

Les bétons renforcés de fibres métalliques

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **67 (1999)**

Heft 9

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-146494>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Les bétons renforcés de fibres métalliques

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer des propriétés déterminées du béton durci.

Bien que les bétons renforcés de fibres métalliques et les bétons projetés renforcés de fibres métalliques soient connus depuis longtemps, ils sont relativement peu utilisés. Une des raisons peut en être le manque partiel de normes, directives et recommandations [1]. Ce manque – qui n'existe pas aux USA [2–5] – concerne non seulement la Suisse, mais également l'Allemagne par exemple.

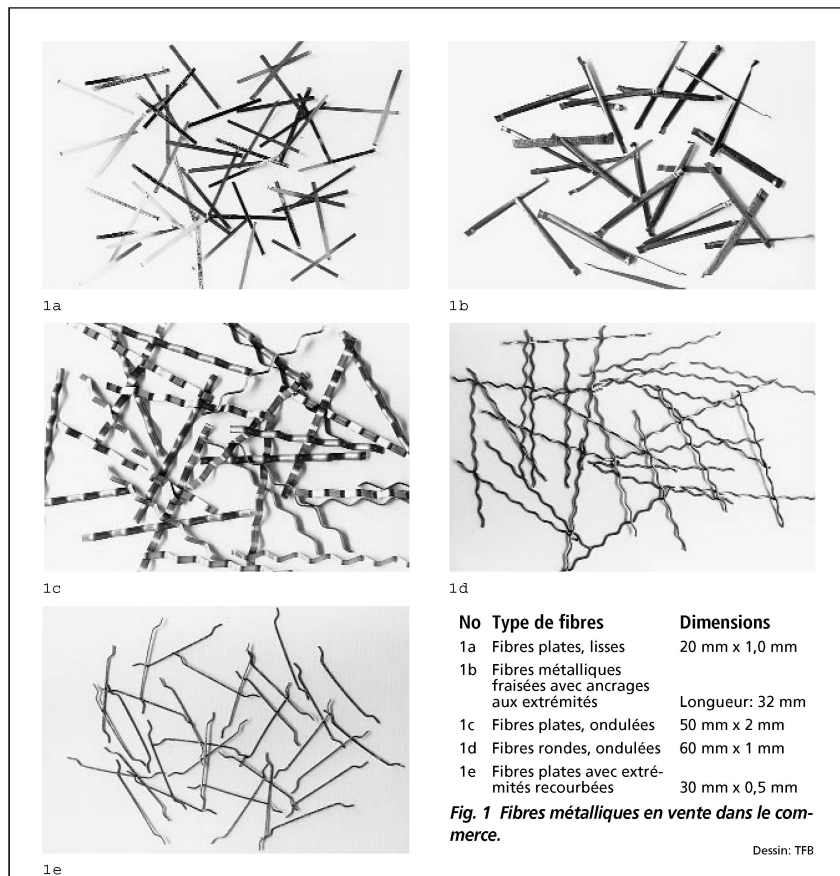
La parution de la recommandation SIA 162/6 «Stahlfaserbeton» [6] pourrait changer les choses en ce qui concerne l'utilisation de bétons contenant des fibres métalliques en Suisse. Cette recommandation, qui contient des indications pour le dimensionnement, le choix des matériaux et l'exécution, doit servir à ce que le béton renforcé de fibres métalliques soit utilisé comme il se doit ¹⁾. (Dans l'in-

troduction de la recommandation SIA 162/6, il est toutefois dit: *Die vorliegende Empfehlung beruht primär auf Erfahrungen mit Stahlfaserspritzbeton* ²⁾.)

Dans les lignes qui suivent, il est traité de quelques aspects intéressants des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM) et des bétons projetés renforcés de fibres métalliques (BPFM), en tenant particulièrement compte des indications données dans la recommandation SIA 162/6 [6], sur laquelle repose la majeure partie de cet article. (D'autres informations figurent dans un précédent numéro du «Bulletin du ciment» [7].)

Propriétés des fibres métalliques

La sélection des produits en vente dans le commerce de la *figure 1* donne un petit aperçu de la diversité des formes et dimensions des fibres métalliques. Le facteur de forme (longueur des fibres/diamètre des fibres) est en général de 50–100 pour des fibres de $\leq 1,0$ mm de diamètre [1]. Les fibres métalliques témoignent de résistances à la traction relativement élevées (400–1500 N/mm²); avec 200 kN/mm², leurs modules d'élasticité sont environ d'une puissance de



¹⁾ sachgemässe Anwendung von Stahlfaserbeton

²⁾ La présente recommandation est basée en premier lieu sur des expériences faites avec du béton projeté renforcé de fibres métalliques.

dix plus élevés que ceux de la matrice de mortier. Dans les calculs du volume des composants, on utilise la densité du fer (7850 kg/m^3).

Propriétés des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM)

Selon la recommandation SIA 162/6, un béton renforcé de fibres métalliques contient au moins 20 kg/m^3 de fibres métalliques. Les teneurs seront toutefois généralement plus élevées ($20\text{--}120 \text{ kg/m}^3$).

Les BFM sont des matériaux composites. Ils sont macroscopiquement homogènes, et leurs propriétés physiques et chimiques peuvent être considérées comme pareilles dans les trois directions (isotropes) [9], à condition toutefois que les fibres n'aient pas été orientées pendant le processus de fabrication.

A la différence de celle des bétons armés, la structure de l'armature des BFM est ainsi tridimensionnelle, et elle est aussi plus finement articulée. Même les zones proches de la surface et les arêtes sont armées, ce qui les rend plus résistantes aux contraintes mécaniques [6].

C'est principalement par le dépassement de la résistance à la fissuration que les BFM se distinguent des bétons non armés: ils se comportent comme des matériaux ductiles au lieu de fragiles, ce qui peut être repré-

senté par la puissance de dissipation (surface sous le diagramme contrainte-déformation). Cela est illustré à la figure 2 au moyen d'essais de traction par flexion [1]: les bétons sans fibres lâchent relativement rapidement après atteinte de la résistance au fendillement (diagramme 1). Pour les BFM (diagrammes 2–4), l'allure de la courbe dépend fortement du type de fibres et de la teneur en fibres. La charge diminue si la teneur en fibres est trop faible, si la liaison fibres-matrice de mortier est mauvaise, ou si les fibres se rompent (diagramme 2). Si le béton contient suffisamment de fibres de haute résistance à l'arrachement, la charge peut même augmenter après dépassement de l'allongement de rupture (diagramme 4). Les éléments de construction armés de fibres métalliques lâchent géné-

ralement par suite de l'arrachement des fibres. Dans des cas spéciaux (longues fibres solidement ancrées, bétons à haute résistance), les fibres peuvent aussi se rompre [6].

Les fibres métalliques ont pour avantage de bloquer et de ponter les fissures. Avec une teneur volumique de fibres métalliques de $0,38\%$, on a ainsi par exemple réduit de plus de 50% les largeurs des fissures dans des bétons de construction. Le pourcentage de microfissures à la déformation était plus élevé que pour des bétons armés, et le nombre de fissures a en outre augmenté, alors que leur espacement s'est réduit. La perméabilité à l'eau a fortement diminué [9].

Les BFM intacts ne se corrodent en général qu'à la surface (taches brunes), même sous l'action des chlorures ou en cas de carbonatation. Dans les BFM

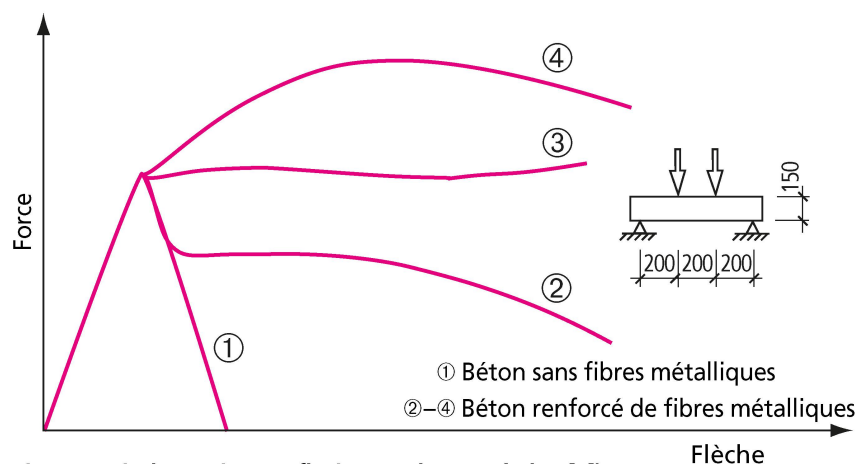


Fig. 2 Essais de traction par flexion sur des BFM (selon [1]).

Éléments de construction	Nature de la charge	Remplacement de l'armature	Propriétés à améliorer				
			Résistance à la traction	Capacité de travail	Résistance à l'usure	Réduction de l'épaisseur de l'élément de constr.	Limitation de la largeur des fissures
Tuyaux en béton	statique	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Murs de bunkers	impulsionnelle	non	non	oui	non	non	oui
Éléments de façades	statique	oui	oui	sous réserve	non	oui	oui
Puits préfabriqués	statique	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Pistes d'aéroports	stat./dyn.	oui	oui	sous réserve	oui	sous réserve	oui
Boxes de garages	statique	sous réserve	sous réserve	sous réserve	oui	oui	oui
Stabilisations de talus	statique	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Sols industriels	statique	oui	oui	sous réserve	oui	oui	oui
Points d'introduction des charges	statique	sous réserve	oui	oui	non	sous réserve	oui
Fondations de machines	stat./dyn.	non	sous réserve	oui	non	non	oui
Pieux battus	dynamique	non	sous réserve	oui	non	non	sous réserve
Caissons de réacteurs	stat./dyn.	non	non	oui	oui	non	oui
Voiles porteurs	statique	sous réserve	oui	sous réserve	sous réserve	oui	oui
Coffrage (perdu)	statique	sous réserve	oui	non	non	oui	oui
Stabilisation par béton projeté – exploitation de mines – construction de tunnels	statique statique	sous réserve sous réserve	oui oui	oui oui	non non	oui oui	sous réserve oui
Poutres en béton armé ou précontraint	statique	non	sous réserve	non	non	sous réserve	oui
Protection contre les avalanches et les chutes de pierres	stat./dyn.	sous réserve	oui	oui	oui	sous réserve	sous réserve
Revêtements routiers	stat./dyn.	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Coffres-forts	dynamique	non	non	oui	non	oui	sous réserve
Segments de cuvelage	statique	sous réserve	oui	sous réserve	sous réserve	oui	oui
Piliers composites	statique	oui	oui	non	non	non	oui
Réservoirs d'eau	statique	sous réserve	oui	oui	non	oui	oui

Tab. 1 Domaines d'utilisation du béton renforcé de fibres métalliques (selon [1]).

fissurés, il suffit en revanche d'une relativement faible concentration de chlorures pour provoquer la corrosion.

Les BFM ne sont pas sujets à des éclatements dus à la corrosion [10].

Les fibres métalliques augmentent la résistance initiale du béton et la cohésion du béton frais [6] (consistance ferme). D'autres effets positifs des fibres, sur les propriétés du béton

durci également, ressortent du *tableau 1*.

Utilisations, classification et désignation des BFM

Les principales utilisations des BFM mis en place en coffrage sont les sols industriels, routes, pistes d'aéroport et éléments en béton préfabriqués (segments de cuvelage, tuyaux, etc.).

Une énumération plus détaillée des domaines d'utilisation des bétons renforcés de fibres métalliques figure dans le *tableau 1*.

Les BPFM ont fait leurs preuves pour

- les mesures de sécurité dans le génie civil
- les mesures de sécurité dans les travaux souterrains

Indications	Exemples	
Sorte de béton (désignation selon norme SIA 162 [12])	Béton renforcé de fibres métalliques BFM 40/30	Béton projeté renforcé de fibres métalliques BPFM 40/30
Sorte de ciment plus teneur en ciment minimale ¹⁾	CEM I ... kg/m ³	CEM I ... kg/m ³
Désignation des fibres métalliques / longueur l_f / diamètre d_f et teneur en fibres C_f (recette prescrite)	type de fibres / $l_f = \dots$ mm/ $d_f = \dots$ mm $C_f = \dots$ kg/m ³	type de fibres / $l_f = \dots$ mm/ $d_f = \dots$ mm $C_f = \dots$ kg/m ³
ou Valeur caractéristique de la résistance à la traction par flexion f_{ctf} (recette initiale)	$f_{ctf} = \dots$ N/mm ²	$f_{ctf} = \dots$ N/mm ²
ou Valeur caractéristique de l'énergie de rupture G_f (recette initiale)	$G_f = \dots$ N/m	$G_f = \dots$ N/m
Diamètre maximum des granulats (d_{max})	$d_{max} = \dots$ mm	$d_{max} = \dots$ mm
Eventuelles propriétés particulières exigées	résistant au gel et aux sels de déverglaçage	résistant au gel

¹⁾ rapporté à 1 m³ de mélange sec composé de granulats, ciment, fibres métalliques et ajouts pour le béton projeté par voie sèche ou à 1 m³ de béton compacté pour les autres sortes de béton

Tab. 2 Désignation des bétons renforcés de fibres métalliques et des bétons projetés renforcés de fibres métalliques [6].

- stabilisation de roches (protection de la tête)
 - stabilisation après creusement (remplacement ou complément de béton projeté avec treillis d'armature)
 - la remise en état de structures porteuses en béton.
- Les fibres métalliques améliorent la résistance à l'usure des bétons soumis au frottement par glissement, et surtout au choc. De sensibles améliorations de la résistance à l'usure due au choc ont été enregistrées avec

une teneur volumique de fibres métalliques de 1,0 % [11].

On distingue entre BFM mis en coffrage et BPFM. Pour le BFM, il peut s'agir de

- béton renforcé de fibres métalliques
- béton armé renforcé de fibres métalliques ou
- béton précontraint renforcé de fibres métalliques [6].

Les indications nécessaires pour la désignation des bétons figurent dans le *tableau 2*, avec des exemples [6].

Matières premières et fabrication

Les exigences relatives aux matières premières sont pour la plupart les mêmes que pour les bétons sans fibres métalliques. Les principales figurent dans le *tableau 3*.

Les prescriptions pour le malaxage correspondent dans une large mesure à celles pour les bétons non armés [12]:

- La répartition et le mélange de tous les composants doivent être homogènes.
- La durée du malaxage doit être d'au moins une minute après l'introduction de l'eau.
- Il ne doit pas être ajouté d'eau après ou peu avant la fin du malaxage.
- Si l'on utilise des additifs, la durée du malaxage doit être augmentée conformément aux indications du fournisseur.
- A observer en outre pour les bétons de fibres [6]:
 - Le temps de malaxage après adjonction de tous les composants doit être d'au moins 2 minutes/ gâchée.
 - L'adjonction de fibres métalliques dans des camions-bétonnières ne peut se faire que dans des cas exceptionnels. Il faut, comme habituellement, malaxer 1 minute par m³ de béton, mais 5 minutes au moins au total.
 - Il faut toutefois éviter de trop

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Maidl, B.**, «Stahlfaserbeton», Ernst & Sohn Verlag, Berlin (1991).
- [2] ACI Committee 544: «State-of-the-art report on fiber reinforced concrete», 66 pages (1996).
- [3] ACI Committee 544: «Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fibre reinforced concrete», 10 pages (1993).
- [4] ACI Committee 544: «Design considerations for steel fibre reinforced concrete», 18 pages (reapproved 1994).
- [5] ACI Committee 506: «State-of-the-art report on fiber reinforced shotcrete», 13 pages (reapproved 1995).
- [6] Recommandation SIA 162/6: «Stahlfaserbeton» (édition 1999).
- [7] **Hermann, K.**, «Le béton de fibres métalliques», Bulletin du ciment **60** [7], 1–8 (1992).
- [8] **Teutsch, M.**, «Anwendung von Faserbeton in Beton- und Fertigteilwerken», Betonwerk + Fertigteil-Technik **63** [10], 84–89 (1997).
- [9] **Winterberg, R.**, «Einfluss von Stahlfasern auf die Durchlässigkeit von Beton», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **483**, 71–135 (1997).
- [10] **Schiessl, P., et al.**, «Korrosion von Stahlfasern in gerissenem und ungerissenem Stahlfaserbeton», Forschungsbericht F 516, Institut für Bauforschung Aachen (1998).
- [11] **Höcker, T.**, «Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleissverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **468**, 73–170 (1996).
- [12] Norme SIA 162: «Ouvrages en béton» (édition 1993).
- [13] Norme SIA 215.002: «Ciment – composition, spécifications et critères de conformité – Partie 1: Ciments courants», édition 1993.

longues durées de malaxage (risque que les fibres forment des agglomérats ou des boules).

- En cas de fibres métalliques en bande, il faut choisir une durée de malaxage permettant aux fibres de se séparer.

Après l'adjonction de fibres métalliques et de superfluidifiants (HBV), l'étalement ne devrait pas excéder 550 mm. Dans les bétons aérés, l'adjonction de fibres métalliques peut exercer une influence sur la structure des pores.

Mise en œuvre et traitement de cure

La mise en œuvre des BFM est dans une large mesure pareille à celle du béton selon norme SIA 162 [12]. Il faut prendre en considération la consistance plus ferme des BFM. Pour le compactage, les vibrateurs externes (vibrateurs de coffrage) sont recommandés [8].

Pour les BPFM non plus, les différences ne sont pas grandes par rapport aux bétons sans fibres. Il faut tenir compte de ce que la teneur en fibres

dans le béton durci peut diminuer de 20 à 50 %. Particulièrement avec la projection par voie sèche et en cas de couches de faible épaisseur, il faut s'attendre à des pertes en fibres élevées. Il faut également tenir compte de ce que par suite de la projection, les fibres s'orientent en partie parallèlement à la surface à recouvrir.

Le traitement de cure des BFM peut se faire conformément à la norme SIA 162 [12]. Des mesures spéciales, par exemple procédés d'apport d'eau, peuvent être nécessaires pour les couches minces de béton projeté renforcé de fibres métalliques [6].

Ce que contiennent encore les normes

On trouve dans d'autres chapitres de la recommandation SIA 162/6 [6]:

- Calcul et dimensionnement (sécurité structurale, aptitude au service)
- Essais et contrôles
- Prestations et mode de métré (entre autres contrôles d'aptitude et de qualité)
- Essais de charge (essais pour déterminer les valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion et de l'énergie de rupture effectives).

	Exigences
Ciments	Ciments Portland (CEM I) selon norme SIA 215.002 [13] Si, à des fins spéciales, d'autres liants sont prévus, leur convenance doit être prouvée au moyen d'essais préliminaires systématiques.
Granulats	La norme SIA 162 [12] est applicable. <i>Forme des grains:</i> formes de préférence ramassées et arrondies (particulièrement pour les fractions de $\leq 2,0$ mm). <i>Diamètre maximum</i> – habituellement jusqu'à 16 mm (BFM) – pour BPFM, on conseille 8 mm – les facteurs de forme et/ou des teneurs en fibres élevées peuvent exiger une limitation à 4 mm. <i>Teneurs en granulats fins</i> – diamètre $< 0,125$ mm: ≥ 350 kg/m ³ [12] – diamètre $< 0,25$ mm: ≥ 380 kg/m ³ (en cas de teneurs en fibres élevées) [5] – diamètre ≤ 3 mm: 560–630 kg/m ³ [8]
Eau de gâchage	Le chiffre 5 14 3 de la norme SIA 162 [12] est applicable.
Adjuvants et ajouts	Le chiffre 5 14 4 de la norme SIA 162 [12] est applicable. Les fibres métalliques ne sont pas considérées comme des ajouts.
Fibres métalliques	Produits normalement caractérisés par leur désignation. <i>Indications à donner par le fabricant:</i> – mode de fabrication – forme de livraison (en vrac, collées) – géométrie des fibres (diamètre ou diamètre df équivalent, longueur l_f , forme, propriétés spéciales et tolérances) – résistance à la traction <i>Surface</i> exempte de rouille et de substances qui nuisent à l'adhérence entre fibres et béton durci.

Tab. 3 Exigences relatives aux matières premières pour les bétons renforcés de fibres métalliques et les bétons projetés renforcés de fibres métalliques [6].