L2 and 3 + 100.
Country	Switzerland

PRODUCT INFORMATION	
Product	SikaFiber® Force-50
Dosage	3.0 kg/m³

DESIGN SUMMARY	
Design method	Concrete Society Technical Report 34 - Concrete Industrial Ground Floors, 4th Edition
Regulations	EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
Concrete class	C40/50
Slab thickness	h = 200 mm
Joint spacing	s = 5000 mm, y = 5000 mm
Modulus of subgrade reaction	k = 0.020 N/mm²

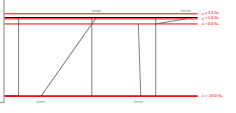
LOADING SUMMARY		
DESIGN TYPE	LOAD CASE	VALUE
Bending	Messzone 1	0.9721
Bending (SHF)	MSE 1	0.9150
Punching	Messzone 1	0.6058
Uniformly distributed loads	Uniform load 1	0.7331
Linearly distributed loads	Linear load 1	0.1187

#4 reinforced concrete
 f_{ctm} = 23.00 N/mm²
 f_{ctd} = 23.00 N/mm²
 α_{ct} = 0.80

#4 CMOD 0.5
 f_{ct} = 2.12 MPa
 α_{ct} = 0.42

#4 CMOD 1.5
 f_{ct} = 2.12 MPa
 f_{ctd} = 40.00 MPa
 α_{ct} = 1.50

σ_{max} are derived from the stress-strain curves in the #4
 content per unit width of slab
 M₁ = 50.82 kN m/m



σ_{max} Maximum strain
 α_{ct} Maximum strain
 σ_{ct} Maximum stress
 α_{ct} Maximum stress
 α_{ct} Distance from extreme compression fiber to neutral axis
 M₁ Negative resistance moment per unit width of slab
 The negative moment of the slab is taken to be that of the plain unreinforced concrete.

$M_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ct} \cdot \alpha_{ct} \cdot b \cdot h^2$

h Slab thickness
 f_{ctd} Design concrete flexural tensile strength
 $f_{ctd} = \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} \cdot \alpha_{ct} \cdot \gamma_{red}$

f_{ctm} Mean axial tensile strength
 γ: Partial safety factor for material

σ_{max} = 2.22 N/mm²
 α_{ct} = 23.00 N/mm²
 σ_{ct} = 22.87 MPa
 α_{ct} = 23.31 MPa
 f_{ct} = 0.22 mm
 M₁ = 25.62 kN m/m

A = 300 mm
 f_{ctd} = 2.04 MPa

f_{ctm} = 3.31 MPa
 γ = 2.50

AVAILABLE FROM SIKA		
Address	Optimising the fresh and/or hardened properties of concrete using admixtures, water reducers, accelerators, retarders, air-entrainment, shrinkage reducers, anti-cracks (compression whitening)	Sika ViscoFlow®, Viscocrete®, SikaCenter®, FerroCem®, SikaStige®
Admixtures	For use with self-consolidating aggregates and protecting equipment from excessive wear. Minimizes internal abrasion.	SikaPump®, Sika® Stabilizer
Admixtures	Liquid agents or sheets protecting the slab from premature drying.	Actisol®, Sika® Ultracure
Admixtures	Extend longevity of formwork by preventing concrete from sticking to the mould.	Sika® Separo®
Admixtures	Preventing dirt from filling the joint, accelerating movement and protecting the edges allowing smooth joint crossing.	SikaSeal®
Admixtures	Improve slab life span by impregnating the surface on the forming, especially, later.	Sika® Coatform, SikaFloor®
Admixtures	Increase resistance against mechanical and chemical attack.	SikaFloor®, SikaSweep®



7 ANWENDUNG VON FASERBETON

7.1 FUNDAMENT- / BODENPLATTEN



Fundamentplatten, Bodenplatten, tragende und nicht-tragende Bodenplatten haben alle eines gemeinsam, nämlich dass der Boden direkt unter der Platte das Fundament ist. Es handelt sich um ein ähnliches Prinzip wie bei einem traditionellen Mauerfundament, bei dem die Lasten durch den Beton in einen entsprechend stabilen Boden übertragen werden.

Bodenplatten sind nicht zu verwechseln mit vorgespannten, schwimmenden oder Flächen Gründungen, bei denen die Konstruktionskonzepte unterschiedlich sind. Zwar kann sich unter diesen Plattentypen ein Boden befinden, doch kann dieser anfällig für Setzungen oder Bewegungen sein oder nicht stark genug, um die Lasten zu tragen. Es gibt unterschiedliche Auffassungen von schwimmenden Platten und Estrichen, so dass die Definition einer Fundamentplatte letztlich vom statischen Konzept abhängt und davon, wie die Lasten in eine geeignete Tragschicht eingeleitet werden.

Verwendung

- Wohn-, Gewerbe- oder Industrieböden
- Landwirtschaftliche Bodenplatten
- Gehwege und befestigte Flächen
- Strassen
- Estriche und Deckschichten

Vorteile

Faserbeton ist eine ideale Alternative zu herkömmlicher Stahlbewehrung in Bodenplatten, bei denen der Zweck der Bewehrung darin besteht, die plastische Schwindrissbildung zu kontrollieren. Unabhängig davon, wo der erste Riss auftritt, befinden sich die Fasern immer an der richtigen Stelle. Es gibt mehrere wichtige Gründe, warum die Verwendung von Faserbeton in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat.

- Vereinfachung des Bauprozesses
- Verkürzung der Bauzeiten
- Verbesserung der Gesundheit und Sicherheit
- Erhebliche Kosteneinsparungen
- 3-dimensionale Verstärkung

Faserauswahl

Die Wahl der Fasern kann auch von der Verfügbarkeit des Produkts abhängen.

Fasertyp	Monofilament-Mikrofaser	Fibrillierte Mikrofaser	PP-Makrofaser	Stahl-Makrofaser
Plattentyp	Statisch wirksam und statisch nicht wirksam	Statisch wirksam und statisch nicht wirksam	Statisch wirksam und statisch nicht wirksam	Statisch wirksam
Zu Beachten	Temperaturen Luftfeuchtigkeit Wind	Temperaturen Luftfeuchtigkeit Wind	Lasten Umgebungs- bedingungen	Lasten Umgebungs- bedingungen
Leitfaden zur Anwendung	Wohnen Leichte gewerbliche Nutzung	Wohnen Gewerbe	Gewerbe Industrie	Schwerindustrie
Produkt	SikaFiber®-618 PPM SikaFiber®-1218 PPM SikaFiber®-634 PPM SikaFiber®-12 PPM	SikaFiber®-6 PPF SikaFiber®-12 PPF	SikaFiber® Force-50 SikaFiber® Force-60	Wenden Sie sich an Ihre lokale Sika-Niederlassung
Leitfaden Dosierung ^[1]	0.6 – 1.0 kg / m ³	0.9 – 1.2 kg / m ³	3 – 6 kg / m ³	20 – 40 kg / m ³

^[1] siehe entsprechendes Produktdatenblatt für Hinweise

Anwendung

Die Kosten für einen Kubikmeter Faserbeton werden höher sein als die eines Betons ohne Fasern, so dass die zusätzlichen Kosten vom Hersteller zu berücksichtigen sind. Diese hängen von mehreren Faktoren ab.

- Art und Menge der Fasern
- Betonrezeptur
- Dosierungsmethode
- Bearbeitungsgebühren

Wichtigste Schritte	Struktureller Entwurf	Bestellung	Transport	Entladen
				
Stahlbewehrung	Berechnungen und Betonangaben. Zeichnungen und Biegeplan	Bestellung beim Stahlhersteller. Vorlaufzeiten.	Bei sperrigem, schwerem Stahl kann mehr als eine LKW-Lieferung zum Einsatzort erforderlich sein.	Lagerung der Bewehrung an der Baustelle. Hebezeug erforderlich.
Faserbeton	Faserbeton-Berechnung	Bestellung des Betons im Betonwerk.		



50 % ZEITERSPARNIS



20 % KOSTENEINSPARUNG

Typische Einsparungen bei einem Projekt:

- Gebühren für Entwurf und Detaillierung
- Transportkosten
- Arbeitskosten
- Ausrüstung zum Pumpen







Es kann notwendig sein, dass der Betonhersteller die Siebkurve anpasst oder zusätzliche Betonverflüssiger hinzufügt, um die Verarbeitbarkeit anzupassen. Der Betonhersteller kann auch eine Bearbeitungsgebühr erheben, wenn die Fasern im Werk hinzugefügt werden. Wenn die Fasern auf der Baustelle hinzugefügt werden, kann ein Aufschlag berechnet werden, weil die Lastwagen länger auf der Baustelle verbleiben. Die grössten Einsparungen bei der Umstellung von herkömmlicher Bewehrung

auf Faserbeton ergeben sich vor allem auf der Baustelle, wo die zusätzlichen Kosten für den Beton durch den Wegfall von Handhabung, Verlegung und Befestigung von Stahlstäben und -matten sowie durch die Verringerung des Arbeitsaufwands ausgeglichen werden. Die grössten Einsparungen durch den Einsatz von Faserbeton ergeben sich auf der Baustelle durch den Wegfall schwerer Stahlmatten.

Beispiel

Austausch einer "leichten" Mattenbewehrung mit einem Gewicht von $3 \text{ kg} / \text{m}^2$ und einer Grösse von $2.4 \times 4.8 \text{ m}$.

- Die Dicke der Platte beträgt 150 mm
- Grösse der Platte $1'000 \text{ m}$
- Gewicht pro Matte ca. 35 kg
- $3.10 \text{ kg} / \text{m}^2$ Bewehrung unter Berücksichtigung der Überlappungslängen erforderlich
- $3'100 \text{ kg}$ sperrige Stahlbewehrung insgesamt erforderlich
- $4 \text{ kg} / \text{m}^3$ Dosierung der PP-Fasern
- 600 kg benötigte Fasern insgesamt

Vorbereitung	Einbau	Beton	Endbearbeitung
 <p>Zum Messen, Schneiden und Biegen von Bewehrungsstahl sind Fachkräfte erforderlich. Bewehrungshalter und ergänzende Befestigungen.</p>	 <p>Die Matten an die richtige Stelle heben. Die richtige Betonüberdeckung sicherstellen. Stahl überlappen und anbinden.</p>	 <p>Betonfahrzeuge können die vorbereitete Bewehrung nicht befahren und es kann sein, dass eine Pumpanlage erforderlich ist. Arbeiten im Umfeld von platziertem Stahl.</p>	 <p>Überschüssiges Material entsorgen oder nicht verwendete Bewehrung an das Werk zurückgeben.</p>
		Den Betonwagen zur Einbaustelle manövrieren.	

Weitere Vorteile:

- Fasern füllen Kanten, Ecken und schwierige Formen
- Bessere Kohäsion des Betons und weniger Bluten
- Bessere Spannungsverteilung in der Platte
- Keine Lagerfläche für Stahlbewehrung auf der Baustelle erforderlich
- 3-dimensionale Verstärkung

Plattenfugen

Grundsätzlich sollen die Fugen Schwind- und Ausdehnungsbewegungen aufnehmen und das Risiko unerwünschter sichtbarer Risse minimieren. Eine Fuge muss auch in der Lage sein, die Last von einer Platte auf eine andere zu übertragen. Die Art der Fuge und die Abstände hängen von mehreren Faktoren ab, unter anderem von den Folgenden:

- Betonrezeptur
- Höhe des Trocknungsschwindens des Betons / Volumenänderung
- Temperaturänderungen / wärmebedingte Bewegung
- Die Grösse und Anordnung der Platte
- Geplante Lasten/Verwendung und Verkehrsaufkommen
- Entwurfsverfahren
- Dicke der Platte
- Plattenbeschränkungen (z. B. Plattenverdickungen, einspringende Ecken usw.)
- Feuchtigkeit des Untergrunds
- Bauprozess
- Aushärtung



Die Breite einer Fuge wird durch das Schwinden des Betons, die Fugenabstände und wärmebedingte Bewegungen beeinflusst. Ein grösserer Fugenabstand kann zu grösseren Bewegungen an jeder Fuge und damit zu einem Risiko von Rissen in der Plattenmitte und breiteren Fugen führen. Es gibt verschiedene Arten von Fugen, die verwendet werden können, um die Gefahr der Rissbildung zu minimieren. Der Entwurf, die Auswahl und die Positionierung der Fugen liegen in der Verantwortung des Ingenieurs oder Konstrukteurs. Sie fallen nicht in den Anwendungsbereich dieses Handbuchs, und es gibt verschiedene Leitfäden, in denen der Leser weitere Informationen finden kann.

- Technical Report 34, Concrete Industrial Ground Floors, A Guide to Design and Construction – Chapter 11 (Technischer Bericht 34, Industriefussböden aus Beton, ein Leitfaden für Planung und Bau - Kapitel 11)
- SIA 262 – Die vorliegende Norm SIA 262 richtet sich an Fachleute der Projektierung. Zudem sind Bauherrschaften sowie Fachleute der Bauleitung und der Bauausführung angesprochen. Die Norm SIA 262 ist Teil der Tragwerksnormen des SIA. Sie lehnt sich an die EN 1992-1-1 der Europäischen Norm Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken-Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbaudie und integriert die Festlegungen der SN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

Ein hohes Trocknungsschwinden ist einer der Hauptgründe für die Rissbildung. Der Einsatz von Sika Schwindreduzierenden Zusatzmitteln SikaControl® SRA in Verbindung mit Fasern führt zu einem schwindarmen Beton

7.2 TUNNELAUSKLEIDUNGEN



In den letzten 30 Jahren haben eine Reihe schwerer Tunnelbrände die Schwächen von hochfestem Beton bei hohen Temperaturen aufgezeigt. Nachfolgende Untersuchungen solcher Brände und Forschungen haben ergeben, dass hochfester Beton bei hohen Temperaturen extrem anfällig für explosionsartige Abplatzungen ist, die durch den Dampfdruck im Inneren verursacht werden. Als Betonabplatzungen werden im Allgemeinen Stücke, Fragmente oder Schichten bezeichnet, die aus dem Beton herausbrechen, wenn dieser den hohen und schnell ansteigenden Temperaturen ausgesetzt ist, die bei Bränden auftreten. Betonabplatzungen können in drei Haupttypen eingeteilt werden.

1. Oberflächenabplatzungen

Das Abplatzen der Oberfläche betrifft die Gesteinskörnungen an der Betonoberfläche, wobei sich kleine Betonstücke von bis zu 20 mm Grösse in der Anfangsphase des Brandes allmählich und ohne Gewaltanwendung von der Oberfläche lösen. Dies wird in der Regel durch das Zerschlagen von Gesteinskörnungen aufgrund physikalischer oder chemischer Veränderungen bei hohen Temperaturen verursacht. Bei Oberflächenabplatzungen erfolgt der Abbau des Betons relativ langsam und umfasst die Austrocknung der Zementmatrix, gefolgt vom Verlust des Verbunds zwischen Gesteinskörnung und Matrix.



2. Eckausbruch

In den späteren Phasen der Hitzeeinwirkung, wenn der Beton gerissen ist, beginnen die geschwächten Ecken und Kanten des Betons abzubrochen.

3. Explosionsartiges Abplatzen

Dies ist zweifellos die gefährlichste Form des Abplatzens und tritt während der ersten 20 bis 30 Minuten eines Brandes auf, wenn die Temperatur im Beton zwischen 150 und 250 °C liegt. Die Theorien darüber, wie und warum es zu explosionsartigen Abplatzungen kommt, basieren überwiegend auf der Bewegung von Feuchtigkeit. Wenn die Temperatur des Betons steigt, verwandelt sich die Feuchtigkeit im Beton in Wasserdampf. Wenn er nicht aus der Betonmasse entweichen kann, führt dieser Dampf zu einem erheblichen Druckanstieg innerhalb des Betons. Im Laufe dieses Prozesses steigt der Dampfdruck bis zu dem Punkt, an dem er die Zugfestigkeit des Betons übersteigt, wodurch grosse fortschreitenden explosionsartigen Abplatzungen bis tief in die Betonstruktur hinein kommen. Betonstücke gewaltsam und explosionsartig aus dem Element herausgelöst werden. Wenn der anschliessend verbleibende Beton dem Feuer



weiterhin ausgesetzt ist, kann es zu fortschreitenden explosionsartigen Abplatzungen bis tief in die Betonstruktur hinein kommen.

Faktoren die das Abplatzen beeinflussen

Viele Faktoren beeinflussen den Grad der explosionsartigen Abplatzungen in Beton. Heutige Konstruktionen erfordern oft weitaus höhere Betonfestigkeiten als vor 40 Jahren. Hochfester Beton bietet zwar eine höhere Druckfestigkeit, einen höheren Elastizitätsmodul, eine höhere Zugfestigkeit und eine grössere Dauerhaftigkeit als normalfester Beton, erhöht aber auch die Dichte des Betons. Diese erhöhte Dichte ist einer der Hauptgründe dafür, dass explosionsartige Abplatzungen in den letzten 30 Jahren immer häufiger auftreten.

Bei der Verwendung von durchlässigerem Beton kann bei einem Brand die Feuchtigkeit aufgrund der höheren Porosität schnell aus dem heissen Beton entweichen und der Aufbau von Dampfdruck wird minimiert.

In hochfestem / dichtem Beton ist das Entweichen von Feuchtigkeit aufgrund der veränderten Porenstruktur unmöglich. Die Feuchtigkeit wird effektiv eingeschlossen und es entstehen überhitzter Dampf und erhöhte innere Spannungen, die zu explosionsartigen Abplatzungen beitragen. Dies ist der Hauptgrund, warum PP-Mikrofasern heute für viele hochfeste Betonanwendungen und Fertigteilkonstruktionen spezifiziert werden.

Weitere Faktoren, die zum Abplatzen des Betons beitragen, sind unter anderem:

- Erhitzungsgeschwindigkeit
- Vorhandensein einer durchgehenden Bewehrung
- Lasten
- Ausdehnungseigenschaften der Gesteinskörnungen

Alle vorstehend genannten Punkte sollten bei der Spezifizierung einer Betonmischung sorgfältig berücksichtigt werden. Bei vielen grossen Tunnelbauprojekten ist die Auswahl der Gesteinskörnung oft auf leicht verfügbare Materialien an einem bestimmten Ort beschränkt, so dass es nicht möglich ist, eine Gesteinskörnung mit geringen Wärmeausdehnungseigenschaften zu spezifizieren.

Faserauswahl

Die Verwendung von PP-Mikrofasern für den passiven Brandschutz wird auf der Grundlage von Erfahrungen aus ähnlichen Projekten, verfügbaren Normen oder 1:1-Tests festgelegt. Die richtige Dosierung von PP-Mikrofasern für den passiven Brandschutz muss unter Berücksichtigung der Betonspezifikation und einer Brandrisikobewertung erfolgen

Gross angelegte Brandversuche werden oft als die einzige Möglichkeit angesehen, die richtige Faserdosierung für eine bestimmte Betonmischung zu bestimmen.

Die Europäische Norm EN 1992 Eurocode 2 Abschnitt 6.1 bezieht sich auf die Verwendung von $2 \text{ kg} / \text{m}^3$ Monofilament - Mikrofasern aus Polypropylen (PP) zur Bekämpfung explosionsartiger Abplatzungen in hochfestem Beton. Viele Ingenieure folgen dieser Empfehlung, um auf teure Brandversuche verzichten zu können, da sie wissen, dass sich diese Methode in vielen abgeschlossenen Projekten bewährt hat.

Dies schliesst nicht aus, dass niedrigere Dosierungen angegeben werden können, doch sind eine sorgfältige Prüfung der Anforderungen und massstabsgetreue Tests erforderlich. In den Fällen, in denen solche Tests durchgeführt wurden, haben sich Dosiermengen zwischen 1.0 und $1.5 \text{ kg} / \text{m}^3$ für einige spezifische Tunnelprojekte als zufriedenstellend erwiesen.

Erste Brandversuche in kleinem Massstab werden einige Leistungsrichtwerte liefern, die für die erste Auswahl von Materialien nützlich sind. Es muss entschieden werden, ob ein solches Szenario die Situation bei einem echten Brand vollständig abbildet und die Qualität oder den Umfang der Daten liefert, die bei einem massstabsgetreuen Test zur Verfügung stehen.

Alle Komponenten der Betonrezeptur müssen sorgfältig ausgewählt werden. Die Gesamtwirkung von Fasertyp und -dosierung auf die Verarbeitbarkeit, den Luftgehalt und die Festigkeit des Betons sollten ebenfalls vor der Durchführung des Brandversuchs sorgfältig geprüft werden.

Die Betonprüfung sollte mindestens 90 Tage nach der Herstellung der Probekörper durchgeführt werden, so dass der grösste Teil des Wassers im Hydratationsprozess verbraucht wurde.



Tabelle 7.2.1: Beispiel für eine Betonmischung mit passivem Brandschutz

	Referenzbeton	Beton für den passiven Brandschutz
Zement	$320 \text{ kg} / \text{m}^3$	$320 \text{ kg} / \text{m}^3$
w/z-Wert	0.5	0.5
Gesteinskörnungen	0 - 32 mm	0 - 32 mm (Kalkstein, kein Quarz)
Sika® ViscoCrete®	0.8%	1.1%
SikaControl® AER (optional)		0.2%
SikaFiber®-12 / 634 PPM		$2.0 \text{ kg} / \text{m}^3$

Anwendung

Brandversuche im Originalmassstab dienen der Überprüfung der strukturellen Leistungsfähigkeit von Betonbauteilen unter Brand- und Lastbedingungen. Zusätzlich zur Hitze wird der Beton strukturell belastet, um die Betriebsbedingungen an Ort und Stelle abzubilden.

Bei Grossprojekten werden in einer Projektspezifikation in der Regel Brandversuche Originalmassstab gefordert.

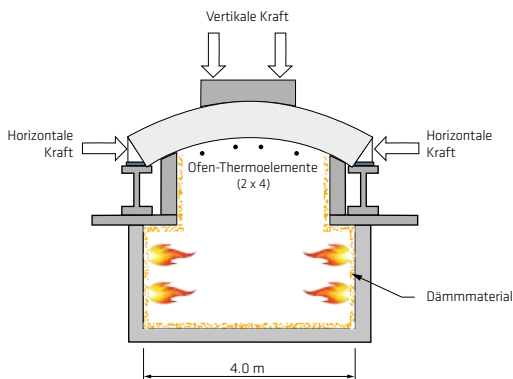


Abb. 7.2.3: Typischer Versuchsaufbau für die Prüfung eines Tübbings unter Brandlast

Die Ergebnisse eines Brandversuchs werden anhand des Folgenden interpretiert:

- Optische Kontrolle auf explosionsartige Abplatzungen an der Betonoberfläche
- Messung der Tiefe der Oberflächenabplatzungen
- Zeit bis zum Auftreten der ersten Abplatzungen
- Temperaturentwicklung auf verschiedenen Ebenen im Inneren des Probekörpers (einschliesslich der Temperatur an eingebetteten Bewehrungsstäben)

Tabelle 7.2.2: Zusammenfassung der Ergebnisse des Brandversuchs an einem Tübbing mit SikaFiber®-12 PPM

Probekörper	Maximale Abplatzungen im Raster von 20 x 20 cm	Durchschnittliche Abplatztiefe im Raster von 20 x 20 cm	Durchschnittliche Abplatztiefe über alle Probekörper
Referenz ohne Fasern	20 mm	15 mm	18 mm
Referenzbeton mit 2.0 kg / m ³ SikaFiber®-12 PPM / 634 PPM	0 mm	0 mm	0 mm

Bei den Tests wies der unbewehrte Beton erhebliche Querschnittsverluste durch explosionsartige Abplatzungen aufgrund des schnellen Eindringens von Hitze in den Beton auf. Die Verwendung von PP-Mikrofasern in einer Dosierung von 1.5 kg/m^3 verringerte die Abplatzungstiefe und das Eindringen von Wärme. Mit 2 kg/m^3 SikaFiber®-12 PPM hingegen kam es zu keinen Abplatzungen des Betons, und die maximale Temperatur, die in 50 mm Tiefe von der Oberfläche gemessen wurde, betrug nach 60 Minuten $170 \text{ }^\circ\text{C}$.

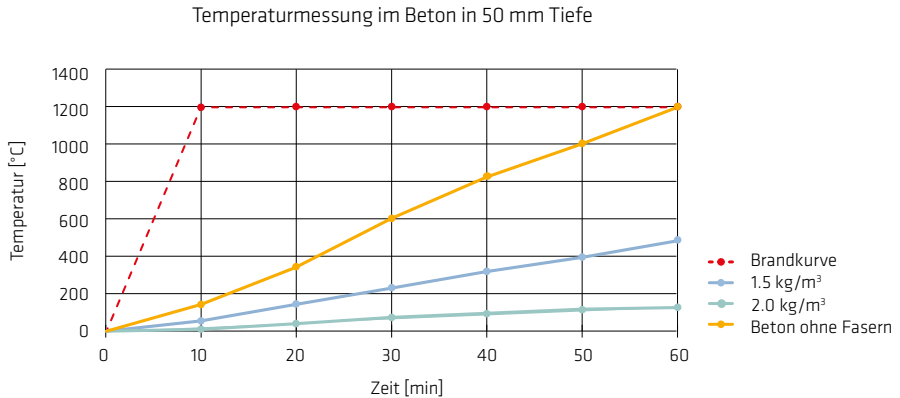
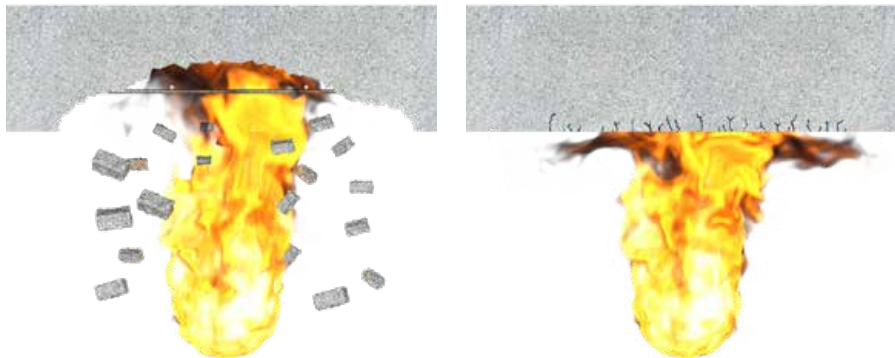


Abbildung 7.2.4 Temperaturmessungen desselben Betons in 50 mm Tiefe, wenn er einer RABT-ZV (Zug) Brandkurve ausgesetzt wird

Die Ergebnisse der Abplatzungstiefe und der Wärmeeindringung können je nach Betonqualität und Brandlastkurve stark variieren. Daher ist es wichtig, dass bei allen Grossprojekten eine geeignete Brandkurve entsprechend den Risikobewertungen und eindeutigen Leistungsparametern, wie z. B. der zulässigen maximalen Abplatztiefe und der Temperaturentwicklung, eindeutig festgelegt wird



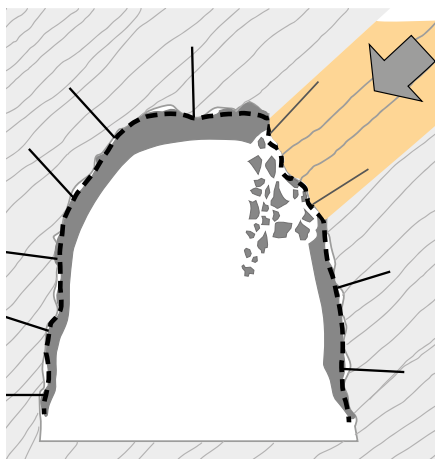
7.3 FELSSICHERUNG

Spritzbeton bezieht sich auf ein Verfahren, bei dem Beton mit hoher Geschwindigkeit auf eine Oberfläche gespritzt wird. Spritzbeton kann in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, darunter Schwimmbäder, Hangsicherungen, Silos und Bewässerungskanäle.

Im Tunnelbau und im Bergbau wird er hauptsächlich zur Fels- und Hangsicherung eingesetzt. Die wichtigsten Vorteile von Spritzbeton sind, dass der Beton in kurzer Zeit aushärtet und keine Schalung benötigt wird.



Herkömmliches Baustahlgewebe wird in der Regel zur Sicherung von Felsen oder Böschungen verwendet, muss aber mühsam zugeschnitten und befestigt werden, bevor der Beton aufgespritzt werden kann. Der Düsenführer muss zusätzlich darauf achten, dass das Baustahlgewebe vollständig vom Spritzbeton umschlossen wird. Wenn dies nicht der Fall ist, wird der Spritzbeton nicht die erforderliche Leistung erbringen und die langfristige Dauerhaftigkeit kann beeinträchtigt werden.



Aus der einfachen Strukturmechanik ist bekannt, dass Beton bei Zug am schwächsten ist und eine Bewehrung benötigt, um eine Erhöhung der Zugfestigkeit zu erzielen. Eine Böschung oder die Fläche eines Ausbaus ist nicht perfekt glatt oder konturiert. Baustahlgewebe wird so gut wie möglich auf einem Untergrund befestigt, manchmal direkt auf der Oberfläche oder aber auch von ihr entfernt. Das heisst, wenn die aus der Bodenbewegung resultierenden Zugkräfte an der Vorderseite des Betons wirken und sich die Matte an der Rückseite befindet, dann werden der Beton und das Baustahlgewebe nicht im Verbund arbeiten.

Der Spritzbeton wird reissen und wegbrechen, was bei Überkopfanwendungen manchmal eine Gefahr darstellt. Faserverstärkung wird seit mehr als 50 Jahren in Spritzbeton verwendet, und seither haben sich Technologie und Leistung enorm verbessert, insbesondere im Bereich der PP-Makrofasern, die heute als praktische, sichere und wirtschaftliche Alternative zu Baustahlgewebe gelten. Faserverstärkter Spritzbeton bietet Leistungsvorteile und ermöglicht einen wesentlich schnelleren Baufortschritt als der Einbau herkömmlicher Baustahlgewebe. Fasern haben den Vorteil, dass sie gleichmässig über den gesamten Betonquerschnitt verteilt sind, d. h. wenn ungleichmässige Spannungen auf den Beton einwirken, befinden sich immer Fasern in der Schwächezone.



Vorteile

Die Verwendung von Fasern in Spritzbeton ist weithin akzeptiert, da Ingenieure, Bauunternehmer und Bauherren die Vorteile von Fasern als Ersatz oder Teilersatz für Baustahlgewebe zunehmend erkennen.

Die Verwendung von Fasern anstelle von Baustahlgewebe für die Ausbruchsicherung, den Tunnelbau und den Bergbau bietet zahlreiche Vorteile wie:

- Sicherere Arbeitsbedingungen
- Schnellerer Anwendungsprozess
- Gleichmässige Verteilung der Fasern im Beton
- Beifügung der Fasern zum Beton in der Dosieranlage
- Verringerung des Rückpralls
- Verringerung der Abfälle
- Verringerung der Hohlräume

Kosteneinsparungen durch den Wechsel von Baustahlgewebe zu Fasern:

- **Transport** – Baustahlgewebe muss nicht bestellt und zur Baustelle transportiert werden
- **Lagerung** – Es müssen keine Flächen auf der Baustelle für die Lagerung des Baustahlgewebes reserviert werden
- **Arbeit** – In Abhängigkeit von lokalen Faktoren wie Projektstandort, Stahl- und Arbeitskosten usw. ca. 25% Arbeitersparnis, da die Befestigung von Baustahlgewebe auf einem Untergrund entfällt.
- **Zeit** – Keine Befestigung von Baustahlgewebe auf dem Untergrund erforderlich
- **Rückprall** – Der Rückprall des Spritzbetons, der das Baustahlgewebe in Schwingung versetzt, ist etwa 20% höher als bei der Anwendung von Faserbeton. Das bedeutet, dass in der Regel 20% mehr Beton für Baustahlgewebe benötigt werden und die weiteren 20% als Abfall entsorgt werden müssen.
- **Materialien** – Der Faserspritzbeton erfordert keine Mindestüberdeckung von Baustahlgewebe, so dass der Spritzbeton den Konturen des Untergrunds folgen kann.

Faserauswahl

Stahlfasern werden seit vielen Jahren im Tunnelbau und im Bergbau eingesetzt, und die Effizienz wurde durch den Einsatz von Faserdosiersystemen verbessert. Die Verwendung von Stahlfasern hat jedoch auch Nachteile:

- **Abrieb** – Stahlfasern erhöhen den Verschleiss an Misch- und Sprühmaschinen
- **Scharfe Kanten** – Hervorstehende Stahlfasern können Abdichtungsschichten beschädigen
- **Scharfe Kanten** – Manuelle Handhabung Stahlfasern verursachen Hautverletzungen
- **Korrosiv** – Freiliegender Stahl korrodiert bei Kontakt mit Luft und Wasser
- **Leistung** – Magnetische Fasern können im Bergbau zu Problemen führen



PP-Makrofasern sind eine ideale Alternative, da sie leichter sind, in geringeren Mengen dosiert werden und ähnliche Leistungskriterien wie Stahlfasern erfüllen können. Bei normaler Dosierung können die PP-Makrofasern Belastungen bei grösseren Verformungen standhalten. Dies ist ein wichtiger Sicherheitsfaktor im Tunnelbau und im Bergbau, wenn sich Risse im Beton bilden.

Es gibt einige gute Gründe, PP-Makrofasern als Alternative in Betracht zu ziehen:

- **Handhabung** – Geringeres Gewicht beim Transport zur Mischanlage
- **Handhabung** – Einfach zu handhaben, leichte Pucks in einer löslichen Folie verpackt
- **Handhabung** – Pucks funktionieren auch in Dosieranlagen
- **Abrieb** – Weniger Verschleiss an Maschinen
- **Nicht korrosiv** – Korrodiert nicht
- **Leistung** – Herausstehende Fasern stellen keine Gefahr für die Abdichtungsschicht dar
- **Leistung** – Höhere Langzeitbelastungen bei grösseren Verformungen

Die Menge der Fasern basiert auf einem Test, bei dem die von einer Betonplatte absorbierte Energiemenge ermittelt und in Joule gemessen wird. Die für einen Test erforderliche Energiemenge muss zunächst anhand geotechnischer Berechnungen ermittelt werden.

Es gibt eine Hauptprüfmethode zur Bestimmung der Energieabsorption – EN 14488-5 Prüfung von Spritzbeton. Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Probekörpern

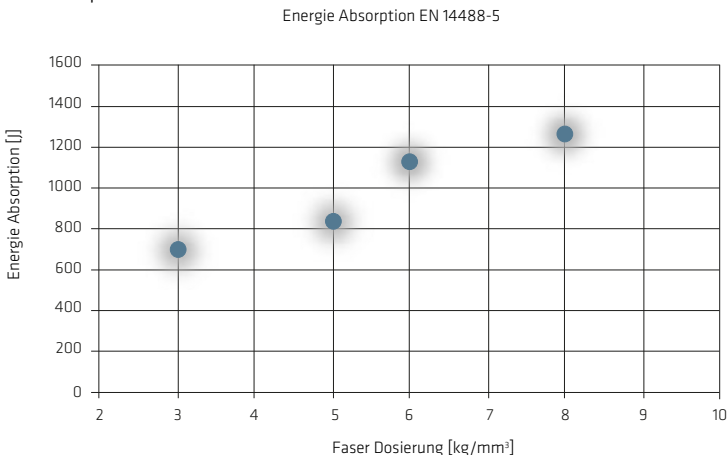


Abb. 7.3.1: Beispielhafte Dosierungen von SikaFiber® Force-60 mit einer Spritzbetonmischung zur Erreichung von Energieabsorptionsklassen nach EN 14488-5T-ZV (Zug) Brandkurve

Tabelle 7.3.1: Richtwerte für die Faserdosierung von Kunst- und Stahlfasern zur Erreichung der Energieabsorptionsklassen gemäss EFNARC

Energieabsorptionsklasse	Joule (25 mm Durchbiegung)	Faserdosierung (kg / m ³)	
		PP-Makrofasern	Stahlfasern
E 500	500	3 – 4	20 – 25
E 700	700	5 – 6	25 – 35
E 1'000	1'000	>7	>35

Bei der Festlegung der Energieabsorption ist es wichtig, das für die Anwendung erforderliche Mass der Rissöffnung zu kennen und dieses mit den Ergebnissen in Beziehung zu setzen. Bei einer endgültigen Auskleidung kann es beispielsweise wichtig sein, die Breite der Rissöffnung zu minimieren. Daher müssen Art und Dosierung der Fasern höhere Lasten bei kleinen Verformungen tragen. Im Berg- oder Tunnelbau oder bei der Felsicherung kann es wichtiger sein, ein verbessertes duktiles Verhalten des Spritzbetons zu erzielen, weshalb die Art und Dosierung der Fasern höhere Lasten bei breiteren Rissöffnungen tragen muss. Aufgrund der unterschiedlichen Verankerungseigenschaften, der Anzahl der Fasern und des höheren Elastizitätsmoduls zeigen Stahlfasern eine höhere Leistung bei kleinen Rissöffnungen und PP-Makrofasern eine viel bessere Tragfähigkeit bei grösseren Rissöffnungen.

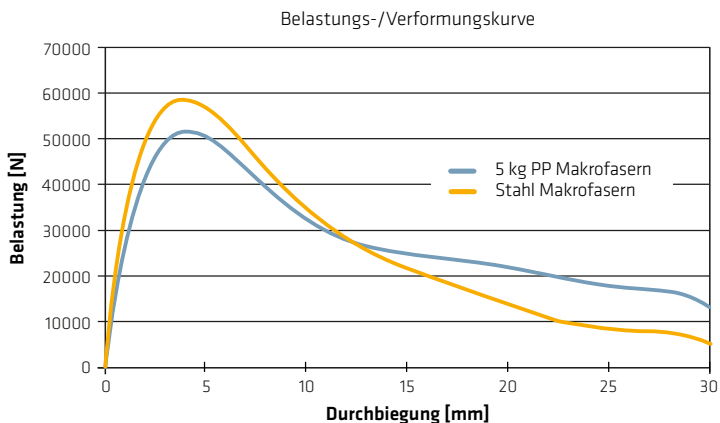


Abb. 7.3.2: Typisches Last-Durchbiegungsverhalten von PP- und Stahl-Makrofasern in einem Energieabsorptionstest nach EN 14487-5

Tabelle 7.3.2: Beispiele für Spritzbetonrezepturen

	Referenzbeton	Beton für Spritzbeton
Zement	400 – 500 kg / m ³	400 – 500 kg / m ³
w/z-Wert	0.45 – 0.5	0.45 – 0.5
Gesteinskörnungen	0 – 8 mm	0 – 8 mm
Sika® ViscoCrete®	0,8 – 1.2%	1.0 – 1.5%
Sika® Sigunit®	5 – 8% (alkalifrei)	5 – 8% (alkalifrei)
SikaFiber® Force-60		4 – 8 kg / m ³



Weitere Informationen finden Sie im Sika Spritzbeton-Handbuch

7.4 HERSTELLUNG VON BETONFERTIGTEILEN



Betonfertigteile sind eine effiziente Art, Bauwerke zu errichten, da die Elemente in einem Qualitätsverfahren vorgefertigt und pünktlich zum Einbau auf die Baustelle geliefert werden können. Fasern sind ideal für die Verbesserung des Herstellungsprozesses, da sie rissfest sind, die Stahlbewehrung ersetzen oder teilweise ersetzen und die Dauerhaftigkeit erhöhen. Dies kann zu erheblichen Kosteneinsparungen bei der Stahlbefestigung führen und dazu beitragen, die Zahl der abgelehnten Elemente zu verringern, die beim Ausschalen und Transport beschädigt werden.

Verwendung

- Wandplatten
- Gehwegplatten
- Aussenverkleidung
- Wände
- Eisenbahnschwellen
- Betonbarrieren
- Betonrohre und zugehörige Produkte
- Kastendurchlässe
- Klärgruben
- Pfähle
- Tübbings

Vorteile

Die Verwendung von Faserbeton in der Betonfertigteilindustrie bietet zahlreiche Vorteile

Herstellung

- Erhöhung der frühen Grünstandsfestigkeit, was ein frühzeitiges Ausschalen ermöglicht
- Verringerung der Rüttel- und Anwendungszeiten
- Verringerung von Schwindrissen
- Ersetzen der Stahlbewehrung in leichten Fertigbauteilen
- Teilweiser Ersatz der Stahlbewehrung von Bauelementen
- Optimierung der Produktivität

Nutzungsdauer

- Erhöhung der Abrieb- und Schlagfestigkeit
- Verminderung der Durchlässigkeit
- Erhöhung der Dauerhaftigkeit

Transport

- Schutz von Kanten und Ecken bei Transport, Handhabung und Lagerung

Faserauswahl

Der Ersatz von sekundären oder leichten Matten durch Faserbeton hat viele Vorteile. Unter dem Gesichtspunkt der Kosteneinsparung entfällt bei Faserbeton das Schneiden, Biegen, Verlegen und Befestigen der Stahlbewehrung. Dies hat den Vorteil, dass die Produktivität insgesamt steigt.

PP-Mikrofasern sind eine einfache und wirtschaftliche Option für die Wertschöpfung von Fertigteilherstellern.

Stahlfasern können verwendet werden, um die mechanische Festigkeit und Duktilität zu erhöhen. Freiliegende Fasern auf der Oberfläche, die der Luft und dem Wasser ausgesetzt sind, beginnen jedoch zu korrodieren. Dies kann zu unansehnlichen Flecken auf der Oberfläche führen.

PP-Makrofasern können zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit und Duktilität verwendet werden und haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie nicht korrodieren.



Anwendung

Der Ersatz der herkömmlichen Stahlbewehrung hängt in hohem Masse davon ab, für welchen Zweck die Bewehrung ursprünglich festgelegt wurde. Die Faserverstärkung kann zwar die Momententragsfähigkeit von Beton beeinflussen, hat aber nicht die gleiche Wirkung wie die Stahlbewehrung. Aus diesem Grund ist es unwahrscheinlich, dass bei vorgefertigten Elementen, die hohen Biegemomenten ausgesetzt sind, die Stahlbewehrung vollständig durch Faserbeton ersetzt werden kann. Auch wenn es möglich ist, die mit Faserbeton erreichte Momententragsfähigkeit zu nutzen, um die Querschnittsfläche des Stahls zu verringern, profitiert der Beton durch die Verwendung von Fasern von mehreren Vorteilen von Faserbeton, wie z. B. Schlagfestigkeit und längere Dauerhaftigkeit.

Sekundäre Bewehrung, wie z. B. geschweisstes Baustahlgewebe, wird verwendet, um Rissbreiten aufgrund von thermischer Ausdehnung, Kontraktion und Schwinden zu minimieren. Die sekundäre Bewehrung dient im Wesentlichen dazu, den Beton nach dem Auftreten von Rissen zusammenzuhalten, und wird nicht als Beitrag zur strukturellen Leistungsfähigkeit des Betonelements angesehen. In solchen Fällen ist es durchaus möglich, diese Bewehrung durch eine reine Faserlösung zu ersetzen. Bei Betonfertigteilen mit einspringenden Ecken, Öffnungen oder Transportankern ist dennoch Vorsicht geboten, da an diesen Stellen Risse wahrscheinlicher sind und eine Stahlbewehrungslösung erforderlich sein kann.

Die Vorbereitung der Stahlbewehrung in Fertigteilen kann sehr zeitaufwändig sein und verursacht oft erhebliche Kosten, da die Geometrie vieler Elemente recht komplex sein kann. Darüber hinaus kann die Stahlbewehrung Probleme beim Einbau und der Verdichtung des Betons in die Formen verursachen. Diese Komplikationen können zu minderwertigem Beton mit unerwünschten Oberflächenfehlern und Korrosion bei unzureichender Betonüberdeckung führen

7.5 PUMPBETON



Betonpumpen werden in der Regel dort eingesetzt, wo es für Fahrmischer nicht möglich ist, den Beton an der Einbringungsstelle abzuladen, oder wo grosse Betonmengen in einem begrenzten Zeitrahmen benötigt werden. Faserbeton kann im Allgemeinen gepumpt werden, erfordert aber eine geeignete Faserbetonmischung, um die Entmischung oder das Zusetzen in den Geräten oder Rohren zu vermeiden. Die Art der Ausrüstung kann die Anzahl der Fasern, die dosiert werden können, begrenzen.

Verwendung

- Spritzbeton für Tunnelbau und Bergbau
- Spritzbeton zur Bodenstabilisierung
- Pumpen von Beton zu einem Einsatzort

Vorteile

- Schnellerer Anwendungsprozess
- Verbesserung der Effizienz

Faserauswahl

Der Durchgang des Faserbetons durch das Gitter über dem Pumpentrichter begrenzt zusammen mit dem Rohrdurchmesser die maximale Länge der Fasern und die maximale Dosierung. Als Faustregel gilt, dass die Länge der Fasern mehr als die Hälfte des Schlauchdurchmessers betragen sollte, da sich längere Fasern entlang des Schlauchverlaufs ausrichten, während sich kleinere Fasern drehen können, was zu einem Zusammenballen der Fasern und Schlauchverstopfungen führen kann. Mit einer geeigneten Rezeptur ist es möglich, hohe Mengen an PP-Makrofasern zu dosieren.



Betonrezeptur

Siehe Kapitel 6.2 des Sika Beton-Handbuchs

7.6 ULTRAHOCHLEISTUNGSFASERBETON



Ultrahochleistungsfaserbeton (UHPFRC) wird aus Zement, Zusatzstoffen (Pulvern), harten feinen Partikeln, Wasser, Zusatzmitteln und einer grossen Menge relativ kurzer Stahlfasern hergestellt.

Die dicht gepackte Struktur von UHPFRC führt zu einem wasserundurchlässigen Beton mit extrem hohen Druckfestigkeiten, typischerweise über 150 MPa. Bei Zugbeanspruchung weist UHPFRC ein signifikantes Verfestigungs- und Entfestigungsverhalten auf, und die Zugfestigkeit beträgt etwa 7 bis 15 MPa.

Die Auswahl der Fasern ist ein Schlüsselfaktor für das optimale Design von UHPC und hat einen starken Einfluss auf die Festigkeit, die Duktilität und die Kosten. Die Duktilität ist besonders wichtig, da in der Regel ein Mindestmass an Duktilität erforderlich ist.

Vorteile

- Erhöht die Duktilität
- Kontrolliert die Rissbildung
- Erhöht die Dauerhaftigkeit

Faserauswahl

Es gibt verschiedene Arten von Materialien, wobei hochfester Edelstahl am häufigsten verwendet wird.

Die Mindestlänge der Fasern beträgt in der Regel das Dreifache der maximalen Korngrösse, ist jedoch so kurz wie möglich, wenn man die erforderlichen Leistungsanforderungen an den Beton berücksichtigt. Es ist ein geeignetes Schlankheitsverhältnis festzulegen, um ein Zusammenballen beim Mischen zu vermeiden. Fasern mit einem hohen Schlankheitsverhältnis und einer geringen Streckgrenze lassen sich beim Mischen leicht biegen. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass Fasern mit einer hohen Streckgrenze, in der Regel > 2 GPa, erforderlich sind.

Table 7.6.1: Typische Rezeptur für UHPFRC im Vergleich zu normalem Faserbeton

	UHPFRC	Normaler Faserbeton
Zementgehalt	1'000 kg / m ³	350 kg / m ³
Max. Grösse der Gesteinskörnung	< 1 mm	32 mm
Wassermenge	< 0.2	< 0.5
SikaFiber®	> 100 kg / m ³ (l = 12 mm Stahlfasern)	5 kg / m ³ PP-Makrofasern oder 25 kg / m ³ Stahlfasern (l = 50 mm)

8 TESTS

8.1 BALKENPRÜFUNG

Es gibt verschiedene Arten von Balkenprüfungen, und die Wahl der Balkenprüfung hängt von der Anwendung, den Spezifikationsanforderungen oder der Konstruktionsmethode ab. Balkenprüfungen sind nicht immer gleich und variieren aus unterschiedlichen Gründen.

- 3-Punkt- oder 4-Punkt-Biegung
- Balkengrösse
- Mit / ohne Einkerbung
- Gerätespezifikation / Einstellungen
- Messmethode
- Referenzbeton

8.1.1 EUROPÄISCHE BALKENPRÜFUNG

Die relevanten Europäischen Normen für die Balkenprüfung von Faserbeton

Referenz	Titel	Relevanz
EN 14889-1	Fasern für Beton – Teil 1 – Stahlfasern	Leistungsanforderungen
EN 14889-2	Fasern für Beton – Teil 2 – Polymerfasern	Leistungsanforderungen
EN 14845-1	Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 1: Referenzbeton ^[1]	Zusammensetzung und Eigenschaften des Referenzbetons
EN 14845-2	Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 2: Einfluss auf den Beton	Verfahren zur Bestimmung der residuelle Biegezugfestigkeit
EN 14651	Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)	Vorbereitung und Durchführung der Prüfung
EN 14488-3	Prüfung von Spritzbeton – Teil 3: Biegezugfestigkeiten (Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprobekörpern	Verfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Referenzbeton

EN 14845-1

Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 1: Referenzbetone

Inhalt

Diese Norm legt die Zusammensetzung und die Eigenschaften von vier reproduzierbaren Referenzbetonen fest, die zur Bewertung der Faserleistung in Beton verwendet werden können. Die Prüfung eines der Referenzbetone ist obligatorisch, während die Prüfung der übrigen drei Referenzbetone fakultativ ist. Der / die Referenzbeton(e) wird / werden je nach Produkt- oder Systemtyp ausgewählt und seine/ihre Eigenschaften werden durch einen Mindestwert für die Biegezugfestigkeit, eine maximale Korngrösse und einen maximalen Zementgehalt definiert.

Gesteinskörnungen

Natürliche, ungebrochene quarzitische Gesteinskörnungen mit niedriger Wasserabsorption (weniger als 2% Massenanteil) sind ofentrocken zu verwenden. Die nach EN 933-2 ermittelte Korngrössenverteilung muss mit EN 1766:2000, Anhang A, (übereinstimmen, ausser, dass die Grenzsieblinien für eine 16 mm- bzw. 20 mm-Gesteinskörnung bei 0.25 mm 5% bzw. 10% (anstelle von 3% und 8 %) entsprechen müssen. Nationaler Anhang in der Schweiz: Es können auch Gesteinskörnungen mit einer anderen petrographischen Zusammensetzung verwendet werden, sofern diese weitgehend ungebrochen sind, die geforderte niedrige Wasserabsorption aufweisen und diese üblicherweise bei der Betonherstellung für die geforderten Betonfestigkeitsklassen verwendet werden.

Zugabewasser

Nach EN 1008 werden verschiedene Arten von Wasser, die aus unterschiedlichen Quellen stammen, klassifiziert. In der Regel handelt es sich bei dem zur Prüfung verwendeten Wasser um Trinkwasser, das nicht weiter geprüft werden muss. Andere Wasserarten können verwendet werden, müssen aber überprüft werden.

Zement

Portlandtyp CEM I Klasse 42,5 R nach EN 197-1. Anstelle des Zements CEM | 42,5 R wird in der Schweiz der Zement CEM | 42,5 N verwendet.

Zusatzmittel

Zur Steuerung der Verarbeitbarkeit kann ein Verflüssiger oder Hochleistungsfließmittel gemäss EN 934-2 verwendet werden. Die Norm beschreibt zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Betonkonsistenz.

- Vébé-Klasse V3 EN 12350-3
- Verdichtungsklasse C2 EN 12350-4

In der Schweiz kann Alternativ auch die Verarbeitbarkeit der Klasse F3 (Ausbreitmass nach SN EN 12350-5) gewählt werden.

Fasern

Der Hersteller muss Fasern gemäss EN 14889 Teil 1 oder Teil 2 verwenden und kann die Mischreihenfolge festlegen, um eine gleichmässige Verteilung im Beton zu gewährleisten.

Table 1 aus EN 14845-1 Vier Anforderungen an Referenzbetonmischungen

Biegezugfestigkeit (MPa)	Wassermenge		Maximaler Zementgehalt (kg / m ³)
	Grösstkorn		
	8 mm oder 10 mm	16 mm oder 20 mm	
4.3 ± 0.33 (25 / 30) ^c	0.55 ^b	0.355 ^a	350
5.8 ± 0.4 (40 / 50) ^c	0.45 ^b	0.45 ^b	400

a Obligatorische Mischung

b freigestellt

c Äquivalente Druckfestigkeitsklasse nach EN 1992-1

Vorbereitung

Die Vorbereitung des Probekörpers wird in der Norm beschrieben, wobei auch auf EN 14845 verwiesen wird. Die Betonprobenahme erfolgt gemäss EN 12350-1.

Anforderungen

Tabelle 1 aus EN 14845-1 beschreibt die vier vorgeschriebenen Mischungen zur Bestimmung der Auswirkungen auf die Konsistenz eines Betons. Eine Mischung ist obligatorisch, obwohl der Faserhersteller die Möglichkeit hat, weitere Prüfungen mit einem der anderen drei Referenzbetone durchzuführen.

Bericht

Eine Aufzeichnung der Informationen über den/die Referenzbeton(e) muss das Folgende enthalten:

- Zusammensetzung der Mischung
- Mischverfahren
- Fasertyp gemäss EN 14889 und Dosierung
- Datum und Uhrzeit der Herstellung
- Konsistenz: Vêbé-Zeit oder Verdichtungsmaß
- Aushärtung und Lagerung
- Ergebnisse, Proportionalitätsgrenze und residuelle Biegezugfestigkeit (Durchschnitts- und Einzelwerte)
- Verweis auf die Norm
- Jede Abweichung von der Norm

BALKENPRÜFUNGEN

EN 14845-2

Prüfverfahren für Fasern in Beton – Teil 2: Einfluss auf den Beton

Inhalt

Diese Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der Wirkung von Stahl- oder Polymerfasern auf einen oder mehrere Referenzbetone fest, mit dem Ziel, einen festgelegten Mindestwert der residuellen Biegezugfestigkeit zu erreichen, der sich auf ein definiertes Verformungsmass bezieht.

Prüfverfahren

Zwölf gekerbte Balken mit den Massen 550 x 150 x 150 mm, die aus dem obligatorischen Referenzbeton mit Fasern und einem zusätzlichen optionalen Referenzbeton gegossen wurden, werden nach 28 Tagen in einer 3-Punkt-Balkenprüfung mit einer Spannweite von 500 mm gemäss EN 14651 geprüft

Ergebnisse

Es ist diejenige Fasermenge zu bestimmen, die erforderlich ist, um eine Restbiegezugfestigkeit von mind. 1.5 MPa bei einer Rissverbreiterung von 0.5 mm (was einer mittleren Durchbiegung von 0.47 mm entspricht) und eine mittlere Festigkeit von mindestens 1 MPa bei einer Rissverbreiterung von 3.5 mm (was einer mittleren Durchbiegung von 3.02 mm entspricht) zu erreichen.

Bericht

Eine Aufzeichnung des/der Referenzbeton-Probekörper sollte enthalten:

- Art der Faser (einschliesslich Material, Länge, Durchmesser und Zugfestigkeit), beschrieben nach EN 14889-1 oder EN 14889-2
- Fasergehalt in kg/m^3 entsprechend einem Leistungsniveau von 1.5 MPa bei einer Rissverbreiterung von 0.5 mm und / oder 1.0 MPa bei einer Rissverbreiterung von 3.5 mm
- Angaben zur Übereinstimmung des Referenzbetons mit prEN 14845-1, einschliesslich Zusammensetzung der Betonmischung und Herkunft der Gesteinskörnungen
- Angaben zur Identifikation der Prüfkörper
- Datum der Herstellung der Prüfkörper
- Datum der Einkerbung
- Prüfdatum
- Aufzeichnungen über die Nachbehandlung und die Feuchtebedingungen der Prüfkörper zum Zeitpunkt der Prüfung
- Die mittlere Breite jedes Prüfkörpers, auf 0.1 mm gerundet
- Der mittlere Abstand zwischen der Spitze der Einkerbung und der Oberseite der Prüfkörper, auf 0.1 mm gerundet
- Masse der Kerbe, auf 0.01 mm gerundet
- Spannweite, auf 1 mm gerundet
- zeitliche Zuwachsrate der Rissverbreiterung oder der Durchbiegung und jegliche Abweichungen davon
- Die Last / Rissverbreiterungs-Kurve oder Last / Durchbiegungs-Kurve
- Die Festigkeit an der Proportionalitätsgrenze, auf 0.01 MPa gerundet bei Einzelwerten und auf 0.1 MPa gerundet für den Mittelwert
- Die Restbiegezugfestigkeit, gerundet auf 0.01 MPa bei Einzelwerten und 0.1 MPa für den Mittelwert
- Verweis auf diese Europäische Norm und jegliche Abweichungen von dieser Norm.

EN 14651

Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)

Inhalt

Die Norm beschreibt das Prüfverfahren zur Messung der Biegezugfestigkeit von Faserbeton an einem definierten Probekörper, um die Proportionalitätsgrenze (LOP) und eine Reihe von Werten für die residuelle Biegezugfestigkeit zu bestimmen. Ursprünglich war das Verfahren für Metallfasern ≤ 60 mm vorgesehen, kann aber auch für eine Kombination von Metall- und anderen Fasern verwendet werden und wird in EN 14889-2 für Polymerfasern erwähnt.

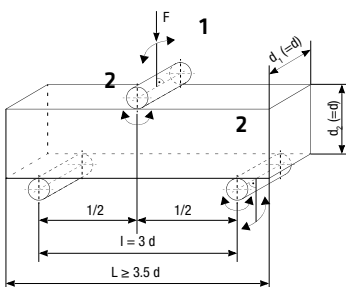
Beschreibung

Das Verhalten von Beton mit metallischen Fasern unter Zugbeanspruchung wird über Werte der residuellen Biegezugfestigkeit bestimmt, die aus der Last-CMOD-Kurve oder der Last-Durchbiegungskurve ermittelt werden, die sich jeweils aus dem Aufbringen einer mittigen Last auf einen einfach gelagerten prismatischen Probekörper mit Einkerbung ergeben.

- Eine CMOD-Kurve, die aus Messungen in der Kerbe ermittelt wurde, wenn die Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung gleich 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm und 3.5 mm ist
- Die Last-Durchbiegungskurve wird aus Durchbiegungsmessungen in der Balkenmitte ermittelt, die der Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung (CMOD) entsprechen: 0.08 mm (0.05 mm CMOD), 1.32 mm (1.5 mm CMOD), 2.17 mm (2.5 mm CMOD), 3.02 mm (3.5 mm CMOD) und 3.44 mm (4 mm CMOD)

Um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, beschreibt die Norm das Verfahren zur Vorbereitung, Befüllung und Aushärtung der Probekörper in Übereinstimmung mit EN 12350-1 und EN 12350-2.

Abbildungen aus EN 14651



Anordnung des Belastungsprobekörpers

Legende:

1. Auflagerrolle
2. Belastungsrolle

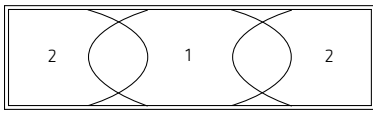
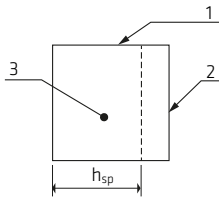


Abb. 1 und 2 Reihenfolge der Befüllung

Die Füllung muss gleichmässig sein, da sie die Faserorientierung und damit die Ergebnisse beeinflusst.

In der Norm wird beschrieben, wie die Form gefüllt und der Faserbeton verdichtet werden sollte.

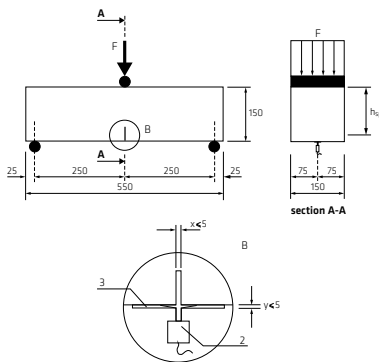


Legende:

1. Oberseite beim Giessen
2. Kerbe
3. Querschnitt des Probekörpers

Nach der Vorbereitung werden die Balken um 90° gedreht und ein Sägeschnitt über die Breite des Probekörpers durchgeführt.

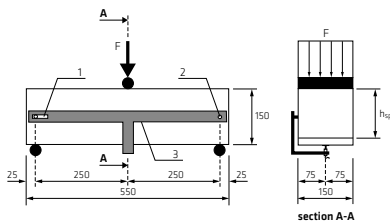
Die Norm enthält spezifische Anweisungen, wann der Balken zu sägen ist, sowie Aushärtungsbedingungen gemäss EN 12390-2.



Legende:

1. Detail (Kerbe)
2. Messwertempfänger (Klammermessgerät)
3. Messerschneide

Die Messung der CMOD erfolgt durch die Montage eines Messwertempfängers in der Balkenmitte. Die Maschine startet mit einer konstanten Rate, so dass die CMOD mit 0.05 mm / min ansteigt, bis die CMOD 0.1 mm erreicht, wenn die CMOD auf eine konstante Rate von 0.2 mm / min ansteigt. In den ersten 2 Minuten werden die Belastungswerte und die entsprechende CMOD mit einer Rate ≥ 5 Hz aufgezeichnet, die dann auf eine Rate ≥ 1 Hz reduziert werden kann. Die Prüfung wird beendet, wenn die CMOD ≥ 4 mm ist.



Legende:

- 1 Schiebevorrichtung
- 2 Drehvorrichtung
- 3 Starrer Rahmen

Die Durchbiegung wird gemessen, indem ein Messwertaufnehmer an einem starren Rahmen in halber Höhe über den Stützen angebracht wird. Ein Ende des Rahmens ist mit einer Schiebevorrichtung und das andere Ende mit einer Drehvorrichtung am Balken befestigt. Die Durchbiegungsmethode entspricht der CMOD-Methode, mit dem Unterschied, dass die CMOD-Parameter in Durchbiegung umgewandelt werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Form von Last- Durchbiegungs-Diagrammen dargestellt, und die Norm enthält Formeln zur Bestimmung der äquivalenten Durchbiegung aus der CMOD-Messung, die in Tabelle 1 in EN 14651 zusammengefasst sind.

CMOD (mm)	δ (mm)
0.05	0.08
0.1	0.13
0.2	0.21
0.5	0.47
1.5	1.32
2.5	2.17
3.5	3.02
4.0	3.44

Die Proportionalitätsgrenze und die residuelle Biegezugfestigkeit ergeben sich aus den Ausdrücken in Anhang A der Norm und können zusammengefasst werden.

Proportionalitätsgrenze (LOP)

$$f \frac{f}{ct} L = \frac{4 F_L l}{2bh^2_{sp}}$$

- $f \frac{f}{ct} L$ ist die LOP in Newton pro Quadratmillimeter;
 F_L ist die der LOP entsprechenden Last in Newton;
 l ist die Spannweite in Millimetern;
 b ist die Breite des Probekörpers in Millimetern;
 h_{sp} ist der Abstand zwischen der Spitze der Kerbe und der Oberseite des Probekörpers in Millimetern

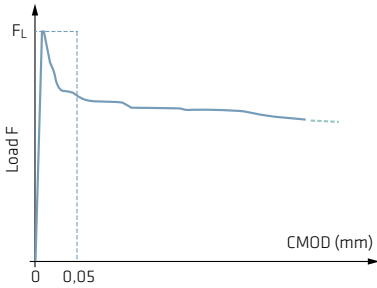
Residuelle Biegezugfestigkeit ($f_{R,j}$)

$$f_{Rj} = \frac{3 F_j l}{2bh^2_{sp}}$$

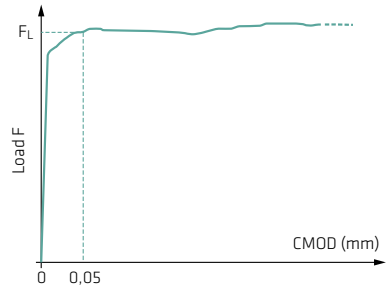
- f_{Rj} ist die residuelle Biegezugfestigkeit, die $CMOD = CMOD_j$ oder $\delta = \delta_j$ ($j = 1,2,3,4$), entspricht, in Newton pro Quadratmillimeter
 F_j ist die Last entsprechend $CMOD = CMOD_j$ oder $\delta = \delta_j$ ($j = 1,2,3,4$), in Newton (siehe Abbildung 7)
 l ist die Spannweite in Millimetern;
 b ist die Breite des Probekörpers in Millimetern;
 h_{sp} ist der Abstand zwischen der Spitze der Kerbe und der Oberseite des Probekörpers in Millimetern

Der Lastwert F_L wird durch den Lastwert bei 0.05 mm CMOD bestimmt.

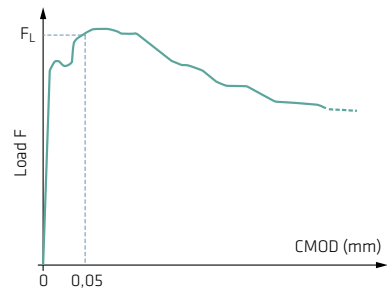
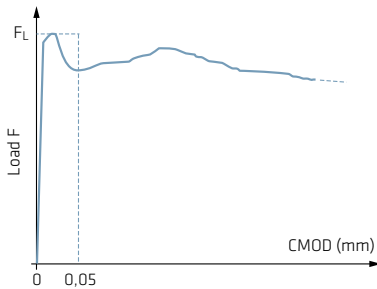
Entfestigung



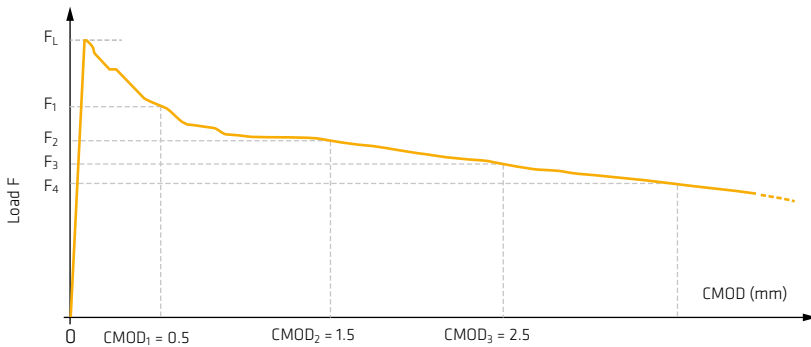
Verfestigung



Typisch für einen normalen Stahlfaserbeton



Typisch für einen PP-Makrofaserbeton



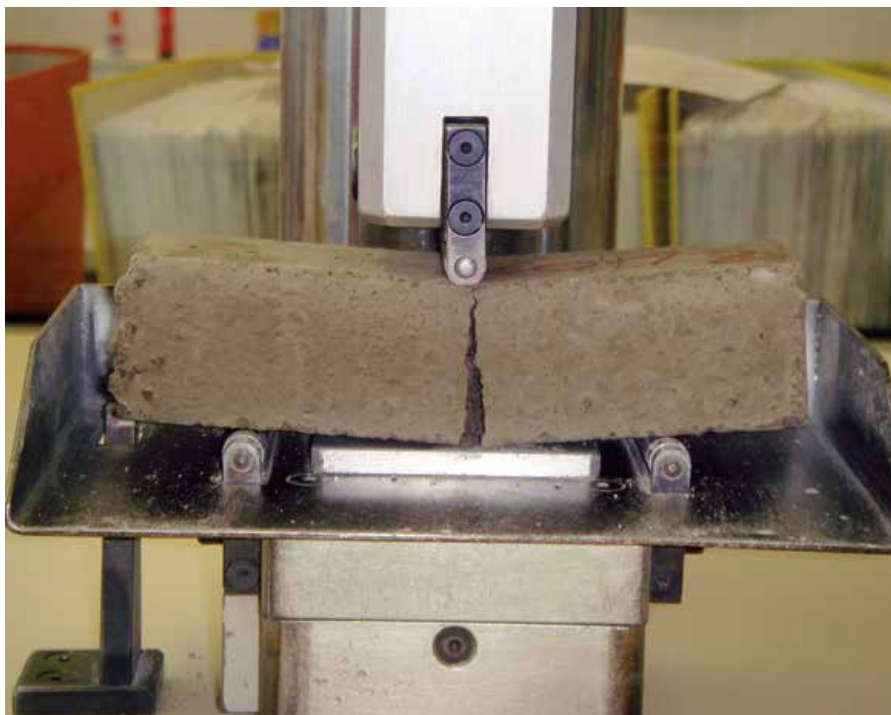
Der Last-CMOD wird als Last ausgedrückt, die der CMOD entspricht bei:

- 0.5 (FR1)
- 1.5 (FR2)
- 2.5 (FR3)
- 3.5 (FR4)

Bericht

Der Prüfbericht kann zusammengefasst werden.

- Ort, Datum, Name des Prüfinstituts und der für die Prüfung verantwortlichen Person und des Bedieners
- Fasertyp gemäss EN 14889 und Dosierung
- Zusammensetzung der Mischung nach EN 14845-1
- Einzelheiten zu den Prüfmustern – Abmessungen, Zustand
- Datum und Uhrzeit der Vorbereitung des Probekörpers
- Aushärtungsverlauf und Feuchtigkeitsbedingungen bei der Prüfung
- Prüfverfahren, Datum der Prüfung (Steigerungsrate der CMOD oder der Verformung und etwaige Abweichungen)
- Ergebnisse –
 - Last-CMOD-Kurve oder Last-Durchbiegungskurve
 - Proportionalitätsgrenze
 - Residuelle Biegezugfestigkeiten entsprechend CMOD_j (Durchschnitts- und Einzelwerte)
- Verweis auf die Norm
- Jede Abweichung von der Norm
- Optional: Beobachtung der Gleichmässigkeit der Faserverteilung
- Erklärung der für die Prüfung verantwortlichen Person, dass die Prüfung in Übereinstimmung mit EN 14651 durchgeführt wurde, mit Ausnahme der angegebenen Abweichungen



EN 14488-3

Prüfung von Spritzbeton – Teil 3: Biegezugfestigkeiten (Erststiss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprobekörpern

Inhalt

Diese Norm klassifiziert die Restfestigkeit von faserverstärktem Spritzbeton (FRSC) für ein Festigkeitsniveau bei einer bestimmten Verformung. Die Verformungsklassen sind in EN 14487-1 nach den Verformungsbereichen D1 (niedrig), D2 (normal) und D3 (hoch) und dem Festigkeitsniveau definiert.

Eine Klasse D2S2 bedeutet beispielsweise, dass die Restfestigkeit ≥ 2 MPa und die Durchbiegung zwischen 0.5 und 2 mm liegt

Tabelle 2 der EN 14487 definiert die Restfestigkeitsklassen

Bereich der Verformung		Festigkeitsniveau (Mindestfestigkeit, MPa)			
	Durchbiegung mm	S1	S2	S3	S4
D1	0.5 bis 1				
D2	0.5 bis 2	1	2	3	4
D3	0.5 bis 4				

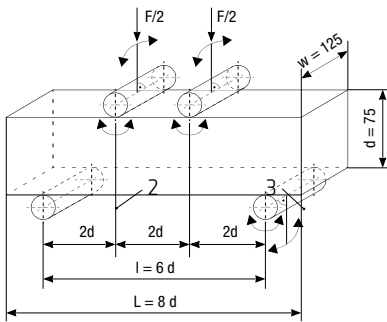
Es gibt zwei beschriebene Methoden A und B, die auf metallische, synthetische und andere Fasern oder eine Kombination verschiedener Fasern angewendet werden können. Die Prüfung wird in der Regel an einem Spritzbetonprobekörper durchgeführt, sofern nicht anders angegeben.

- Methode A – 4-Punkt-Biegeversuch an einem gesägten Balken (ohne Kerbe)
- Methode B – 3-Punkt-Biegeversuch an einer quadratischen Platte mit Kerbe

Methode A – Beschreibung

Die Probekörper werden mit einer Prüfmaschine (EN 12390-4) durch zwei obere und zwei untere Rollen belastet, um ein Biegemoment zu erzeugen, das zur Bestimmung der Erststiss-, Biegezug- und Restfestigkeit aus der Last-Durchbiegungskurve verwendet wird. Der Abstand zwischen den beiden unteren Rollen beträgt 450 mm.

Probekörper mit den Massen 75 mm Tiefe x 125 mm Breite x 500 mm (Minimum) Länge gemäss EN 12390-1 werden aus einer Prüfplatte gesägt, die gemäss EN 14488-1 mit Spritzbeton versehen wurde. Die Balken werden mit der ungeschnittenen Formfläche unter Spannung geprüft, sofern nicht anders angegeben. Die Oberseite kann unter Spannung gesetzt werden, darf aber nicht gesägt werden, um ein Einschneiden der Faserverankerungen zu vermeiden. Die Prüfung erfolgt nach 28 Tagen, und die Norm beschreibt die Anforderungen an die Lagerung während der Aushärtung.

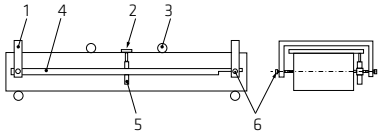


Legende:

- 1 Belastungsrolle (drehbar und neigbar)
- 2 Auflagerrolle
- 3 Auflagerrolle (drehbar und neigbar)

Die Durchbiegung wird mit einem elektronischen Messwertaufnehmer gemessen, der in der Balkenmitte auf einem Bügel montiert ist, der sich in der neutralen Achse in der Balkenmitte befindet. Zwei Messwertaufnehmer auf jeder Seite sind besser als nur einer. Das Verfahren zur Vorbereitung, Positionierung und Belastung der Probekörper ist in der Norm beschrieben. Die Prüfung ist beendet, wenn die Verformung in der Balkenmitte mehr als 4 mm beträgt oder der Probekörper bricht.

- F ist die Last (P_{fp} oder P_{ult}) in N, wie oben definiert
- l ist die Spannweite
- w ist die durchschnittliche Balkenbreite
- d ist die Balkenhöhe
- L ist die Balkenlänge



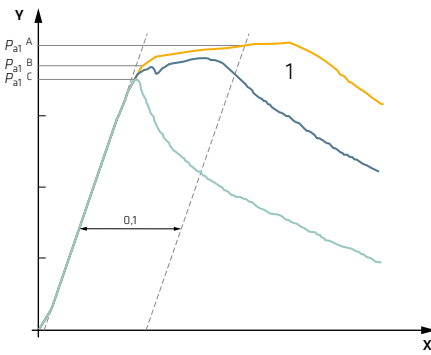
Legende:

- 1 Klammer
- 2 Referenzstange (geklemmt oder geklebt)
- 3 Belastungsrolle
- 4 Bügel
- 5 Messwertaufnehmer
- 6 Fixierschraube

Anordnung des Bügels zur Messung der Durchbiegung

Method A – Ergebnisse

Der Abstand von der Rissmitte auf der Zugseite bis zum nächstgelegenen Auflager ist aufzuzeichnen. Die Erstrissbiegezugfestigkeit wird aus der Last-Durchbiegungskurve berechnet, je nach Kurventyp (siehe Norm).



Beispiele für Last-Durchbiegungskurven zur Bestimmung der Erstrisslast.

X zentrale Durchbiegung in mm

Y Last in kN

P_{a1A} ist die Erstrisslast (P_{fp}) für die Kurve A

P_{a1B} ist die Erstrisslast (P_{fp}) für die Kurve B

P_{a1C} ist die Erstrisslast (P_{fp}) für die Kurve C

Biegezugfestigkeit in MPa = $P \times l / (w \times d^2)$

Die Biegezugfestigkeit wird dann mithilfe einer Rezeptur aus der aufgezeichneten Höchstlast ermittelt.

P ist die Last (P_{fp} oder P_{ult}) in N, wie oben definiert

l ist die Spannweite (450 mm)

w ist die durchschnittliche Breite des Balkens in der Bruchebene (nominal 125 mm)

d ist die durchschnittliche Breite des Balkens in der Bruchebene (nominal 75 mm)

Die residuelle Biegezugfestigkeit wird aus den Mindestbelastungen aus der Biegezugspannung / Last-Durchbiegungskurve zwischen 0.5 mm, 1 mm, 2 mm und 4 mm berechnet.

- f_{r1} – wird aus der Mindestlast P_{r1} berechnet, die zwischen den Durchbiegungen in der Balkenmitte bei 0.5 mm und 1.0 mm gemessen wird
- f_{r2} – wird aus der Mindestlast P_{r2} berechnet, die zwischen den Durchbiegungen in der Balkenmitte bei 0.5 mm und 2.0 mm gemessen wird
- f_{r4} – wird aus der Mindestlast P_{r4} berechnet, die zwischen den Durchbiegungen in der Balkenmitte bei 0.5 mm und 4.0 mm gemessen wird

Die residuelle Biegezugfestigkeit wird als äquivalente elastische Zugfestigkeit unter Verwendung der vorstehenden Formulierung berechnet.

Methode A – Bericht

Der Prüfbericht kann zusammengefasst werden.

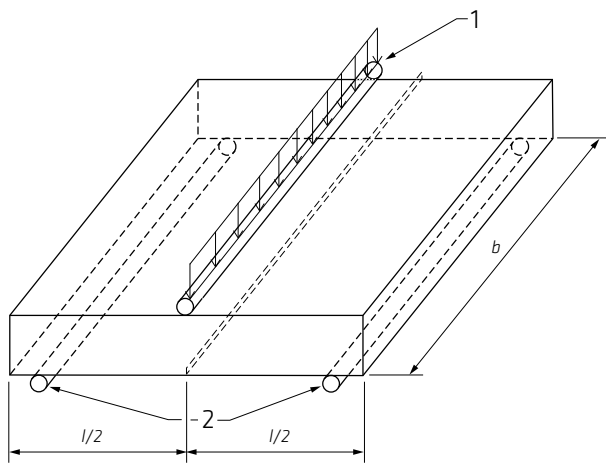
- Ort, Datum, Name des Prüfinstituts und der für die Prüfung verantwortlichen Person und des Bedieners
- Fasertyp gemäss EN 14889 und Dosierung
- Identifizierung der Mischungszusammensetzung
- Datum und Uhrzeit der Anwendung des Probekörpers, Identifizierung und Ort der Herstellung
- Zustand der Probekörper bei Eingang zur Lagerung
- Angaben zu den Probekörpern, deren Anzahl, Abmessungen und Vorbereitung
- Aushärtungsverlauf und Feuchtigkeitsbedingungen bei der Prüfung
- Alter des Probekörpers bei der Prüfung
- Prüfmaschine und Einrichtung
- Ergebnisse –
 - Last- (oder Spannungs-)Durchbiegungskurve
 - Erstriss-, Maximal- und Restlast
 - Erstriss-, Maximal- und residuelle Biegezugfestigkeit
 - Abstand der Rissmitte zum nächstgelegenen Auflager
 - Optisches Erscheinungsbild des Betons
- Verweis auf die Norm
- Jede Abweichung von der Norm
- Beobachtungen zur Gleichmässigkeit der Faserverteilung (muss angefragt werden)
- Erklärung der für die Prüfung verantwortlichen Person, dass die Prüfung in Übereinstimmung mit EN 14488-3 durchgeführt wurde, mit Ausnahme der angegebenen Abweichungen

Method B – Beschreibung

Der Plattenprobekörper wird mit einer Prüfmaschine (EN 12390-4) durch eine obere und zwei untere Rollen belastet, um ein Biegemoment zu erzeugen, das zur Bestimmung der Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit aus der Last-Durchbiegungskurve verwendet wird. Der Abstand zwischen den beiden unteren Rollen (Plattenspannweite) beträgt 500 mm.

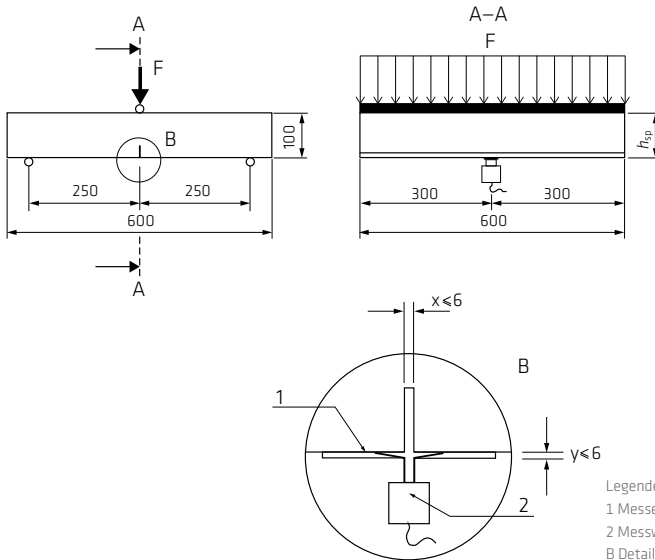
Probekörper mit den Massen 100 mm Tiefe x 600 mm Breite x 600 mm Länge nach EN 12390-1 werden hergestellt, indem Beton in eine Platte nach EN 14488-1 gespritzt wird. Eine 10 mm tiefe und 5 mm breite Kerbe wird in der Mitte der Platte auf der Seite, die während des Spritzens mit dem Boden der Form in Berührung kommt, durch die Breite der Platte gesägt. Die Platten werden gemäss EN 12390-2 3 Tage nach dem Sägen bis <3 Stunden vor der Prüfung ausgehärtet, sofern nicht anders angegeben. Die Prüfung wird nach 28 Tagen durchgeführt.

Die Prüfung wird nach den einschlägigen Teilen der Norm EN 12390-4 für Biegeprüfungen durchgeführt und erfolgt unter kontrollierten Bedingungen.



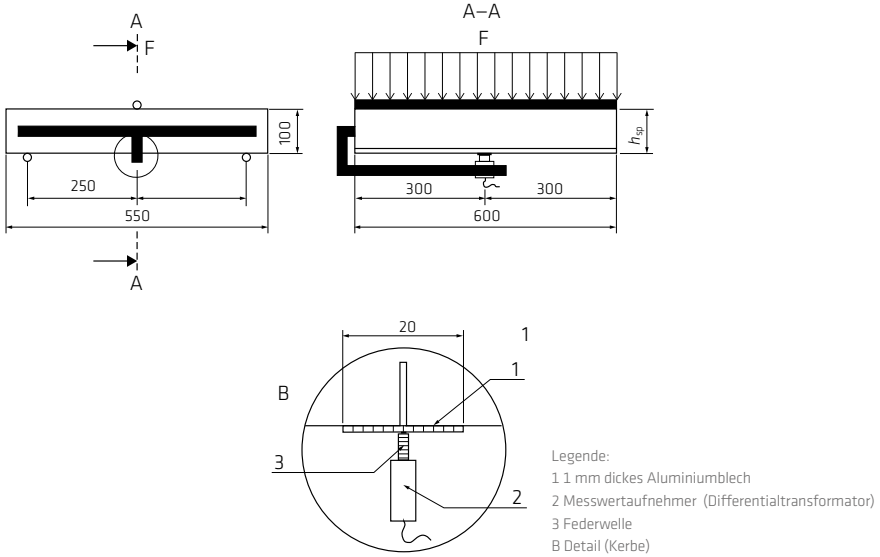
Legende:
 1 Belastungsrolle
 2 Auflegerrolle

Die Durchbiegung kann mit der CMOD-Methode (Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung) oder der Durchbiegungsmethode gemessen werden.



Legende:
 1 Messerschneide
 2 Messwertaufnehmer (Klammersmessgerät)
 B Detail (Kerbe)

Die Messung der CMOD erfolgt durch die Montage eines Messwertaufnehmers in der Balkenmitte. Die Maschine startet mit einer konstanten Rate, so dass die CMOD mit 0.05 mm / min ansteigt, bis die CMOD 0.2 mm erreicht, wenn die CMOD auf eine konstante Rate von 0.2 mm / min ansteigt. In den ersten 2 Minuten werden die Belastungswerte und die entsprechende CMOD mit einer Rate ≥ 5 Hz aufgezeichnet, die dann auf eine Rate ≥ 1 Hz reduziert werden kann. Die Prüfung wird beendet, wenn die CMOD ≥ 5 mm ist. Beginnen die Risse ausserhalb der Kerbe, ist der Probekörper zurückzuweisen.



Die Durchbiegung wird gemessen, indem ein Messwertaufnehmer an einem starren Rahmen in halber Höhe über den Stützen angebracht wird. Ein Ende des Rahmens ist mit einer Schiebevorrichtung und das andere Ende mit einer Drehvorrichtung am Balken befestigt. Die Durchbiegungsmethode entspricht der CMOD-Methode, mit dem Unterschied, dass die CMOD-Parameter in Durchbiegung umgewandelt werden.

Methode B - Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Form von Last-Durchbiegungs-Diagrammen dargestellt, und die Norm enthält eine Formel zur Bestimmung der äquivalenten Durchbiegung aus der CMOD-Messung in Bezug auf die LOP und die residuelle Biegezugfestigkeit (zusammengefasst in Tabelle 1 der EN 14488-3).

LOP / residuelle Biegezugfestigkeit	CMOD (mm)	Durchbiegung (mm)
FL	0.05	0.08
$f_{R_s,1}$	0.5	0.631
$f_{R_s,2}$	1.5	1.894
$f_{R_s,3}$	2.5	3.156
$f_{R_s,4}$	3.5	4.420

Die LOP ist durch den Ausdruck gegeben, wobei der Belastungswert F_L durch Ziehen einer Linie im Abstand von 0.005 mm und parallel zur Belastungsachse des Last-CMOD-Diagramms bestimmt wird, wobei F_L als höchster Belastungswert gilt.

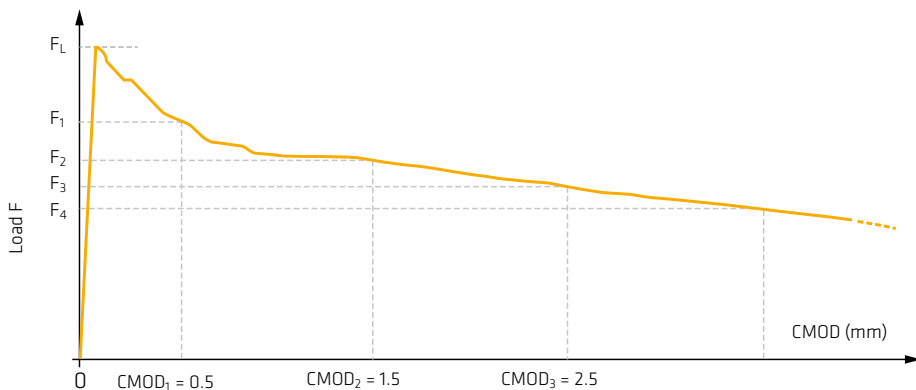
$$f_{cts,L} = \frac{3 F_{L,S} l}{2 b h_{sp}^2}$$

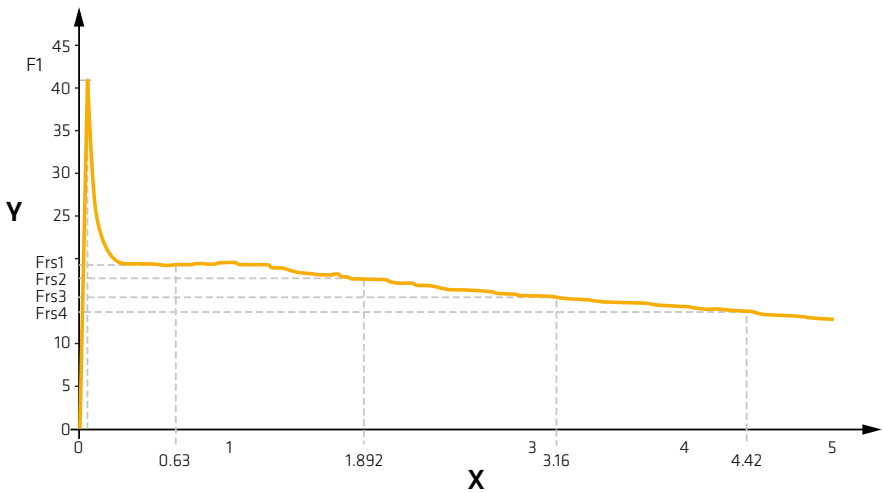
- $f_{cts,L}$ ist die LOP in N/mm;
- f ist die der LOP entsprechende Last in N;
- $F_{L,S}$ ist die Spannweite in mm;
- l ist die Breite des Probekörpers in mm;
- b ist der Abstand zwischen der Spitze der Kerbe und der Oberseite des Probekörpers, in mm

Die residuelle Biegezugfestigkeit ($f_{R,j}$) ist gegeben durch

$$f_{R5,j} = \frac{3 F_{s,j} l}{2 b h_{sp}^2}$$

- $f_{R5,j}$ ist die residuelle Biegezugfestigkeit entsprechend $CMOD = CMOD_j$ oder $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), in N/mm²;
- $F_{s,j}$ ist die Last entsprechend $CMOD = CMOD_j$ oder $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), in N (siehe Abbildung 7);
- l ist die Spannweite in mm;
- b ist die Breite des Probekörpers in mm;
- h_{sp} ist der Abstand zwischen der Spitze der Kerbe und der Oberseite des Probekörpers, in mm





Der Last-CMOD wird als Last ausgedrückt, die der CMOD bei 0.5 (F_{R1}), 1,5 (F_{R2}), 2.5 (F_{R3}) und 3.5 (F_{R4}) entspricht

Methode B - Bericht

Der Prüfbericht kann zusammengefasst werden.

- Ort, Datum, Name des Prüfinstituts und der für die Prüfung verantwortlichen Person und des Bedieners
- Fasertyp gemäss EN 14889 und Dosierung
- Identifizierung der Mischungszusammensetzung
- Datum und Uhrzeit der Anwendung des Probekörpers, Identifizierung und Ort der Herstellung
- Zustand der Probekörper bei Eingang zur Lagerung
- Einzelheiten zu den Probekörpern, Anzahl, Abmessungen der Platten und Kerben und Vorbereitung
- Aushärtungsverlauf und Feuchtigkeitsbedingungen bei der Prüfung
- Alter des Probekörpers bei der Prüfung
- Prüfmaschine und Einrichtung
- Ergebnisse –
 - Last-CMOD-Kurve oder Last-Durchbiegungskurve
 - Proportionalitätsgrenze
 - Residuelle Biegezugfestigkeiten entsprechend CMOD_j (Durchschnitts- und Einzelwerte)
 - Optisches Erscheinungsbild des Betons
- Verweis auf die Norm
- Jede Abweichung von der Norm
- Beobachtungen zur Gleichmässigkeit der Faserverteilung (muss angefragt werden)
- Erklärung der für die Prüfung verantwortlichen Person, dass die Prüfung in Übereinstimmung mit EN 14488-3 durchgeführt wurde, mit Ausnahme der angegebenen Abweichungen

8.2 ENERGIEABSORPTION

Es gibt verschiedene Arten von Energieabsorptionstests, je nach den Anforderungen der Spezifikation oder der Entwurfsmethode. Die Energieabsorptionsprüfungen sind nicht immer gleich und variieren aus verschiedenen Gründen.

- Grösse und Form der Platte
- Plattenaufleger in der Maschine
- Lastanwendung
- Gerätespezifikation / Einstellungen
- Messmethode
- Spritzbeton

Die beiden Hauptprüfungen werden gemeinhin als Prüfung quadratischer oder runder Platten bezeichnet. Die Ergebnisse der Prüfverfahren für quadratische und runde Platten lassen sich nur schwer direkt miteinander vergleichen, da die Geometrie und die Prüfbedingungen recht unterschiedlich sind. Studien belegen jedoch, dass es eine Korrelation zwischen den Ergebnissen gibt, und der Energieabsorption nach EN 14488-5 bei 25 mm Durchbiegung nahe. Es ist nicht sicher, ob diese grundlegende Korrelation für alle Rezepturen gelten kann.

Tabelle 8.2.1: Vergleich der Prüfmethode für runde und quadratische Platten

Merkmal	Prüfung quadratischer Platten EN 14885
Geometrie	Quadratisch (600 x 600 x 100 mm tief)
Auflagerbedingungen	Kontinuierliche Kantenabstützung
Spannungstyp	Biegung und Durchstanzen
Verhaltenstyp	Material und Struktur
Rissbild	Variabel
Durchbiegung	Bis zu 25 mm
Nachteil	Prüfverfahren, welches auf perfekte Auflagerbedingungen angewiesen ist
Vorteil	Bessere Simulation der realen Leistung

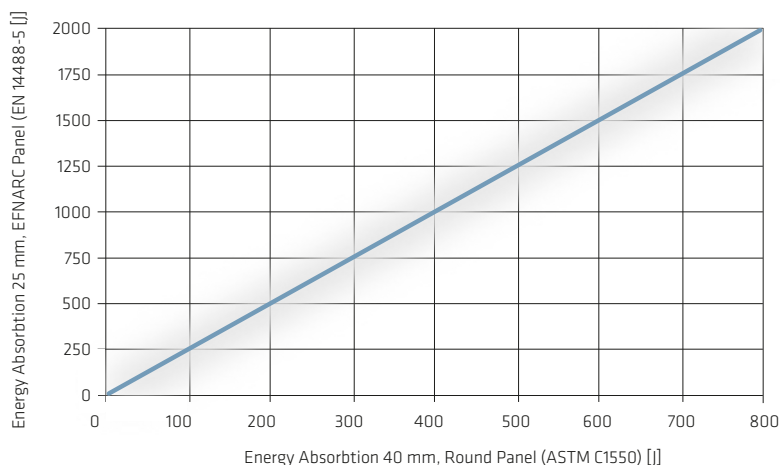


Abb. 8.2.1: Annähernde Korrelation von Prüfverfahren für quadratische/runde Platten zur Energieabsorption

8.2.1 PRÜFUNG QUADRATISCHER PLATTEN

8.2.1.1: Einschlägige Dokumente zur Bestimmung der Energieabsorption

Referenz	Titel	Relevanz
EN 14889-1	Fasern für Beton - Teil 1 - Stahlfasern	Leistungsanforderungen
EN 14889-2	Fasern für Beton - Teil 2 - Polymerfasern	Leistungsanforderungen
EN 14488-1	Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität	Leistungsanforderungen
EN 14488-5	Prüfung von Spritzbeton – Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Probekörpern	Vorbereitung und Durchführung der Prüfung

EN 14488-5

Prüfung von Spritzbeton – Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Probekörpern.

Inhalt

Diese Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der Energieabsorption durch Aufbringen einer Last auf die obere Mitte eines Probekörpers und Messung der Last / Durchbiegung fest. Aus der Last-Durchbiegungskurve kann eine zweite Kurve berechnet werden, die die Energieabsorption in Abhängigkeit von der Durchbiegung angibt.

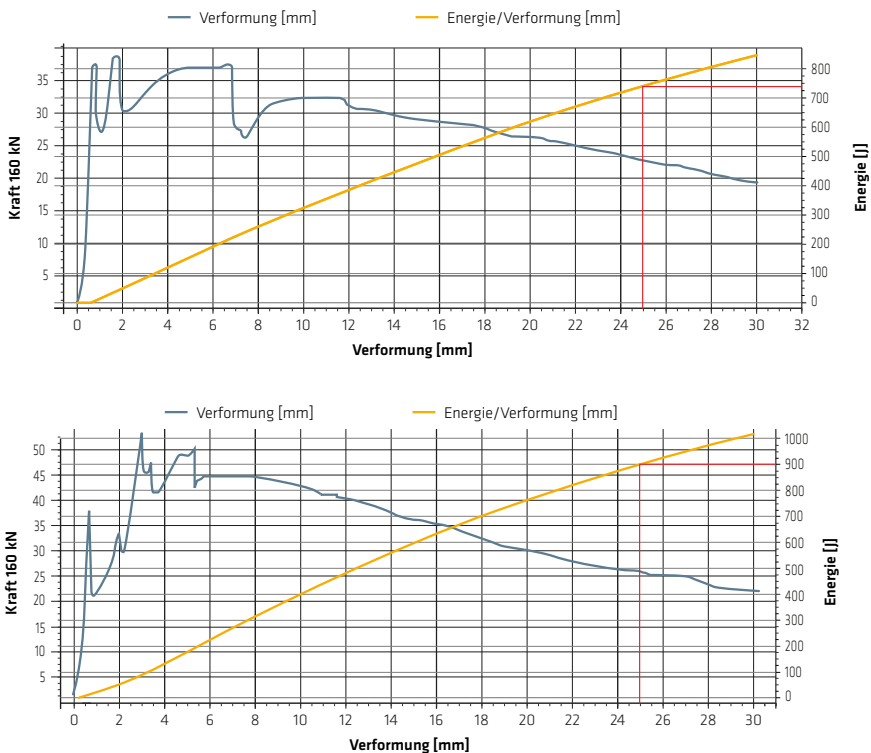
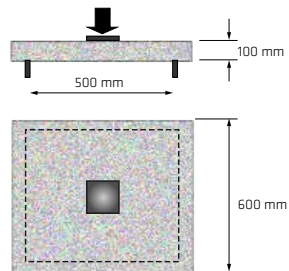


Abb. 8.2.1.1: Beispiele für Last-Durchbiegungs-Diagramme zur Bestimmung der Energieabsorption

Beschreibung

Faserbeton wird unter Verwendung der für das Projekt vorgesehenen Betonrezeptur in eine Plattenform gespritzt. Die Platte wird von der Baustelle entfernt und an ein Prüfinstitut geliefert, wo sie für die Prüfung vorbereitet und gemäss EN 12390-2 ausgehärtet wird. Die Prüfung wird normalerweise nach 28 Tagen durchgeführt. Der Probekörper für die Prüfung wird auf die Masse 600 mm x 600 mm x 100 mm Dicke zugeschnitten und in einer Maschine gemäss EN 12390-4 auf einen starren, quadratischen Auflagerahmen gelegt. Auf die Oberseite der Platte wird eine Punktlast durch einen quadratischen Belastungsblock von 100 x 100 aufgebracht. Elektronische Messaufnehmer messen die Durchbiegung des Probekörpers, während die Last aufgebracht wird. Die Prüfung ist beendet, wenn die Durchbiegung mehr als 30 mm beträgt. Das Energieabsorptionsvermögen des Betons in Joule wird aus der Fläche unter der Last-Durchbiegungskurve zwischen 0 - 25 mm ermittelt.



Ergebnisse

Aus der Last-Durchbiegungskurve wird das Energieabsorptionsdiagramm in Abhängigkeit von der Verschiebung berechnet. Die Definitionen der Energieabsorptionsklassen sind in EN 14488-1 enthalten: Tabelle 3.

Energieabsorptionsklasse	Energieabsorption in J bei einer Durchbiegung von bis zu 25 mm
E500	500
E700	700
E1'000	1'000

Bericht

- Ort, Datum, Name des Prüfinstituts und der für die Prüfung verantwortlichen Person und des Bedieners
- Fasertyp gemäss EN 14889 und Dosierung
- Identifizierung der Mischungszusammensetzung
- Datum und Uhrzeit der Anwendung des Probekörpers, Identifizierung und Ort der Herstellung
- Zustand der Probekörper bei Eingang zur Lagerung
- Angaben zu den Probekörpern, deren Anzahl, Abmessungen und Vorbereitung
- Aushärtungsverlauf und Feuchtigkeitsbedingungen bei der Prüfung
- Alter des Probekörpers bei der Prüfung
- Prüfmaschine und Einrichtung
- Ergebnisse –
 - Last-Durchbiegungskurve
 - Maximale Last (kN)
 - Berechnetes Energie-Durchbiegungs-Diagramm
 - Energieabsorptionsvermögen
 - Skizze oder Foto des Probekörpers mit Angabe der Anzahl und Lage der Risse
- Verweis auf die Norm
- Jede Abweichung von der Norm
- Erklärung der für die Prüfung verantwortlichen Person, dass die Prüfung in Übereinstimmung mit EN 14488-5 durchgeführt wurde, mit Ausnahme der angegebenen Abweichungen



Abb. 8.2.1.2: Ansicht der Unterseite der geprüften quadratischen Platten

8.3 FASERFESTIGKEIT



Die in den globalen Normen erwähnten Prüfverfahren für Zugfestigkeit und E-Modul unterscheiden sich stark voneinander und enthalten manchmal keine genauen Angaben zu den Prüfbedingungen.

In der Norm EN 14889-2:2006 sind keine Leistungsanforderungen für die Zugfestigkeit oder den E-Modul festgelegt, obwohl die Werte des Herstellers angegeben werden müssen. Es gibt zwei Methoden zur Bestimmung der Zugfestigkeit einer synthetischen Faser, je nachdem, ob die Faser als Mikro- oder Makrofaser eingestuft wird.

Synthetische Makrofasern werden derzeit nach EN 10002:1 geprüft, mit der zusätzlichen Anforderung, dass die Prüfgeschwindigkeit nicht höher als 10 mm / min sein darf und die Prüfung an Strängen von mindestens 20 mm Länge durchgeführt werden muss. Das bedeutet, dass keine spezifische Dehnungsrate angegeben ist, jedoch gibt EN 10002-1:2001 eine maximale Dehnungsrate von 0.008 s⁻¹ an, was ungefähr 50%/min entspricht.

EN 10002-1:2001 wurde 2009 zurückgezogen, in EN 14889:1 und 2 wird jedoch noch auf diese verwiesen, bis die Normen EN 14889:1 und 2 aktualisiert sind. EN 10002-1:2001 wird durch ISO 6892-1:2009 Metallische Werkstoffe – Zugprüfung – Teil 1 ersetzt: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.

In der Regel werden mindestens 30 Stränge geprüft. Anhand der Streuung der Ergebnisse kann der Hersteller entscheiden, welcher Wert angegeben werden soll, auch wenn die Normen die maximal zulässige Differenz zwischen dem angegebenen und dem oberen und unteren Wert festlegen. Der Hersteller legt auch fest, an welcher Stelle des Produktionsprozesses die Stränge für die Prüfung entnommen werden. So werden beispielsweise Zugprüfungen in der Regel an der geprägten Faser (dem Endprodukt) durchgeführt, während bei gewellten oder gekräuselten Fasern die Prüfung besser vor dem Wellen- oder Kräuselungsprozess erfolgt. Der Grund dafür ist, dass die anfängliche Bruchdehnung zum Richten einer gewellten oder gekräuselten Faser die Ergebnisse stark beeinflusst.

Synthetische Mikrofasern werden gemäss EN ISO 2062:2009 mit einer Messlänge von 250 oder 500 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 250 bzw. 500 mm / min geprüft, was einer Dehnungsrate von 100 %/min entspricht. In der Norm EN ISO 2062:2009 heisst es weiter, dass alle Vorkonditionierungen und Prüfungen in Standardatmosphäre bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden müssen. Wenngleich diese Prüfmethode nur für synthetische Mikrofasern gilt, ist es nicht unüblich, auch synthetische Makrofasern nach dieser Methode zu prüfen.

Tabelle 8.3.1: Überblick über die wichtigsten Normen für Zugprüfverfahren für synthetische Makrofasern zur Verwendung in Beton.

	EN 14889-2	
Zugfestigkeit	Makrofasern EN 10002-1	Mikrofasern EN ISO 2062
Dehnungsrate	< 50% / min	100% / min
Messlänge	≥ 20 mm	250 mm oder 500 mm
Prüfgeschwindigkeit	≤ 10 mm / min	250 mm / min oder 500 mm / min
E-Modul	EN 10002-1 – Steigung der Linie, die durch die Punkte bei 10% und 30% der maximalen Kraft auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve verläuft	

Dehnungsrate

Die Dehnungsrate im Zugversuch hat einen grossen Einfluss auf die angegebenen Werte. Die Werte für die Zugfestigkeit sind stark von den Prüfparametern abhängig, insbesondere von der Dehnungsrate und bei Kunstfasern von der Prüftemperatur. Die Dehnungsrate ist die Geschwindigkeit des sich bewegenden Kreuzkopfes im Verhältnis zur ursprünglichen Länge des Probekörpers zwischen den Klemmen. Die Dehnungsrate und die Temperatur, bei der der Zugversuch durchgeführt wird, haben einen grossen Einfluss auf die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve von synthetischen Makrofasern. Im Allgemeinen gilt, je höher die Dehnungsrate und damit die Prüfgeschwindigkeit, desto höher sind die resultierenden Werte für die Zugfestigkeit. Eine Senkung der Prüftemperatur hat die gleiche Wirkung wie eine Erhöhung der Dehnungsrate.

Empfehlung für Makrofaser-Zugversuche

Es werden mindestens 30 Stränge mit einer Länge von ca. 400 mm benötigt.

Geprägt	Gekräuselt / gewellt
Es sind die geprägten Stränge zu prüfen, d. h. das fertige Produkt	Es sind die ungekräuselten Stränge zu prüfen

Für EN 14889-2:2006 müssen alle Zug- und E-Modulwerte mit einer Universalprüfmaschine mit Flachspannsystem und taktilem oder optischem Dehnungsmesser geprüft werden.

Dehnungsrate ^[1]	Prüfgeschwindigkeit ^[2]	Messlänge	Abstand des taktilen Dehnungsmessers
33% / min (abgeleitet aus Prüfgeschwindigkeit / Messlänge x 100%)	10 mm / min	30 mm ±2 mm	10 mm ±1 mm

^[1] Ermittelt aus der Prüfgeschwindigkeit und der Messlänge

^[2] Gegeben in der Norm

Die äquivalente Fläche und die Querschnittsfläche werden nach der Methode des unregelmässigen Querschnitts ermittelt.

Die Zugfestigkeit wird aus der maximalen Bruchkraft [N] / Querschnittsfläche [mm²] ermittelt.

Der E-Modul wird aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve zwischen den ermittelten Werten bei 10% von f_{\max} und 30% von f_{\max} aus der maximalen Bruchkraft und unter Verwendung der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\frac{(30\%F_{\max} - 10\% F_{\max}) / \text{Querschnittsfläche}}{(\text{Bruchdehnung bei } 30\% F_{\max} - \text{Bruchdehnung bei } 10\% F_{\max})}$$

9 VERPACKUNG UND DOSIERUNG

9.1 VERPACKUNG



Die Wirksamkeit von Faserbeton in Bezug auf Rissbeständigkeit und Verbesserung der Materialeigenschaften hängt vollständig von der gleichmässigen dreidimensionalen Verteilung der Fasern im Beton ab.

Faserbeton kann nicht als ein dreidimensionales Bewehrungssystem beschrieben werden, wenn Fasern in einem Teil des Betons vorhanden sind und in einem anderen nicht. Zum Erhalt einer vollständigen und gleichmässigen Verteilung ist es daher wichtig, dass die gewählte Faser mit dem gewählten Beton oder der gewählten Zementmischung kompatibel ist und dass das empfohlene Mischverfahren eingehalten wird.

Je nach Hersteller sind die Fasern in verschiedenen Verpackungsarten und -grössen erhältlich. Typische Verpackungsarten sind wasserlösliche Säcke zur einfachen Dosierung, Kartons oder grössere Beutel / Säcke.



PP-Mikrofasern

PP-Mikrofasern werden als lose Fasern geliefert und im Allgemeinen in 0.6 kg oder 0.9 kg schweren wasserlöslichen Papiersäcken verpackt. Diese Säcke sind so konzipiert, dass sie direkt in die Betonmischung gegeben werden können, ohne den Sack selbst zu öffnen. Diese Säcke werden normalerweise hinzugefügt, nachdem alle anderen Materialien, einschliesslich Wasser, in den Mischer gegeben wurden. Die Säcke zersetzen sich in der Mischung durch die mechanische Wirkung der Gesteinskörnungen. Es sollte immer darauf geachtet werden, dass die einzelnen Säcke nach und nach in den Beton gegeben werden und nicht alle auf einmal. Nach der Zugabe sollte der Beton so lange gemischt werden, bis sich alle Fasern gleichmässig im Beton verteilt haben.

Die Mischzeiten können durch das Alter und die Effizienz der Mischanlage beeinflusst werden und dadurch, ob es sich um einen statischen Zwangsmischer oder einen Taumelmischer handelt. Die Mischzeiten hängen von der Menge des gemischten Betons, dem w/z-Wert und dem Mischertyp ab. Lesen Sie immer das Produktdatenblatt.

Auf dem Markt gibt es automatisierte Systeme für das Einbringen von kleinen, abgepackten Materialien in den Beton. Wenn PP-Mikrofasern jedoch in grossen Mengen verwendet werden, z. B. bei Tunnelanwendungen, werden sie häufig in Big Bags geliefert, um den Einsatz automatischer Dosieranlagen zu erleichtern.



PP-Makrofasern

PP-Makrofasern werden in der Regel in abbaubaren Papiersäcken, in Kartons und je nach Hersteller in Big Bags geliefert. Die abbaubaren Säcke sind so konzipiert, dass sie ungeöffnet in den Beton gegeben werden können, während Kartons mit Fasern geöffnet und die Fasern langsam in den Beton eingebracht werden müssen. Einige Arten von PP-Makrofasern werden als loses Material geliefert. PP-Mikrofasern werden im Allgemeinen auch als "Pucks" geliefert, bei denen es sich im Wesentlichen um eine grössere Menge von Einzelfasern handelt, die in eine lösliche Folie eingewickelt sind.

Diese Pucks tragen zur gleichmässigen Verteilung der Fasern im Beton bei und ermöglichen eine effiziente Transportverpackung des ansonsten sperrigen Materials. PP-Makrofasern sollten langsam und gleichmässig in den Beton eingearbeitet werden. Während sich die Säcke schnell zersetzen, verteilen sich die Pucks gleichmässig im Beton. Die Folie um die Pucks löst sich auf, so dass sich die Fasern homogen im Beton verteilen können.

PP-Makrofasern können in Big Bags geliefert werden und werden im Allgemeinen in Kombination mit einer automatischen Dosieranlage verwendet.



Stahl-Makrofasern

Stahlfasern sind lose oder verklebt erhältlich und werden im Allgemeinen in Kartons oder grossen Säcken für Grossprojekte geliefert. Die Grössen der Kartons variieren je nach Hersteller und werden in der Regel in den Grössen 10 kg, 20 kg oder 25 kg geliefert. Stahlfasern können auch in auflösbaren Säcken geliefert werden, je nach Gewicht und Grösse der Fasern, verklebt oder lose bereitgestellt. Auflösbare Säcke können verstärkt werden, um das zusätzliche Gewicht zu tragen, was jedoch die Abbaudauer im Mischer beeinflusst.

In regelmässigen Abständen sollte überprüft werden, ob die Säcke vollständig abgebaut sind.

Stahlfasern mit hohem Schlankheitsverhältnis werden in der Regel zu Faserbündeln zusammengeklebt, da dies die Faserverteilung im Beton verbessert.

Stahlfasern werden dem frisch gemischten Beton zugesetzt, jedoch nie als erste Komponente. Die Mischzeit hängt von der Grösse und Effizienz der Mischanlage ab. Im Allgemeinen wird eine Mischzeit von mindestens 5 Minuten empfohlen, oder eine zusätzliche Mischzeit von 1 Minute für jeden Kubikmeter im Mischer. Stahlfasern können im Allgemeinen in einem Big Bag von etwa 1 Tonne für die Verwendung mit automatischen Dosieranlagen geliefert werden.

9.2 DOSIERUNG



9.2.1 MANUELLE DOSIERUNG

Die Dosierung hängt von der Menge des zu verwendenden Betons ab. Wenn relativ kleine Mengen an Fasern benötigt werden, werden diese normalerweise manuell dosiert. Wenn grosse Mengen an Beton verwendet werden sollen, kann es sinnvoll sein, automatische Dosieranlagen zu verwenden.



9.2.2 AUTOMATISCHE DOSIERANLAGEN

Bei grossen Projekten ist die beste Methode zur Dosierung von Fasern die Verwendung einer automatischen Dosieranlage. Diese Systeme sind im Allgemeinen für alle Fasertypen geeignet und werden je nach Fasertyp, Zuführkapazität, Waagschaleninhalt und Genauigkeitsanforderungen ausgewählt.

Die Anlage verfügt in der Regel über einen zylindrischen Behälter mit einer auf einem starren Rahmen mit Beschickungsspirale im Inneren, die auf einem starren Rahmen mit angebrachten Vibrationsmotoren montiert ist. Nach Aktivierung arbeiten sich die Fasern manuell oder automatisch an der Spirale nach oben und werden in den Mischer oder auf sekundäre Förderbänder abgegeben. Automatische Dosieranlagen können als eigenständiges System eingesetzt oder direkt mit dem Computersystem für die Betondosierung verbunden werden, das die Faserdosierung für jede Charge genau misst und aufzeichnet.



Förderband

Mobile Förderbänder sind eine sehr einfache Möglichkeit, Mikro- oder Makrofasern aus PP oder Stahl direkt zum Betonmischer zu transportieren. Die Fasern werden manuell am unteren Ende des laufenden Förderbandes abgelegt. Die Faseremengen, die in den Mischer gelangen, werden manuell kontrolliert, und es wird empfohlen, die Dosierung für jede Betoncharge zu protokollieren. Bei der Verwendung von PP-Makrofasern, die in Pucks geliefert werden, werden gerippte Bänder empfohlen.

Blasanlage

Blasanlagen können für verschiedene Arten von Fasern verwendet werden. Sie werden eher von Spezialfirmen für gewellte Stahlfasern verwendet. Der Grund dafür ist, dass die wellenförmige Form der Faser zum Zusammenballen führen kann, wenn diese als loses Material aus einem Karton oder von einem Förderband eingeführt werden.



Becherwerke

Becherwerke dienen der vertikalen Beförderung von Fasern. Sie verfügen über eine Reihe von kleinen Bechern, die an einem beweglichen Band befestigt sind und alle Arten von Fasern vom Boden in eine erhöhte Position befördern. Becherwerke können in kompliziertere Liefermethoden wie automatische Faserdosieranlagen, Förderbänder und andere Wägesysteme integriert werden.

10 OBERFLÄCHENGÜTE DES BETONS

10.1 GUTE BETONPRAXIS

Wenn Faserbeton als Sichtbeton verwendet werden soll, ist die Qualität der Oberflächenbeschaffenheit oft ein Gradmesser für den Erfolg. Zum Beispiel für Fertigteile und für Ortbeton wie Bodenplatten. Zum Erzielen einer guten Oberfläche müssen die Betonmischung, der Zeitpunkt des Einbaus und die Nachbehandlungstechnik sorgfältig ausgewählt werden. Die Bestandteile der Betonrezeptur spielen eine wichtige Rolle für die Oberflächeneigenschaften.

- Feinanteil
- Inhalt der Gesteinskörnung
- Wasser- / Bindemittelverhältnis
- Verwendung von Zusatzmitteln
- Hilfsmittel für die Endbearbeitung



Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass genügend Leim vorhanden ist, um die Fasern zu bedecken. Lange, steife Fasern können aus dem Sichtbeton herausragen, während sich weiche Fasern an der Oberfläche nach unten biegen. Freiliegende Stahlfasern können anfangen zu korrodieren und unschöne Flecken auf dem Beton hinterlassen. Die richtige Auswahl der Fasern hängt daher auch von der Betonanwendung und dem gewünschten Aussehen der Oberfläche ab. Auch wenn die Fasern gleichmäßig im Beton verteilt sind, ist es unvermeidlich, dass einige an der Oberfläche sichtbar sind.

Faserbeton kann mit herkömmlichen Methoden wie Betonrutschen und Eimern eingebaut werden. Faserbeton kann auch durch spezielle Pump- und Sprühtechniken auf eine Oberfläche extrudiert oder aufgespritzt werden. Die gewünschte Verarbeitbarkeit beeinflusst das Aussehen der Oberfläche, je nachdem, ob die Verarbeitbarkeit zum Zeitpunkt des Einbaus hoch oder niedrig war und wie stark verdichtet wurde. Ein zu starkes Rütteln von Faserbeton kann die Fasern in eine sieht zwar trockener aus als normaler Beton, lässt sich aber durch Einrütteln genauso gut verarbeiten. Das liegt daran, dass die Fasern mit Zementleim ummantelt werden müssen und der Beton dadurch kohäsiver werden kann.

Ein scheinbarer Verlust des Ausbreitmasses bzw. des Setzflussmasses ist ein Merkmal von Faserbeton, aber in den meisten Fällen ist die Zugabe von Wasser nicht erforderlich. Viele Faktoren beeinflussen die Verarbeitbarkeit von Beton; daher ist es wichtig, die Faserbetonmischung vor dem Einbau zu analysieren. Wie bei jedem Beton sollten Sie nicht die besten Ergebnisse mit einer Mischung mit hohem w/z-Wert erwarten.

Bei der Endbearbeitung des Betons kommt es auf den richtigen Zeitpunkt und das richtige Werkzeug an. Besenstrich-Patschen, manuelle oder maschinelle Glätter sind einige Beispiele. Beginnen Sie nicht zu früh mit den Nacharbeiten. Lassen Sie alles Wasser von der Oberfläche verdampfen, bevor Sie diese bearbeiten. Es ist sehr wichtig, dass die Oberfläche nicht überarbeitet wird, insbesondere bei Faserbeton, wo sich Fasern auf der Oberfläche befinden können.



Bluten

Bluten ist die Bewegung von Wasser innerhalb des Betons an die Oberfläche aufgrund der Schwerkraftverdrängung des Zements und der Gesteinskörnungen vor dem Erstarrungsbeginn. Unbewehrter Beton kann in Bereichen, in denen sich grosse Kapillaren gebildet haben, an der Oberfläche Pfützen mit ausblutendem Wasser bilden. Inkonsistenzen bei der Betonqualität und den Liefermengen können zu weiteren Problemen mit Bluten bei der Nachbehandlung führen.

Endbearbeitungsvorgänge, die durchgeführt werden, während Wasser auf der Oberfläche vorhanden ist, können schwerwiegende Probleme mit Rissbildung, Staubbildung oder Abblätterung verursachen. Auch das Besprühen der Oberfläche mit Wasser zur Erleichterung der Bearbeitung kann diese Probleme verursachen.

Faserbeton weist aufgrund des internen Mechanismus, den die Fasern zur Unterstützung der Gesteinskörnungen bieten, weniger Bluten auf als der entsprechende unbewehrte Beton. Wenn es zum Bluten kommt, erfolgt dies in der Regel gleichmässiger, so dass die Gefahr von „Pfützenbildung“ deutlich geringer ist als bei unbewehrtem Beton.

10.2 METHODEN DER ENDBEARBEITUNG



Die Fasern sind mit den meisten Nachbehandlung und Oberflächenbehandlungen kompatibel, wie z. B. Musterprägung, Waschbetonoberflächen, Bearbeitung mit Besenstrich-Patschen, manuellen oder maschinellen Glättern. Stahlfasern werden nicht für Musterprägungen oder Waschbetonoberflächen empfohlen. Es wird nicht empfohlen, Sackleinen über die Oberfläche zu ziehen, da sie sich in einer Faser verfangen und diese von der Oberfläche abheben können.



Abziehen oder Einsatz von Betonschwimmern

Zum Abziehen können manuelle, Rüttel- und lasergesteuerte Verfahren verwendet werden. Lasergesteuerte und vibrierende Estrichmaschinen sorgen für eine Oberflächenvibration, die den Leim an die Oberfläche bringt und die Gefahr freiliegender Fasern minimiert.

Magnesiumschwimmer werden empfohlen, um eine glatte, ebene Oberfläche zu schaffen und Risse oder offene Stellen zu schliessen, die beim Abziehen entstehen. Wie bei der Nachbehandlung jedes Betons sollte eine Überarbeitung der Oberfläche vermieden werden, da dies nur dazu führt, dass zu viele Feinteile und Fasern an die Oberfläche gelangen

Maschinelles Glätten

Timing ist alles, und es kann sein, dass unerfahrene Arbeiter dazu neigen, zu früh mit der Nachbehandlung des Faserbetons zu beginnen. Dies liegt daran, dass der Faserbeton steifer aussieht und weniger Oberflächenwasser aufweist als unbewehrter Beton. Es ist wichtig zu wissen, dass die Fasern den Hydratationsprozess des Betons nicht beeinflussen. Daher ist Beton, der aussieht, als sei er fertig für die Nachbehandlung, wahrscheinlich nicht fertig, weil er nicht schneller abbindet. Die Fasern verleihen dem Beton mehr Kohäsion und Halt, so dass weniger Wasser austritt. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn die Arbeiter vor Ort Tests durchführen, um die Bereitschaft für die Nachbehandlung festzustellen. wahrscheinlich nicht fertig, weil er nicht schneller abbindet.

Die Fasern verleihen dem Beton mehr Kohäsion und Halt, so dass weniger Wasser austritt. Dies sollte berücksichtigt werden, wenn die Arbeiter vor Ort Tests durchführen, um die Bereitschaft für die Endbearbeitung festzustellen.

Bei vorzeitigem Glätten treten mehr Oberflächenfasern auf, da der Zementleim nicht genügend Zeit hat, an den Fasern zu haften. Dies führt dazu, dass die Fasern auf der Oberfläche bewegt werden. Ausserdem werden dadurch mehr Fasern an die Oberfläche gezogen, was eine hochwertige Nachbehandlung erschwert. Wenn die Fasern an die Oberfläche gezogen werden, halten Sie an, warten Sie 10 bis 15 Minuten und versuchen Sie es erneut. Das richtige Timing sorgt für eine glatte, gleichmässige Oberfläche mit wenigen freiliegenden Fasern.

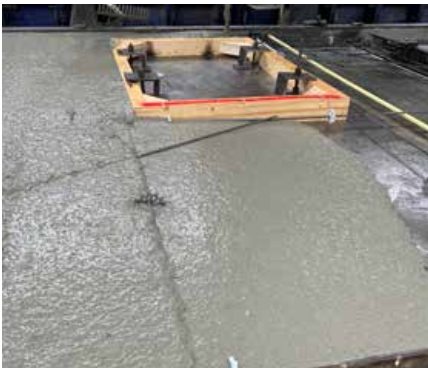
Es hat sich bewährt, die Oberfläche zunächst mit einem Flügelglätter mit flach gestellten Flügeln zu glätten. Durch dieses Verfahren wird die Oberfläche verfestigt, Oberflächenmängel werden beseitigt und die Oberfläche wird für die weitere Bearbeitung vorbereitet. Fahren Sie so lange wie möglich mit flach gestellten Flügeln fort und erhöhen Sie dann langsam den Winkel der Flügel, bis die gewünschte Betonoberfläche erreicht ist.





Betonharken und Besenstrichpatschen

Betonharken und Besenstrich-Patschen werden am besten in eine Richtung gezogen. Es können einige Fasern an der Oberfläche vorhanden sein, aber das ist normal und die PP-Fasern können später abgeschnitten oder weggebrannt werden. Sollten sie jedoch verbleiben, werden sie mit der Zeit abgenutzt. Stahlfasern können entfernt werden, indem die Fasern mit einer gekröpften Zange oder einem Drahtschneider von der Oberfläche abgeschnitten werden. Bei erfahrenen Faserbeton-Bearbeitern sind diese Schritte nur selten erforderlich



Betonfertigteile

Es gibt nur wenige Probleme im Zusammenhang mit Faserbeton in Betonfertigteilen, wenn der Beton in Schalungen gegossen wird. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass der Beton von guter Qualität ist und nicht zu stark gerüttelt wird. Sichtbetonoberflächen müssen zum geeigneten Zeitpunkt manuell geglättet werden. Überstehende Fasern können abgeschnitten oder im Falle von PP bei Bedarf abgebrannt werden.

11 INDEX

A		Duktilität	7, 55, 58
Abrieb	50, 86	Durchlässigkeit	50
ACI 360R	61, 70	E	
American Concrete Association (ACI) -		EFNARC	88, 114
Amerikanische Betonvereinigung	61, 70	E-Modul	33, 37, 38, 42, 117-119
ASTM C1550	114	EN 10002-1	117, 118
ASTM D2256	38	EN 14889 25, 28-32, 35-38, 66, 95, 116-119	
Automatisierte Dosierung	122, 124	EN 14845-1	66, 95, 97, 104
B		EN 14845-2	66, 95, 97
Bauzeit	55-56	EN 14487-1	27, 58, 105
Besenstrich-Patschen,		EN 14651	69, 95, 98-101
Beton	16, 21, 25, 63-67	EN 14488-3	95, 108, 110, 112
Betonfertigteile	90, 131	EN 14488-5	87, 113, 114, 116
Betonschwimmer	129	Endbearbeitung	128-131
Biegeversuch	64, 105	Energieabsorption	34, 55, 87, 88, 113-116
Bluten	44, 77, 128	Europäische Normen	25, 27, 66
Bruchdehnung	9, 33, 37-39	Explosionsartiges Abplatzen	47, 79
Bruchmodul	34	F	
C		Faser	
CE-Zertifizierung	28	Ausbreitversuch	43
Chemische Bindung	12	Bemessungskonzept	67
Verschiebung am Ansatz der Rissöffnung (CMOD)	34, 99-104	Biegezugfestigkeit	29, 34, 63, 66, 95-99, 102, 107, 110
D		Brandschutz (passiv)	45, 49, 80
DAfStB	26	Dispersion	14, 65
Dauerhaftigkeit	23, 41, 51, 90	Eigenschaften	8
Leistungserklärung (DoP)	31	Endbearbeitung, Decken	127-130
Dehnung		Faserbeton	7, 61, 75
Verfestigung/Entfestigung	63	Fibrilliert	11, 33, 41
Zugprüfung	117	Flache Fasern	11, 12
Dosierung	8, 47, 58, 124	Form	11
		Geometrie	10, 42, 51

Klassifizierung	35	M	
Materialien	9	Makrofasern	51
Statisch wirksam	66	Betoneigenschaften	54
Temperatur	39	Dosierung	58, 63
Terminologie	33	Mechanische Festigkeit	91
Verankerung	13, 66	Rissfestigkeit	7, 51
Vorteile	45, 55, 66, 68, 69, 75, 77, 84, 86, 90, 92, 93	Typen	51
Felssicherung	84-88	Vorteile	55-56
Feinheit	33	Mikrofasern	41
fib Model Code	27, 61, 68	Betoneigenschaften	42, 43
Fugen (Decke)	78	Dosierung	47
Fundamentplatte	20, 51, 61, 69, 75-78	Feuer	79
G		Rissfestigkeit	46
Geprägt	11, 12, 33, 51, 65	Typen	42
Glätten, Oberfläche	130	Vorteile	45-50
Gewellt	11, 12, 51, 65	Mischen	14
H		Monofilament	33, 41
Hakenförmig	11, 12, 65	N	
I		Nachhaltigkeit	19
ITAttech	27, 61, 68	O	
K		Oberflächenabplatzungen	79. 82
Kohäsion	42	P	
Korrosion	23	Plastische Senkungsrisssbildung	42, 45
Kriechen	39	Plastische Schwindrisssbildung	46, 52, 62, 75
Kritische Länge	12-14	Polypropylen	
L		Eigenschaften	8, 9
Lebenszyklusanalyse	19-21	Makro	51
		Mikro	41
		Pucks	122, 125
		Proportionalitätsgrenze	34, 64
		Pumpbeton	92

R

Referenzbeton	66
Residuelle Biegezugfestigkeit (RFS)	34, 55, 63
RILEM	27, 61
Riss	10, 12
Rissbildung	23, 43, 57, 63

S

Schlagfestigkeit	90
Schlankheitsverhältnis	10, 12, 35
Schmelzindex	39
Schmelzpunkt	39
SIA	26, 32, 78
SikaFiber® Software	70-73
Spitzenwert der Biegezugfestigkeit	34
Spritzbeton	84
Stahlfasern	
Eigenschaften	9
Geklebt	14, 106, 123
Typen	53, 54
Stahlbewehrung	56, 62, 76, 90, 91

T

Technische Berichte	61
Tests	95-120
TR34	61, 70, 78
TR63	61
TR65	61
Tunnel	48
Tunnelauskleidungen	79

U

UHPC	8, 64, 93
Ultraviolettes Licht	40

V

Vébé-Prüfung	29, 30
Verarbeitbarkeit	42
Verdrehte Fasern	51
Verbände	24
Verpackung	15, 121

Z

Zähigkeit	33
Zementmatrix	16
Zersetzungstemperatur	39
Zugfestigkeit	33, 37, 46, 65
Zugprüfung	38, 117
Zusammenballen	14, 34, 51, 92, 125

VOM FUNDAMENT BIS ZUM DACH



BETON- UND MÖRTELHERSTELLUNG | BAUWERKSABDICHTUNG | BAUWERKSSCHUTZ
UND -SANIERUNG | KLEBEN UND DICHTEN AM BAU | BODEN UND WAND | BETON-
BRANDSCHUTZ | GEBÄUDEHÜLLE | TUNNELBAU | DACHSYSTEME | INDUSTRIE

SIKA SEIT 1910

Die Sika AG ist ein global tätiges Unternehmen der Spezialitätenchemie. Sika ist führend in den Bereichen Prozessmaterialien für das Dichten, Kleben, Dämpfen, Verstärken und Schützen von Tragstrukturen am Bau und in der Industrie.

Vor Verwendung und Verarbeitung ist stets das aktuelle Produktdatenblatt der verwendeten Produkte zu konsultieren. Es gelten unsere jeweils aktuellen Allgemeinen Geschäftsbedingungen.



SIKA SCHWEIZ AG
Tüffenwies 16
CH-8048 Zürich
+41 58 436 40 40
www.sika.ch

BUILDING TRUST

