sia

SIA 2052:2016 Construction

Schweizer Regel
Règle Suisse
Regola Svizzera

592052

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung

Calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni (CFAP) –
Materiali, dimensionamento ed esecuzione

Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) –
Materials, design and execution

Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution

2052

Merci de prendre connaissance du correctif dans l' annexe.

Numéro de référence
SNR 592052:2016 fr

Valable dès: 2016-03-01

Éditeur
Societé suisse des ingénieurs
et des architectes
Case postale, CH-8027 Zurich

Nombre de pages: 48

Copyright © 2016 by SIA Zurich

Groupe de prix: 30

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Cahiers techniques SIA

Les cahiers techniques sont publiés par la SIA en tant que règlements complémentaires et commentaires dans des domaines spécifiques.

Les cahiers techniques font partie intégrante des normes SIA.

Les cahiers techniques sont valables trois ans à partir de leur parution. Leur validité est renouvelable par période de trois ans.

Les corrections et commentaires éventuels concernant la présente publication sont disponibles sous www.sia.ch/correctif.

La SIA décline toute responsabilité en cas de dommages qui pourraient survenir du fait de l'utilisation ou de l'application de la présente publication.

2016-03 1er tirage

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

TABLE DES MATIÈRES

Page

Avant-propos 4

0 Domaine d'application 5
0.1 Délimitation 5
0.2 Références normatives 5
0.3 Dérogations 6

1 Terminologie 7
1.1 Termes techniques 7
1.2 Notations 8

2 Principes 11
2.1 Généralités 11
2.2 Construction en BFUP 12
2.3 Construction mixte BFUP–béton 12
2.4 Analyse structurale et dimensionnement 12
2.5 Durabilité 13
2.6 Assurance de la qualité 13

3 Matériaux 14
3.1 Composition du BFUP 14
3.2 Propriétés du BFUP 14
3.3 Propriétés du BFUP armé 18

4 Analyse structurale et dimensionnement 19
4.1 Principes 19
4.2 Éléments de structure en BFUP 19
4.3 Éléments mixtes BFUP–béton 22

5 Dispositions constructives 26
5.1 Principes 26
5.2 Disposition de l'armature 26
5.3 Éléments préfabriqués en BFUP et assemblages d'éléments 26
5.4 Éléments mixtes BFUP–béton 27

6 Exécution 28
6.1 Fabrication du BFUP 28
6.2 Mise en place et cure du BFUP 28
6.3 Essais 29
6.4 Propriétés de surface du BFUP 30
6.5 Sécurité du travail 30

Annexe
A **Propriétés des BFUP** (informative) 31
B **Assurance de la qualité** (normative) . . . 32
C **Essais sur BFUP** (normative) 34
D **Essai de comportement à la traction** (normative) 36
E **Essai de traction par flexion** (normative) 40
F **Publications** (informative) 46
G **Index des termes techniques** (informative) 47

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

AVANT-PROPOS

Le présent cahier technique a pour but de régler l'emploi du béton fibré ultra-performant (BFUP) dans le projet, le dimensionnement et l'exécution des structures porteuses. Il est essentiellement basé sur deux concepts fondamentaux:

- La construction de structures porteuses constituées d'éléments en BFUP ou en BFUP armé, généralement préfabriqués.
- La remise en état et/ou le renforcement de structures porteuses existantes en béton armé en complétant le béton armé par du BFUP. Il en résulte des éléments mixtes. Ce concept est également applicable à la construction de nouvelles structures porteuses.

Ce document est fondé sur les normes de structures de la SIA et s'adresse aux projeteurs, aux maîtres d'ouvrage et aux entrepreneurs.

Le BFUP est un matériau composite lié par du ciment et notablement renforcé par l'incorporation de fibres courtes. Ce n'est pas un béton au sens défini dans la norme SN EN 206. Certains chapitres renvoient toutefois à cette norme (par exemple les essais). En règle générale, le granulat est inférieur à 1 mm et la compacité des constituants est très élevée et optimisée. Lors du durcissement, l'eau de gâchage est utilisée en totalité, empêchant ainsi la formation de réseaux capillaires. En conséquence, la pénétration d'eau extérieure dans le BFUP est négligeable.

Comparé au béton renforcé de fibres, le BFUP se caractérise par la faible taille du granulat, une teneur en fibres particulièrement élevée, une haute compacité et des propriétés mécaniques élevées.

Ce cahier technique ne traite pas du comportement des structures porteuses en BFUP soumises à une action sismique, ou au poinçonnement dans le cas des dalles, car les connaissances relatives à ces domaines ne sont pas encore suffisamment confirmées.

Groupe de travail BFUP de la Commission SIA 262

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

0 DOMAINE D'APPLICATION

0.1 Délimitation

0.1.1 L'ensemble des règles contenues dans le présent cahier technique s'applique au dimensionnement et à l'exécution des structures porteuses lors de l'utilisation de béton fibré ultra-performant (BFUP). Il porte essentiellement sur deux concepts:
- Structures porteuses et éléments en BFUP, BFUP armé et BFUP précontraint
- Construction mixte BFUP–béton pour de nouvelles constructions ou pour la remise en état et le renforcement de structures existantes.

0.2 Références normatives

Le texte de ce cahier technique fait référence aux publications suivantes, dont les dispositions s'appliquent intégralement ou en partie dans le sens du renvoi. Les références non datées se rapportent à la dernière édition de la publication, les références datées se rapportent à l'édition correspondante.

0.2.1 Publications de la SIA

Recommandation SIA 179	Les fixations dans le béton et dans la maçonnerie
Norme SIA 260	Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses
Norme SIA 261	Actions sur les structures porteuses
Norme SIA 262	Construction en béton
Norme SIA 263	Construction en acier
Norme SIA 269	Bases pour la maintenance des structures porteuses
Norme SIA 269/1	Maintenance des structures porteuses – Actions
Norme SIA 269/2	Maintenance des structures porteuses – Structures en béton
Recommandation SIA 414/10	Tolérances dimensionnelles dans le bâtiment

0.2.2 Normes européennes

SN EN 206	Béton – Spécification, performances, production et conformité
SN EN 413-2	Ciment à maçonner – Partie 2: Méthodes d'essai
SN EN 1542	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Méthodes d'essais – Mesurage de l'adhérence par traction directe
SN EN 1925	Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité
SN EN 12350-6	Essai pour béton frais – Partie 6: Masse volumique
SN EN 12350-7	Essai pour béton frais – Partie 7: Teneur en air – Méthode de la compressibilité
SN EN 12350-8	Essai pour béton frais – Partie 8: Béton auto-plaçant – Essai d'étalement au cône d'Abrams
SN EN 12390-2	Essais pour béton durci – Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance
SN EN 12390-3	Essais pour béton durci – Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes
SN EN 12390-4	Essais pour béton durci – Partie 4: Résistance en compression – Caractéristiques des machines d'essai
SN EN 12390-13	Essais pour béton durci – Partie 13: Détermination du module sécant d'élasticité en compression
SN EN 13057	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Méthodes d'essais – Détermination de l'absorption capillaire

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

SN EN 13892-3	Méthodes d'essai des matériaux pour chapes – Partie 3: Détermination de la résistance à l'usure Böhme

0.3 Dérogations

0.3.1 Des dérogations au présent cahier technique sont admises, lorsqu'elles sont suffisamment fondées par la théorie ou par des essais, ainsi que lorsqu'elles sont justifiées par de nouveaux développements ou connaissances.

0.3.2 Pour les situations non traitées dans le présent document, la procédure choisie sera documentée dans la convention d'utilisation et dans la base du projet.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

1 TERMINOLOGIE

1.1 Termes techniques

Le présent cahier technique utilise les termes techniques et spécifiques définis ci-dessous. Ces termes sont répertoriés par ordre alphabétique dans l'annexe F. Les termes techniques généraux utilisés sont définis dans les normes SIA 260 à 262 et SIA 269, SIA 269/1 et SIA 269/2.

1.1.1 **Béton fibré ultra-performant** *Ultra-Hochleistungs-Faserbeton; Calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni; Ultra-high performance fibre reinforced concrete*
Matériau composite produit à partir de ciment, d'additions, de granulats fins, d'eau, d'adjuvants et de fibres courtes. Sa haute compacité le rend imperméable aux liquides. En règle générale, la valeur caractéristique de sa résistance à la compression sur cube à 28 jours est supérieure à 120 N/mm^2.

1.1.2 **Prémix** *Premix; Premix; Premix*
Mélange sec constitué de ciment, de granulats fins et, le cas échéant, d'adjuvants, le tout selon des dosages déterminés.

1.1.3 **BFUP armé** *Bewehrter UHFB; CFAP armato; Reinforced UHPFRC*
BFUP dont l'armature est constituée d'acier d'armature passive.

1.1.4 **BFUP précontraint** *Vorgespannter UHFB; CFAP precompresso; Prestressed UHPFRC*
BFUP dont l'armature est partiellement constituée d'acier de précontrainte.

1.1.5 **Système mixte** *Verbundsystem; Sistema composito; Composite system*
Résultat d'un procédé par lequel deux ou plusieurs matériaux de construction sont liés entre eux de façon monolithique.

1.1.6 **Résistance à la traction** *Zugfestigkeit; Resistenza alla trazione; Tensile strength*
Contrainte obtenue en traction uniaxiale, et résultant de la force de traction maximale atteinte rapportée à la section initiale de l'éprouvette.

1.1.7 **Résistance limite élastique à la traction** *Elastische Grenzzugfestigkeit; Limite della resistenza elastica alla trazione; Elastic limit tensile strength*
Valeur de la contrainte lorsque la limite élastique du BFUP est atteinte sous une sollicitation de traction uniaxiale.

1.1.8 **Degré d'entrave** *Einspanngrad; Grado di incastro; Degree of restraint*
Rapport entre les contraintes de traction effectives apparaissant dans le BFUP d'un système structural mixte sous l'action de déformations empêchées du fait de sa liaison avec le support, et les contraintes de traction qui apparaîtraient dans le BFUP d'un système totalement entravé sous l'action des mêmes déformations spécifiques.

1.1.9 **Comportement adoucissant** *Entfestigung; Riduzione della resistenza; Strain softening*
Propriété mécanique d'un matériau caractérisée par une diminution graduelle des contraintes de traction après dépassement de la résistance à la traction.

1.1.10 **Maturité** *Reife; Maturità; Maturity*
Âge équivalent lié à une propriété mécanique donnée, calculé sur la base de l'évolution de la température pendant le durcissement de l'élément considéré.

1.1.11 **Comportement écrouissant** *Verfestigung; Incrudimento; Strain hardening*
Propriété mécanique d'un matériau caractérisée par une augmentation des contraintes de traction lorsque la déformation s'accroît après dépassement de la résistance limite élastique à la traction.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

1.2 Notations

1.2.1 Majuscules latines

A_c	aire de la section du béton
A_{sc}	aire de la section d'acier d'armature passive (de flexion) dans le béton d'un élément mixte
A_{sU}	aire de la section d'acier d'armature passive (de flexion) dans le BFUP d'un élément mixte
A_{sw}	aire de la section d'armature d'effort tranchant
A_U	aire de la section ou de la couche en BFUP
$A_{0,4}$	aire sous la courbe force–déplacement de l'essai de traction jusqu'à un déplacement de 0,4 mm
E_c	module d'élasticité du béton
E_i	module sécant (valeur particulière) selon D.8 et E.8
E_m	moyenne mobile des 10 valeurs antérieures du module sécant selon D.8 et E.8
E_U	module d'élasticité du BFUP
E_{Ud}	valeur de dimensionnement du module d'élasticité du BFUP
E_{Um}	valeur moyenne du module d'élasticité du BFUP
E_{Ut}	module d'élasticité du BFUP sollicité en traction
F_A	valeur de la force mesurée à la fin du comportement élastique de l'éprouvette
F_B	valeur maximale de la force mesurée au cours de l'essai de l'éprouvette
F_{ccd}	valeur de dimensionnement de la force résultante de compression agissant sur le béton
F_i	valeur de force (valeur particulière) selon D.8 et E.8
F_{scd}	valeur de dimensionnement de la force de traction de l'armature passive dans le béton
F_{sUd}	valeur de dimensionnement de la force de traction de l'armature passive dans le BFUP
F_{tVd}	valeur de dimensionnement de la force longitudinale due à l'effort tranchant
F_{Ucd}	valeur de dimensionnement de la force résultante de compression agissant sur le BFUP
F_{Utd}	valeur de dimensionnement de la force résultante de traction agissant sur le BFUP
G_{FU}	énergie spécifique de rupture du BFUP
M	moment de flexion
M_{Rd}	valeur de dimensionnement de la résistance à la flexion de l'élément mixte BFUP–béton
$M_{R,D}$	limite de fatigue à la flexion d'un élément en BFUP armé ou d'un élément mixte BFUP–béton
$M_{Rd,RU}$	valeur de dimensionnement de la résistance à la flexion dans le domaine plastique du BFUP armé
N	effort normal
R_d	valeur de dimensionnement de la résistance ultime
T	température
V_d	valeur de dimensionnement de l'effort tranchant
V_{Rd}	valeur de dimensionnement de la résistance ultime à l'effort tranchant
$V_{Rd,c}$	valeur de dimensionnement de la résistance ultime du béton
$V_{Rd,s}$	valeur de dimensionnement de la résistance ultime de l'armature d'effort tranchant verticale
$V_{Rd,U}$	valeur de dimensionnement de la résistance ultime à l'effort tranchant du BFUP armé

1.2.2 Minuscules latines

a_0	distance entre la section déterminante et l'appui
a, b	coefficients pour le calcul du coefficient de fluage du BFUP en fonction du temps
a_d	valeur de dimensionnement de la dimension d'un élément de construction
b_m	moyenne des largeurs mesurées de l'éprouvette
b_w	épaisseur de l'âme
c, d	coefficients pour le calcul de la déformation due au retrait du BFUP
c_{nom}	enrobage nominal de l'armature, à déclarer dans les plans
d_{eq}	hauteur statique équivalente d'un élément mixte en BFUP–béton
d_s	hauteur statique

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

d_{sc}	hauteur statique de l'armature dans la zone de traction en béton armé d'un élément mixte
d_{scc}	hauteur statique de l'armature dans la zone comprimée en béton armé d'un élément mixte
d_{sU}	hauteur statique de l'armature passive dans la partie en BFUP d'un élément mixte
d_U	hauteur statique de la partie en BFUP d'un élément mixte
f_{cd}	valeur de dimensionnement de la résistance à la compression du béton
f_{pd}	valeur de dimensionnement de la limite d'écoulement de l'acier de précontrainte
f_{sd}	valeur de dimensionnement de la limite d'écoulement de l'acier d'armature passive
f_{sUd}	valeur de dimensionnement de la limite d'écoulement de l'acier d'armature passive dans le BFUP
f_{Uc}	résistance à la compression du BFUP
f_{Ucd}	valeur de dimensionnement de la résistance à la compression du BFUP
f_{Uck}	valeur caractéristique de la résistance à la compression sur cube du BFUP (fractile 5%)
f_{Ucm}	valeur moyenne de la résistance à la compression sur cube du BFUP
$f_{Ucm,28}$	valeur moyenne de la résistance à la compression sur cube du BFUP à 28 jours
f_{Ud}	valeur de dimensionnement de la résistance du BFUP
f_{Ute}	résistance limite élastique à la traction du BFUP
f_{Uted}	valeur de dimensionnement de la résistance limite élastique à la traction du BFUP
f_{Utek}	valeur caractéristique de la résistance limite élastique à la traction du BFUP
f_{Utu}	résistance à la traction du BFUP
f_{Utud}	valeur de dimensionnement de la résistance à la traction du BFUP
f_{Utuk}	valeur caractéristique de la résistance à la traction du BFUP
h	hauteur de poutre
h_U	épaisseur de la couche de BFUP, épaisseur de l'élément en BFUP
h_c	hauteur de la section en béton armé ou épaisseur du support en béton armé d'un élément de construction mixte
h_m	moyenne des épaisseurs mesurées de l'éprouvette
k_T	coefficient permettant de tenir compte de la température
l_m	portée entre appuis de l'éprouvette pour l'essai de traction par flexion
l_{mes}	base de mesure du capteur de déformation
l_U	longueur de référence servant à calculer la déformation à partir de l'ouverture des fissures
l_z	longueur participante de la couche de BFUP dans un élément de construction mixte
s	espacement des barres
t	temps en jours, durée, âge
t_0	âge en jours du BFUP au début de la sollicitation
t_∞	durée admise comme infinie
w_{Ut}	ouverture de fissure d'adoucissement dans le BFUP
w_{Uti}	valeur de déformation (valeur particulière) couplée à la valeur de force selon D.8 et E.8
$w_{Ut,max}$	ouverture maximale de fissure d'adoucissement dans le BFUP
w_{Uel}	flèche élastique d'éléments de structure en BFUP armé à l'état de service
$w_{U\varphi}$	flèche d'éléments de structure en BFUP armé tenant compte du fluage du BFUP
x	hauteur de la zone de compression (en flexion)
z	bras de levier des forces internes

1.2.3 Minuscules grecques

α	inclinaison du champ de contrainte
α_c	angle d'inclinaison de la fissure critique de cisaillement dans le béton d'un élément de construction mixte
α_i	rapport entre la hauteur de la zone plastifiée et la hauteur totale de l'éprouvette soumise à la flexion selon l'annexe E
α_{min}	inclinaison minimale du champ de contrainte
α_U	coefficient de dilatation thermique du BFUP

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

β	inclinaison de l'armature d'effort tranchant ou de l'armature longitudinale relevée
γ_{U1}	coefficient de résistance pour le BFUP
γ_{U2}	coefficient de résistance pour le BFUP armé
δ	flèche de l'éprouvette soumise à la traction par flexion selon annexe E
δ_i	valeur particulière de la flèche de l'éprouvette soumise à la traction par flexion selon annexe E
ε_c	déformation du béton soumis à la compression
ε_s	déformation de l'armature
ε_{sc}	déformation de l'armature dans le béton d'un élément de construction mixte
ε_{sU}	déformation de l'armature dans le BFUP d'un élément de construction mixte
ε_U	déformation du BFUP
ε_{Uc}	déformation de compression du BFUP
ε_{Ucc}	déformation de fluage du BFUP
ε_{Uel}	déformation élastique du BFUP
ε_{Us}	retrait du BFUP
$\varepsilon_{Us\infty}$	valeur finale du retrait du BFUP
ε_{Ut}	déformation de traction du BFUP
ε_{Utu}	déformation du BFUP lorsque la résistance à la traction est atteinte (écrouissage)
$\varepsilon_{Ut,soft}$	déformation d'adoucissement du BFUP
λ_i	paramètre servant au calcul du coefficient α_i dans l'analyse simplifiée selon l'annexe E
η_K	coefficient lié à l'orientation des fibres du BFUP, dépendant de l'élément de construction et du processus de fabrication (répartition irrégulière des fibres)
η_{fU1}	coefficient pour la prise en compte de la capacité de déformation en compression du BFUP
η_{fU2}	coefficient pour la prise en compte du comportement en compression des éléments comprimés
η_{hU}	coefficient pour la prise en compte de l'influence de l'épaisseur de la couche de BFUP ou de l'épaisseur de l'élément ainsi que du processus de fabrication sur l'orientation des fibres
η_t	coefficient pour la prise en compte de la durée d'application des actions sur les résistances du BFUP
μ_U	degré d'entrave de la couche de BFUP dans le système mixte
ν_U	coefficient de Poisson du BFUP
ρ_U	masse volumique du BFUP
σ_{sc}	contrainte de traction dans l'armature passive du béton d'un élément mixte BFUP–béton
σ_{sU}	contrainte de traction dans l'armature passive du BFUP d'un élément mixte BFUP–béton
σ_{Uc}	contrainte de compression dans le BFUP
$\sigma_{U,D}$	limite de fatigue du BFUP
σ_{Ue}	contrainte effective de traction dans le BFUP tenant compte de la rigidité du système mixte
$\sigma_{Ue,max}$	contrainte effective de traction dans le BFUP en admettant une entrave totale
$\sigma_{Ufat,max}$	contrainte de traction maximale dans le BFUP due aux actions permanentes et à l'action de la fatigue
σ_{Ut}	contrainte de traction dans le BFUP
σ_{Utd}	valeur de dimensionnement de la contrainte de traction dans le BFUP
σ_{Uti}	contrainte de traction (valeur particulière) dans la fibre la plus basse de la section d'éprouvette selon annexe E
τ_{bU}	résistance par adhérence entre l'acier d'armature passive et le BFUP
$\varphi_U(t,t_0)$	coefficient de fluage du BFUP
$\varphi_{U\infty}(t_\infty,t_0)$	coefficient de fluage final du BFUP
χ_i	courbure élastique dans la zone de moment constant d'une éprouvette soumise à la flexion selon l'annexe E
ω_m	taux mécanique total d'armature dans l'élément mixte BFUP–béton

1.2.4 Notations particulières

$\varnothing_s$	diamètre d'une barre d'armature passive

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

2 PRINCIPES

2.1 Généralités

2.1.1 Le choix des matériaux de construction, et du BFUP en particulier, doit être adapté aux exigences de la conception du projet et aux possibilités de fabrication. Les propriétés requises seront consignées dans la base du projet. Les propriétés du béton, de l'acier d'armature passive et de l'acier de précontrainte sont spécifiées dans les normes SIA 262 et SIA 269/2.

2.1.2 Le BFUP qui assure une fonction principale porteuse, est généralement fabriqué à l'aide de fibres d'acier et doit être pourvu d'une armature dans le sens porteur.

2.1.3 En règle générale, le BFUP est mis en œuvre dans des parties d'ouvrages soumises à des actions sévères dues à l'environnement ou à de fortes sollicitations mécaniques, par exemple:
- des actions sévères dues à l'environnement s'exercent sur les éléments de construction des classes d'exposition XD2b, XD3 et XF4 ainsi que dans le cas d'attaque chimique;
- de fortes sollicitations mécaniques se produisent: (1) dans des zones fortement sollicitées suite à des situations de dimensionnement ou d'examen durables ou transitoires, (2) lors d'actions accidentelles (choc, explosion, séisme) ou (3) dans des zones soumises à l'abrasion;
- de fortes sollicitations locales se produisent au droit de concentrations d'efforts et dans les zones d'introduction ou de déviation des forces. Ces dernières conduisent généralement à de hautes exigences en matière de ductilité.

2.1.4 Les structures porteuses et les éléments préfabriqués en BFUP sont conçus dans le but de minimiser les dimensions des sections et le poids propre. Il s'agit essentiellement de structures hautement sollicitées pour des toitures à grande portée, des dalles de bâtiments, des ponts ou d'autres ouvrages d'art, et également des éléments de façade en BFUP dans lesquels les fibres synthétiques sont fréquemment utilisées.

2.1.5 Lors de la remise en état et du renforcement de structures en béton et de leurs éléments constitutifs, les applications les plus courantes sont les suivantes:
- étanchement (revêtement de protection sur des tabliers de ponts, bordures, parapets, piliers, murs ou toitures)
- augmentation de la résistance ou de la rigidité de tabliers de ponts ou de dalles de bâtiments
- éléments d'équipement préfabriqués (bordures, parapets, dispositifs pour les joints de dilatation)
- blocs d'ancrage pour la liaison de nouveaux éléments de construction à des éléments existants.

2.1.6 Le BFUP peut aussi être utilisé en combinaison avec le béton armé, l'acier ou le bois. Les règles des modes de construction mixte correspondants s'appliquent par analogie.

2.1.7 Au-delà des conditions cadres du projet mentionnées dans la norme SIA 260, il faut veiller aux points suivants et, le cas échéant, les traiter de manière spécifique au projet:
- exigences relatives à l'aspect des surfaces et des arêtes de BFUP, par exemple à l'aide de prescriptions sur le type de fibres à utiliser (fibres synthétiques)
- exigences à l'égard de la résistance au feu
- joints de reprise, en ce qui concerne l'étanchéité aux liquides
- cadence d'exécution et étapes de coulée (sens de coulage) lors de la mise en place du BFUP frais
- données pour l'incorporation d'installations du bâtiment dans les éléments de construction en BFUP.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

2.2 Construction en BFUP

2.2.1 En règle générale, les structures porteuses en BFUP sont constituées d'éléments préfabriqués. Elles peuvent également être coulées sur le chantier dans des coffrages.

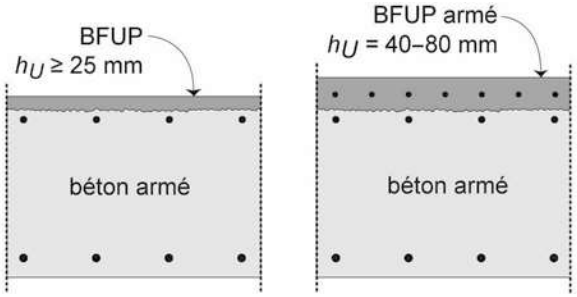
2.2.2 Lorsqu'un élément de construction est comprimé, par exemple sous l'effet de la précontrainte, le BFUP utilisé ne nécessite pas de comportement écrouissant. Toutefois, le comportement écrouissant est généralement requis pour résister aux sollicitations perpendiculaires à la direction porteuse principale, dues par exemple à l'effort tranchant, à la flexion transversale dans les ailes et les âmes ou à l'introduction de forces concentrées.

2.2.3 Les structures porteuses et les éléments de construction soumis à de fortes sollicitations mécaniques sont généralement constitués de BFUP armé ou précontraint.

2.3 Construction mixte BFUP–béton

2.3.1 Les éléments mixtes BFUP–béton sont constitués d'un élément en béton armé et d'une couche adhérente en BFUP ou BFUP armé, selon la figure 1.

Figure 1 Configurations de base du mode de construction mixte BFUP–béton



La réalisation d'un élément mixte BFUP–béton conduit à un état d'autocontraintes dans l'élément avec, en général, des autocontraintes de traction dans le BFUP.

2.3.2 Les éléments mixtes BFUP–béton ont à l'état de service un comportement monolithique, donc sans décollements à l'interface BFUP–béton, qui subsiste jusqu'à ce que la résistance ultime soit atteinte. La résistance ultime sera calculée pour une section monolithique.

2.3.3 Afin d'éviter la concentration des déformations sur une seule fissure à l'état de service, on utilisera un BFUP écrouissant (sortes UA et UB) pour la fabrication des éléments de construction mixtes BFUP–béton.

2.3.4 Lorsque le BFUP présente un comportement écrouissant (sorte UA ou UB), l'imperméabilité aux liquides de la couche de BFUP subsiste à l'état de service, malgré les autocontraintes de traction.

2.3.5 L'emploi de BFUP armé accroît la résistance ultime et la rigidité des éléments de construction mixtes BFUP–béton.

2.4 Analyse structurale et dimensionnement

2.4.1 Généralités

2.4.1.1 L'analyse structurale et le dimensionnement des structures porteuses en BFUP armé et des éléments de construction en BFUP doivent être effectués selon la norme SIA 260.

2.4.1.2 L'analyse structurale et le dimensionnement des éléments de construction mixtes BFUP–béton doivent être effectués selon la norme SIA 269 pour les structures existantes et selon la norme SIA 260 pour les nouvelles structures.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

2.4.2 **États-limites ultimes**

2.4.2.1 La valeur de dimensionnement de la résistance ultime est fonction de:

$$R_d = R\{f_{Ud}, f_{sd}, f_{pd}, a_d\} \quad (1)$$

2.4.2.2 La valeur de dimensionnement de la résistance ultime peut aussi être déduite d'essais, dans la mesure où ceux-ci sont représentatifs et interprétés à l'aide de modèles théoriques. Cette manière de procéder doit toutefois permettre d'atteindre la même fiabilité que l'utilisation du présent document.

2.4.2.3 La valeur de dimensionnement de la résistance du BFUP à la traction est donnée par:

$$f_{Utud} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utuk}}{\gamma_U} \text{ et } f_{Uted} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (2) \text{ et } (3)$$

où les coefficients η_t, η_{hU} et η_k sont déterminés selon 4.2.

2.4.2.4 La valeur de dimensionnement de la résistance du BFUP à la compression est donnée par:

$$f_{Ucd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{fU1} \cdot \eta_{fU2} \cdot f_{Uck}}{\gamma_U} \quad (4)$$

où les coefficients η_t, η_{fU1} et η_{fU2} sont déterminés selon 4.2.

2.4.2.5 Pour la vérification de la sécurité structurale, on utilisera le coefficient de résistance $\gamma_U = 1{,}50$.

2.4.2.6 On admettra comme valeur de dimensionnement du module d'élasticité du BFUP sollicité en traction et en compression:

$$E_{Ud} = E_{Um} \quad (5)$$

2.4.2.7 La valeur de dimensionnement et la valeur d'examen du béton, de l'acier d'armature passive et de l'acier de précontrainte sont données respectivement dans la norme SIA 262 et la norme SIA 269/2.

2.4.3 **États-limites de service**

Des limites à l'état de service, comme les valeurs admissibles pour les flèches ou les vibrations, doivent être mentionnées dans la base du projet.

2.5 Durabilité

En règle générale, aucune mesure particulière destinée à garantir la durabilité n'est requise pour les éléments de construction et les surfaces en BFUP ou en BFUP armé soumis aux classes d'exposition XC, XD, XA et XF selon la norme SIA 262, chiffre 2.4.2.

2.6 Assurance de la qualité

2.6.1 L'assurance de la qualité garantit que les produits et les systèmes utilisés sont conformes au présent document ainsi qu'aux exigences particulières requises par la construction. L'assurance de la qualité consiste en essais initiaux, essais de convenance et essais de contrôle de qualité selon l'annexe B. Les essais ainsi que leurs critères d'acceptation et les conséquences du non-respect des exigences doivent être mentionnés dans la base du projet et les documents de soumission.

2.6.2 L'aptitude à l'usage prévu d'un BFUP sera vérifiée par des essais initiaux.

2.6.3 L'adéquation d'un BFUP et de ses constituants à une application donnée sera vérifiée par des essais de convenance qui, en règle générale, consisteront en essais représentatifs du point de vue des dimensions, du mode de coulage et de la cure. Pendant l'exécution des travaux, le respect des exigences sera contrôlé par des essais de qualité.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

3 MATÉRIAUX

3.1 Composition du BFUP

3.1.1 Le BFUP est constitué d'une matrice à durcissement hydraulique renforcée par des fibres:
- La matrice est constituée de ciment, d'additions, de granulats fins, d'eau et d'adjuvants.
- Les fibres sont définies par leur forme, leur matériau, leurs dimensions (longueur, diamètre) et leur dosage dans le BFUP. Le dosage en fibres nécessaire pour obtenir les propriétés mécaniques exigées pour le BFUP dépend de leur élancement, de leur forme, de leur matériau constitutif et de leur adhérence avec la matrice.

3.1.2 Le type, la quantité et la composition des constituants sont spécifiques à chaque sorte de BFUP. Le BFUP est proposé sur le marché sous forme de prémix ou préparé selon une recette détaillée. Il est produit dans une centrale à béton ou sur le chantier. Le BFUP peut être confectionné avec toutes les sortes de ciments admis dans la norme SN EN 206.

3.2 Propriétés du BFUP

3.2.1 Généralités

3.2.1.1 Le BFUP est caractérisé par les propriétés suivantes:
- comportement à la traction défini par la résistance à la traction f_{Utu}, la résistance limite élastique à la traction f_{Ute}, la déformation lorsque la résistance à la traction ε_{Utu} est atteinte et le comportement adoucissant (énergie spécifique de rupture G_{FU}, ouverture maximale de fissure d'adoucissement $w_{Ut,max}$)
- résistance à la compression f_{Uc}
- module d'élasticité E_U
- coefficient de Poisson ν_U
- coefficient de dilatation thermique α_U
- retrait ε_{Us}; coefficient de fluage $\varphi_U(t,t_0)$.

Des valeurs indicatives des propriétés du BFUP sont données dans le tableau 4 de l'annexe A.

3.2.1.2 Les sortes de BFUP selon le tableau 1 sont spécifiées en fonction de leur comportement à la traction et à la traction par flexion déterminé selon les annexes D et E sur la base des essais initiaux et de qualité (éprouvettes moulées individuellement). Les valeurs minimales obtenues entre les résultats de traction et traction par flexion (analyse inverse) seront utilisées comme base. L'attribution des sortes de BFUP s'effectue selon les données du tableau 1.

Tableau 1 Sortes de BFUP

Sorte		U0	UA	UB
f_{Utek}	N/mm²	≥ 7,0	≥ 7,0	≥ 10,0
f_{Utuk} / f_{Utek}		> 0,7	> 1,1	> 1,2
ε_{Utu}	‰		> 1,5	> 2,0
f_{Uck}	N/mm²	≥ 120	≥ 120	≥ 120

3.2.1.3 Des exigences complémentaires applicables aux sortes de BFUP concernent généralement les propriétés suivantes:
- résistance à la compression selon le chiffre C.1
- module d'élasticité selon la norme SN EN 12390-13
- résistance à l'abrasion selon la norme SN EN 13892-3
- aptitude à la mise en place en pente du BFUP frais selon C.5.

3.2.1.4 Des essais de convenance permettront de spécifier les valeurs requises pour l'essai d'étalement en vue d'obtenir une ouvrabilité suffisante du BFUP utilisé.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

3.2.1.5 Les valeurs des relations entre les diverses propriétés du BFUP mentionnées aux chiffres 3.2.2 et 3.2.3 sont indicatives et s'appliquent aux sortes de BFUP mentionnées dans le tableau 1.

3.2.2 Propriétés mécaniques

3.2.2.1 Le comportement à la traction du BFUP est caractérisé par les lois de matériau de la figure 2:
a) loi contrainte–déformation bilinéaire, décrivant le comportement élastique et l'écrouissage du BFUP comme un milieu continu;
b) loi contrainte–ouverture de fissure décrivant le comportement adoucissant. L'ouverture de fissure sera convertie en déformation selon la relation suivante:

$$\varepsilon_{Ut,soft} = \frac{w_{Ut}}{l_U} \tag{6}$$

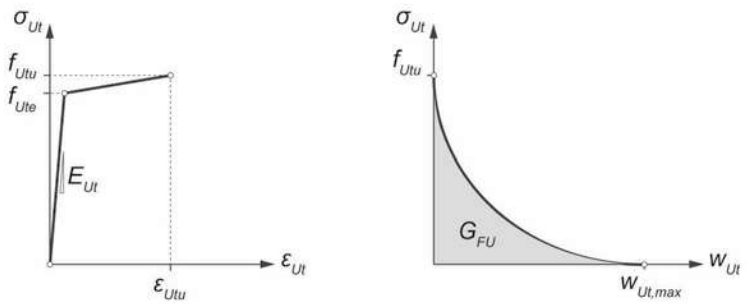
Pour la longueur de référence d'un élément fléchi en BFUP, on pourra admettre:

$$l_U = \frac{2}{3} h_U$$

L'ouverture de fissure maximale $w_{Ut,max}$ correspond à la moitié de la longueur maximale des fibres.

Figure 2 Lois de matériau idéalisées pour le BFUP des sortes UA et UB sollicité en traction

a) comportement écrouissant b) comportement adoucissant



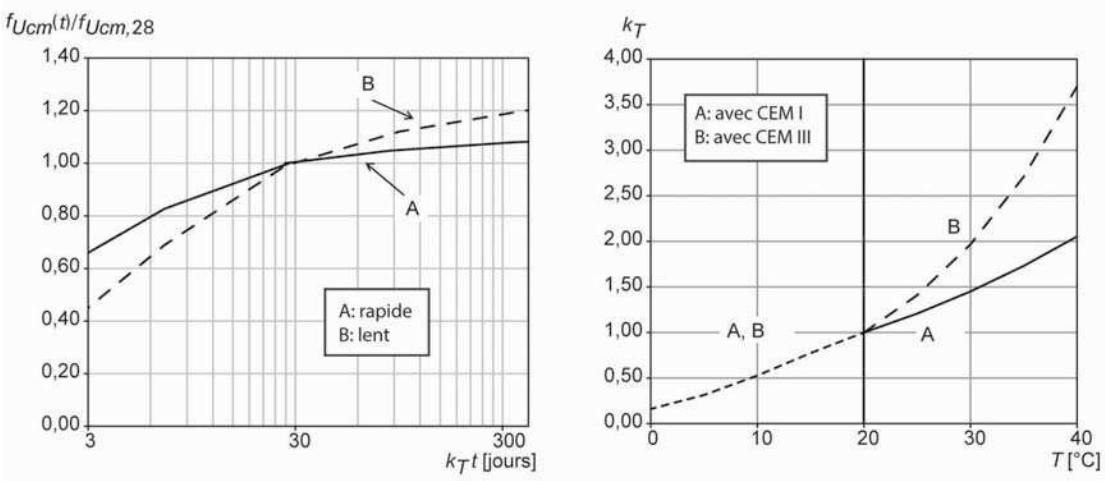
3.2.2.2 Le comportement du BFUP sollicité en compression est caractérisé par une relation linéaire contrainte–déformation jusqu'à ce que la résistance à la compression soit atteinte. On pourra éventuellement utiliser une relation non linéaire, pour décrire la branche ascendante du diagramme contraintes–déformations, en tenant compte d'une réduction de la rigidité.

3.2.2.3 L'évolution des propriétés mécaniques du BFUP en fonction du temps dépend de la composition, du traitement thermique éventuel et de la cure du BFUP. Pour un BFUP sans traitement thermique, on pourra utiliser les valeurs indicatives de la figure 3. Pour un BFUP avec traitement thermique, les valeurs indicatives sont à établir de manière spécifique au projet, le cas échéant sur la base d'essais.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Figure 3 Évolution dans le temps de la résistance à la compression de BFUP et de la maturation, selon le type de ciment utilisé, en l'absence de traitement thermique.

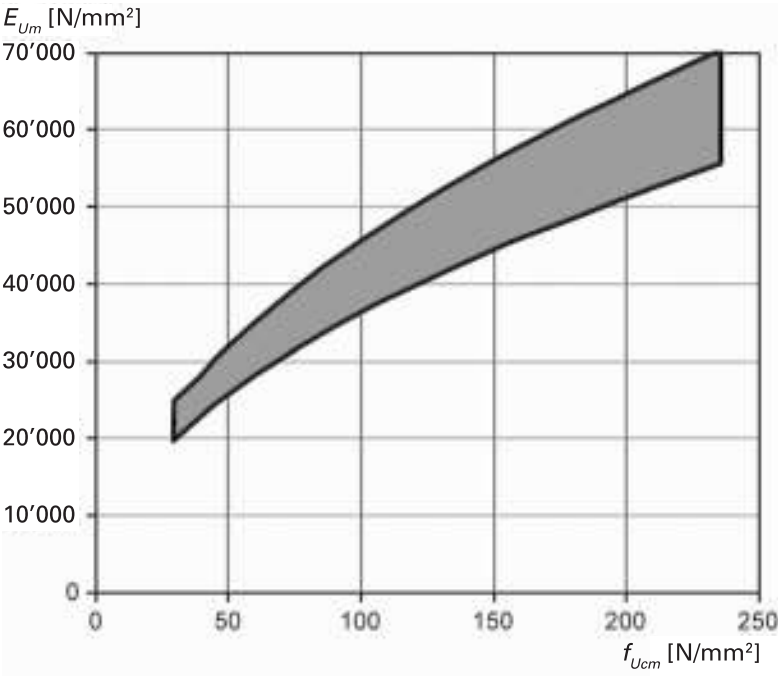
a) résistance à la compression b) maturation



On pourra admettre que l'évolution de la résistance à la traction suit celle de la résistance à la compression donnée à la figure 3.

3.2.2.4 La valeur moyenne du module d'élasticité du BFUP peut être estimée à l'aide de la figure 4.

Figure 4 Module d'élasticité moyen en fonction de la résistance moyenne à la compression sur cube du BFUP



On pourra utiliser la même valeur pour le module d'élasticité du BFUP sollicité en traction et en compression.

3.2.2.5 Dans le domaine des déformations élastiques, on admettra un coefficient de Poisson ν_U de 0,20.

3.2.3 Fluage et retrait

3.2.3.1 Un traitement thermique au jeune âge a pour effet de limiter considérablement le fluage et le retrait.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

3.2.3.2 Pour le BFUP sans traitement thermique, confectionné avec du CEM I et soumis dès la mise en charge t_0 à des contraintes de compression ne dépassant pas 40% de la résistance moyenne à la compression au moment de la charge, on déterminera les déformations dues au fluage à partir des déformations élastiques à l'aide de la relation suivante:

$$\varepsilon_{Ucc}(t) = \varphi_U(t,t_0) \cdot \varepsilon_{Uel} \tag{7}$$

avec le coefficient de fluage: $\varphi_U(t,t_0) = \varphi_{U_\infty}(t_\infty,t_0) \cdot \dfrac{(t-t_0)^a}{(t-t_0)^a + b}$

Le coefficient de fluage final et les coefficients *a* et *b* servant à déterminer le coefficient de fluage du BFUP en fonction du temps figurent dans le tableau 2:

Tableau 2 Coefficient de fluage final et coefficients *a* et *b*

t_0 jours	Cure	$\varphi_{U_\infty}(t_\infty,t_0)$	*a*	*b*
4	20 °C	1,2	0,6	3,2
7	20 °C	1,0	0,6	4,5
28	20 °C	0,9	0,6	10
–	Traitement thermique – 2 jours à 90 °C et à la vapeur	0,3	0,6	10

Pour des contraintes de compression supérieures à 40% de la résistance moyenne à la compression, il est nécessaire de procéder à des investigations particulières.

3.2.3.3 Pour le BFUP soumis à des contraintes de traction $\sigma_{Ut} \leq f_{Utef}$, les déformations dues au fluage seront déterminées selon 3.2.3.2. Pour des contraintes de traction $\sigma_{Ut} > f_{Utef}$, il faudra prendre en considération l'influence du niveau de sollicitation sur le fluage (fluage non linéaire).

3.2.3.4 Le retrait du BFUP résulte pour une part prépondérante de retrait endogène et pour une part limitée de retrait de dessiccation. Pour un BFUP sans traitement thermique, le retrait total peut être estimé à l'aide de la relation suivante:

$$\varepsilon_{Us}(t) = \varepsilon_{Us_\infty} \cdot e^{\frac{-c}{\sqrt{t-d}}} \tag{8}$$

Pour le BFUP confectionné avec du CEM I, les valeurs des coefficients sont $c = 2{,}48$ et $d = 0{,}86$. On pourra admettre comme valeur finale du retrait $\varepsilon_{Us_\infty} = 0{,}6 - 0{,}8‰$.

Pour le BFUP confectionné avec du CEM III/B, les valeurs des coefficients sont $c = 1{,}3$ et $d = 0{,}86$. On pourra admettre comme valeur finale du retrait $\varepsilon_{Us_\infty} = 0{,}95‰$.

Si le BFUP est confectionné avec d'autres sortes de ciment ou que le retrait joue un rôle majeur, il conviendra alors de procéder à des essais.

3.2.4 Fatigue

La résistance à la fatigue du BFUP des sortes UA et UB sollicité en traction est caractérisée par sa limite de fatigue:

$$\sigma_{U,D} = 0{,}30 \cdot (f_{Utek} + f_{Utuk}) \tag{9}$$

3.2.5 Résistance au feu

3.2.5.1 Les méthodes de calcul servant à déterminer la résistance au feu ne peuvent être appliquées que si la résistance à l'écaillage est vérifiée.

3.2.5.2 L'ajout de fibres de polypropylène peut, par exemple, éviter l'écaillage du BFUP. L'efficacité des mesures prises à cet effet sera vérifiée par des essais.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

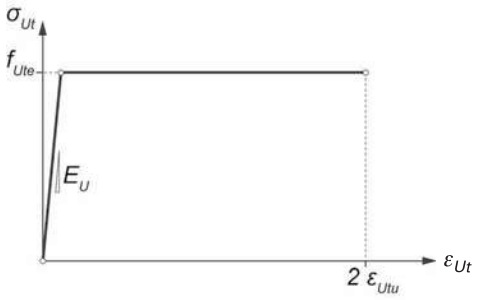
3.3 Propriétés du BFUP armé

3.3.1 Le BFUP armé est pourvu d'acier d'armature passive sous forme de barres et de treillis soudés ou d'acier de précontrainte sous forme de fils, de barres et de torons, selon la norme SIA 262.

3.3.2 L'acier d'armature passive qui répond aux critères de la norme SIA 262 en ce qui concerne la surface projetée relative des nervures, peut être considéré comme acier à haute adhérence. L'acier nervuré de la classe de ductilité A ne doit pas être utilisé, étant donné que des ruptures de barres relativement précoces peuvent se produire dans le domaine adoucissant en raison de la haute adhérence.

3.3.3 Le comportement du BFUP armé sollicité en traction s'obtient par superposition linéaire des lois de matériaux du BFUP et de l'acier d'armature passive. En règle générale, la capacité d'écrouissage du BFUP est accrue par l'action concomitante de l'acier d'armature passive. En première approximation, on pourra utiliser la loi de matériau de la figure 5 pour le BFUP des sortes UA et UB.

Figure 5 Loi de matériau idéalisée pour le BFUP des sortes UA et UB dans le cas d'éléments de construction en BFUP armé sollicités en traction



SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4 ANALYSE STRUCTURALE ET DIMENSIONNEMENT

4.1 Principes

4.1.1 Généralités

4.1.1.1 L'analyse structurale sera effectuée selon les principes de la norme SIA 262, conformément aux chiffres 4.1.2 et 4.1.3.

4.1.1.2 Les valeurs de dimensionnement des résistances du BFUP sont déterminées selon 2.4.2.

4.1.2 Méthodes de calcul

4.1.2.1 En règle générale, pour l'état-limite de service et l'état-limite ultime, les sollicitations des systèmes hyperstatiques seront déterminées par des méthodes de calcul fondées sur la théorie de l'élasticité linéaire.

4.1.2.2 On pourra appliquer les méthodes de la théorie de la plasticité dans le cas où une capacité de déformation suffisante aura été vérifiée.

4.1.2.3 Dans les systèmes hyperstatiques, on pourra négliger les sollicitations dues aux déformations imposées ou entravées dans le cas où une capacité de déformation suffisante aura été vérifiée.

4.1.3 Vérification de la capacité de déformation

4.1.3.1 Lors de la vérification de la capacité de déformation, on tiendra compte de la ductilité limitée du BFUP ainsi que de la diminution de l'allongement spécifique de rupture de l'acier d'armature nervuré dû à une notable augmentation de la rigidité en traction du BFUP.

4.1.3.2 Pour les éléments de construction mixtes, on tiendra compte des déformations initiales selon 4.3.1.4. On tiendra également compte des sollicitations dues aux déformations entravées au jeune âge.

4.1.3.3 Lors de vérifications de la capacité de déformation pour lesquelles la résistance à la traction doit être déterminée à l'aide d'éprouvettes prélevées sur les éléments, on relèvera également le comportement force–déplacement du BFUP au cours de ces essais.

4.2 Éléments de structure en BFUP

4.2.1 Généralités

4.2.1.1 La sécurité structurale sera vérifiée pour les états-limites ultimes suivants:
- épuisement de la résistance des sections
- défaillance par instabilité des structures ou de leurs éléments
- épuisement de la résistance des liaisons
- fatigue.

4.2.1.2 La défaillance par instabilité des structures ou de leurs éléments pourra être étudiée par analogie avec les méthodes de la construction métallique, selon la norme SIA 263.

4.2.1.3 La vérification de l'aptitude au service portera en particulier sur les déformations (flèches) et les vibrations.

4.2.1.4 On vérifiera la valeur de dimensionnement de la résistance à la traction du BFUP dans le cadre des essais de convenance, sur des éprouvettes prismatiques. Ces éprouvettes seront prélevées sur un prototype exécuté dans les mêmes conditions de fabrication que les éléments de structure et seront testées par un essai de flexion 3 points. La géométrie des éprouvettes, l'exécution de l'essai et son évaluation seront conformes aux Recommandations AFGC *«Bétons fibrés à ultra-hautes performances»* (2013), annexe 6. On ne recourra à des éprouvettes prélevées sur l'élément de construc-

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

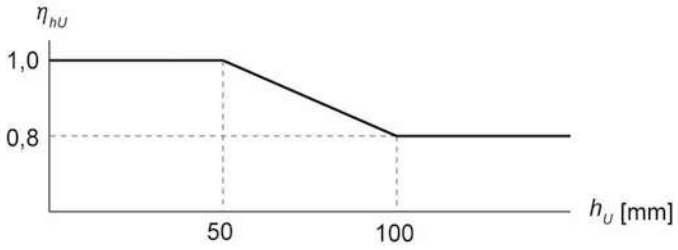
tion que dans le cas où la contribution du BFUP à la résistance est supérieure à 30%. Dans tous les autres cas, la résistance à la traction peut être déterminée selon le chiffre 2.4.2.3 et les coefficients mentionnés au chiffre 4.2.2.

4.2.2 Coefficients

4.2.2.1 Le coefficient lié à l'orientation des fibres η_K dépend de la géométrie de l'élément de construction et du processus de fabrication. Sa valeur est la suivante:
- η_K = 0,90 en cas de comportement d'ensemble (redistribution des contraintes possible, par exemple dans des dalles ou des systèmes hyperstatiques),
- η_K = 0,75 en cas de comportement localisé (aucune possibilité de redistribution des contraintes, par exemple dans les zones d'ancrages)

4.2.2.2 Le coefficient η_{hU} tient compte de l'influence exercée par l'épaisseur de l'élément sur l'orientation des fibres. La spécification de l'épaisseur de l'élément sera effectuée en tenant compte du processus de fabrication. La figure 6 contient les données permettant de déterminer le coefficient η_{hU}.

Figure 6 Coefficient pour la prise en compte de l'épaisseur de l'élément et du processus de fabrication



4.2.2.3 Le coefficient η_{fU1} pour la prise en compte de la capacité de déformation relativement faible du BFUP sollicité en compression vaut η_{fU1} = 0,85.

4.2.2.4 Le coefficient η_{fU2} pour la prise en compte du comportement sous charge des éléments comprimés au sens du chiffre 4.3.7 de la norme SIA 262 vaut η_{fU2} = 0,67.

4.2.2.5 Le coefficient pour la prise en compte de la durée de l'action vaut en général: η_t = 1,0. Dans le cas d'actions brutales, comme le choc et l'explosion par exemple, on pourra admettre un coefficient η_t > 1,0, dans la mesure où sa valeur aura été suffisamment étayée par des essais.

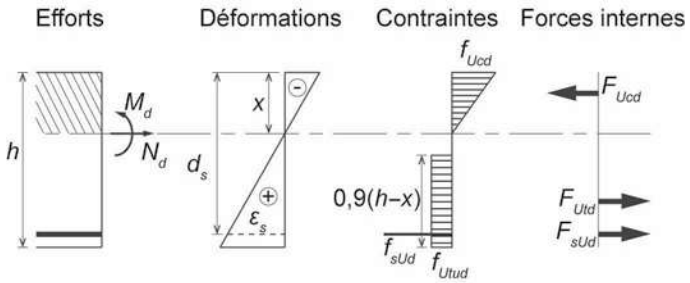
4.2.2.6 Les coefficients des chiffres 4.2.2.1 et 4.2.2.2 prennent la valeur 1,0 lorsque la valeur de dimensionnement de la résistance ultime selon le chiffre 2.4.2.2 a été déterminée par des essais.

4.2.3 Vérification de la sécurité structurale

4.2.3.1 Flexion

On déterminera la valeur de dimensionnement de la résistance ultime en flexion simple ou en flexion composée à l'aide du modèle de résistance en section de la figure 7.

Figure 7 Résistance à la flexion d'une section en BFUP armé



SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4.2.3.2 Effort tranchant

4.2.3.2.1 Lors du dimensionnement de l'âme de poutres porteuses, on admettra que l'effort tranchant est repris par l'âme seule. On prendra pour base de dimensionnement un champ de contraintes dont les bielles de compression ont une inclinaison variable et sont perpendiculaires aux bielles de traction.

4.2.3.2.2 Pour les éléments de construction réalisés avec un BFUP des sortes UA ou UB, on déterminera la valeur de dimensionnement de la résistance à l'effort tranchant en superposant la résistance à l'effort tranchant du BFUP et celle de l'armature d'effort tranchant:

$$V_{Rd} = V_{Rd,U} + V_{Rd,s} \tag{10}$$

avec:

$$V_{Rd,U} = \frac{b_w \cdot z \cdot 0{,}5\,(f_{Uted} + f_{Utud})}{\tan \alpha} \tag{11}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \sin \beta \tag{12}$$

Pour l'inclinaison des champs de compression, on admettra: $\alpha_{min} \leq \alpha \leq 45°$. L'inclinaison minimale α_{min} pourra prendre les valeurs suivantes:
- $\alpha_{min} = 30°$ cas normal
- $\alpha_{min} = 25°$ lorsque l'âme est soumise à un important effort normal de compression
- $\alpha_{min} = 40°$ lorsque l'âme est soumise à un important effort normal de traction ou s'il faut s'attendre à des déformations plastiques des ailes dans le segment de poutre considéré.

On vérifiera les dimensions de l'âme pour l'inclinaison choisie du champ de compression. On limitera la résistance à:

$$\frac{V_d}{V_{Rd}} \cdot \left[\frac{V_{Rd,U}}{\tan \alpha} + \frac{V_{Rd,s}}{(\cos \alpha + \cot \beta \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \alpha} \right] \leq b_w \cdot z \cdot 0{,}55 \cdot f_{Ucd} \tag{13}$$

Par analogie avec la norme SIA 262, la force de traction longitudinale due au champ de contraintes biaxial dans le BFUP et devant être reprise par l'armature longitudinale est donnée par la relation:

$$F_{tVd} = \frac{V_d}{V_{Rd}} [V_{Rd,U} (\cot \alpha - \tan \alpha) + V_{Rd,s} \cdot (\cot \alpha - \tan \alpha)] \tag{14}$$

Elle sera reprise pour moitié par la membrure tendue et pour moitié par la membrure comprimée.

4.2.3.2.3 Pour les éléments de construction réalisés avec un BFUP de la sorte U0, on déterminera la valeur de dimensionnement de la résistance à l'effort tranchant de l'âme à l'état élastique en calculant la contrainte principale de traction, qui peut atteindre au maximum la valeur de dimensionnement de la résistance limite élastique à la traction f_{Uted}.

4.2.3.3 Fatigue

4.2.3.3.1 La vérification à la fatigue des éléments en BFUP armé soumis à la flexion sera effectuée pour la limite de fatigue donnée par la relation:

$$M_{R,D} = 0{,}5 \cdot M_{Rd} \tag{15}$$

De plus, on vérifiera à la fatigue l'acier d'armature passive selon la norme SIA 262.

4.2.3.3.2 La vérification à la fatigue des éléments en BFUP non armé soumis à la flexion sera effectuée pour la limite de fatigue du BFUP:

$$\sigma_{Ufat,max} \leq \sigma_{U,D} \tag{16}$$

où la contrainte maximale de traction $\sigma_{Ufat,max}$ due aux actions permanentes et à l'action de fatigue dans le BFUP sera déterminée pour un comportement élastique.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4.2.4 Vérification de l'aptitude au service

4.2.4.1 Les sollicitations seront déterminées dans l'hypothèse d'un comportement élastique de la structure porteuse.

4.2.4.2 Le BFUP des sortes UA et UB soumis à la traction est exempt de fissures et étanche aux liquides tant que sa déformation à l'état-limite de service reste inférieure à 1‰. Dans le cas d'un BFUP de la sorte U0, cette valeur est de $0{,}9 \cdot \frac{f_{Utek}}{E_{Ut}}$.

4.2.4.3 On pourra estimer la flèche due au fluage à l'aide de la relation suivante:

$$w_{U\varphi} = w_{Uel} \cdot (1 + \varphi_U(t,t_0)) \tag{17}$$

Pour les sollicitations de compression ou de traction dans le BFUP, on déterminera le coefficient de fluage selon le chiffre 3.2.3.

4.3 Éléments mixtes BFUP–béton

4.3.1 Généralités

4.3.1.1 La fabrication d'un élément mixte constitué de BFUP coulé sur un élément en béton armé conduit à un état d'autocontraintes dans cet élément. Dans le BFUP, les déformations générées par le retrait et les autres processus liés à la température sont entravés et induisent des contraintes de traction. Le fluage du BFUP conduit à une réduction importante de ces autocontraintes.

4.3.1.2 L'état d'autocontraintes dépend des propriétés des matériaux et de la structure porteuse. Il est défini par le degré d'entrave:

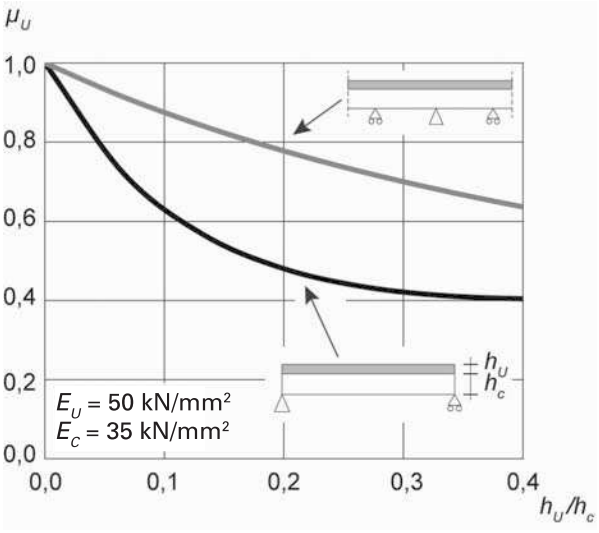
$$\mu_U = \frac{\sigma_{Ue}}{\sigma_{Ue,max}} \tag{18}$$

avec:

$$\sigma_{Ue,max} = \frac{\varepsilon_{Us\infty}}{1 + \varphi_{U\infty}(t_\infty,t_0)} \cdot E_{Um}$$

4.3.1.3 Le degré d'entrave peut être déterminé pour chaque configuration de structure porteuse en tenant compte des propriétés géométriques et des modules d'élasticité des matériaux utilisés. On pourra le déterminer à l'aide de la figure 8.

Figure 8 Détermination du degré d'entrave d'une couche de BFUP sur un support en béton pour deux conditions d'appui différentes.



SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4.3.1.4 Lors de la détermination de contraintes à l'état-limite de service et de résistances ultimes, on tiendra compte des déformations initiales dues aux déformations entravées, aux sollicitations existantes dans l'élément de béton lors du renforcement ou à celles dues à la précontrainte. À l'état-limite ultime, et à condition que le BFUP mis en œuvre soit des sortes UA ou UB, on pourra négliger dans le système mixte les sollicitations dues aux déformations entravées au jeune âge, en particulier les déformations dues à la traction dans le BFUP.

4.3.2 Coefficients

4.3.2.1 Le coefficient lié à l'orientation des fibres dépend de la géométrie de l'élément de construction et du processus de fabrication. Sa valeur est la suivante:
- η_K = 0,90 en cas de comportement d'ensemble (redistribution des contraintes possible, par exemple dans des dalles ou des systèmes hyperstatiques),
- η_K = 0,75 en cas de comportement localisé (aucune possibilité de redistribution des contraintes, par exemple dans les zones d'ancrages).

4.3.2.2 Le coefficient η_{hU} sera déterminé selon 4.2.2.2.

4.3.2.3 Le coefficient pour la prise en compte de la durée de l'action vaut en général: η_t = 1,0.

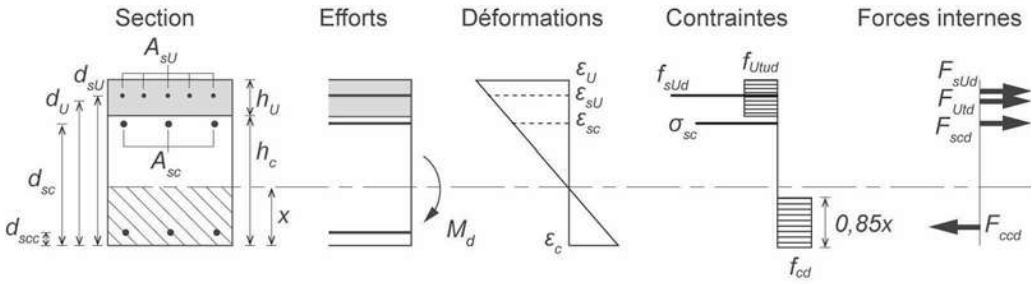
4.3.3 Vérification de la sécurité structurale

4.3.3.1 Flexion

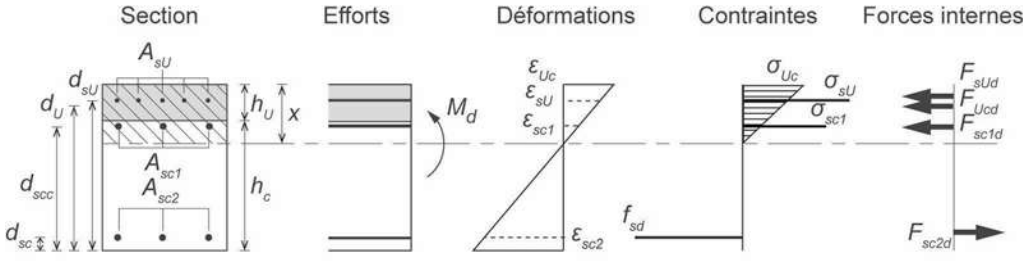
4.3.3.1.1 On pourra déterminer la résistance ultime en flexion simple à l'aide du modèle de la figure 9. Les déformations initiales seront prises en considération selon 4.3.1.4. Pour la flexion oblique et la flexion composée, on utilisera le même modèle par analogie.

Figure 9 Résistance à la flexion d'éléments mixtes à l'état-limite ultime

a) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en traction



b) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en compression



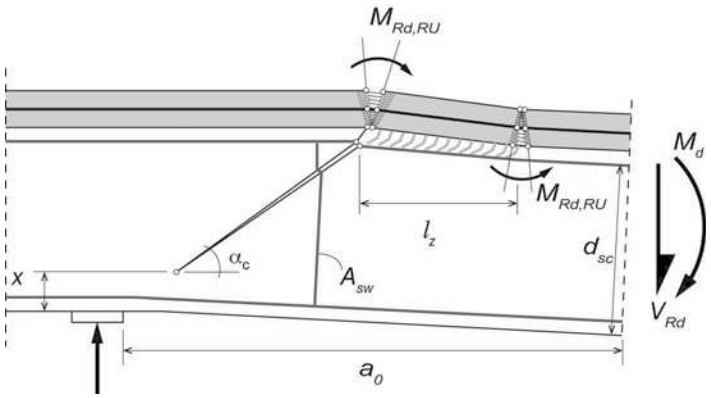
4.3.3.1.2 Le BFUP dispose d'une capacité de déformation plus limitée que l'acier d'armature passive. Lors de la formation de rotules plastiques, on pourra admettre un effet participant en traction de σ_{Utd} = 0,9 f_{Utud} du BFUP pour une déformation allant jusqu'à 3 ε_{Utu}. Si les déformations spécifiques excèdent 3 ε_{Utu}, on ne pourra admettre aucun effet participant du BFUP. Dans ce cas, les forces de traction seront reprises exclusivement par l'acier d'armature passive situé dans le BFUP.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4.3.3.2 Effort tranchant

La résistance à l'effort tranchant des éléments mixtes BFUP–béton sera déterminée à partir de la superposition des résistances à l'effort tranchant de la partie en béton armé et de la couche en BFUP armé selon la figure 10:

Figure 10 Modèle pour la détermination de la résistance à l'effort tranchant



La valeur de dimensionnement de la résistance ultime à l'effort tranchant est donnée par la relation:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,U} \tag{19}$$

avec:

– Valeur de dimensionnement de la résistance ultime du béton:

$$V_{Rd,c} = \frac{f_{cd} \cdot b_w}{2}\left[\frac{x}{\sin \alpha_c} \cdot (1 - \cos \alpha_c)\right] \tag{20}$$

Pour l'inclinaison α_c de la fissure diagonale de flexion–effort tranchant dans le béton armé, on pourra admettre: $20° \le \alpha_c \le 60°$. Lors d'une première évaluation, on admettra: $\alpha_c = 35°$.

La hauteur de la zone de compression est donnée par la relation: $x = 0{,}9 \cdot \omega_m \cdot d_{eq}$ (21)

avec: $\omega_m = \dfrac{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utud} + A_{sU} f_{sUd}}{A_c f_{cd}}$ et $d_{eq} = \dfrac{d_{sc} A_{sc} f_{sd} + d_U A_U f_{Utud} + d_{sU} A_{sU} f_{sUd}}{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}$ (22, 23)

– Valeur de dimensionnement de la résistance ultime de l'armature d'effort tranchant verticale:

$$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot f_{sd} \cdot \cot \alpha \tag{24}$$

– Valeur de dimensionnement de la résistance ultime à l'effort tranchant du BFUP armé:

$$V_{Rd,U} = \frac{2 \cdot M_{Rd,RU}}{l_z} \tag{25}$$

où: $l_z = a_0 - \dfrac{d_{sc}}{\tan \alpha_c}$ (26)

4.3.3.3 Fatigue

On effectuera la vérification à la fatigue des éléments fléchis pour la limite de fatigue par analogie avec le chiffre 4.2.3.3.

4.3.3.4 Cisaillement dans la zone d'interface entre BFUP et béton

4.3.3.4.1 Dans le cas où l'exécution de l'interface entre BFUP et béton est conforme aux chiffres 5.4.2 et 6.2.3 et si la résistance du béton de support est supérieure à celle d'un béton C20/25, on pourra renoncer à la vérification de la sécurité structurale de cette interface par le calcul.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

4.3.3.4.2 Dans le cas où la résistance du béton de support est inférieure à celle d'un béton C20/25, on vérifiera que la contrainte de cisaillement à l'interface reste inférieure à 50% de la valeur limite de la résistance au cisaillement du béton de support indiquée dans la norme SIA 262.

4.3.4 Vérification de l'aptitude au service

Le tableau 3 prescrit la sorte de BFUP requise en fonction du degré d'entrave, lorsque la couche de BFUP doit être étanche aux liquides.

Tableau 3 Degré d'entrave et sorte de BFUP requise en vue de garantir l'étanchéité aux liquides

Degré d'entrave μ_U	Sorte de BFUP
< 0,6	UA
0,6 – 0,8	UA[1)], UB
> 0,8	UB

[1)] On vérifiera par une analyse détaillée du comportement structural si la sorte UA répond aux exigences.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

5 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

5.1 Principes

5.1.1 Le choix des dimensions des éléments de construction en BFUP et des couches de BFUP doit se fonder sur la quantité d'armature et sur sa disposition. La disposition de l'armature doit permettre une mise en place et un autocompactage corrects du BFUP.

5.1.2 Les dispositions constructives doivent correspondre au modèle de la structure admis lors de l'analyse structurale.

5.2 Disposition de l'armature

5.2.1 En règle générale, on utilisera des barres d'armature dont le diamètre $\varnothing_s$ est compris entre 8 et 20 mm.

5.2.2 L'enrobage minimal de l'armature c_{nom} est généralement de 15 mm. Sur les faces coffrées, il peut être réduit à 10 mm ou à la longueur maximale des fibres. Dans le cas de la précontrainte par adhérence, l'enrobage minimal de l'armature c_{nom} correspond au double du diamètre des fils ou des torons adhérents. La valeur la plus élevée est déterminante.

5.2.3 L'espace libre entre deux barres ou deux unités de précontrainte sera au moins égal à 20 mm ou 1,5 fois la longueur des fibres. La valeur la plus élevée est déterminante.

5.2.4 Pour les ancrages situés en zone tendue, la valeur de base de la longueur d'ancrage sera au moins égale à 15 $\varnothing_s$ pour les barres et les treillis d'armature nervurés constitués d'acier dont la limite d'écoulement a une valeur caractéristique de 500 N/mm^2.

On pourra considérer que l'intensité de la force à l'extrémité d'une barre augmente sur la longueur d'ancrage selon les hypothèses admises dans la norme SIA 262. En présence d'une compression transversale, par exemple sur appuis, ou en cas d'utilisation de crochets terminaux, la longueur d'ancrage pourra être réduite de 30%.

La reprise, par le BFUP seul, des forces transversales de traction apparaissant localement dans les zones d'ancrage devra être vérifiée ou faire l'objet d'une armature transversale.

5.2.5 Les indications de la norme SIA 262 sont applicables par analogie aux joints, déviations et courbures des barres d'armature.

5.2.6 On évitera le soudage des armatures dans les éléments de construction soumis à la fatigue à cause de leur faible résistance à ce type de sollicitation. Les dispositifs d'ancrage ou les coupleurs des unités de précontrainte seront disposés dans des zones où les différences de contraintes sont faibles.

5.3 Éléments préfabriqués en BFUP et assemblages d'éléments

5.3.1 Lors de l'étude des éléments préfabriqués en BFUP et des assemblages d'éléments qu'ils composent, on étudiera, en plus du stade final, les différents états de construction survenant au cours du transport et du montage. Cette étude tiendra compte de l'évolution de la résistance du BFUP.

5.3.2 Les dispositifs d'ancrages et les fixations seront choisis en tenant compte de leur comportement mécanique et de leur mode de défaillance ainsi que de leur compatibilité avec les autres éléments de construction. De plus, on tiendra compte des instructions de sécurité et de montage. La résistance ultime des fixations sera déterminée selon SIA 179.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

5.4 Éléments mixtes BFUP–béton

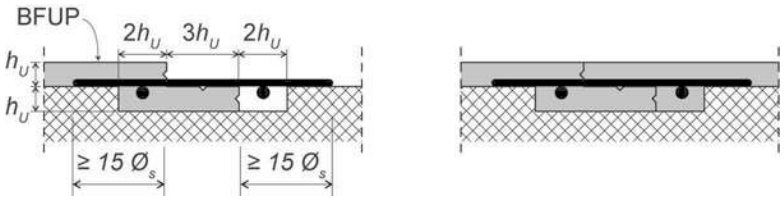
5.4.1 Les couches de BFUP ont une épaisseur généralement comprise entre 25 et 80 mm.

5.4.2 Pour garantir, sous charge, un comportement monolithique des éléments mixtes, il est impératif d'exécuter la liaison entre la couche de BFUP et le béton de support selon les indications du chiffre 6.2.3, afin d'assurer la transmission des forces entre les deux matériaux.

5.4.3 On pourra exécuter les joints de reprise selon le détail indiqué dans la figure 11. Le taux d'armature passive de liaison se montera au moins à 2,4% de la section de BFUP A_U (épaisseur h_U) en dehors du joint. La longueur d'ancrage des armatures de liaison respectera les indications du chiffre 5.2.4.

Figure 11 Détail constructif pour l'exécution des joints de reprise dans la couche de BFUP

1re étape: 2e étape:



i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

6 EXÉCUTION

6.1 Fabrication du BFUP

6.1.1 La fabrication du BFUP s'effectue dans une centrale à béton ou sur le chantier, dans une installation de malaxage foraine. La succession des étapes de malaxage et le temps de malaxage dépendent de la sorte de BFUP à fabriquer.

6.1.2 On tiendra compte des indications suivantes concernant le malaxage:
- Le volume total des composants secs se monte environ au double du volume de BFUP frais. En général, la cuve de malaxage peut être remplie à moitié, au maximum jusqu'aux ⅔ de sa capacité nominale.
- La tolérance de dosage en ciment, eau, fumée de silice, adjuvant (plastifiant), sable de quartz et fibres métalliques est de ± 2% (en masse). L'eau de gâchage proviendra du réseau d'eau potable. Aucune eau résiduelle ne doit être utilisée.
- Avant la première gâchée de BFUP, la cuve de malaxage sera humidifiée avec soin sans laisser de flaques d'eau.
- Pour un BFUP courant, le temps de malaxage se situe entre 5 et 15 minutes.
- Après le malaxage, plus aucun ajout d'eau ou d'adjuvant (plastifiant) ne sera autorisé dans le BFUP frais.
- Lors du recyclage de l'eau de rinçage en centrale à béton, la présence de fibres métalliques peut causer une usure mécanique des pompes et conduites, et les fibres peuvent s'accumuler dans les filtres.

6.1.3 En règle générale, le BFUP frais sera transporté par camion malaxeur en respectant les indications suivantes:
- Le tambour du camion malaxeur sera parfaitement vidé avant l'introduction du BFUP frais.
- Lors du transport, le tambour du camion malaxeur sera animé d'une rotation lente. Pour effectuer la vidange complète du camion malaxeur, il est judicieux d'arrêter brièvement la rotation du tambour peu avant la fin de la vidange, puis de la reprendre avec une rotation lente.
- Avant le déversement, le BFUP sera malaxé par une rotation rapide de la cuve pendant cinq minutes.
- Selon le mélange de BFUP mis en œuvre, une quantité importante de BFUP frais peut adhérer au tambour.

6.2 Mise en place et cure du BFUP

6.2.1 On tiendra compte des indications suivantes pour la mise en place du BFUP:
- En général, le BFUP frais est visqueux. Certains BFUP présentent un comportement thixotrope.
- La durée d'ouvrabilité dépend de la composition du BFUP. En règle générale, l'ouvrabilité se maintient pendant 2 heures par des températures ambiantes comprises entre + 5 °C et + 30 °C.
- Le coffrage sera dimensionné pour la pression hydrostatique intégrale du BFUP frais.
- L'étanchéité du coffrage doit être assurée.
- On préparera avant chaque étape un plan détaillé de mise en place tenant compte du nombre de gâchées à réaliser.
- En cas de mise en place à la grue, on veillera à ce que le clapet d'ouverture et de fermeture de la benne soit étanche.
- Le BFUP frais sera déversé de la benne ou d'un dumper de manière contrôlée, de telle sorte que son étalement et son égalisation jusqu'à l'épaisseur voulue ne nécessitent qu'un minimum de main d'œuvre.
- La mise en place d'une couche de BFUP exige une grande précision, que l'on peut atteindre à l'aide de distanciers ou d'indicateurs de niveau. Lors de la mise en place en couches minces, les irrégularités de surface du support en béton peuvent conduire à une notable consommation additionnelle de BFUP. Cet aspect devra être pris en compte lors de la préparation du dossier de soumission.
- Le BFUP est généralement accessible aux piétons après 12 à 24 heures, puis aux véhicules après 48 à 60 heures. Les basses températures retardent son durcissement.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

– Jusqu'à présent, l'expérience acquise en matière d'aptitude au pompage du BFUP est limitée. L'aptitude au pompage requiert en tout cas un BFUP de consistance molle avec un dosage en fibres réduit.
– On protégera le BFUP des vibrations nuisibles jusqu'à ce qu'il ait atteint une résistance suffisante.

6.2.2 La mise en place du BFUP doit être planifiée. Il est recommandé de le couler en continu ou de prévoir un joint de reprise selon la figure 11.

6.2.3 Dans les éléments mixtes BFUP–béton, la surface de contact du support en béton armé sera traitée par des méthodes comme les jets d'eau à haute pression ou le sablage. Cette opération doit éliminer complètement les particules libres et les substances affaiblissant la liaison (graisse, huile, etc.). La profondeur de repiquage de la surface est comprise entre 3 et 5 mm. L'élimination de la pellicule superficielle de ciment du support en béton n'est pas suffisante. Au surplus, les indications de la norme SIA 269/2 sont applicables.

6.2.4 Avant le coulage du BFUP, on vérifiera que sa consistance respecte les exigences d'ouvrabilité selon le chiffre C.4. Le BFUP frais sera coulé sur un support préalablement saturé d'eau, mais de surface humide et mate, débarrassée de tous les restes d'eau. La mise en place par forte pluie est à éviter.

6.2.5 Après la mise en place du BFUP frais, les surfaces exposées seront immédiatement protégées de la dessiccation par la pose d'une feuille plastique. Au chantier, on procédera à une cure humide (arrosage quotidien avec de l'eau) immédiatement après la fin de prise et pendant les 7 jours suivants. L'adéquation de produits de cure éventuels est à vérifier.

6.2.6 Lorsque la température ambiante est de 20 °C, on pourra généralement décoffrer le BFUP au plus tôt 24 heures après sa mise en place. Les indications relatives à l'évolution de sa résistance sont à respecter.

6.2.7 Les éléments préfabriqués pourront être soumis à un traitement thermique avant ou dès la fin de prise du BFUP, afin de raccourcir le processus de retrait et d'améliorer les propriétés mécaniques.

6.2.8 Pour les éléments de construction en BFUP ou comprenant des couches de BFUP, les tolérances dimensionnelles seront déterminées de manière spécifique à chaque projet et à chaque objet. En l'absence de spécifications, on appliquera les indications des normes SIA 262 et SIA V414/10.

Pour les tolérances dimensionnelles et le façonnage des aciers d'armature passive, on appliquera les indications de l'annexe A de la norme SIA 262.

6.2.9 Dans le cas d'éléments mixtes BFUP–béton et de conditions hivernales, la température minimale du support ne doit pas être inférieure à +5 °C. Après la mise en place, le BFUP sera immédiatement protégé par des nattes thermiquement isolantes.

6.3 Essais

6.3.1 L'évaluation de la consistance du BFUP frais et le contrôle de la régularité de sa fabrication seront effectués selon le chiffre C.4.

6.3.2 Les essais destinés à caractériser les propriétés du BFUP sont définis dans les annexes B à E. Pour la conformité de la consistance, de la masse volumique et de la résistance à la compression, on appliquera par analogie les réglementations prévues dans la norme SN EN 206. Pour d'autres propriétés, on spécifiera les essais et les critères en fonction des projets.

6.3.3 La conformité des aciers d'armature et de précontrainte sera vérifiée selon la norme SIA 262.

6.3.4 On appliquera aux constituants du BFUP les exigences requises pour les constituants du béton selon la norme SN EN 206, chiffre 5.1.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

6.4 Propriétés de surface du BFUP

6.4.1 Au contact de l'eau (chargée de sels de déverglaçage), les extrémités des fibres métalliques qui affleurent la surface du BFUP sont rapidement corrodées ponctuellement. La formation de cette corrosion peut être réduite par l'utilisation de coffrage en bois, ou par une peau de coffrage drainante. Des fibres en acier inoxydable peuvent être utilisées comme solution alternative. L'apparition de points de corrosion superficielle est toutefois sans conséquences néfastes sur la durabilité.

6.4.2 En l'absence de mesures particulières, les surfaces lisses de BFUP en face supérieure des dalles de roulement (pour véhicules routiers) ne sont pas aptes à recevoir le trafic par manque de qualité antidérapante. Des précautions doivent être prises lors de la mise en place du BFUP (par exemple exécution de stries, ou épandage de gravier concassé sur le BFUP fraîchement mis en place) pour obtenir une texture de surface suffisamment antidérapante. Les surfaces carrossables de BFUP destinées aux véhicules routiers sont généralement recouvertes d'un enduit d'accrochage et d'un revêtement bitumineux.

6.5 Sécurité du travail

6.5.1 Les mesures de sécurité habituelles relatives au contact et au maniement du ciment, de la fumée de silice et du sable de quartz sont applicables (protection de la peau, des voies respiratoires et des yeux).

6.5.2 Le travail avec des fibres métalliques impose des précautions particulières, car la confection et la mise en place du BFUP, le nettoyage des machines et des outils ainsi que la manipulation des éprouvettes ou des éléments préfabriqués génèrent un risque de blessure de la peau et des yeux, dû à la présence des fibres métalliques qui peuvent être éjectées hors de la masse ou en émerger. Le port de gants de protection et de lunettes de protection est indispensable.

6.5.3 Lors du transport d'éléments préfabriqués ou d'éprouvettes, des fibres métalliques émergeant de la surface peuvent endommager les engins de levage (sangles, etc.).

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe A (informative)
Propriétés des BFUP

A.1 La consistance du BFUP frais peut se situer entre autoplaçant (mesure de l'étalement au cône d'Abrams entre 550 et 800 mm, selon la norme SN EN 206) et thixotrope (apte à la mise en place en pente).

A.2 Le tableau 4 présente des valeurs indicatives caractérisant les BFUP courants.

Tableau 4 Valeurs indicatives caractérisant les BFUP courants

Propriété	Désignation	Valeurs typiques (à l'âge de 28 jours)
Module d'élasticité (traction / compression)	E_U	40–60 kN/mm^2
Coefficient de Poisson	ν_U	0,2
Résistance à la compression	f_{Uc}	120–200 N/mm^2
Résistance limite élastique à la traction	f_{Ute}	7–12 N/mm^2
Résistance à la traction	f_{Utu}	7–15 N/mm^2
Déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte (écrouissage)	ε_{Utu}	0–5‰
Énergie spécifique de rupture	G_{FU}	8–25 kJ/m^2
Coefficient de dilatation thermique	α_U	10^{-5} / °C
Valeur finale du retrait	$\varepsilon_{Us\infty}$	sans traitement thermique: 0,6–0,8‰ avec traitement thermique[1)]: identique, mais atteinte à la fin du traitement thermique
Coefficient final de fluage	$\varphi_{U\infty}(t_\infty,t_0)$	sans traitement thermique: 1,0 (t_0 = 7 jours); 0,8–1,0 (t_0 = 28 jours) avec traitement thermique[1)]: 0,2–0,4
Masse volumique du BFUP durci	ρ_U	2300 à 2700 kg/m^3 selon le type de fibres et leur dosage

[1)] Traitement à 90 °C et humidité relative > 95% pendant 48 heures.

A.3 La résistance par adhérence des aciers d'armature nervurés dans le BFUP est comprise entre les valeurs indicatives suivantes: τ_{bU} = 35–45 N/mm^2.

La résistance par adhérence des aciers d'armature non profilés (avec peau de laminage) dans le BFUP est comprise entre les valeurs indicatives suivantes: τ_{bU} = 18–22 N/mm^2.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe B (normative)
Assurance de la qualité

B.1 Les tableaux 5 et 6 définissent les essais à effectuer sur le BFUP dans le cadre des essais initiaux, des essais de qualité périodiques effectués par le fournisseur ainsi que des essais de convenance et de qualité exécutés sur le chantier. On distinguera entre les essais sur BFUP fourni sous forme de prémix (tableau 5) et les essais sur BFUP produit selon une recette donnée, à partir de composants séparés (tableau 6).

Les fréquences données dans les tableaux 5 et 6 pour les essais de convenance et de qualité sont des valeurs indicatives. Elles peuvent être adaptées par l'auteur du projet sur la base de critères tels que données existantes sur le BFUP, résultats d'essais sur des éléments de construction, quantité de BFUP à mettre en place ou hypothèses spécifiques au projet dans l'analyse structurale et le dimensionnement.

Il est conseillé de confier l'exécution des essais sur BFUP à des laboratoires expérimentés dans ce domaine.

Tableau 5 Essais sur BFUP fourni sous forme de prémix

Type d'essai		Essais initiaux		Essais de qualité périodiques du producteur				Essais de convenance		Essais de qualité	
Responsable		Producteur du BFUP-prémix		Producteur du BFUP-prémix				Entrepreneur		Entrepreneur	
		BFUP avec fibres		Surveillance du prémix (sans fibres)		Surveillance du BFUP (prémix et fibres)		BFUP avec fibres		BFUP avec fibres	
Méthode d'essai	Référence		Fréquence		Fréquence		Fréquence		Fréquence		Fréquence
Ouvrabilité	chiffre C.4	X	5 ans	X	Toutes les 120 tonnes, au moins tous les 2 mois de production			X	A	X	C
Résistance à la compression	chiffre C.1	X		X		X	2 fois par an	X	A	X	C
Module d'élasticité	chiffre C.1	X									
Essai de traction par flexion	annexe E	X				X		X	B	X	D
Comportement à la traction	annexe D	X				X	2,5 ans				
Étanchéité	chiffre C.3	X									
Aptitude à la mise en place en pente	chiffre C.5	X [1)]						X [1)]	A		
Mesure de l'adhérence par traction directe	chiffre C.6							X	A	X	C
Retrait	chiffre C.7	X									
Fluage	chiffre C.7	X									

X: essai à effectuer
[1)] seulement si le BFUP est déclaré apte à la mise en place en pente
A: 1 fois avant chaque exécution
B: 1 fois avant chaque exécution, au cas où le volume de BFUP à mettre en place dépasse 10 m^3
C: 1 fois à chaque étape de mise en place, ou tous les 10 m^3 de BFUP produit
D: au moins 1 fois par exécution, ou tous les 150 m^3 de BFUP mis en place

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Tableau 6 Essais sur BFUP produit selon une recette, à partir de composants séparés

Type d'essai		Essais initiaux		Essais de qualité périodiques du producteur		Essais de convenance		Essais de qualité	
Responsable		Producteur du BFUP		Producteur du BFUP		Entrepreneur		Entrepreneur	
Méthode d'essai	Référence		Fréquence		Fréquence		Fréquence		Fréquence
Ouvrabilité	chiffre C.4	X	5 ans	X	chaque jour de production	X	A	X	C
Résistance à la compression	chiffre C.1	X		X	tous les 50 m^3, au moins 1 fois par semaine de production	X	A	X	D
Module d'élasticité	chiffre C.1	X							
Essai de traction par flexion	annexe E	X		X	tous les 150 m^3	X	B	X	E
Comportement à la traction	annexe D	X		X	tous les 1000 m^3				
Étanchéité	chiffre C.3	X							
Aptitude à la mise en place en pente	chiffre C.5	X [1)]				X [1)]	A		
Mesure de l'adhérence par traction directe	chiffre C.6					X	A	X	D
Retrait	chiffre C.7	X							
Fluage	chiffre C.7	X							

X: essai à effectuer
[1)] seulement si le BFUP est déclaré apte à la mise en place en pente
A: 1 fois avant chaque exécution
B: 1 fois avant chaque exécution, au cas où le volume de BFUP à mettre en place dépasse 50 m^3
C: 1 fois par étape de mise en place. Lors de chaque livraison par camion pour des mises en place spéciales (pente > 5% ou mise en place à la machine, par exemple)
D: au moins 1 fois par exécution ou tous les 50 m^3 de BFUP mis en place
E: au moins 1 fois par exécution ou tous les 300 m^3 de BFUP mis en place

B.2 Les quantités des matériaux mis en œuvre (composants) seront contrôlées de façon détaillée lors de la confection et de la mise en place du BFUP frais.

B.3 La déclaration de conformité ainsi que le certificat de contrôle de production interne seront tenus à disposition en vue de vérifier la conformité du BFUP aux résultats des essais initiaux.

B.4 Lors du contrôle de production du BFUP, on appliquera par analogie les indications de l'annexe C de la norme SN EN 206.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe C (normative)
Essais sur BFUP

C.1 Les résistances sur cylindre ou sur cube seront déterminées selon la norme SN EN 12390-3. Les éprouvettes devront être des cylindres de 70 mm de diamètre et de 140 mm de hauteur, ou des cubes de 100 mm d'arête. On pourra admettre une valeur indicative de 0,95 pour le rapport entre la résistance sur cylindre et la résistance sur cube. La résistance à la compression sera déterminée sur des éprouvettes âgées de 28 jours. Les valeurs de résistance seront déterminées à l'aide de 3 éprouvettes.

Le module d'élasticité sera déterminé selon la norme SN EN 12390-13. Lors des essais initiaux, le module d'élasticité sera déterminé à l'aide de 6 éprouvettes. Lors des essais de convenance ou de qualité, 3 éprouvettes suffisent.

La résistance à la compression peut éventuellement aussi être déterminée au moyen de demi-prismes de section 40 mm × 40 mm issus de l'essai de flexion sur prismes de 40 mm × 40 mm × 160 mm de longueur. On tiendra compte dans ce cas d'un rapport entre la résistance à la compression sur cube de 40 mm d'arête et la résistance à la compression sur cube de 100 mm d'arête de 1,4.

C.2 Les essais pour la détermination du comportement à la traction et à la traction par flexion selon les annexes D et E seront généralement effectués sur des éprouvettes âgées de 28 jours.

Pour leur autocontrôle, les usines de production pourront également déterminer la résistance à la traction par flexion au moyen de prismes de section 40 mm × 40 mm et de 160 mm de longueur.

C.3 On vérifiera l'étanchéité de la couche de BFUP par l'essai d'absorption d'eau (méthode par capillarité) selon la norme SN EN 13057 ou éventuellement selon la norme SN EN 1925. Les exigences requises en matière d'étanchéité aux liquides du BFUP sont satisfaites lorsque les éprouvettes d'un diamètre de 100 mm et d'une épaisseur de 30 mm présentent, pour un BFUP âgé de 28 jours, une valeur moyenne du coefficient de capillarité $\leq 100\ g/m^2h^{0,5}$. L'étanchéité sera déterminée à l'aide de 6 éprouvettes.

C.4 On vérifiera l'ouvrabilité du BFUP frais par l'essai d'étalement au cône d'Abrams selon la norme SN EN 12350-8. Les mesures sont effectuées 1 minute et 5 minutes après avoir retiré le cône. Lors de la confection des éprouvettes destinées aux essais des propriétés mécaniques, on mesurera en complément la masse volumique du BFUP frais (selon la norme SN EN 12350-6) et sa teneur en air occlus (selon la norme SN EN 12350-7). Pour la mesure de la masse volumique et de la teneur en air, les méthodes d'essai sur mortier selon la norme SN EN 413-2 sont également admises.

C.5 L'aptitude à la mise en place du BFUP frais sur des pentes de plus de 2% sera vérifiée à l'aide d'un plateau incliné long de 3,0 m (dans le sens de la pente) et large de 1,0 m. La pente du plateau correspondra à la pente exigée et la texture de sa surface sera représentative de la texture prévue du support. La couche de BFUP présentera soit une épaisseur minimale de 25 mm, soit l'épaisseur prévue pour l'application. Si celle-ci contient de l'armature, il faudra la prendre en compte. Le critère d'acceptation sera défini de manière spécifique au projet et sera fondé sur un contrôle visuel de toute déformation éventuelle de la couche de BFUP après la mise en place et après le durcissement.

C.6 La mesure de l'adhérence par traction directe sera effectuée selon la norme SN EN 1542 sur un BFUP âgé d'au moins 7 jours. Pour les essais de convenance, le support et sa texture de surface devront être représentatifs de l'objet à exécuter. Les exigences requises seront satisfaites si la rupture a lieu dans le béton de support et si les exigences spécifiques au projet en matière d'adhérence par traction directe du béton sont remplies. Le nombre d'essais à effectuer sera déterminé de manière spécifique au projet.

C.7 Dans le cadre des essais initiaux, on déterminera le comportement au retrait et au fluage du BFUP. On indiquera la méthode de détermination de la valeur finale du retrait et du coefficient final de fluage. La méthode pour la mesure de la déformation due au retrait comprendra le retrait endogène et sera effectuée dans des conditions isothermes pendant 6 mois dès la confection des éprouvettes. Les comportements au retrait et au fluage seront déterminés chacun à l'aide d'au minimum 2 éprouvettes.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

C.8 En vue de satisfaire à des exigences spécifiques, on déterminera la résistance au feu et la résistance à l'abrasion dans le cadre des essais initiaux ou des essais de convenance, en indiquant les méthodes d'essai utilisées.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe D (normative)
Essai de comportement à la traction

D.1 Domaine d'application

Les chiffres qui suivent spécifient une méthode permettant de déterminer la réponse force–déplacement en traction uniaxiale, d'une éprouvette non entaillée en BFUP.

D.2 Définitions

D.2.1 La réponse force–déplacement de l'éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force–déplacement jusqu'à une force résiduelle égale à 20% de la force maximale ou une variation moyenne de la longueur de l'éprouvette dans la zone de mesure supérieure de 20% à la demi-longueur maximale des fibres utilisées.

D.2.2 Le déplacement moyen est défini comme la valeur moyenne des mesures des 2 capteurs inductifs placés sur l'éprouvette, d'un côté et de l'autre de cette dernière.

D.2.3 La contrainte est définie par le rapport entre la force mesurée et la section de l'éprouvette dans sa partie centrale.

D.2.4 La déformation dans les domaines élastique et écrouissant est définie par le rapport du déplacement moyen à la longueur de la base de mesure des capteurs de déplacement $l_{mes,1}$ (capteurs entre les points C et E ainsi qu'entre L et J) et $l_{mes,2}$ (capteurs entre les points O et P ainsi qu'entre Q et R).

D.3 Principe

D.3.1 L'essai de traction est réalisé au moyen d'une machine disposant d'une plage de mesure de 50 kN à 200 kN, asservie au déplacement de la traverse ou au déplacement sur la base des valeurs mesurées par les capteurs de déplacement.

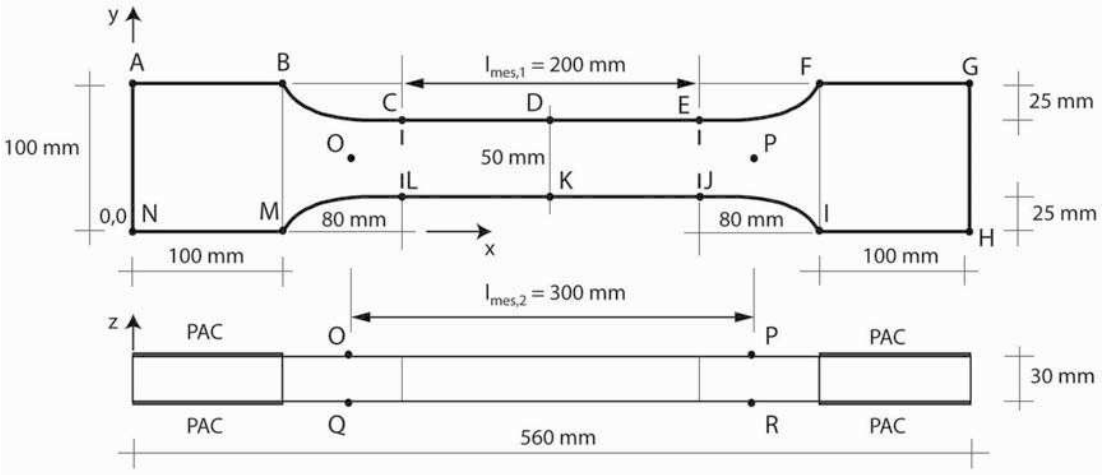
D.3.2 Les deux capteurs de déplacement sont fixés aux points C et E d'un côté de l'éprouvette et aux points L et J de l'autre côté. Deux autres capteurs de déplacement sont fixés sur les faces planes de l'éprouvette, aux points O et P sur l'une des faces et aux points Q et R sur l'autre, pour garantir la mesure du déplacement, au cas où la rupture se produirait à proximité immédiate de la zone du changement de section.

D.3.3 L'effort de traction est introduit selon l'axe x. Cet effort de traction peut être introduit au moyen de plaques d'aluminium (PAC) de 1,5 mm d'épaisseur collées sur les faces ABMN et FGHI et serrées dans les mors de la machine.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

D.3.4 Les conditions d'appui de l'éprouvette doivent être du type «encastré», sans possibilité de rotation.

Figure 12 Essai de traction uniaxiale – éprouvette et positionnement des capteurs



PAC: Plaques d'aluminium collées, épaisseur 1,5 mm

Courbes B–C, E–F, I–J, L–M selon le chiffre D.11

D.4 Équipement d'essai

L'équipement comporte une machine d'essais de résistance en compression et en traction (classe 1) selon la norme SN EN 12390-4, mesurant la force avec une précision de ± 0,2 kN, des capteurs de déplacement de ± 5 à ± 30 mm de course présentant un écart maximal de ± 0,2% sur la linéarité, ainsi que des instruments de mesure permettant de déterminer la longueur et l'épaisseur de l'éprouvette avec une incertitude de mesure maximale de ± 0,05 mm.

D.5 Confection et préparation des éprouvettes

D.5.1 Chaque série d'essai comportera six éprouvettes de géométrie conforme à la figure 12 et au chiffre D.11, à couler l'une après l'autre dans des moules séparés. Les inserts destinés au rétrécissement de la section seront réalisés à l'aide d'un matériau facilement déformable. Lors du coulage, on utilisera une goulotte de déversement assurant la mise en place continue du BFUP dans le moule, d'une extrémité à l'autre, tout en respectant l'épaisseur de 33 mm avec une tolérance de ± 2 mm. Pour les BFUP hautement thixotropes (étalement au cône d'Abrams < 400 mm), la mise en place se fera de la même manière mais sans goulotte de déversement. Avant d'exécuter l'essai, toutes les éprouvettes seront rectifiées jusqu'à une épaisseur constante de 30 mm (± 1 mm).

D.5.2 Après le processus de fabrication, les éprouvettes seront immédiatement protégées de la dessiccation à l'aide d'une feuille plastique et conservées à la température de 20 °C. Elles seront démoulées après un jour et conservées jusqu'à 3 à 5 jours avant l'essai dans les conditions prescrites par la norme SN EN 12390-2. Les éprouvettes seront protégées de la dessiccation lors des transports ou des manipulations liées au processus de rectification. Trois à cinq jours avant l'essai, les éprouvettes seront séchées pendant 24 heures dans l'air ambiant, à la température de 20 °C, avant le collage des plaques d'aluminium aux extrémités des éprouvettes et des boulons de fixation des capteurs de déplacement. Les éprouvettes seront ensuite à nouveau protégées de la dessiccation par une feuille plastique et conservées à la température de 20 °C jusqu'à l'exécution de l'essai.

D.5.3 On mesurera les dimensions de chaque éprouvette (longueur et largeur dans la zone centrale). L'épaisseur de l'éprouvette résultera de la valeur moyenne de 6 mesures effectuées à des endroits différents, 3 sur chaque côté longitudinal avec un espacement régulier.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

D.6 Exécution

D.6.1 Les trois premières des six éprouvettes seront testées selon le processus décrit ci-après. Chaque éprouvette sera soumise à un chargement monotone avec une vitesse de 0,05 mm/minute de déplacement moyen des capteurs (correspondant à une vitesse de la traverse d'environ 0,2 mm/minute) dans les domaines élastique et écrouissant de la réponse de l'éprouvette. Dans le domaine adoucissant, la vitesse de sollicitation pourra être augmentée à 0,5 mm/minute (correspondant à une vitesse de la traverse d'environ 0,4 mm/minute). La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées doit être de 5 Hz. L'essai est terminé lorsque la modification moyenne de longueur de l'éprouvette dans la zone de mesure est supérieure de 20% à la moitié de la longueur maximale des fibres utilisées.

D.6.2 Les trois éprouvettes restantes seront soumises chacune à trois cycles de charge–décharge jusqu'au tiers de la force maximale moyenne déterminée lors des trois premiers essais, et avec les mêmes vitesses de chargement et d'acquisition des valeurs mesurées. On leur appliquera ensuite le processus décrit sous D.6.1.

D.7 Résultats d'essais

L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes:
Pour chaque éprouvette:
- Courbe complète contrainte–déplacement moyen pour les deux séries de capteurs
- Contrainte maximale f_{Utu} et déformation correspondante ε_{Utu}
- Position et trajectoire des fissures localisées finales.

Pour chaque éprouvette testée selon D.6.2:
- Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u selon D.8.

Pour la série d'essai:
- Détermination des valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu}/f_{Ute} pour les 3 éprouvettes testées selon D.6.2
- Détermination de la résistance à la traction et de la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte pour les six éprouvettes
- Détermination de la sorte du BFUP selon le tableau 1, en admettant que les valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction et de la résistance à la traction soient utilisées comme valeurs caractéristiques de la résistance limite élastique à la traction f_{Utek} et de la résistance à la traction f_{Utuk}.

D.8 Détermination des valeurs de résistance et déformabilité

D.8.1 Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon D.6.2. On déterminera à cet effet le module sécant E_i pour chaque couple de valeurs constitué de la force F_i et de la déformation moyenne w_{Uti} enregistrées lors du dernier cycle de charge, avant que la force maximale n'ait été atteinte, à l'aide de la relation:

$$E_i = \frac{F_i}{b_m \cdot h_m} \cdot \frac{l_{mes}}{w_{Uti}} \tag{27}$$

D.8.2 On déterminera ensuite pour chaque valeur de la déformation w_{Uti} la moyenne mobile E_{im} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de w_{Uti}. Le domaine linéaire se terminera avec la force de valeur F_A, à partir de laquelle une réduction irréversible du module sécant moyen E_{mi} de plus de 1% aura été constatée.

D.8.3 On déterminera la valeur de la résistance limite élastique à la traction au moyen de la relation:

$$f_{Ute} = \frac{F_A}{b_m \cdot h_m} \tag{28}$$

Le module d'élasticité E_U correspond au module sécant E_i pour la force F_A.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

D.8.4 On déterminera enfin la valeur de la résistance à la traction au moyen de la relation:

$$f_{Utu} = \frac{F_B}{b_m \cdot h_m} \tag{29}$$

Si le BFUP présente un comportement écrouissant, F_B est la force maximale atteinte au cours de l'essai.

Si le BFUP ne présente pas de comportement écrouissant, F_B est la force moyenne jusqu'à une ouverture de fissure de 0,4 mm, dans le domaine adoucissant. La force moyenne est calculée selon l'équation (30), avec $A_{0,4}$ l'aire sous la courbe force–déplacement moyen jusqu'à 0,4 mm de déplacement (base de mesure $l_{mes,2}$):

$$F_B = \frac{A_{0,4}}{0{,}4 \text{ mm}} \tag{30}$$

Dans le cas où le BFUP présente un comportement écrouissant, la déformation d'écrouissage ε_{Utu} sera celle pour la force maximale atteinte F_B.

D.9 Rapport d'essai

Le rapport d'essai contiendra les données suivantes:
- Nom et adresse du mandant, nom de l'objet
- Nom du laboratoire d'essai et nom du responsable de l'essai
- Référence au présent document et mention de tout écart par rapport aux spécifications qu'il contient
- Identification des éprouvettes, dates de fabrication et d'essai
- Dimensions mesurées de chaque éprouvette (longueur, largeur, épaisseur)
- Résultats d'essai selon D.7 et D.8.

D.10 Précision

D.10.1 La précision de mesure de l'essai sera caractérisée au moyen d'un témoin de référence en aluminium de mêmes dimensions. La reproductibilité des mesures de force et de déplacement (en se fondant sur la détermination du module d'élasticité) sera testée dans le domaine élastique de l'aluminium par 6 cycles de charge–décharge.

D.10.2 La concordance entre laboratoires sera contrôlée avec les mêmes éprouvettes de référence constituées des mêmes matériaux et soumises aux mêmes conditions de coulée et de cure.

D.11 Coordonnées des points de découpe des éprouvettes

Tableau 7 Coordonnées des points du segment B–C (selon figure 12).
Les segments (E–F, I–J, L–M) s'obtiennent par symétrie.

Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x	mm	100,0	104,0	108,0	112,0	116,0	120,0	124,0	128,0	132,0	136,0	140,0
y	mm	100,0	94,4	90,0	86,6	84,0	81,9	80,4	79,1	78,2	77,4	76,8

Point		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
x	mm	144,0	148,0	152,0	156,0	160,0	164,0	168,0	172,0	176,0	180,0
y	mm	76,4	76,0	75,8	75,6	75,4	75,3	75,2	75,1	75,0	75,0

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe E (normative)
Essai de traction par flexion

E.1 **Domaine d'application**

Les chiffres qui suivent spécifient une méthode permettant de déterminer la réponse force–flèche d'une éprouvette en BFUP soumise à la flexion en 4 points.

E.2 **Définitions**

E.2.1 La réponse force–flèche d'une éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force–flèche (F–δ) jusqu'à une force résiduelle égale à 20% de la force maximale ou par une flèche moyenne à mi-portée égale à 25 mm.

E.2.2 La flèche moyenne à mi-portée est définie comme la valeur moyenne des mesures des 2 capteurs inductifs fixés à mi-portée de l'éprouvette, d'un côté et de l'autre de cette dernière.

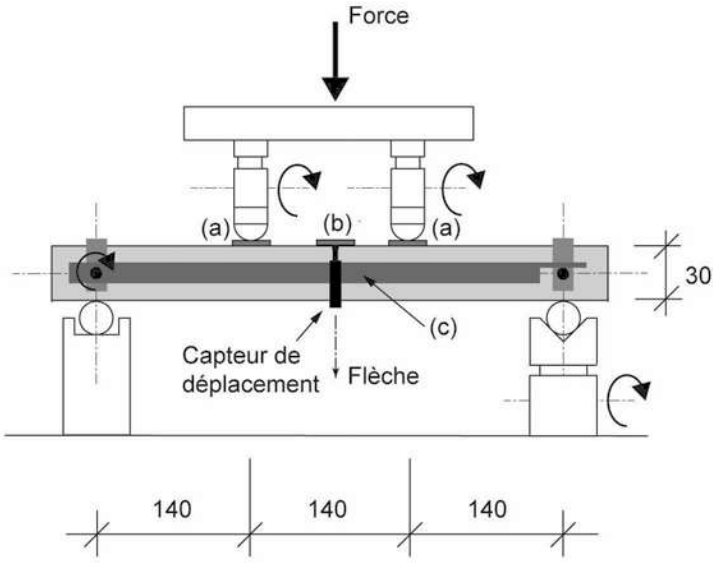
E.3 **Principe**

E.3.1 L'essai de flexion 4 points est réalisé selon la figure 13 au moyen d'une machine disposant d'une plage de mesure de 50 à 200 kN et asservie au déplacement du piston.

E.3.2 L'éprouvette est disposée de façon à soumettre la face coffrée à la compression. Deux capteurs de déplacement sont fixés à mi-portée d'un côté et de l'autre de l'éprouvette sur un châssis métallique (c) placé à mi-hauteur de l'éprouvette et solidaire de celle-ci par des fixations articulées au droit des appuis. La flèche sera mesurée sur une plaquette de référence (b) fixée en face supérieure de l'éprouvette. L'effort de flexion sera réparti uniformément au moyen de plaques déformables (par exemple en plomb) placées sous les deux points d'application (a) des déplacements.

E.3.3 L'un des appuis inférieurs de l'éprouvette permettra une rotation dans le plan transversal à la ligne d'appui. Les deux dispositifs d'application des déplacements imposés devront présenter la même capacité de rotation.

Figure 13 Essai de flexion 4 points sur des plaques de dimensions 500 mm × 100 mm × 30 mm



SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

E.4 Équipement d'essai

L'équipement comporte une machine d'essais de résistance en compression et en traction (classe 1) selon la norme SN EN 12390-4, mesurant la force avec une précision de ± 0,2 kN, des capteurs de déplacements de ± 20 à ± 30 mm de course présentant un écart maximal de ± 0,2% sur la linéarité ainsi que des instruments de mesure permettant de déterminer la longueur et l'épaisseur de l'éprouvette avec une incertitude de mesure maximale de ± 0,05 mm. La figure 13 présente la géométrie des points d'application des déplacements à imposer.

E.5 Préparation des éprouvettes

E.5.1 Les éprouvettes sont des plaques de dimensions 500 mm × 100 mm × 30 mm.

E.5.2 Pour les *essais initiaux* et les *essais de qualité*, les éprouvettes seront confectionnées de la manière suivante: chaque série d'essais comprendra six éprouvettes de dimensions 500 mm × 100 mm × 33 mm, à couler l'une après l'autre, dans des moules séparés, en respectant l'épaisseur de 33 mm avec une tolérance de ± 2 mm. On utilisera pour le coulage une goulotte de déversement assurant la mise en place continue du BFUP dans le moule, d'une extrémité à l'autre. Pour les BFUP hautement thixotropes (étalement au cône d'Abrams < 400 mm), la mise en place se fera de la même manière mais sans goulotte de déversement. Pour l'exécution de l'essai, toutes les éprouvettes doivent présenter une épaisseur constante de 30 mm (± 1 mm). En règle générale, les éprouvettes seront rectifiées. L'adéquation et l'équivalence d'un procédé divergent doivent être justifiées par l'usager de ce procédé.

E.5.3 Pour les *essais de convenance*, on coulera de manière identique deux plaques de dimensions 700 mm × 700 mm × 33 mm, en respectant l'épaisseur de 33 mm avec une tolérance de ± 2 mm. Après le démoulage, le sens du coulage sera indiqué sur les plaques et sur les moules. On prélèvera sur l'une des deux plaques six éprouvettes dont la longueur sera parallèle au sens de coulage et sur l'autre plaque six éprouvettes dont la longueur sera perpendiculaire au sens de coulage. Celui-ci sera clairement indiqué sur chaque éprouvette. Pour l'exécution de l'essai, toutes les éprouvettes doivent présenter une épaisseur constante de 30 mm (± 1 mm). En règle générale, les éprouvettes seront rectifiées. L'adéquation et l'équivalence d'un procédé divergent doivent être justifiées par l'usager de ce procédé. Le processus de coulé devra correspondre aux conditions de mise en place du BFUP lors de l'exécution (coulage horizontal par exemple, ou coulage vertical entre deux parois coffrées).

Pour les BFUP autoplaçants ou légèrement thixotropes (étalement au cône d'Abrams ≥ 400 mm), la mise en place s'effectuera manuellement en utilisant une goulotte de déversement assurant la mise en place continue du BFUP dans le moule, d'une extrémité à l'autre. Pour les BFUP hautement thixotropes (étalement au cône d'Abrams < 400 mm), les plaques seront confectionnées selon le processus de mise en place utilisé pour l'exécution.

E.5.4 Après le processus de fabrication, les plaques ou les éprouvettes seront immédiatement protégées de la dessiccation à l'aide d'une feuille plastique, et conservées à la température de 20 °C. Elles seront démoulées après un jour et conservées jusqu'à 3 à 5 jours avant l'essai dans les conditions prescrites par la norme SN EN 12390-2. Les éprouvettes seront protégées de la dessiccation lors des transports ou des manipulations liées aux processus de prélèvement et de rectification. Vingt-quatre heures avant l'essai, les éprouvettes seront séchées dans l'air ambiant, à la température de 20 °C, puis protégées à nouveau de la dessiccation par emballage dans une feuille plastique.

E.5.5 On mesurera les dimensions de chaque éprouvette (longueur et largeur dans la zone centrale). L'épaisseur de l'éprouvette résultera de la valeur moyenne de 6 mesures effectuées à des endroits différents, 3 sur chaque côté longitudinal avec un espacement régulier.

E.6 Exécution

E.6.1 Les trois premières des six éprouvettes seront testées selon le processus décrit ci-après. Chaque éprouvette sera soumise à un chargement monotone avec une vitesse de déplacement du piston de 0,5 mm/minute jusqu'à ce que la force maximale soit atteinte, puis de 5 mm/minute jusqu'à ce qu'une flèche moyenne de 25 mm à mi-portée soit atteinte. La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées doit être de 5 Hz.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

E.6.2 Les trois éprouvettes restantes seront soumises chacune à trois cycles de charge–décharge jusqu'au quart de la force maximale moyenne déterminée lors des trois premiers essais, et avec les mêmes vitesses de chargement et d'acquisition des valeurs mesurées. On leur appliquera ensuite le processus décrit sous E.6.1.

E.7 Résultats d'essais

E.7.1 Dans le cas des essais de convenance selon E.5.3, chaque direction de prélèvement constitue une série d'essais avec 6 éprouvettes.

E.7.2 L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes:

Pour chaque éprouvette:
- Courbe complète force–flèche moyenne
- Contrainte f_{Utu} correspondant à la force de pic F_B selon figure 14a
- Position et trajectoire de la (des) fissure(s) localisée(s) finale(s).

En plus, pour chaque éprouvette testée selon E.6.2, analyse inverse selon E.8:
- Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u
- Dans le cas ou $f_{Utu} > f_{Ute}$, détermination de la limite d'écrouissage ε_{Utu}.

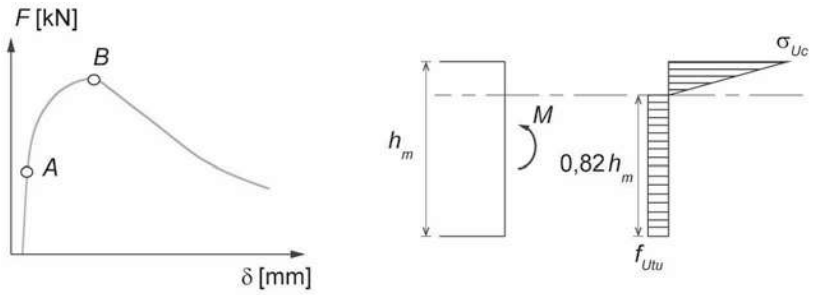
Pour la série d'essai:
- Détermination des valeurs moyennes de la contrainte en fin de domaine élastique, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu}/f_{Ute} pour les éprouvettes testées selon E.6.2
- Détermination de la résistance à la traction moyenne f_{Utu} pour les six éprouvettes.

E.7.3 Seulement pour le cas des essais initiaux ou de qualité (éprouvettes préparées selon E.5.2), détermination de la sorte de BFUP selon le tableau 1, en admettant que les valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction et de la résistance à la traction soient utilisées comme valeurs caractéristiques de la résistance limite élastique à la traction f_{Utek} et de la résistance à la traction f_{Utuk}.

E.8 Analyse inverse simplifiée

E.8.1 Le principe de l'analyse inverse simplifiée consiste à fractionner la courbe force–flèche, représentant la réponse de l'éprouvette, en segments tels qu'ils apparaissent sur la figure 14. Chaque segment sera analysé selon un modèle de comportement en vue de déterminer les valeurs s'y rapportant:

Figure 14 a) Principe de l'analyse inverse b) répartition admise des contraintes dans la section soumise à la force maximale (point B)



(1)
Le point A caractérise la fin du domaine de comportement élastique de l'éprouvette. Dans l'hypothèse d'un modèle linéaire élastique, il permet de déterminer la résistance limite élastique à la traction f_{Ute} de la manière suivante:

Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon E.6.2. On déterminera à cet effet le module sécant E_i pour chaque couple de valeurs constitué de la force F_i et de la flèche δ_i enregistrées lors du dernier cycle de charge, avant que la force maximale n'ait été atteinte, à l'aide de la relation:

$$E_i = 0{,}212 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3} \qquad (31)$$

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

On déterminera ensuite pour chaque valeur de la flèche δ_i la moyenne mobile E_{mi} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de δ_i. Le domaine linéaire se terminera avec la force de valeur F_A à partir de laquelle une réduction irréversible de la moyenne mobile du module sécant E_{mi} de plus de 1% aura été constatée.

On déterminera enfin la valeur de la résistance limite élastique au moyen de la relation:

$$f_{Ute} = F_A \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \tag{32}$$

On déterminera le module d'élasticité E_U à l'aide de la formule (31) pour la force de valeur F_A et la flèche de valeur correspondante.

(2)
Le point B caractérise la force maximale mesurée pendant l'essai. Sous cette force maximale F_B, on pourra admettre dans la section une répartition des contraintes selon la figure 14b. La résistance à la traction correspondante f_{Utu} sera obtenue à l'aide de la relation:

$$f_{Utu} = 0{,}383 \cdot F_B \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \tag{33}$$

(3)
Le domaine entre les points A et B en deçà de la force maximale caractérise, le cas échéant, l'activation progressive d'un comportement écrouissant et le début du comportement adoucissant.

Dans le cas où la valeur calculée f_{Utu} est inférieure à la valeur f_{Ute}, le BFUP ne présente pas de comportement écrouissant.

Seulement dans le cas où la valeur calculée f_{Utu} est supérieure à la valeur f_{Ute}, on effectuera une analyse inverse du domaine compris entre les points A et B.

Cette méthode permet de déterminer, pour un couple de valeurs F_i et δ_i, la contrainte de traction σ_{Uti} dans la fibre inférieure de la section de l'éprouvette d'essai dans le domaine à moment constant, à l'aide de la relation:

$$\sigma_{Uti} = 0{,}5 \cdot (1 - \alpha_i)^2 \cdot h_m \cdot \chi_i \cdot E \tag{34}$$

avec:

$$\lambda_i = \frac{46}{216} \cdot \frac{F_i}{\delta_i \cdot E_U} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3} \text{ et } \chi_i = \frac{216}{23} \cdot \frac{\delta_i}{l_m^2} \tag{35) et (36}$$

et α_i (λ_i) selon le tableau 8.

La déformation correspondant à la contrainte de traction σ_{Uti} est donnée par la relation:

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E_U} + \chi_i \cdot \alpha_i \cdot h_m \tag{37}$$

On utilisera 10 couples de valeurs F_i et δ_i entre les points A et B. On choisit la valeur de la force et de la flèche au premier point de calcul parmi les valeurs mesurées de telle sorte que la valeur λ_i correspondante soit égale à 0,5 ($\alpha_i > 0{,}5$ soit 50% de la section déjà plastifiée). Les 9 couples de valeurs suivants sont choisis régulièrement répartis le long de l'axe des valeurs de la flèche, entre le premier point et la flèche pour la force F_B.

Le procédé sera appliqué jusqu'à ce que la valeur de la contrainte calculée soit supérieure pour la première fois à la résistance à la traction f_{Utu} calculée au point (2). La valeur de la déformation correspondante sera la déformation ε_{Utu}, caractéristique du fait que la résistance à la traction est atteinte (écrouissage).

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Tableau 8 Coefficients α_i pour une valeur donnée de λ_i

λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i
0,00	0,988	0,25	0,674	0,50	0,500	0,75	0,326
0,01	0,941	0,26	0,666	0,51	0,493	0,76	0,319
0,02	0,915	0,27	0,658	0,52	0,487	0,77	0,311
0,03	0,896	0,28	0,651	0,53	0,480	0,78	0,303
0,04	0,879	0,29	0,644	0,54	0,473	0,79	0,295
0,05	0,863	0,30	0,636	0,55	0,467	0,80	0,287
0,06	0,850	0,31	0,629	0,56	0,460	0,81	0,279
0,07	0,838	0,32	0,622	0,57	0,453	0,82	0,270
0,08	0,826	0,33	0,615	0,58	0,446	0,83	0,261
0,09	0,815	0,34	0,608	0,59	0,440	0,84	0,253
0,10	0,804	0,35	0,601	0,60	0,433	0,85	0,244
0,11	0,794	0,36	0,594	0,61	0,426	0,86	0,235
0,12	0,784	0,37	0,587	0,62	0,419	0,87	0,226
0,13	0,774	0,38	0,580	0,63	0,412	0,88	0,216
0,14	0,764	0,39	0,574	0,64	0,406	0,89	0,206
0,15	0,755	0,40	0,567	0,65	0,399	0,90	0,196
0,16	0,746	0,41	0,560	0,66	0,392	0,91	0,185
0,17	0,738	0,42	0,553	0,67	0,385	0,92	0,174
0,18	0,729	0,43	0,547	0,68	0,378	0,93	0,161
0,19	0,721	0,44	0,540	0,69	0,370	0,94	0,149
0,20	0,712	0,45	0,533	0,70	0,363	0,95	0,135
0,21	0,705	0,46	0,527	0,71	0,355	0,96	0,120
0,22	0,697	0,47	0,520	0,72	0,348	0,97	0,104
0,23	0,689	0,48	0,513	0,73	0,341	0,98	0,082
0,24	0,681	0,49	0,507	0,74	0,334	0,99	0,060
						1,00	0,000

E.9 Rapport d'essai

Le rapport d'essai contiendra les données suivantes:
- Nom et adresse du mandant, nom de l'objet
- Nom du laboratoire d'essai et nom du responsable de l'essai
- Référence au présent document et mention de tout écart par rapport aux spécifications qu'il contient
- Identification des éprouvettes avec, pour les essais de convenance, indication du sens de prélèvement par rapport au sens de coulage
- Masse volumique de chaque éprouvette avant l'essai
- Dimensions mesurées de chaque éprouvette (longueur, largeur et épaisseur)
- Courbes complètes force–flèche moyenne pour chaque éprouvette
- Force maximale et flèche correspondante pour chaque éprouvette
- Position des fissures finales pour chaque éprouvette avec documentation photographique le cas échéant
- Résultats d'essai et d'analyse inverse selon E.7
- Pour les essais initiaux ou de qualité, classification de la sorte de BFUP selon tableau 1.

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich
i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

E.10 **Précision**

E.10.1 La précision de mesure de l'essai sera caractérisée au moyen d'un témoin de référence en aluminium de mêmes dimensions. La reproductibilité des mesures de force et de flèche (en se fondant sur la détermination du module d'élasticité) sera testée dans le domaine élastique de l'aluminium par 6 cycles de charge–décharge.

E.10.2 La concordance entre laboratoires sera contrôlée avec les mêmes éprouvettes de référence constituées des mêmes matériaux et soumises aux mêmes conditions de coulée et de cure.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Annexe F (informative)
Publications

Cette annexe fait référence à des publications qui apportent des compléments au sujet du cahier technique.

F.1 Normes

Norme SIA 262/1	Construction en béton – Spécifications complémentaires
SN EN 196-1	Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: Détermination des résistances mécaniques
SN EN 197-1	Ciment – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments
SN EN 934-1	Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 1: Exigences communes
SN EN 934-2	Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2: Adjuvants pour bétons – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage
SN EN 13263-1	Fumée de silice pour béton – Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité
SN EN 14889-1	Fibres pour béton – Partie 1: Fibres d'acier – Définition, spécifications et conformité
SN EN 14889-2	Fibres pour béton – Partie 2: Fibres de polymère – Définition, spécifications et conformité

Éditeur: SIA, Zurich (www.sia.ch)

F.2 Autres publications

Recommandations: Bétons fibrés à ultra-hautes performances (2013)

Éditeur: Association Française de Génie Civil (www.afgc.asso.fr)

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

SIA 2052, Copyright © 2016 by SIA Zurich

Annexe G (informative)
Index des termes techniques

Le tableau 9 contient la liste des termes techniques définis au chapitre 1 classés par ordre alphabétique.

Tableau 9 Index des termes techniques

Terme français	**Terme allemand**	**Terme italien**	**Terme anglais**	**Chiffre**
Béton fibré ultra-performant	Ultra-Hochleistungs-Faserbeton	Calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni	Ultra-high performance fiber reinforced concrete	1.1.1
BFUP armé	Bewehrter UHFB	CFAP armato	Reinforced UHPFRC	1.1.3
BFUP précontraint	Vorgespannter UHFB	CFAP precompresso	Prestressed UHPFRC	1.1.4
Comportement adoucissant	Entfestigung	Riduzione della resistenza	Strain softening	1.1.9
Comportement écrouissant	Verfestigung	Incrudimento	Strain hardening	1.1.11
Degré d'entrave	Einspanngrad	Grado di incastro	Degree of restraint	1.1.8
Maturité	Reife	Maturità	Maturity	1.1.10
Prémix	Premix	Premix	Premix	1.1.2
Résistance à la traction	Zugfestigkeit	Resistenza alla trazione	Tensile strength	1.1.6
Résistance limite élastique à la traction	Elastische Grenzzugfestigkeit	Limite della resistenza elastica alla trazione	Elastic limit tensile strength	1.1.7
Système mixte	Verbundsystem	Sistema composito	Composite system	1.1.5

Organisations représentées dans la commission SIA 262

EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
OFROU	Office Fédéral des Routes

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Commission SIA 262

		Représentant de
Président	Walter Kaufmann, prof. dr ing. dipl. EPF/SIA, Zurich	EPF Zurich
Membres	Manuel Alvarez, dr ing. dipl. EPF/SIA, Ittigen	OFROU
	Daniel Buschor, ing. dipl. EPF/SIA, Berthoud	Bureau d'études
	Christoph Czaderski, ing. dipl. EPF/SIA, Dübendorf	EMPA
	Stephan Etter, dr ing. dipl. EPF/SIA, Zurich	Bureau d'études
	Blaise Fleury, ing. dipl. EPF/SIA, Neuchâtel	Bureau d'études
	Hans Rudolf Ganz, dr ing. dipl. EPF/SIA, Bösingen	Ingénieur-conseil
	Daniel Heinzmann, dr ing. dipl. EPF/SIA, Zurich	HES
	Ernst Honegger, ing. dipl. EPF/SIA, Berne	Industrie
	Bernard Houriet, dr ing. dipl. EPF/SIA, Tramelan	Bureau d'études
	Fritz Hunkeler, dr ing. dipl. EPF/SIA, Wildegg	Laboratoire des matériaux
	Rudolf Lagger, ing. dipl. EPF, Thoune	Entreprise
	Peter Lunk, dr ing. dipl., Würenlingen	Industrie
	Aurelio Muttoni, prof. dr ing. dipl. EPF/SIA, Lausanne	EPFL
	Sylvain Plumey, dr ing. dipl. EPF/SIA, Porrentruy	Bureau d'études
	Ana Spasojevic, dr ing. dipl. EPF, Fribourg	Bureau d'études
	Kerstin Wassmann, ing. dipl., Würenlingen	Industrie
Procès-verbaux	Luca Trachsler, ing. dipl. EPF, Zurich	Bureau d'études

Groupe de travail BFUP de la commission SIA 262

Présidence	Eugen Brühwiler, prof. dr ing. dipl. EPF/SIA, Lausanne (jusqu'au 21 avril 2015)	EPFL
	Cornelius Oesterlee, prof. dr ing. dipl. TU, Bienne (à partir du 22 juillet 2015)	HES
Membres	Blaise Fleury, ing. dipl. EPF/SIA, Neuchâtel	Bureau d'études
	Lionel Moreillon, dr ing. dipl. ENPC, Lausanne	Bureau d'études
	Agnes Petit, dr ing. dipl. UNIL, Lyss	Entreprise
	Juan Francisco Rivero, ing. dipl. EPF/SIA, Saint-Gall	Administration
	René Suter, prof. dr ing. dipl. EPF/SIA, Fribourg	HES
	Richard Thürler, ing. dipl. EPF/SIA, Berne	Bureau d'études

Adoption et validité

La Commission centrale des normes de la SIA a adopté le présent cahier technique SIA 2052 le 17 novembre 2015.

Il est valable à partir du 1er mars 2016.

Copyright © 2016 by SIA Zurich

Tous les droits de reproduction, même partielle, de copie, intégrale ou partielle (photocopie, microcopie, CD-ROM, etc.), d'enregistrement sur ordinateur et de traduction sont réservés.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

sia

Schweizer Regel
Règle Suisse
Regola Svizzera

SIA 2052-C1:2017 Construction

592052-C1

Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung – Korrigenda C1 zum Merkblatt SIA 2052:2016

Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution

Correctif C1 au cahier technique SIA 2052:2016

Numéro de référence
SNR 592052:2017 fr

Valable dès: 2017-07-01

Éditeur
Societé suisse des ingénieurs
et des architectes
Case postale, CH-8027 Zurich

Nombre de pages: xx

Copyright © 2017 by SIA Zurich

Groupe de prix: 0

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Le présent correctif SIA 2052-C1:2017 au cahier technique SIA 2052:2016 a été approuvé par la commission SIA « Normes de structures porteuses » le 29 juin 2017.

Il est valable à partir du 1er juillet 2017.

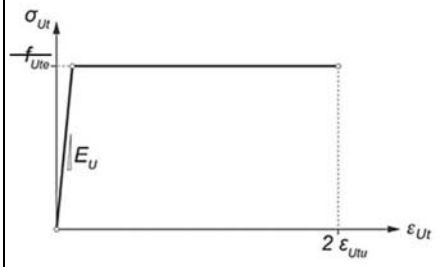
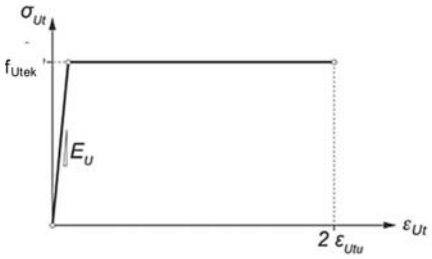
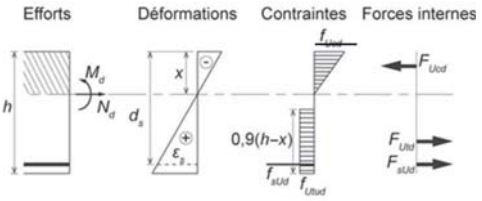
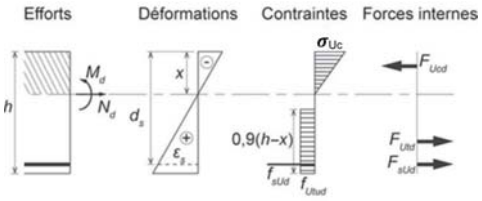
Il est mis à disposition sous www.sia.ch/correctif > SIA 2052.

i Norm Li cense by SI A EPFL Bi bl i ot hèque | 28. 02. 2018

Correctif C1 au cahier technique SIA 2052:2016 de (1er tirage 2016-03)

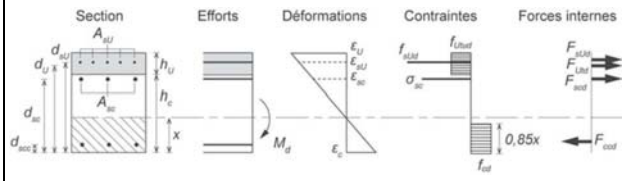
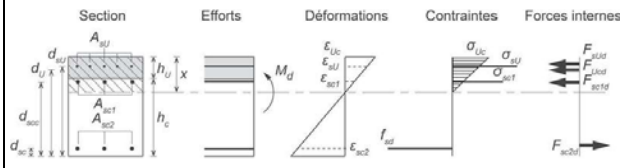
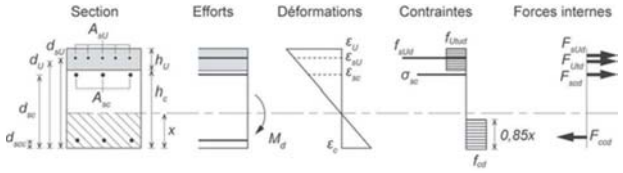
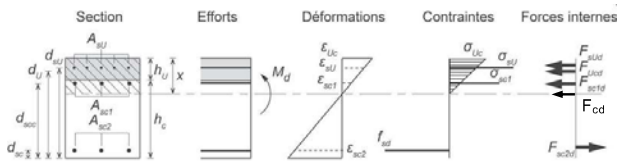
<table>
<tr><th>Page</th><th>Chiffre/
Figure</th><th>jusqu'à présent
(Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)</th><th>Correction
(Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)</th></tr>
<tr><td>7</td><td>1.1.7</td><td><s>Résistance</s> limite élastique à la traction;
Elastische Grenzzug<s>festigkeit</s> ; Limite della <s>resistenza</s> elastica alla trazione; Elastic limit tensile <s>strength</s>
Valeur de la contrainte lorsque la limite élastique du BFUP est atteinte sous une sollicitation de traction uniaxiale.</td><td>Contrainte limite élastique à la traction;
Elastische Grenzzug spannung ; Limite della tensione elastica alla trazione; Elastic limit tensile stress
Valeur de la contrainte lorsque la limite élastique du BFUP est atteinte sous une sollicitation de traction uniaxiale.</td></tr>
<tr><td>8</td><td>1.2.2
(nouveau)</td><td></td><td>b_{eff} ($M_{Rd,RU}$) largeur de la dalle participante en système mixte BFUP - Béton pour la détermination de $M_{Rd,\,RU}$</td></tr>
<tr><td>13</td><td>2.4.2.3</td><td>----
où les coefficients η_t, η_{hU} et η_k sont déterminés selon <s>4.2</s>.</td><td>----
où les coefficients η_t, η_{hU} et η_k sont déterminés selon 4.2.2 et 4.3.2.</td></tr>
<tr><td>14</td><td>3.2.1.2</td><td>----
Tableau 1 Sortes de BFUP
<table>
<tr><th>Sorte</th><th></th><th>U0</th><th>UA</th><th>UB</th></tr>
<tr><td>f_{Utek}</td><td>N/mm²</td><td>≥ 7,0</td><td>≥ 7,0</td><td>≥ 10,0</td></tr>
<tr><td>f_{Utuk} /f_{Utek}</td><td></td><td>> 0,7</td><td>> 1,1</td><td>> 1,2</td></tr>
<tr><td>ε_{Utu}</td><td>‰</td><td></td><td>> 1,5</td><td>> 2,0</td></tr>
<tr><td>f_{Uck}</td><td>N/mm²</td><td>≥ 120</td><td>≥ 120</td><td>≥ 120</td></tr>
</table></td><td>----
Tableau 1 Sortes de BFUP
<table>
<tr><th>Sorte</th><th></th><th>U0</th><th>UA</th><th>UB</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Non écrouissant</td><td colspan="2">Ecrouissant</td></tr>
<tr><td>f_{Utek}</td><td>N/mm²</td><td>≥ 7,0</td><td>≥ 7,0</td><td>≥ 10,0</td></tr>
<tr><td>f_{Utuk} /f_{Utek}</td><td></td><td>> 0,7</td><td>> 1,1</td><td>> 1,2</td></tr>
<tr><td>ε_{Utu}</td><td>‰</td><td></td><td>> 1,5</td><td>> 2,0</td></tr>
<tr><td>f_{Uck}</td><td>N/mm²</td><td>≥ 120</td><td>≥ 120</td><td>≥ 120</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich
iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

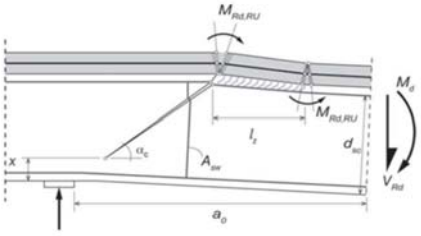
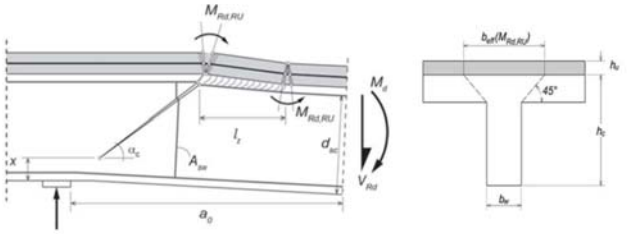
Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
18	3.3.3 Figure 5		
20	4.2.3.1 Figure 7		
22	4.3.1.2	L'état d'autocontraintes dépend des propriétés des matériaux et de la structure porteuse. Il est dé- fini par le degré d'entrave: $\mu_U = \frac{\sigma_{Ue}}{\sigma_{Ue,\max}}$ (18) avec: $\sigma_{Uc,\max} = \frac{\varepsilon_{Us,\infty}}{1+\varphi_{U\infty}(t_\infty,t_0)} \cdot E_{Um}$	L'état d'autocontraintes dépend des propriétés des matériaux et de la structure porteuse. Il est dé- fini par le degré d'entrave: $\sigma_{Ue} = \mu_U \cdot \frac{\sigma_{Ue,max}}{1+\varphi_{U\infty}(t_\infty,t_0)}$ (18) avec: $\sigma_{Ue,max} = \varepsilon_{Us\infty} \cdot E_{Um}$ Pour les sortes UA et UB de BFUP, E_{Um} peut être réduit de 60%.
23	4.3.1.4	Lors de la détermination de contraintes à l'état-limite de service et de résis- tances ultimes, on tiendra compte des déformations initiales dues aux défor- mations entravées, aux sollicitations existantes dans l'élément de béton lors du renforcement ou à celles dues à la précontrainte. À l'état- limite ultime, et à	Lors de la détermination de contraintes à l'état-limite de service et de résistances ultimes, on tiendra compte des déformations initiales dues aux déformations entravées, aux sollicitations existantes dans l'élément de béton lors du renfor- cement ou à celles dues à la précontrainte. À l'état- limite ultime, et à condition

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich

iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
		condition que le BFUP mis en œuvre soit des sortes UA ou UB, on pourra négliger dans le système mixte les sollicitations dues aux déformations entravées au jeune âge, en particulier **~~les déformations dues à la traction~~** dans le BFUP.	que le BFUP mis en œuvre soit des sortes UA ou UB, on pourra négliger dans le système mixte les sollicitations dues aux déformations entravées au jeune âge, en particulier les contraintes dues au retrait entravé dans le BFUP.
23	4.3.3.1.1	On pourra déterminer la résistance ultime en flexion simple à l'aide du modèle de la figure 9. Les déformations initiales seront prises en considération selon 4.3.1.4. Pour la flexion oblique et la flexion composée, on utilisera le même modèle par analogie. Figure 9 Résistance à la flexion d'éléments mixtes à l'état-limite ultime a) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en traction  b) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en compression  	On pourra déterminer la résistance ultime en flexion simple à l'aide du modèle de la figure 9. Les déformations initiales seront prises en considération selon 4.3.1.4. Pour la flexion oblique et la flexion composée, on utilisera le même modèle par analogie. Pour la largeur de la dalle participante, se référer à la SIA 262, 4.1.3.3.2. Figure 9 Résistance à la flexion d'éléments mixtes à l'état-limite ultime a) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en traction  b) pour des moments de flexion lorsque le BFUP est sollicité en compression 
24	4.3.3.2	Effort tranchant La résistance à l'effort tranchant des éléments mixtes BFUP–béton sera déterminée à partir de la superposition des résistances à l'effort tranchant de la partie en béton armé et de la couche en BFUP armé selon la figure 10:	Effort tranchant La résistance à l'effort tranchant des éléments mixtes BFUP – Béton sollicités par une charge ponctuelle à une distance a_0 de la zone d'appui sera déterminée par la superposition des résistances à l'effort tranchant de la partie en béton armé et de

iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
			la couche de BFUP armé selon la figure 10. Le principe de calcul est valable pour $h_U/h_c > 0{,}1$. En cas de divergences, des analyses approfondies sont requises. Dans le cas d'une sollicitation à l'effort tranchant, une diffusion à 45° de la poutre dans la dalle peut être admise pour la largeur participante de la dalle pour la détermination de $M_{Rd,RU}$ (figure 10b).
		Figure 10 Modèle pour la détermination de la résistance à l'effort tranchant  	Figure 10 Modèle pour la détermination de la borne supérieure de la résistance à l'effort tranchant 
		------	------
		Pour l'inclinaison α_c de la fissure diagonale de flexion–effort tranchant dans le béton armé, on pourra admettre: $20° \le \alpha_c \le 60°$. ~~**Lors d'une première évaluation, on admettra: $\alpha_c = 35°$.**~~	Pour l'inclinaison α_c de la fissure diagonale de flexion–effort tranchant dans le béton armé, on pourra admettre: $20° \le \alpha_c \le 60°$. L'inclinaison doit être choisie de telle sorte que la valeur minimale de la résistance à l'effort tranchant soit trouvée.
		------	------
		- Valeur de dimensionnement de la résistance ultime de l'armature d'effort tranchant verticale: ~~$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot f_{sd} \cdot \cot\alpha$~~ (24)	- Valeur de dimensionnement de la résistance ultime de l'armature d'effort tranchant verticale: $\boldsymbol{V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot (d_{sc} - x) \cdot cot\alpha_c \cdot f_{sd}}$ (24)
		------	------

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich

iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
35	D.2.1	La réponse force–déplacement de l'éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force–déplacement jusqu'à une force résiduelle égale à **~~20%~~** de la force maximale **~~ou une variation moyenne de la longueur de l'éprouvette dans la zone de mesure supérieure de 20% à la demi-longueur maximale des fibres utilisées~~**.	La réponse force–déplacement de l'éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force–déplacement jusqu'à une force résiduelle égale à 50% de la force maximale.
37	D.6.1	**~~Les trois premières des six éprouvettes seront testées selon le processus décrit ci-après. Chaque éprouvette sera soumise à un chargement monotone avec une vitesse de 0,05 mm/minute de déplacement moyen des capteurs (correspondant à une vitesse de la traverse d'environ 0,2 mm/minute) dans les domaines élastique et écrouissant de la réponse de l'éprouvette. Dans le domaine adoucissant, la vitesse de sollicitation pourra être augmentée à 0,5 mm/minute (correspondant à une vitesse de la traverse d'environ 0,4 mm/minute). La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées doit être de 5 Hz. L'essai est terminé lorsque la modification moyenne de longueur de l'éprouvette dans la zone de mesure est supérieure de 20% à la moitié de la longueur maximale des fibres utilisées.~~**	Les six éprouvettes seront testés selon le processus décrit ci-après. Dans un premier temps, trois cycles de chargement/déchargement avec déplacement imposé monotone seront exécutés. La vitesse des cycles s'élève à 0,05 mm par minute basée sur une valeur moyenne des capteurs de déplacement (correspond à une vitesse de la traverse d'environ 0,2 mm par minute). Une contrainte inférieure et supérieure de respectivement 0,5 MPa et 3 MPa seront appliquées. Chaque cycle de chargement/déchargement est suivi par une phase d'attente de 10 secondes pendant laquelle la position du piston reste constante. La contrainte de traction doit être calculée avec les dimensions effectives de l'éprouvette d'essai. Les éprouvettes d'essai seront ensuite chargées avec une vitesse de 0,05 mm par minute jusqu'à l'atteinte de la charge maximale. Dans le domaine adoucissant la vitesse de déplacement peut être augmentée à 0,5 mm (correspond à une vitesse de la traverse d'environ 0,4 mm par minute). L'essai est terminé quand la force mesurée atteint 50% de la force maximale. La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées s'élève toujours à 5 Hz.
37	D.6.2	**~~Les trois éprouvettes restantes seront soumises chacune à trois cycles de charge–décharge jus- qu'au tiers de la force maximale moyenne déterminée lors des trois premiers essais, et avec les mêmes vitesses de chargement et d'acquisition des valeurs mesurées. On leur appliquera ensuite le processus décrit sous D.6.1.~~**	
37	D.7	Résultats d'essais L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes: Pour chaque éprouvette: – Courbe complète contrainte–déplacement moyen pour les deux séries de capteurs	Résultats d'essais Les écarts entre les courbes contraintes-déformations des différentes éprouvettes d'essai sont à évaluer. L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes: Pour chaque éprouvette:

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich

iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
		– Contrainte maximale f_{Utu} et déformation correspondante E_{Utu} – Position et trajectoire des fissures localisées finales. ~~**Pour chaque éprouvette testée selon D.6.2:**~~ – Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u selon D.8. Pour la série d'essai: – Détermination des valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu} /f_{Ute} ~~**pour les 3 éprouvettes testées selon D.6.2**~~ – Détermination de la résistance à la traction et de la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte pour les six éprouvettes – Détermination de la sorte du BFUP selon le tableau 1, en admettant que les valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction et de la résistance à la traction soient utilisées comme valeurs caractéristiques de la résistance limite élastique à la traction f_{Utek} et de la résistance à la traction f_{Utuk}.	– Courbe complète contrainte–déplacement moyen pour les deux séries de capteurs – Contrainte maximale f_{Utu} et déformation correspondante E_{Utu} – Position et trajectoire des fissures localisées finales. – Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u selon D.8. Pour la série d'essai: – Détermination des valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu} /f_{Ute}. – Détermination de la résistance à la traction et de la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte pour les six éprouvettes – Détermination de la sorte du BFUP selon le tableau 1, en admettant que les valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction et de la résistance à la traction soient utilisées comme valeurs caractéristiques de la résistance limite élastique à la traction f_{Utek} et de la résistance à la traction f_{Utuk}.
37	D.8.1	Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon ~~***D.6.2.***~~ ~~**----**~~	Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon D.6.1. ----
37	D.8.2	On déterminera ensuite pour chaque valeur de la déformation w_{Uti} la moyenne mobile E_{im} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de ~~w_{Uti}~~ Le domaine linéaire se terminera avec la force de valeur F_A, à partir de laquelle une réduction irréversible du module sécant moyen E_{mi} de plus de ~~***1%***~~ aura été constatée.	On déterminera ensuite pour chaque valeur de la déformation w_{Uti} la valeur moyenne correspondante E_{mi} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de la valeur de la contrainte calculée. Le domaine linéaire se terminera avec la force de valeur F_A, à partir de laquelle une réduction irréversible du module sécant moyen E_{mi} de plus de ***10%*** aura été constatée. La réduction se réfère à une valeur de comparaison correspondante à une contrainte de 2 MPa.
39	E.2.1	La réponse force–flèche d'une éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force– flèche (F– δ) jusqu'à une force résiduelle égale à ~~**20% de la force maximale ou par une flèche moyenne à mi-portée égale à 25 mm.**~~	La réponse force–flèche d'une éprouvette en BFUP est caractérisée par la courbe complète force– flèche (F– δ) jusqu'à une force résiduelle égale à ***50%*** de la force maximale.
40	E.6.1	~~**Les trois premières des six éprouvettes seront testées selon le processus décrit ci-après. Chaque éprouvette sera soumise à un chargement monotone avec une vitesse de déplacement du piston de 0,5 mm/minute**~~	Les six éprouvettes seront testés selon le procvessus décrit ci après. Dans un premier temps, trois cycles de chargement/déchargement avec une vitesse de déplacement du piston de 0,5 mm par minute et une contrainte inférieure et supérieure de respectivement 0,5 MPa et 3 MPa seront exécutés. Chaque cycle

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich
iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
		~~**jusqu'à ce que la force maximale soit atteinte, puis de 5 mm/minute jusqu'à ce qu'une flèche moyenne de 25 mm à mi-portée soit atteinte. La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées doit être de 5 Hz.**~~	de chargement/déchargement est suivi par une phase d'attente de 10 secondes pendant laquelle la position du piston reste constante. La contrainte de flexion doit ètre calculée avec les dimensions effectives de l'éprouvette d'essai. Les éprouvettes d'essai seront ensuite chargées avec une vitesse de déplacement du piston de 0,5 mm par minute jusqu'à l'atteinte de la force maximale et ensuite avec une vitesse de 2 mm par minute. L'essai est terminé quand la force mesurée atteint 50% de la force maximale. La fréquence d'acquisition des valeurs mesurées 'élève toujours à 5 Hz.
41	E.6.2	~~**Les trois éprouvettes restantes seront soumises chacune à trois cycles de charge–décharge jusqu'au quart de la force maximale moyenne déterminée lors des trois premiers essais, et avec les mêmes vitesses de chargement et d'acquisition des valeurs mesurées. On leur appliquera ensuite le pro- cessus décrit sous E.6.1.**~~	
41	E.7.2	L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes: Pour chaque éprouvette: – Courbe complète force–flèche moyenne – Contrainte f_{Utu} correspondant à la force de pic F_B selon figure 14a – Position et trajectoire de la (des) fissure(s) localisée(s) finale(s). En plus, pour chaque éprouvette ~~**testée selon E.6.2**~~, analyse inverse selon E.8: – Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u – Dans le cas ou $f_{Utu} > f_{Ute}$, détermination de la limite d'écrouissage ε_{Utu}. Pour la série d'essai: – Détermination des valeurs moyennes de la contrainte en fin de domaine élastique, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu} / f_{Ute} ~~**pour les éprouvettes testées selon E.6.2**~~ – Détermination de la résistance à la traction moyenne f_{Utu} pour les six éprouvettes.	Les écarts entre les courbes contraintes-déformations des différentes éprouvettes d'essai sont à évaluer. L'évaluation des résultats d'essais doit contenir les données suivantes: Pour chaque éprouvette: – Courbe complète force–flèche moyenne – Contrainte f_{Utu} correspondant à la force de pic F_B selon figure 14a – Position et trajectoire de la (des) fissure(s) localisée(s) finale(s). En plus, pour chaque éprouvette, analyse inverse selon E.8: – Contrainte en fin de domaine élastique f_{Ute} avec déformation correspondante et module d'élasticité E_u – Dans le cas ou $f_{Utu} > f_{Ute}$, détermination de la limite d'écrouissage ε_{Utu}. Pour la série d'essai: – Détermination des valeurs moyennes de la contrainte en fin de domaine élastique, du module d'élasticité, et du rapport f_{Utu} / f_{Ute} – Détermination de la résistance à la traction moyenne f_{Utu} pour les six éprouvettes.
41	E.8.1	~~**----**~~ Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon ~~**E.6.2**~~. On déterminera à cet effet le module sécant E_i pour chaque couple de valeurs constitué de la force F_i et de la flèche δ_i enregis-	**----** Le module d'élasticité est déterminé à l'aide des résultats des trois éprouvettes testées selon ***E.6.1.*** On déterminera à cet effet le module sécant E_i pour chaque couple de valeurs constitué de la force F_i et de la flèche δ_i enregistrées lors du dernier cycle de charge, avant que la force maximale n'ait été atteinte, à l'aide

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich

iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018

Page	Chiffre/ Figure	jusqu'à présent (Les passages erronés sont écrits en gras / biffé)	Correction (Les passages corrigés sont écrits en gras / italique)
		trées lors du dernier cycle de charge, avant que la force maximale n'ait été atteinte, à l'aide de la relation: $E_i = 0{,}212 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3}$ (31) On déterminera ensuite pour chaque valeur de la flèche δ_i la moyenne mobile E_{mi} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. ~~**Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de δ_i.**~~ ----	de la relation: $E_i = 0{,}212 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3}$ (31) Le couple de valeurs force et flèche se réfèrent à la contrainte inférieure de 0,5 MPa et à la déformation correspondante. On déterminera ensuite pour chaque valeur de la flèche δ_i la moyenne mobile E_{mi} à partir des 10 valeurs précédentes du module sécant E_i. Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de la valeur de la contrainte calculée. ----

SIA 2052- C1, Copyright © 2017 by SIA Zurich
iNorm License by SIA EPFL Bibliothèque | 28. 02. 2018