



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg



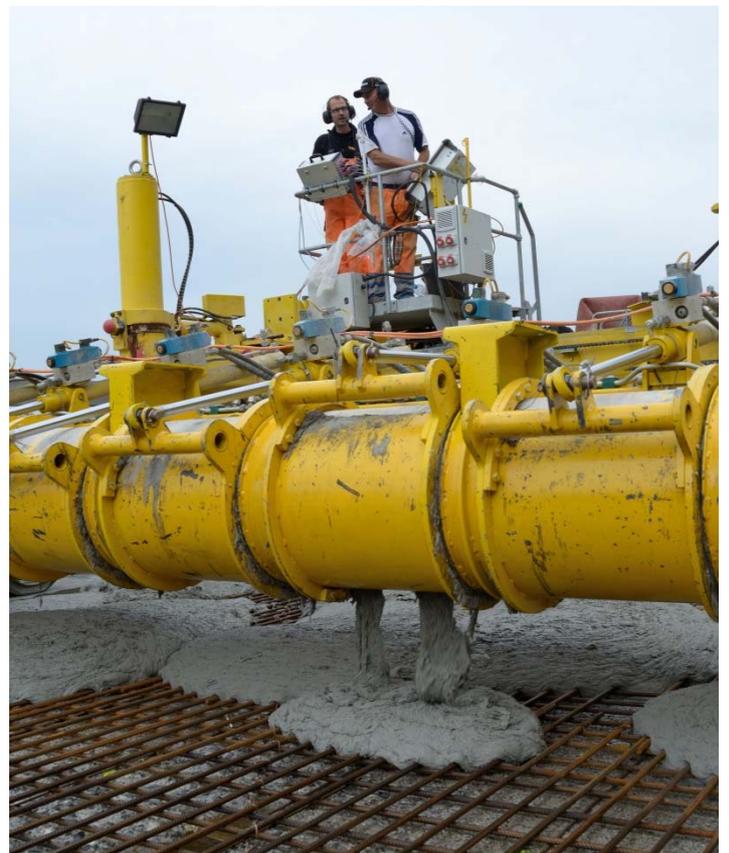
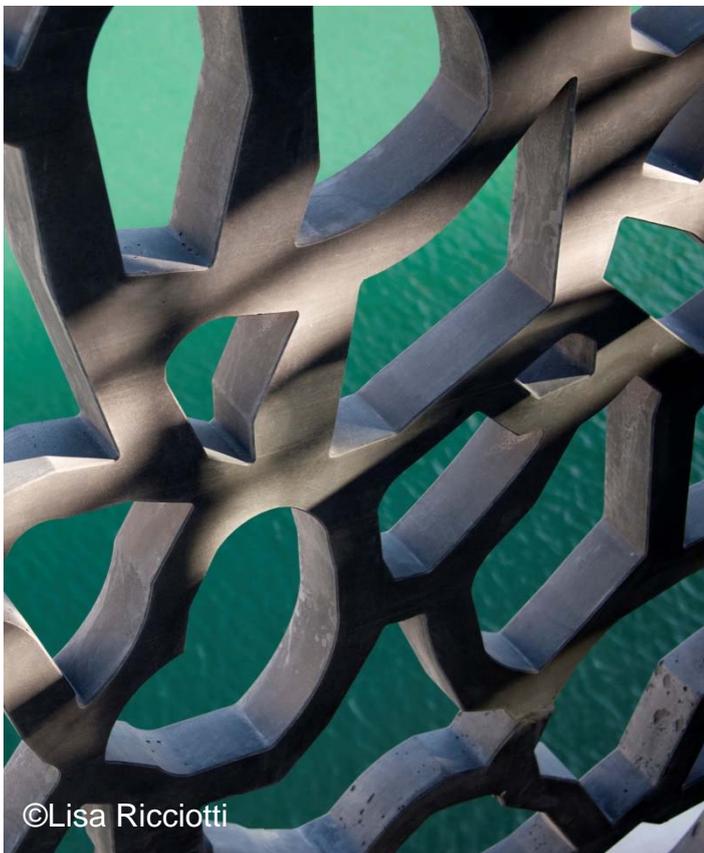
Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

2ème Journée d'étude, 22 octobre 2015
BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT
concevoir, dimensionner, construire

2. Fachtagung, 22. Oktober 2015
ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON
entwerfen, bemessen, bauen



Rédacteurs / Redaktoren

Eugen Brühwiler

Prof. Dr. dipl. Ing. ETH / SIA / IABSE
EPFL – ETH Lausanne

Cornelius Oesterlee

Prof. Dr ès sc. EPFL / dipl. Ing.
Bernser Fachhochschule, AHB

Dario Redaelli

Prof. Dr ès sc. EPFL / dipl. Ing.
Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg

René Suter

Prof Dr. dipl. Ing. ETH /SIA / IABSE
Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg

© Copyright 2015, EIA - FR
Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
ISBN 978-2-940156-50-4

© Copyright 2015, BFH - AHB
Bernser Fachhochschule; Architektur, Holz, Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
ISBN 978-3-9523787-6-2



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

2ème Journée d'étude, 22 octobre 2015

BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT

concevoir, dimensionner, construire

2. Fachtagung, 22. Oktober 2015

ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON

entwerfen, bemessen, bauen

Edité par / Herausgeber

Eugen Brühwiler
Cornelius Oesterlee
Dario Redaelli
René Suter

Partenaires / Partner

BETONSUISSE

element.ch 



CREABETON



Shaping a Better Life

stahlton

Betonsuisse
www.betonsuisse.ch

Element AG
www.element.ch

Sika AG
www.sika.com

Bekaert
www.bekaert.com

Artbeton MFP Dénériaz
www.mfp-prefa.ch
www.deneriaz.com

Creabeton
www.creabeton-materiaux.ch

Mapei
www.mapei.ch

Prelco
www.prelco.ch

Walo
www.walo.ch

Freyssinet
www.freyssinet.ch

BASF
www.basf.ch

Holcim
www.holcim.ch

Losinger-Marrazzi
www.losinger-marrazzi.ch

Stahlton
www.stahlton.ch

Partenaires académiques / Akademische Partner



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

Haute école d'ingénierie et
d'architecture Fribourg
www.heia-fr.ch



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Ecole Polytechnique Fédérale de
Lausanne
www.epfl.ch



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

Berner Fachhochschule
www.bfh.ch

Patronage / Patronat

s i a

SIA
ww.sia.ch

fib-CH

Schweizer Gruppe der *fib*
Groupe Suisse de la *fib*
ww.fib.ch

 **IABSE**

IVBH Schweizer Gruppe
AIPC Groupe Suisse
www.ivbh.ch

Remerciements

Les organisateurs remercient vivement Madame Elsy Saloumi, collaboratrice scientifique au sein de l'Institut des Technologies de l'Environnement Construit (iTEC) de l'HEIA, pour son engagement et sa collaboration à l'organisation de cette journée d'études.

Avant-propos / Vorwort

Les nouveaux matériaux de construction ont depuis toujours donné une impulsion décisive au développement de l'ingénierie des structures. Des bétons fibrés ultra-performants (BFUP) sont appliqués en Suisse depuis plus de 10 ans pour renforcer des structures en béton et dans les nouvelles constructions. Aujourd'hui, grâce à leurs propriétés de résistance et durabilité, les BFUP s'imposent de plus en plus comme nouveaux matériaux de construction.

Suivant la 1^{ère} journée d'étude BFUP du 27 octobre 2011, cette deuxième journée d'étude a pour but de présenter des méthodes d'ingénieurs pour l'élaboration de projets et le dimensionnement, mais aussi de partager des expériences de chantier de mise en place du BFUP. Plusieurs projets déjà exécutés permettront de démontrer les possibilités d'application variées du BFUP ainsi que les tendances actuelles de développement. Une attention particulière sera donnée au contenu du Cahier Technique SIA 2052 « BFUP – Matériaux, dimensionnement et exécution » qui sortira en 2016.

Seit jeher haben neuartige Baustoffe der Ingenieurbaukunst zu einer Weiterentwicklung verholfen. Ultrahochleistungs-Faserbetone (UHFB) werden in der Schweiz seit mehr als 10 Jahren zur Verstärkung von Betonbauten und vereinzelt auch im Neubau eingesetzt. UHFB setzen sich dank ihrer Eigenschaften hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit als neuartige Baustoffe immer mehr durch.

Nach der 1. Fachtagung UHFB vom 27.10.2011 werden an dieser 2. Fachtagung UHFB Ingenieurmethoden für den Entwurf und die Bemessung sowie Erfahrungen zur Ausführung beim Einsatz von UHFB erläutert. Anhand mehrerer ausgeführter Projekte werden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von UHFB sowie aktuelle Entwicklungstendenzen aufgezeigt. Eine spezielle Aufmerksamkeit gilt dem Inhalt des Merkblatts SIA 2052 „UHFB – Baustoffe, Bemessung und Ausführung“, das 2016 publiziert wird.

Eugen Brühwiler

Cornelius Oesterlee

Dario Redaelli

René Suter

Table de matières/ Inhaltsverzeichnis

Verstärken und neu Bauen mit UHFB – Grundsätze und Entwurf.....	3
Eugen BRÜHWILER	
Spécification et propriétés du BFUP	15
Blaise FLEURY	
Essais de caractérisation – réponse en traction.....	24
Emmanuel DENARIÉ	
Konstruktion und Bemessung – bestehende Bauten.....	37
Cornelius OESTERLEE	
Conception et dimensionnement de structures en BFUP	47
Lionel MOREILLON	
Préfabrication avec du BFUP	63
Agnès PETIT	
Passerelle du Martinet en BFUP armé.....	75
Rita GALRITO, Didier ROBYR, Eugen BRÜHWILER	
Viaducs de Chillon – Verstärkung mit UHFB.....	89
Hartmut MÜHLBERG	
Instandsetzung und Verstärkung Brücke T13 Jupiterstrasse, Bern.....	97
Silvan FELLER, Maurice HARTENBACH	
Renforcement et remise en état du Pont de Montbovon	109
Damien MÉTRY, Eugen BRÜHWILER	
UHFB aus Sicht des Baustoffproduzenten.....	119
Kerstin WASSMANN	
Evolution des applications du BFUP aux structures porteuses	127
Philippe MENÉTREY, Lionel MOREILLON	
Flexion et cisaillement de poutres précontraintes en BFUP avec des ouvertures circulaires .	139
Jaão TOMAS, Lionel MOREILLON, Joanna NSEIR, Dario REDAELLI, René SUTER	
SIA Merkblatt 2052: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung	157
SIA Cahier technique 2052 : Béton fibré ultra-performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement, et exécution	

Verstärken und neu Bauen mit UHFB – Grundsätze und Entwurf

Eugen BRÜHWILER¹

Prof. Dr. dipl. Ing. ETH/SIA/IABSE

EPFL – ETH Lausanne

BridgIng Consultant, Lussy VD

Zusammenfassung

UHFB ist weder Beton noch Stahl sondern ein neuartiger Baustoff, der heute vor allem zur Verbesserung (Instandsetzung und Verstärkung) der bestehenden Betonbauten sowie zunehmend auch für den Neubau von Tragwerken verwendet wird. Dieser Aufsatz hat zum Ziel, Grundsätze beim Entwurf, der Bemessung und der Ausführung von bestehenden und neu zu bauenden Tragwerken unter Verwendung von UHFB zu erläutern. Im Wesentlichen geht es um zusätzliche Angaben zum Kapitel 2 des Merkblatts SIA 2052 „UHFB – Baustoffe, Bemessung und Ausführung“.

1. Weder Beton, noch Stahl, sondern UHFB

Seit jeher führen neuartige Baustoffe wie UHFB zu Fortschritten im konstruktiven Ingenieurbau. Ihre Anwendung beschränkt sich nicht einfach darauf, herkömmliche Baustoffe zu ersetzen. Vielmehr basiert die wirtschaftlich effiziente und qualitativ hochstehende Anwendung des Baustoffs UHFB auf einem kreativen Entwurf für die Verstärkung bestehender Tragwerke und den Bau von neuen Tragwerken. Diese Entwurfsideen resultieren aus einem grundlegenden Verständnis der Baustoffeigenschaften von UHFB und der Baumethoden im konstruktiven Ingenieurbau.

In den letzten zwanzig Jahren wurden die Eigenschaften faserverstärkter, zementgebundener Verbundbaustoffe deutlich verbessert. Die besten, dieser Baustoffe werden Ultra-Hochleistungs-Faserverstärkte-zementgebundene Verbund-Baustoffe, kurz UHFB, genannt.



Abb. 1 Links: UHFB und Beton, zwei offensichtlich sehr unterschiedliche Baustoffe (Ausschnitt eines UHFB – Beton Verbundquerschnitts); Mitte: maschineller Einbau von UHFB zur Verstärkung einer Autobahnbrücke; Rechts: „organischer“ Steg einer Fussgängerbrücke.

¹ Eugen Brühwiler ist seit 1991 im SIA Normenwesen aktiv, vor allem im Zusammenhang mit den SIA Regelwerken zur Erhaltung bestehender Bauwerke. Er entwarf 2003 das Konzept der seit 2011 veröffentlichten Normenreihe SIA 269 „Erhaltung von Tragwerken“, war von 2006 bis 2011 Mitglied der Projektleitung der Normenreihe SIA 269, und leitete von 01/2004 bis 12/2012 die Normkommission SIA 260, welche die Grundlagennorm SIA 269 erarbeitete und die Norm SIA 260 revidierte. E.B. begründete 2011 die Arbeitsgruppe UHFB, welche der Normkommission SIA 262 angegliedert ist, und leitete diese bis zum 21. April 2015.

UHFB ist weder Beton noch Stahl, sondern ein neuartiger zementgebundener Faser-Verbundbaustoff (Abb.1, links): UHFB besteht aus einer Matrix mit reaktiven Feinstoffen (v.a. Zement) und feinen mineralischen Partikeln aus Quarz oder anderen sehr harten Stoffen. Diese Matrix wird mit schlanken Kurzfasern in hoher Dosierung verstärkt und verformungsfähig gemacht.

Um die Tragfähigkeit und Robustheit von UHFB zusätzlich zu erhöhen, wird UHFB mit Betonstahl oder Spannstahl bewehrt. Diese Bewehrungen werden jedoch nur in der Haupttragrichtung eingelegt. Entsprechend spricht man von „bewehrtem UHFB“ und „vorgespanntem UHFB“.

UHFB wird seit 11 Jahren in der Schweiz und vereinzelt auch im Ausland für die Verbesserung bestehender Betonbauten, vor allem von Brücken und Hochbauten, eingesetzt, indem bestehende Bauteile durch eine 25 bis 80 mm UHFB-Schicht ergänzt werden, um einen UHFB – Beton Verbundquerschnitt herzustellen. Dieses Konzept wird eingesetzt für die Instandsetzung und den Schutz von Bauteilen aus Stahlbeton, die durch Bewehrungskorrosion und andere Schädigungsmechanismen beschädigt wurden, sowie für die Erhöhung des Tragwiderstands (Verstärkung) der Bauteile. Bis heute sind allein in der Schweiz vermutlich mehr als 50 Anwendungen ausgeführt worden (Abb.1, Mitte).

Seit ein paar Jahren ist ein Trend erkennbar, UHFB auch für den Bau von neuen Tragwerken und Bauteilen einzusetzen. Die Grundidee des konstruktiven Ingenieurbaus mit UHFB besteht darin, das Beste der Betonbauweise (d.h. Zement, Bewehrungsstahl, Vorspanntechnik und vielfältige Formbarkeit) sowie der Stahlbauweise (d.h. leichte, dünne und vorgefertigte Bauteile, schnelle Montagemethoden) möglichst optimal zu kombinieren und dabei neuartige Tragwerke zu bauen (Abb.1, rechts).

Die Abmessungen von UHFB Bauteilen und Schichtdicken werden in mm angegeben, und die Anforderungen an die Ausführungspräzision liegen im Millimeterbereich². Mehrere Anwendungen haben gezeigt, dass die Millimeterpräzision bei entsprechend sorgfältiger Planung und Ausführung gut eingehalten werden kann.

2. Eigenschaften von UHFB und bewehrtem UHFB

Die wesentlichen Eigenschaften von UHFB und bewehrtem UHFB können für die Anwendung im konstruktiven Ingenieurbau wie folgt zusammengefasst werden:

- UHFB ist ein mit Kurzfasern hochgradig verstärkter, zementgebundener Verbundbaustoff³. Die Gesteinskörnung ist in der Regel kleiner als 1mm, und die Packungsdichte der Komponenten ist sehr hoch und optimiert. Das Mischwasser wird beim Erhärten von UHFB vollständig verbraucht, womit sich keine kommunizierenden Kapillarporen bilden können und ein Wassereintritt von aussen in den UHFB vernachlässigbar gering ist. Diese Matrix wird mit schlanken Kurzfasern in hoher Dosierung verstärkt. Diese Fasern sind etwa 15 mm lang und 0.2 mm dick (Schlankheit = 75) und werden mit mindestens 3 % des Baustoff-Volumens (240 kg/m³ UHFB) dosiert. Heute werden die besten mechanischen Eigenschaften von UHFB mit Fasern aus Stahl erreicht, weil der Elastizitätsmodul von Stahl vergleichsweise hoch ist, denn die Fasern müssen bereits bei geringen Beanspruchungen wesentliche Spannungen aufnehmen können.
- Der Elastizitäts-Modul von UHFB bleibt mit Werten zwischen 45 und 55 GPa vergleichsweise gering. Dies ist in UHFB – Beton Verbundquerschnitten aus Gründen der Verformungsverträglichkeit eher von Vorteil. Beim Entwurf von neuen UHFB-Tragwerkteilen muss jedoch beim Entwurf in erster Linie auf eine genügende Steifigkeit der Bauteile geachtet werden. Verformungen aus Kriechen und Schwinden sind in einer ähnlichen Grössenordnung wie diejenigen von Beton, wobei bereits 2/3 des Schwindens innerhalb der ersten 30 Tage erfolgt. Kriechen und Schwinden können durch eine thermische Nachbehandlung der vorgefertigten Bauteile stark reduziert werden.

² Die Zentimeterpräzision und das „Zentimeter-Denken“ des Betonbaus sind ungenügend und beruhen auch auf einem falschen Verständnis des Verbundbaustoffs UHFB.

³ UHFB ist kein Beton gemäss der Definition in der Norm SN EN 206. Im Vergleich zu UHFB unterscheidet sich Faserbeton durch eine grobe Gesteinskörnung, einen wesentlich geringeren Fasergehalt, gegenüber Beton nicht wesentlich verbesserte mechanische Eigenschaften sowie eine Porosität ähnlich wie Beton. Es ist sehr wichtig, bei Entwurf, Bemessung und Ausführung mit UHFB nicht in Kategorien des Stahlbetonbaus oder Faserbetonbaus zu denken und zu handeln. UHFB ist kein Massivbaustoff.

- Unter Druckbeanspruchung verhält sich UHFB linear-elastisch bis zu etwa 70% der Druckfestigkeit, wobei das nachfolgende nicht-lineare Verhalten relativ wenig ausgeprägt ist. Die Druckfestigkeiten liegen in der Regel zwischen 150 und 200 MPa. Die begrenzte Verformbarkeit von UHFB muss bei der Bemessung mit einem gewissen Sicherheitsabstand begegnet werden (siehe Kap. 6.3).
- Unter Zugbeanspruchung (Abb.1, links) verhalten sich UHFB der Sorten UA und UB elastisch bis zur Dehnung ε_{Ute} . Danach „verfestigt“ sich der Baustoff, d.h. mit zunehmenden Dehnungen nimmt die Zugspannung im UHFB geringfügig zu bis bei der Verfestigungsdehnung ε_{Utu} die Zugfestigkeit f_{Utu} erreicht wird. Nach Überschreiten der Verfestigungsdehnung nehmen mit zunehmender Dehnung die Zugspannungen ab, d.h. das Material „entfestigt“ sich, und es wird ein diskreter Riss sichtbar. Dieses Zugverhalten ähnelt demjenigen von Stahl, jedoch mit Dehnungs- und Festigkeitswerten, die um mindestens eine Größenordnung geringer sind.
- Die Kombination von UHFB mit Bewehrungsstäben ermöglicht ein Optimieren der Tragfähigkeit. Die Betonstahlstäbe weisen eher kleine Durchmesser von 8 bis 14 mm auf und sind im Querschnitt möglichst gleichmässig verteilt; jedoch sind auch grosse Durchmesser von mehr als 20mm ohne weiteres einsetzbar. Eine interne Vorspannung ist bei geradlinigem Verlauf des Spannkabels zur Erzielung einer zentrischen Vorspannung gut machbar. Ein polygonaler Spannkabelverlauf wird wegen der geringen Bauteilstärken (z.B. Stege von Trägern) mit einer externen Vorspannung erzielt.
Der Tragwiderstand eines Zugglieds F_{max} wird erreicht, wenn sich der UHFB verfestigt und der Betonstahl fließt (Abb.1, rechts). Dies bedeutet, dass bewehrter UHFB bis F_{max} rissfrei bleibt und seine Steifigkeit weitgehend beibehalten kann. Nach Überschreiten des Tragwiderstands entfestigt sich der UHFB bis seine Tragfähigkeit erschöpft ist. Die Stahlbewehrung mit einer Bruchdehnung von mehr als 5 % behält jedoch seine Tragfähigkeit mit einer Resttragkraft F_{res} . Die Verbundfestigkeit zwischen geripptem Betonstahl und UHFB ist etwa 4 Mal grösser als diejenige zwischen Betonstahl und Beton.

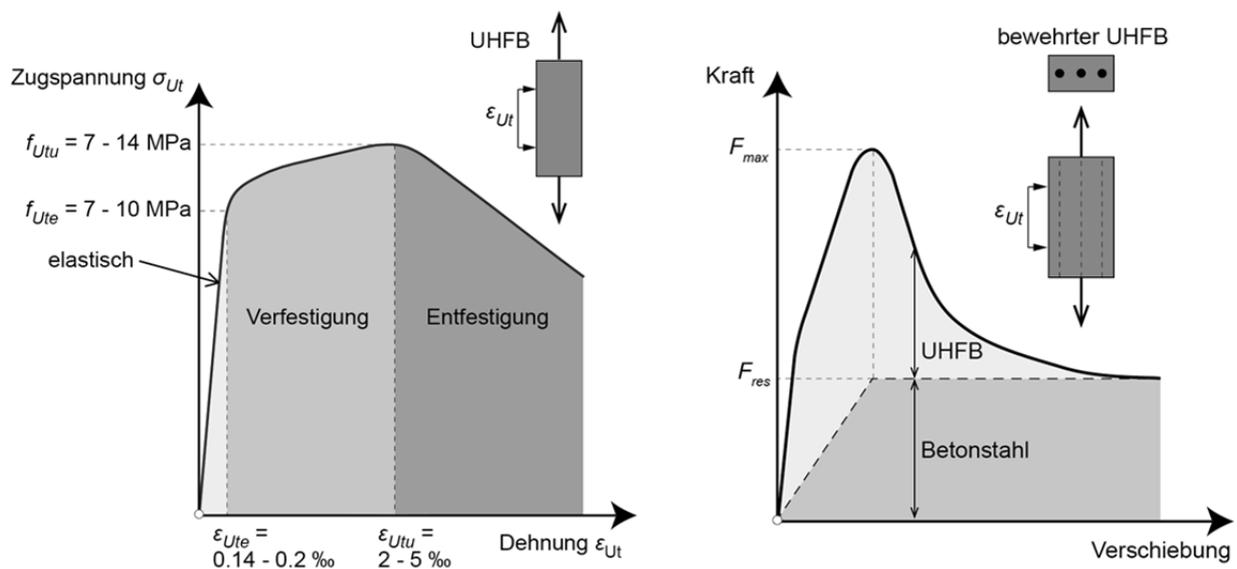


Abb. 2 Links: Zugverhalten von UHFB (links) und bewehrtem UHFB (rechts).

3. Verbesserung von Betonbauten mit Hilfe von UHFB

UHFB – Beton Verbundbauteile bestehen aus einem Stahlbetonquerschnitt und einer darauf im monolithischen Verbund wirkenden Schicht aus UHFB oder UHFB mit Bewehrung (Abb.3).

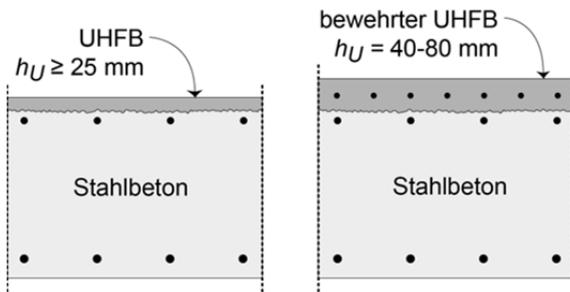


Abb. 3 Grundkonfigurationen des UHFB – Beton Verbundbauteils

Die Herstellung eines UHFB-Beton-Verbundbauteils führt zu einem Eigenspannungszustand im Bauteil, mit Zugeigenspannungen im UHFB, infolge verformungsinduzierter Beanspruchungen durch die Schwindvorgänge und Kriechen des UHFB. Dieser Eigenspannungszustand überlagert mit der kraftinduzierten Beanspruchung infolge Nutzlasten kann von UHFB der Sorten UA und UB (gemäss dem Merkblatt SIA 2052) dank der relativ hohen Zugfestigkeit und des verfestigenden Verhaltens aufgenommen werden, ohne dass es zu einer Rissbildung kommt. Auch ist trotz dieser Zugeigenspannungen eine UHFB-Schicht aus verfestigendem UHFB im Gebrauchszustand flüssigkeitsundurchlässig. Daraus lässt sich folgern, dass für den UHFB – Beton Verbundbau immer ein verfestigender UHFB zu verwenden ist.

UHFB – Beton Verbundbauteile verhalten sich im Gebrauchszustand und bis zum Erreichen des Tragwiderstands monolithisch, d.h. es treten keine Ablösungen an der Grenzschicht zwischen UHFB und Beton auf. Der Tragwiderstand wird somit am monolithischen Querschnitt ermittelt. Voraussetzung dafür sind eine fachgerechte Vorbereitung der Oberfläche des Betonuntergrunds und ein fachgerechter UHFB-Einbau, was bei Einhaltung elementarer Qualitätsanforderungen ohne weiteres erreichbar ist, wie viele Anwendungen bereits gezeigt haben.

4. Entwurf von Tragwerken aus UHFB

Im Neubau stehen hochbeanspruchte Tragwerke für weitgespannte Dächer, Hochbaudecken sowie Brücken und andere Kunstbauten im Vordergrund. Bauteile aus UHFB werden konzipiert als profilierte Bauteile bestehend aus «Blechen», die mit «Rippen», welche Betonstahlstäbe enthalten, versteift und verstärkt werden. Übliche Dicken von Bauteilen aus UHFB betragen 30 bis 100 mm; die UHFB-Überdeckung von Betonstahlstäben beträgt 10 – 15 mm. UHFB-Konstruktionen sind eher vom Stahlbau inspiriert und setzen die Vorspanntechnologie und gegossene Verbindungen ein.

Der Nachweis eines guten Tragverhaltens des UHFB Tragwerks und damit einer genügenden Bauteilsteifigkeit im Gebrauchszustand ist – wie im Leichtbau üblich – von grösster Bedeutung. Der Nachweis der Tragsicherheit sollte in der Regel nicht massgebend sein und nur dazu dienen, einen normenmässig genügenden Sicherheitsabstand auszuweisen.

Für mechanisch höher beanspruchte Bauteile wird bewehrter UHFB eingesetzt. Für Flächenelemente wie Platten oder Scheiben ist nicht immer eine Betonstahlbewehrung erforderlich. Auch sind für den Bau von Flächentragwerken – in Anlehnung an den Ferrozementbau und den ersten Eisenbetonbau (im deutschsprachigen Raum) des 19. Jahrhunderts – auch Gitter aus Stahldrähten oder Kunststoffgeflechten denkbar.

Eine weitere Inspiration für die Verwendung von UHFB im Neubau ist der Bau in Gusseisen. Es ist denkbar, dass Bauteile, die früher, vor allem im 19. Jahrhundert, in Gusseisen gefertigt wurden und „vergessen“ gingen, heute vergleichsweise kostengünstig aus UHFB wieder hergestellt werden könnten.

Für mechanisch wenig beanspruchte Bauteile wie Fassadenelemente wird UHFB häufig mit synthetischen Fasern hergestellt, um eine Bildung von Korrosionspunkten an der Oberfläche durch Stahlfasern auszuschliessen. Die Einlage von Betonstahlbewehrung ist bei Fassadenelementen kaum erforderlich. Die UHFB-Technologie ermöglicht die Entwicklung von neuen Fassadenformen

und -verkleidungen, zum Beispiel mit feinen Verästelungen oder in Netzform. Dank der geringen Dicke der UHFB-Bleche können grössere Elemente vorgefertigt und montiert werden, was der Kreativität von Architekten, Ingenieuren und Designern neue Impulse verleihen kann. Zum Bereich der Gebäudehüllen können auch Balkonbrüstungen gezählt werden, wo der Baustoff UHFB ebenfalls neue Gestaltungsmöglichkeiten bieten kann.

5. Grundsätze beim Entwurf mit UHFB

Aus den vorhergehenden Kapiteln lassen sich Grundsätze beim Entwurf mit UHFB ableiten:

Grundsatz 1: Bauteile, die hauptsächlich eine Tragfunktion wahrnehmen, werden aus verfestigendem UHFB der Sorten UA oder UB (mit Stahlfasern) hergestellt und in der Haupttragrichtung mit Bewehrung aus Betonstahl und/oder Spannstahl versehen.

Grundsatz 2: UHFB wird in der Regel in Bauwerksbereichen eingesetzt, die starken Umwelteinflüssen, hohen Eigenspannungen oder hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind:

- Starke Umwelteinflüsse treten bei Bauteilen der Expositionsclassen XD2b, XD3 und XF4 sowie bei chemischem Angriff auf.
- Die mechanischen Eigenschaften von UHFB können vor allem bei hohen mechanischen Beanspruchungen sowie bei aussergewöhnlichen Einwirkungen (Anprall, Explosion, Erdbeben) und Abrasion ausgenutzt werden. Hohe lokale Beanspruchungen ergeben sich bei Kräftekonzentration in Bereichen von Krafteinleitungen oder Kraftumlenkungen. Diese führen in der Regel zu hohen Anforderungen an die Duktilität, die der UHFB dank seiner vergleichsweise hohen Bruchenergie erfüllen kann.

Grundsatz 3: Verstärkungen bestehender Tragwerke sowie Tragwerke und Fertigteile aus bewehrtem UHFB werden entworfen mit dem Ziel, die Bauteilabmessungen und Eigenlasten zu minimieren. UHFB-Bau ist Leichtbau und damit auch Ressourcen schonend.

Grundsatz 4: Bei der Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauten und deren Bestandteilen stehen folgende Anwendungen im Vordergrund:

- Abdichtung (Schutzbeschichtung von Brückenfahrbahnplatten, Randabschlüssen, Leitmauern, Pfeilern, Wänden und Bedachungen)
- Erhöhung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit von Brückenfahrbahnplatten und Hochbaudecken
- Herstellung von Ausrüstungsteilen in Fertigteilbauweise (Randabschlüsse, Leitmauern, Vorrichtungen für Dilatationsfugen)
- Verankerungsblöcke für das Verbinden von neuen und bestehenden Bauteilen.

Grundsatz 5: UHFB kann auch im Verbund mit Stahl oder Holz eingesetzt werden. Dieser Bereich bietet ein grosses Entwicklungspotenzial, bedarf jedoch noch weiterer Forschung und Entwicklung. In erster Näherung können die bestehenden Regeln für Verbundbauweisen sinngemäss übernommen werden.

Grundsatz 6: Projektspezifisch können folgende Festlegungen getroffen werden:

- Anforderungen an das Erscheinungsbild der Oberflächen und Kanten des UHFB, beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit und die Farbe, welche durch die Beigabe von Pigmenten beeinflusst werden kann.
- Anforderungen an den Feuerwiderstand können durch die Beigabe von Kunststofffasern (Polypropylen-Fasern) erfüllt werden.
- Arbeitsfugen in Bezug auf Flüssigkeitsdichtheit.

6. Sicherheitskonzept und Sicherheitsabstände

6.1. Grundsatz

Der zentrale Grundsatz der UHFB Bauweise hinsichtlich der Tragsicherheit besteht darin, dass UHFB, der hauptsächlich eine Tragfunktion wahrnimmt, in der Haupttragrichtung mit Bewehrung versehen wird⁴. Mechanisch hochbeanspruchte Tragwerke und Bauteile bestehen aus bewehrtem oder vorgespanntem UHFB. Mit diesem Grundsatz sollen unsachgemässe Anwendungen⁵ wie z.B. hoch beanspruchte Stützen oder Biegeträger allein aus UHFB vermieden werden.

6.2. Bemessungswert des Tragwiderstands

Im Merkblatt SIA 2052 wurde für den Grenzzustand der Tragsicherheit das Format gemäss Gleichung (12) der Norm SIA 260 (Ziffer 4.4.2.7) gewählt⁶, um den Bemessungswert des Tragwiderstands R_d von Bauteilen aus UHFB, bewehrtem UHFB und Verbundquerschnitten, die UHFB enthalten, zu ermitteln:

$$R_d = R \left\{ \frac{\eta \cdot X_k}{\gamma_M}, a_d \right\} = R \{ f_{Ud}, a_d \} \quad (1)$$

mit γ_M : Widerstandsbeiwert; X_k : charakteristischer Wert einer Baustoffeigenschaft und η : Umrechnungsfaktoren (nachfolgend „Beiwerte“ genannt) zur Berücksichtigung von Einflüssen, die vom Baustoff und Tragwerksverhalten abhängen.

Im Merkblatt SIA 2052 wurde zur Ermittlung des Bemessungswerts der UHFB-Baustoffeigenschaft f_{Ud} das Format gemäss Gleichung (7) der Norm SIA 260 (Ziffer 4.4.2.4) gewählt, was zu folgenden Ausdrücken für den Bemessungswert des Tragwiderstands führt:

$$\text{- unter Zugbeanspruchung: } f_{Utd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utk}}{\gamma_U} \quad (2)$$

$$\text{- unter Druckbeanspruchung: } f_{Ucd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{fU1} \cdot \eta_{fU2} \cdot f_{Uck}}{\gamma_U} \quad (3)$$

Gemäss der Norm SIA 260 beinhaltet der Widerstandsbeiwert γ_U zwei Partialfaktoren:

$$\gamma_U = \gamma_{UR} \cdot \gamma_{Um} \quad (4)$$

Der Partialfaktor γ_{UR} berücksichtigt die Unschärfen im Widerstandsmodell von Bauteilen aus UHFB, bewehrtem UHFB und Verbundquerschnitten, die UHFB enthalten. Unschärfen im Widerstandsmodell können implizit auch in Umrechnungsfaktoren enthalten sein.

Der Partialfaktor γ_{Um} berücksichtigt die ungünstigen Abweichungen der UHFB-Baustoffeigenschaft von ihrem charakteristischen Wert X_k .

Nachfolgend werden die Beiwerte η_i und der Widerstandsbeiwert γ_U hergeleitet und erläutert.

⁴ UHFB wird manchmal immer noch als ein Faserbeton ohne Einlegen von Bewehrung verstanden. Betonstahl- und Spannstahlbewehrung führt zu einer effizienten Erhöhung des Tragwiderstands und Verbesserung der Robustheit von UHFB-Bauteilen, was auszunutzen ist.

⁵ Wie bei den anderen Bauweisen muss auch bei der UHFB Bauweise unbedingt vermieden werden, dass unsachgemässe Anwendungen mit einem übertriebenen Widerstandsbeiwert abgedeckt werden. Korrekt konzipierte, fachgerechte Anwendungen dürfen auf keinen Fall mit einem übertriebenen hohen Widerstandsbeiwert „bestraft“ werden.

⁶ Im Hinblick auf nicht-lineare Tragwerksanalysen ist das Format gemäss der Gleichung (13) gemäss Norm SIA 260, Ziffer 4.4.2.7, zweckmässiger und realitätsnäher. Zudem werden bei UHFB-Beton Verbundquerschnitten oft mehrere Baustoffe aus unterschiedlichen Bauepochen kombiniert. Die Anwendung von charakteristischen Baustoffwerten bei der Tragwerksanalyse und Ermittlung des Tragwiderstands, gefolgt von der Anwendung eines Widerstandsbeiwerts, wäre ein kohärenteres Format.

6.3. Beiwerte η

Im Merkblatt SIA 2052 werden insgesamt fünf Beiwerte η festgelegt. Die Einführung dieser Beiwerte ist vor allem durch Variationen in der Faserorientierung, die von der Bauteildicke abhängen können und bei geringer Faserdosierung (d.h. < 3 Vol.-%) ausgeprägter sind, sowie durch ein allfällig begrenztes Verformungsvermögen von Bauteilen begründet. Diese Beiwerte berücksichtigen demnach implizit auch Unschärfen im Zusammenhang mit Widerstandsmodellen:

- Der Faserorientierungsbeiwert η_K hängt von der Bauteilgeometrie und vom Herstellungsprozess ab. Aufgrund von Überlegungen zur Robustheit des Tragverhaltens wurde empirisch für das globale und lokale Tragverhalten je ein Beiwert von 0.9 respektive 0.75 festgelegt. Dieser Beiwert ist für alle Arten von Bauteilen anzuwenden.
- Der Dickenbeiwert η_{hU} berücksichtigt den Einfluss der UHFB-Schichtstärke oder Bauteildicke sowie des Herstellungsprozesses auf die Faserorientierung von UHFB. Der Dickenbeiwert berücksichtigt demnach (zusätzlich zum Faserorientierungsbeiwert) ebenfalls den Einfluss der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften von UHFB. Bei sehr dünnen Schichten haben die etwa 15 mm langen Fasern eine Tendenz sich vorwiegend in 2-Dimensionen anzuordnen, während bei dicken Abmessungen (> 100 mm) sich die Fasern in 3 Dimensionen ausrichten können. Deshalb wird für UHFB-Schichtstärken und Bauteildicken von mehr als 50 mm eine Kalibrierung der Versuchswerte, die ja gemäss dem Merkblatt SIA 2052 mit Prüfkörperdicken von 30 mm ermittelt werden, vorgenommen.
Die Abhängigkeit der Faserorientierung von der Faseranordnung in 2-Dimensionen respektive 3-Dimensionen kann theoretisch ermittelt und anhand von Probekörperanalysen verifiziert werden [1]. Der maximale Dickenbeiwert $\eta_{hU} = 0,80$ für $h_U > 100$ mm lässt sich theoretisch herleiten. Der Beiwert η_{hU} ist ebenfalls für alle Arten von Bauteilen anzuwenden.
- Der Beiwert $\eta_{fc} = 0,85$ berücksichtigt das Verhalten von UHFB unter Druckbeanspruchung. Dieser Beiwert soll das vergleichsweise verformungsarme Tragverhalten (oft „Spröbruch“⁷ genannt) des Baustoffs UHFB im einachsigen Druckversuch abdecken. Er führt dazu, dass die Beanspruchung im Grenzzustand der Tragsicherheit auf ein Niveau begrenzt wird, wo ein Druckversagen praktisch ausgeschlossen werden kann.
Dieser Beiwert ist massgebend in Fällen, wo die Druckfestigkeit von UHFB, z.B. vorwiegend auf Druck beanspruchte UHFB-Bauteile wie Stützen, ausgenutzt werden kann. Bei UHFB – Beton Verbundquerschnitten kann die Druckfestigkeit von UHFB bei den üblichen Querschnittsabmessungen nicht ausgenutzt werden, da die Druckfestigkeit von Beton massgebend wird. Bei Biegeträgern aus bewehrtem UHFB muss – ähnlich wie bei Stahlbeton – aus Gründen eines genügenden Verformungsvermögens im Grenzzustand der Tragsicherheit der Querschnittsbereich unter Zugbeanspruchung massgebend sein.
Der Beiwert η_{fc} beinhaltet somit implizit Unschärfen im Zusammenhang mit Widerstandsmodellen.
- Der Beiwert η_{fu2} gilt nur für Druckglieder im Sinne von Ziffer 4.3.7 der Norm SIA 262, deren Verhalten durch Effekte 2. Ordnung beeinflusst wird. Dieser Beiwert berücksichtigt das Tragverhaltens von Druckgliedern und wurde in Anlehnung an den Beiwert η_{fc} der Norm SIA 262 empirisch wie folgt abgeschätzt: $\eta_{fu2} = \left(\frac{30}{100}\right)^{1/3} = 0,67$; dieser Ansatz kann nicht begründet werden.

Der resultierende Beiwert erscheint jedoch genügend vorsichtig zu sein, zumal hochbeanspruchte Druckglieder aus UHFB gemäss dem zentralen Grundsatz sowieso Betonstahlbewehrung enthalten, welche zu einem duktilen Tragverhalten führen sollten. In der Praxis dürfte (und sollte) der Beiwert η_{fu2} dazu führen, dass der Bemessungswert des

⁷ Obwohl in den Normen SIA 260 und SIA 269 der Begriff „spröd“ oder „Spröbruch“ nicht definiert ist, wird er in der Umgangssprache häufig verwendet, schafft dabei mehr Verwirrung und Verunsicherung (Angst) als Klarheit. Gemeint ist ein verformungsarmes Tragverhalten vor Erreichen des Tragwiderstands eines Bauteils sowie ein spontanes Versagen ohne Vorankündigung eines Tragwerks (z.B. Durchstanzen einer Decke aus Stahlbeton oder Einsturz eines Dachs in Stahlbauweise unter einer extremen Schneelast). Die Norm SIA 260 definiert Duktilität als „Durch irreversible Verformungen und Energiedissipation charakterisiertes, in der Regel auf die Grenze des elastischen Verhaltens bezogenes plastisches Verformungsvermögen.“ Diese Definition wird leider in der Forschung und Praxis nur selten angewendet, um Duktilität zu quantifizieren und zu beurteilen.

Tragwiderstands z.B. einer hochbeanspruchten Stütze aus bewehrtem UHFB sowieso anhand von Versuchen (siehe Kapitel 6.5) ermittelt wird.

- Der Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer beträgt im Allgemeinen: $\eta_t = 1,0$. Bei stossartigen Einwirkungen, wie z.B. Anprall und Explosion, nehmen die mechanischen Eigenschaften von UHFB wie bei anderen Baustoffen ebenfalls zu. Somit darf ein Beiwert $\eta_t > 1,0$ angesetzt werden; er muss jedoch durch Versuche begründet sein.

6.4. Widerstandsbeiwert γ_U

Im europäischen Normenwesen wird der Widerstandsbeiwert über die semi-probabilistische Methode hergeleitet. Diese Methode wurde in der Schweiz mit der Veröffentlichung der Norm SIA 269 (2011) explizit eingeführt und wird bei der Überprüfung bestehender Tragwerke angewendet.

Gemäss der semi-probabilistischen Methode wird der Bemessungswert X_d einer Baustoffeigenschaft wie folgt ermittelt:

$$X_d = X_m \cdot (1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_X) \quad (5)$$

mit

X_m : Erwartungswert einer Baustoffeigenschaft (oft: charakteristischer Wert)

α_R : Sensitivitätsfaktor für Tragwiderstände, die im Tragsicherheitsnachweis von massgebender Bedeutung sind

β_0 : Zielwert des Zuverlässigkeitsindex

ν_X : Variationskoeffizient der Baustoffeigenschaft, wobei: $\nu_X = \frac{\sigma_X}{X_m}$,

mit σ_X : Standardabweichung und X_m : Mittelwert

Gleichung (5) wird wie folgt ergänzt:

$$X_d = X_m \cdot (1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_X) \cdot (1 + \kappa_r) \quad (6)$$

mit κ_r : Resilienz-Koeffizient zur Berücksichtigung von z.B. Umlagerungseffekten bei Auftreten von lokalen Schädigungen im Baustoff; Redundanzmöglichkeiten; Robustheit des Baustoffs im System Bauteil/ Tragwerk.

Nachfolgend wird konservativ angenommen, dass: (1) die deterministische Methode und die semi-probabilistische Methode zum gleichen Bemessungswert der UHFB-Baustoffeigenschaft führen, und (2) im vorliegenden Fall nur der Partialfaktor γ_{Um} ermittelt wird. Dies führt zum folgenden Ausdruck:

$$\gamma_m = \frac{X_k}{X_m \cdot (1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_X)} \cdot \frac{1}{(1 + \kappa_r)} \quad (7)$$

Gleichung (7) wird nachfolgend aufgrund folgender Überlegungen und numerischer Werte für die UHFB-Bauweise umgesetzt:

Entspricht der charakteristische Wert dem 5 %-Fraktilwert einer Baustoffeigenschaft, dann gilt:

$$X_k = X_m - 1,65 \cdot \sigma_X \quad \text{und mit } \sigma_X = \nu_X \cdot X_m$$

erhält man für den Partialfaktor den folgenden Ausdruck:

$$\gamma_M = \frac{1 - 1,65 \nu_X}{(1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_X)} \cdot \frac{1}{(1 + \kappa_r)} \quad (8)$$

und mit:

- $\alpha_R = -0,8$: gemäss Norm SIA 269 und Euronormen
- $\beta_0 = 3,7$: unter Annahme des höchsten Sicherheitsniveaus gemäss Euronormen und Norm SIA 269 (d.h. jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} , welche einem Zuverlässigkeitsindex $\beta_0 = 4,7$ entspricht) und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren.
- Resilienz-Koeffizient in Bezug auf UHFB und bewehrten UHFB:

Falls bei allfälligen lokalen Schwächungen keine Spannungsumlagerung stattfinden kann, beträgt $\kappa_{r,1} = 0$. Im Fall eines hochgradig faserverstärkten Verbundbaustoffs wie UHFB (ohne Bewehrung) ist dies eine konservative Annahme, denn UHFB ohne Bewehrung kommt einzig bei flächigen Tragwerksteilen vor, wo bei allfälligen ungleichmässigen Fasergehalten und Faserorientierungen im flächigen Bauteil Verformungen umgelagert werden können.

Bei bewehrtem UHFB darf aufgrund von Forschungserkenntnissen von einer gewissen Resilienz ausgegangen werden, da lokal auftretende, ungleichmässige Faserhalte und Faserorientierungen im UHFB durch den duktilen Betonstahl kompensiert werden. Somit darf gesetzt werden: $\kappa_{r,2} = 0,1$.

- Der Variationskoeffizient ν_X ist eine Baustoffeigenschaft, die durch Versuche ermittelt wird und die somit von der Versuchsart, vom Prüfkörper und seiner Herstellung abhängen. Es werden zwei Annahmen getroffen: $\nu_{U1} = 0,10$ und $\nu_{U2} = 0,15$ für mittelmässig und stark streuende Baustoffe. Solche Werte sind für UHFB ermittelt worden in Fällen, wo keine wesentlichen Streuungen bei der Prüfkörperherstellung und Versuchsdurchführung auftraten⁸.

Setzt man diese numerischen Werte in die Gleichung (8) ein, beträgt der Partialfaktor γ_{Um} zur Berücksichtigung der ungünstigen Abweichungen der UHFB-Baustoffeigenschaft von ihrem charakteristischen Wert X_k :

- für einen Resilienz-Faktor $\kappa_{r,1} = 0$:

$$\text{für } \nu_{U1} = 0,10: \quad \gamma_{Um1} = \frac{1 - 1,65\nu_{U1}}{1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_{U1}} = \frac{1 - 1,65 \cdot 0,10}{1 - 0,8 \cdot 3,7 \cdot 0,10} = \frac{0,835}{0,704} = 1,19$$

$$\text{für } \nu_{U2} = 0,15: \quad \gamma_{Um2} = \frac{1 - 1,65\nu_X}{1 + \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \nu_X} = \frac{1 - 1,65 \cdot 0,15}{1 - 0,8 \cdot 3,7 \cdot 0,15} = \frac{0,753}{0,556} = 1,35$$

- für einen Resilienz-Faktor $\kappa_{r,2} = 0,1$ beträgt:

$$\text{für } \nu_{U1} = 0,10: \quad \gamma_{Um1} = \frac{0,835}{0,704} \cdot \frac{1}{1,1} = 1,08$$

$$\text{für } \nu_{U2} = 0,15: \quad \gamma_{Um2} = \frac{0,753}{0,556} \cdot \frac{1}{1,1} = 1,23$$

Für den Partialfaktor γ_{UR} zur Berücksichtigung der Unschärfen im Widerstandsmodell von Bauteilen aus UHFB, bewehrtem UHFB und Verbundquerschnitten, die UHFB enthalten, kann der

⁸ Gemessene Versuchswerte sind immer mit Unschärfen behaftet, d.h. es gibt eine Abweichung zwischen den gemessenen Werten und den ideellen, realen Werten wie sie im Tragwerk auftreten, die nie genau bekannt sein können. Diese Unschärfen treten implizit durch die Probekörperherstellung (fachgerechtes Mischen und Einbau des Frisch-UHFB in die Prüfkörperschalung), die Prüfmethode und die Prüf- und Messeinrichtungen auf. Versuchsserien haben gezeigt, dass je nach Art des Einbaus eines Frisch-UHFB von gleicher Zusammensetzung und Verarbeitbarkeit in die Prüfkörperschalung die Versuchswerte sehr stark oder nur gering streuen können. Es ist offensichtlich, dass bei grossen Streuungen von Einflüssen, die nicht vom Baustoff abhängen, die Versuchsergebnisse für das Baustoffverhalten nicht objektiv sind. Folglich sind Werte für die Standardabweichung von Versuchsergebnissen immer schlechter als die dem Baustoff inhärente Streuung. Für einen gegebenen Baustoff kommt somit die kleinste durch Versuche jemals ermittelte Streuung (Standardabweichung) der dem Baustoff inhärenten Streuung am nächsten. (Bemerkung: Die manchmal geäusserte Meinung, dass faserverstärkte zementgebundene Baustoffe eine besonders grosse Streuung aufweisen würden ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht stichhaltig. Es ist eher so, dass die oben erwähnten Einflussfaktoren bei faserverstärkten zementgebundenen Verbundbaustoffen unterschätzt werden.)

(für die anderen Bauweisen) übliche Wert $\gamma_{UR} = 1,10$ angenommen werden, zumal die fünf Beiwerte gemäss Kapitel 6.3 auch Unschärfen im Widerstandsmodell abdecken.

Folgerung: Ausgehend von den vorhergehenden Ausführungen können schliesslich für den Nachweis der Tragsicherheit die folgenden, konservativen Widerstandsbeiwerte festgelegt werden:

- für UHFB mit Bewehrung: $\gamma_{U1} = 1,30$
- für UHFB ohne Bewehrung: $\gamma_{U2} = 1,40$.⁹

6.5. Ermittlung des Bemessungswerts anhand von Versuchen

Wie für alle Bauweisen darf gemäss der Ziffer 4.5 der Norm SIA 260 der Bemessungswert des Tragwiderstands auch gestützt auf Versuchen erfolgen. Entsprechend enthält das Merkblatt SIA 2052 die wichtige Ziffer 2.4.2.2. Die Beiwerte gemäss Kapitel 6.3 dürfen ebenfalls anhand von Versuchen festgelegt und begründet werden.

7. Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit von zementgebundenen Baustoffen hängt im Wesentlichen davon ab, ob und wieviel Wasser in den Baustoff eindringen kann. Da dem Frisch-UHFB weniger Wasser beigegeben wird als für das Abbinden der gesamten Zementmenge notwendig wäre, befindet sich im erhärteten UHFB kein freies Wasser mehr. Dadurch können sich auch keine Kapillarporen (durch Trocknungsvorgänge) bilden. Ein Wassertransport in den UHFB bleibt somit aus, womit Schädigungsmechanismen wie sie für Beton bekannt sind, nicht stattfinden können.

Daraus folgt, dass für Bauteile und Oberflächen aus UHFB oder bewehrtem UHFB, die den Expositionsklassen XC, XD, XA und XF gemäss der Ziffer 2.4.2 der Norm SIA 262 ausgesetzt sind, in der Regel zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit keine besonderen Massnahmen zu treffen sind.

Zum Nachweis der Dauerhaftigkeit von UHFB und der Schutzwirkung einer UHFB-Schicht als Abdichtung einer Brückenplatte erfolgte im März 2014 eine Zustandsaufnahme der Strassenbrücke über die Morge bei Sion (Abb. 4). Diese 10 m kurze Brücke wurde im Oktober 2004 verbreitert, und die Oberfläche und Randabschlüsse der Fahrbahnplatte wurden mit einer 30 mm dicken Schicht aus verfestigendem UHFB abgedichtet. Es handelt sich um die erste Anwendung von UHFB zur Verbesserung eines Betonbauwerks [2].



Abb. 4 Ansicht der Strassenbrücke über die Morge bei Sion (Foto aufgenommen am 10. März 2014 bei der Probekörperentnahme).

⁹ Im Merkblatt SIA 2052 hat die Normkommission SIA 262 an ihrer Sitzung vom 17. April 2015 einen einzigen Wert $\gamma_U = 1,50$ angeordnet.

Eine im März 2014 durchgeführte Inspektionskampagne mit Baustoffversuchen ergab folgende Ergebnisse [3]:

- Die Haftzugfestigkeit zwischen UHFB und dem Betonuntergrund war deutlich grösser als 1.5 MPa, wobei der Prüfkörperbruch immer im Betonuntergrund auftrat.
- Die Dichtheit der UHFB-Schicht wurde mit dem Wasseraufnahmeversuch (Kapillaritätsmethode) nachgewiesen. Die gemessenen Werte lagen im Bereich der für UHFB zu erwartenden, geringen Werte.
- Die gemessenen Chloridmengen im UHFB sind verschwindend gering und nur im oberflächennahen Bereich bis maximal 5mm Tiefe nennenswert.
- Die fotografischen Aufnahmen und visuellen Kontrollen der Betonunterseite der Rippenplatte wurden mit den Referenzaufnahmen vor den UHFB-Arbeiten von 2004 verglichen. Damals wurde diese Untersicht, die auf eine bedeutende Infiltration von chloridbeaufschlagtem Wasser in den Beton hinwies, absichtlich nicht instandgesetzt, denn man wollte die Wirksamkeit der UHFB-Schicht als Abdichtung nachweisen. Seit der Verbesserung mit UHFB von 2004 zeigen sich visuell keine Anzeichen einer weiteren Wasserinfiltration, Bewehrungskorrosion oder von Ausblühungen. Es war keine Änderung gegenüber dem Zustand von 2004 erkennbar, und dies insbesondere auch in den Bereichen entlang der UHFB-Arbeitsfuge in Brückenlängsrichtung (Abb. 5).



Abb. 5 Untersicht der Strassenbrücke über die Morge; links: Aufnahme im Mai 2004 vor dem Eingriff, rechts: Aufnahme vom 10. März 2014.

Folgerung: Die mit einer UHFB-Schicht abgedichtete Brückenkonstruktion zeigte nach beinahe 10 Jahren Exposition durch Wasser und Tausalze keine Veränderung des Zustands. Damit sind die Erwartungen an die Dauerhaftigkeit von UHFB und der gesamten Brückenkonstruktion erfüllt.

8. Qualitätssicherung

Das Merkblatt SIA 2052 legt eine Qualitätssicherung fest, welche die üblichen drei Arten von Prüfungen beinhaltet:

- (1) Die grundsätzliche Eignung eines UHFB wird durch Erstprüfungen nachgewiesen.
- (2) Die Eignung eines UHFB und seiner Komponenten im Hinblick auf eine spezifische Anwendung ist anhand von Eignungsprüfungen nachzuweisen, die in der Regel aus repräsentativen Versuchen hinsichtlich der Bauteilabmessungen, des Giessvorgangs und der Nachbehandlung bestehen.
- (3) Während der Bauausführung ist das Einhalten der Anforderungen anhand von Qualitätsprüfungen zu kontrollieren.

Damit soll sichergestellt werden, dass der eingesetzte UHFB sowie die Bauverfahren und -systeme mit den vom Projektverfasser festgelegten, objektspezifischen Anforderungen übereinstimmen. Wichtig ist, dass zusätzlich zu den im Merkblatt SIA 2052 festgelegten Prüfungen die zugehörigen Abnahmekriterien und Konsequenzen bei Nichterfüllen der Anforderungen (in der Projektbasis und in den Ausschreibungsunterlagen) festgelegt werden.

Bemerkung: Ähnlich wie im Betonbau sind die im Merkblatt SIA 2052 vorgesehenen Qualitätsprüfungen nicht hinreichend, denn die Prüfergebnisse an Prüfkörpern treffen zu spät auf der Baustelle ein, um eine allenfalls notwendige Korrektur noch vornehmen zu können. Bei den bisherigen Anwendungen führte dies zu keinen Schwierigkeiten, da die geforderten Prüfwerte erfüllt werden konnten. Jedoch sollten zerstörungsfreie Prüfmethode zur Ermittlung von Fasergehalt und Faserorientierung, die in einem direkten Zusammenhang mit den Festigkeitswerten von UHFB haben, zu entwickeln, mit denen kurze Zeit nach dem UHFB-Einbau relativ grosse Flächen zu untersucht werden können. Eine Messkampagne mit einer elektromagnetischen Methode auf dem Chillon-Viadukt ergab vielversprechende Ergebnisse [4].

9. Ausblick

Die bisherigen Anwendungen von UHFB zur Verbesserung (Instandsetzung und Verstärkung) von bestehenden Betonbauten sowie die Vielfältigkeit der Anwendungen bestätigen das Potential des Konzepts, die Leistungsfähigkeit von bestehenden Tragwerken aus Stahl- und Spannbeton durch Ergänzen mit einer relativ dünnen Schicht aus bewehrtem UHFB zu erhöhen und diesen Bauwerken eine zweite Nutzungsdauer zu geben.

Weil die UHFB-Technologie zur Verbesserung von Betonbauten auch wirtschaftlich ist, kann erwartet werden, dass in Zukunft die Anwendungen weiter zunehmen werden. Dazu sind die Baumethoden zu verbessern. Insbesondere sollte in Zukunft UHFB nur noch maschinell – und nicht mehr händisch – eingebaut werden. Auch besteht ein grosser Bedarf, die Methoden zur Nachbearbeitung von UHFB-Oberflächen im Hinblick auf Rauigkeit, Aussehen und Abriebwiderstand weiter zu entwickeln.

Es ist offensichtlich, dass das Konzept der UHFB – Beton Verbundbauweise bereits beim Neubau von hoch beanspruchten Betonbauteilen (Fahrbahnplatten, Tausalz-beanspruchte Bauteile) angewendet werden muss. Weshalb soll gewartet werden, um dann in 20 bis 30 Jahren bei deutlich grösserem Aufwand und höheren Kosten (inklusive Nutzerkosten) ein Betonbauwerk mit UHFB zu verbessern?

Im Bereich des Neubaus eröffnen der Baustoff UHFB und die UHFB-Leichtbauweise neue Perspektiven und ressourcenschonende Anwendungen. Es geht vor allem darum, die Errungenschaften der Baustoff- und Ingenieurwissenschaften zusammen mit Produktions- und Baufachleuten umzusetzen. Es könnte sich denn auch schon bald eine spezifische Bau- und Baustoffindustrie für UHFB bilden.

Aufgrund der Ausführungen in diesem Aufsatz werden in Zukunft wahrscheinlich nur noch UHFB der Sorten UA und UB, d.h. UHFB mit einem verfestigenden Verhalten unter Zugbeanspruchung, angeboten werden. Der damit zusammenstehende etwas höhere Fasergehalt und damit die etwas höheren Baustoffkosten sind unbedeutend, da die UHFB Baustoffkosten im Neubau weniger als 30 % der Gesamtbaukosten und bei der Verbesserung bestehender Bauwerke weniger als 50 % der Gesamtbaukosten betragen.

10. Literatur

- [1] BASTIEN MASSE, M., DENARIE, E., BRÜHWILER, E., Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers, *Cement and Concrete Composites*, accepted for publication (October 2015).
- [2] BRÜHWILER, E., DENARIE, E., PUTALLAZ, J.-C.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit ultrahochleistungsfähigem Faserfeinkornbeton (UHLFB). *Beton- und Stahlbetonbau*, 100. Jahrgang, Heft 8, September 2005, S. 822-827.
- [3] DENARIE, E., Pont sur la Morge – campagne de caractérisation de l'état de l'ouvrage 9.5 ans après intervention, *Rapport n° MCS 23.14.05 – 1*, 22 mai 2015 (pas publié).
- [4] NUNES, S., RIBEIRO, F., CARVALHO, A., PIMENTEL, M., BRÜHWILER, E., BASTIEN MASSE, M., Non-destructive measurements to evaluate fiber dispersion and content in UHPFRC reinforcement layers, *Proceedings, Conference on "Multi-span large bridges", Porto*, 1-3 July 2015.

Spécification et propriétés du BFUP

Blaise FLEURY

Ing. Civil EPFL

OPAN concept Neuchâtel SA

Neuchâtel

Keywords: Loi de comportement, propriétés mécaniques, fluage, retrait, sortes de BFUP, spécification

1. Introduction

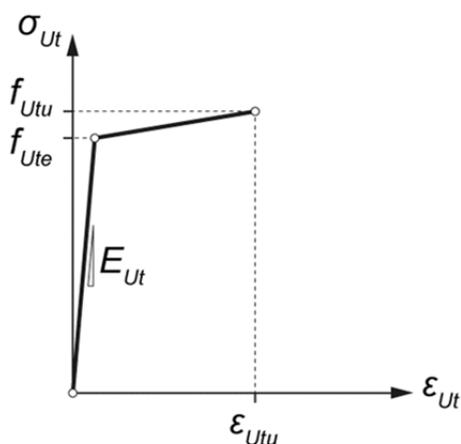
Dans le but d'assurer une utilisation fiable du BFUP, tout en respectant les normes en vigueur en Suisse, la commission SIA 262 a chargé un groupe de travail d'élaborer un cahier technique relatif au béton fibré ultra-performant (BFUP). Le présent article a pour objectif de présenter les principales notions du chapitre 3 (Matériaux) de ce document dénommé CT 2052. Pour de plus amples informations, ou en cas de divergences rédactionnelles, le lecteur se référera au document officiel [1], qui fera foi dès sa parution.

2. Lois de comportement du BFUP et principales notations

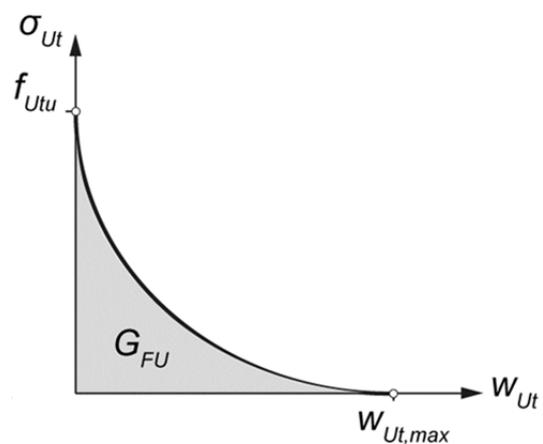
2.1. Comportement en traction d'un BFUP

Le comportement en traction du BFUP est caractérisé par deux phases distinctes :

- Une loi contrainte-déformation linéaire, ou bilinéaire, décrivant le comportement élastique et l'écroutissement éventuel (partie entre f_{Ute} et f_{Utu}). Lors de l'écroutissement, le BFUP se déforme de façon « homogène » avec une microfissuration uniformément répartie et presque indécélable.
- Une loi contrainte-ouverture de fissure décrivant le comportement adoucissant. La chute de la contrainte découle de l'arrachement progressif des fibres dans une fissure localisée.



a) comportement écroutissant
(loi déformation spécifique - contrainte)



b) comportement adoucissant
(loi ouverture de fissure - contrainte)

Fig. 1 Comportement du BFUP sollicité en traction

Avec les notations suivantes :

ε_{Ut}	Déformation de traction du BFUP
σ_{Ut}	Contrainte de traction dans le BFUP
f_{Ute}	Résistance limite élastique à la traction du BFUP. Cette valeur dépend principalement de la matrice cimentaire
f_{Utu}	Résistance à la traction du BFUP. Cette valeur dépend principalement du fibrage
ε_{Utu}	Déformation du BFUP lorsque la résistance à la traction est atteinte (écrouissage)
E_{Ut}	Module d'élasticité du BFUP sollicité en traction
w_{Ut}	Ouverture de fissure d'adoucissement du BFUP
$w_{Ut,max}$	Ouverture maximale de fissure d'adoucissement du BFUP (correspondant à une contrainte post-fissuration nulle). Cette ouverture vaut approximativement la moitié de la longueur maximale des fibres.
G_{fU}	Energie spécifique de rupture du BFUP

Dans la partie adoucissante, l'ouverture de fissure peut être convertie en une déformation apparente à l'aide des relations suivantes :

$$\varepsilon_{Ut,soft} = \frac{w_{Ut}}{l_U} \quad (1)$$

La longueur de référence l_U dépend de la géométrie de l'élément de BFUP considéré. Selon le CT 2052, pour des éléments fléchis on peut admettre :

$$l_U = \frac{2}{3} h_U \quad (2)$$

h_U	Épaisseur de la couche de BFUP, épaisseur de l'élément en BFUP
l_U	Longueur de référence servant à calculer la déformation apparente à partir de l'ouverture de fissure
$\varepsilon_{Ut,soft}$	Déformation d'adoucissement du BFUP

Application numérique :

En considérant un module d'élasticité $E_{Ut} = 45 \text{ kN/mm}^2$ et une résistance à la traction f_{Ute} de 8.0 N/mm^2 , on obtient une déformation de **0.18 %** à la fin du domaine élastique.

Avec une épaisseur de BFUP $h_U = 50 \text{ mm}$ et des fibres usuelles de 13 mm de longueur, on obtient (éléments fléchis) :

$$l_U = \frac{2}{3} \times 50 = 33.3 \text{ mm}$$

$$w_{Ut,max} = \frac{13}{2} = 6.5 \text{ mm}$$

La déformation d'adoucissement, correspondant à l'ouverture maximale des fissures peut donc être estimé à $\varepsilon_{Ut,soft max} = \mathbf{195 \%}$.

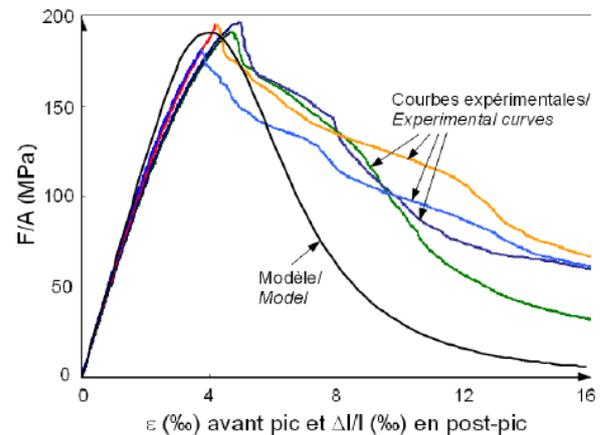
Pour rappel, la déformation ε_{Utu} d'un BFUP écrouissant vaut environ **1.5 à 3 %** lorsque la résistance à la traction est atteinte.

2.2. Comportement en compression

Dans le cas d'un fibrage nul ou faible, la rupture en compression se produit de manière particulièrement brutale et fragile. En revanche, un fibrage usuel, constitué d'environ 2.5 à 4 % volumiques de fibres métalliques, permet d'atténuer fortement la fragilité du BFUP et d'obtenir une certaine résistance post-pic.



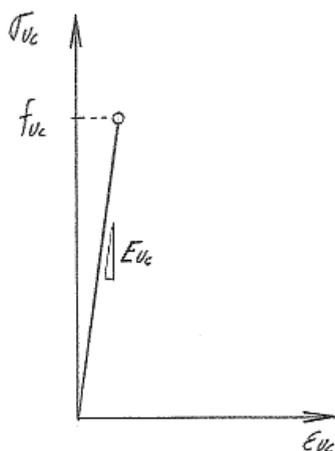
Reste d'une éprouvette cubique ($a = 150 \text{ mm}$) non fibrée (matrice seule) après un essai de compression. La rupture s'est produite de façon explosive sous une contrainte de 130 N/mm^2 (photo Holcim).



Comportement en compression d'un BFUP usuel (essai dirigé en déplacement) selon [2]

Fig. 2 Comportement du BFUP sollicité en compression (en fonction du fibrage)

Dans le modèle de calcul du CT 2052, le comportement du BFUP sollicité en compression est considéré comme linéaire élastique jusqu'à ce que la résistance à la compression f_{Uc} soit atteinte et la courbe descendante du diagramme contrainte-déformation est négligée. Il est également possible de prendre en compte une baisse de rigidité et d'admettre un diagramme non linéaire pour décrire la branche ascendante du diagramme contrainte-déformation.



Application numérique :

En admettant une résistance à la compression f_{Uc} de 140 N/mm^2 et un module d'élasticité $E_{Uc} = 45 \text{ kN/mm}^2$, on obtient une déformation théorique de **-3.1 %** au moment de la rupture en compression.

f_{Uc} Résistance à compression du BFUP

Fig. 3 Loi contrainte-déformation du BFUP sollicité en compression selon le CT 2052

Par définition, le BFUP considéré dans le CT 2052 présente une résistance caractéristique (fractile 5 %) à la compression sur cube à 28 jours de 120 N/mm^2 au minimum.

La limitation de capacité des presses usuelles incite à choisir des éprouvettes de compression de taille réduite. Celles-ci peuvent être de forme cylindriques, cubique ou correspondre à des demi-prismes, préalablement rompu en flexion trois points. Des facteurs de correspondance entre les différentes tailles et formes d'éprouvettes sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Relations entre la géométrie des éprouvettes et la résistance à la compression mesurée du BFUP (CT 2052 Annexe C.1)		
Cylindres (d = 70 mm h = 140 mm)	Cubes (100 mm d'arête)	Demi-prismes (40 mm x 40 mm x 160 mm)
≈ 95 %	100 %	≈ 140 %

Ces valeurs sont indicatives et déterminées de façon expérimentale. Le tableau ci-après illustre les rapports entre les résistances à la compression, mesurées lors d'une campagne d'essais, sur des cubes (100 mm d'arête) et sur des cylindres (d = 70 mm, h = 140 mm) à différentes échéances et pour différents taux de fibres métalliques (en % vol.).

Rapport f_{Uc} cylindre/ f_{Uc} cube				
Age [j]				
Fibrage	1	2	7	28
2.7 %	0.82	0.83	0.80	0.85
3.7 %	0.80	0.94	0.92	0.93
4.7 %	0.90	1.01	0.85	0.84
moyenne	0.84	0.93	0.86	0.87

La même démarche a été effectuée pour obtenir la relation entre la résistance à la compression sur cubes et sur demi-prismes (40 mm x 40 mm x 160 mm).

Rapport f_{Uc} prisme/ f_{Uc} cube		
Age [j]		
Fibrage	7	28
2.7 %	1.13	1.27
3.7 %	1.24	1.30
4.7 %	1.45	1.66
moyenne	1.27	1.41

Dans les deux cas on constate que les valeurs obtenues sont relativement proches des coefficients de corrélation proposés dans le CT 2052.

3. Sortes de BFUP et spécification

Contrairement à un béton usuel, la principale propriété mécanique attendue d'un BFUP n'est pas la valeur de sa résistance en compression, mais son comportement à la traction. La résistance à la compression du BFUP n'étant que rarement déterminante, et ses propriétés de durabilité étant largement assurées, le CT 2052 définit trois sortes de BFUP en se basant uniquement sur le comportement en traction. La spécification du BFUP se fait donc par le choix d'une sorte U0, UA ou UB et d'éventuelles autres propriétés, considérées comme des exigences complémentaires.

3.1. Sortes de BFUP

Sorte		U0	UA	UB
f_{Utek}	[MPa]	≥ 7.0	≥ 7.0	≥ 10.0
f_{Uuk}/f_{Utek}	[-]	> 0.7 ⁽¹⁾	> 1.1	> 1.2
ϵ_{Ut}	[‰]	- ⁽²⁾	> 1.5	> 2.0

(1) Le BFUP de la sorte U0 ne présente pas un comportement écrouissant en traction. La limite $f_{Uuk}/f_{Utek} > 0.7$ lui confère cependant un comportement écrouissant en flexion avec une certaine marge de sécurité.

(2) Aucune limite n'est imposée car cette valeur découle directement du rapport entre la valeur caractéristique de la résistance limite élastique à la traction f_{Uuk} et le module d'élasticité du BFUP en traction E_{Ut} . Avec $f_{Uuk} = 7 \text{ N/mm}^2$ et un module d'élasticité usuel de 45 kN/mm^2 , la déformation de traction d'un BFUP de la sorte U0, lorsque la résistance à la traction est atteinte, peut être estimée à $7/45'000 = 0.16 \text{ ‰}$.

Le BFUP de la sorte U0 est couramment employé pour la production d'éléments préfabriqués non structuraux. Lors de la réalisation d'éléments mixtes BFUP-béton, l'entrave au retrait du BFUP nécessite généralement un comportement écrouissant en traction et l'emploi d'un BFUP de la sorte UA ou éventuellement UB.

3.2. Exigences complémentaires

En plus de la sorte de BFUP, le concepteur pourra définir des exigences complémentaires, concernant par exemple les propriétés non exhaustives suivantes :

- Résistance caractéristique à la compression sur cube (si celle-ci doit être supérieure à une valeur de 120 N/mm^2)
- Aptitude à la mise en place en pente de x %
- Consistance dans le cas d'une mise en place particulière
- Exigence relative à un module d'élasticité minimal
- Résistance à l'abrasion
- Résistance au feu
- Température maximale ou minimale du BFUP frais
- Aspect esthétique particulier (par ex. teinte sombre par ajout de x % de pigments noir)

En général ces exigences complémentaires doivent faire référence à une méthode d'essai et être associées à une valeur limite ou une valeur cible.

4. Propriétés mécaniques

L'évolution des propriétés mécaniques du BFUP en fonction du temps dépend de la composition, du traitement thermique éventuel et de la cure. Pour un BFUP sans traitement thermique, on pourra utiliser les valeurs indicatives données ci-après. Dans le cas d'un BFUP avec traitement thermique, ou si l'évolution des propriétés mécaniques joue un rôle déterminant, on l'évaluera de façon spécifique au projet sur la base d'essais.

4.1. Evolution de la résistance en compression

Connaissant le type de ciment utilisé et la température moyenne de l'élément en BFUP, il est possible d'estimer l'évolution de la résistance à la compression à l'aide de la figure 4 ci-dessous.

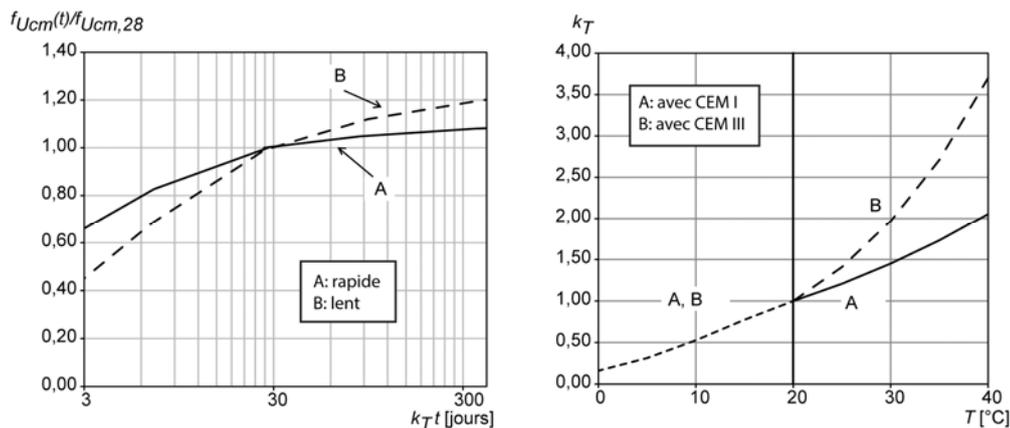


Fig. 4 Evolution de la résistance à la compression du BFUP.

Les frottements engendrés par le malaxage ont tendance à élever fortement la température du BFUP frais. Dans des conditions estivales, il n'est pas rare d'avoir une température du BFUP frais comprise entre 30 et 35°C. Une telle température accélère fortement la cinétique de montée en résistance lors des premiers jours. Cet effet pourra être pris en compte à l'aide du coefficient k_T .

4.2. Estimation du module d'élasticité

Le module d'élasticité peut être estimé sur la base de la résistance moyenne à la compression sur cube à l'aide du diagramme suivant.

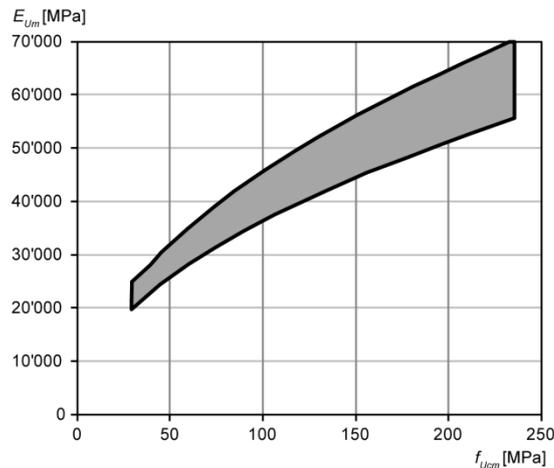


Fig. 5 Module d'élasticité du BFUP en fonction de sa résistance à la compression

Ce diagramme est applicable pour des BFUP qui n'ont pas encore atteint un âge de 28 jours, raison pour laquelle il couvre également une plage de résistances inférieures à la résistance minimale de 120 N/mm². Si le module d'élasticité joue un rôle déterminant, il faudra le mesurer à l'aide d'essais.

5. Fluage et retrait

5.1. Fluage en compression

La déformation de fluage $\varepsilon_{Ucc}(t)$ d'un BFUP confectionné avec du CEM I et soumis lors de sa mise en charge à une contrainte de compression inférieure à 40 % de sa résistance moyenne à la compression au moment de la mise en charge t_0 , peut être déterminée à partir de la déformation élastique ε_{Uel} à l'aide de la relation suivante :

$$\varepsilon_{Ucc}(t) = \varphi_U(t, t_0) \cdot \varepsilon_{Uel} \quad (3)$$

Avec le coefficient de fluage :

$$\varphi_U(t, t_0) = \varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b} \quad (4)$$

Le coefficient de fluage final $\varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$ ainsi que les coefficients a et b sont donnés dans le tableau suivant. Un traitement thermique du BFUP au jeune âge permet de diminuer considérablement le fluage.

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

Dans le cas d'une contrainte de compression permanente supérieure à 40 % de la résistance moyenne à la compression, le coefficient de fluage devra être évalué à l'aide d'investigations particulières.

La représentation graphique des courbes de fluages obtenues selon le CT 2052 pour différentes échéances de mise en charge est donnée dans la figure 6 (courbes continues). L'évolution du

coefficient de fluage mesuré sur des éprouvettes de 12 x 12 x 36 cm, mises en charge à 7 jours, est également indiquée pour comparaison.

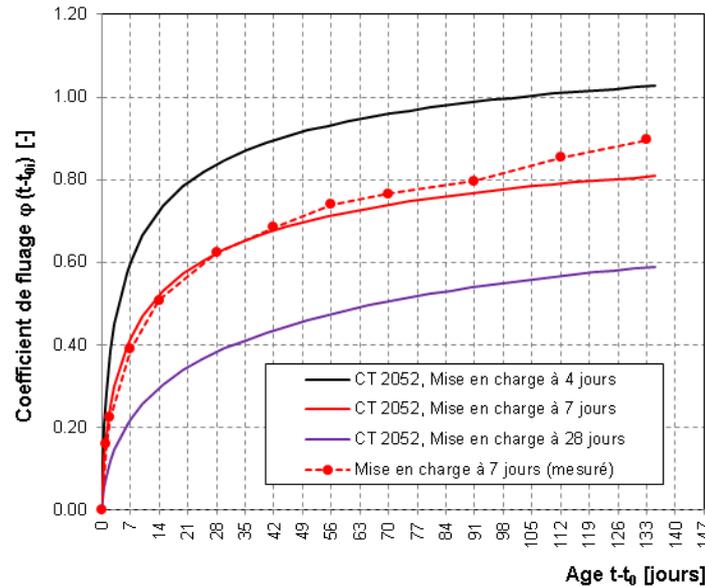


Fig. 6 Courbes de fluage théoriques d'un BFUP confectionné avec du CEM I, mis en charge à 4, 7 ou 28 jours et comparaison avec des valeurs mesurées pour une mise en charge à 7 jours

5.2. Fluage en traction

Pour un BFUP soumis à des sollicitations de traction inférieures ou égales à sa résistance limite élastique à la traction f_{Ute} , le fluage sera déterminé de la même façon que lors d'une sollicitation de compression. Si la contrainte de traction dépasse la limite élastique à la traction, le fluage présente un comportement non linéaire.

5.3. Retrait

Le retrait du BFUP résulte d'une part prépondérante de retrait endogène (sans échange d'humidité avec le milieu ambiant) et d'une part limitée de retrait de dessiccation.

Un traitement thermique du BFUP au jeune âge a pour effet de diminuer considérablement le retrait. Dans le cas d'un BFUP sans traitement thermique, le retrait total (endogène + dessiccation) peut être estimé à l'aide de la relation suivante :

$$\varepsilon_{Us}(t) = \varepsilon_{U_{\infty}} \cdot e^{\frac{-c}{\sqrt{t+d}}} \quad (5)$$

L'âge t est exprimé en jours. Les coefficients c et d , ainsi que la valeur finale du retrait $\varepsilon_{U_{\infty}}$, sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Type de ciment employé dans la formulation du BFUP	$\varepsilon_{U_{\infty}}$ [‰]	c [-]	d [-]
CEM I	0.6 à 0.8	2.48	-0.86
CEM III/B	0.95	1.3	-0.86

La représentation graphique du retrait total, selon CT 2052, d'un BFUP confectionné avec du ciment CEM III (courbe bleue) ou CEM I (courbe grise = borne supérieure, courbe noire = borne inférieure) est donnée dans la figure 7. Des valeurs mesurées dès 1 jour sur un BFUP confectionné avec un CEM I sont données à titre comparatif. Il faut signaler que les valeurs mesurées ne prennent pas en compte le retrait qui s'est produit entre 0 et 24 heures.

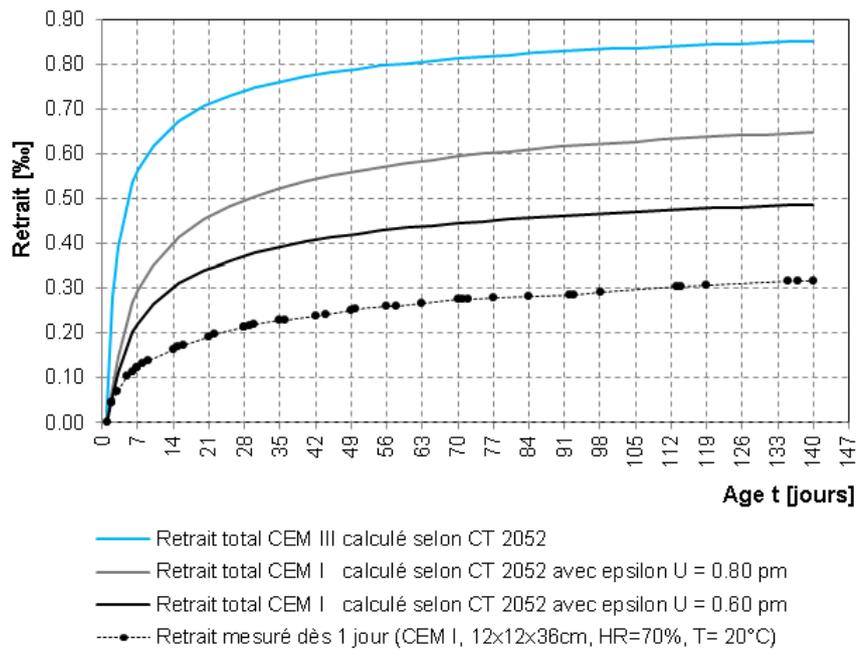


Fig. 7 Courbes de retrait théoriques de BFUP confectionnés avec du CEM I ou du CEM III

6. Fatigue

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

$$\sigma_{U,D} = 0,30 \cdot (f_{Utek} + f_{Utuk}) \quad (6)$$

7. Résistance au feu

Lors d'un incendie, l'eau contenue dans le béton se transforme en vapeur et engendre une pression vers l'extérieur pouvant conduire à un écaillage très brutal de la surface et une perte de section de l'élément. Plus la perméabilité du béton est faible, plus ce risque d'écaillage est important. Le BFUP est donc extrêmement sensible en cas d'incendie. L'ajout de fibres de polypropylène permet de limiter fortement, voire d'éviter l'écaillage du BFUP. L'efficacité de cette mesure dépend du type et du dosage des fibres de polypropylène. Une vérification au cas par cas, par des essais spécifiques est donc impérative.

Un calcul, servant à déterminer la résistance au feu, ne peut être appliqué que si la section conserve son intégralité et que le risque d'écaillage est éliminé.



Éprouvettes au début de l'essai



Écaillage des éprouvettes soumises à une température de 500°C
Photos Holcim (Suisse) SA

Fig. 8 Exemple d'écaillage d'un BFUP (sans fibres de polypropylènes) soumis à une température élevée

8. Propriétés du BFUP armé

En raison de l'excellente adhérence entre le BFUP et les barres d'armature nervurées, une rupture précoce des armatures est susceptible de se produire dans le domaine écouissant du BFUP, si la ductilité des armatures n'est pas suffisante. L'acier d'armature nervuré correspondant à la classe de ductilité A selon SIA 262 doit donc être évité dans le BFUP.

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 présence d'armature passive accroît la capacité d'écrouissage du BFUP. En première approximation on pourra utiliser les lois de matériaux de la figure 9 pour le BFUP des sortes UA et UB.

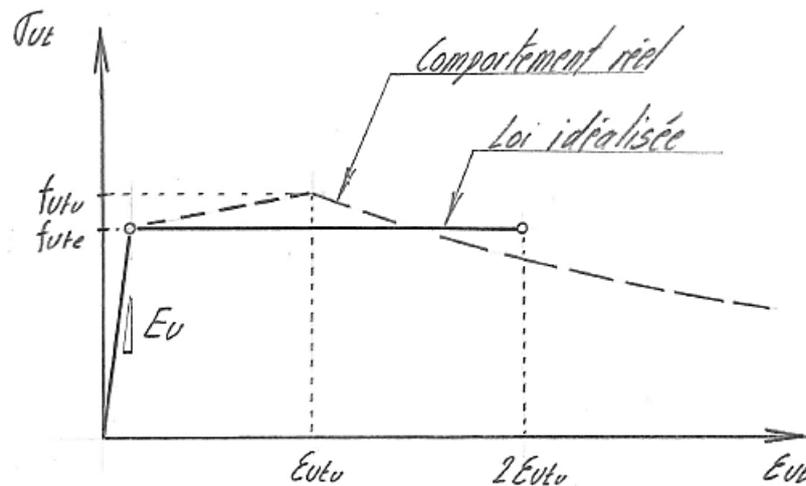


Fig. 9 Loi de matériaux idéaliste pour les BFUP des sortes UA et UB dans les cas d'éléments en BFUP armé sollicités en traction

Cette loi bilinéaire idéaliste considère une partie du comportement adoucissant en limitant forfaitairement la déformation ultime du BFUP tendu à $2 \cdot \epsilon_{Ultu}$.

9. Références

- [1] Cahier technique SIA 2052 (en cours de publication) version mai 2015, Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich
- [2] Recommandation AFGC – Béton fibré à ultra-hautes performances, édition révisée, juin 2013
- [3] Norme SIA 262, 2013

Essais de caractérisation – réponse en traction

Emmanuel DENARIÉ

Dr. ès sc. techn., Ing. civ. dipl. EPFL/SIA, MER
MCS-IIC-ENAC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,
CH-1015 Lausanne

Résumé

Le comportement en traction des BFUP (résistance élevée et déformabilité notable) est un de leurs principaux attraits. Pour valoriser au mieux ces propriétés, il importe de disposer d'essais et de méthode d'analyse inverse permettant de déterminer la réponse en traction des BFUP soit directement au moyen d'essais de traction uniaxiale, soit indirectement au moyen d'essais de flexion sur bandes minces.

Dans un premier temps on présente les deux types d'essais proposés pour caractériser la réponse en traction des BFUP : traction uniaxiale sur éprouvettes cintrées non entaillées et flexion 4 points sur bandes non entaillées et les paramètres qui en sont extraits. Dans un deuxième temps on illustre l'analyse des résultats d'essais au moyen d'exemples d'application basés sur le cas de chantiers récents.

Mots-clés : BFUP, écouvissage, traction, flexion, fibrage, effets d'orientation, analyse inverse

1. Introduction

On trouvera dans [1] un aperçu des bases sur les BFUP et des aspects plus spécifiques liés à leur réponse en traction uniaxiale et aux paramètres de composition et de mise en œuvre qui la gouvernent. Leur réponse en traction uniaxiale issue d'essais est représentée schématiquement à la Figure 1a) dans le cadre de BFUP écouvissants en traction et à la Figure 1b) dans le cas de BFUP adoucissants, avec G_{FU} l'énergie spécifique de rupture définie par les aires grisées. On distingue 3 domaines: (1) la partie élastique jusqu'à f_{Ute} (entre 7 et 11 MPa selon les BFUP), avec un module d'élasticité E_{Ut} , (2) la partie écouvissante entre la fin de la partie élastique et la fin du domaine écouvissant marquée par la résistance maximale f_{Utu} (entre 7 et 15 MPa environ) et la fin de l'écouvissage pour une élongation w_{Utu} , et (3), la partie adoucissante qui suit la partie écouvissante si elle est présente, et se prolonge jusqu'à une élongation $w_{Ut,max}$ dominée par l'ouverture d'une fissure localisée, pour laquelle le BFUP ne transmet plus d'efforts de traction (en règle générale, $w_{Ut,max} = l_f/2$ où l_f est la longueur des fibres les plus longues utilisées dans le BFUP).

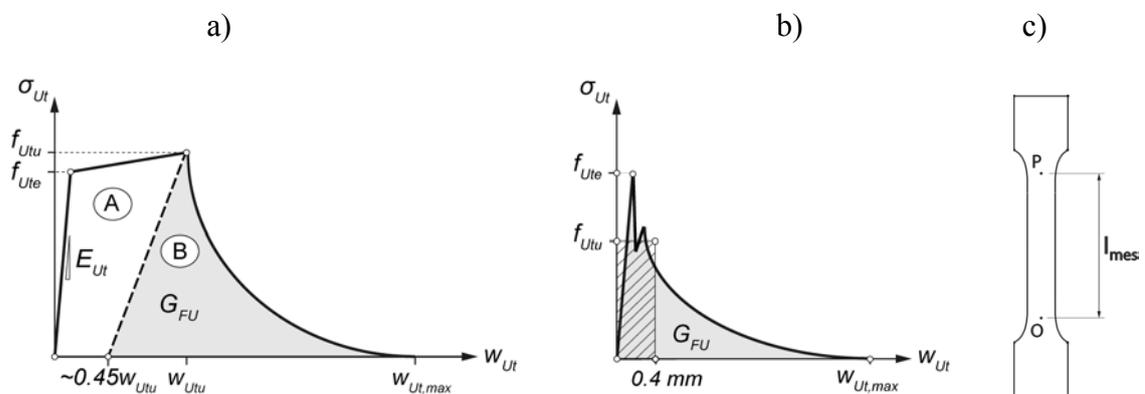


Fig. 1 Réponse en traction expérimentale idéalisée d'un BFUP: a) écouvissant, b) adoucissant; c) base de mesure des essais de traction, avec w_{Ut} l'élongation de l'éprouvette mesurée entre les points O et P.

Dans le cas des BFUP écrouissants, la dissipation d'énergie se fait de 2 manières différentes, (A) de manière répartie (domaine écrouissant) et (B) de manière localisée dans le domaine adoucissant. La séparation des contributions de ces 2 formes de dissipation d'énergie qui se chevauchent au voisinage du pic de contrainte au cours d'un essai de traction, impose de tenir compte de la pente de décharge au pic d'écrouissage, comme indiqué à la figure 1a). L'aire à considérer pour la détermination de l'énergie spécifique de rupture G_{FU} (indiquée par la lettre (B)) est constituée à gauche par la pente de décharge au pic (pente donnée par une élévation résiduelle de l'ordre de 45 % de la valeur de départ), et à droite par le comportement adoucissant du matériau. La relation entre déformations et élongations s'écrit (valable uniquement jusqu'à l'élongation au pic de contraintes w_{Ut}), avec l_{mes} la base de mesure des capteurs de déplacement entre les points O et P sur la figure 1c) et w_{Ut} , l'élongation de l'éprouvette entre ces points:

$$\varepsilon_{Ut} = w_{Ut} / l_{mes} \quad (1)$$

Dans le cas des BFUP adoucissants, Figure 1b), l'énergie spécifique de rupture G_{FU} est égale à l'aire sous la courbe contrainte - élongation. La valeur représentative de la résistance à la traction post-pic f_{utu} est déterminée sur la base de la contrainte moyenne jusqu'à 0.4 mm d'élongation.

L'objectif de la caractérisation des propriétés en traction des BFUP est la détermination des valeurs de résistance et de déformabilité: f_{Ute} , f_{Ut} , ε_{Ut} et E_{Ut} qui sont la base de la définition de sortes de BFUP selon [2]. Ceci peut se faire soit de manière directe au moyen d'un essai de traction uniaxiale non entaillé, soit de manière indirecte au moyen d'un essai de flexion non entaillé, associé à une méthode d'analyse inverse des résultats de flexion. En complément, l'énergie spécifique de rupture G_{FU} et le comportement adoucissant du BFUP peuvent être déterminés au moyen d'un essai de traction uniaxiale.

On prendra garde au fait que la performance en traction des BFUP est intimement liée à l'action de leur ossature fibrée. En cas d'orientation défavorables des fibres par rapport aux efforts de traction, de variations locales de la quantité de fibres, ou de perte de la continuité du fibrage (joints de coulage ou fronts de flux lors du coulage) cette performance peut être très fortement diminuée. Au contraire, en cas d'orientation favorable des fibres par rapport à la direction des efforts, par exemple dans des éprouvettes de laboratoire moulées, testées de manière unidirectionnelle, les performances du matériau obtenues sont le plus souvent une borne supérieure. Il n'existe pas de loi de comportement en traction absolue et unique pour des matériaux renforcés de fibres discontinues, tels que les BFUP. La réponse du matériau dépend de sa composition et du mode de fabrication/coulage des éprouvettes. Cet aspect désormais bien connu est couvert entre autres lors du dimensionnement par le coefficient de passage K selon [3] ou par les coefficients η_{hu} et η_k selon [2].

Dans ce qui suit on présentera d'abord les essais de traction et flexion ainsi que le mode de préparation des éprouvettes, avec des exemples pratiques d'application aux BFUP. On illustrera ensuite, sur la base d'un exemple d'application, l'analyse inverse de résultats de flexion sur bandes minces.

2. Essais de caractérisation

2.1. Vue d'ensemble

Deux types d'essais (traction uniaxiale sur éprouvettes cintrées, non entaillées, et flexion sur bandes minces non entaillées) sont prescrits selon [2], avec deux différents modes de préparation des éprouvettes:

- (1) coulage individuel dans un moule,
- (2) découpe par sciage dans une plaque carrée de 700 x 700 mm de côté.

Une épaisseur unique de 30 ± 1 mm (obtenue par rectification d'éléments de 35 ± 2 mm d'épaisseur) a été retenue pour toutes les configurations, quelle que soit la longueur des fibres utilisées. L'effet d'épaisseurs différentes est pris en compte lors du calcul des valeurs de dimensionnement. Le tableau 1 ci-dessous présente les différents types d'essais (définis selon [4]) et leur application. Pour les essais de convenance, 2 séries d'essais avec chacune 6 éprouvettes sciées dans une plaque carrée

de 700 mm de côté sont réalisées, correspondant aux directions de découpe parallèles (série 1) et perpendiculaires (série 2) au sens de coulage du BFUP.

Tableau 1 Types d'essais et application

Type d'essai	Eprouvette	Préparation	Nombre
Initial	Traction uniaxiale	Moules individuels	6
Initial	Flexion sur plaque	Moules individuels	6
De convenance	Flexion sur plaque	Sciage de plaque carrée	2 x 6
De qualité	Flexion sur plaque	Moules individuels	6

- Les essais initiaux sont : soit ceux réalisés par les fournisseurs de BFUP pour caractériser leurs matériaux (fiche produit), soit ceux réalisés en amont du déroulement d'un chantier pour retenir des BFUP répondant au cahier des charges fixé.
- Les essais de qualité sont réalisés en cours de chantier au titre d'assurance qualité. Les valeurs obtenues doivent correspondre à celles des essais initiaux.

Les essais initiaux et de qualité sont réalisés sur des éprouvettes moulées individuellement, avec une orientation préférentielles volontaire des fibres. Les résultats obtenus constituent une borne supérieure du comportement mécanique du BFUP et sont la base de la définition des sortes de BFUP selon [2].

Les valeurs de dimensionnement sont obtenues à partir des résultats des essais initiaux (ou des valeurs minimales de définition des sortes de BFUP), affectés des coefficients de réduction liés à l'orientation des fibres η_{hu} et η_k et du coefficient de sécurité global γ_U .

- Enfin, les essais de convenance permettent de valider la performance mécanique du BFUP choisi dans le contexte particulier de l'application (conditions de coulage). Ces essais permettent de vérifier que les valeurs obtenues pour la résistance et la déformabilité du BFUP dans une configuration la plus proche possible de celle qui est rencontrée dans l'ouvrage sont supérieures ou égales à celles admises au niveau de dimensionnement.

2.2. Essai de traction uniaxiale

2.2.1. Eprouvette et équipements

L'essai de traction est réalisé au moyen d'une machine asservie sur la base des capteurs de déplacement ou du déplacement de la traverse. La figure 2 présente la géométrie de l'éprouvette et la disposition des capteurs. La géométrie de la zone de transition (segments B-C, E-F, I-J, L-M) a été calculée d'après [5] pour minimiser les effets de concentration de contraintes dus au changement de section.

Deux capteurs de déplacement sont placés, centrés sur le milieu de l'éprouvette, dans sa partie cintrée, de part et d'autre de l'éprouvette et solidaires de celle-ci aux points C et E d'une part et L et J d'autre part. Deux autres capteurs de déplacement sont placés sur les faces planes de l'éprouvette, et solidaires de celles-ci aux points O et P d'une part et Q et R d'autre part (afin d'assurer la mesure des déplacements même en cas de rupture au voisinage immédiat ou au début de la zone de changement de section). Les efforts de traction sont introduits selon l'axe longitudinal de l'éprouvette "x" au moyen de plaques d'aluminium (PAC) de 1.5 mm d'épaisseur collées sur les faces ABMN et FGHI qui sont serrées dans les mors de la machine (le cas échéant, selon le type de mors utilisés, l'essai peut également être réalisé sans les plaques d'aluminium collées, par serrage direct sur le BFUP). Les conditions d'appui de l'éprouvette doivent être du type « encastré », sans possibilité de rotation aux extrémités.

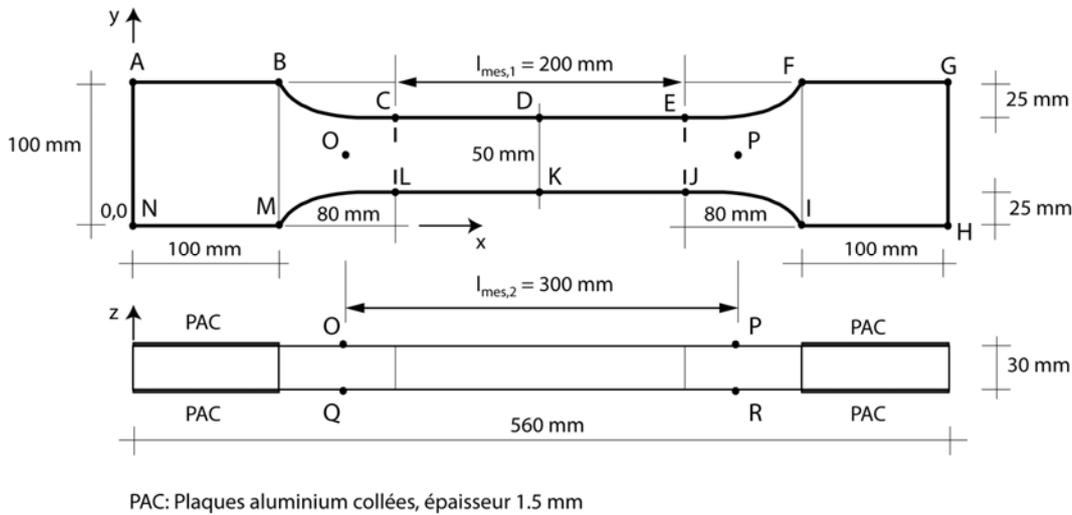


Fig. 2 Essai de traction uniaxiale.

2.2.2. Essai

La fréquence d'acquisition des données est de 5 Hz. Les essais sont réalisés en 2 temps. On teste d'abord 3 éprouvettes de manière monotone avec une vitesse de 0.05 mm par minute de déplacement moyen des capteurs pour les parties élastiques et écrouissantes (ou 0.2 mm par minute de déplacement de traverse). Pour la partie adoucissante la vitesse de déplacement des capteurs peut être augmentée à 0.5 mm/minute (ou 0.4 mm par minute de déplacement de traverse). L'essai est terminé lorsque le déplacement moyen des capteurs est égal à la demi-longueur des fibres les plus longues utilisées + 20 %. Ces 3 premiers essais permettent de déterminer la plage de variation de la résistance à la traction du BFUP f_{Utu} .

Pour les 3 éprouvettes restantes, on commence par réaliser 3 cycles de charge-décharge jusqu'au tiers de la contrainte maximale moyenne déterminée pour les 3 premières éprouvettes testées. On recharge ensuite l'éprouvette de manière monotone jusqu'à la rupture complète comme pour les 3 premières éprouvettes. Les vitesses de sollicitation sont les mêmes que précédemment. Pour ces 3 éprouvettes, les cycles de charge-décharge réalisés permettent de déterminer de manière précise le module d'élasticité et la résistance limite élastique du BFUP f_{Ute} .

L'ensemble des 6 éprouvettes permet de déterminer la plage de variation et la valeur moyenne de la résistance à la traction du BFUP et de la déformation correspondante ε_{Utu} .

2.2.3. Interprétation des résultats

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

Pour les 3 éprouvettes ayant subi les 3 cycles de charge-décharge, pour chaque couple de valeurs force F_i et déplacement moyen w_{Uti} mesurées, avant la force maximale, on détermine le module d'élasticité sécant apparent E_i au cours de la dernière recharge (avec l_{mes} : base de mesure des capteurs, b_m : largeur de la partie centrale et h_m : épaisseur de l'éprouvette) selon:

$$E_i = \frac{F_i}{b_m \cdot h_m} \cdot \frac{l_{mes}}{w_{Uti}} \quad (2)$$

On détermine également pour chaque valeur de déplacement moyen w_{Uti} ($i \geq 10$) la moyenne mobile E_{mi} des 10 valeurs précédentes du module sécant apparent E_i . Finalement, on représente graphiquement le module E_i et sa moyenne mobile en fonction du déplacement moyen mesuré w_{Uti} . La fin du domaine linéaire correspond à la force F_A à partir de laquelle on observe une perte irréversible de 1 % de la moyenne mobile E_{mi} du module sécant apparent. La valeur de la limite d'élasticité du BFUP vaut :

$$f_{Ute} = \frac{F_A}{b_m \cdot h_m} \quad (3)$$

Le module d'élasticité apparent du BFUP est égal à la valeur de la moyenne mobile du module sécant apparent E_{mi} pour la force F_A .

On détermine enfin la valeur de la résistance à la traction au moyen de la relation :

$$f_{Utu} = \frac{F_B}{b_m \cdot h_m} \quad (4)$$

- Si le BFUP présente un comportement écouissant, F_B est la force maximale atteinte au cours de l'essai.
- Si le BFUP ne présente pas de comportement écouissant, 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 (5), avec $A_{0,4}$ l'aire sous la courbe force-déplacement moyen jusqu'à 0.4 mm de déplacement (base de mesure $l_{mes,2}$):

$$F_B = \frac{A_{0,4}}{0.4 \text{ mm}} \quad (5)$$

Ce choix est motivé par la volonté de garantir un comportement écouissant en flexion, et par le fait que la réponse en flexion jusqu'à la force maximale atteinte est influencée majoritairement par l'allure du comportement adoucissant initial du BFUP en traction et non par une valeur ponctuelle.

- Dans le cas où le BFUP présente un comportement écouissant, la déformation d'écrouissage ε_{Utu} est celle qui correspond à la force maximale atteinte F_B .

2.3. Essai de flexion sur bandes

2.3.1. Eprouvette et équipements

Les éprouvettes sont des bandes de 500 x 100 x 30 mm. L'essai de flexion 4 points, figure 3, est réalisé au moyen d'une machine asservie en déplacement du piston. L'éprouvette est disposée de façon à soumettre la face de damage, rectifiée, en traction. Deux capteurs inductifs de déplacement sont placés à mi portée de part et d'autre de l'éprouvette et solidaires de celle-ci par un châssis de mesure (c) fixé au droit des appuis, à mi-hauteur de l'éprouvette. Le déplacement est mesuré par rapport à un témoin solide de l'éprouvette (b). La portée entre les axes des appuis est de 420 mm. Les efforts de flexion sont distribués uniformément au moyen de plaques déformables (a) placées sous les points d'application des déplacements (bois aggloméré ou plomb par exemple). Les appuis inférieurs de l'éprouvette sont munis d'un côté d'une capacité de rotation dans le plan transversal et de même pour les points d'application des déplacements imposés.

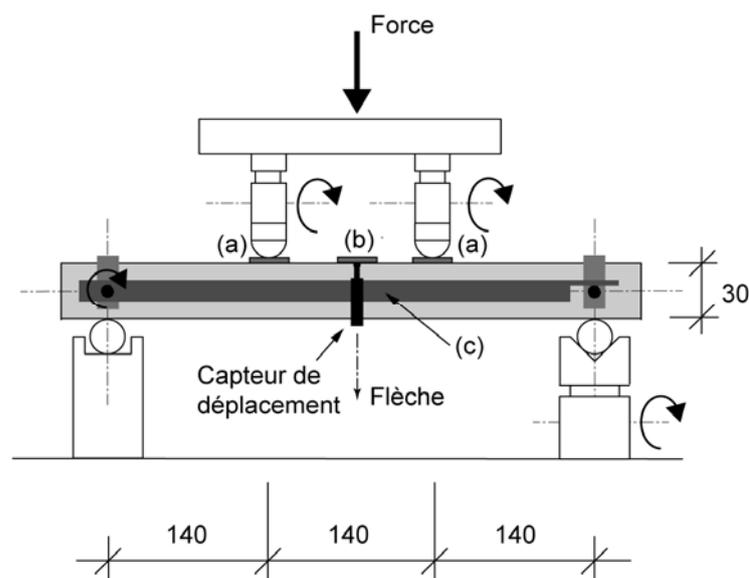


Fig. 3 Essai de flexion 4 points sur bande.

2.3.2. Essai

La fréquence d'acquisition des données est de 5 Hz. Les essais sont réalisés en 2 temps. On teste d'abord 3 éprouvettes de manière monotone avec une vitesse de 0.05 mm par minute de déplacement du piston (traverse) de la machine. Pour la partie post-pic la vitesse de déplacement du piston peut être augmentée à 0.5 mm/min. L'essai est terminé lorsque la flèche moyenne à mi-portée donnée par les capteurs est égale à 25 mm. *Ces 3 premiers essais permettent de déterminer la plage de variation de la résistance à la traction du BFUP f_{Utu} sur la base des forces maximales F_B selon figure 4.*

Pour les 3 éprouvettes restantes, on commence par réaliser 3 cycles de charge-décharge jusqu'au quart de la force maximale moyenne déterminée pour les 3 premières éprouvettes testées. On recharge ensuite l'éprouvette de manière monotone jusqu'à la rupture complète comme pour les 3 premières éprouvettes. Les vitesses de sollicitation sont les mêmes que précédemment. *Pour ces 3 éprouvettes, les cycles de charge-décharge réalisés permettent de déterminer de manière précise le module d'élasticité et la résistance limite élastique du BFUP f_{Ute} , puis de réaliser le cas échéant l'analyse inverse pour extraire des résultats d'essai l'étendue du domaine écrouissant ε_{Utu} .*

L'ensemble des 6 éprouvettes permet de déterminer la plage de variation et la valeur moyenne de la résistance à la traction du BFUP sur la base de la force maximale atteinte F_B .

2.3.3. Interprétation des résultats

La figure 4a) représente schématiquement le résultat d'un essai de flexion. La figure 4b) représente la distribution de contraintes en section qui peut être admise au pic de force et qui permet de déterminer la résistance à la traction du BFUP f_{Utu} . Cette distribution de contraintes a été validée sur la base de très nombreuses analyses inverses réalisées à l'aide d'un programme de calcul non linéaire par éléments finis [6] pour de nombreux BFUP, dans le cas d'une bande mince fléchie identique à celle utilisée pour les essais de flexion prescrits selon [2].

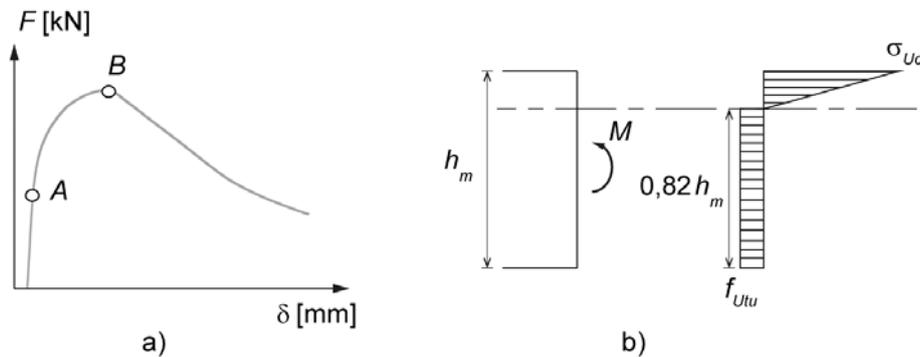


Fig. 4 a) essai de flexion, limite d'élasticité (point A) et b) modèle de contraintes en section au pic de force (point B).

Pour les 3 éprouvettes ayant subi les 3 cycles de charge-décharge, pour chaque couple de valeurs force F_i et flèche moyenne δ_i mesurées, avant la force maximale, on détermine le module d'élasticité sécant apparent E_i au cours de la dernière recharge (avec l_m : portée entre appuis, b_m : largeur et h_m : épaisseur de l'éprouvette) selon:

$$E_i = 0.0177 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{12 \cdot l_m^3}{b_m \cdot h_m^3} \quad (6)$$

On détermine également pour chaque valeur de flèche moyenne δ_i ($i \geq 10$) la moyenne mobile $E_{i,mob}$ des 10 valeurs précédentes du module sécant apparent E_i . Finalement, on représente graphiquement le module E_i et sa moyenne mobile en fonction de la flèche moyenne mesurée δ_i .

La fin du domaine linéaire correspond à la force F_A à partir de laquelle on observe une perte irréversible de 1% de la moyenne mobile du module sécant apparent E_{mi} . La valeur de la limite d'élasticité du BFUP vaut:

$$f_{Ute} = \frac{F_A \cdot l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (7)$$

Le module d'élasticité apparent du BFUP est égal à la valeur de la moyenne mobile du module sécant apparent E_{mi} pour la force F_A .

Le critère de variation du module sécant (1 %) utilisé dans la méthode de détection de la limite d'élasticité du BFUP f_{Ute} a été validé sur la base de mesures de bruit intrinsèque de mesure, pour deux laboratoires distincts, avec la même éprouvette témoin en aluminium soumise à l'essai de flexion 4 points recommandé, en mode de contrôle de vitesse de traverse. Le bruit sur la mesure de flèche, avant la moyenne mobile des modules d'élasticité, varie entre 0.85 % (labo 1) et 1.84 % (labo 2), valeurs moyennes de bruit à la recharge, sur 10 cycles. Après la moyenne mobile il est inférieur à 1 % pour les deux laboratoires.

Le point B caractérise la force maximale observée pendant l'essai. On peut admettre à ce point une distribution de contraintes en section identique à celle représentée à la figure 4b).

Selon cette hypothèse (zone comprimée en régime élastique), connaissant la force maximale mesurée F_B , on peut calculer la résistance à la traction du BFUP f_{Utu} et la contrainte de compression σ_{Uc} , selon :

$$f_{Utu} = 0.383 \cdot \frac{F_B \cdot l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (8) \qquad \sigma_{Uc} = 9.111 f_{Utu} \quad (9)$$

Et ainsi vérifier que l'hypothèse de zone comprimée en régime élastique est bien encore valide.

2.4. Préparation des éprouvettes

2.4.1. Essais de traction uniaxiale

La forme des éprouvettes de traction uniaxiale cintrées est donnée à la figure 2. Leur longueur est de 560 mm et leur largeur maximale de 100 mm. Pour chaque série d'essais, 6 éprouvettes de traction sont coulées de manière identique, dans des moules correspondant à la géométrie indiquée, avec une épaisseur de $35 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. On utilise une goulotte pour guider le coulage du BFUP en un flux continu d'un bout à l'autre des moules. De façon à limiter l'entrave imposée par la forme cintrée du moule, le profil du rétrécissement doit être réalisé avec un matériau déformable. Toutes les éprouvettes sont rectifiées à $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ d'épaisseur.

2.4.2. Essais de flexion sur bande

Les éprouvettes sont des bandes de $500 \times 100 \times 30 \text{ mm}$.

(1) Essais initiaux et essais de qualité: 6 éprouvettes de flexion sont coulées dans des moules de 100 mm de largeur, correspondant à la géométrie indiquée, de manière identique, avec une épaisseur de $35 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. On utilise une goulotte pour guider le coulage du BFUP en un flux continu d'un bout à l'autre des moules lors du coulage. Toutes les éprouvettes sont rectifiées à $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ d'épaisseur.

(2) Essais de convenance: deux plaques de $700/700/35 \text{ mm}$ sont coulées de manière identique avec une épaisseur de $35 \pm 2 \text{ mm}$. Le sens de coulage des plaques est repéré sur le coffrage et les plaques une fois démoulées. Dans l'une des deux plaques, on prélève six éprouvettes, en orientant l'axe longitudinal des éprouvettes parallèlement au sens de coulage. Dans l'autre plaque on prélève six éprouvettes, en orientant l'axe longitudinal des éprouvettes perpendiculairement au sens de coulage. Le sens de coulage est indiqué sur chaque éprouvette (flèche selon axe longitudinal de l'éprouvette pour la découpe dans le sens de coulage ou selon axe transversal pour la découpe perpendiculairement au sens de coulage). Toutes les éprouvettes sont rectifiées à $30 \pm 1 \text{ mm}$ d'épaisseur avant l'essai.

Le coulage des plaques est réalisé dans les conditions de pose du BFUP sur l'ouvrage (soit sur chant, plan vertical, faces coffrées, soit à l'horizontale), soit sur le chantier, soit au laboratoire. Pour les BFUP autoplaçants ou modérément thixotropes (étalement au cône d'Abram $\geq 400 \text{ mm}$), la mise en place pourra être faite manuellement.

On utilise une goulotte pour guider le coulage du BFUP en un flux continu d'un bout à l'autre de la plaque, de manière identique pour chaque plaque. Pour les BFUP fortement thixotropes (étalement au cône d'Abram < 400 mm), on réalise les plaques avec les moyens de mise en place utilisés sur l'ouvrage.

2.4.3. Conditionnement, cure et âge d'essai

Après le coulage, les éprouvettes ou les plaques carrées sont immédiatement protégées de la dessiccation au moyen d'une feuille de plastique et conservées à 20 °C. Elles sont décoffrées après 1 jour et conservées jusqu'à 3 à 5 jours avant l'essai, selon la norme SN EN 12 390-2.

Lors du transport et des manipulations pour les opérations de rectification, elles sont protégées de la dessiccation. 3 à 5 jours avant l'essai les éprouvettes sont séchées pendant 24 heures à l'air ambiant, à 20°C, avant les collages préalables aux essais. Les éprouvettes sont protégées de la dessiccation au moyen d'une feuille de plastique et conservées à 20 °C jusqu'à l'essai.

En l'absence de traitement thermique, les essais sont réalisés à un âge de 28 jours du BFUP de manière à éviter de sous-estimer ses performances potentielles. Avec un traitement thermique, l'âge d'essai est fixé d'entente avec le fournisseur de BFUP et le maître d'ouvrage, en fonction de l'application.

3. Analyse inverse d'essais de flexion

3.1. Bases théoriques

La méthode d'analyse inverse simplifiée (avec courbure élastique constante) proposée par [3] est appliquée en un point, au pic de force uniquement. Cette méthode est étendue à l'ensemble du domaine pré-pic entre les points A et B selon la figure 5. On peut admettre selon [3] que la courbure dans la zone de moment constant, dans le domaine pré-pic, est constante pour une force donnée et égale à la valeur dans le cas élastique, selon équation (11). Pour un couple de valeurs F_i , δ_i mesurées lors d'un essai de flexion, on a, avec σ_{Uti} la contrainte de traction dans le BFUP à la fibre inférieure tendue dans la zone de moment constant, ε_{Uti} la déformation du BFUP à la fibre inférieure tendue dans la zone de moment constant, χ_i la courbure dans la zone de moment constant, α_i le rapport de la hauteur de la zone plastifiée sur la hauteur totale de la section h_m , b_m la largeur de l'éprouvette et l_m la portée, E module d'élasticité calculé à partir de l'équation (6), pour la force F_A :

$$M_i = \frac{F_i \cdot l_m}{6} \quad (10)$$

$$\chi_i = \frac{216}{23} \cdot \frac{\delta_i}{l_m^2} \quad (11)$$

Les équations d'équilibre des efforts normaux et des moments en section, et de compatibilité permettent de dériver l'équation (12) suivante :

$$2\alpha_i^3 - 3\alpha_i^2 + 1 - \lambda_i = 0 \quad (12) \quad \text{avec} \quad \lambda_i = \frac{12 \cdot M_i}{b_m \cdot h_m^3 \cdot \chi_i \cdot E} \quad (13)$$

La valeur du paramètre λ_i peut être déterminée pour une série de couples F_i , δ_i de valeurs mesurées couvrant le domaine pré-pic, après la limite de linéarité au point A. L'équation (12) peut être résolue directement à l'aide d'un logiciel du commerce. Par facilité, on peut également utiliser des valeurs tabulées de la solution α_i pour différentes valeurs du paramètre λ_i entre 1 et 0, comme c'est le cas dans [2]. *On notera que le paramètre λ_i ne peut être supérieur à 1 (et α_i également par définition), sinon le modèle ne s'applique pas au point considéré.*

A partir de la valeur α_i , on calcule pour une série de points entre la limite d'élasticité du BFUP (point A) et la force maximale (point B), la contrainte de traction et la déformation à la fibre inférieure tendue selon:

$$\sigma_{Uti} = 0.5(1 - \alpha_i)^2 h_m \chi_i E \quad (14)$$

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E} + \chi_i \alpha_i h_m \quad (15)$$

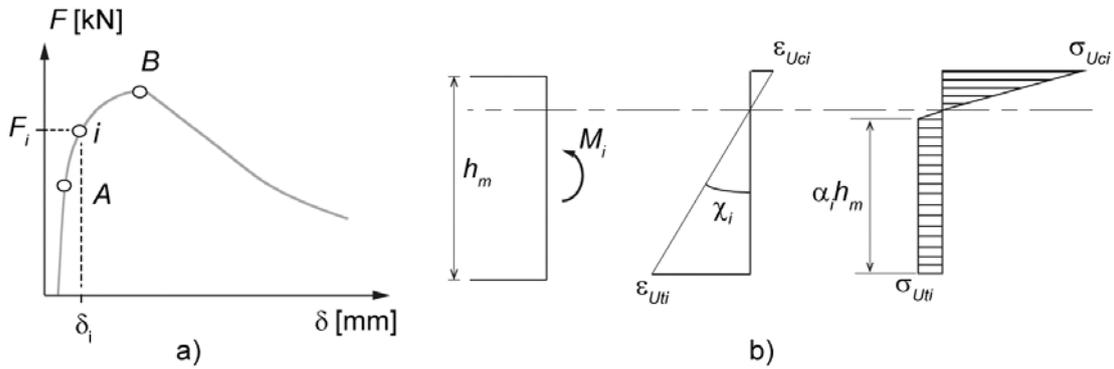


Fig. 5 Analyse inverse d'essais de flexion sur bandes, principes.

La base mécanique de cette méthode de calcul simplifiée a le désavantage de ne pas tenir compte du comportement adoucissant en traction du BFUP (déjà actif peu avant le pic de force). Appliquée telle quelle à la force de pic F_B comme c'est le cas dans [3], elle surestime de ce fait notablement la déformation d'écroutissage en traction du BFUP.

Pour cette raison, on complète l'application progressive de cette méthode entre les points A et B par un critère supplémentaire associé à la résistance à la traction du BFUP f_{utu} . Cette valeur est calculée grâce à la force maximale F_B mesurée et à la distribution de contraintes en section selon la figure 4b) et l'équation (8).

Le calcul est effectué pour une série de points espacés entre les points A et B. Le premier point "j" pour lequel la valeur de la contrainte calculée dépasse la résistance à la traction f_{utu} calculée à partir de l'équation (4) permet d'estimer la limite d'écroutissage du BFUP $\varepsilon_{Uti} = \varepsilon_{Uti}$.

On prendra garde au fait que la méthode de calcul utilisée selon les équations (10) à (15) suppose pour chaque point de calcul (F_i , δ_i) une distribution de contraintes de traction en section de type élasto-plastique dans la zone tendue selon la Figure 5b). L'ensemble des points σ_{Uti} , ε_{Uti} obtenus par le calcul ne constitue donc pas une approximation point par point de la loi de comportement en traction du matériau mais plutôt des approximations successives d'une loi de traction de type élasto-plastique, pour des profondeurs croissantes de matériau plastifié dans la section de l'éprouvette (α_i croissant). Il n'est donc pas exclu d'avoir une réponse non monotone ("premier pic") de cette courbe dans le cas d'éprouvettes présentant une résistance plus élevée sur les premiers mm de la section fléchie (valeurs λ_i proches de 1 et α_i proches de 0) par exemple, ce qui peut être le cas à cause de l'orientation préférentielle des fibres au voisinage du fond de coffrage et de la surface libre du BFUP. Pour cette raison, le choix des points de calcul doit être fait de telle sorte que la hauteur de la section plastifiée α_i soit au moins égale à 0.5 (loi de traction moyenne estimée sur plus de 50 % de la hauteur de la section totale) pour avoir une estimation suffisamment représentative de l'ensemble de la section fléchie.

3.2. Choix des points de calcul

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 environ ($\alpha_i > 0.5$ 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 .

4. Exemple d'application

Dans ce qui suit on illustre les essais de flexion sur bandes et la méthode d'analyse inverse sur la base des résultats d'essais réalisés dans le cadre d'un chantier d'application de BFUP en Suisse.

4.1. Limite de linéarité et module d'élasticité

La figure 6a) présente la variation du module d'élasticité sécant et de sa moyenne mobile pour une éprouvette. Le point correspondant à la limite d'élasticité est celui à partir duquel on observe une variation irréversible de plus de 1 % de la moyenne mobile, soit pour une flèche de 0.217 mm, correspondant à un module d'élasticité de 43'330 MPa et à une force de 1.522 kN. La limite d'élasticité f_{Ute} correspondante vaut 7.45 MPa. La figure 6b) montre le point (A) de limite

d'élasticité sur la courbe force-flèche. On remarque la difficulté de détecter la déviation de la linéarité sur cette courbe uniquement.

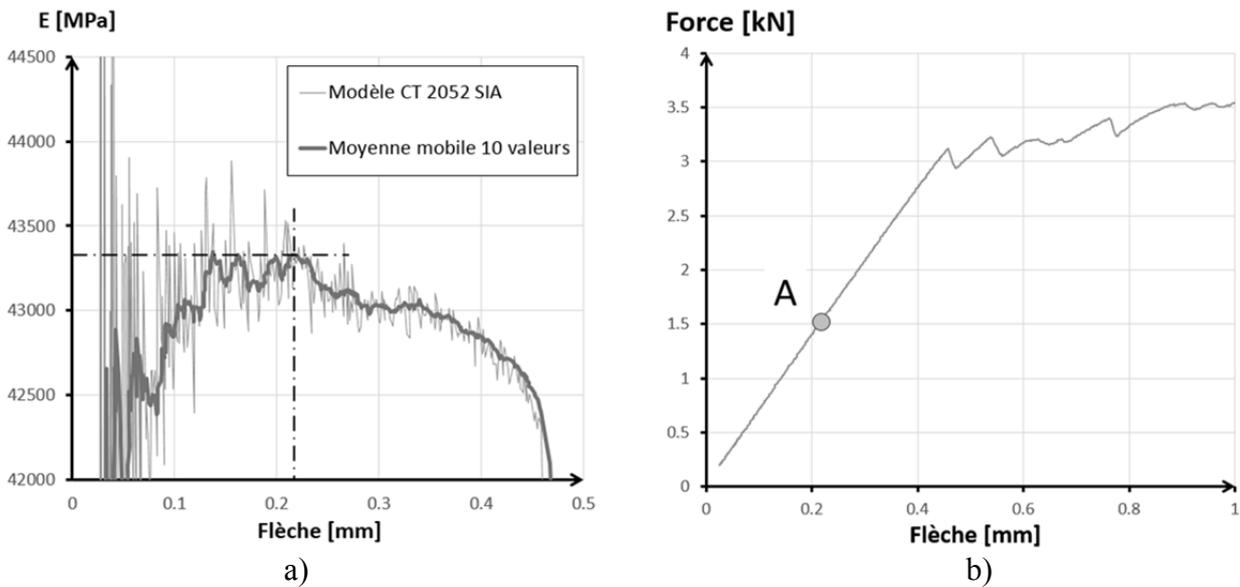


Fig. 6 Analyse inverse d'essais de flexion sur bandes, application, a) détermination de la limite d'élasticité f_{Ute} , b) force-flèche et indication de la limite d'élasticité.

4.2. Analyse inverse et détermination de l'écroissage

La figure 7a) présente la courbe force-flèche de l'essai avec les points utilisés pour l'analyse inverse selon [2]. On a également représenté sur cette figure le résultat du calcul par éléments finis (logiciel MLS) avec les paramètres de calcul obtenus au moyen de l'analyse inverse selon la méthode proposée dans [2], complétés avec un comportement adoucissant avec une énergie de rupture spécifique G_{FU} de 14'000 J/m². On note la très bonne correspondance entre le résultat d'essai et le calcul par éléments finis.

La figure 7b) illustre l'application de la méthode d'analyse inverse selon CT2052. La résistance à la traction du BFUP vaut 9.28 MPa. Cette valeur est dépassée pour la première fois pour une déformation ϵ_{Uti} de 3.9 ‰ qui est donc la limite d'écroissage ϵ_{Utu} du BFUP pour cette éprouvette. La loi de traction (parties élastique et écroissante) correspondant aux 3 paramètres f_{Ute} , f_{Utu} et ϵ_{Utu} et utilisés pour le calcul par éléments finis (MLS) est indiquée pour mémoire.

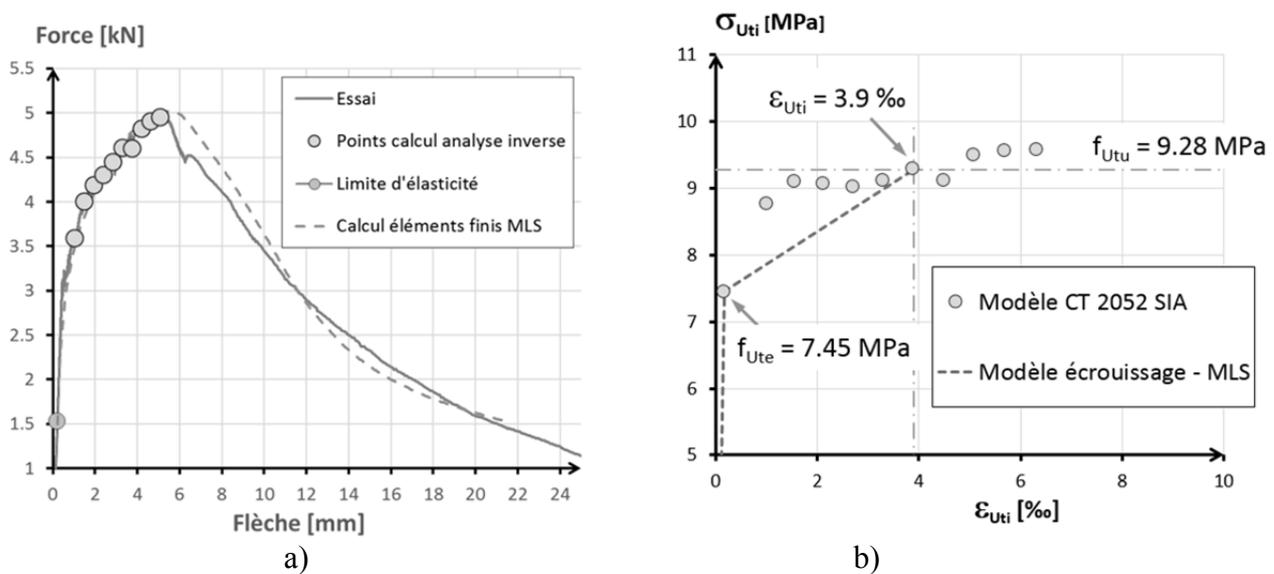


Fig. 7 Analyse inverse d'essais de flexion sur bandes, application, a) force-flèche et points de calcul et b), résultats et comparaison avec calcul MLS (paramètres de calcul: $f_{Ute} = 7.45 \text{ MPa}$, $f_{Utu} = 9.28 \text{ MPa}$, $\epsilon_{Utu} = 3.9 \text{ ‰}$, $G_{FU} = 14'000 \text{ J/m}^2$).

5. Conclusions

- Deux essais sont proposés pour l'identification de la réponse en traction des BFUP.
- Une méthode originale basée sur la variation du module sécant est proposée pour l'identification fine de la limite d'élasticité des BFUP f_{Ute} .
- Une méthode originale, inspirée de [3], permet de réaliser l'analyse inverse de résultats d'essai de flexion dans le domaine pré-pic de manière simple, à l'aide de valeurs tabulées, et d'estimer la déformation maximale d'écroutissement du BFUP ε_{Um} .
- La comparaison entre les résultats obtenus avec la méthode d'analyse inverse simplifiée proposée et les prédictions d'un logiciel de calcul par éléments finis avec un modèle complet élasto-écroutissant-adoucissant montre une très bonne correspondance.
- Les méthodes proposées ont été appliquées avec succès à des chantiers récents d'application de BFUP en Suisse.

6. Références

- [1] DENARIÉ, E., "Formulation et propriétés des BFUP – du matériau aux structures", *Journée d'étude « Bétons Fibrés Ultra-Performants, concevoir, dimensionner, construire*, 27 octobre 2011, édité par E. Brühwiler, L. Moreillon, R. Suter, Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg, Suisse, pp. 49-65.
- [2] DENARIÉ, E., "Formulation et propriétés des BFUP – du matériau aux structures", *Journée d'étude « Bétons Fibrés Ultra-Performants, concevoir, dimensionner, construire*, 27 octobre 2011, édité par E. Brühwiler, L. Moreillon, R. Suter, Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg, Suisse, pp. 49-65.
- [3] SIA CT 2052, "Béton fibré ultra-performant (BFUP) : Matériaux, dimensionnement et exécution", *Cahier technique SIA 2052, en préparation*, 2015, Zürich.
- [4] AFGC, "Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances", *Recommandations, Edition révisée*, Association Française de Génie Civil, 2013, Paris.
- [5] SIA 269/2, "Maintenance des structures porteuses - Structures en béton", *Norme Suisse*, 2011, Zürich.
- [6] NEUBER, H., "Der zugbeanspruchte Flachstab mit optimalem Querschnittsübergang". *Forschung im Ingenieurwesen*, 1969, 35, No.1, pp. 29–30.
- [7] ROELFSTRA, P. E., SALET, A. M., KUIKS, J. E., "Defining and application of stress-analysis based temperature difference limits to prevent early-age cracking in concrete structures", *Proceedings n°25 of the International RILEM Symposium: Thermal cracking in concrete at early age*, 1994, pp. 273-280, Munich.

Konstruktion und Bemessung – bestehende Bauten

Cornelius OESTERLEE

Prof. Dr ès sc. EPFL, dipl. Ing.

Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau

CH - 2500 Biel

Zusammenfassung

Der Einsatz von UHFB zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauwerken ist aufgrund der stofflichen Kompatibilität baupraktisch gut umsetzbar und aufgrund der Differenzierung der Werkstoffeigenschaften technisch sinnvoll. Stahlbetonbauten können in stark exponierten Bereichen mit dünnen UHFB-Schichten hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit und ihrer Tragfähigkeit deutlich verbessert werden. Durch die Bewehrung der UHFB-Schicht kann die Tragfähigkeit sehr effizient gesteigert werden. Zu beachten sind dabei entstehende Eigenspannungen, die aus der Behinderung der Schwindverformung des UHFB durch den Untergrund entstehen.

Keywords: Verbund, UHFB, bewehrter UHFB, Einspanngrad, Eigenspannungen, Verformungsvermögen

1. Einleitung

Die Entwicklung ultrahochfester duktiler Betone mit Kurzfaserbewehrung reicht bis in die 1980er Jahre zurück. Während die französische Anwendungspraxis vor allem im Neubau den Baustoff UHFB werkstoffgerecht und erfolgreich zum Einsatz gebracht hat, liegt die Besonderheit der Schweizer Anwendungspraxis seit dem ersten Pilotprojekt 2004 im Wallis in der Verwendung von UHFB zur Verstärkung und Verbesserung bestehender Betonbauwerke (UHFB-Beton-Verbundbau) [1]. Entscheidend für die technisch und wirtschaftlich sinnvolle Anwendung in diesem Gebiet sind einerseits die besonderen Eigenschaften von UHFB (siehe auch Artikel B. Fleury), andererseits die stoffliche Kompatibilität des Baustoffs UHFB mit dem Baustoff Stahlbeton. Beide Baustoffe sind zementgebunden und erhärten hydraulisch. Die daraus resultierende grosse Verwandtschaft der beiden Baustoffe schafft die Voraussetzungen für die baupraktisch einfache Anwendbarkeit von UHFB. Während kunststoffbasierte Systeme wie bspw. Epoxidharze sensibel auf die Untergrundfeuchte reagieren, bestehen bei UHFB deutlich grössere Toleranzen. Die Verträglichkeit der mineralischen Baustoffe Stahlbeton und UHFB untereinander ist sehr gut und weitaus weniger problematisch als bei Baustoffen unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung.

Dennoch ist hervorzuheben, dass UHFB sich bis auf den Erhärtungsmechanismus von herkömmlichem Beton deutlich unterscheidet. Genau in der Unterscheidung liegt die Ursache für den sinnvollen Einsatz von UHFB in Verbindung mit Stahlbeton. UHFB kann aufgrund seines Leistungsspektrums Aufgaben übernehmen und Anforderungen erfüllen, die das Leistungsspektrum von herkömmlichem Stahlbeton übersteigen. Werkstoffgerecht eingesetzt findet UHFB dort Verwendung, wo herkömmlicher Beton systematische Schwächen zeigt oder seine Dauerhaftigkeit stark begrenzt ist. Dies sind einerseits stark exponierte Bereiche, an die hohe Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit gestellt werden und andererseits Bereiche, in denen hohe mechanische Beanspruchungen auftreten. Durch die hohe Dauerhaftigkeit des UHFB ist eingelegte Bewehrung sehr gut geschützt, so dass dünne UHFB-Schichten von ca. 50 mm auch mit Stabstählen bewehrt werden können.

Beim Einsatz von UHFB im Verbund mit bestehenden Tragwerken bedeutet dies, dass UHFB in der Regel auf den exponierten Stahlbetonoberflächen als Ergänzungs-, Schutz- und Verstärkungsschicht aufgebracht wird ohne das Eigengewicht des Tragwerks übermässig zu erhöhen.

Andere Branchen wie der Automobil- oder Flugzeugbau machen sich die Differenzierung von Baustoffen derselben stofflichen Basis seit langem selbstverständlich zu Nutze. Auch im Bauwesen findet dieser Gedanke mehr und mehr Verbreitung.

2. Grundlagen der Verbundbauweise UHFB – Stahlbeton im Bestand

2.1. Konzeptuelle Grundlagen

Das grundlegende Konzept der Verbundbauteile aus UHFB und Stahlbeton ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

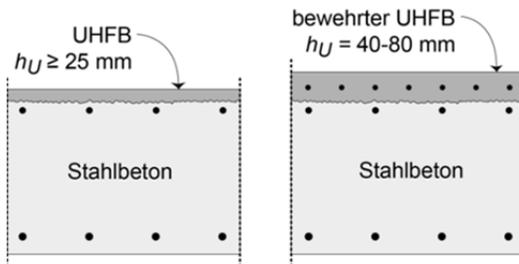


Abb. 1 Grundkonfigurationen des UHFB-Beton-Verbundbaus ([2], Figur 1)

Je nach Anforderungsprofil wird eine Schicht aus UHFB ohne (obige Abbildung links) oder mit Stabstahlbewehrung (obige Abbildung rechts) aufgebracht. Im ersten Fall dient die UHFB-Schicht in der Regel eher dem Schutz der bestehenden Struktur. Im zweiten Fall übernimmt die UHFB-Schicht neben der Schutzfunktion auch eine bedeutende Tragfunktion indem sie der Verstärkung des bestehenden Tragwerks dient.

2.2. Spezifische Eigenschaften von UHFB in Verbundbauteilen

In der oben gezeigten Konfiguration entstehen in der UHFB-Schicht Zugspannungen aufgrund der Behinderung der Schwindverformungen des UHFB durch den Untergrund. Um diesen Zugspannungen begegnen zu können, muss der UHFB neben der hohen Zugfestigkeit auch ein ausgeprägtes Verformungsvermögen aufweisen. Dieses wird mit dem Begriff Verfestigung bezeichnet und ist eine Grundvoraussetzung für die Verwendbarkeit von UHFB auf bestehen Tragwerken. Der Eigenspannungszustand darf nicht zur Bildung von Rissen im UHFB führen, damit die Schutzfunktion der UHFB-Schicht im Gebrauchszustand sichergestellt ist.

3. UHFB – Beton – Verbundbauteile gemäss SIA MB 2052

Im Folgenden werden die wesentlichen Regelungen des SIA Merkblatts 2052 [2] für UHFB-Beton-Verbundbauteile dargestellt und erläutert.

3.1. Einspanngrad

Die Behinderung der Schwindverformungen der UHFB-Schicht erzeugt Eigenspannungen. Die Höhe dieser Eigenspannungen hängt ab vom Grad der Verformungsbehinderung. Je steifer der Untergrund ist umso stärker werden die Schwindverformungen behindert und umso grösser sind die entstehenden Eigenspannungen. Der Einspanngrad μ_U beschreibt das Mass der Verformungsbehinderung.

$$\mu_U = \frac{\sigma_{Ue}}{\sigma_{Ue,max}} \quad (1)$$

Dabei ist σ_{Ue} die im UHFB auftretende Zugspannung unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Verbundsystems. $\sigma_{Ue,max}$ ist die in einem vollständig eingespannten Verbundsystem auftretende Zugspannung im UHFB. Vollständig eingespannt bedeutet, dass die Schwindverformung des UHFB, die sich ohne Behinderung einstellen würde, vollständig unterbunden wird.

$\sigma_{Ue,max}$ wird unter Berücksichtigung des mittleren Elastizitätsmoduls E_{Um} , des Endschwindmasses $\varepsilon_{s\infty}$ und der Endkriechzahl $\varphi_{U\infty}(t_\infty, t_0)$ wie folgt bestimmt.

$$\sigma_{Ue,max} = \frac{\varepsilon_{Us,\infty}}{1 + \varphi_{Us}(t_\infty, t_0)} \cdot E_{Um} \quad (2)$$

In der Verbundsituation wirkt sich das Kriechen bzw. die Relaxation des UHFB sehr günstig aus, da dadurch die Eigenspannungen reduziert werden.

Ein numerisches Beispiel mit Werten aus untenstehender Tabelle führt zu einer theoretischen Spannung $\sigma_{Ue,max} = 0,8 \text{‰} / (1+1,0) \cdot 45 \cdot 10^6 \text{ MPa} = 18 \text{ MPa}$ in der voll eingespannten UHFB-Schicht.

Selbst ein Einspanngrad von 50 % führt mit diesen Annahmen damit zu sehr hohen Spannungen, die in der Regel nur von der UHFB-Sorte UB aufgenommen werden können.

Tabelle 1: Richtwerte gebräuchlicher UHFB, Auszug aus Tabelle 4, [2]

Eigenschaft	Bezeichnung	Typische Werte (Alter: 28 Tage)
Elastizitätsmodul (Zug / Druck)	E_U	40 – 60 GPa
Endschwindmass	$\varepsilon_{Us,c}$	ohne thermische Behandlung : 0,6 – 0,8 ‰ mit thermischer Behandlung: identisch, wird aber am Ende der thermischen Behandlung erreicht
Endkriechzahl	$\varphi_{Us}(t_\infty, t_0)$	ohne thermische Behandlung: 1,0 ($t_0 = 7$ Tage) ; 0,8 – 1,0 ($t_0 = 28$ Tage) mit thermischer Behandlung : 0,2 – 0,4

Zur näherungsweisen Bestimmung des Einspanngrades einer UHFB-Schicht für bestimmte Situationen dient Abb. 2. Die Graphik berücksichtigt typische Elastizitätsmoduln für den Untergrund E_C und die UHFB-Schicht E_U , das Verhältnis der Dicke der aufgetragenen UHFB-Schicht zur Dicke des Untergrunds h_U/h_C und zwei unterschiedliche statische Systeme. Der Einfeldträger stellt ein statisches System dar, welches dem bestehenden Tragwerk mehr Verformungsmöglichkeit gestattet als der Durchlaufträger. Daraus resultiert ein entsprechend höherer Einspanngrad einer UHFB-Schicht, die auf ein bestehendes Stahlbetonbauteil aufgebracht wird, welches als Durchlaufträger konzipiert ist.

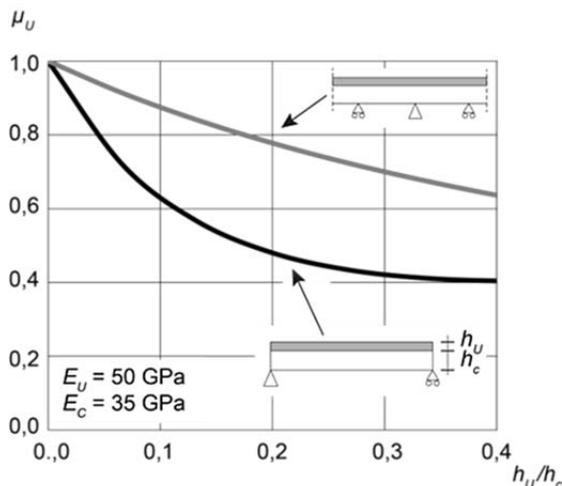


Abb. 2 Ermittlung des Einspanngrads der UHFB – Schicht auf einem Betonuntergrund für zwei unterschiedliche Freiheitsgrade ([2], Figur 8)

Bei der Ermittlung von Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und von Tragwiderständen sind Vordehnungen infolge Verformungsbehinderung, Beanspruchungen im Betonbauteil zum Verstärkungszeitpunkt oder Vorspannung zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Tragsicherheit dürfen Beanspruchungen im Verbundsystem durch Verformungsbehinderung im jungen Alter, insbesondere Zugdehnungen im UHFB, vernachlässigt werden, falls UHFB der Sorten UA und UB eingesetzt wird. Die Sorten UA und UB weisen ein ausreichendes Verformungsvermögen (Verfestigung) auf, das diese Annahme rechtfertigt.

3.2. Beiwerte zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften von UHFB werden durch die Orientierung der Fasern beeinflusst. Dem wird Rechnung getragen, indem die Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Tragverhalten mit dem Faserorientierungsbeiwert η_K kombiniert wird. Dieser beträgt $\eta_K = 0.90$ bei globalem Tragverhalten. Dies liegt vor, wenn Spannungumlagerungen im Bauteil möglich sind wie z.B. bei flächigen Bauteile, Platten oder statisch unbestimmten Systemen. Bei lokalem Tragverhalten, bei dem Spannungumlagerungen nicht möglich sind (z. B. Verankerungszonen), wird $\eta_K = 0.75$ entsprechend niedriger angesetzt.

Zudem wird die Dicke der UHFB-Schicht mit dem Beiwert η_{hU} berücksichtigt. Auch diese hat Auswirkungen auf die Orientierung der Fasern, die sich in einem dicken Bauteil eher dreidimensional ausrichten können als in einem dünnen. Für Schichtdicken bis 80 mm ist $\eta_{hU} = 1.0$, für Schichtdicken über 80 mm ist $\eta_{hU} = 0.80$.

Der Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer beträgt bei UHFB-Beton-Verbundbauteilen im Allgemeinen $\eta_t = 1.0$. Die Beiwerte fließen in die folgende Beziehung zur Bestimmung der Bemessungswerte der Zugfestigkeit f_{Utd} und der elastischen Grenzzugfestigkeit f_{Uted} ein.

$$f_{Utd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_K \cdot f_{Utk}}{\gamma_U} \quad \text{und} \quad f_{Uted} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_K \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (3) \text{ und } (4)$$

γ_U beträgt in allen Fällen 1.5. Detaillierte Ausführungen zu den Teilsicherheitsbeiwerten finden sich im ersten Beitrag dieses Dokuments von E. Brühwiler.

3.3. Nachweis der Tragsicherheit

3.3.1. Biegung

Das Modell zur Bestimmung des Tragwiderstands von Verbundbauteilen, die auf Biegung beansprucht werden, beruht so weit wie möglich auf den bekannten Annahmen, die auch für herkömmlichen Stahlbeton getroffen werden. Es wird von einem monolithischen Verbund der UHFB-Schicht mit dem Untergrund ausgegangen. Darauf begründet sich auch die Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte und der daraus resultierenden linearen Dehnungsverteilung über die Bauteilhöhe. Versuche haben gezeigt, dass diese Annahme bis zum Erreichen der Tragfähigkeit eines UHFB-Beton-Verbundbauteils richtig ist [3].

Liegt die Druckzone des Verbundbauteils im bestehenden Stahlbetonbauteil (negative Momente) wird vereinfachend ein Spannungsblock gemäss Abb. 23 angenommen. Die Kräfte, die die unterschiedlichen Bewehrungslagen übernehmen, werden analog zum Stahlbeton als Einzelkräfte in Abhängigkeit der jeweiligen Dehnung abgebildet. Die Zugkraft der UHFB-Schicht wird vereinfachend mit Hilfe eines Spannungsblocks mit dem Bemessungswert der Zugfestigkeit des UHFB f_{Utd} ermittelt. Die Lage der Nulllinie x folgt dann aus den Gleichgewichtsbedingungen am Querschnitt.

Bei Bauteilen, bei denen die UHFB-Schicht die Zugzone verstärkt, muss insbesondere die Kapazität der Druckzone des bestehenden Stahlbetonbauteils überprüft werden, um ihr Versagen sicher auszuschliessen.

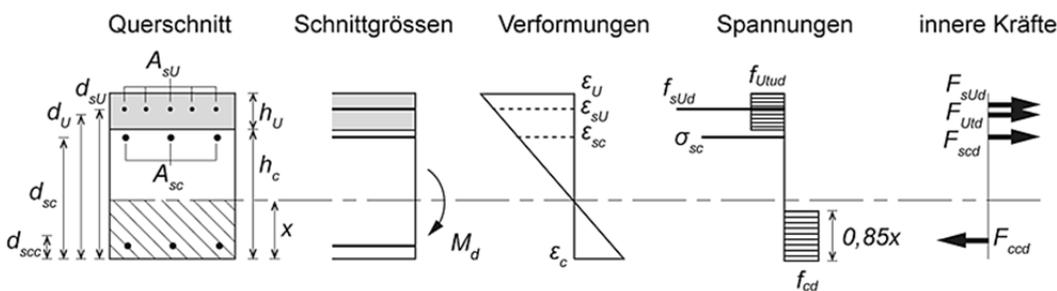


Abb. 3 Biege­wider­stand von Verbundbauteilen im Grenzzustand der Tragsicherheit für Biege­momente, wenn der UHFB auf Zug beansprucht wird ([2], Figur 9a))

Bei Verbundbauteilen, bei denen die UHFB-Schicht auf Druck beansprucht wird, geht man analog vor. Wie bei Stahlbeton üblich wird die Zugfestigkeit des Betons nicht berücksichtigt. Die Druckspannungsverteilung in der UHFB-Schicht wird entsprechend dem Materialverhalten nicht als Spannungsblock sondern als lineare Verteilung angenommen (Abb. 4).

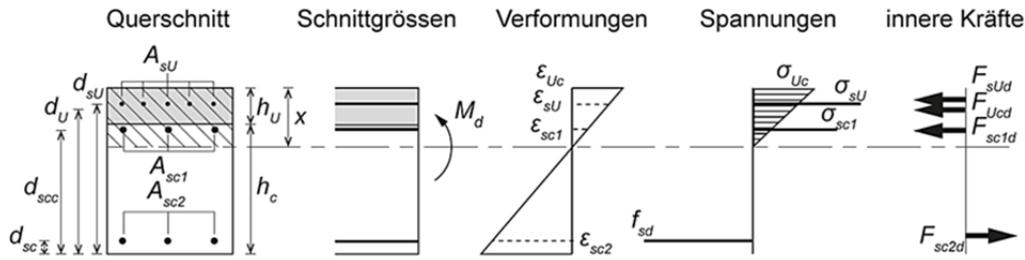


Abb. 4 Biegeverhalten von Verbundbauteilen im Grenzzustand der Tragsicherheit für Biegemomente, wenn der UHFB auf Druck beansprucht wird.

UHFB weist im Vergleich zu Betonstahl ein deutlich geringeres Verformungsvermögen auf. Bei der Bildung von Fließgelenken darf für den UHFB eine mittragende Wirkung über eine Dehnung von bis zum Dreifachen der Dehnung des UHFB bei Erreichen der Zugfestigkeit ($3 \cdot \epsilon_{Utu}$) angenommen werden, jedoch bei einer reduzierten Zugspannung von $\sigma_{Utd} = 0.9 \cdot f_{Utd}$ angenommen werden. Für Dehnungen grösser als $3 \cdot \epsilon_{Utu}$ darf keine mittragende Wirkung des UHFB mehr angenommen werden. Ab diesem Grenzwert leistet der UHFB keinen Beitrag mehr und die Zugkräfte werden allein vom Bewehrungsstahl in der UHFB-Schicht und im Stahlbetonbauteil übertragen.

Zur Veranschaulichung des Tragverhaltens zeigt Abb. 5 das Kraft-Verformungsverhalten eines mit einer UHFB-Schicht verstärkten Stahlbetonträgers, der einer reinen Biegebelastung ausgesetzt ist.

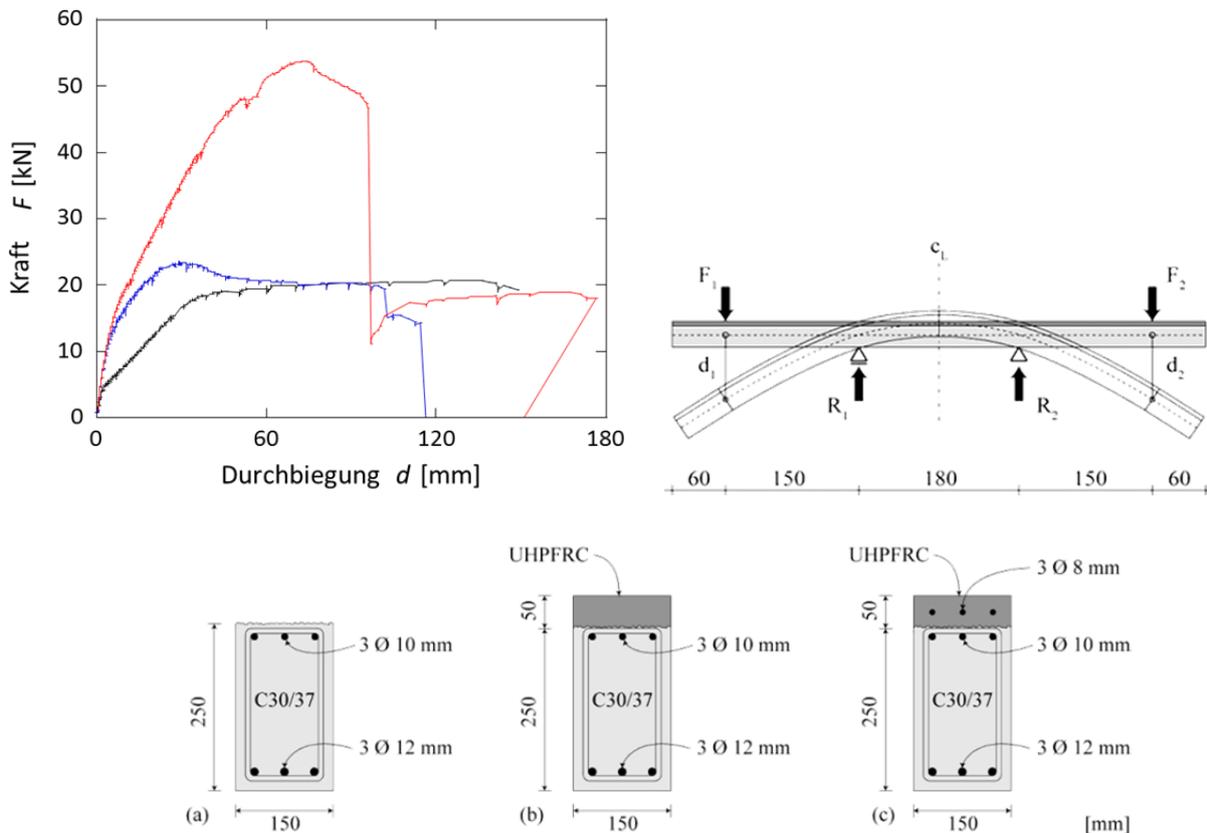


Abb. 5 Tragverhalten eines Stahlbetonträgers mit einer Verstärkungsschicht aus unbewehrtem und bewehrtem UHFB[3].

- Die schwarze Kurve zeigt das Verhalten des unverstärkten Trägers.
- Die blaue Kurve zeigt die traglaststeigernde Wirkung einer unbewehrten UHFB-Schicht. Es ist eine Reduktion des Verformungsvermögens gegenüber dem unverstärkten Träger zu beobachten. Die Bildung eines Makrorisses in der UHFB-Schicht konzentriert das Verformungsvermögen des gesamten Bauteils auf einen oder wenige Risse.
- Die rote Kurve zeigt das Verhalten mit geripptem Bewehrungsstahl in der UHFB-Schicht. Durch die sehr gute Verbundwirkung im UHFB beschränkt sich das Verformungsvermögen des Trägers noch deutlicher auf einen oder wenige Risse, die vom UHFB vorgegeben werden (siehe auch Beitrag von E. Denarié).

In jedem Fall bewirkt die UHFB-Schicht eine deutliche Versteifung der Tragwerksantwort. Im Vergleich wird die Wirksamkeit der Bewehrung der UHFB-Schicht hinsichtlich der Steigerung der Tragfähigkeit ersichtlich.

3.3.2. Querkraft

Der Querkraftwiderstand von UHFB – Beton Verbundbauteilen wird durch die Superposition der Querkraftwiderstände des Stahlbetonteils und der bewehrten UHFB-Schicht ermittelt.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,U} \quad (5)$$

Das Modell beruht auf der Bildung von zwei plastischen Gelenken in der UHFB-Schicht und einem bereichsweisen Ablösen der UHFB-Schicht gemäss dem Modell in Abb. 6.

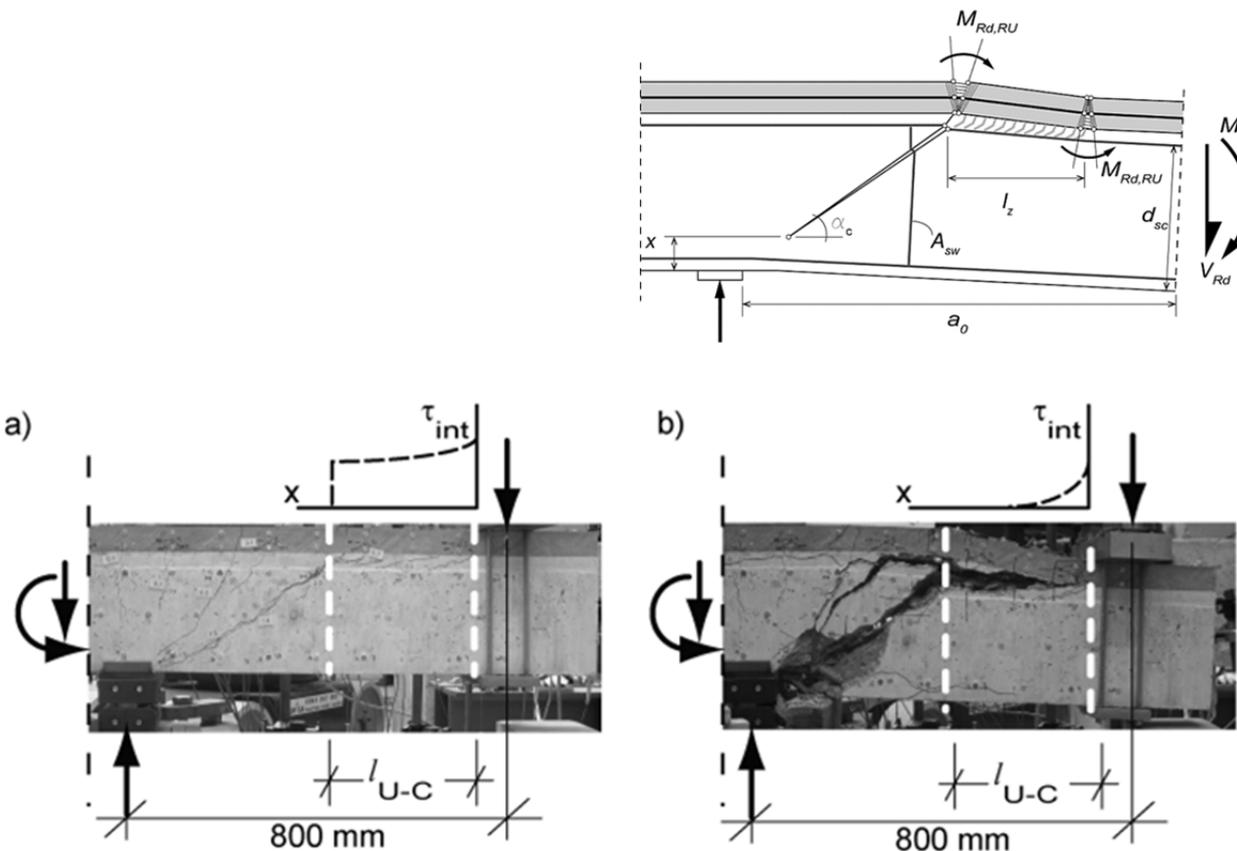


Abb. 6 oben: Modell zur Ermittlung des Querkraftwiderstands von UHFB – Stahlbeton Verbundbauteilen ([2], Figur 10), unten: analoge Versuchssituation [4]

Der Querkraftanteil des Betons (bestehendes Bauteil) $V_{Rd,c}$ beträgt:

$$V_{Rd,c} = \frac{f_{cd} \cdot b_w}{2} \left[\frac{x}{\sin \alpha_c} \cdot (1 - \cos \alpha_c) \right] \quad (6)$$

Für die Neigung der Druckstrebe bzw. des Hauptschubrisses darf angenommen werden: $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$ wobei für den ersten Ansatz gilt $\alpha_c = 35^\circ$. Die Höhe der Druckzone x berechnet sich zu $x = 0,9 \cdot \omega_m \cdot d_{eq}$.

Mit ω_m wird der gesamte mechanische Bewehrungsgehalt im UHFB-Beton-Verbundbauteil erfasst, bezogen auf die Querschnittsfläche des Betonbauteils. d_{eq} ist die äquivalente statische Höhe des UHFB-Beton-Verbundbauteils. Sie berücksichtigt die Gewichtung der Bewehrungsanteile entsprechend ihrer Lage im UHFB und im Betonbauteil.

$$\omega_m = \frac{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}{A_c f_{cd}} \quad \text{und} \quad d_{eq} = \frac{d_{sc} A_{sc} f_{sd} + d_U A_U f_{Utd} + d_{sU} A_{sU} f_{sUd}}{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}} \quad (7 \text{ und } 8)$$

Der Bemessungswert des Tragwiderstands der vertikalen Querkraftbewehrung (Bügel) $V_{Rd,s}$ ist:

$$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot f_{sd} \cdot \cot \alpha \quad (9)$$

Der Anteil der bewehrten UHFB-Schicht am gesamten Querkrafttragwiderstand resultiert aus der Bildung von zwei plastischen Gelenken, die sich gemäss des oben gezeigten Mechanismus bilden. Der Bemessungswert des Biegewiderstands der bewehrten UHFB-Schicht $M_{Rd,RU}$ wird gemäss Kapitel 4.2.3.1 des SIA Merkblatt 2052 bestimmt. Damit ergibt sich für $V_{Rd,U}$:

$$V_{Rd,U} = \frac{2 \cdot M_{Rd,RU}}{l_z} \quad (10)$$

Mit dem Abstand l_z zwischen den plastischen Gelenken im UHFB

$$l_z = a_0 - \frac{d_{sc}}{\tan \alpha_c} \quad (11)$$

a_0 beschreibt dabei die Distanz zwischen dem massgebenden Querschnitt und dem Auflager nach Abb. 6.

Das Modell geht von einem negativen Biegemoment aus und beschreibt die Situation in Auflagernähe.

3.3.3. Ermüdung

Der Ermüdungsnachweis für biegebeanspruchte UHFB-Beton-Verbundbauteile wird analog zum Nachweis für Biegebauteile aus nur UHFB mit Bewehrung geführt und erfolgt für die Dauerfestigkeit des UHFB-Beton-Verbundbauteils:

$$M_{R,D} = 0,5 \cdot M_{Rd} \quad (12)$$

Dem Ansatz liegt eine deutliche Vereinfachung zu Grunde, die die Dauerfestigkeit unter Biegebeanspruchung $M_{R,D}$ bei 50 % des statischen Biegewiderstands M_{Rd} ansetzt.

Für UHFB-Schichten ohne Stabstahlbewehrung wird der Nachweis auf dem Spannungsniveau für die Dauerfestigkeit des UHFB wie folgt geführt:

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

Dabei ist $\sigma_{U,D}$:

$$\sigma_{U,D} = 0,30 \cdot (f_{Utek} + f_{Utk}) \quad (13)$$

und $\sigma_{Ufat,max}$ die maximale Zugspannung infolge ständiger Einwirkungen und Ermüdungseinwirkungen im UHFB. Sie wird für elastisches Tragverhalten ermittelt.

Die Dauerfestigkeit von UHFB $\sigma_{U,D}$ liegt immer im elastischen Bereich. Im verfestigenden Bereich kann der Baustoff keine Ermüdungsbelastung mit einer hohen Anzahl von Lastspielen sicher ertragen. Für die verfestigenden UHFB-Sorte UB bedeutet dies, dass die Dauerfestigkeit $\sigma_{U,D}$ bei mindestens $0.3 \cdot f_{Utek} \cdot (1+1.2) = 0.66 \cdot f_{Utek}$ liegt, für die Sorte U0 entsprechend bei $0.3 \cdot f_{Utek}$.

Bei bewehrtem UHFB wird die Dauerfestigkeit des Betonstahls gemäss SIA 262 nachgewiesen.

3.3.4. Schubspannungen im Bereich der Grenzschicht UHFB – Beton

Um die Schubspannungen in der Grenzschicht zwischen bestehendem Bauteil und der UHFB-Schicht sicher aufnehmen zu können, ist eine sorgfältige Untergrundvorbereitung erforderlich. Sie besteht im Aufrauen der Oberfläche durch Hochdruckwasserstrahlen oder Sandstrahlen. Die Rauhtiefe muss 3 bis 5 mm erreichen. Das alleinige Entfernen der Zementhaut ist nicht ausreichend. Die Gesteinskörnung muss freigelegt werden, damit sich die UHFB-Schicht mit dem Untergrund verzahnen kann.

Die Grenzschicht wird im jungen Alter insbesondere durch die Eigenspannungen der UHFB-Schicht beansprucht. Aufgrund der deutlich höheren Zug- und Scherfestigkeit des UHFB ist immer der Untergrundbeton massgebend. Der rechnerische Nachweis der Fuge kann entfallen, wenn die Druckfestigkeit des Untergrundbetons die eines Betons der Druckfestigkeitsklasse C20/25 übersteigt.

Bei einer Festigkeit des Untergrundbetons kleiner als C20/25 ist nachzuweisen, dass die Schubspannungen entlang der Grenzschicht kleiner als 50 % der Schubfestigkeit des Untergrundbetons gemäss SIA 262 sind.

Allgemein stützt sich dieses Vorgehen auf zahlreiche Versuche, die gezeigt haben, dass die Festigkeit der Grenzschicht in der Regel hoch genug ist und erst nach dem Erreichen der Traglast eines UHFB-Verbund-Bauteils massgebend geschädigt wird [3].

3.4. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit der UHFB-Schicht besteht insbesondere darin, dass sich keine Makrorisse bilden, durch die die Abdichtungs- und Schutzfunktion beeinträchtigt werden. Der Nachweis kann anhand des Einspanngrades geführt.

Der Zuordnung der UHFB-Sorten zu maximal zulässigen Einspanngraden in Tabelle 2 liegt eine maximale Dehnung der UHFB-Schicht von 1 ‰ zu Grunde. Versuche haben gezeigt, dass verfestigenden UHFB-Sorten bis zu dieser Dehnung flüssigkeitsdicht sind.

Bei UHFB der Sorte UB kann damit ein Einspanngrad von 80 % toleriert werden, ohne dass die UHFB-Schicht ihre abdichtende Funktion verliert. Das verfestigende Verhalten des UHFB der Sorte UB ermöglicht dabei die entstehenden Eigenspannungen schadlos aufzunehmen. Zusätzliche Bewehrung ist im Fall eines hohen Einspanngrades aber sinnvoll, da sich dadurch das Verformungsvermögen des UHFB verbessert.

Tabelle 2: Einspanngrad und erforderliche UHFB-Sorte für eine flüssigkeitsdichte UHFB-Schicht

Einspanngrad	UHFB-Sorte
<0,6	UA
0,6 – 0,8	UA, UB
>0,8	UB

Für UHFB der Sorte UA ist die Eignung in einer detaillierten Untersuchung nachzuweisen, die die tatsächlichen Spannungen und Verformungen in der UHFB-Schicht berücksichtigt.

Im Grenzfall wenn die Abdichtfunktion im Vordergrund steht, ist eine detaillierte Untersuchung des Verformungszustands sinnvoll, um die Dichtigkeit sicherzustellen.

4. Literatur

- [1] BRÜHWILER, E., DENARIÉ, E., Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB), Beton- und Stahlbetonbau 108, p. 216-226 (2013)
- [2] SIA: Merkblatt prSIA 2052 Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) Baustoffe, Bemessung, Ausführung, Fassung 09/2015 (2015)
- [3] OESTERLEE, C., Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members, Thèse 4848, EPFL (2010)
- [4] NOSHIRAVANI, T., Structural Response of R-UHPFRC – RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear, Thèse 5246, EPFL (2012)

Conception et dimensionnement de structures en BFUP

Lionel MOREILLON

Dr Univ. Paris-Est, MSc ENPC

INGPHI SA – Ingénieurs en ouvrages d’art

Lausanne

Résumé

Ces dernières années, les Bétons Fibrés Ultra-Performants (BFUP) connaissent un essor grandissant dans le domaine des structures et de la réfection d’ouvrages d’art. Par rapport aux bétons conventionnels, les BFUP sont caractérisés par des propriétés mécaniques et une durabilité élevées permettant la réalisation d’éléments minces avec ou sans armatures, aux formes complexes et aux textures travaillées. Les réalisations remarquables en BFUP témoignent du fort potentiel d’application de ce matériau principalement pour des structures préfabriquées. La conception et le dimensionnement de structures en BFUP nécessitent des règles spécifiques.

Cet article a pour objectifs de montrer le comportement d’éléments de structure en BFUP à travers plusieurs études expérimentales d’une part, et de présenter des règles de conception et des méthodes de dimensionnement d’autre part.

Mots-clés: BFUP, structure, comportement, études expérimentales, conception, dimensionnement.

1. Introduction

La première application structurale remarquable en BFUP a été la passerelle de Sherbrooke au Canada construite en 1996. Depuis lors, les BFUP connaissent un important développement dans le monde avec des applications de plus en plus imposantes [1] [2] [3] (Figure 1). La France et le Japon sont particulièrement actifs dans ce domaine. A noter que ces deux pays disposent de recommandations spécifiques depuis le début des années 2000 [4] [5] favorisant ainsi l’utilisation des BFUP.

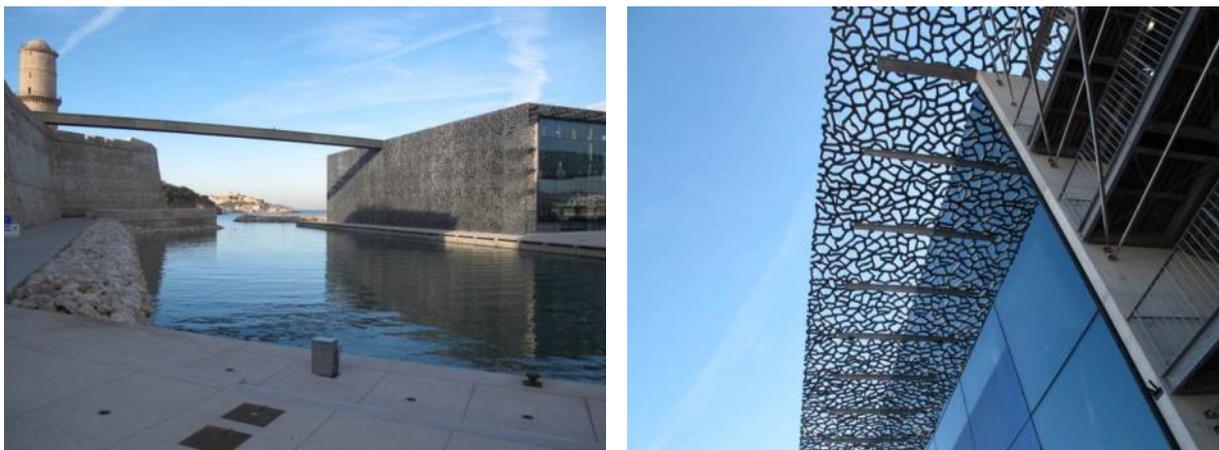


Fig. 1 Musée des civilisations de l’Europe et de la Méditerranée MuCEM à Marseille

En Suisse, les applications de protection et de renforcement de structures en béton au moyen de couches minces en BFUP ont connu un essor important, le renforcement des Viaducs de Chillon [6] en est le meilleur exemple. Pour de nouvelles structures, l’application du BFUP est restée plus confidentielle. Cependant, quelques réalisations remarquables sont à relever telle que la nouvelle toiture du Musée Olympique à Lausanne [7].

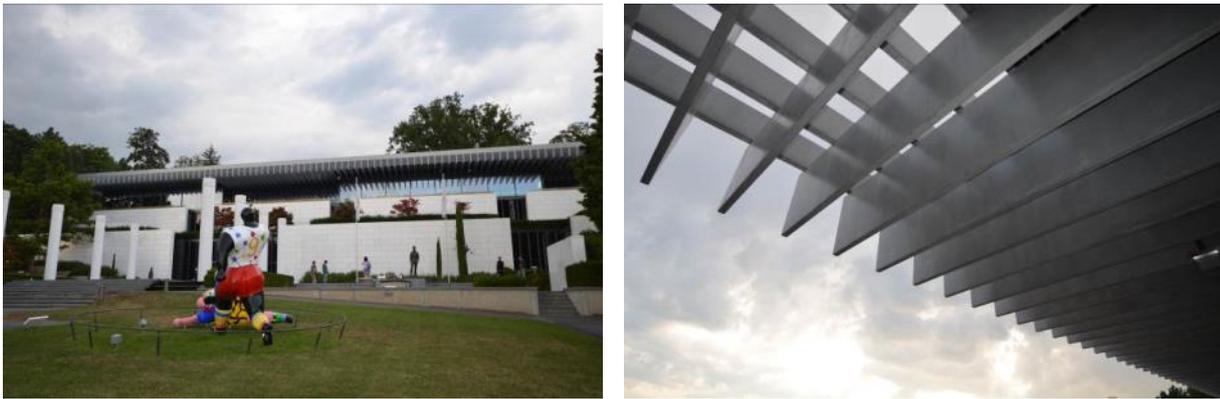


Fig. 2 Musée Olympique à Lausanne

Les structures réalisées ces dernières années à travers le monde mettent en évidence le potentiel du BFUP en particulier pour des passerelles, des ponts, des résilles, des habillages de façade, des structures industrielles et de génie civil. La conception et le dimensionnement de structures en BFUP nécessitent des règles spécifiques. Le cahier technique *SIA 2052 Béton fibré ultra-performant (BFUP) : matériaux, dimensionnement et exécution* [10] vise à mettre à disposition les outils nécessaires au concepteur.

Cet article est divisé en deux grandes parties : premièrement, le comportement de structures en BFUP est présenté au travers de plusieurs campagnes expérimentales réalisées à la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg. Deuxièmement, quelques règles de conception et méthodes de dimensionnement provenant du cahier technique SIA 2052 sont présentées.

2. Du matériau à la structure

Les principaux BFUP commercialisés sur le marché suisse sont le Ductal® de Lafarge, le BCV® de Vicat, le 707/710 de Holcim et le BSI® de Eiffage.

Pour permettre le dimensionnement d'une structure, un ensemble de caractéristiques du matériau doivent être préalablement déterminées par des essais ou fournies par le producteur. Pour un pré-dimensionnement, les propriétés mécaniques courantes des BFUP sont les suivantes :

- Densité ρ : 2400 – 2800 kg/m³
- Résistance en compression f_{Uc} : 130 – 180 MPa
- Résistance élastique en traction de la matrice f_{Ute} : 7 – 10 MPa
- Résistance en traction f_{Ut} : 8 – 12 MPa
- Module d'élasticité E_U : 45 – 65 GPa
- Coefficient de Poisson ν : ~ 0.2

Il est important de distinguer le comportement durcissant ou écouissant en traction du comportement durcissant de la structure. Les matériaux cimentaires fibrés avec un comportement adoucissant en traction peuvent présenter un comportement durcissant en flexion dépendant de leur réponse post-fissuration en traction directe et du niveau de la structure (poutre, dalle, coque, etc.). Un aperçu schématique des divers comportements suivant le niveau de structure est présenté dans la Fig. 3.

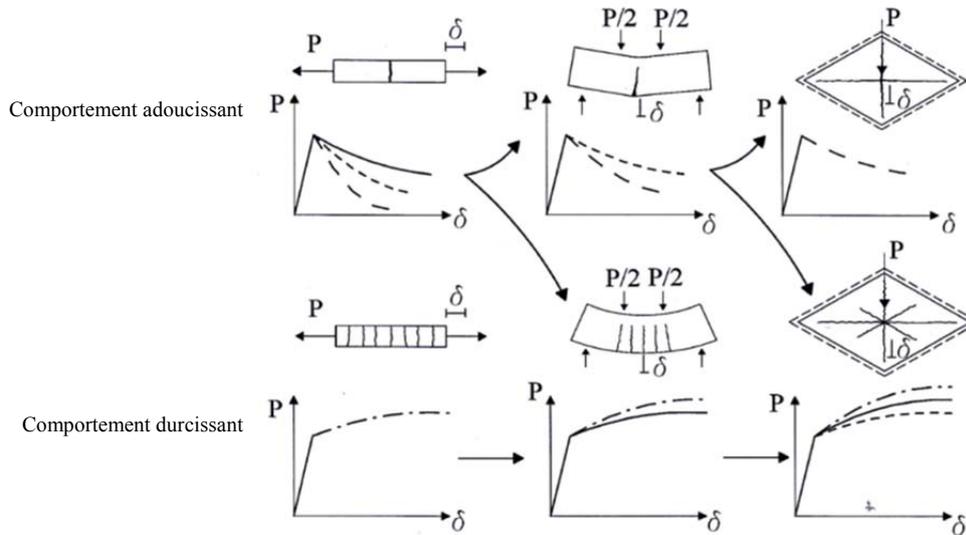


Fig. 3 Comportement structural d'un matériau cimentaire fibré selon le degré d'hyperstaticité de la structure [8]

Dans le cahier technique SIA 2052 [10], trois sortes de BFUP sont définies en fonction de la réponse en traction directe. Les BFUP de la sorte U0 sont de type adoucissant en traction alors que les BFUP des sortes UA à UB sont écouvissant en traction plus ou moins fortement.

Tableau 1 : Sortes de BFUP définis dans le cahier technique SIA 2052

Sorte	U0	UA	UB
f_{Utek} [MPa]	≥ 7.0	≥ 7.0	≥ 10.0
f_{Uuk} / f_{Utek}	> 0.7	> 1.1	> 1.2
ε_{Utu} [‰]	-	> 1.5	> 2.0
f_{Uck} [MPa]	≥ 120	≥ 120	≥ 120

Le comportement en traction d'un BFUP est dépendant de la formulation ainsi que de la méthode de mise en œuvre. Au niveau de la formulation, la réponse en traction est principalement dépendante de la quantité de fibres, de la résistance de la matrice cimentaire, du rapport longueur/diamètre de la fibre l_f/ϕ_f et de la forme de la fibre [3]. Les BFUP n'ont cependant pas un comportement isotrope. Ils sont sujets à des orientations préférentielles des fibres dues aux parois des coffrages et aux méthodes de coulage. Les BFUP sont généralement auto-plaçants. Dans ce type de bétons, les fibres s'orientent parallèlement au sens des flux d'écoulement. Les éléments en BFUP étant souvent minces, les effets de parois sont importants. Ces différents effets peuvent être favorables ou défavorables suivant les cas en fonction de l'orientation des sollicitations dans l'ouvrage. Ces facteurs sont à considérer avec attention lors du dimensionnement de structures en BFUP, en particulier pour des éléments sans armature.

3. Comportement des structures en BFUP

Dans ce chapitre une partie des résultats d'une importante recherche théorique et expérimentale menée à Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR) sur des éléments de structure en BFUP sont présentés [11] [12]. Les objectifs de cette recherche étaient d'analyser le comportement d'éléments de structure en BFUP, avec et sans armatures, soumis à différentes sollicitations et d'établir des règles de dimensionnement. Pour répondre à ces objectifs un programme expérimental ambitieux comprenant cinq études a été mené. Dans une première étude, comprenant 25 poutres, étaient analysés le comportement flexionnel et la résistance au cisaillement. Une deuxième étude, composée de 38 bandes de dalles minces, traitait du comportement flexionnel. Dans une troisième étude, comprenant 22 dalles carrées, était analysée la résistance au poinçonnement. Une quatrième étude, composée de 16 dalles octogonales, traitait le comportement sous des sollicitations de flexion bi-axiale. Finalement, la cinquième étude comprenant 5 poutres précontraintes ajourées en pleine échelle étudiait le potentiel du BFUP pour des structures innovantes.

Les études 1 à 4 ont été réalisées en Béton Composite Vicat BCV® en collaboration avec Creabéton Matériaux SA. Le BCV est développé par le groupe Vicat et fait partie de la famille des BFUP. Les compositions suivantes avec leurs dénominations respectives ont été analysées :

- BCV-0 sans fibres (référence)
- BCV-1 % A fibres métalliques 13/0.18 mm, $V_f = 1\%$ (79 kg/m^3)
- BCV-1 % B fibres métalliques 13/0.18 et 20/0.30 mm, $V_f = 1\%$ (79 kg/m^3)
- BCV-2 % fibres métalliques 13/0.18 et 20/0.30 mm, $V_f = 2\%$ (158 kg/m^3)
- BCV-3 % fibres métalliques 13/0.18 et 20/0.30 mm, $V_f = 3\%$ (237 kg/m^3)
- BCV-FO fibres synthétiques, $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$

Le BCV présente une résistance moyenne en compression f_{Ucm} comprise entre 130 et 150 MPa. Le module d'élasticité E_U est de 45 GPa. La réponse en traction des différentes compositions a été déterminée au moyen d'essais de flexion sur des prismes et des plaques, comme illustrés à la Fig. 4, ainsi que des essais de traction uniaxiale.



Fig. 4 Essais de flexion pour la caractérisation du BFUP en traction

Les graphiques de la Fig. 5 présentent les courbes moyennes contrainte équivalente de flexion vs flèche au centre d'essais de flexion 3-points sur des plaques de différentes épaisseurs en BCV-1 % A et 2 %.

La contrainte équivalente de flexion σ_{eq} est définie de la manière suivante :

$$\sigma_{eq} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \tag{1}$$

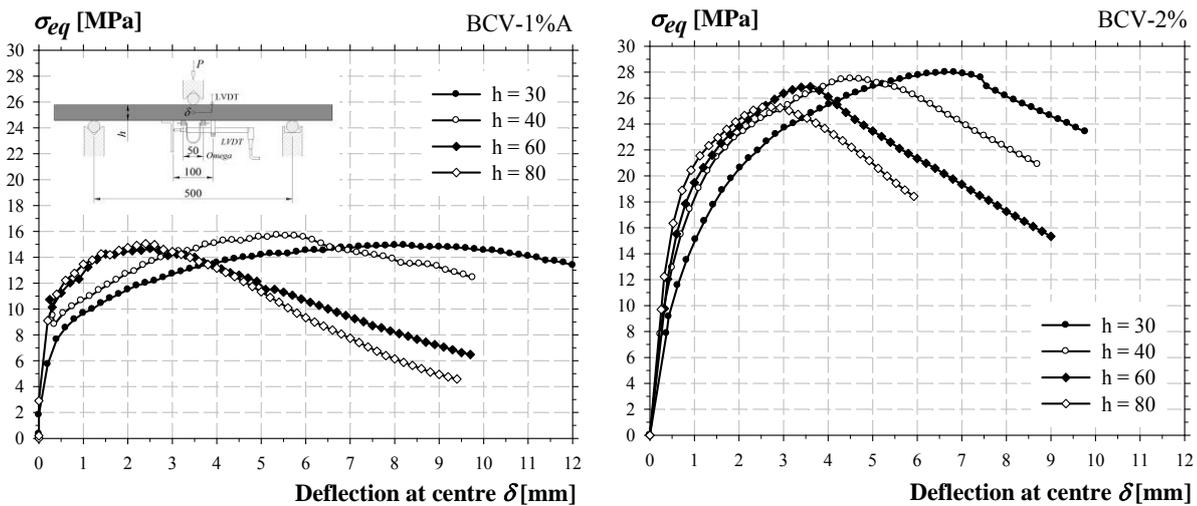


Fig. 5 Courbes moyennes contrainte équivalente de flexion vs flèche au centre des plaques

La première étude expérimentale est composée de 25 poutres, avec et sans armatures, en béton de résistance normale (BN) et en BFUP. Quatre poutres ont été réalisées pour les séries BCV-1 %, 2 %, 3 % et FO. Pour le béton ordinaire, 3 poutres avec armatures ont été réalisées. Les paramètres variant entre les éléments d'essai étaient : la quantité et le type de fibres, le taux d'armature et le taux de précontrainte. Les poutres ont une hauteur de 150 mm et une largeur de 100 mm. Une poutre ne comprend aucune armature. Deux éléments sont armés de deux barres $\phi 10$ mm et $\phi 16$ mm ce qui représente respectivement un taux d'armature ρ_s de 1.31 % et 3.35 %. Une poutre est précontrainte au moyen d'un toron 15.7 gainé graissé disposé au centre de la section. L'effort de précontrainte appliqué est de 180 kN, ce qui représente une contrainte initiale dans le béton σ_{cp} de 12 MPa. Les poutres sont testées en flexion 4-points sur une portée de 1.35 m ce qui représente un élanement de 1/9 (Fig. 6).

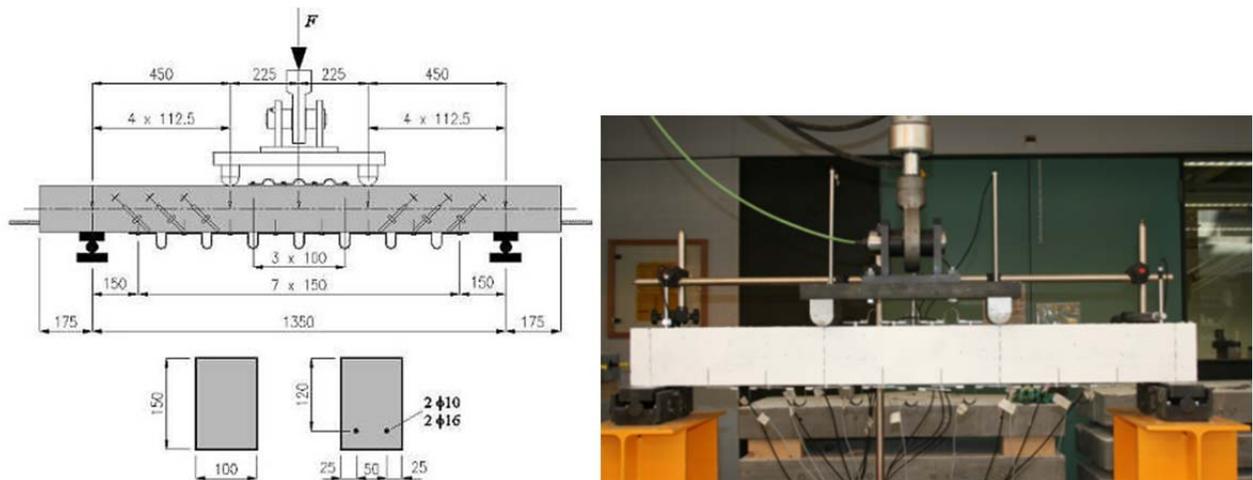


Fig. 6 Configuration des essais de flexion sur les poutres

Dans les graphiques de la Fig. 7 sont présentés les courbes, effort tranchant ($F/2$) vs flèche au centre, des poutres avec armatures.

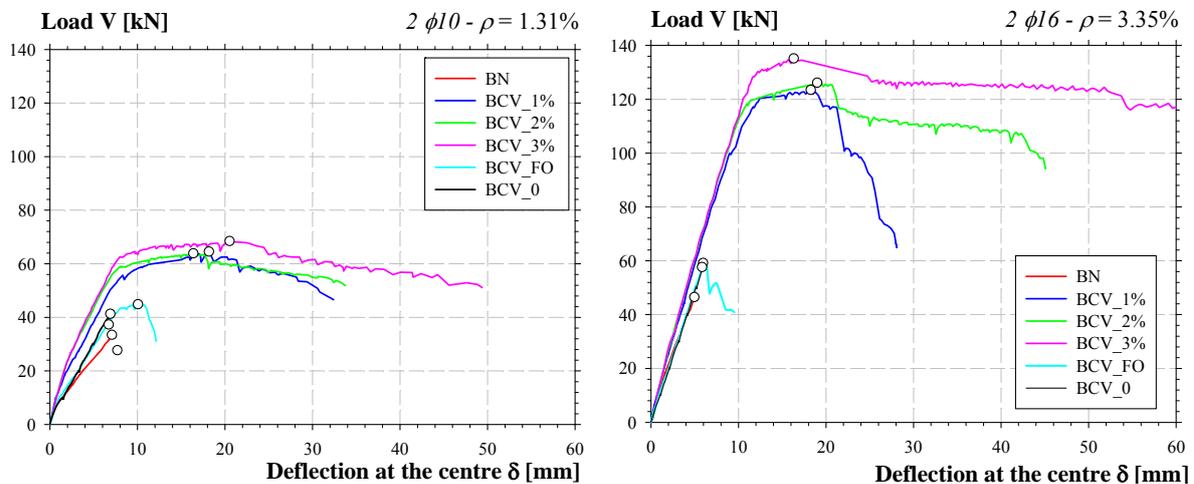


Fig. 7 Courbes effort tranchant vs flèche au centre des poutres avec armature

Les poutres armées réalisées en béton conventionnel, en BCV-0 sans fibres et en BCV-FO avec fibres synthétiques présentent une rupture fragile à l'effort tranchant sans avoir atteint la limite élastique des aciers d'armature. Les poutres armées en BCV avec fibres métalliques présentent des ruptures en flexion, hormis la poutre en BCV-1 % avec un taux d'armature élevé (Fig. 8). Pour cette poutre, la capacité de déformation après la plastification des armatures a été limitée par une rupture d'effort tranchant. Ces résultats montrent la capacité du BFUP avec fibres métalliques à reprendre et contrôler l'effort tranchant. La différence de résistance est faible entre les poutres en BCV avec fibres métalliques. Ceci s'explique par la méthodologie appliquée lors de ces essais. Des cycles de chargement-déchargement ont été effectués à chaque palier de charge jusqu'à la rupture, ceux-ci ne sont pas représentés dans les graphiques. Ces cycles ont provoqué un "écrêtage" du pic.

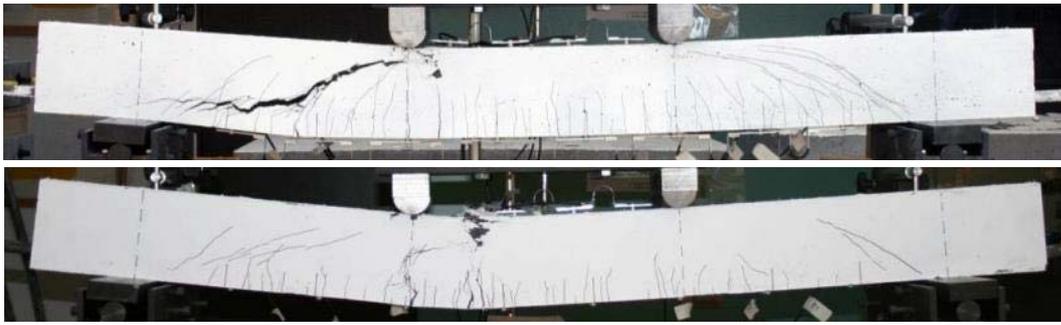


Fig. 8 Faciès de fissuration à la rupture des poutres BCV 1% et 2% avec 2 ϕ 16 mm

La seconde série d'essais est composée de 35 bandes de dalle en BFUP, avec et sans armatures passives. Les paramètres distinguant les éléments d'essai sont : l'épaisseur, la quantité de fibres métalliques et le taux d'armature. Les dalles ont une longueur de 1'400 mm pour une largeur de 400 mm. Les épaisseurs sont de 30, 40, 60 et 80 mm. Pour les éléments armés, l'enrobage à l'axe des armatures est de 15 mm. Deux taux d'armature ρ de 1.1 % et 2.5 % ont été mis en œuvre. Tous les éléments ont été coulés de la même manière. Les éléments sont testés en flexion 4-points inversée sur une portée de 1.2 m. Les forces sont introduites aux extrémités de la plaque au moyen de deux vérins (Fig. 9).

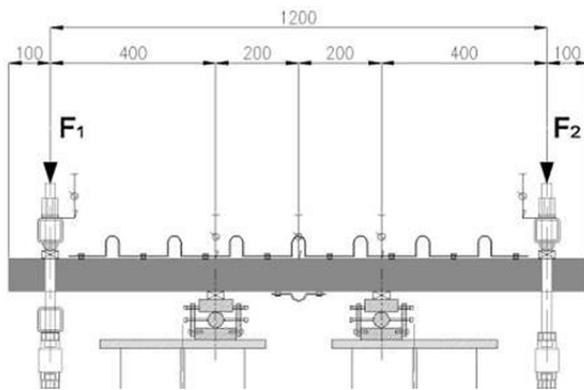


Fig. 9 Configuration des essais de flexion sur les bandes de dalle

Dans les graphiques de la Fig. 10 sont présentés les courbes force vs flèche au centre des bandes de dalle avec une épaisseur de 40 et 60 mm.

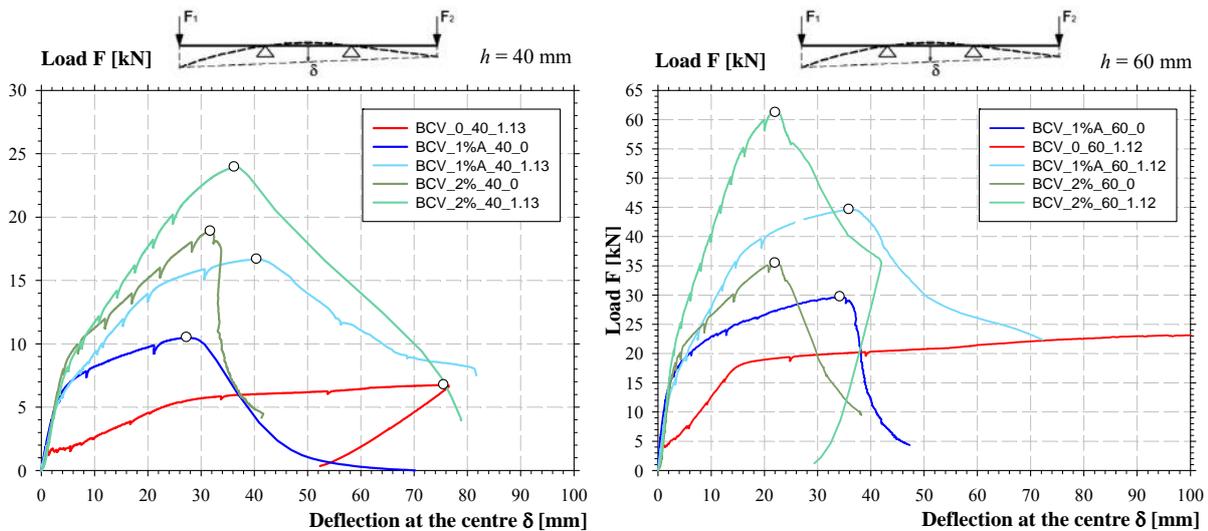


Fig. 10 Courbes force vs flèche au centre des bandes de dalle avec une épaisseur de 40 et 60 mm

En stade élastique non fissuré, la rigidité entre les éléments est similaire. Après la fissuration, le changement de rigidité des plaques en BCV-0 sans fibres est important alors que les éléments en BCV avec fibres présentent un changement de rigidité progressif. Les dalle en BCV avec armature présentent une rigidité élevée et dépendante de la quantité de fibres. Pour ces éléments, la fissuration se développe jusqu'à la plastification des armatures avec des ouvertures de fissure restant inférieures à 0.1 mm. La plastification des armatures marque une diminution importante de la rigidité et la charge maximale est rapidement atteinte. A partir de ce point, les déformations se concentrent sur une seule macro-fissure (Fig. 11). Dans la phase post-pic la force diminue progressivement jusqu'à la rupture des barres. Les essais mettent en évidence que la capacité de déformation au pic tend à diminuer avec l'augmentation de la quantité de fibres.



Fig. 11 Faciès de fissuration à la rupture d'une bande de dalle en BFUP avec des armatures

La troisième étude expérimentale est composée de 28 dalles carrées de 960 mm de côté. Les paramètres distinguant les éléments d'essai sont : l'épaisseur, la quantité de fibres métalliques, le taux d'armature et l'arrangement des armatures. Les épaisseurs sont de 30, 40, 60 et 80 mm. Des enrobages de 15 mm pour les dalles de 30 mm d'épaisseur et de 20 mm pour les autres ont été adoptés. Différents taux d'armature ρ_s compris entre 0.98 % et 2.57 % ont été mis en œuvre. Tous les éléments ont été coulés de la même manière.

Les dalles sont testées sur un banc d'essai spécifique. La charge est appliquée au centre de la dalle par un vérin surmonté d'un cylindre en acier de 80 mm de diamètre. La dalle est supportée par 8 tiges d'ancrage disposées sur un cercle de 878 mm de diamètre. L'appui entre les tiges et la dalle se fait au travers de rotules (Fig. 12).

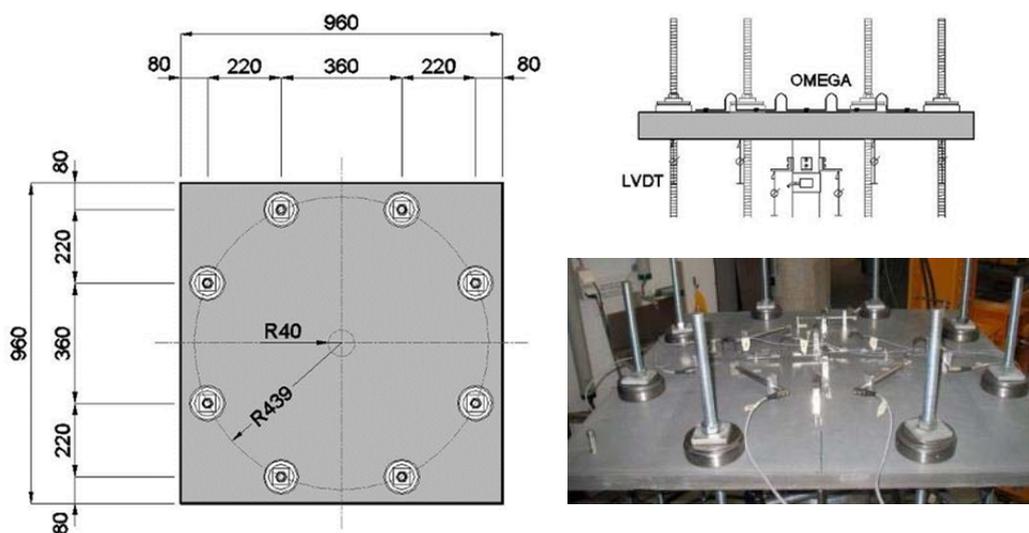


Fig. 12 Configuration des essais de poinçonnement des dalles

Dans les graphiques de la Fig. 13 sont présentés les courbes force vs flèche au centre des dalles avec des épaisseurs de 60 et 80 mm.

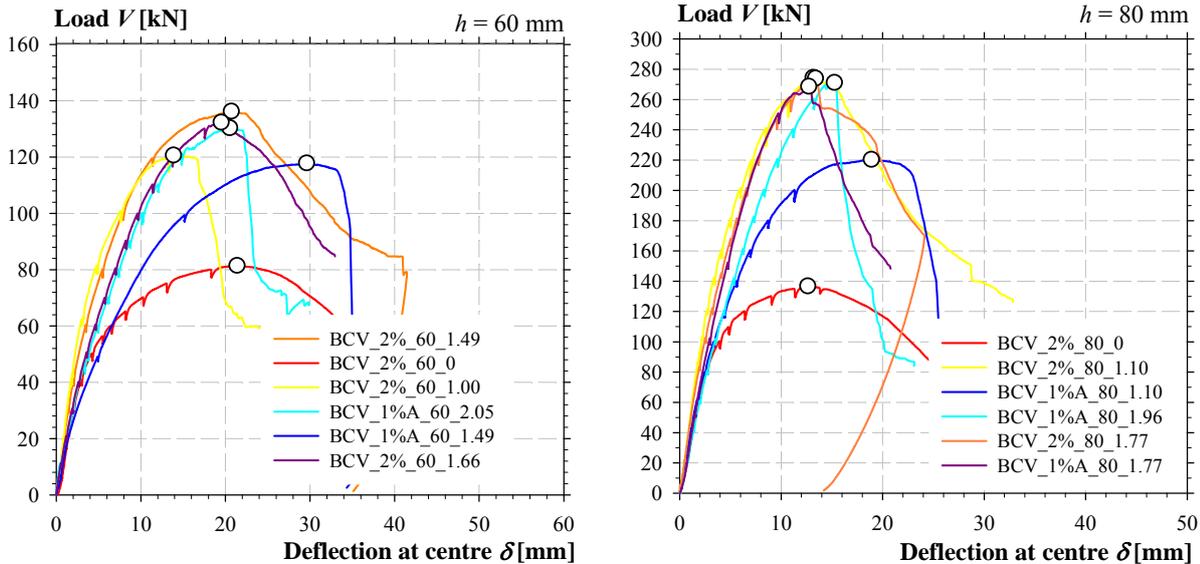


Fig. 13 Courbe force vs flèche au centre des dalles avec une épaisseur de 60 et 80 mm

Les dalles sans armature passive ont manifesté une rupture en flexion avec un développement marqué de lignes de rupture. Après découpe et analyse de la fissuration interne, aucun cône de poinçonnement marqué n'est visible. Le même constat que pour les poutres a été observé : la résistance d'éléments sans armature passive en flexion est modérée, par conséquent le poinçonnement n'est pas déterminant dans le cas étudié.

Les dalles avec treillis d'armatures ont toutes atteint la limite élastique des aciers d'armature suivie d'un court palier et d'une rupture par poinçonnement. La chute de résistance est plus ou moins brutale selon l'épaisseur de la dalle. Compte tenu de la disposition des treillis d'armature, nous distinguons deux types de mécanismes de ruine. Dans le premier type, le cône de poinçonnement intercepte les armatures, la résistance est élevée. Dans le second type, le cône de poinçonnement n'intercepte pas les barres, le cône de poinçonnement est concentré, la résistance est plus faible.

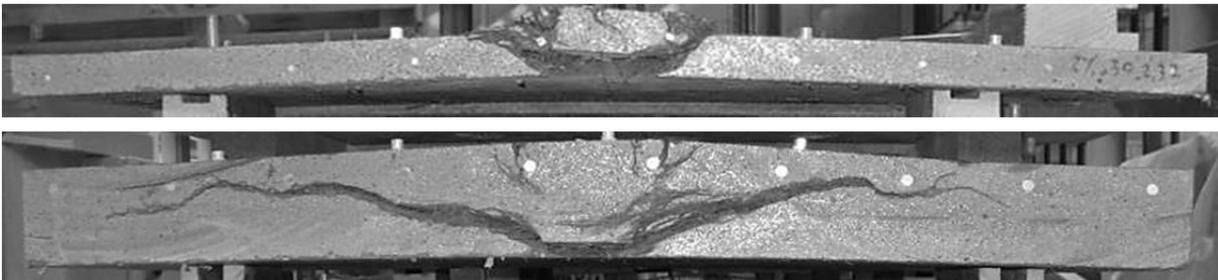


Fig. 14 Fissures internes d'une dalle mince (30 mm) et d'une dalle plus épaisse (80 mm)

La quatrième étude expérimentale est composée de 16 dalles octogonales. Les éléments d'essai ont des dimensions de $2'040 \times 2'040 \times h$ mm. Les paramètres distinguant les éléments d'essai sont : l'épaisseur, la quantité de fibres métalliques, le taux d'armature. Les épaisseurs sont de 30, 40, 60 et 80 mm. Des enrobages moyens de 15 mm pour les dalles de 30 mm d'épaisseur et de 20 mm pour les autres ont été adoptés. Différents taux d'armature ρ_s , compris entre 0.98 % et 2.57 % ont été mis en œuvre. Tous les éléments ont été coulés de la même manière. Les dalles sont testées sur un banc d'essai spécifique (Fig. 15). La charge est appliquée en huit points par quatre vérins hydrauliques placés sur le pourtour de la dalle. Les points de chargement décrivent un cercle de 1.93 m de diamètre. A chaque point d'appui, des rotules laissent libres les rotations. La dalle est appuyée en son centre sur une couronne d'appui de 500 mm de diamètre.

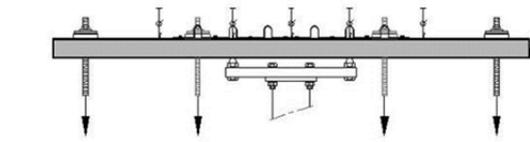
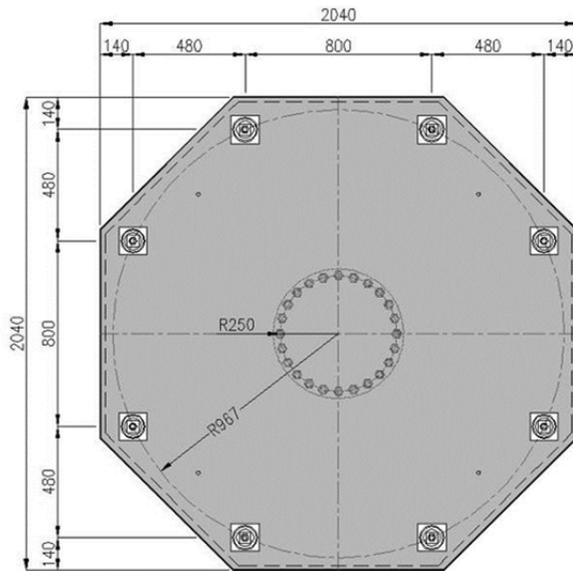


Fig. 15 Configuration des essais de flexion des dalles

Dans les graphiques de la Fig. 17 sont présentées les courbes, force vs flèche au centre, des dalles.

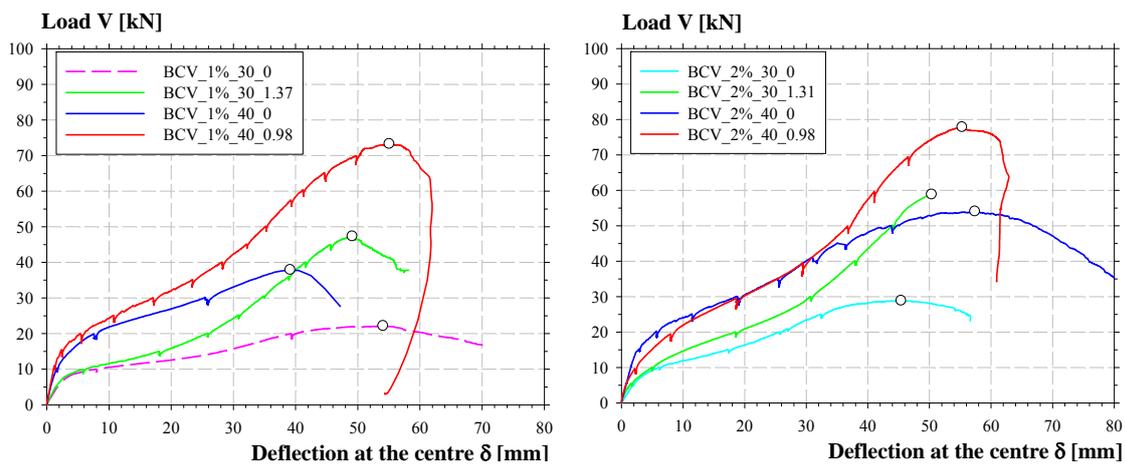


Fig. 16 Courbe force vs flèche au centre des dalles avec une épaisseur de 30 et 40 mm

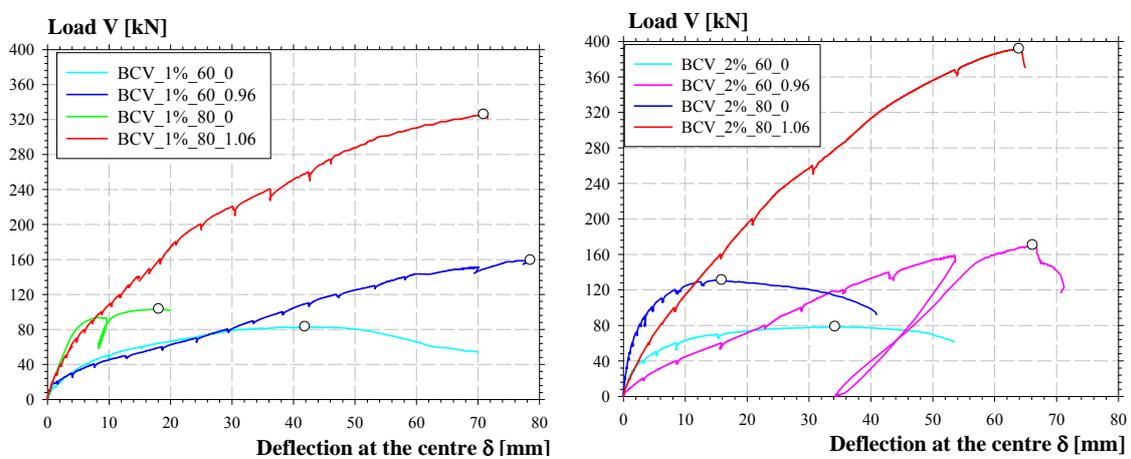


Fig. 17 Courbe force vs flèche au centre des dalles avec une épaisseur de 60 et 80 mm

Tous les éléments ont eu une rupture en flexion avec la formation de lignes de rupture marquées. Pour les dalles minces de 30 et 40 mm, le comportement entre les éléments avec et sans armature est similaire dans une première phase. Cependant, dès que la fissuration s'est développée, les treillis d'armature, qui sont situés à l'axe de la section, sont activés augmentant ainsi la rigidité et la charge ultime. Pour les dalles plus épaisses de 60 et 80 mm, le comportement entre les éléments avec et sans armatures est différent. Les éléments sans armature sont plus rigides, ceci est particulièrement marqué pour les dalles en BCV-2 %. Ceci s'explique par une fissuration préférentielle des dalles avec armatures, provoquée par les treillis. Les dalles épaisses avec armatures atteignent un niveau de charge et une capacité de déformation très importante.

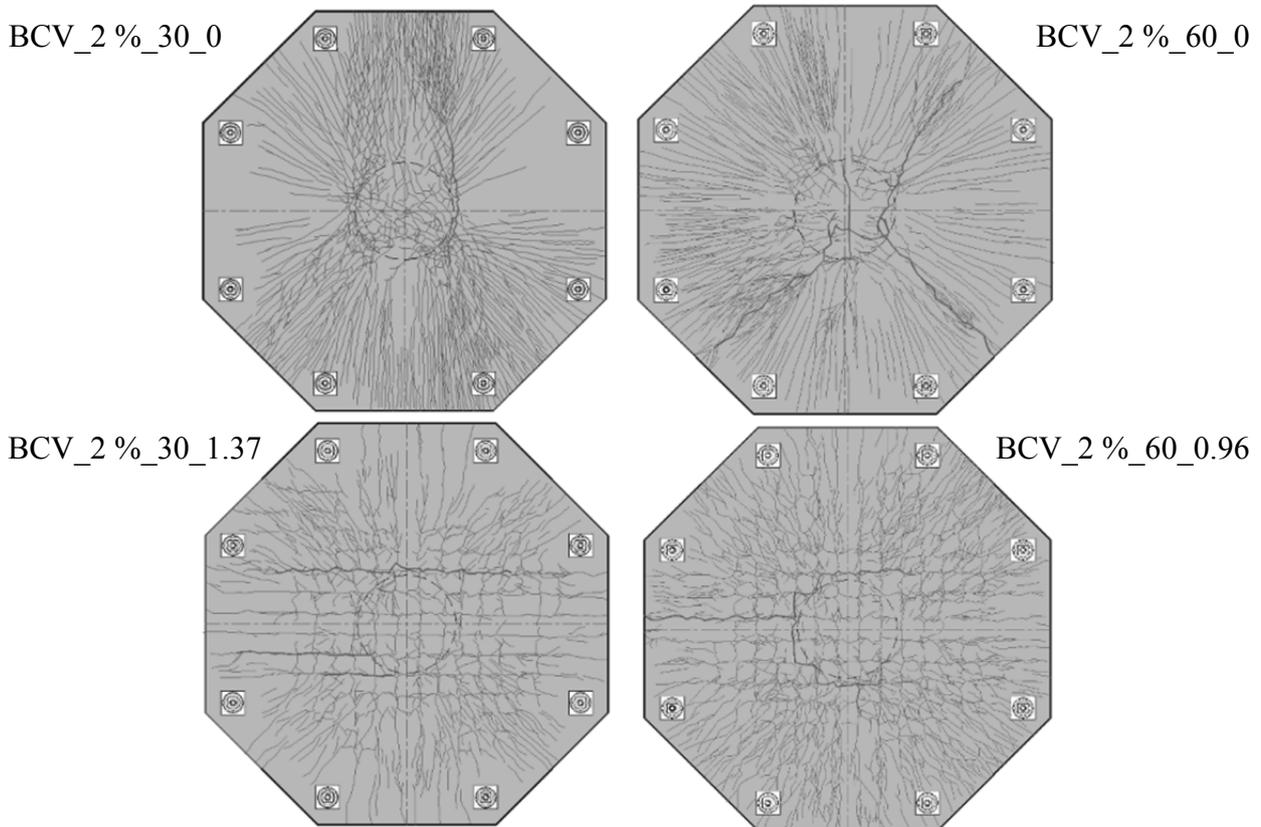


Fig. 18 Faciès de fissuration à la rupture de dalles de différentes épaisseurs sans et avec armatures

Finally, the last study is composed of 5 pre-stressed full-scale beams in BSI® (Special Industrial Concrete) and was realized in collaboration with MFP SA. The objective of the experimental study was to analyze the behavior of perforated beams under the effect of flexion solicitations and, in particular, to determine the shear resistance as a function of the diameter of the openings. The beams have a length of 9.00 m for a height of 1'000 mm and a width that varies between 80 and 100 mm. The beams are pre-stressed by pre-tensioning using four tendons of 150 mm². Three of these tendons are placed in the lower part and one tendon in the upper part. The parameters were the diameter of the openings and the intensity of the pre-tensioning. The five beams were tested on a span of 8 m and subjected to two concentrated loads spaced 3.00 m (Fig. 19).

Tableau 2 : Caractéristiques des éléments d'essai

Élément	Ouvertures ϕ [mm]	Précontrainte P_0 [kN]	Dosage en fibres [kg/m ³]
PU-1	-	4 x 125	200
PU-2	400	4 x 125	200
PU-3	500	4 x 125	200
PU-4	500	4 x 175	200
PU-5	600	4 x 125	200

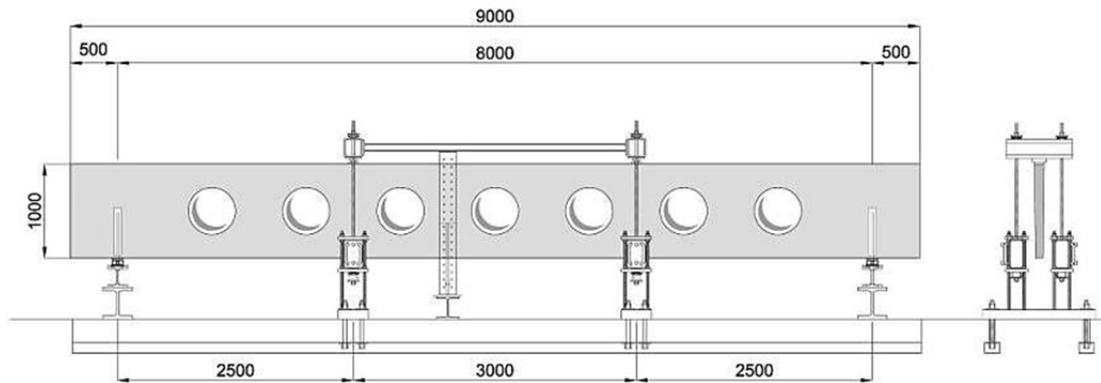


Fig. 19 Configuration des essais de flexion sur poutres précontraintes

Les propriétés mécaniques du BSI ont été déterminées par le biais de plusieurs essais sur le matériau. Ce BFUP présente une résistance à la compression f_{Ucm} de 180 MPa et un module d'élasticité E_{Um} de 58 GPa. La résistance en traction f_{Ut} identifiée à partir d'essais de flexion sur des plaques minces est d'environ 9 MPa.

Dans le graphique de la Fig. 20 sont présentées les courbes force totale vs flèche au centre des poutres précontraintes.

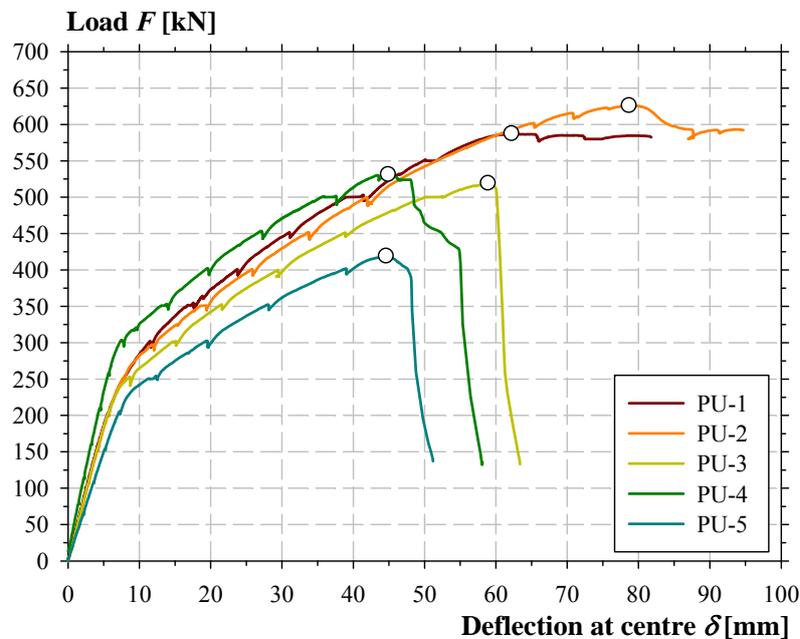


Fig. 20 Courbes force – flèche au centre des poutres précontraintes

Les poutres PU-1 et PU-2 ont subi une rupture en flexion par insuffisance de la partie comprimée suivi d'une rupture des torons. La charge ultime de la poutre PU2 (625 kN) était même supérieure à celle de la poutre de référence PU-1 (587 kN), en raison d'une orientation préférentielle des fibres dans la membrure tendue. Pour ces deux poutres la résistance à l'effort tranchant n'a pas été déterminante, aucune fissure diagonale ne s'est formée.

Les poutres PU-3 à PU-5 ont subi une rupture par effort tranchant dictée par les ouvertures. La charge de rupture est réduite à 519 kN pour la poutre PU3 et à 531 kN pour la poutre PU-4. L'intensité de la précontrainte n'a quasi pas d'effet sur le mécanisme de ruine. Pour la poutre PU-5, avec des ouvertures de 600 mm, une nette diminution de la rigidité et de la charge ultime (418 kN) sont observées. Le comportement de cette dernière s'apparente plutôt à celui d'une poutre Vierendeel.

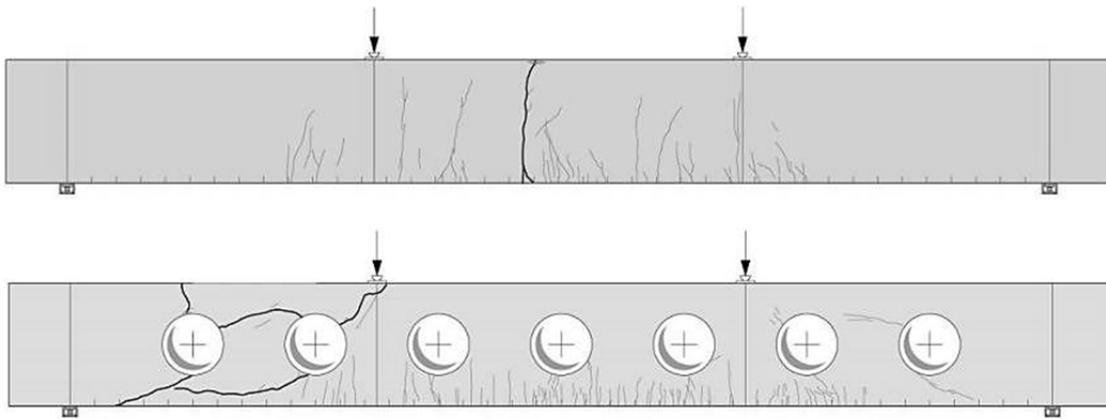


Fig. 21 Faciès de fissuration à la rupture des poutres PU-1 et PU-3

4. Conception et dispositions constructives

Les structures en BFUP ne se conçoivent pas de la même manière que les structures en béton ordinaire du fait des propriétés mécaniques spécifiques du BFUP, particulièrement la résistance en traction et des coûts du matériau plutôt élevés. Afin d'obtenir une structure techniquement et économiquement réalisable, les règles de conception suivantes sont à considérer. Il est à noter que ces règles sont d'ordre général et non-exhaustives.

- Les BFUP sont particulièrement adaptés aux éléments minces et élancés comme vu plus haut. Par conséquent, l'épaisseur d'une plaque en BFUP n'excédera pas 100 mm.
- Afin d'obtenir une rigidité suffisante il est intéressant de concevoir des éléments nervurés ou des structures en treillis. Les structures en BFUP s'apparentent aux structures métalliques par le fait de limiter la quantité de matière.
- Les éléments de structure en BFUP sont généralement préfabriqués. La fabrication délicate, le transport problématique, le haut niveau de finition souvent demandé, etc. limitent la réalisation in situ d'éléments de structure.
- Des armatures passives et/ou de précontrainte seront disposées pour reprendre les efforts principaux. Les armatures dites secondaires et de fissuration peuvent généralement être supprimées.
- Le concepteur se souciera de la fabrication de l'élément, en particulier la méthode de coulage, afin d'être cohérent avec les hypothèses considérées dans les calculs.
- 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.
- En général, le diamètre maximal des armatures n'excédera pas 16 mm. La distance minimale entre les barres correspond à la longueur maximale des fibres.
- La longueur d'ancrage des barres dans le BFUP est fortement réduite (15ϕ) ce qui permet de simplifier les détails d'armature.

5. Dimensionnement

Quelques règles de dimensionnement basées sur le cahier technique SIA 2052 et les recommandations BFUP de l'AFGC [4] sont présentées dans ce chapitre.

Dans le cahier technique SIA 2052 [10], les valeurs de dimensionnement de la résistance du BFUP à la traction et à la compression sont définies de la manière suivante :

$$f_{Uted} = \frac{\eta_i \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (2)$$

$$f_{Utd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utk}}{\gamma_U} \quad (3)$$

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

Le coefficient η_t prend en compte la durée de l'action et vaut en général $\eta_t = 1.0$. Dans le cas d'actions comme le choc, on pourra admettre un coefficient $\eta_t > 1.0$, dans la mesure où sa valeur aura été démontrée par des essais.

Le coefficient η_{hU} prend en compte 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. Le coefficient η_{hU} est déterminé au moyen de la Fig. 22.

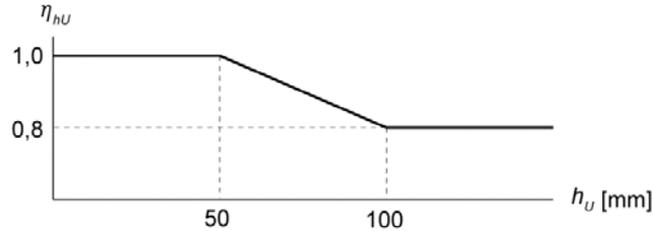


Fig. 22 Coefficient pour la prise en compte de l'épaisseur de l'élément et du processus de fabrication [SIA CT 2052]

Le coefficient η_K est lié à l'orientation des fibres dans la structure. Il dépend de la géométrie de l'élément de construction et du processus de fabrication. La valeur du coefficient est la suivante :

$\eta_K = 0.90$ en cas de comportement d'ensemble (redistribution des contraintes possible, par exemple dans des dalles ou des systèmes hyperstatiques)

$\eta_K = 0.75$ en cas de comportement localisé (aucune possibilité de redistribution des contraintes, par exemple dans les zones d'ancrages ou la vérification de l'effort tranchant)

Si la résistance en traction dans les différentes directions est déterminée par des essais sur un prototype, les coefficients η_{hU} et η_K prennent la valeur de 1.0.

Le coefficient η_{fU1} prend en compte la faible capacité de déformation du BFUP sollicité en compression, il vaut 0.85. Le coefficient η_{fU2} couvre le comportement sous charge des éléments comprimés au sens du chiffre 4.3.7 de la norme SIA 262 et vaut 0.67.

La résistance en section des régions sans discontinuité dont les sections demeurent planes peut être déterminée au moyen d'un modèle continu. Dans cette approche la distribution des contraintes est en relation avec le plan de déformation. En fixant une valeur limite au plan de déformation, il est possible de déterminer la distribution des contraintes correspondantes en assurant l'équilibre. Cet équilibre de la section implique l'égalité des efforts normaux internes avec l'effort normal externes ainsi que l'égalité des moments internes avec le moment extérieur appliqué.

$$\sum N_{int} = \sum N_{ext} \quad (5)$$

$$\sum M_{int} = \sum M_{ext} \quad (6)$$

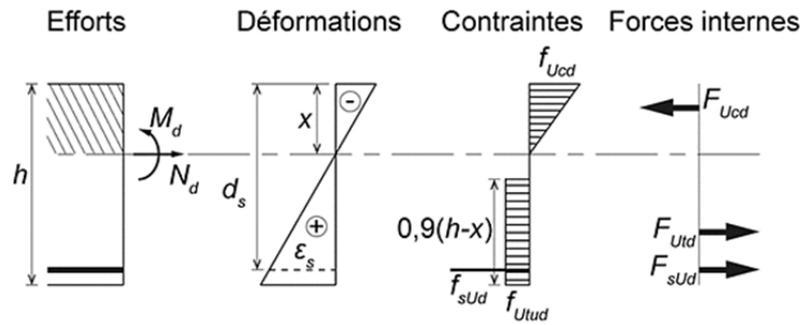


Fig. 23 Modèle général de résistance en section

Dans cette approche la partie adoucissante de la loi de comportement en traction exprimée en contrainte – ouverture de fissure $\sigma(w)$ est transformée en relation contrainte – allongement $\sigma(\varepsilon)$ en introduisant une longueur caractéristique l_U .

$$\varepsilon_{Ut,soft} = \frac{w_{Ut}}{l_U} \quad (7)$$

Pour des sections rectangulaires ou en T, la longueur caractéristique l_U est définie de la manière suivante :

$$l_U = \frac{2}{3} h_U \quad (8)$$

Le moment résistant de la section peut ensuite être déterminé en faisant varier la courbure χ afin d'atteindre le moment maximum.

Pour la vérification à l'effort tranchant des 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. 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.

$$V_{Rd} = V_{Rd,U} + V_{Rd,s} \quad (9)$$

avec :

$$V_{Rd,U} = \frac{b_w \cdot z \cdot 0,5(f_{Utd} + f_{Utd})}{\tan \alpha} \quad (10)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \sin \beta \quad (11)$$

Dans le cas de sollicitations combinées de flexion et effort tranchant, la contribution du BFUP tendu ne devra pas être considérée deux fois.

Pour des cas complexes, une analyse par éléments finis est souvent nécessaire.

6. Conclusions

Les applications réalisées ces dernières années en Suisse et ailleurs mettent en évidence le potentiel des Bétons Fibrés Ultra-Performants (BFUP) dans des structures neuves d'une part et le renforcement de structures existantes d'autre part. Les BFUP sont caractérisés par des propriétés mécaniques et une durabilité élevées permettant la réalisation d'éléments minces avec ou sans armatures, aux formes complexes et aux textures travaillées. Pour de nouvelles structures, les BFUP sont particulièrement adaptés pour des passerelles, des ponts, des résilles, des habillages de façade, des structures industrielles et de génie civil.

Les études expérimentales menées à l'EIA-FR et ailleurs sur des éléments de structure en BFUP présentent des mécanismes de rupture souvent ductiles. La combinaison BFUP – armatures passives ou de précontrainte permet d'atteindre des niveaux de sollicitations très élevés. Dans les parties

d'élément où le BFUP assure seul la résistance, le contrôle et la maîtrise du coulage revêt une importance primordiale car les fibres s'orientent de manière préférentielle.

La conception et le dimensionnement de structure en BFUP nécessitent des règles spécifiques et sensiblement différentes de celles du béton armé traditionnel. La conception des structures en BFUP s'apparente à celle des structures métalliques par le fait de limiter et optimiser la quantité de matière. Les outils de dimensionnement sont à disposition mais nécessitent une phase d'apprentissage. Des développements sont cependant encore nécessaires, en particulier dans les domaines suivants ; la mise en œuvre, la conception et l'amélioration des modèles de calculs.

Le cahier technique SIA 2052 Béton fibré ultra-performant (BFUP) : matériaux, dimensionnement et exécution [11] vise à mettre à disposition les outils de base nécessaires au concepteur.

7. Références

- [1] BRÜHWILER, E., MOREILLON, L., SUTER, R. Bétons fibrés ultra-performants, Proceedings of UHPC symposium in Fribourg (Switzerland), October 26, 2011, Fribourg, 2011, 207 pp.
- [2] SCHMIDT, E. et al. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of the 3rd HiPerMat Symposium, Kassel, Deutschland, 2012.
- [3] TOUTLEMONDE, F., RESPLENDINO, J. Designing and Building with UHPFRC: from innovation to large-scale realizations, Proceedings of UHPFRC symposium in Marseille (France), October 1-3, 2013, Rilem Publication, 2013, 810 pp.
- [4] AFGC, Recommandations, Bétons fibrés à ultra-hautes performances, édition révisée. Paris, 2013.
- [5] JSCE, Recommendations for Design of UHSFRC Structures, Japan Society of Civil Engineers, 2004.
- [6] PERRET, J., MÜHLBERG, H., SCHÄR, Ph. et CUENNET, S. Renforcement des viaducs de Chillon, *Tracés* 19, 2014.
- [7] MUTTONI, A. Une nouvelle toiture pour le musée olympique à Lausanne, Construction en béton en Suisse, fib-CH, *Journée Suisse du béton*, 2014.
- [8] FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. Edited by Ernst & Sohn, Hoboken, 2013, 434 pp.
- [9] MOREILLON, L.. Shear and punching shear behaviour of structural elements in high performance fibre reinforced concrete. Thesis Université Paris-Est SIE, Champs-sur-Marne, 2013, 264 p.
- [10] SOCIETE SUISSE DES INGENIEURS ET DES ARCHITECTE. Cahier Technique 2052 - Béton fibré ultra-performant (BFUP) : matériaux, dimensionnement et exécution, projet, 2015.
- [11] NSEIR, J., MOREILLON, L., SUTER, R. Flexural and shear behaviour of structural elements in UHPFRC, Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, Marseille, 2013.
- [12] MOREILLON, L., SUTER, R., LE ROY, R. Punching shear resistance of UHPFRC slabs: Experimental works and design model, Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, Marseille, 2013.
- [13] SUTER, R., TOMAS, J., MOREILLON, L. Bending and shear of beams with circular openings, *fib* Congress, Mumbai, 2014.

Préfabrication avec du BFUP

Agnès Petit

Dr. Sc. ETH Zürich

Creabéton Matériaux SA

3250 Lyss

Résumé

Grâce aux propriétés du BFUP à l'état frais et durci et à l'élimination des barres d'armatures les préfabricants peuvent réaliser des projets de formes complexes, d'une extrême finesse et avec des perforations de plus de 50 %. Cet article présente les récents développements de Creabéton Matériaux dans les domaines du génie civil, du bâtiment et de l'aménagement urbain. La qualité des pièces préfabriquées en BFUP/BHP dépend fortement des interactions moule / béton et de la mise en œuvre. Le choix entre un BFUP et un BHP se fait en fonction des exigences du maître d'ouvrage, de l'architecte et l'ingénieur, tout en tenant compte de l'aspect économique du projet.

Keywords: préfabrication, enveloppe du bâtiment, mobilier urbain, façade, végétal, moule, mise en œuvre.

1. Introduction

Cet article présentera les réalisations concrètes les plus récentes tant en génie civil et en bâtiment que dans le domaine de l'aménagement urbain et du design réalisées en Suisse par la société Creabéton Matériaux SA. Il analysera les enseignements techniques qui peuvent être tirés de ces retours d'expérience, en termes de conception, de préfabrication et fiabilité de réalisation. Il abordera également les défis liés aux interactions béton-moules et l'étroite collaboration entre architecte, ingénieur et préfabricant menant à la réussite des projets.

2. Matériaux

Le VIFORT® de Creabéton Matériaux comprend plusieurs recettes de béton fibré ultra-haute performance et haute performance. Ces recettes sont adaptées de cas en cas, en fonction des exigences définies par l'architecte, l'ingénieur et le maître d'ouvrage.

2.1. Béton Fibré Ultra Haute Performance

Le Béton fibré Ultra Haute Performance Vifort® utilisé par Creabéton Matériaux est le SmartUp® anciennement appelé B.C.V (Béton Composite Vicat), développé et commercialisé par le groupe Vicat.

Il se caractérise selon le cahier technique SIA 2052 (annexe A) comme suit:

- Un rapport eau sur ciment extrêmement faible et proche de 0.2
- Des granulats allant jusqu'à 2 mm, un air occlus de 2-5 %
- Une grande ouvrabilité à l'état frais
- Une résistance > 160 MPa en compression et un module d'élasticité de 50'000 N/mm², mesuré selon l'annexe C du cahier technique SIA 2052 pour une recette avec 2.5 % de fibres métalliques (mix courte/longue). La traction par flexion futek est de 7.6 N/mm² (annexe E, SIA 2052) et la résistance en traction directe futek est de 4.8 N/mm² (annexe D, SIA 2052). Ces résultats sont préliminaires et doivent encore être confirmés.
- Ces valeurs indicatives caractérisant le premix BFUP utilisé par Creabéton Matériaux selon l'AFCG sont: résistance en compression de 130-150 MPa, une résistance en flexion 4 points de 30 MPa, une résistance en traction directe de 10 MPa et un module d'élasticité de 44 GPa à 28 jours.

- De plus, les caractéristiques de durabilité sont les suivantes :
 - Perméabilité à l'air $K < 10^{-19} \text{ m}^2$
 - Tenue au gel/dégel (56 cycles) : 100 %
 - Tenue à l'écaillage (300 cycles) : $E = 44 \text{ g/m}^2$
 - Abrasion (CNR) : 1,1
 - Résistance aux chocs (CNR) : 76 cm^3
 - Carbonatation : non mesurable
 - Diffusion des ions chlore : $D = 3,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$
 - Résistance à l'alcali-réaction : 100 %
- Une seconde recette thixotrope avec un mélange de fibres métalliques plus élevé est en cours de caractérisation et devrait permettre de classer le BFUP dans la sorte UA.
- L'utilisation de différents types de fibres: acier, inox ou polyvinyle alcool (PVA) selon les exigences du projet est également possible.
- Le mélange n'est actuellement disponible qu'en gris.

En outre, le BFUP utilisé par Creabéton Matériaux est un pré-mix sec auquel il suffit de rajouter les fibres et les adjuvants ainsi que l'eau de gâchage.

2.2. Béton Haute Performance

Le Béton Haute Performance Vifort® utilisé par Creabéton Matériaux se caractérise typiquement par :

- Une teneur en eau comprise entre 0.3 et 0.4
- Une distribution granulométrique optimisée, avec des granulats jusqu'à 4 mm de diamètre
- Fluidité et absence de ségrégation, qui facilitent la mise en œuvre
- Une résistance importante à la compression – typiquement C80/95 à C100/115 – qui permet, à conception identique à un béton traditionnel, de diminuer les épaisseurs des éléments
- Une résistance à la traction pas significative en comparaison à celle d'un BFUP
- Une résistance importante aux eaux de pluies et eaux chargées en ions chlorures et sulfatés, toutefois plus basse en comparaison avec un BFUP
- L'utilisation de matières premières locales, permettant un dosage indépendant de chaque fraction
- Le dosage de différents types de fibres, telles qu'acier, polyvinyle alcool (PVA), polypropylène ou cellulose est possible.

Une gamme de couleurs incluant un mortier blanc, gris et anthracite sont possibles.

3. Dispositions constructives et exécution

Lors de l'étude des éléments préfabriqués en BFUP et des assemblages d'éléments qu'ils composent, on étudie, en plus du stade final, les différents états de construction survenant au cours du transport et du montage selon les recommandations du CT SIA 2052.

Les dispositifs d'ancrages et les fixations sont 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. Des essais expérimentaux ont toutefois démontrés que les résistances en traction et cisaillement déterminées avec la méthode expérimentale selon la norme SIA 179 sont sensibles à la distance du goujon au bord de la plaque en béton. Des résultats expérimentaux pour des goujons de dimensions différentes et positionnement seront toutefois préférés.

3.1. Mise en œuvre et coffrage

La fabrication du BFUP s'effectue selon les recommandations du CT SIA 2052, dans une centrale à béton ou la précision de dosage du premix, de l'eau de gâchage et des fibres métalliques est de $\pm 2 \%$ en masse. L'eau de gâchage proviendra du réseau d'eau potable et tempérée.

Avant la première gâchée de BFUP, la cuve de malaxage est humidifiée avec soin et sans laisser de flaques d'eau. En préfabrication, le déversement du BFUP est fait sans attendre dans une benne de récupération au bas du malaxeur. De cette benne, le coulage est fait de préférence soit directement dans la dalle ou dans un béccher intermédiaire (par exemple 5L) qui permettra de verser le béton dans une ouverture de coffrage.

Les propriétés de surface du BFUP varient en fonction d'un grand nombre de facteurs qu'il faut subtilement ajuster en fonction de chaque projet. De façon générale, les extrémités des fibres métalliques qui affleurent à la surface du BFUP peuvent être rapidement corrodées ponctuellement au contact de l'eau. L'apparition des points superficiels est sans conséquence néfastes sur la durabilité mais n'est que rarement tolérée par le maître d'ouvrage. La surface lisse de BFUP en face supérieure des dalles ne sont pas aptes à recevoir le trafic par manque de qualité antidérapante. Des précautions telles que la mise en place de surface texturée sont donc préférées.

Les coûts de BFUP étant entre 5 et 8 fois supérieure à un béton haute performance constitué avec des matières premières locales, le critère économique est souvent le premier critère de choix du matériau.

D'autre part, les qualités esthétiques des éléments de façades sont également devenues décisives dans le choix des matériaux et de leur mise en œuvre. Ainsi Creabéton a parfois dû écarter le BFUP car l'architecte ou le maître d'ouvrage souhaitait des éléments blancs ou gris clair. De plus, les retours d'expériences (Fig. 1) et les exigences toujours plus élevées au niveau de l'aspect ont poussé Creabéton Matériaux à étudier de plus près la mise en œuvre du béton, et les interactions moule / huile de décoffrage/béton.

Ainsi, les facteurs influençant l'orientation des fibres et l'esthétique de surface ont été identifiés comme étant :

- La nature de l'huile de décoffrage et sa mise en œuvre dans le coffrage
- Le matériau constituant le moule
- La méthode et le temps de relâchement du moule durant le retrait
- Le mode et l'orientation du coulage du béton

Le comportement du béton frais à l'interface BFUP/paroi du moule dépend de la nature des espèces chimiques en présence, et notamment de l'huile de décoffrage et la composition du béton [1], [2]. Il a également été observé que l'application de l'agent de démoulage selon un mode spécifique en une couche mince et régulière permet d'augmenter la qualité du rendu de la pièce. La teneur en fine et l'utilisation de superplastifiant augmente la sensibilité aux types d'huile de décoffrage. Ainsi dans certaines circonstances, l'utilisation de recette Vifort BHP clair est préférée au BFUP foncé car elle est plus robuste face aux variations de qualité de surface. Le type de moule permet également de jouer avec les aspects et propriétés de surface et prévenir dans une certaine mesure les fissures liées au retrait. L'utilisation de moule flexibles comme le silicone est ainsi préférée dans de nombreux cas. Une augmentation des fibres métalliques pourra également compenser l'effort à la traction lié au retrait, mais comme mentionné plus haut il ne sera pas forcément esthétique et souhaité dans de nombreux cas de réalisation architectoniques.

Le mode de coulage revêt une grande importance sur l'orientation des fibres et sur l'esthétique du parement. Ainsi pour des éléments de dalles, un coulage par gravité et concentrique est préféré. Il est alors caractérisé par un coefficient η_K de 0.90 selon le cahier technique SIA 2052. Les pièces nécessitant le coulage au travers d'une fine ouverture devront toutefois supposer un η_K de 0.75.

Ainsi le point de chute du béton devrait dans la mesure du possible toujours être à l'arrière du front d'avancement du béton afin de permettre une bonne orientation des fibres et éviter un coulage en zigzags menant à des fronts de bétonnage. Ces fronts de bétonnage constituent une zone de faiblesse structurelle.

Parmi les retours d'expériences, on peut également mentionner que les arêtes vives d'éléments en béton sont à éviter. Les pièces sont difficiles à démouler et cassantes. Les fibres affleurent préférentiellement dans ces zones, nécessitant un ébarbage. De plus, les fibres dans les angles de coffrage peuvent être préjudiciables pour l'aspect général et la sécurité d'utilisation de l'ouvrage.



Fig. 1 Inhomogénéité de surface et taches blanches sur la surface coffrée de pièces en BFUP réalisés avec des moules en bois vernis.

4. Avantages de la préfabrication en BFUP

Les avantages de la préfabrication en BFUP d'éléments architectoniques sont nombreux et comprennent notamment :

- Réduction des coûts initiaux, grâce au découplage entre le gros œuvre et la production des éléments préfabriqués en usine
- Maitrise de coûts grâce à la réutilisation des coffrages. Le BFUP permet également d'employer des coffrages complexes grâce à son ouvrabilité
- Impact minime des conditions météorologiques offre non seulement des produits de meilleure qualité mais également une amélioration des conditions de travail des ouvriers
- Liberté et uniformité au niveau des couleurs, structures et esthétiques de surface qui seront mieux maîtrisées en usine
- Un mode de construction plus respectueux de l'environnement car il utilise des granulats locaux.

5. Exemples de réalisations en BFUP

5.1. ITER, Cadarache, France



Fig. 2 ITER, Cadarache (France)

La façade ITER se compose de plus de 2'500 éléments pour environ 100 types de moules et un total de 1'600 m² réalisé entre octobre 2011 et juillet 2012. La taille du plus grand panneau est de 1'350 mm x 1'250 mm x 20 mm. La forme des éléments varie selon la position sur la façade. Le bâtiment se situe en zone sismique de classe IV, à sismicité moyenne (Magnitude 5,8). La

géométrie des éléments ainsi-que leur dimensionnement sont définis par les plans d'exécution et les notes de calculs réalisés par le bureau d'études LAMOUREUX-RICCIOTTI Ingénierie. La structure porteuse et constituée de voiles en béton armé coulés in-situ par l'entreprise Léon Grosse.

Une note de calcul a permis de vérifier que la structure du bâtiment est capable de supporter les éléments préfabriqués ainsi-que les surcharges applicables sur ces éléments. Cette note de calcul a été produite par le bureau d'études SICA à Marseille, qui présente également les valeurs d'accélération à prendre en compte pour la vérification sous effets sismiques. Le bureau de contrôle chargé de la vérification est la société APAVE.

Les exigences du BFUP ont été basées sur les valeurs des Recommandations Provisoires AFGC-SETRA disponibles à l'époque. L'assurance de la qualité a été faite sur des essais initiaux, essais de convenance et essais de contrôle de qualité selon l'appréciation technique d'Experimentation (ATEX) reçue en 2011 dont voici les détails. Ce plan de qualité correspond dans les grandes lignes aux recommandations du cahier technique SIA 2052 (§6) mais diffère sur certains points comme le type d'éprouvette utilisée pour les contrôles de qualité.

5.1.1. Plan de qualité

Les essais de convenance et qualité ont été effectués selon la norme SN EN 206-1. La fabrication a été gérée suivant un mode opératoire spécifique à cette fabrication. Le plan qualité comportait, au minimum, les points d'arrêts suivants :

a) Avant bétonnage :

- Réception du moule (propreté, agent démoulant, nivellement),
- Conformité de l'implantation des inserts,

b) Après bétonnage

- Maturité du béton avant démoulage, autorisation de démoulage,
- Mesure des tolérances de fabrication,

c) Stockage

- Calage
- Protection
- Préparation des moules : consignes à prendre sur le planning journalier de fabrication
- Opération de :
 - Préparation de la composition : fiche de calculs pour la pesée – Fiche de fabrication
 - Malaxage : procédure d'introduction des composants – procédure de malaxage (chronométré)
 - Coulée : procédure montrant le sens de la coulée et l'opération de clavage et lissage
- Les P.V. d'essais de résistance sont produits par un laboratoire (laboratoire agréé SIA) sur les éprouvettes durcies. Ils sont consignés dans un classeur.
- Les résultats des résistances sur les éléments en cours de fabrication sont reportés sur les fiches de fabrication établies pour chaque élément.
- Les essais ont été réalisés selon la norme SN-EN 206.1 – 1 :2000
Epreuves : Cube pour compression 15 x 15 x 15 cm
- Barrettes pour traction/flexion 10 x 10 x 40 cm
- La fabrication des éléments a été réalisée en processus continu, sans interruption et coulé de façon gravitaire et concentrique comme pour des dalles.
- Jugement de la qualité : Les contrôles suivants ont été effectués pour tous les produits finis:
 - contrôle visuel sur chaque élément,
 - contrôle systématique de la géométrie et de la planéité,
 - contrôle des résistances mécaniques (f_{cj28} et f_{ij28}) afin de suivre la régularité de la fabrication et sa conformité. Les pièces non conformes sont rebutées (env. 1%)

- l'ensemble des résultats ainsi que les dispositions prises en cas de résultat non satisfaisant (actions correctives) est consigné dans un classeur.

5.1.2. Mise en place, cure et conditions de stockage et transport

Les moules utilisés étaient en bois vernis. Les éléments type dalles ont été coulés à l'horizontale par gravimétrie et de façon concentrique (Fig.3). Les éléments avec deux faces coffrées ont quant à eux été coulés au travers d'une fente (Fig 4). Le calage des éléments lors du stockage et du transport a été organisé de façon à éliminer les risques de déformation par fluage (de flexion notamment). Les arêtes ont été ensuite ébarbées pour retirer les fibres métalliques selon la fig. 5 puis stockés verticalement fig. 6 sous protection d'un film polyane pour maintenir un taux d'humidité pendant la cure de 7 jours, conformément au cahier technique SIA 2052. Par ailleurs les zones de calage et les dimensions des cales ont été déterminées pour exclure tout risque de poinçonnement des éléments.



Fig. 3 (gauche) et Fig 4 (droite) : Mise en place du béton dans des moules en bois laqué.



Fig. 5 (gauche) et 6 (droite) : Les arêtes sont ebarbées et les éléments sont stockés et transportés à la verticale.

5.2. Façade végétalisée SKYFLOR®

En 2011, Creabéton Matériaux et des chercheurs de la Haute Ecole du Paysage de l'Ingénierie et d'Architecture (hepia) se sont associés pour développer des enveloppes de bâtiment végétales.

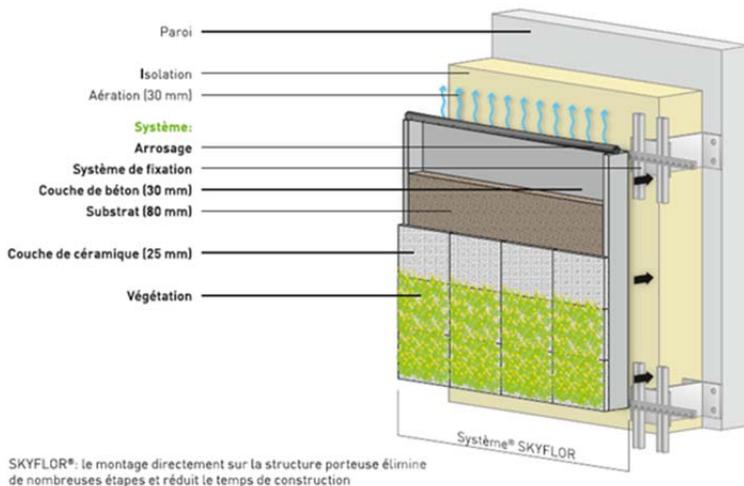


Fig. 7 Système de façade SKYFLOR®

Associer les performances du BFUP à l'esthétique de la céramique et à la variété de la nature, tel était le défi à relever. Ces bardages végétalisés redonnent de la couleur à la grisaille de la ville. Leurs avantages sont multiples : ils soutiennent la biodiversité et garantissent le maintien d'une flore endémique. Ils apportent des propriétés insonorisantes augmentant ainsi la qualité de vie, la lutte contre le réchauffement et permettent la fixation des poussières.

Les défis de ce projet étaient multiples. Pour le béton, il s'agissait de dimensionner un support pour des panneaux de dimensions variant de 60 cm x 90 cm à 210 cm x 120 cm. Le poids que doivent porter ces panneaux et de l'ordre de 80 kg/m² et est constitué de substrat minéral, céramique, plantes et eau. Le choix du béton s'est porté sur le BFUP, car il s'agissait d'avoir le bardage végétalisé le plus léger et fin possible. D'autre part, l'utilisation du BFUP assure l'étanchéité de l'élément avec la façade et une durabilité face aux variations de pH dues au dosage d'engrais périodique, à la dégradation de la matière organique et au cycle de gel-dégel. L'épaisseur de l'élément en BFUP a été dimensionnée à 30 mm bien avant l'apparition du cahier technique CT 2052, et sur la base des résistances en flexion de 30 MPa fournis alors par VICAT.

Le second défi de ce projet était de réaliser une solution de coffrage adaptable et ajustable à un maximum de dimension de façade. Le moule ainsi développé permet de faire des éléments de façades pour des multiples de 300 x 300 mm. Les moules sont en bois laqué car aucune contrainte esthétique n'est donnée pour l'arrière de l'élément. Finalement, les éléments en BFUP SKYFLOR sont coulés à l'horizontale par gravitation puis mis en place sous film plastique durant 3 jours avant d'être manutentionnés.

Le système breveté SKYFLOR® est adapté pour les constructions neuves, la rénovation, des séparations de jardin ou même en mur intérieur. Il constitue également une solution élégante pour les écrans anti-bruit. Les propriétés acoustiques ont d'ailleurs été testées au Laboratoire fédéral d'essais des matériaux et de recherche (EMPA). L'absorption acoustique de ces murs les classe dans le groupe A2/A3 selon EN 1793-1 avec un DLa allant de 6 à 10 dB selon le degré de saturation en eau du substrat.



Fig. 8 SKYFLOR®, Pavillon Suisse, Exposition Universelle Milan (Italie)

Spécificités du projet et intervenants :

- Façade végétalisée SKYFLOR, Pavillon Suisse, Exposition Universelle Milan 2015
- Architecte de l'exposition lessismore: Paola Tosolini, hepia
- Conception et préfabrication: Creabéton Matériaux SA
- Sous-structure et montage : Ray SA Enveloppe du bâtiment, Givisiez
- Végétalisation et irrigation : Forster Baugrün AG, Golaten
- Dimensions d'un élément préfabriqué: Largeur: 1'740 mm | Hauteur: 1'160 mm | Épaisseur béton-substrat-céramique: 135 mm | Poids en fonctionnement: env. 200 kg

5.3. Perspective de développement pour des bordures de pont en BFUP

Dans le domaine du génie civil et la construction de route, des bordures de pont en BFUP sont à l'étude. Nos réflexions ont été menées conjointement avec le bureau d'Ingénieurs et planification Mantegani & Wyseier de Bienne.

Ces études s'orientent dans 3 directions :

- Remplacement de bordures dégradées par des éléments préfabriqués en BFUP armé
- Construction d'une couche en BFUP sur le pourtour d'une bordure de pont dégradée dans sa couche externe.
- Constitution d'une couche de protection et renforcement de dalles portantes existantes (tablier de pont, dalle située en extérieure au-dessus d'une construction souterraine).

Les figures 9 et 10 montrent deux variantes parmi d'autres en cours d'évaluation.

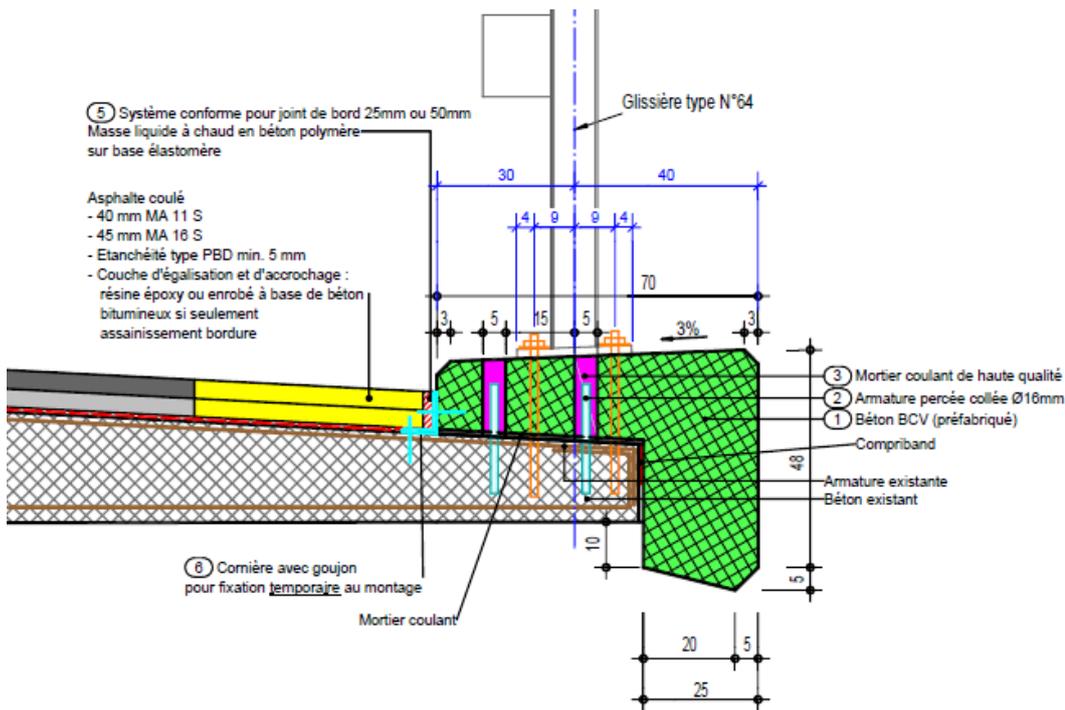


Fig. 9 Bordure de Pont en BFUP Variante 1 : pleine masse © Mantegani et Wyseier et Creabeton Matériaux SA

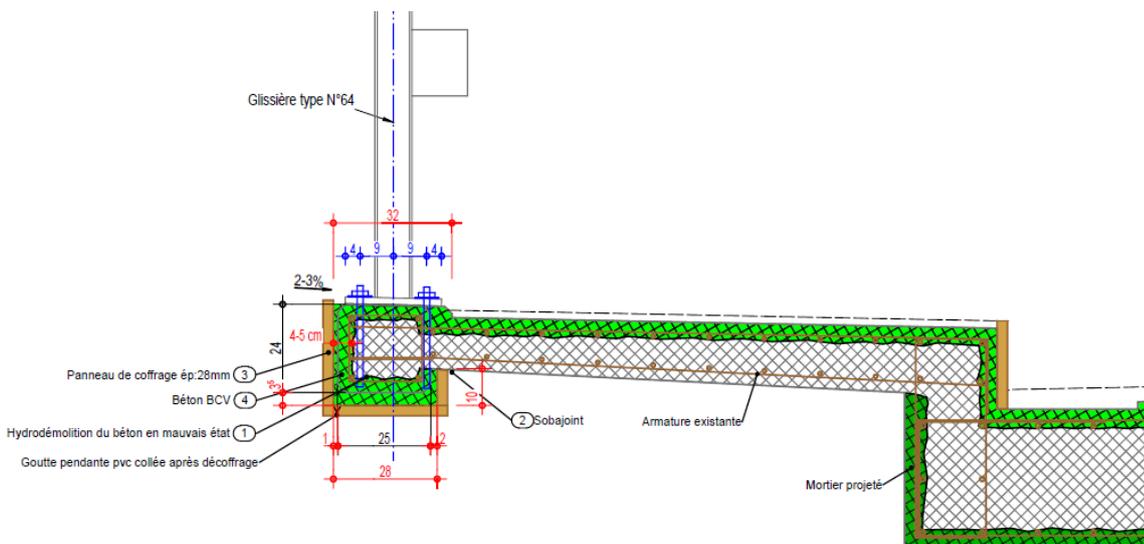


Fig. 10 : Bordure de Pont en BFUP Variante 2: coque BFUP © Mantegani et Wyseier et Creabeton Matériaux SA

Les critères suivants orientent les réflexions:

- Utilisation du BFUP là où ses performances augmentent la durabilité et dans la quantité nécessaire sans surdimensionnement
- Allier l'augmentation de la durabilité à l'augmentation de la résistance lorsque cela s'avère nécessaire.

6. Réalisations en BHP

6.1. Flon Pépinière, Lausanne

Avec Les Pépinières, s'est achevée récemment la dernière étape de reconstruction du quartier du Flon au cœur de Lausanne. La façade est composée de 467 éléments en béton hexagonaux à la structure organique réticulaire. Ce réseau de formes diverses habille le bâtiment d'une enveloppe transparente, aérée et légère – un exemple typique et convaincant de construction en béton au design moderne et d'utilisation du béton haute performance VIFORT® Le revêtement de façade de près de 700 m² est mis en scène la nuit par une mise en lumière, par LED intégrées dans une partie des éléments en béton.



Fig. 11 Façade flon Pépinière t en service

Spécificités du projet et intervenants :

- Flon Pépinières Bâtiment C, Lausanne, 2014
- Architectes: Burckhardt+Partner SA,
- Maître d'ouvrage: LO Immeubles SA / Mobimo,
- Lausanne: Implenla Entreprise Générale SA, Renens
- Préfabricant : Creabéton Matériaux SA
- Dimensions d'un élément préfabriqué : Largeur: 250 cm | Longueur: 165 cm | Épaisseur: 6 cm (éléments standard) | Poids: 150 kg/élément
- Nombre : 467 pièces
- Inserts : Jeu de lumière LED inséré dans les éléments
- Couleurs: gris clair | Surface: lisse de décoffrage
- Coffrage en silicone muni d'un cadre de bois.

Les éléments ont été bétonnés à l'horizontale selon la direction des branches. Un essai de charge en usine a permis de vérifier l'aptitude au service des éléments. L'élément de façade a été suspendu de façon identique que sur le bâtiment du Flon et lors de sa manutention et a été chargé à divers endroits avec des charges de 1 à 5 kN (100 à 500 kg).

La mise en charge s'est faite par mises en tensions successives sur le tire-fort, avec lecture de la charge sur le tensiomètre. Par l'effet de mise en place du système (chaîne, fixation), les charges ont subi des pointes supérieures aux charges stabilisées. Les essais ont montré que l'élément a résisté sans autres à une charge de 2 kN (200 kg) sur chaque point d'application.



Fig. 12 : Flon Pépinières, Lausanne (Suisse) droite : élément fissuré sous charge de 300 kg

Les charges ayant été appliquées sur les branches les plus faibles, on peut admettre qu'il n'y aurait pas de problèmes pour une application de cette charge à n'importe quel endroit de l'élément. La charge a été augmentée jusqu'à 5 kN (500 kg) sans dégâts aux fixations, on peut donc également admettre que les fixations sont dimensionnées correctement.

Ce projet originellement développé en BFUP, a finalement été réalisé en béton haute performance (BHP), car il répondait mieux aux exigences de surface – couleur – et économique en comparaison avec une variante BFUP.

Le tableau 1 présente une comparaison des coûts d'un élément de façade du Flon Pépinière calculé en BHP et BFUP. Les proportions des coûts sont exprimées en fonction de la valeur absolue du coût d'un élément. Le prix du BFUP étant 5-8 fois plus cher que les mélanges béton haute performance développé par Creabéton, l'ouvrage aurait coûté env. 30 % plus cher. De façon générale, les projets en BFUP nécessitent un dimensionnement spécifique. Le coût de ce dimensionnement peut être estimé à environ 20 % pour chaque élément, qui s'ajoutent aux coûts mentionnés dans le tableau 1.

Tableau 1 Comparaison coûts du projet si réalisation en BHP ou en BFUP.

Travaux	BHP	BFUP premix
Béton	10 %	25 %
Moule	30 %	25 %
Main d'oeuvre	50 %	40 %
Transport et autres	6 %	10 %

6.2. Accessoires et mobilier intérieur

Un nombre important d'accessoires et mobilier intérieur ont été développés ces dernières années en BFUP et BHP. Les exigences au niveau statique étant relativement faibles et/ou mal connus, ces éléments sont dimensionnés pour l'heure de façon empirique. Un essai de charge est effectué sur un ou des prototypes dans son état de fonctionnement. Pour le mobilier urbain et les accessoires, le BHP est privilégié pour les raisons économiques, esthétiques tels que couleur et aspect de surface mentionnées plus haut. De plus, les fibres métalliques ne sont pas admises pour des raisons évidentes de sécurité lors de l'utilisation. La main d'œuvre pour la fabrication de ce type de pièces complexes compte parfois tout de même pour 30 à 60 % dans les coûts de production. Ainsi pour la lampe Appollon il faut compter près de 11 heures de manufacture pour la préparation du coffrage à l'emballage de la pièce.

Spécificités du projet et intervenants:

- Lampe Appollon
- Diamètre supérieur 296 mm | Diamètre socle: 320 mm | Hauteur: 1'900 mm | Poids: env. 40 kg
- Couleur: gris,
- Technique LED : Blanc neutre + rvb (pour 16.8 Mo de teintes)
- Commande : Télécommande IR

- Couleurs: grise | Surface: lisse de décoffrage



Fig. 13 Lampe Apollon

7. Construction et perspectives

Le BFUP est une matière première exceptionnelle du point de vue de ses propriétés physiques et chimiques. Il est toutefois encore sous-exploité compte tenu de son prix environ 5-8 fois celui d'un béton haute performance fabriqué avec des matières locales. C'est pourquoi un dimensionnement au cas par cas est nécessaire afin d'éviter le surcoût. Le défi pour la préfabrication reste toutefois dans la définition précise des exigences liées aux propriétés et qualité de surface et finitions. En effet, selon nos estimations les coûts imputés à la main d'œuvre varient entre 30 et 50 % par rapport au coût final du projet. Pour les pièces complexes, le coût du moule constitue également une part importante soit 20 – 35 % du coût de production finale.

Finalement si les délais de réalisation d'un ouvrage sont courts la préfabrication d'élément permet de réduire les temps d'intervention, toutefois, le nombre de moule devra être adapté pour répondre aux délais de livraisons. On voit donc l'avantage d'intégrer le préfabriquant le plus tôt possible lors de la conception du projet.

8. Références

- [1] DJELAL, C., YANHOVE, Y., CHAMBELLAN D, BRISSET, P., "Influence of the application method of release agents on thickness of moulds oils", *Materials and Structures*, Vol. 43, 2010, pp. 687-698.
- [2] LIBESSART, L., «Influence de la composition des agents de démoulage à l'interface coffrage/béton - Impact sur l'esthétique des parements en béton,» Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, 2006.

Passerelle du Martinet en BFUP armé

Didier ROBYR

Ing. civil dipl. EPFL
Emch+Berger SA
Lausanne

Rita GALRITO

Ing. civile dipl. EPFL
Emch+Berger SA
Lausanne

Eugen BRÜHWILER

Prof. Dr. ing. civ. dipl.
ETH/SIA/IABSE
EPF Lausanne (EPFL)
1015 Lausanne

Résumé

Cet article présente les enjeux de la conception et du dimensionnement de la Passerelle du Martinet qui ont justifié l'utilisation du BFUP armé, en mettant l'accent sur la manière dont les indications du nouveau Cahier Technique SIA 2052 [1] ont été prises en compte. L'article se poursuit par la description de la méthode de construction comprenant la préfabrication de la passerelle par éléments en atelier ainsi que leur transport et assemblage sur le site. La partie expérimentale du projet est ensuite traitée incluant les tests de résistance réalisés à l'EPFL sur un prototype de grandeur réelle et les essais de charge exécutés sur l'ouvrage avant son ouverture au public. Finalement, l'aspect financier du projet est mentionné. L'article aborde également des réflexions sur l'expérience faite de l'emploi de BFUP dans la nouvelle construction et l'adaptation de la manière de concevoir et dimensionner une telle structure.

Mots-clés: BFUP, passerelle piétonne, développement durable, optimisation, préfabrication, précontrainte, tests sur prototype, essais de charge in situ

1. Introduction

Avec son ouverture au public le 10 juillet 2015, la Passerelle du Martinet est la première passerelle entièrement en BFUP armé et précontraint et composée d'éléments d'épaisseur mince réalisée en Suisse. L'optimisation de la matière sur cet ouvrage d'art constitue une performance structurelle innovante.

La construction de la Passerelle du Martinet s'inscrit dans le projet d'agglomération Lausanne – Morges (PALM 2007) qui vise à promouvoir la mobilité douce. Plus précisément, la passerelle assure, au droit du chemin du Martinet, la continuité de l'itinéraire de mobilité douce reliant Malley à la place de la Gare de Lausanne.

Les objectifs de ce projet étaient multiples : respecter les principes d'un développement durable, accroître l'attractivité des transports publics en reliant des arrêts TL et CFF, renforcer l'accessibilité à des futurs pôles d'activités et offrir un itinéraire sécurisé pour les piétons et les vélos.

En plus de la construction de la passerelle, un réaménagement d'une partie du quartier dans lequel elle s'insère était souhaité dans le but d'accroître son accessibilité. La passerelle elle-même, de par un de ses parapets faisant office de banc, ainsi que le nouvel aménagement qui l'entoure font, à présent, du lieu un endroit accueillant et plus attractif.

Les principaux intervenants du projet ont été :

- le Maître de l'Ouvrage : Ville de Lausanne (Services Routes et Mobilité, Architecture et Electricité),
- le bureau d'ingénieurs : Emch+Berger SA Lausanne,
- le support technique pour le dimensionnement en BFUP, les tests sur prototype en laboratoire et les essais de charge in situ : le Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) de l'EPFL,
- l'entreprise de construction : Marti SA Lausanne,
- l'entreprise de préfabrication des éléments en BFUP : MFP Préfabrication SA,

- l'entreprise de précontrainte, appuis et joints : Freyssinet Suisse,
- l'entreprise d'éclairage : Lumatec SA.



Fig. 1 Vues d'ensemble de la Passerelle du Martinet



Fig. 2 Vues d'ensemble de l'extrados de la Passerelle du Martinet

2. Conception

2.1. Contraintes et choix de la variante en BFUP

Dans un environnement urbain déjà très construit, les principales contraintes étaient :

- L'intrados du passage inférieur CFF, parallèle à la passerelle, dictait la limite inférieure du tablier de la passerelle et le niveau existant sur le chemin d'accès à l'Ouest la limite supérieure.
- Une largeur utile de 2.5 m et une portée variant entre 15 et 19 m, sans porteurs verticaux intermédiaires, étaient à prévoir.
- Un mur de culée était à prévoir restant indépendant du mur existant de l'Ecole du cirque.
- La passerelle devait être autoportante et ne pas s'appuyer sur l'ouvrage CFF existant.
- Un espace d'environ 30 cm était à prévoir entre le passage inférieur CFF existant et la nouvelle passerelle afin de laisser passer la lumière et de fixer les réseaux.
- Le site ne permettait d'avoir qu'une place restreinte pour l'exécution des travaux.

- L'utilisation de matériaux respectant les principes du développement durable était à prévoir.
- D'un point de vue architectural, il était souhaité de construire un ouvrage léger.

Après une étude de variantes en béton et en construction mixte acier-béton, la variante en BFUP s'est rapidement imposée comme permettant de répondre à la fois aux contraintes géométriques, techniques, architecturales et environnementales :

- Respect des dimensions géométriques imposées.
- Haute performance et finesse structurelle dans un milieu déjà très confiné, permettant de réduire l'impact visuel.
- Réduction de matière considérable diminuant l'empreinte environnementale.
- Tablier avec une épaisseur très mince permettant au passage inférieur de bénéficier d'une luminosité plus importante en comparaison aux autres variantes.
- La méthode de construction d'éléments en atelier, puis assemblage in situ, avait pour avantages une diminution des nuisances sonores ainsi qu'une réduction de la durée des travaux.
- Aucune étanchéité ni revêtement n'étaient nécessaires sur l'ouvrage [2].
- D'un point de vue financier, le coût de construction de la variante en BFUP était faiblement supérieur à celui de la variante en béton. Le très faible entretien et la durée d'utilisation attendus par le BFUP [3] compensaient largement cet écart.

2.2. Structure et architecture

La Passerelle du Martinet est caractérisée par un parapet « organique » côté chemin du Martinet, dont le réseau renvoie aux nervures des feuilles. La conception de ce parapet a tout d'abord été inspirée d'éléments de façade de bâtiments en BFUP. La passerelle avec son parapet alvéolaire a été développée par les auteurs de cet article avec l'assistance du service d'Architecture de la Ville afin d'obtenir un élément de parapet porteur, tout en optimisant les dimensions et la matière à utiliser en fonction du comportement structural, jusqu'à obtention du design final. Le parapet est incliné vers l'extérieur offrant ainsi une sensation d'espace et de confort pour les usagers. En combinaison avec la main courante placée vers l'intérieur, le parapet empêche l'escalade et assure ainsi la sécurité des utilisateurs. Le parapet organique se poursuit en se retournant à 90° de part et d'autre de la passerelle via deux parapets également en BFUP, ne faisant pas partie du système structural de l'ouvrage.

Le second parapet est plein et donne sur le passage inférieur CFF. Son arasée est à 66 cm de la surface de marche et est associée à une grille caillebotis en PRV pour combler l'espace entre la passerelle et le passage inférieur CFF. En plus d'une protection contre les chutes de personnes, la grille caillebotis permet d'éviter la stagnation d'eau et offre une assise originale à l'image d'un assis-debout. Au niveau des culées, la grille caillebotis comporte une partie verticale de part et d'autre de la passerelle pour fermer parfaitement les espaces avec l'existant.

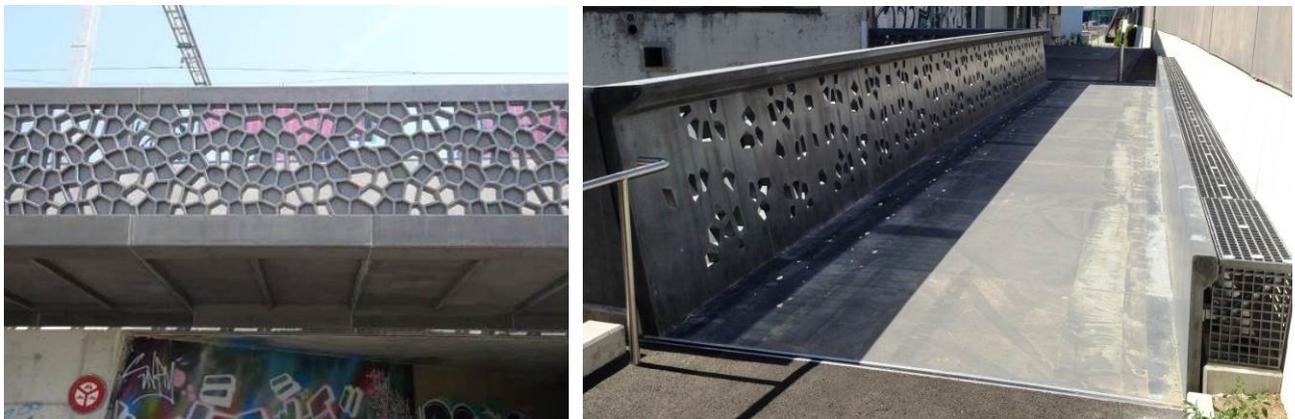


Fig. 3 Gauche : Parapet à âme « organique », Droite : Vue du parapet incliné et de la grille caillebotis

Afin de donner une adhérence à la surface de marche de la passerelle, une matrice avec reliefs a été introduite dans le coffrage de l'extrados du tablier.

La dalle possède un dévers transversal unique de 2 % en direction du parapet plein, qui est muni de barbacanes donnant sur un caniveau en acier inox fixé à la passerelle.

La luminosité a été un des éléments directeurs dans la conception du projet. De ce fait, la passerelle est éclairée de jour par l'éclairage naturel et de nuit via un barreau LED intégré dans la main courante du parapet organique. Des jeux de lumière particuliers, variant le long de la journée et des saisons, sont ainsi obtenus.

Le barreau LED du parapet organique de la passerelle se poursuit du côté Ouest sur le parapet de retour situé sur le mur de l'école du cirque. Du côté Est de la passerelle, le LED se prolonge dans la main courante du garde-corps métallique qui descend le long de l'escalier adjacent à l'ouvrage.



Fig. 4 Gauche et centre : Jeux de lumière de jour; Droite : Eclairage en fin de journée

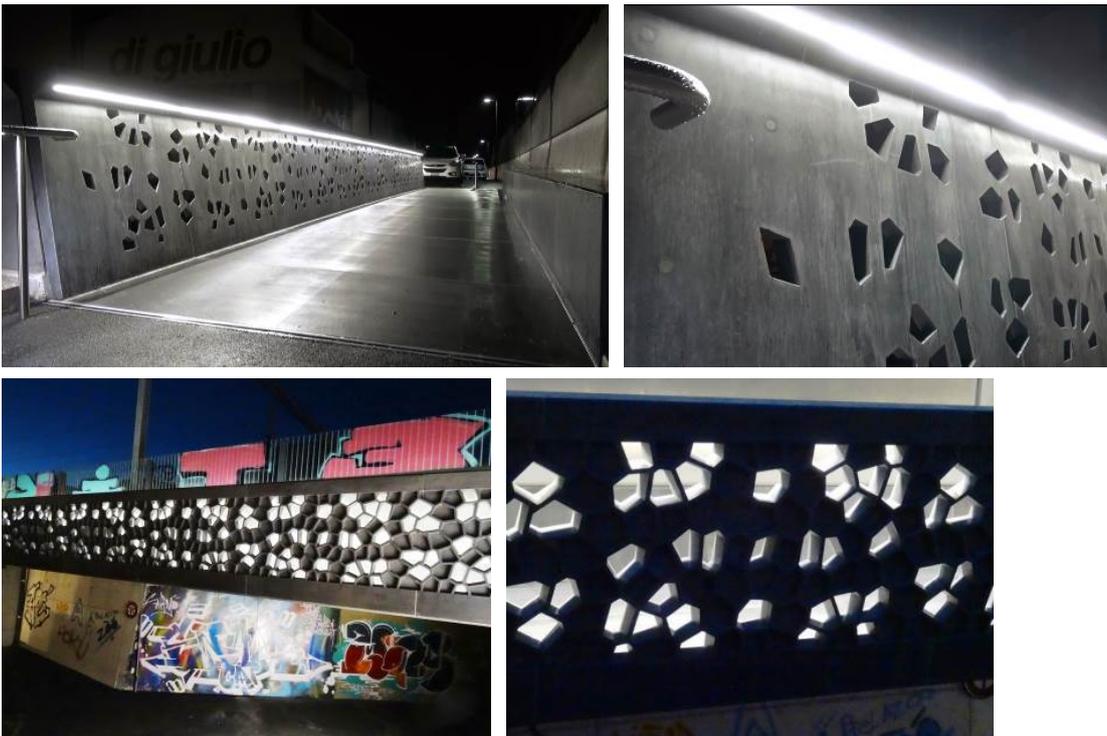


Fig. 5 Eclairage de nuit

2.3. Système statique et dimensions principales

Le système statique de la structure est celui d'une poutre simple de 15.3 m de portée, pour une longueur totale de la passerelle de 15.7 m. L'élançement est de 1/14. Cet élançement peu audacieux s'explique par la hauteur du parapet organique imposée par l'exigence de sécurité pour l'utilisateur. La passerelle est située à 3.15 m du sol.

Les deux culées de la passerelle sont construites en béton armé. La passerelle repose sur quatre appuis en élastomère frettés mobiles en tous sens horizontalement. Un appui de guidage central à la culée Genève et un goujon fixe central à la culée Lausanne complètent le système d'appuis.

A chaque extrémité de la passerelle, se trouve un joint mécanique assurant la transition entre l'ouvrage et l'enrobé de part et d'autre. Des joints identiques ont été prévus des deux côtés de l'ouvrage pour des questions d'étanchéité et d'esthétique.

La section transversale de l'ouvrage est en forme d'auge et est constituée :

- de la dalle de largeur utile de 2.5 m et d'épaisseur 50 mm à 100 mm au droit des parapets. Cette dalle est raidie transversalement par des nervures de largeur 60-80 mm et de hauteur 50 mm, espacées de 942 mm;
- du parapet à âme organique de 1.343 m de hauteur et d'épaisseur variant entre 40 mm et 80 mm au droit des nervures;
- du parapet plein du côté du passage inférieur CFF de 920 mm de haut et 50 mm d'épaisseur.

Les ailes supérieures et inférieures des deux parapets contiennent des câbles de précontrainte (monotorons) rectilignes.

Les deux éléments d'extrémité de la passerelle sont plus massifs (épaisseur de dalle de 100 mm) pour l'introduction des forces d'ancrage des câbles de précontrainte et des réactions d'appui.

Le volume total de la passerelle est de 6 m³ pour un poids total d'environ 15 to (un élément de travée pesant 1.7 to et un élément de bord 1.5 to).

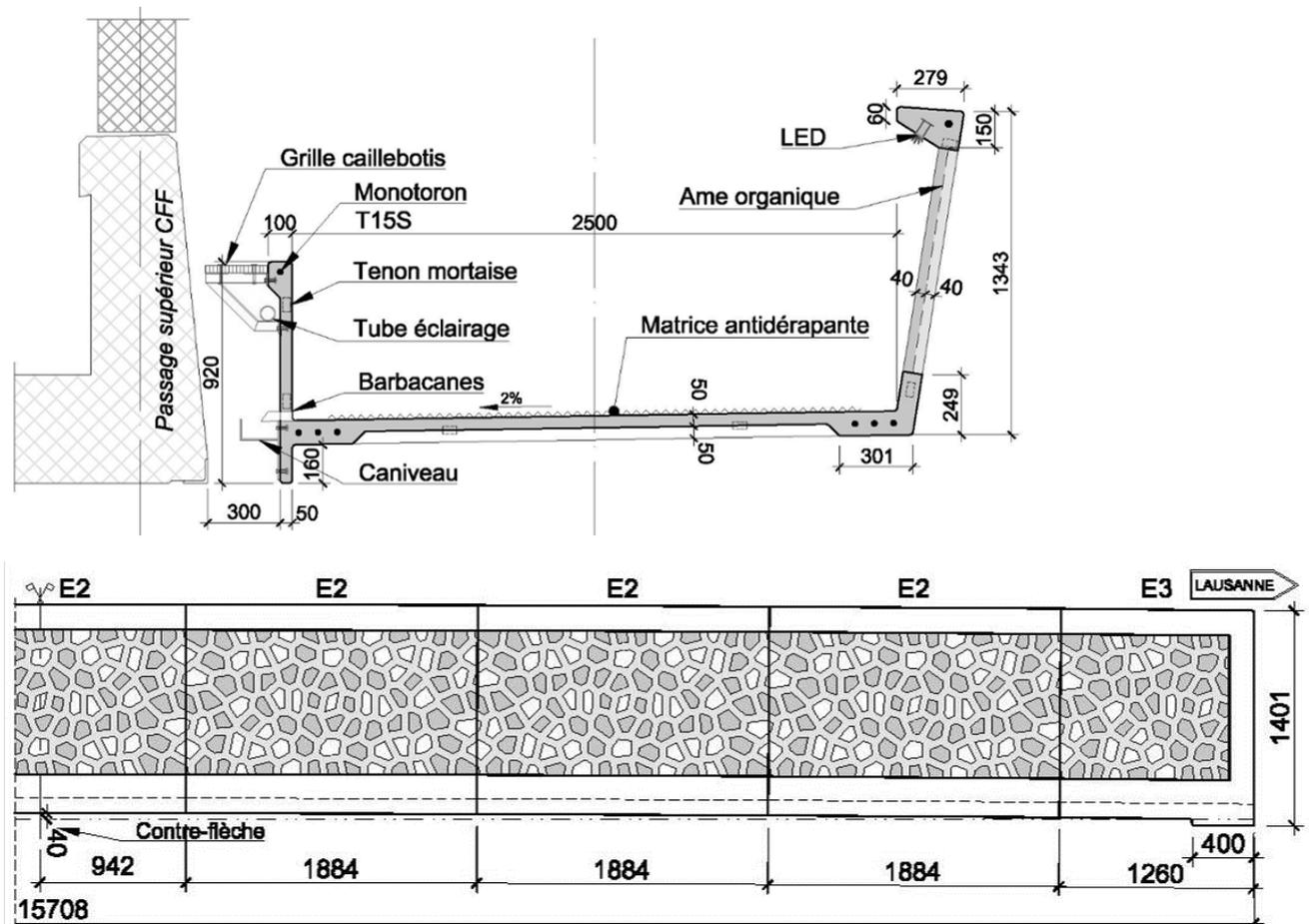


Fig. 6 Haut : Coupe type, Bas : Elévation de la moitié du parapet à âme « organique »

2.4. Propriétés du BFUP utilisé

Le BFUP utilisé est le Ductal fourni par l'entreprise Lafarge, teinté pour obtenir un gris foncé (entrant en contraste avec le mur de soutènement CFF en béton derrière la passerelle), sans traitement thermique. Il s'agit d'un BFUP de la sorte UA selon [1]. Ses propriétés mécaniques sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 Propriétés mécaniques du Ductal données par le fournisseur

Propriétés	Valeur
Résistance caractéristique à la compression	150 MPa
Résistance caractéristique à la traction	7.3 MPa
Module d'élasticité	53 GPa
Coefficient de Poisson	0.2
Densité	2.5
Eau/Liants	0.16
Fibres métalliques	250 kg/m ³

3. Dimensionnement

3.1. Généralités

La détermination des actions a été faite selon la norme SIA 261 [4]. Le dimensionnement de la structure ainsi que les vérifications relatives aux déformations et aux fréquences propres ont été effectués selon la norme SIA 260 [5]. Les valeurs de dimensionnement des résistances des sections en BFUP ont été déterminées selon les règles du Cahier Technique SIA 2052 [1] (article 4.3.2.1 pour la flexion et article 4.3.2.2 pour l'effort tranchant).

La flèche due au fluage a été estimée selon l'article 4.3.3.3 du CT SIA 2052 [1].

Les coefficients de résistance préconisés par l'article 2.4.2.5 du CT SIA 2052 [1] ont été considérés, à savoir $\gamma_{U1} = 1.30$ pour le BFUP et $\gamma_{U2} = 1.20$ pour le BFUP armé. Les coefficients de résistance de l'acier d'armature et de la précontrainte préconisés dans la norme SIA 262 [6] ont été considérés.

Les dispositions constructives données dans le CT SIA 2052 [1] ont été prises en compte :

- Des barres d'armature de diamètre 12 mm et 14 mm ont été utilisées, respectant l'article 5.2.1.
- Toutes les faces étant coffrées, l'enrobage des barres d'armature a pu être réduit selon l'article 5.2.2. L'enrobage minimum varie entre 10 mm et 16 mm dans la dalle et est de 15 mm dans le garde-corps organique.
- La longueur d'ancrage des barres est d'au minimum 15 fois leur diamètre, tel que préconisé par l'article 5.2.4.

3.2. Précontrainte

La précontrainte a pour fonction d'assembler les éléments de passerelle préfabriqués entre eux. Elle a été dimensionnée pour que la section ne soit pas décomprimée dans le sens longitudinal à l'état limite de service. La section est uniformément comprimée par 2.7 MPa à l'état limite de service. A l'état limite ultime, la précontrainte agit comme armature longitudinale.

Les pertes de précontrainte dues au fluage ont été estimées selon l'article 3.2.3.2 et celles dues au retrait selon l'article 3.2.3.4 du CT SIA 2052 [1]. Concernant les pertes dues à la relaxation de l'acier, une hypothèse de 2.5 % de pertes a été faite. Une perte de précontrainte totale de 12 % a ainsi été obtenue.

Les têtes de précontrainte utilisées sont de dimensions réduites et ont spécialement été adaptées par Freyssinet.

3.3. Etat limite de service

La flèche maximale calculée à l'état limite de service est de 10.5 mm. Celle-ci est largement inférieure à la flèche admissible de $l/700$ (22 mm) pour les critères d'aptitude au fonctionnement et aspect. Néanmoins, pour une question visuelle, le choix a été fait de donner une contre-flèche de 40 mm à l'ouvrage.

La fréquence propre du premier mode de vibration vertical calculée est de 6.2 Hz (valeur très proche de celle mesurée in situ de 6.6 Hz).

3.4. Etat limite ultime

3.4.1. Généralités

A l'état limite ultime, 57 % du moment de dimensionnement à mi-travée sont dus à la charge utile (piétons) et 43 % au poids propre de la structure en BFUP. Avec une structure en béton, ces proportions seraient d'approximativement 26 % pour la charge utile, 70 % pour le poids propre de la structure porteuse et 4 % pour le poids propre des charges permanentes (étanchéité et revêtement). Le ratio charge utile/poids propre de la variante en BFUP est donc 3.5 fois plus élevé que celui d'une solution en béton, dû au fait que la structure en BFUP est plus légère.

3.4.2. Dimensionnement de l'âme organique

Le parapet organique se comporte comme une poutre à treillis. Entre les parapets et la dalle, un encastrement est considéré. Chaque élément de travée comporte quatre montants et chaque élément d'extrémité en comporte trois. Ces montants sont constitués d'une tôle en BFUP renforcée par des nervures et des barres d'armature nécessaires à la reprise de l'effort tranchant et de la poussée des piétons, ainsi qu'à la stabilité de la membrure supérieure comprimée. Trois barres de diamètre 12 mm ont été disposées dans chaque montant. Les mêmes barres ont été disposées dans le parapet plein.

Les contraintes dans l'âme organique et notamment dans les nœuds des « nervures de feuille » ont été calculées avec un logiciel d'éléments finis à l'aide duquel la forme de l'âme organique et la disposition des tôles dans celle-ci ont été optimisées.

Le voilement hors plan des bielles comprimées ainsi que le flambage de la membrure supérieure du parapet organique comprimée ont été vérifiés à l'aide des formules utilisées en construction métallique et données dans la norme SIA 263 [7].

3.4.3. Effort tranchant

A l'état limite ultime, l'effort tranchant de dimensionnement à reprendre par les parapets vaut 242 kN. La résistance du BFUP des parapets à l'effort tranchant couvre à elle seule l'effort à reprendre. Une barre d'armature verticale de diamètre 14 mm a été placée en extrémité d'ouvrage pour l'introduction des forces d'ancrage.

3.4.4. Transmission de l'effort tranchant entre éléments

La transmission de l'effort tranchant entre les éléments préfabriqués se fait principalement grâce à la résine appliquée lors de l'assemblage des éléments entre eux. La force de frottement due à l'effort de précontrainte et un système tenon-mortaise, placé à six endroits de la section et assurant un bon calage des éléments entre eux, contribuent également à la transmission de l'effort tranchant.

3.4.5. Vérification de la dalle dans le sens transversal

La vérification de la dalle dans le sens transversal a conduit à la disposition de quatre barres d'armature de diamètre 14 mm dans les nervures transversales de chaque élément ainsi que de barres de diamètre 12 mm réparties le long de la dalle.

4. Méthode de construction

4.1. Durée des travaux et principaux défis

La durée de tous les travaux de construction et de réaménagement a été de trois mois. La mise en place de la passerelle a duré six heures et la mise en précontrainte deux heures, sans compter l'injection des gaines.

Les particularités ont été :

- La construction du moule, en particulier pour l'âme organique,
- La mise en place de barres d'armature dans des sections fines et la garantie des épaisseurs d'enrobage,
- La mise en place de la précontrainte (gaines et têtes d'ancrage) dans des sections fines et le maintien de la forme et de la position des gaines lors du coulage,
- La bonne ouvrabilité du BFUP frais garantissant un remplissage uniforme du moule,

- Les essais de résistance en laboratoire et in situ.
- La construction du cintre avec cales de compensation pour la contre-flèche.

4.2. Préfabrication en atelier

4.2.1. Moule

La passerelle a entièrement été préfabriquée en atelier chez MFP Préfabrication à Marin. Ce procédé permet de garantir la précision de fabrication nécessaire pour réaliser les épaisseurs d'éléments relativement minces.

La passerelle est constituée de neuf éléments (sept en travée de longueur 1.884 m et deux aux extrémités de 1.260 m).

Chaque élément de passerelle a été préfabriqué en un seul moule comprenant la dalle et les deux parapets. Trois moules différents ont été utilisés : un moule pour les éléments de travée et deux moules pour les éléments d'extrémité. Les deux moules des parapets de retour de part et d'autre de l'ouvrage ont été adaptés en partant du moule des éléments de travée. Les moules de la passerelle étaient en acier avec, pour l'âme organique, une matrice en PVC. Les moules des parapets de retour étaient en bois, sauf pour l'âme organique qui avait ici aussi une matrice en PVC. De la silicone a été utilisée pour arrondir les angles de la matrice en PVC de l'âme organique.

Les éléments incorporés dans les moules étaient : 8 gaines de précontrainte, 8 têtes de précontrainte à chaque extrémité, de l'armature passive, un rail pour LED, des réservations pour câble d'éclairage, des inserts pour les fixations du caniveau, du tube électrique et de la grille caillebotis sur le parapet plein, les réservations pour les barbacanes. De l'acier inox a été utilisé pour toutes les fixations directement liées au BFUP. Les barres d'armature verticales étaient attachées à une des gaines de précontrainte en partie basse et tenues par des taquets en partie haute.



Fig. 7 Gauche : moule, Centre : matrice âme « organique », Droite : matrice surface de marche

4.2.2. Coulage des éléments

Environ 0.7 m^3 de BFUP étaient nécessaires pour un élément de travée et 0.6 m^3 pour un élément d'extrémité. Une seule gâchée était produite par élément qui était coulé en une fois. Pour chaque gâchée, des mesures de l'étalement et de la température ont été effectuées. Trois types d'éprouvettes ont été préparées par gâchée pour des essais :

- trois cubes $10 \times 10 \text{ cm}$ testés en compression avant le décoffrage des éléments afin de contrôler la résistance du BFUP,
- une éprouvette cylindrique de diamètre 70 mm et hauteur 140 mm testée en compression à 28 jours, selon l'Annexe B du CT SIA 2052 [1],
- une éprouvette prismatique $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ testée en flexion puis à la compression à 28 jours.

Toutes ces éprouvettes ont été maintenues dans les mêmes conditions de cure que les éléments de passerelle.

Le coulage des éléments de la passerelle a été effectué à l'envers par rapport à l'orientation définitive des éléments, c'est-à-dire que les parapets étaient vers le bas et l'intrados de la dalle vers

le haut. Cette solution a été choisie par l'entreprise afin de faciliter l'écoulement du BFUP frais et garantir que les membrures supérieures (notamment la membrure comprenant le LED) ainsi que toutes les zones de l'âme organique de la passerelle soient bien remplies par le matériau. Ce mode de fabrication assure un rendu esthétique des surfaces des parapets parfaitement lisse, car entièrement coffré, et a permis également d'intégrer à la surface de marche la matrice pour réaliser la rugosité exigée. Un contre-coffrage a été disposé en intrados de dalle pour mouler les nervures sous la dalle.

Un test de coulage, sur un pré-prototype, a été réalisé pour valider le bon remplissage du moule, l'aspect de surface et contrôler l'orientation des fibres qui est liée à la performance en traction du matériau [8].

Lors du coulage des éléments, des barres de rigidification ont été introduites dans les gaines de précontrainte afin que ces dernières ne se déplacent ni se déforment sous le poids du BFUP frais.

Les éléments ont été coulés les uns à la suite des autres en utilisant le système de joints conjugués entre deux pièces consécutives.

Quatre heures et deux ouvriers étaient nécessaires pour couler un élément de passerelle.

Deux à trois éléments ont été coulés par semaine, à raison d'un élément tous les deux jours. La préfabrication des neuf éléments de passerelle a duré approximativement un mois.

La précision visée et obtenue au niveau des dimensions des éléments préfabriqués était de l'ordre du millimètre.

A la fin du coulage, la surface non coffrée a été recouverte par une natte isolante et la cure a débuté.

4.2.3. Démoulage et cure

Au bout d'une quinzaine d'heures, les éléments ont été démoulés. Après quoi, ils ont été entièrement recouverts avec une bâche et leur cure s'est poursuivie à une température située entre 15 et 20°C dans la halle de préfabrication. Au bout d'une semaine la bâche a été ôtée et les éléments sont restés encore cinq (premiers éléments) et deux semaines (derniers éléments) dans la halle. Aucun traitement thermique particulier n'a été mis en œuvre.

4.2.4. Finitions en surface

Suite au démoulage, les éléments ont été maintenus dans la même orientation, c'est-à-dire intrados de dalle vers le haut afin de pouvoir procéder à des retouches. En effet, la surface en intrados présentait du bullage à cause du contre-coffrage (nécessaire pour fermer les nervures). Afin d'obtenir une surface lisse identique aux autres surfaces de la structure, une finition de surface consistant en l'application en fines couches de mortier de ragréage teinté a été mise en œuvre.

Un meulage a été effectué sur les faces entre éléments, préalablement à l'application de la résine époxy, pour leur conférer une plus grande résistance à l'arrachement.

4.3. Transport et mise en place

4.3.1. Cintre

Un cintre horizontal avec cinq tours d'étalement a été monté. Des cales de compensation ont été prévues à l'emplacement des futurs joints entre éléments de la passerelle afin de respecter la contre-flèche de l'ouvrage. Deux vérins plats ont été disposés à chaque culée, entre les appuis. Ceux-ci ont été calés au même niveau que le cintre, soit 5 mm plus haut que le niveau des appuis définitifs de la passerelle.

4.3.2. Transport

Les éléments ont été manutentionnés à l'aide de sangles attachées à quatre douilles de levage dans la dalle de chaque élément. Pour le transport, des renforts par barres, fixés à des douilles en extrémité des éléments, ont été prévus pour empêcher que les parapets ne s'écartent entre eux. Deux trajets par camion entre Marin et le chemin du Martinet ont été nécessaires.



Fig. 8 Gauche : Transport par camion ; Droite : Cintre avec cales de compensation

4.3.3. Pose et collage à la résine

La pose a eu lieu sans entrave au trafic ferroviaire. Elle a nécessité six heures, quatre ouvriers et un camion-grue de 35 to. Les éléments ont été placés sur le platelage un à un, en partant d'une extrémité et en allant vers l'autre, à l'aide de sangles attachées aux quatre douilles de levage. Une fois posée, la passerelle ne reposait que sur les cales de la contre-flèche et sur les vérins.

Les éléments ont été collés entre eux à l'aide de la résine époxy appliquée manuellement sur les bords de deux éléments consécutifs juste avant leur jointoyage. De la silicone a été appliquée autour des gaines de précontrainte pour éviter que celles-ci ne se bouchent par de la résine.

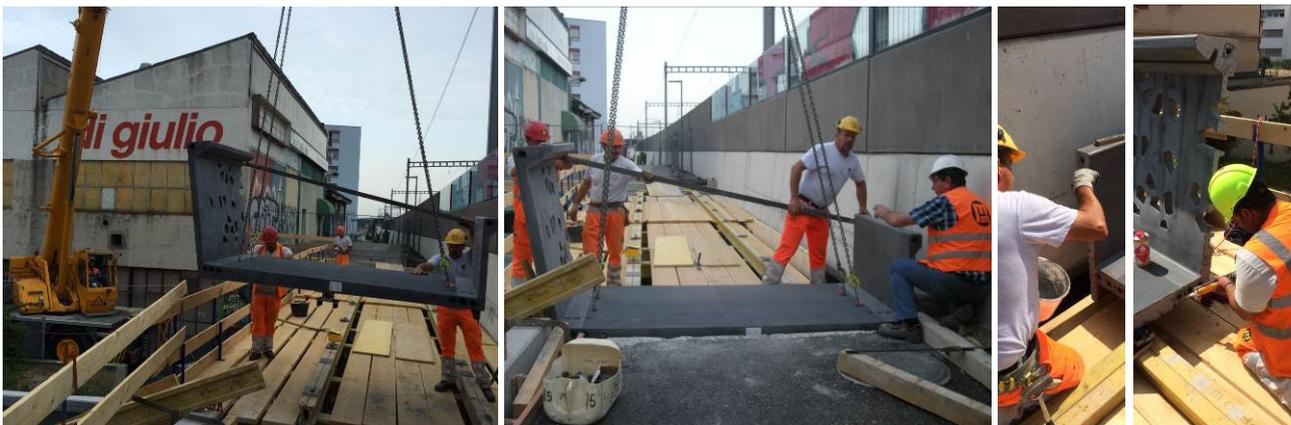


Fig. 9 Gauche et centre : Pose du 1^{er} élément, Centre : Application résine, Droite : Pose silicone

Des ajustements ont été nécessaires afin de garantir l'alignement des éléments entre eux et un serrage provisoire entre deux éléments consécutifs a été mis en place à l'aide d'équerres et de barres horizontales en utilisant les évidements des douilles de levage. Le serrage provisoire a été maintenu une semaine, jusqu'à la mise en précontrainte, laissant ainsi le temps à la résine de monter en résistance.



Fig. 10 Gauche et centre : Suite de la pose, Droite : Serrage provisoire des éléments entre eux

4.3.4. Mise en précontrainte et injection

Des gaines en matière synthétique ont été utilisées pour la précontrainte qui consistait en :

- Six monotorons T15S dans la dalle répartis moitié-moitié au droit de chaque parapet et mis en tension à 116 kN,
- Un monotoron T15S dans la membrure supérieure du parapet organique mis en tension à 285 kN,
- Un monotoron T15S dans la membrure supérieure du parapet plein mis en tension à 285 kN.

Une mise en tension par étapes avait été préalablement définie de sorte à augmenter de manière la plus uniforme possible la contrainte de compression dans le sens longitudinal de la structure.

Une journée a été nécessaire pour toutes les opérations de précontrainte.

4.3.5. Décintringe et pose de la passerelle sur ses appuis

Le décintringe a eu lieu trois jours après l'injection des gaines de précontrainte, temps nécessaire à la prise du coulis d'injection. La passerelle a été posée sur ses appuis définitifs à l'aide de vérins.

4.4. Finitions et traitements de surface

Pour boucher les réservations des douilles de levage, des événements de précontrainte ainsi que les réservations aux ancrages, des bouchons en BFUP ont été préfabriqués sur mesure puis collés à l'aide de résine époxy.

Les quelques fibres qui dépassaient de la structure ont été poncées une à une in situ.

Finalement, une peinture anti-graffiti a été appliquée sur l'ensemble des surfaces en BFUP.



Fig. 11 Gauche : Mise en précontrainte, Centre : Vérins, Droite : Application de l'anti-graffiti

5. Tests sur prototype et essais de charge in situ

5.1. Tests sur prototype

Un prototype en auge de grandeur réelle identique à un élément de travée de la passerelle a été construit pour être testé à l'EPFL par le Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS). Les essais réalisés ont été :

- Un essai de flexion transversale de la dalle en appliquant deux forces ponctuelles via deux vérins verticaux au centre de la dalle dans la partie entre deux nervures transversales : la déformation de la dalle était mesurée par des capteurs de déplacement fixés sous la dalle. Une force maximale de 138 kN a été mesurée pour une flèche verticale de 90 mm. Cette force est plus de 50 % plus élevée que la résistance préalablement calculée. L'élément a donc démontré être très résistant à la flexion transversale. La ruine s'est développée – comme attendu – par la formation d'une ligne de rupture au centre de la dalle. A ce stade, les nervures sous la dalle présentaient une microfissuration répartie avec plusieurs macrofissures localisées. Dans le domaine après pic, deux légères descentes de résistance ont été observées dans le graphique force-flèche ci-dessous, dues à la rupture de deux barres d'armature des nervures [9].

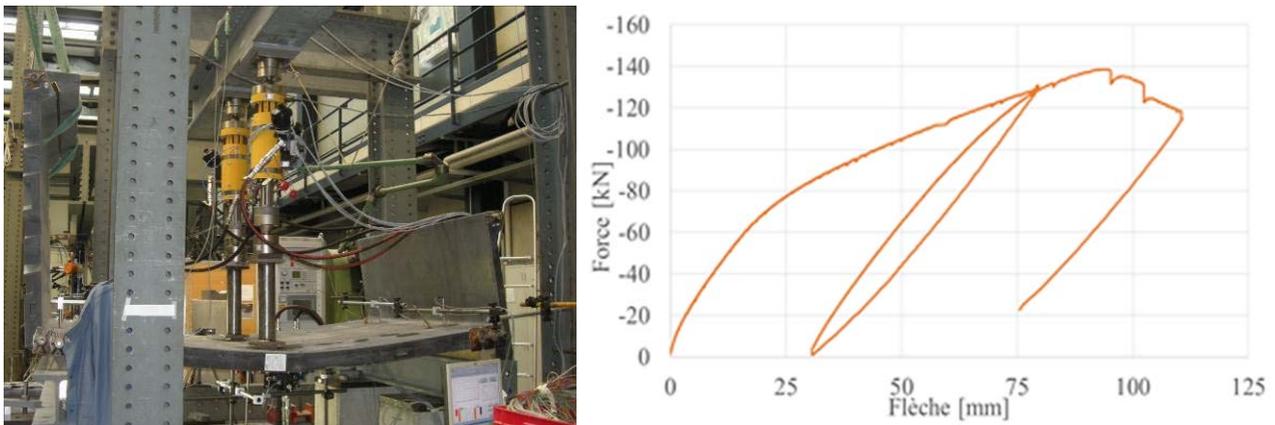


Fig. 12 Gauche : Essai de flexion de la dalle, Droite : Courbe force-flèche [9]

- Un essai de flexion horizontale du garde-corps à âme organique, en appliquant une force ponctuelle contre la membrure supérieure via un vérin horizontal pour simuler la poussée des piétons contre le garde-corps de la passerelle. Des capteurs de déplacement ont été fixés sur le garde-corps. La force maximale mesurée a été de 33 kN pour un déplacement de 85 mm. La résistance de ce parapet est bien au-delà des exigences spécifiées par la norme SIA 261 [4]. Le BFUP proche de la surface a éclaté à cause des fortes contraintes localisées de compression présentes dans les nervures. A ce stade, les barres d'armature n'étant plus enrobées, elles se sont simplement pliées sous le déplacement imposé. Seule la rupture d'une barre a eu lieu [9].

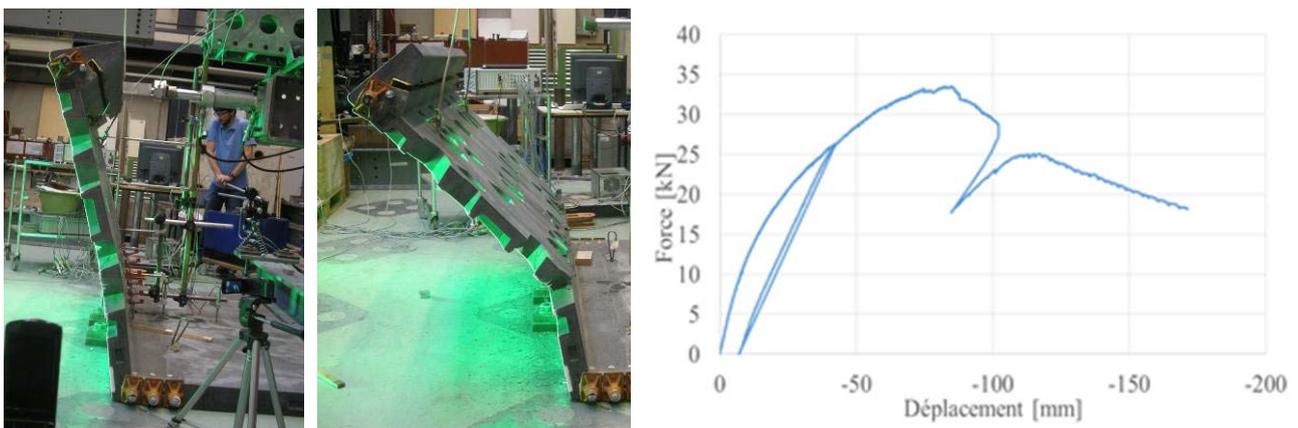


Fig. 13 Gauche et centre : Essai de flexion du parapet, Droite : Courbe force-déplacement [9]

Les deux essais ont donc été concluants et ont largement dépassé les performances attendues.

5.2. Essais de charge in situ

Avant que la passerelle ne soit ouverte au public, des capteurs de déplacement et un accéléromètre ont été installés sous la passerelle. Les capteurs ont été fixés sous chacun des deux parapets afin de pouvoir mesurer la déformation de chacun séparément.

Dans un premier temps, les vibrations ambiantes de la passerelle ont été enregistrées par un séismographe. Le premier mode propre de la structure enregistré, correspondant à la vibration verticale du garde-corps plein, est de 6.6 Hz. Le deuxième mode propre, relatif à la vibration verticale du garde-corps à âme organique, est de 10.4 Hz [9]. Ces fréquences étant relativement élevées par rapport aux fréquences de marche des piétons, de 1.6 à 4.5 Hz pour des vibrations verticales, le risque de mise en résonance de la structure a pu être écarté, et un bon niveau de confort pour les usagers est garanti.

Dans un deuxième temps, des essais de charge statique et dynamique ont été réalisés sur l'ouvrage avec un engin de nettoyage de 5 to. Plusieurs passages du véhicule d'entretien sur la passerelle ont été réalisés à des vitesses différentes. Pour l'essai dynamique, des plaques de différentes épaisseurs ont été posées sur la passerelle à mi-travée afin de produire un choc dû au passage du véhicule. Le graphique ci-dessous montre la mesure de la flèche pour cinq passages du véhicule à des vitesses

différentes variant de 5 à 14 km/h. Ces essais ont confirmé que les déformations et les fréquences propres de l'ouvrage restent dans les limites fixées par la norme (SIA 260, Annexe C [5]). [9]

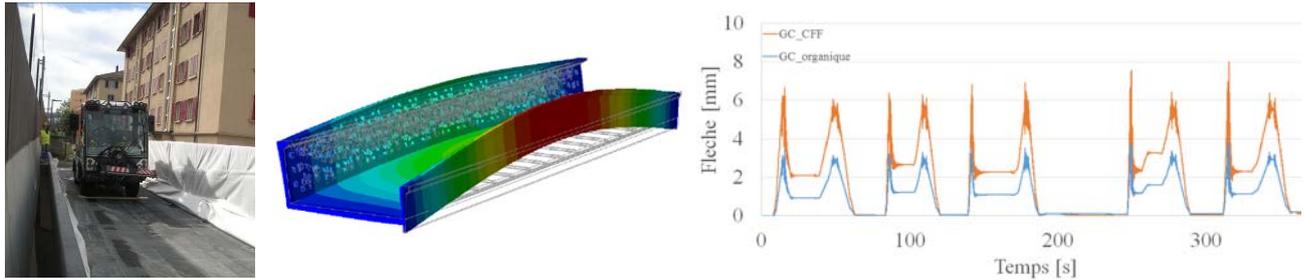


Fig. 14 Gauche à droite : Engin d'entretien, Déformée du 1^{er} mode propre, Courbe flèche-temps [9]

6. Coûts

Le projet a été financé par le fonds de développement durable. Les coûts de construction de la passerelle sont d'environ 298'500 CHF HT, répartis comme suit :

- Fabrication du moule : 76'000 CHF
- Coût du matériau : 19'500 CHF
- Préfabrication des neuf éléments de passerelle en BFUP armé : 145'000 CHF
- Précontrainte : 26'000 CHF
- Transport : 3'500 CHF
- Montage de la passerelle in situ : 28'500 CHF

Le montant total des travaux a été de 790'000 CHF HT. Les coûts de la passerelle correspondent au 38 % du montant total des travaux, celui du matériau BFUP au 2.5 %.

7. Conclusions

En guise de conclusion, nous souhaiterions relever quelques éléments qui ont été essentiels pour le bon aboutissement de ce projet qui permettait d'explorer les possibilités de la conception et construction de nouvelles structures en BFUP armé :

- La motivation, créativité et implication des différents intervenants et ce dès le début du projet (notamment ingénieurs, architectes, pré-fabricants, spécialistes précontrainte, spécialistes éclairage, etc.). Une bonne collaboration étant indispensable à un travail d'équipe efficace.
- L'existence du Cahier Technique SIA 2052.
- L'importance de réaliser des essais en amont et avant la mise en service : coulage du matériau pour contrôler l'ouvrabilité et la faisabilité, tests de teinte sur échantillons, tests d'arrachement pour la résine, essais de résistance sur prototype et essais de charge in situ.
- L'attention particulière portée aux détails techniques, étudiés et soignés dès la conception.
- Une optimisation de la quantité de matière de sorte à permettre une économie du projet.
- Une grande précision particulièrement dans la fabrication du moule, le coulage et dans l'assemblage des éléments entre eux, notamment dû à la contre-flèche.

Concernant le matériau BFUP lui-même, il est important d'exiger un BFUP écrouissant normé tel que celui de sorte UA du Cahier Technique SIA 2052. En effet, ceci donne la garantie d'obtenir les propriétés exigées. Il est également essentiel que le BFUP frais ait la bonne ouvrabilité, surtout lorsque les sections sont minces et les BFUP teintés et aussi pour les formes de coffrage spéciales. Des essais de convenance se sont avérés utiles.

Il importe de souligner que le BFUP n'est ni du béton ni du métal mais bien un nouveau type de matériau composite [10], avec à présent un Cahier Technique SIA 2052 qui lui est propre.

Le BFUP offre une approche nouvelle des nouvelles structures et la manière de concevoir, dimensionner, fabriquer et mettre en place doit être adaptée aux possibilités du BFUP, tant au niveau de sa résistance, que de la forme de la structure et du mode de construction.

Le BFUP ouvre réellement les portes pour un avenir prometteur notamment au niveau des nouveaux designs possibles qui seraient irréalisables avec d'autres matériaux.

8. Remerciements

Les auteurs remercient tous les intervenants du projet pour y avoir mis de leurs compétences pour trouver des solutions aux particularités tout au long de ce projet.

Les auteurs remercient tout d'abord le Maître de l'ouvrage, à savoir la Ville de Lausanne, particulièrement M. O. Français pour son appui tout au long du projet et M. P.-A. Matthey pour leur avoir confié ce mandat, ainsi que les personnes en charge du projet : M. S. Monthoux et Mme A. Bucher du service de Route et Mobilité, M. P.-A. Bochatay, M. M.-O. Paux du service d'Architecture et M. C. Cavin et l'équipe du service d'Electricité. Ils remercient aussi le fonds de développement durable qui a financé le projet.

Un merci également à l'entreprise Marti SA Lausanne, spécialement M. M. Chabaud et son équipe qui ont été en charge de la réalisation, ainsi que tous les sous-traitants, particulièrement M. D. Moullet et l'équipe de chez MFP Préfabrication qui ont préfabriqué les éléments de passerelle en BFUP, ainsi que M. T. Woynarovich et l'équipe de chez Freyssinet qui ont fourni la précontrainte, les appuis et les joints.

Le Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) de l'EPFL est remercié pour son rôle de soutien technique pour le dimensionnement en BFUP ainsi que les tests sur prototype en laboratoire et les essais de charge in situ. Sont en particulier remerciés le Dr. H. Sadouki et M. C. Loraux.

Un remerciement tout particulier à M. N. Giraudon du bureau Emch+Berger SA Lausanne pour avoir établi les plans du projet.

9. Références

- [1] "Cahier Technique SIA 2052 : Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution", Projet de mise en consultation, 1^{er} avril 2014.
- [2] DENARIE, E., KAZEMI-KAMYAB, H., BRUHWILER, E., HADDAD, B. et NENDAZ, S., "Béton fibré ultra performant pour la maintenance, un nouvel élan", *Tracés*, No. 12, 2011, pp. 20-23.
- [3] Batimag No 10 (23 octobre 2014), "Les Bétons Fibrés Ultra-Performants, matériau du futur", interview avec E. Brühwiler.
- [4] Norme Suisse SIA 261, "Actions sur les structures porteuses", 2003.
- [5] Norme Suisse SIA 260, "Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses", 2013.
- [6] Norme Suisse SIA 262, "Construction en béton", 2013.
- [7] Norme Suisse SIA 263, "Construction en acier", 2013.
- [8] DENARIE, E., "Formulation et propriétés des BFUP – du matériau aux structures", Compte rendu de la Journée d'étude « *Béton Fibré Ultra-Performant concevoir, dimensionner, construire* », 27.10.2011.
- [9] LORAUX, C. et BRUHWILER, E., "Passerelle du Martinet – Rapport d'essais de convenance", *Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) de l'EPFL*, 30.06.2015 (Rapport interne).
- [10] BRÜHWILER, E., "Construire en BFUP", *Tracés*, No. 12, 2014, pp. 10-14.

Viaducs de Chillon – Verstärkung mit UHFB

Hartmut MÜHLBERG

Bauingenieur

Monod – Piguet Ingénieurs Conseils SA

Lausanne, Schweiz

Dieser Artikel wurde verfasst unter Mitwirkung von Stéphane Cuennet, Eugen Brühwiler, Bernard Houriet, Frédéric Boudry und Blaise Fleury (siehe „Mit Leichtigkeit verbessern“, TEC21 47/2014 sowie „2‘400 m³ de BFUP sur un pont autoroutier“, Tracés 19/2014)

Zusammenfassung

Die Chillon-Viadukte, erbaut von 1966 bis 1969, erforderten Unterhalts- und Verstärkungsarbeiten. Das Massnahmenprojekt sah den Ersatz der Bordsteine, die Erdbebenertüchtigung sowie die Instandsetzung der Betonunterfläche vor. Nach Beginn der Bauarbeiten wurde der Beginn der Alkali-Aggregat-Reaktion festgestellt. Eine Expertenkommission riet dringend zu Verstärkungsmassnahmen. Es wurde entschieden, die Fahrbahnplatte mit 40 bis 50 mm bewehrtem UHFB zu verstärken. Erstmals wurde der UHFB auf einer Gesamtfläche von mehr als 50‘000 m² industriell eingebaut.

Keywords: Ultrahochleistungs-Faserbeton (UHFB), Autobahnbrücke, Verstärkung



Abb. 1 Gesamtansicht der Baustelle

1. Einleitung



Die Fahrbahnplatte des 1969 eröffneten Viadukts der Autobahn A9 sollte ursprünglich mit herkömmlichen Baustoffen instandgesetzt werden. Doch bei den 2012 ausgeführten Hochdruck wasserstrahlarbeiten an den Unterseiten der Kragarme wurden Anzeichen einer Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) im Beton entdeckt, sodass das Bundesamt für Strassen (Astra) sein Erhaltungskonzept revidieren musste.

Abb. 2 HDW-behandelte Unterseite der Kragarme

Der Schadensmechanismus der AAR befindet sich noch im Anfangsstadium und war im Vorfeld visuell nicht erkennbar. Die fortschreitende AAR wird jedoch über die Jahre zu einer Abnahme der Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls des Betons führen. Die Prüfergebnisse der Chillon-Viadukte ergaben, dass der vorliegende Beton eine gegenüber anderen Bauwerken hohe Reaktivität aufweist. Die für den Beton verwendete Gesteinskörnung aus der Rhône-Mündung am Genfersee zeichnet sich durch lange Inkubations- und Latenzzeiten aus, die mehrere Jahrzehnte umfassen und derzeit zu Ende gehen. Laboruntersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Latenzzeit der AAR erreicht ist und somit die Gefahr einer beschleunigten Schadensentwicklung besteht. In der nun folgenden Entwicklungsphase ist mit einer raschen Festigkeitsverminderung zu rechnen, zuerst mit einem Verlust der Zugfestigkeit, gefolgt von einem Verlust von Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit. Die Versuchsergebnisse platzieren den Beton der Chillon-Viadukte unter den reaktivsten der in der Schweiz bekannten Betone.

Der Beton der Fahrbahnplatte entspricht heute einer Druckfestigkeitsklasse C60/75. Die Tragsicherheit der am stärksten querkraftbeanspruchten Bereiche der Fahrbahnplatten ist somit gerade noch erfüllt. Es ist aber zu erwarten, dass die Betondruckfestigkeit infolge der AAR in 30 Jahren nur noch der Klasse C40/50 entsprechen wird und somit die Tragsicherheit nicht mehr gewährleistet sein würde. Weitergehende Untersuchungen bestätigten, dass die AAR, trotz der optischen scheinbar gesunden Struktur des Betons, sich in der Übergangsphase befindet mit dem Risiko des beschleunigten Abfalls der Festigkeitswerte.

Von diesem Zeitpunkt an wurde dem Projektverfasser sowie dem Bauherrn klar, dass das ursprüngliche Massnahmenprojekt nicht mehr situationsgerecht war und nach Alternativlösungen zu suchen war.

2. Die UHFB-Lösung setzt sich durch

Aufgrund dieser Erkenntnisse standen drei Erhaltungsmassnahmen zur Diskussion: Als Erstes sollte die Tragfähigkeit der Fahrbahnplatte in Querrichtung durch eine herkömmliche Stahlbetonverstärkung erhöht werden. Das Eigengewicht hätte aber derart zugenommen, dass die Tragfähigkeit des Bauwerks in Längsrichtung deutlich überschritten worden wäre sowie zusätzliche unwirtschaftliche Verstärkungsmassnahmen ausgelöst worden wären. Zudem waren die neuen Bordsteine bereits betoniert und die so verstärkte Fahrbahnplatte hätte die Bordsteine überragt. Die zweite Variante sah das Aufkleben von Kohlenstofffaserlamellen auf der Ober- und Unterseite der Fahrbahnplatte vor. Auch diese Lösung war unbefriedigend, denn die Lamellen hätten zwar das Biegeverhalten der Platten etwas verbessert, aber nicht den Querkraftwiderstand.

Mit der dritten Variante konnte man die Schwächen der ersten beiden vermeiden: Eine 40 mm dicke Schicht aus schlaff bewehrtem Ultrahochleistungs-Faserbeton (UHFB) bildet mit der bestehenden Fahrbahnplatte aus Beton einen monolithischen Verbundquerschnitt, der die Tragfähigkeit hinsichtlich Biegung, Querkraft und Ermüdung deutlich erhöht. Bei einer Dichte, die in etwa der von Beton entspricht, bietet dieses neue Material deutlich höhere Festigkeit und E-Modul. An der ETH Lausanne seit etwa 15 Jahren durchgeführte Versuche und Forschungsarbeiten belegen das

Verbesserungspotential einer mit UHFB verstärkten Betonplatte. Der so erhaltene Verbundquerschnitt überzeugt durch verbesserte mechanische Eigenschaften im Hinblick auf Zug-, Druck- und Ermüdungsfestigkeit.

Diese Schicht wirkt zugleich als Abdichtung gegenüber einem weiteren Wassereintritt in den Beton, womit sich die Schadentwicklung durch AAR begrenzen lässt. Auch die vergleichsweise geringen Kosten, die kürzere Bauzeit und die vorhandene, noch intakte Oberfläche der Fahrbahnplatte sprachen für diese Lösung

3. Vorversuche

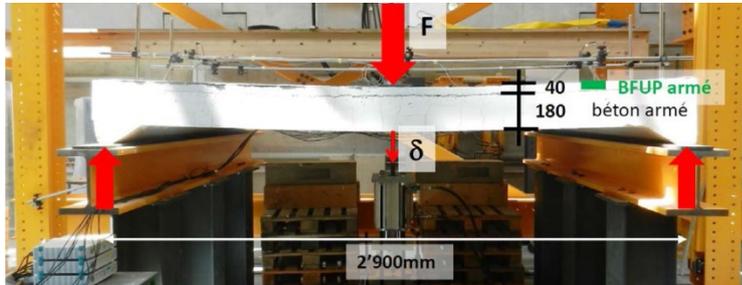


Abb. 3 Plattenversuch, Feldmoment

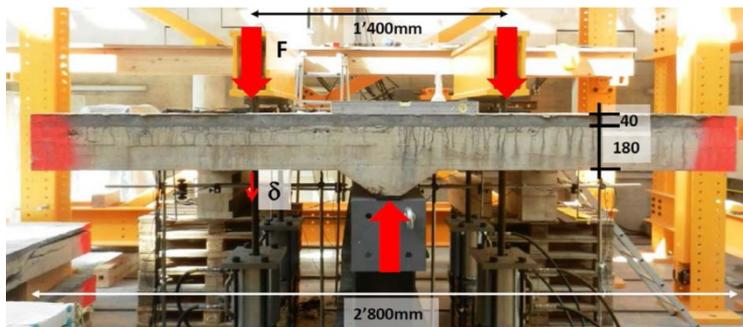


Abb. 4 Plattenversuch, Stützmoment

Anhand von Bruchversuchen an Prüfkörpern im Labor konnte der Tragwiderstand des Verbundquerschnitts nachgewiesen werden. Die Versuche wurden unter der Leitung von Professor Daia Zwicky an der HTA Freiburg durchgeführt. Diese Erkenntnisse wurden mithilfe einer Finite-Element-Analyse überprüft. Das Tragverhalten in Längsrichtung wurde anhand von Fachwerkmodellen untersucht.

Der bestehende Beton wurde rechnerisch mit einer reduzierten Festigkeitsklasse C40/50 und der UHFB mit einer Zugfestigkeit von mehr als 7 N/mm^2 und einer Verfestigungsdehnung von über 2 % berücksichtigt.

4. Bemessung der UHFB-Verstärkung

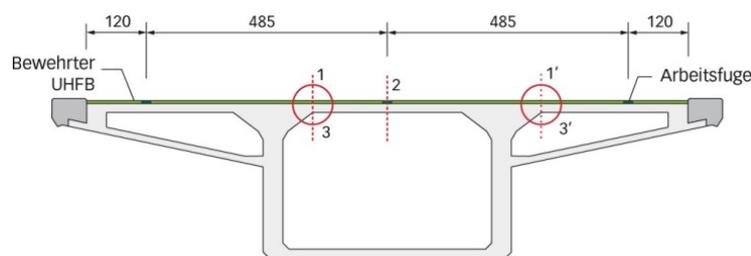


Abb. 5 Verstärkung mit einer Schicht UHFB

Die UHFB-Schicht erhöht die Fahrbahnplattenstärke von 180 auf 220 bzw. 230 mm. Dank dieser Schicht konnte aber zugleich eine reduzierte Belagsdicke von 85 mm anstatt der bestehenden 100 mm realisiert werden, womit sich die Erhöhung der ständigen Lasten in Grenzen hielt. Die Längsfugen zwischen den vier Einbautappen wurden gezielt dort positioniert, wo der UHFB auf Biegedruck beansprucht wird.

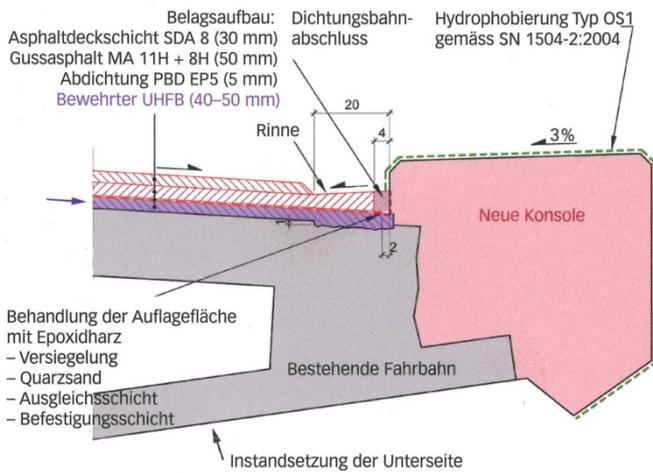


Abb. 6 Detailschnitt im Konsolenbereich UHFB

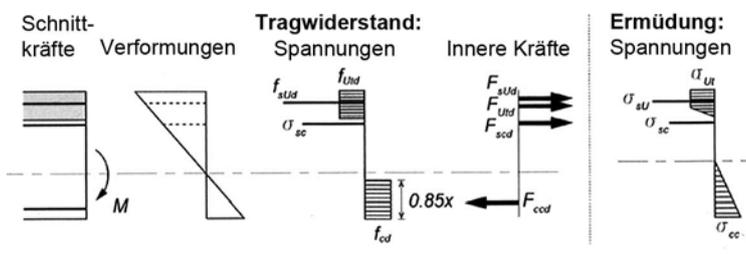


Abb. 7 Einfache Biegung, UHFB in der Zugzone

Die Verstärkung mit einer Schicht bewehrtem UHFB erhöht den Biege-widerstand um 73 % (Biegezug im UHFB, Abb. 5, Schnitte 1 und 1') beziehungsweise 33 % (Biegedruck im UHFB, Schnitt 2).

Der Querkraftwiderstand (Abb. 5, Schnitte 3 und 3') der verstärkten Fahrbahn im Endzustand (C40/50 + UHFB) ist 20 % höher als ohne Verstärkung im heutigen Zustand (C60/70).

Für die Bemessung der zu ver-stärkenden Fahrbahnplatte wurde, wie in SIA269, § 0.1.5 gefordert, das für Neubauten vorgesehene Last-modell 1 nach SIA 261 zugrunde gelegt.

Wie bereits erwähnt, berücksichtigen die in Rechnung gestellten Material-eigenschaften einen Festigkeitsabfall infolge der AAR. Laut Bericht der Expertenkommission „AAR“ entspricht die in 30 Jahren zu erwartende Betonfestigkeit einem C40/50. Für den UHFB wurde die Qualität UA laut SIA Merkblatt 2052 gefordert, mit einer Zugfestigkeit von mehr als 7 N/mm² und einer Verformung an der Dehngrenze von mehr als 1.5 ‰.



Abb. 8 Einfache Biegung, UHFB in der Zugzone

Die seitlichen Kragarme des Brücken-oberbaus sind als Kästen ausgebildet. Bedingt durch die geringe innere freie Höhe von 30 bis 60 cm sind diese Hohlkästen nicht für Unterhalts- und Verstärkungsarbeiten zugänglich. Einige in den unteren Platten (12 cm dick) angebrachte Kontrollöffnungen machten ersichtlich, dass die untere Bewehrung der Fahrbahnplatte, bedingt durch Eindringen von Chlorid-belastetem Wasser teils erheblich korrodiert ist.



Die UHFB-Schicht wurde in Querrichtung schlaff bewehrt ($\varnothing 12$ mm alle 100 mm), um die Fahrbahnplatte in dieser Richtung tragfähiger auszubilden. Im Bereich der Pfeiler erwies sich der Biegetragwiderstand in Längsrichtung als knapp ungenügend. Eine erhöhte UHFB-Schichtstärke von 50 mm über 25 % der Feldlänge sowie zusätzliche Längsbewehrung genügte aber, um auch diesen Nachweis zu erfüllen.

Abb. 9 Einfache Biegung, UHFB in der Zugzone

Durch die gleichzeitige Verstärkung der unteren Druckplatten im Stützbereich wurde nicht nur der Biege- und Querkraftwiderstand, sondern auch die Duktilität in Längsrichtung deutlich verbessert.

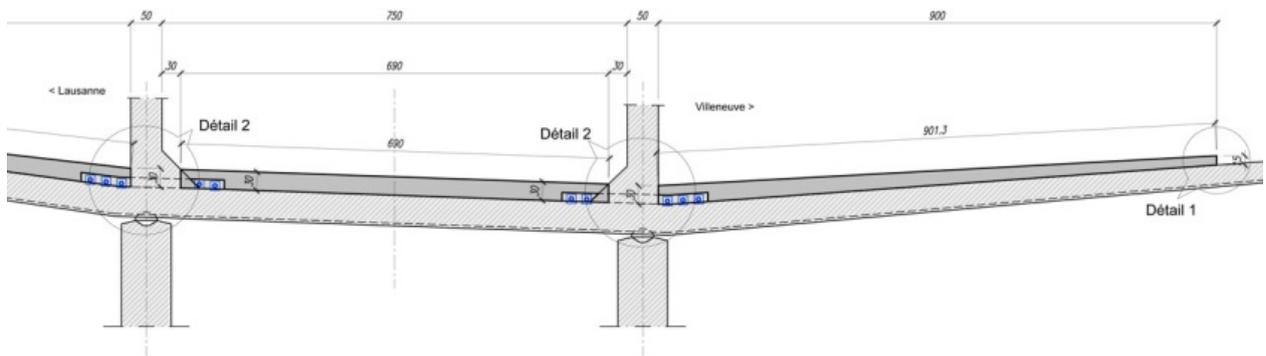


Abb. 10 Verstärkung der Druckplatte des Kastenquerschnitts im Stützbereich

Das Aufbringen einer dünnen UHFB-Schicht über die gesamte Fahrbahnplattenbreite bewirkt:

- Eine deutliche Erhöhung des Biege-, Querkraft- und Ermüdungswiderstands in Querrichtung
- Eine Erhöhung des Biege- und Querkraftwiderstands und der Duktilität in Brückenlängsrichtung
- Eine Verlangsamung der Verformungsentwicklung
- Eine (zusätzliche) Abdichtung der Oberfläche

5. Flüssig oder fest? - thixotrop



Abb. 11 Thixotroper UHFB im Fertiger

Wenn auch die Entscheidung für eine Verstärkung mit UHFB relativ eindeutig gefällt wurde, stellte sie das ausführende Bauunternehmen vor Herausforderungen bisher unbekanntes Ausmasses. In den letzten zehn Jahren sind in der Schweiz über 25 Projekte mit UHFB-Verstärkungen von Brückenplatten und Gebäudedecken umgesetzt worden. Bisher wurden jedoch relativ kleine Volumina von maximal 110 m³ realisiert, die auf Brücken und in Gebäuden manuell eingebracht wurden. Hier dagegen sind pro Viadukt auf einer Fläche von bis zu 25'400 m² rund 1'200 m³ UHFB zu giessen!



Abb. 12 Thixotroper UHFB

Auf dem ersten (talseitigen) Viadukt erfolgte dieser Einbau zwischen dem 25. Juli und dem 3. September 2014, auf dem zweiten (bergseitigen), zwischen dem 1. Juni und dem 1. Juli 2015. Diese kurze Zeitspanne wurde durch den maschinellen Einbau des UHFB ermöglicht. Der Lieferant des UHFB entwickelte dafür drei unterschiedlich thixotrope UHFB-Rezepturen, die auf die spezifischen Bedingungen wie Temperatur, Längs- und Quergefälle abgestimmt waren: Der Frisch-UHFB konnte sowohl einwandfrei eingebaut werden als auch Oberflächengefällen bis zu 7% standhalten.

6. Eigenentwickelte Einbaumaschinen



Abb. 13 UHFB-Mischzentrale

Der UHFB musste in weniger als sechs Wochen eingebaut werden, was einer durchschnittlichen Leistung von 40 m³ pro Tag entspricht. Bei Spitzenleistungen konnten bis zu 80 m³ pro Tag eingebaut werden. Aus logistischen Gründen installierte das Unternehmen eine UHFB-Mischanlage direkt vor dem Viadukt. Somit konnten die Verarbeitbarkeit, die Produktionsleistung sowie der Transport des UHFB auf die Witterungsverhältnisse abgestimmt werden.



Abb. 14 UHFB-Fertiger im Einsatz

Der Unternehmer entwickelte in einer Rekordzeit (5 Monate von Bestellung bis Inbetriebnahme) die Einbaumaschine ausgehend vom Fahrgestell eines Fertigers, der für den Bau der Betonplatten am Flughafen Zürich im Einsatz war. Der Einbaubalken wird über eine Schneckenförderung mit Frisch-UHFB beschickt. Die Einbaubreite ist über Klappen regelbar von 1.20 bis 6.00 m. Der Mindestvorschub des Fertigers beträgt 0.60 m/min was, bei einer Einbaubreite von 4.80 m, eine Kapazität der Mischanlage von fast 10 m³/h erfordert.



Abb. 15 Abdeckung zur Nachbehandlung

Die Nachbehandlung dauerte fünf Tage und erfolgte unmittelbar nach dem Einbau des UHFB mit einer Kunststoffolie als Abdeckung.



Abb. 16 Geklebte Dichtungsbahnen

Obwohl UHFB wasserdicht ist, wurde die gesamte Oberfläche mit Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD) abgedeckt, damit die Haftung des Gussasphalts auf dem UHFB und eine sichere Abdichtung der UHFB-Arbeitsfugen garantiert werden konnten.

7. Folgerungen



Abb. 17 UHFB-Einbau am Widerlager Villeneuve

Der sorgfältigen Vorbereitung und dem Engagement aller am Projekt Beteiligten sowie der Bereitschaft des Bauherrn, neue Wege zu gehen, ist es zu verdanken, dass die Verstärkung der Fahrbahnplatte der Chillon-Viadukte mithilfe einer bewehrten UHFB-Schicht in der gesetzten kurzen Frist und ohne nennenswerte Schwierigkeiten erfolgreich ausgeführt werden konnte.

Diese in diesem Umfang erstmalige Anwendung bestätigt, dass sich UHFB für die Verstärkung und Verbesserung von Tragwerken aus Stahlbeton eignet. Die Kosten der UHFB-Arbeiten beliefen sich auf ca. 230 Fr./m² Fahrbahnoberfläche, was angesichts der vielfältigen Anforderungen wirtschaftlich ist. Durch die vergleichsweise sanfte Intervention mit UHFB bleiben auch die kulturellen Werte der als Denkmalobjekt inventarisierten Chillon-Viadukte erhalten.

Instandsetzung und Verstärkung Brücke T13 Jupiterstrasse, Bern

Silvan FELLER

Bauingenieur MSc EPFL
Hartenbach & Wenger AG
CH – 3006 Bern

Maurice HARTENBACH

dipl. Bauing. ETH/SIA
Hartenbach & Wenger AG
CH – 3006 Bern

Zusammenfassung

Im Rahmen der geplanten Pannenstreifen-Umnutzung auf der Autobahn A6 zwischen Bern-Wankdorf und Muri wurde die Überführung T13 Jupiterstrasse, die von Strassen-, Tramverkehr sowie Fussgängern benutzt wird, ertüchtigt. Die dreifeldrige Plattenbrücke mit einer Gesamtlänge von 62 m, Gesamtbreite von 18.5 m und mit eingehängten Gerberträgern über der Hauptspannweite wies Schwachstellen bezüglich der Tragsicherheit auf. Deshalb wurde die Brücke zu einem monolithischen Rahmentragwerk umgebaut, indem die beiden Gerbergelenke aufgehoben und biegesteife Rahmenwände anstelle der Stützenreihen erstellt wurden. Durch bewehrten UHFB konnten die negativen Biegemomente im Bereich der Rahmenwand aufgenommen und die Brückenoberfläche abgedichtet werden. Für die Abdichtung wurde ein UHFB mit Gefälleignung verwendet. Die Einbaustärken betragen zwischen 30 mm in der Druckzone und bis zu 80 mm in der stark bewehrten Zugzone. Im Bereich des Gerbergelenks wurde zur Verankerung der unteren Bewehrung eine UHFB-Plombe mit fliessfähigem UHFB erstellt. Auf die Verstärkungs- und Abdichtungsschicht des UHFB wurde ein Walzasphalt eingebracht. Die Bauarbeiten dauerten von Dezember 2013 bis September 2014 und konnten termingerecht abgeschlossen werden.

Keywords: UHFB, Instandsetzung, Verstärkung, Abdichtung, Brücke, Autobahn, Verkehr

1. Einleitung

Die Brücke T13 Überführung Jupiterstrasse Egghölzli wurde in den Jahren 1971 bis 1972 im Rahmen des Baus der Nationalstrasse N06 zwischen dem Wankdorf und Muri erstellt. Die Brücke erschliesst als einzige Zufahrt für motorisierten Individualverkehr sowie Tramverkehr die Siedlung Wittigkofen in Bern, mit rund 1'250 Wohnungen für insgesamt ca. 3'000 Einwohner. Als einzige mögliche Zufahrt zum Quartier und mit ihrer Funktion als Überquerung des stark befahrenen Autobahnabschnitts Ostring – Muri kommt der Brücke eine besondere Bedeutung zu.

Die Überführung ist 62 m lang und 18.5 m breit. Die Hauptspannweite über der Autobahn beträgt 32 m und wurde mit mittig eingehängten Gerbergelenkträgern mit einer Spannweite von 27.6 m ausgeführt.

Im Rahmen des Projekts N06 PUN Bern Wankdorf – Muri (Pannenstreifenumnutzung zu Spitzenzeiten, um die Stauzeiten zu reduzieren und den Verkehr zu verflüssigen) wurde von der ASTRA Filiale Thun der Auftrag für eine umfassende Überprüfung aller Brücken hinsichtlich der Tragsicherheit, der Dauerhaftigkeit und der Gebrauchstauglichkeit im betroffenen Abschnitt erteilt. Das Projekt N06 PUN Wankdorf – Muri wurde von der Ingenieurgemeinschaft PUN Team B+S Plus der B+S AG in Bern erarbeitet. Die Hartenbach & Wenger AG war als Subplaner für die statische Nachrechnung der Brücke T13 zuständig.

Ziel war die Planung von Instandsetzungsmassnahmen an den betroffenen Bauwerken zur Sicherstellung des Nationalstrassenbetriebs während der geplanten Restnutzungsdauer, da nach der Aufhebung des Pannenstreifens noch weniger Spielraum für Instandsetzungsmassnahmen bestehen wird.

2. Bauwerk

Die Überführung ist als Dreifeldbrücke mit lichten Weiten von 18.00 m, 32.00 m und 11.00 m ausgebildet (Abb. 1). Das mittlere Feld wurde mit einem Gerbergelenkträger mit einer Spannweite von 27.60 m ausgeführt.

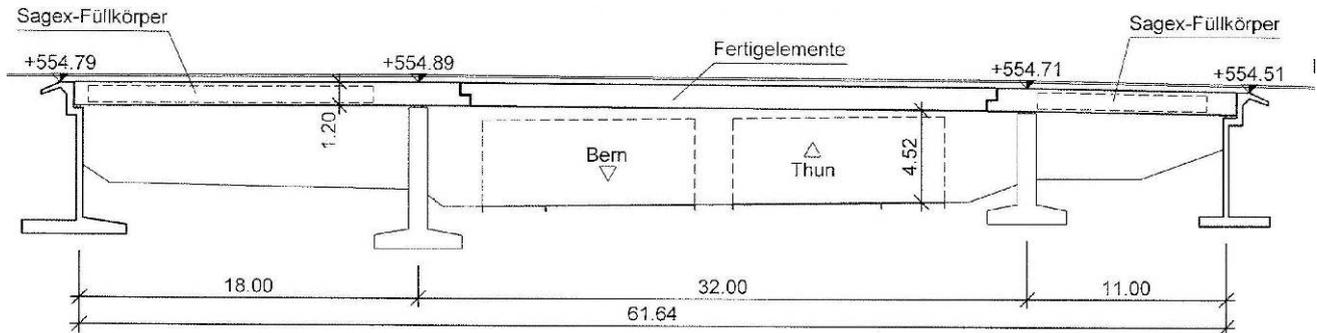


Abb. 1 Längsschnitt UEF Jupiterstrasse Egghölzli

Der Brückenquerschnitt im Bereich mit eingehängten Trägern besteht aus 11 Fertigteilträgern (vorgespannter U – Querschnitt, Spannbettverfahren). Die Querverteilung erfolgt durch zwei vorgespannte Querträger und die Ort beton verteilplatte. Die Höhe der Längsträger mit der aufbetonierten Platte beträgt 1.20 m (Schlankheit: $h/L = 1/16$). Die beiden Brückenendfelder sind als Ort betonplatte mit Sagex-Füllkörpern und einer gleichen Bauteilstärke wie das Mittelfeld erstellt worden. Die Randfelder wurden ohne Vorspannung ausgeführt. Die Brücke war vor der Verstärkung auf 2 x 3 Stützen und den Widerlagern gelagert. Die Auflagerung erfolgt auf den Stützen mit Topflägern, am Widerlager Bern mit 8 Blocklagern, am Widerlager Murifeld mit Linienkipp-Gleitlagern. Die Widerlager und Flügelmauern, sowie die Stützen wurden auf Flachgründungen fundiert.

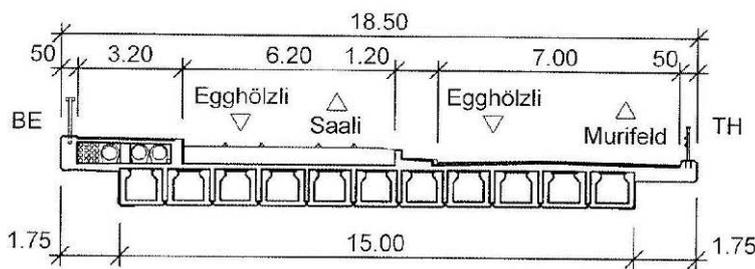


Abb. 2 Querschnitt im Bereich der Einhängerträger

2.1. Nutzung der Brücke

Die Nutzung der Brücke lässt sich in drei Bereiche einteilen (Abb. 2). Strassenbereich für MIV und Schwerverkehr bis 40 Tonnen. Trambereich für Trambzüge Bernmobil bis 66 Tonnen. Fussgängerbereich mit Werkleitungskanal.

2.2. Zustand der Brücke

Die Brücke wurde im Jahr 2004 im Rahmen der Übergabe vom Kanton Bern an den Bund lokal instand gesetzt, ohne dass dabei jedoch die Statik überprüft wurde. Bei den Einhängerträgern wurde im Rahmen dieser Instandsetzung Schubrisse entdeckt, welche mit CFK-Lamellen an den Aussenstegen der vorfabrizierten und vorgespannten Längsträger abgedeckt wurden.

Die Brückenlager bei den Widerlagern waren grösstenteils in einem schlechten Zustand. Sie waren entweder stark korrodiert oder wiesen eine ungenügende PTFE-Gleitschicht auf. Die Stützenlager waren in einem annehmbaren Zustand mit Ausnahme der Führungslager, bei denen aufgrund der schiefen Lagerung der Führungsdorn bereits kraftschlüssig anstand. Bei einem Temperaturwechsel war demnach mit Zwängungen zu rechnen.

Die Bordüren wiesen teilweise Bewehrungskorrosion und Risse mit Aussinterungen auf.

An der Plattenunterseite in den Randfeldern war die Bewehrungsüberdeckung zum Teil mangelhaft. Die Widerlagerwände wiesen aufgrund der Undichtigkeit früherer Fahrbahnübergänge Korrosionsstellen auf.



Insbesondere der Bereich des Gerbergelenks war vor der Instandsetzung 2004 undicht (Abb. 3).

Die Gerbergelenke wurden als Schwachstelle definiert, da sie nicht einsehbar waren. Es liess sich keinen Schluss über den Zustand und eventuell vorhandene Bewehrungskorrosion in der Auflagerbank ziehen.

Abb. 3 Bereich Gerbergelenk vor der Instandsetzung

2.3. Beurteilung der konstruktiven Ausbildung des Bauwerkes

Gerbergelenke wurden früher oft verwendet, da sie die statischen Berechnungen stark vereinfachten. Heute verwendet man das Prinzip des Gerbergelenks jedoch normalerweise nicht mehr, da sich mit den Möglichkeiten moderner Computerprogramme die Berechnung von statisch unbestimmten Systemen stark erleichtert hat. Des Weiteren weisen Gerbergelenke diverse negative Eigenschaften auf: Die Zugänglichkeit des „Inneren“ ist nicht möglich und bei undichter Abdichtung können allfällige Schäden schlecht entdeckt respektive saniert werden.

Beim Objekt T13 war die Abdichtung während Jahren schadhaft, bevor sie im Jahre 2004 saniert wurde. Dies führte höchstwahrscheinlich zu einem Chlorideintrag bei den Gerbergelenken. Die Schäden, die dadurch entstanden waren jedoch nicht quantifizierbar, da das „Innere“ eines Gerbergelenks unzugänglich ist. Dies bedeutete, dass auch bei einer genügenden statischen Nachrechnung Unsicherheiten bestehen bleiben würden.



Die nachträglich angebrachte CFK-Verstärkung (Abb. 4) erwies sich bei der statischen Überprüfung als nur bedingt wirksam, da dadurch nur der äusserste Steg verstärkt werden konnte. Ausserdem war das Hauptproblem nicht durch mangelnde Querkraftbewehrung sondern vor allem in einer mangelnden Verankerung der Längszugkraft bedingt.

Abb. 4 Nachträglich angebrachte CFK Verstärkung

3. Statische Überprüfung der bestehenden Brücke

Die Überprüfung der Tragsicherheit nach SIA 269 [1-3] ergab genügende Erfüllungsgrade für die Biegung und Querkraft in den Randfeldern. Für die Führungslager auf den Stützen und das Gerbergelenk der Einhängeträger konnte jedoch kein genügender Tragsicherheitsnachweis erbracht werden. Die Erdbebensicherheit zeigte ebenfalls in der Überprüfungsstufe II ungenügende Erfüllungsgrade bei den Stützenlagern sowie eine mögliche Absturzgefahr der eingehängten Träger im Falle eines Erdbebens.

3.1. Tragwerksmodell und Vorgehen bei der statischen Überprüfung

Die Bauherrschaft wünschte in einem ersten Schritt nur eine statische Überprüfung der kritischen Bereiche (Gerbergelenk). Es wurde in einer ersten Überprüfungsstufe ein einfaches Modell für die eingehängten Gerberträger erstellt: Einfacher Balken mit 28 m Spannweite und Handrechnung. Da dadurch kein genügender Tragsicherheitsnachweis erbracht werden konnte, wurden in der zweiten Überprüfungsstufe verschiedene 2D- Fachwerkmodelle zur Prüfung der Kraftaufhängung erstellt und von Hand durchgerechnet. Da auch dieses Vorgehen keine genügenden Resultate erbrachte, wurde für die eingehängten Träger ein 3D- Fachwerkmodell erstellt, um den Kräfteverlauf in der Bewehrung besser zu simulieren. Das 3D- Fachwerkmodell wurde mittels des Programms Statik 5 der Cubus AG erstellt (Abb. 5 + 6).

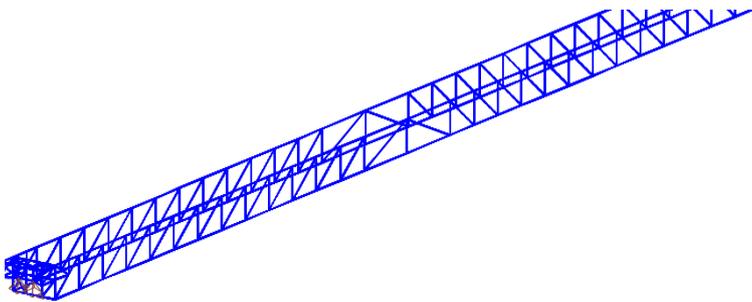


Abb. 5 3D Fachwerkmodell der vorfabrizierten Träger

Dieses Fachwerkmodell ergab jedoch keine entscheidenden Verbesserungen in den Tragwiderständen.

Aufgrund der schlechten Erfüllungsgrade der Tragsicherheit wurden in der dritten Überprüfungsstufe verschiedene statische Modelle erstellt, um die Berechnungen zu verfeinern und um die Querverteilung besser zu berücksichtigen.

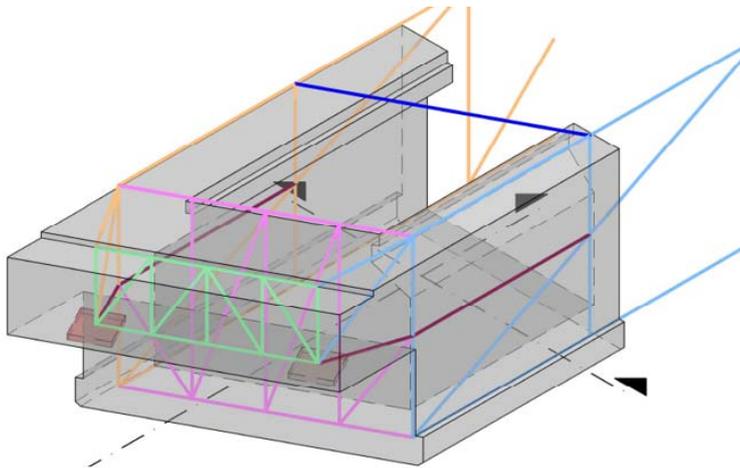


Abb. 6 Fachwerkmodell Detail Gerbergelenk

Dazu wurde mit dem Programm Fenas von Walder + Trüb ein 3D- Schalenmodell erstellt (Abb. 7 + 8). Dieses Programm erlaubt es, Schalen- und Stabelemente im gleichen Modell miteinander zu verbinden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Überbetonplatte zu schwach ist, um eine effektive quer verteilende Wirkung zu erzielen. Die beiden Querträger in Plattenmitte erfüllten ebenfalls nur eine beschränkte quer verteilende Wirkung.

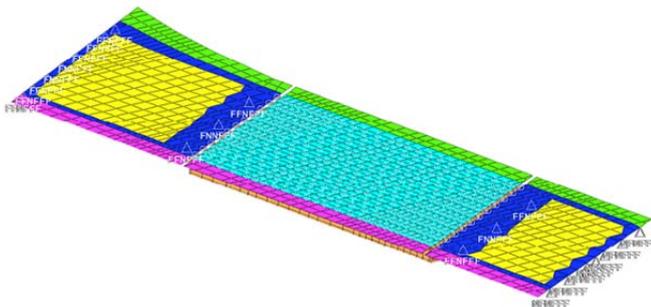


Abb. 7 Fenas Schalen-Modell mit Lagerung

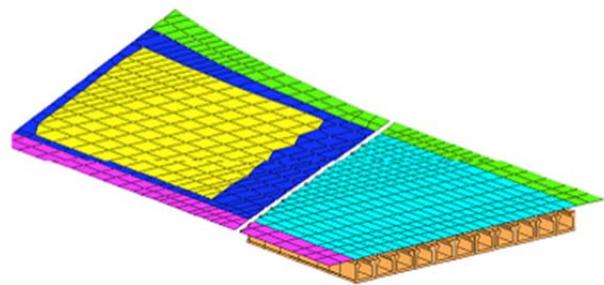


Abb. 8 Schnitt durch Fenas Schalen-Modell

3.2. Zusammenfassung der statischen und konstruktiven Mängel

- Gerbergelenk konstruktive zu kurze Bewehrungsverankerung der Längszugkräfte
- Mangel bei Schubtragfähigkeit in den Trägerstegen
- Keine Querverteilungswirkung der Ortbetonplatte

- Die schiefe Lagerung der Brücke ergibt ungünstige Drillmomente und eine Schubkraftkonzentration in den Randträgern (Verteilung der Lasten negativ)
- Lagerprobleme (Erdbeben, Zwängungen, Teflone, Korrosion)

Da bei der detaillierten mehrstufigen statischen Überprüfung kein genügender Tragsicherheitsnachweis gemäss den gültigen SIA Tragwerksnormen für die Querkrafteinwirkung im Gerbergelenk erbracht werden konnte, wurde die Bauherrschaft eng in die Planung der möglichen Verstärkungsmassnahmen einbezogen.

4. Ausarbeitung Verstärkungsprojekt

4.1. Variantenstudium

Für die Behebung der statischen und konstruktiven Mängel der Brücke wurden unterschiedliche Varianten vorgeschlagen. Die Verstärkungsvarianten umfassten eine reine Verstärkung des Gerbergelenkes bis zum Umbau in eine Rahmenbrücke oder den Ersatz der ganzen Brücke.

Als Bestvariante hat sich die Variante des Umbaus in eine Rahmenbrücke erwiesen. Diese hatte einen massiven Eingriff in das statische System zur Folge. Das Gerbergelenk wurde aufgehoben und monolithisch zusammenbetoniert, um zusätzlich eine Rahmenwirkung zu erzielen. Die Rahmenwirkung wurde mit dem Betonieren einer Betonscheibe zwischen den Stützen mit eingebohrten Zugstangen erreicht. Das statische System konnte so auf eine schwimmende Lagerung bei den Widerlagern angepasst werden. Die Rahmenwirkung bei schiefen Brücken ist eine effiziente Lösung, um die Drillungskräfte besser abzutragen. Mit der Rahmenwirkung wurde die Erbebensicherheit erfüllt und die ungünstigen Stützenlager konnten ebenfalls aufgehoben werden.

4.2. Sofortmassnahmen und Konzept Umbau in Rahmenbrücke

Da die Tragwiderstände auch unter aktualisierten Strassenverkehrs- respektive Tramlasten sehr tief waren $n_{min} = 0,52$, wurde als Sofortmassnahme SOMA, die eingehängten Träger mit einer Stahlkonstruktion auf dem Pannestreifen unterstellt (Abb. 9) Die Abstützung der vorfabrizierten Träger bildete für die Umbaumassnahme die erforderliche temporäre Lagerung.



Diese Unterstellung erlaubte es in einem zweiten Schritt, die vorfabrizierten Träger der Brücke anzuheben und das Gerbergelenk freizulegen. Insgesamt wurde die Brücke mit ca. 1'500 Tonnen aufgepresst, um die Eigenlasten abzufangen. Dadurch konnte das Gerbergelenk aufgehoben und biegesteif mit dem Rest der Brücke verbunden werden.

Abb. 9 SOMA Abstützung auf dem Pannestreifen

4.3. Zeitplan für die Instandsetzung

Der ursprüngliche Zeitplan des Projektes PUN sah vor, den Umbau des Autobahnabschnittes im Herbst 2014 zu beginnen. Deshalb war es von grosser Bedeutung, dass die provisorische Abstützung auf dem Pannestreifen vor dem Umstellungstermin für die Bauarbeiten demontiert werden konnte. Aufgrund dessen war das Programm der Planungs- und Ausschreibungsphase ziemlich gedrängt. Auch aufgrund von einer möglichen Zeitersparnis, durch den Verzicht auf eine nachträglich aufgebrachte Abdichtung bei Verwendung von UHFB, wurde beschlossen die statisch notwendigen Verstärkungsmassnahmen mit UHFB auszuführen.

4.4. Umbau in Rahmenbrücke Vorteil mit UHFB

Der Umbau in eine Rahmenbrücke mit Durchlaufträger anstatt Gerbergelenk erhöhte die Biegemomente über dem Stützstreifen respektive der Rahmenwand erheblich. Es war von Anfang an klar, dass bei einer solchen Variante der Beton im Gelenkbereich und über dem Auflager entfernt

und zusätzliche Zugbewehrung verlegt werden musste. Anstatt einen normalen Beton mit zusätzlicher Bewehrung zu verwenden, kamen wir zum Schluss, dass mit UHFB ein Mehrwert gewonnen werden könnte. Einerseits kann der UHFB Zugkräfte aufnehmen, was den Grad an erforderlicher Bewehrung reduziert und andererseits, weist der UHFB sehr gute Eigenschaften bezüglich Wasserdichtigkeit auf. Ein weiterer grosser Vorteil war die reduzierte Einbauhöhe die wir mit UHFB erreichen konnten. Im Tramtrog bestanden beispielsweise durch das vorgegebene Trasse, welches nicht angehoben werden durfte, starke Einschränkungen. Deshalb haben wir als Planungsbüro ein Verstärkungskonzept mit UHFB entwickelt und der Bauherrschaft präsentiert. Das ASTRA als Bauherrschaft hatte sich daraufhin bereit erklärt, den Baustoff im Rahmen eines Pilotversuches einzusetzen.

Das System mit UHFB konnte die Bauherrschaft unter anderem überzeugen, da durch die flächendeckende Anwendung von UHFB einerseits die zu ergänzende Biegebewehrung reduziert, und andererseits eine genügende Abdichtung gewährleistet wird. Auch die Reduktion der Einbauhöhen gegenüber einer Methode mit traditionellem Beton war überzeugend.

4.5. Bemessung Rahmenbrücke

Für die Neubemessung der Brücke mit aufgehobenem Gerbergelenk und Umwandlung in eine Rahmenbrücke wurde ein erweitertes Fenas Modell (Abb. 10) erstellt, in dem die neu zu erstellende Rahmenwand zusätzlich simuliert wurde. Für die Bemessung der negativen Biegemomente wurde der uns zur Verfügung stehende Entwurf des SIA Merkblatt 2052 zum UHFB Beton verwendet [4]. Bei der Bemessung auf die negativen Biegemomente zeigte sich, dass nicht die Tragsicherheit sondern die Gebrauchstauglichkeit massgebend wurde. Die negativen Biegemomente in der Rahmenecke konnten für die Bemessungssituation Tragsicherheit ins Mittelfeld umgelagert werden, da dort aufgrund des abgeänderten statischen Systems grosse Reserven verblieben. Für den Gebrauchszustand sollte aber keine Umlagerung (Rissbildung) stattfinden. Deshalb musste der UHFB in der Zugzone ziemlich stark bewehrt werden, um die Dehnungen im Gebrauchszustand unter 1.0 ‰ zu halten. Die Kontrolle der Dehnungen erfolgte mit dem Programm Fagus der Firma Cubus AG.

Beim Bemessungskonzept sowie für die Überzeugungsarbeit bei den Behörden konnten wir Professor Eugen Brühwiler als ausgewiesenen Experten engagieren.

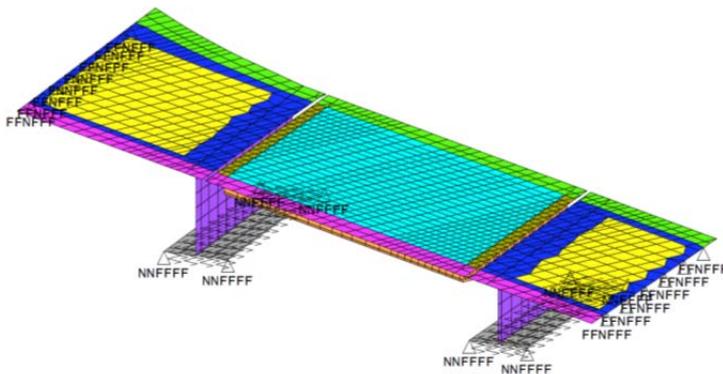


Abb. 10 Modell Endzustand mit Rahmenwänden

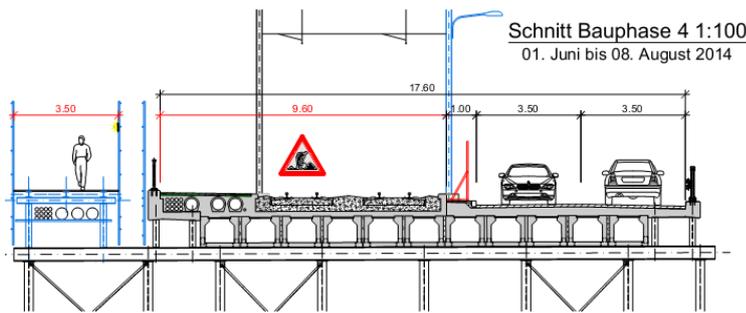
5. Baubeschrieb

5.1. Etappiertes Vorgehen

Die Arbeiten ausserhalb des Autobahnbereichs unterhalb der Brücke konnten unabhängig von den restlichen Arbeiten ausgeführt werden. Als erstes wurden die Stützenfundamente verbreitert und die neuen Rahmenwände vorbereitet.

Da die Brücke unter Verkehr umgebaut werden musste, wurde ein etappiertes Vorgehen gewählt. Der Strassenbereich wurde unter zwei Etappen instandgesetzt, wobei der Verkehr mittels Ampelsteuerung einspurig geführt wurde. Da die Fahrleitung in Phase 2 in Betrieb bleiben musste und in dieser Phase bereits bis zum Bereich des Fahrleitungsmastes gearbeitet wurde, musste eine zusätzliche Abspannung der Aufhängungen konzipiert werden, um die Fahrleitung vorübergehend

zu sichern. In der dritten Etappe wurde der ganze Trambereich umgebaut und der Tramverkehr vorgängig auf Busbetrieb umgestellt.



Für die letzte Etappe der Sanierung des Fussgängerbereichs musste auf Grund fehlender Brückenbreite während den Bauetappen vorgängig eine Hilfsbrücke für die Fussgänger und Werkleitungen erstellt werden. Dies erlaubte es, bei der vierten und letzten Etappe parallel zu den Arbeiten im Trambereich vorzugehen (Abb. 11).

Abb. 11 Ausschnitt Bauphasenplan

Nach dem Umbau des Gerbergelenkes wurde in den Randfeldern eine lokale Instandsetzung durchgeführt und die Lager bei den Widerlagern ersetzt.

5.2. Umbau Gerbergelenk zu biegesteifem Träger

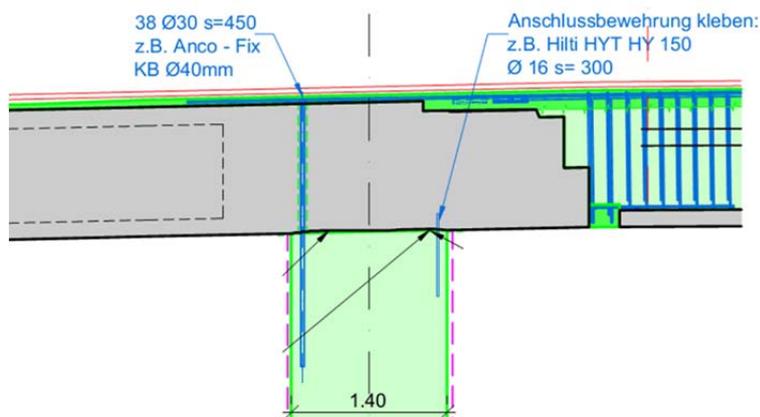
Als erstes wurde die Brückenoberfläche mittels HDW Verfahren 20 bis 60 mm abgetragen. Im Bereich des Gerbergelenks wurde der komplette Beton entfernt (Abb. 12). Die Trägerstege der vorfabrizierten Träger, die Bodenplatte sowie ein Teil des Auflagerbetons wurden jedoch erhalten. Danach wurde die Anschlussbewehrung des neuen Endquerträgers verlegt und eingeklebt.



Die untere Bewehrung im Endquerträger wurde dabei für einen besseren Verbund mittels einer UHFB-Plombe einbetoniert. Für diese Plombe wurde der fliessfähige Beton Holcim 707 verwendet.

Unterhalb der Brücke wurde parallel zu den Arbeiten oben die neue Rahmenwand vorbereitet. Für eine wirksame Verankerung der Zugkräfte wurde die Anschlussbewehrung mittels Kernbohrungen durch die ganze Plattendicke hindurchgeführt und mittels Kopfplatten in der Deckschicht des UHFB verankert (Abb. 13).

Abb. 12 Betonabtrag Bereich Gerbergelenk



Der Zwischenbereich des Endquerträgers hatte nur Anforderungen an die Druckfestigkeit, aber keine spezifischen Anforderungen bezüglich Dichtigkeit, oder Zugfestigkeit zu erfüllen. Deshalb wurde hier zur Kosteneinsparung normaler SCC verwendet.

Abb. 13 System Rahmenecke mit Bewehrung

5.3. Abdichtung mit UHFB

Um eine mögliche Rissbildung bei Zugbelastung zu minimieren, wurde der UHFB auf der Brückenoberfläche bewehrt. Im Bereich der Druckzone wurde eine Netzbewehrung verlegt. Im Bereich der Zugzone über der neu erstellten Rahmenwand wurden eine statisch wirksame Längsbewehrung sowie eine quer verteilende Bewehrung verlegt (Abb. 14). Der Einbau des UHFB erfolgte von Hand mit Schubkarren und Rechen (Abb. 15). Das Material wurde vor Ort gemäss Anweisungen der Firma Holcim in zwei Betonmischern angerührt. Die Kapazität je Mischer betrug 100 Liter pro Charge. Bei einer Anrührzeit von ca. 15 Minuten waren zwei Mischer nötig die jeweils zeitversetzt mischten, um keine Unterbrüche im Einbau zu erhalten, da das Material relativ schnell erhärtet, insbesondere beim Einbau mit erhöhten Temperaturen. An einem Arbeitstag wurden je nach Etappe jeweils zwischen 3 und 8 m³ UHFB eingebaut, was alle Beteiligten zu Höchstleistungen antrieb. Total wurden ca. 66 m³ des thixotropen UHFB Holcim 710 und ca. 3 m³ des fließfähigen UHFB Holcim 707 eingebaut. Der Einbau des UHFB erfolgte in Etappen, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Arbeitsfugen in der Zugzone entstanden. Ausserdem wurden die Arbeitsfugen treppenartig abgeschalt, damit die Dichtigkeit der Schicht gewährleistet bleibt und kein durchgehender Riss entsteht.



Abb. 14 Neue Bewehrung in der Zugzone



Abb. 15 Einbau UHFB Deckschicht

5.4. Schubrisse in den Trägerstegen

Eine Zustandserfassung der inneren Trägerstege nach dem Freilegen des Gerbergelenks zeigte Schubrisse in den am stärksten belasteten inneren Trägerstegen (Abb. 16). Im Auflagerbereich des Gerbergelenks, beim Übergang der Längsträger zum Auflagerträger konnten ebenfalls vertikale Risse festgestellt werden, die darauf schliessen liessen, dass die Verankerung der Längszugkräfte ungenügend war (Abb. 17).

Durch diese Feststellungen konnten die Resultate der statischen Überprüfung verifiziert werden.



Abb. 16 Schubrisse in den inneren Trägerstegen (links)



Abb. 17 Vertikale Risse im Auflagerbereich Verankerung der Längszugkräfte (rechts)

6. Erfahrungen aus der Praxisanwendung

6.1. Belagsaufbau auf UHFB

Im Prinzip wird auf ASTRA Brücken nur Gussasphalt eingebaut, da er aufgrund seiner Wasserdichtigkeit gegenüber dem Walzasphalt entscheidende Vorteile mit sich bringt. Normalerweise wird auf eine Betonkonstruktion mittels eines Hessesiegel und einer PDB-Bahn abgedichtet, um insbesondere keinen Dampfdruck unter dem Gussasphalt zu haben. Da der UHFB wasserdicht ist, kann im Prinzip auf eine Abdichtung verzichtet werden. Da er von der Klassifizierung her als Beton gilt, war es schwierig eine Gussasphalt-Unternehmung zu finden, die direkt auf dem UHFB einen Gussasphalt einbauen wollte. Da bei den uns bekannten Projekten nur Walzasphalt auf UHFB eingebaut wurde, haben wir uns dazu entschlossen, ebenfalls Walzasphalt zu verbauen.

Bis anhin ist kein Fall bekannt, in dem Gussasphalt ohne zusätzliche Abdichtung direkt auf einen UHFB eingebaut wurde. Unserer Meinung nach besteht hier noch Forschungsbedarf bezüglich der Verträglichkeit von direktem Gussasphalt-Einbau, damit das Vorgehen dann auch in der Praxis akzeptiert wird. Eine zusätzliche Abdichtung auf dem UHFB aufzubringen, damit ein Gussasphalt eingebaut werden kann, halten wir hingegen für zu teuer.

6.2. Einbau thixotroper UHFB als Abdichtungsschicht

Der Personalaufwand für den Einbau des UHFB hat sich als eher hoch erwiesen. Aufgrund der grossen Mengen, die verwendet wurden, erwies sich das Mischen vor Ort mit zwei Betonmischern als sehr anspruchsvoll. Die Mischer, welche pro Charge nur 0.1 m³ produzieren konnten mussten je nach Einbau Etappe während 10 bis 12 Stunden ununterbrochen laufen, um die geforderten Mengen herstellen zu können und keine Unterbrüche im Einbau zu provozieren. Bei grösseren Anrührmengen, wurde die Zeit zum Mischen der UHFB-Bestandteile zu gross. Auch war das Verteilen der zähflüssigen UHFB-Schicht mit Schubkarren und Rechen relativ personalintensiv. Durch die von Tag zu Tag gesteigerte Erfahrung, lief der Einbau mit fortgeschrittener Bauzeit jedoch immer flüssiger ab.

6.3. Wettereinflüsse

Die Wettereinflüsse erwiesen sich als eher anspruchsvoll. Bei kühleren Temperaturen im Frühling ging der Einbau einfacher vonstatten, da auch die Zeitspanne bis zum Einsetzen der Erhärtung länger war. Bei höheren Temperaturen musste viel schneller eingebaut werden und dementsprechend mehr Personal vor Ort sein. Ausserdem gab es im Sommer zum Teil Probleme mit plötzlich auftretendem Regen. Da die ganze Baustelle ziemlich zeitkritisch war, konnte an schönen Tagen mit Gewitterisiko nicht auf einen Einbau verzichtet werden. Da bei stärkerem Regen ein Einbau jedoch nicht mehr tolerierbar ist, mussten auch hier innovative Lösungen gesucht werden. Einerseits wurden gewisse Zonen abgedeckt, und andererseits wurden Bereiche definiert (Zugzone), in denen keine Fugen im UHFB ausgeführt werden durften. Ausserdem wurde festgelegt, dass Arbeitsfugen jeweils abgestuft abgeschalt werden müssen. Damit die geforderte Qualität eingehalten werden konnte, wurde der Einbau engmaschig durch die Bauleitung begleitet, um auch im Falle von Wetterumschwüngen direkt vor Ort über das weitere Vorgehen zu bestimmen.

6.4. Nachbehandlung und Risse in der Belagsoberfläche

Bei den ersten Einbau-Etappen wurden oberflächliche Risse im UHFB festgestellt. Eine Sondierung ergab, dass es sich nur um oberflächliche Risse handelt, die aufgrund von Frühschwinden entstanden sind. Zum Teil wurde die Oberfläche auch porös (Elefantenhaut). Eine optimierte Nachbehandlung mit direktem Abdecken der Oberfläche führte dann zu einer rissfreien Oberfläche. Durch das sofortige Abdecken des eingebauten UHFB entstand teilweise eine unregelmässige Oberfläche mit Eindrücken der Plastikfolie (Abb. 18).



Abb. 18 Unregelmässigkeiten in Oberfläche

6.5. Qualitätssicherung UHFB

Vor Beginn des UHFB Einbaus wurde auf einer Prüfplatte der Einbau geübt und die Mitarbeiter der Bauunternehmung von Holcim-Personal im Mischen und Einbau geschult.

Zur Sicherung der geforderten Qualität wurden von Holcim unterschiedliche Proben des vor Ort hergestellten Betons genommen. Die Bauherrschaft liess zusätzliche Proben nehmen und diese in einem unabhängigen Prüflabor der Berner Fachhochschule prüfen. Es wurde der Zugversuch nach Merkblatt SIA 2052 [4] durchgeführt. Die Werte erfüllten eine Klassifizierung nach Tabelle 1 des SIA Merkblattes 2052 in die Klasse UA. Die elastische Grenzfestigkeit lag im Mittel bei 7.6 N/mm² und die Zugfestigkeit bei 9.5 N/mm².

Um einen ebenmässigeren Einbau zu erreichen, erachten wir es als sinnvoll bei einer Brücke dieser Grössenordnung einen maschinellen Einbau analog Gussasphalt-Verfahren zu prüfen. Ebenfalls wären Mischer mit einer grösseren Kapazität als 100 Liter pro Charge von Vorteil.

7. Fazit und Kostenbetrachtung

Die Gesamtkosten inklusive Sofortmassnahmen und Projekterarbeitung beliefen sich auf rund 3.0 Mio. Franken. Die reinen Baukosten der Instandsetzung und Verstärkung beliefen sich auf ca. 2.5 Mio. Franken. Mit einer Brückenfläche von 1'160 m² ergaben sich somit Kosten von rund 2'150 Franken pro m². Auf eine Abdichtung mittels Hessesiegel und PDB-Bahnen konnte verzichtet werden, was die Bauzeit entscheidend verkürzte. Dadurch blieben auch die Mehrkosten des vergleichsweise teuren UHFB in einem akzeptablen Rahmen. Der Anteil des UHFB an den Gesamtkosten der Instandsetzung betrug nur ca. 200 Franken pro m².

8. Danksagung

Gerne bedanken wir uns bei Professor Eugen Brühwiler, sowie Emmanuel Denarié bei der Unterstützung zu Fragen im Bereich UHFB. Auch Kerstin Wassmann von der Holcim (Schweiz) AG stand uns beim Projekt jederzeit hilfsbereit zur Seite. Schliesslich möchten wir uns auch bei Cornelius Oesterlee bedanken, der uns für die Prüfung des UHFB unterstützend zur Seite stand. Schlussendlich danken wir dem ASTRA für das entgegengebrachte Vertrauen und den Mut, ein insbesondere in der Deutschschweiz bis anhin relativ selten verwendetes Material einzusetzen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] SIA 269:2011 Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken
- [2] SIA 269-1:2011 Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen
- [3] SIA 269-2:2011 Erhaltung von Tragwerken – Betonbau
- [4] SIA 2052 (Entwurf) UHFB – Baustoffe, Bemessung, Ausführung

Bauherrschaft

ASTRA Filiale Thun

Projektverfasser

PUN Team B+S Plus, c/o B+S AG, Weltpoststrasse 5, 3000 Bern 15
Projekt T13 Hartenbach & Wenger AG, Egelgasse 70, 3006 Bern

Bauausführung

Frutiger AG, Abt. Tiefbau, Frutigenstrasse 37, 3601 Thun

Produkt

UHFB Holcim 710, Holcim 707 Schichtdicken zwischen 30 mm und 80 mm

Renforcement et remise en état du Pont de Montbovon

Damien Metry

Ingénieur civil EPF
sd ingénierie fribourg sa
Fribourg, Suisse

Eugen Brühwiler

prof. dr sc. techn., ing. civ.
dipl. ETHZ/SIA/IABSE
Lausanne, Suisse

Résumé

L'intervention de remise en état et de renforcement exploite des nouvelles technologies de renforcement de tabliers de pont avec l'application d'une couche de Béton Fibré Ultra-Performant. Cette couche permet d'augmenter à la fois la résistance statique et, par la même occasion, elle sert de couche d'étanchéité vitale pour la durabilité de l'ouvrage. Ce matériau extrêmement dense et résistant se met en place par coulage en plusieurs étapes sur l'ensemble du tablier et travaille en combinaison avec une précontrainte extérieure disposée sous le tablier. Le but du renforcement est d'assurer la sécurité structurale en se basant sur les nouveaux éléments structuraux fiables, mis en place lors de la remise en état.

Mots clés : Pont, renforcement, remise en état, BFUP, précontrainte extérieure, durabilité, développement durable.



Fig. 1 Pont de Montbovon, photo après les travaux

1. Le contexte

L'usine électrique de Montbovon, propriété du "groupe e", dispose d'un seul accès routier par l'intermédiaire d'un pont en béton armé enjambant la Sarine sur la commune Haut-Intyamon en Gruyère. Cet ouvrage datant de 1916 est l'unique moyen d'acheminer des machines et pièces lourdes sur la rive droite du cours d'eau plaquée contre les Préalpes Fribourgeoises.

Le pont a subi les assauts du temps et a montré de fortes dégradations sur ses éléments structuraux primaires, si bien que le bureau d'ingénieurs civils a demandé une limitation de charge lors d'une inspection principale. Les recherches d'archives datant de la construction du pont ont été infructueuses et n'ont pas permis de plans d'ingénieur civil. L'auteur de l'intervention a dû se passer des plans de coffrage et des précieuses informations contenues dans les plans armature pour l'établissement de son projet d'intervention.

Le maintien de l'utilisation du pont et sa capacité à supporter des charges de convois exceptionnels a influencé l'orientation du projet dès les premières études. Le maître de l'ouvrage avait comme impératif de ne pas subir des pertes d'exploitation en cas d'une panne d'un transformateur. Son éventuel remplacement devrait avoir lieu dans des délais très courts. Cette consigne a conduit l'auteur de projet à proposer deux variantes principales d'intervention, distinctes par leurs coûts et la durée des travaux :

- 1) Renforcement et remise en état
- 2) Démolition et remplacement du pont existant

2. Compétitivité du Béton Fibré Ultra-Performant (BFUP)

Le développement des deux variantes d'intervention a pour but de choisir le type de projet le plus adapté à la situation donnée. Après un prédimensionnement et un chiffrage financier des deux projets et leurs sous-variantes (nouveau pont en béton, mixte et bois), l'étude multicritères a permis de mettre en évidence des avantages solides pour le renforcement au BFUP au détriment de la construction d'un nouveau pont. Les principaux arguments favorables à la remise en état sont :

- Financiers, avec un coût de renforcement et remise en état équivalent à la moitié de la somme d'investissement pour un nouveau pont
- Travaux légers et circonscrits au nécessaire
- Rapidité des travaux et maintien de l'accès à l'usine
- Economie des matériaux et développement durable
- Procédure de mise à l'enquête simple
- Préservation des surfaces non-construites
- Conservation du patrimoine bâti

Table 1 Etude multicritère; Variantes d'intervention

Variantes	Pondé- ration	V1 : BFUP avec remise en état		V2 : Pont mixte		V3 : Pont par ripage	
		Note	Note pondérée	Note	Note pondérée	Note	Note pondérée
Durée du chantier	10	5	50	3	30	2	20
Emprises provi. et déf.	10	5	50	2	20	4	40
Gêne du chantier	10	2	20	5	50	4	40
Aspects financiers	40	5	200	3	120	2	80
Aspects administratifs	20	5	100	3	60	4	80
Aspects environnementaux	5	5	25	2	10	3	15
Aspects techniques	5	4	20	5	25	4	20
Total	100		465		315		295
Classement			1		2		3

Fort des avantages de la variante de remise en état au moyen du BFUP, le maître de l'ouvrage a décidé de mettre à l'enquête le projet novateur proposé par le bureau d'ingénieur civil à la place d'une reconstruction conventionnelle et onéreuse.

3. Concept d'intervention

L'intervention de remise en état et de renforcement exploite des nouvelles technologies de renforcement de tabliers de pont avec l'application d'une couche de BFUP renforcée de barres d'armature. Cette couche permet d'augmenter à la fois la résistance statique et, par la même occasion, elle sert de couche d'étanchéité vitale pour la durabilité de l'ouvrage. Ce matériau extrêmement dense et résistant se met en place par coulage en plusieurs étapes sur l'ensemble du tablier. Le but du renforcement est d'assurer la sécurité structurale en se basant sur les nouveaux éléments structuraux fiables, mise en place lors de la remise en état.

L'intervention se déroule en plusieurs phases pour garantir l'accès à l'usine. Néanmoins, pour la mise en place de la couche de BFUP, les participants au projet ont préféré une opération « coup de poing » avec une courte fermeture du pont de 5 jours. Même dans cette phase critique de travaux, le pont est resté franchissable par les piétons et cyclistes. Il faut aussi noter que la circulation sur le pont est très faible et s'effectue que de manière ponctuelle.

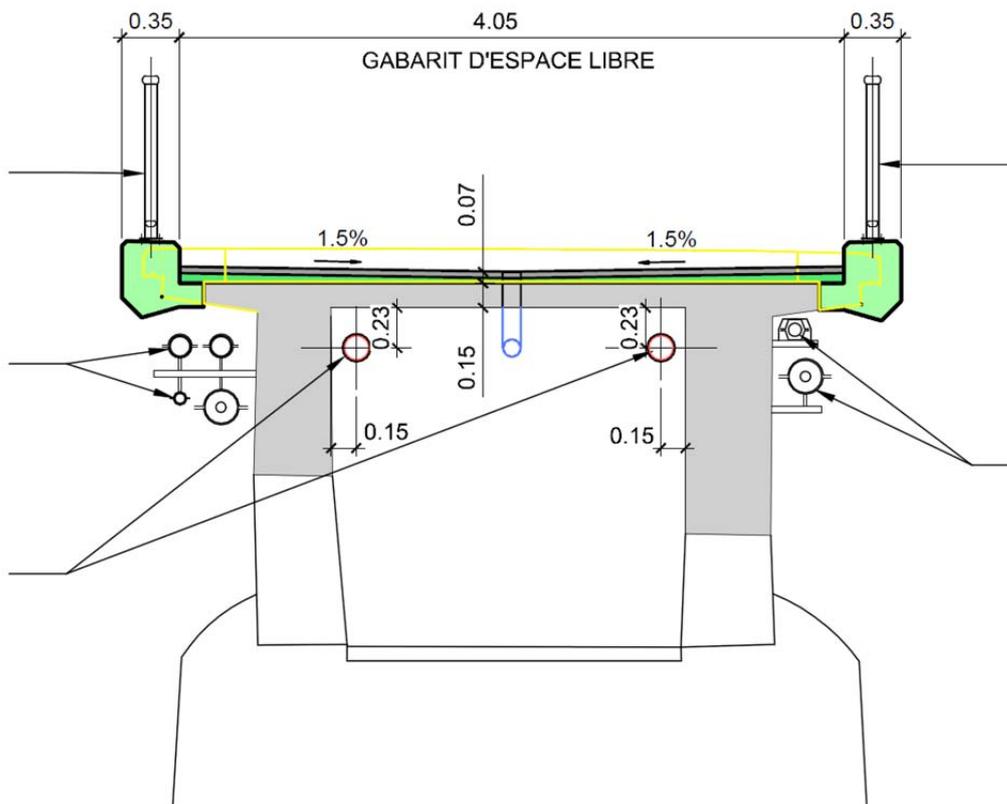


Fig. 2 Section type du pont

Avec la mise en place du BFUP, l'origine des phénomènes de détérioration a été supprimée si bien qu'il est possible de procéder à de simples réparations ponctuelles des dégâts actuellement visibles. Cette solution économique est privilégiée par rapport à une intervention généralisée sur l'ensemble des surfaces sous tablier. Les éclats de béton ont été piqués et les évidements ainsi laissés sont remplis au mortier de réparation selon les règles de l'art. La face supérieure du tablier a subi une hydrodémolition afin de créer une adhérence rugueuse avec la nouvelle couche de BFUP. Ce procédé permet par la même occasion l'évacuation du béton contaminé par les chlorures et la carbonatation.

La solution de remise en état nécessite plus d'ingénierie et une collecte d'informations par sondages sur le pont existant. Pour les besoins de l'étude, l'auteur de projet a décidé de procéder à un relevé précis de l'ouvrage par balayage au laser. Le résultat a permis d'extrapoler du nuage de points 3D des coupes dans les zones intéressantes pour le dimensionnement statique.

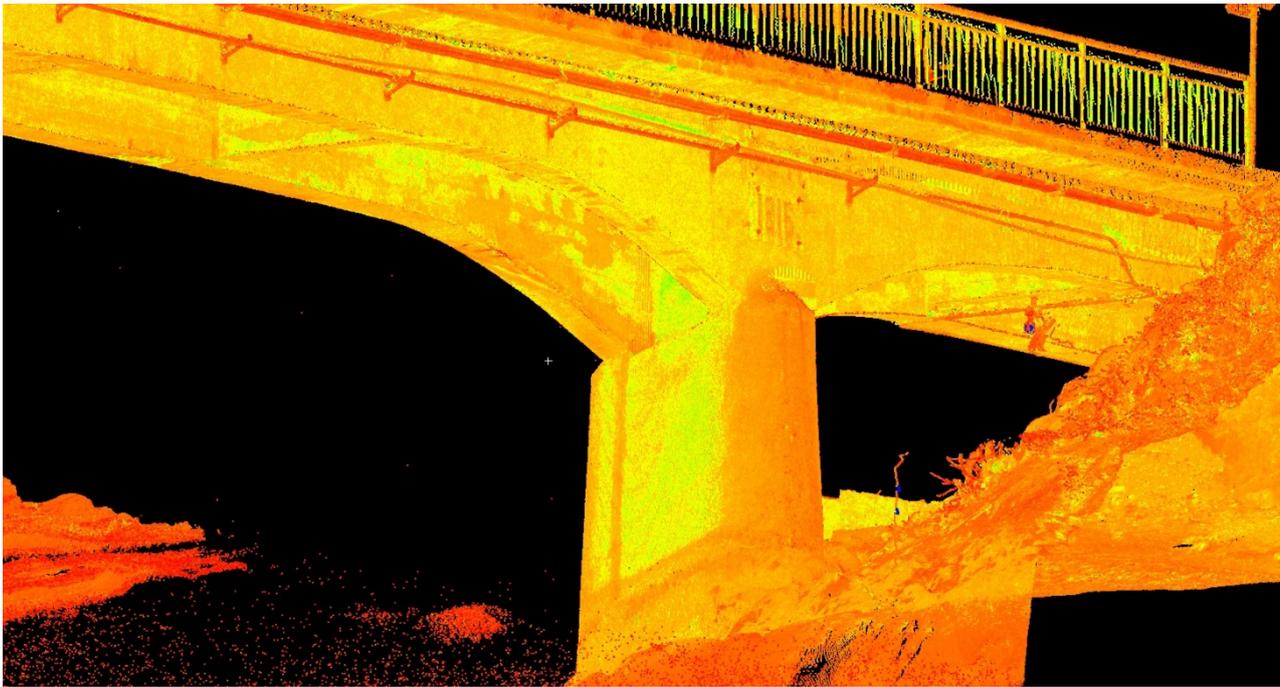


Fig. 3 Photomontage du nuage de points à partir du balayage par laser

Les sondages sur le tablier ont permis de conclure que les barres d'armatures étaient de type « acier doux lisse » avec une limite d'écoulement de l'ordre de 220 MPa. Les fenêtres de sondage en face supérieure du tablier ont montré que le pont avait reçu plus de 20 cm de revêtement avec le temps et que l'état du béton était satisfaisant. Toutes ces informations ont permis d'affiner la vérification de la sécurité structurale définitive de la structure renforcée.

Le périmètre d'intervention se limite à la superstructure du pont, sans toucher les colonnes étant en bon état et les parties en contact avec le lit du cours d'eau. Aucun réaménagement de la chaussée en-dehors du pont n'a dû être effectué.

Lors des travaux, la mise en un platelage capable de supporter le coffrage des bordures a permis de réaliser les différents travaux tout en protégeant le lit du cours d'eau. Pendant cette phase, le gabarit hydraulique sous le pont était considérablement réduit. Afin de diminuer tout risque de perte du portique, le maître de l'ouvrage et le bureau d'ingénieur ont procédé à des calculs hydrauliques avec des consignes précises en cas de crue. Les modélisations numériques montrent qu'en temps d'exploitation normale, la hauteur de garde de 70 cm sous le portique est régie par le niveau maximal du lac de Lessoc. Par contre, en cas de crue exceptionnelle suite à un déversement d'urgence depuis le barrage de Rossinière, des corps flottant éventuels peuvent rentrer en conflit avec la membrure inférieure du portique. Fort de ce constat, une procédure en cas d'évènement exceptionnel a été mise en place avec une description claire de l'organigramme décisionnel ainsi que le déroulement de l'intervention de l'équipe spécialisée pour enlever les corps flottant.

4. Le renforcement

Le renforcement a pour but d'assurer une durabilité accrue de l'ouvrage et de garantir la sécurité structurale face aux sollicitations de trafic normal et exceptionnel décrites dans les normes SIA 269/1 et SIA 261/1. Le concept de renforcement comporte la mise en place d'une couche de BFUP armé sur la surface du tablier combiné à l'effet d'augmentation de la résistance des sections en béton armé par l'effet de la flexion composée, provoquée par un effort normal de compression induit par des câbles de précontrainte. Ainsi, une augmentation significative de la résistance ultime a été obtenue, permettant de répondre aux exigences d'utilisation au niveau des charges routières et de combler le manque d'information relatif aux armatures présentes dans la structure en béton.

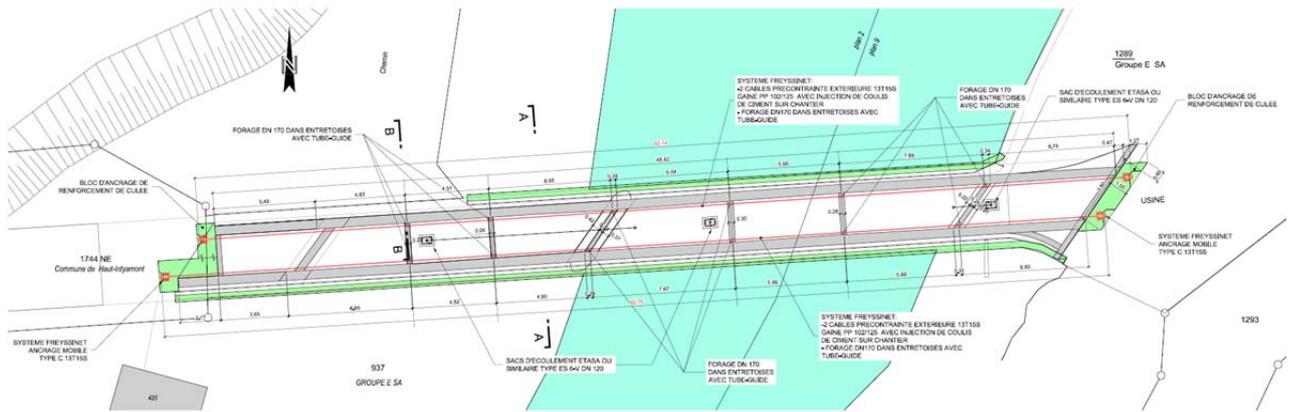


Fig. 4 Projet d'intervention, vue en plan

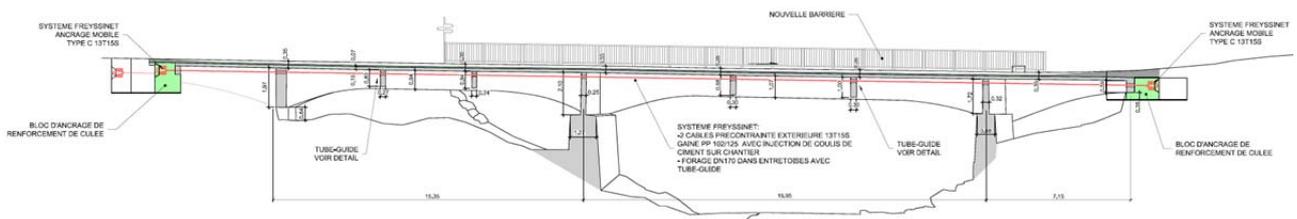


Fig. 5 Projet d'intervention, profil en long

Le positionnement et la force de la précontrainte extérieure ont été choisis judicieusement de manière à mobiliser une résistance en section par flexion composée. (Interaction $M - N$). La trajectoire des câbles de précontrainte est rectiligne afin d'éviter la reprise des forces de déviation concentrées et de limiter les coûts. Le positionnement en élévation des câbles est choisi en fonction des centres géométriques de la section sur appui et en travée. Comme les poutres maîtresses sous le tablier sont à inertie variable, la trajectoire rectiligne des câbles de précontrainte induit des forces de balancement qui peuvent soulager la poutre continue. Après plusieurs itérations, le niveau des câbles est fixée de manière à réduire les moments négatifs sur appui et de soulager par la même occasion les travées par effet de balancement. Au droit des appuis intermédiaires, une armature intégrée à la couche de BFUP est mise en place de manière à limiter la contrainte de traction sous charges de services.

L'absence d'armatures transversales supérieures fiables a conduit l'auteur de projet à ancrer une armature supplémentaire issue des nouvelles bordures du pont dans la couche de BFUP. Ce détail prévu à l'avance a permis d'éviter des surprises lors des travaux d'hydrodémolition.

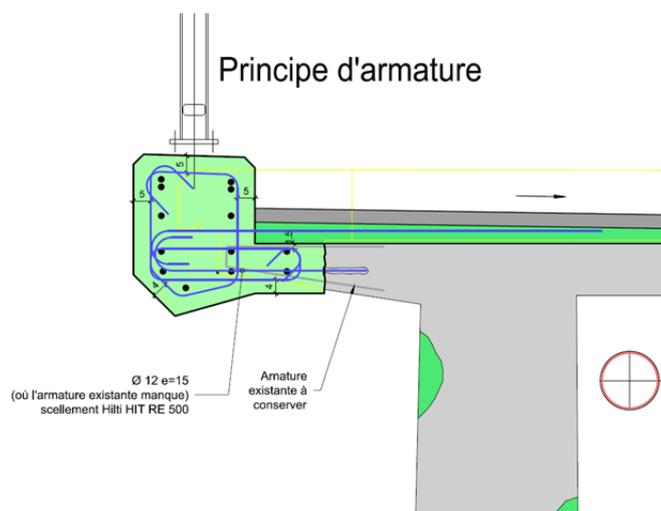


Fig. 6 Coupe de détail de la bordure du pont

Ci-dessous, une liste non-exhaustive des travaux réalisés dans le cadre de l'intervention:

- Installations de chantier et mise en place d'un platelage de travail sous le tablier du pont.
- Déviation des services fixés au pont.
- Démolition et évacuation du revêtement, des bordures et des garde-corps.
- Préparation de la surface du tablier.
- Exécution des bordures
- Terrassements aux culées et petits travaux de bétonnage pour la mise en place des câbles de précontrainte.
- Réalisation de la couche de BFUP.
- Carottage des entretoises et des murs de culées pour la mise en place des câbles de précontrainte
- Mise en place et en tension de la précontrainte extérieure.
- Travaux de finitions : garde-corps, services, réparations ponctuelles et habillages localisés.



Fig. 7 Vue de la cure de la dernière étape de bétonnage du tablier en BFUP



Fig. 8 Mise en place du BFUP

5. Expériences acquises

Cette réalisation démontre que la solution de remise en état et de renforcement du pont par des techniques innovantes est l'intervention la plus judicieuse à plus d'un titre pour le maître de l'ouvrage. Les avantages sont techniques, administratifs, financiers et temporels avec une importante réduction de la durée du chantier. Les impacts sur l'environnement sont réduits à leur strict minimum. L'état original du pont et son site sont conservés tel quel. Le coût d'intervention était de 500'000.- francs ou 1940.- francs par m² de chaussée. Compte tenu des/ Au vu des exigences à atteindre et comparé à des cas similaires, ce montant est considéré comme étant économique.

La mise en place de la couche de BFUP a permis de résoudre plusieurs points névralgiques de l'intervention. Elle sert de couche de protection étanche en lieu et place d'une feuille d'étanchéité collée. Dans le sens transversal de la dalle de roulement, elle augmente la résistance à la flexion et à l'effort tranchant sous des charges ponctuelles d'essieux de camion. Dans le sens longitudinal, elle participe pleinement à la résistance en section sous l'influence des moments de flexion. Complétée par une précontrainte additionnelle, cette section de béton renforcée dispose d'une résistance supplémentaire avec l'interaction flexion-compression.

Grâce aux interventions de remise en état et de renforcement, le pont construit il y a bientôt 100 ans présente aujourd'hui une performance égale à un pont neuf. Comparé à l'option de remplacement souvent appliquée à un ouvrage centenaire, la remise en état et le renforcement du pont répond beaucoup mieux aux principes du développement durable puisque d'importantes ressources financières ainsi que de matériau et d'énergie ont été économisées. Ce projet démontre comment un ouvrage d'art centenaire peut être amélioré et sa durée d'utilisation étendue, par l'emploi de matériaux et techniques avancés.

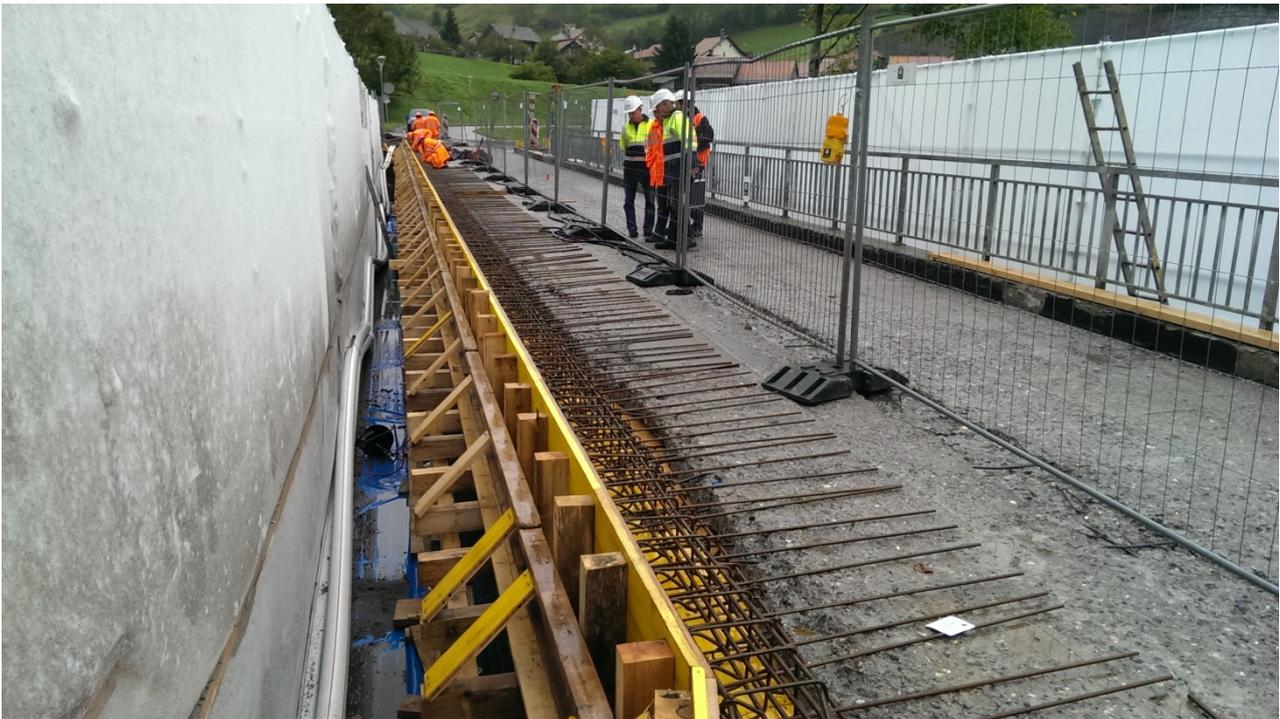


Fig. 9 Armature du parapet et armature de liaison avec la couche en BFUP



Fig. 10 Fabrication du BFUP sur chantier



Fig. 11 Mise en tension de la précontrainte extérieure

6. Données techniques

- Pont poutre à inertie variable
- Longueur totale : 50.15 m
- Portées : 7.65 m / 15.35 m / 20.00 m / 7.15 m
- Barres d'armature : lisses en acier doux et B500
- Précontrainte : 2 câbles 13T15S
- BFUP : 11 m³, épaisseur variable de 30 à 60 mm



Fig. 12 Photo du pont après intervention

7. Références

- [1] DENARIE, E., WUEST, J., PUTALLAZ, J.-C., BRÜHWILER, E. : «Béton fibré ultra performant : Première application en réhabilitation », *Tracés no 17*, pp. 6-11, 7 septembre 2005
- [2] DENARIÉ, E., KAZEMI-KAMYAB, H., BRÜHWILER, E., HADDAD, B., NENDAZ, S., Béton fibré ultra performant pour la maintenance, un nouvel élan, *Tracés*, no 12, pp. 20-23.
- [3] BRÜHWILER, E., MOREILLON, L., SUTER, R. (éditeurs); Bétons fibrés ultra-performants, Acte du 1^{er} Colloque sur les BFUP en Suisse, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, 27 October 2011, ISBN 978-2-8399-0951-8, 175p
- [4] Cahier Technique SIA 2052, Béton fibré ultra-performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement et exécution, Projet de mise en consultation 1. avril 2014.

UHFB aus Sicht des Baustoffproduzenten

Kerstin WASSMANN

Dipl.-Ing

Holcim (Schweiz) AG

Würenlingen

Zusammenfassung

Die Motivation von Holcim, sich seit nunmehr 10 Jahren mit Ultrahochleistungs-Faserbeton (UHFB) zu beschäftigen, liegt in der Faszination für neue zementgebundene Werkstoffe begründet. Dieser Hochleistungsbaustoff ergänzt das Spektrum verfügbarer Betone und erschliesst neue Anwendungsbereiche, insbesondere für Bauwerke mit hohen Anforderungen durch extreme Exposition oder intensive Nutzung. Das begründet das zunehmende Interesse an der Verwendung von UHFB in der Schweiz, wie die zahlreichen Beispiele zum Schutz, zur Abdichtung und Verstärkung bestehender Bauwerke verdeutlichen. Einige davon sollen im Folgenden vorgestellt werden, um die besonderen Eigenschaften des Baustoffs und die sich daraus ergebenden Nutzungsmöglichkeiten zu erläutern. Die Einführung des SIA Merkblattes 2052 sollte die vielfältigen bisherigen Anwendungen durch solche im Neubau erweitern.

Keywords: UHFB, BFUP, UHPFRC, Dauerhaftigkeit, Anwendung, Verstärkung

1. Einleitung

Ultrahochfester-Faserbeton (UHFB) ist ein Hochleistungsbaustoff. Seine Eigenschaften sind nur mit hochwertigen Rohstoffen zu erreichen und seine Herstellung bedarf besonderer Sorgfalt. Ausgehend von einem durch Prof. Brühwiler initiierten KTI Projekt von 2003 bis 2005, in welchem wir grundlegende Informationen über den Werkstoff gewinnen durften, haben wir basierend auf eigenen und in der Schweiz verfügbaren ausgewählten Rohstoffen einen UHFB entwickelt.

1.1. Entwicklung und Herstellung von UHFB

Für die hohen Anforderungen hinsichtlich der Dichtigkeit des UHFB und dem damit verbunden sehr tiefen W/Z-Wert von 0,17 bis 0,19 kommen nur hochwertige Zemente und Mikrosilika in Frage. Die Auswahl der feinen Gesteinskörnung mit einem Grösstkorn von 0,6 mm erfordert neben der Berücksichtigung einer optimalen Kornform auch eine Feinkornoptimierung zum Erreichen der gewünschten Packungsdichte. Erst hoch konzentrierte und wirksame Fließmittel erlauben die Einstellung der für die Verarbeitung erforderlichen Konsistenz. Für die hohe Duktilität des UHFB werden schlanke Mikrostahlfasern in Anteilen von 3 bis 4 Volumenprozent zugegeben.

Aktuell werden von der Holcim (Schweiz) AG zwei UHFB für das Marktgebiet Schweiz hergestellt. Der UHFB Holcim 707 besitzt eine hohe Fließfähigkeit und eignet sich damit zur Verfüllung von Schalungen und zur Beschichtung horizontaler Flächen. Der UHFB Holcim 710 eignet sich für Gefälleanwendungen und wird vorwiegend zur Beschichtung von Brücken eingesetzt. Beide Produkte weisen gleichwertige mechanische Eigenschaften auf und unterliegen denselben Anforderungen hinsichtlich Produktion und Qualitätssicherung.

Die Holcim (Schweiz) AG, seit Juli 2015 Member der LafargeHolcim Group, ist daran interessiert, diesen Baustoff in konstanter Qualität zur Verfügung zu stellen. Die Herstellung des UHFB Holcim 707 und Holcim 710 unterliegt einer werkseigenen Produktionskontrolle, die nach EN 1504-3:2005, Anhang A von einer unabhängigen Zertifizierungsstelle bewertet, überwacht und zertifiziert wird. Als System zur Bestätigung der Konformität wird das System 2+ zugrunde gelegt, welches für tragende und nichttragende Systeme angewendet werden kann. Die Qualitätsüberwachung nach 2+ erfolgt entsprechend EN 1504-8:2004.

Nach Inkraftsetzung des SIA Merkblattes 2052 wird die werkseigene Produktionskontrolle auf der Basis der im Merkblatt vorgegebenen Qualitätsprüfungen unter Beibehaltung des Konformitätssystems 2+ einschliesslich Zertifizierung fortgeführt.

1.2. Eigenschaften der UHFH Holcim 707 und Holcim 710

Die mechanischen Kennwerte der UHFH Holcim 707 und Holcim 710 sind gleichwertig, ebenso die Dauerhaftigkeitseigenschaften. Einzig die Frühfestigkeit des Holcim 710 entwickelt sich schneller und liegt nach 24 Stunden bei 20 °C bei 70 bis 80 N/mm² und damit um 30 bis 40 N/mm² höher als die des Holcim 707. Der Chloridwiderstand eines faserverstärkten Betons kann mit dem bestehenden Prüfstand nach Norm nicht geprüft werden, da an einem Faserbeton kein elektrisches Feld angelegt werden kann. Deshalb wird diese Prüfung am UHFH ohne Fasern durchgeführt. Das Verhalten unter Brandeinwirkung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes an der ETH Zürich geprüft. Dazu wurde in Vorversuchen sowohl der geeignete Fasertyp (Polypropylen) als auch die geeignete Fasermenge für den Feinkornbeton bestimmt. An einem Plattenversuch an der EMPA wurde dann das Abplatzverhalten unter hohen Temperaturen entsprechend der Einheitstemperaturkurve untersucht. Durch die Zugabe der in den Vorversuchen ausgewählten Brandschutz-Faser konnte ein Abplatzen vollständig vermieden werden. Die einzelnen Eigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte und Dauerhaftigkeit des Holcim 707 und Holcim 710 mit 3,8 Vol.-% Stahlfasern nach 28 Tagen

Mechanische Kennwerte		
Würfeldruckfestigkeit (100x100x100 mm)	140 +/- 10	N/mm ²
Prismendruckfestigkeit (40x40x160 mm)	180 +/- 10	N/mm ²
Zugfestigkeit (zentrisch)	≥ 10	N/mm ²
Prismenbiegezugfestigkeit (40x40x160 mm)	40 +/- 5	N/mm ²
Elastizitätsmodul	40'000 +/- 5'000	N/mm ²
UHFH-Sorte, Einstufung gemäss MB 2052 folgt nach Inkrafttreten, vorauss. 1/2016	Erwartete Einstufung als Sorte UB	
Dauerhaftigkeitskennwerte		
Luftpermeabilität, Wasserleitfähigkeit	sehr gering	
Frost-Frosttaumittel, Sulfat- und AAR-Widerstand	sehr hoch	
Brandwiderstand, mit Zugabe ausgewählter PP Fasern (Einheitstemperaturzeitkurve)	keine Abplatzungen	
Verschleisswiderstand nach Böhme DIN 52108 (entspricht Verschleisswiderstandsklasse nach SIA 252: A6)	4,6	cm ³ /cm ²
Erhöhter Säurewiderstand nach ESW-Prüfung (Schädigungstiefe; hochfester Referenzbeton 1 mm)	0,20	mm

1.3. Beratung und Begleitung beim Einbau; Qualitätssicherung

Durch die Vielzahl ausgeführter Projekte konnten auf Seiten der Planer, Ingenieure und Baufirmen bereits umfangreiche Erfahrung gesammelt werden. Dennoch hat sich eine frühzeitige Beratung vor der Ausführung als wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Applikation bewährt. Holcim hat dafür ein Team sowohl in der Deutschschweiz als auch in der Westschweiz definiert, welches von der Beratung der Bauherren bis zur Nachbehandlung des eingebauten UHFH die Verwendung des Hochleistungsbaustoffes begleitet. Auf Wunsch können auch verschiedene Qualitätsprüfungen vor Ort durchgeführt werden.

2. Anwendungsbeispiele

2.1. Abdichtung von Brücken am Beispiel von SBB Bachdurchlässen und der Beschichtung einer Leitmauer



Die SBB setzt als Bauherrin zunehmend auf die Dauerhaftigkeit von Beschichtungen mit UHFB. Ausgehend von einem Pilotprojekt in 2011 an der Strecke Escholzmatt-Schüpfheim konnten in den Jahren 2012 und 2013 bereits 7 Bachdurchlässe und eine Leitmauer an der Strecke Immensee-Arth-Goldau und in 2014 weitere in Arth beschichtet werden. Dabei konnte unter anderem die Robustheit in der Verwendung des UHFB auf auch schwer zugänglichen Baustellen in sehr hoher Gleichmässigkeit und Qualität nachgewiesen werden, was durch die Zugabe von Wasser und Fließmittel zum trockenen Premix im Rahmen der vorgegebenen Dosieranweisung erklärt werden kann.

Abb. 1 Blick auf die fertiggestellte UHFB Beschichtung mit gefällegeeignetem Holcim 710 unterhalb des Splittkoffers und Gleiseinbau, Strecke Immensee-Arth-Goldau. (2012)

Im Rahmen der Zustandserfassung konnte bei den vor nur 20 Jahren neu erstellten Leitmauern der Tössbrücke in Winterthur eine Schädigung in Form von netzartigen Rissen mit direktem Chlorideintrag aus Spritzwasser und Sprühnebel festgestellt werden. Die gemessenen Chloridkonzentrationen im Beton liessen auf eine wahrscheinliche Korrosion der Bewehrung und Schädigung der Betonstruktur schliessen. Deshalb sollte die Betonleitmauer mit UHFB abgedichtet werden. Während der Realisierung 2014 und 2015 wurde der chloridbelastete oberflächennahe Beton bis auf das Niveau der ersten Bewehrungslage mittels HWD (Höchstwasserdruckverfahren) abgetragen und die neue UHFB-Schutzschicht mit einer Schichtstärke von ca. 40 mm aufgetragen. Die Instandsetzung mit UHFB erfolgt in zwei unmittelbar aufeinander folgenden Schritten. Zuerst werden die geschalteten Flächen mit fließfähigem UHFB vergossen und anschliessend mit einem gefällegeeignetem UHFB die Krone beschichtet. Letzteres erweist sich als anspruchsvoll, da durch den laufenden Verkehr leichte Erschütterungen auf die gesperrte Fahrbahn übertragen wurden. Trotz der thixotropen Konsistenz, welche üblicherweise die Erstellung von Beschichtungen in bis zu 6 % Gefälle erlaubt, war für die Ausbildung des Gefälles von nur 2 % eine anspruchsvolle handwerkliche Massarbeit der ausführenden Firma erforderlich.



Abb.2 Bauwerksinstandsetzung N01, Effretikon-Ohringen, Tössbrücke Winterthur Instandsetzung der Leitmauer (2014 /2015)

2.2. Verstärkung von Bauwerken am Beispiel eines Parkdecks und einer Deponie

Im Rahmen der Raumplanung für das Stadtviertel „Îlot Sud“ in Versoix, sollten den Einwohnern mit der Baumassnahme mehr ansprechende Fläche unter anderem für Veranstaltungen geschaffen werden. Die bestehenden Parkhausdecken mussten in Folge der Umnutzung erhöhte Lasten durch Lastwagenverkehr, grosse Menschenmengen sowie das Gewicht des neuen Belags aufnehmen können. Daher war es unerlässlich, die vorhandenen Parkhausdecken zu verstärken, um

Durchstanzen und unzulässige Verformungen zu vermeiden. In einer ersten Variante wurde eine klassische Verstärkung der Decken erwogen, was aber zu nicht tragbaren Lasten für Stützen und Fundamente geführt hätte. Die zweite Variante mittels vorgespannter Carbonfasern im oberen und unteren Teil der Decke ergänzt durch Stahlpilze barg die Gefahr der Verletzung der Carbonfasern durch die Abdichtungsmassnahmen und hätte andererseits zu einer optischen Beeinträchtigung des Tragwerkes geführt. Auf Grund der mechanischen Eigenschaften und seiner Dauerhaftigkeit entschied sich der Bauwerkseigentümer, die Gemeinde Versoix, die 800 m² grosse Platte mit einer 50 mm dicken Schicht UHFB, die über den Stützen auch als Durchstanzverstärkung wirkt, in Verbindung mit einer Schubverstärkung über den Stützen zu ertüchtigen. Zusätzliche Vorteile bot diese Variante hinsichtlich der Einhaltung der Ausführungsfrist und einer optisch ansprechenden Ausprägung des Tragsystems. Gleichzeitig erwies sich die Verstärkung mit UHFB Holcim 710 als wirtschaftlichste Lösung mit einer Kosteneinsparung von rund 20 % gegenüber der Variante mit Carbonfasern.



Abb.3 Blick auf das Parkdeck während der Verstärkungsarbeiten (2015)

Das Auslaufbauwerk der Schlackedeponie Eilen bei Attinghausen wies eine unzureichende Tragfähigkeit im gesamten Bereich auf und musste mit umfangreichen Massnahmen verstärkt werden. Auf Grund des ohnehin geringen vorhandenen Raumvolumens wurde deshalb von Anbeginn mit UHFB geplant. Die Wände des Auslaufbauwerkes wurden mit mehr als 50 mm bewehrtem UHFB verstärkt. Dabei war es aus ausführungstechnischen Gründen erforderlich, die Bewehrungsüberdeckung auf 20 mm zu erhöhen, um eine gute Ummantelung der quer- und längsliegenden Bewehrung zu gewährleisten. Für den Korrosionsschutz bei horizontalen Bauwerken kann diese Dicke auf 15 mm reduziert werden. Für die Verstärkung der Bodenplatte wurden zwischen 50 und 60 mm bewehrter UHFB eingebaut. Da die Bodenplatte kein Gefälle auswies, konnten die vertikalen und horizontalen Verstärkungen mit Holcim 707 ausgeführt werden.



Abb.4 Vergiessen der Wandschalung mit Holcim 707 links im Bild und aus-geschalte Wandverstärkung im Bild rechts (2015)

2.3. Schutz vor chemischem Angriff und aggressiven Abwässern

Geringe pH-Werte < 4 sowie stark schwankende Säurebelastungen führen erwartungsgemäss zu grossflächigen Ablösungen von Betonoberflächen. Dieses Schadensbild konnte am Absetzbecken der Textilfabrik Schöller beobachtet werden, wo die Ablösung bereits die Bewehrungsüberdeckung stark angegriffen hatte.



Wie im Eignungstest nach der in Deutschland eingeführten Methode des „Erhöhten Säurewiderstandes“ belegt, weist UHFB auf Grund seines sehr dichten Gefüges sowie der verwendeten Rohstoffe einen fünffach höheren Widerstand gegen Säureangriff auf, als der als Referenzbeton verwendete hochfeste Beton einer Festigkeitsklasse C70/85. Damit eignet er sich besonders bei Expositionen infolge chemischen Angriffs XA.

Dies war auch dem mit der Planung betrauten Ingenieurbüro bekannt. Da im Zuge der Instandsetzung keine Erweiterung des Beckens unter annehmbaren Kosten in Betracht kam und gleichfalls das verfügbare Abwasservolumen nicht geringer werden sollte, entschied man sich für eine Abdichtung von Wänden und Sohle mit UHFB. Dazu wurden die geschalteten Wände in einer Dicke von 30 mm mit UHFB Holcim 707 vergossen, die Sohle mit einem Gefälle von ca. 4 % mit UHFB Holcim 710 beschichtet.

Abb.5 Blick in das instandgesetzte Absetzbecken der Fa. Schöller, Sevelen (2011)

2.4. Mechanische Beständigkeit gegenüber Abrieb und Schlagbelastung

Geschiebe und Wasser setzen den Schwellen des Kraftwerks Matte in Bern stark zu, denn bei hohem Pegelstand überfließt ein Teil des Wassers aus dem Kraftwerkkanal die Schwellen direkt in die Aare. Diese Übermenge an Wasser aus Schneeschmelze oder Regenfällen schleppt aber auch sehr viel Geschiebe mit sich, welches die Schwellen verschleisst und damit hohe Instandhaltungskosten verursacht. Üblicherweise wird die Sohle solcher hoch beanspruchter Schwellen mit einem extrem verschleissfesten Material, wie zum Beispiel Schmelzbasaltplatten, beschichtet. Und doch erleiden die Schwellen immer wieder Schäden, da die Fugen zwischen den Basaltplatten verletzbar Unstetigkeiten bilden, an denen die Abrasion einsetzt. Die verschiedenen Beanspruchungen, die insgesamt als Hydroabrasion bezeichnet werden, setzen sich aus Stoss- und Schlagbelastungen sowie Verschleissbelastungen zusammen. Gerade im Bereich der Fugen können kleine Schäden die Beschichtung ablösen, was dem Schadensbild an den Mattenschwellen entsprach.



Abb.6 Schadensbild an den Schwellen in Form grossflächig abgelöster Schmelzbasaltplatten

Zwei der schadhaften Schwellen wurden im Frühjahr 2015 mit UHFB Holcim 710 beschichtet, um die Ausbildung des gewünschten Gefälles zwischen zwei und sechs Prozent umzusetzen. Die Schwellen wurden jeweils eingehaust, um trotz Winterkälte Temperaturen um 15 °C während Einbau und Erhärtung sicherzustellen. Vor dem Auftrag der UHFB-Schicht wurde der Untergrund ausreichend aufgeraut, mit Wasser gesättigt und stehendes Wasser beseitigt.



Abb.7 Einbau des UHFB auf den zum Schutz vor kalten Temperaturen eingehaust und auf ca. 15 °C temperierten Schwellen

Die mechanische Belastung durch Schwerlastverkehr (Gummireifen, im Winter auch mit Ketten) in einem Steinbruch für die Gewinnung von Kalkstein und Mergel für die Zementproduktion in Siggenthal, führte zu erheblichen Schäden an den 50 cm dicken Bodenplatten im Bereich der Rohstoffaufgabe in den Brecher. Deshalb sollten die am stärksten belasteten Platten im Brems- und Wendebereich der Radlader mit bewehrtem UHFB Holcim 710 verstärkt werden. Massgebend für diese Anwendung war auch eine sehr hohe Frühfestigkeit der Verstärkung. Da die Rohstoffsicherung oberste Priorität hat, konnte eine Sperrung der Fläche nur über die Zeit des Wochenendes vorgenommen werden. Zusätzliche Qualitätsprüfungen für den gewünschten Freigabezeitpunkt nach spätestens 72 Stunden ergaben am Prisma eine Biegezugfestigkeiten von $> 30 \text{ N/mm}^2$, eine Druckfestigkeit $> 170 \text{ N/mm}^2$ und eine direkte Zugfestigkeit von rund 6 N/mm^2 , errechnet aus der Stempeldruckfestigkeit am Würfel mit 10 cm Kantenlänge. Damit war eine Verkehrsfreigabe nach nur 61 Stunden bedenkenlos möglich. Für die Ausbildung einer ausreichenden Rauigkeit wurde direkt in den frisch abgezogenen UHFB Holcim 710 Splitt der Korngrösse 2/4 mm eingearbeitet.



Abb.8 Schadensbild an den Bodenplatten mit grossflächig freiliegender Bewehrung links und Radlader bei der Anfahrt nach Fertigstellung der Verstärkung im Bereich der Brecheraufgabe rechts

2.5. Elegante Lösungen im Bereich der Instandsetzung mit direkt begehbaren Oberflächen am Beispiel zweier Fussgängerbrücken

Die Instandsetzung der denkmalgeschützten Hebeltobelbrücke bei Uznach wurde in Anlehnung der Instandsetzungsmassnahme an der Dalvazzabrücke (2008) und der Valtschielbrücke (2013) geplant und im Sommer diesen Jahres ausgeführt. Die Brücke für Fussgängerverkehr sollte dauerhaft abgedichtet werden, wobei die Oberfläche als direkt begehrbar ausgebildet werden sollte. Dazu wurde der alte schadhafte Beton bis unter die Bewehrung abgetragen und mit einer Ausgleichsschicht versehen. Anschliessend wurde auf den abgejeteten und wassergesättigten Untergrund der UHFB Holcim 710 als Abdichtungsschicht in einer Dicke von 25 bis 30 mm aufgebracht und unverzüglich mit Folie abgedeckt. In einem zweiten Arbeitsgang wurde frisch in frisch der UHFB Holcim 710 ohne Fasern, jedoch mit einer Schwindkompensation und Schwindreduktion angemischt und in einer Schichtstärke von etwa 2 bis 3 mm aufgebracht. In diese Matrix konnte der Splitt mit 2/4 mm Grösstkorn eingestreut werden. Die Ausführung und die Oberflächenausbildung sind in hohem Masse gelungen und die Vorgehensweise der frisch in frisch Ausbildung der Oberfläche hat sich in der Ausführung bewährt.



Abb.9 Hebeltobelbrücke vor der Beschichtung mit UHFB (konventioneller Beton mit Bewehrungsnetz) links im Bild und fertig instandgesetzte Brückenplatte mit heller Splitteinstreuung in gelungener Ausführung (2015) rechts im Bild



Besonders anspruchsvoll erwies sich die geplante Instandsetzung der Passerelle ouvrage 39 in Neuchâtel. Die Fussgängerbrücke sollte in gleicher Weise mit UHFB instandgesetzt werden, nur dass die Seitenflügel der Aufgänge ein Gefälle von 13% aufwiesen. Dazu wurden vorab Laborversuche bei Holcim und anschliessend Feldversuche von der ausführenden Firma durchgeführt. Speziell die Einstellung der für das sehr hohe Gefälle erforderlichen Konsistenz (Thixotropie) und die geeignete Vorgehensweise für die Splitteinstreuung wurden ermittelt. Auch hier entschied man sich, basierend auf guten Haftzugergebnissen aus den Vorversuchen, für eine nachträgliche Beschichtung mit der faserlosen UHFB Matrix zur Aufnahme des Splittes.



Abb.10 Blick auf die Gesamtansicht der Passerelle ouvrage 39 links und Eindruck der Gefälleneigung von 13 % an der fertig instandgesetzten Fussgängerbrücke mit Splitteinstreuung rechts im Bild (2015)

3. Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Anwendungsbeispiele zeigen aus Sicht der Holcim (Schweiz) AG sowohl die Vielseitigkeit der Verwendbarkeit des UHFB als auch die Robustheit des Werkstoffes in der Anwendung. Damit liegen im Bereich der Abdichtung und Verstärkung umfangreiche und durchwegs positive Erfahrungen vor.

Im Zuge der Einführung des SIA Merkblatts 2052 sollten nun weitere Anwendungsgebiete im Bereich des Neubaus hinzukommen. Hoffnung macht diesbezüglich ein in Planung befindliches Projekt einer Brücke aus UHFB. Dazu wurde bereits ein Brückensegment hergestellt und einer umfangreichen und erfolgreichen Bauteilprüfung unterzogen. Nach Umsetzung dieses Pilotprojektes in 2016 hoffen wir auf eine Vervielfachung dieses Ansatzes. Auch völlig neuartige Anwendungen im Neubau, in Form dünnwandiger Bauteile, Schalen und Baukörper, werden von Seiten der Holcim (Schweiz) AG unterstützt und Projekte dazu sind bereits in der Versuchsphase.

Evolution des applications du BFUP aux structures porteuses

Philippe Menétrey

Dr. Sc. Tech. EPFL, MSc, Dipl. Ing. Civil EPFL
INGPHI SA – Ingénieurs en ouvrages d’art
Lausanne

Lionel Moreillon

Dr Univ. Paris-Est, MSc ENPC
INGPHI SA – Ingénieurs en ouvrages d’art
Lausanne

Résumé

Le BFUP avec sa résistance élevée, un comportement ductile et sa faible porosité est idéal pour être utilisé dans les structures porteuses.

Dans cet article, diverses applications développées par le bureau INGPHI au cours des onze dernières années sont présentées ; elles sont regroupées dans les catégories suivantes : couches de protection, couches de renforcement, renforcements au cisaillement, éléments de façade, dalles, éléments en compression, pièces d’assemblage, passerelles et pont.

Pour toutes ces applications, la contribution mécanique du BFUP est décrite et quantifiée. Le niveau de contrainte est reproduit en relation avec la surface de rupture du BFUP. Il ressort très clairement que pour les applications réalisées, le niveau de contrainte dans le BFUP est particulièrement faible.

Il est également montré que pour les applications à venir, comme les éléments en compression, les passerelles et les ponts, le niveau de sollicitations augmente et donc le risque ! La normalisation du BFUP est donc indispensable.

Finalement, il est clair que l’application du BFUP aux structures porteuses débute prudemment mais sûrement et qu’il existe encore un large potentiel de développements et d’innovation.

Mots clés: BFUP, couches de protection, couches de renforcement, renforcements au cisaillement, éléments de façade, dalles, éléments en compression, pièces d’assemblage, passerelles, ponts, niveau de contrainte, surface de rupture.

1. Introduction

Le BFUP avec sa résistance élevée, un comportement ductile et sa faible perméabilité est idéal pour être utilisé dans les structures porteuses.

Depuis les années 2000, l’application du BFUP aux structures porteuses connaît un développement important comme décrit dans [1], [2], [2], [4], [5] et [6]. Certaines applications en France, comme le MuCEM, la couverture du stade Jean Bouin ou encore « l’Iceberg » de la Fondation Louis Vuitton démontrent sur des projets d’exception le potentiel du BFUP pour des habillages de bâtiment. Au Japon, l’extension des pistes de l’aéroport Haneda et de nombreux ponts routiers et ferroviaires démontrent le potentiel du BFUP pour des infrastructures de génie civil. En Suisse, le renforcement des Viaducs de Chillon [6] est exceptionnel par la taille et la nouvelle toiture du Musée Olympique [7] est particulièrement astucieuse.

Dans cet article, seules les applications développées par le bureau INGPHI au cours des onze dernières années sont présentées. Elles sont regroupées dans les catégories suivantes : couches de protection, couches de renforcement, renforcements au cisaillement, éléments de façade, dalles, éléments en compression, pièces d’assemblage, passerelles et ponts. Chaque application est décrite succinctement et pour chaque application, la contribution mécanique du BFUP est quantifiée.

Finalement, pour toutes ces applications, le niveau de contrainte est reproduit dans un graphique $\xi-\rho$ en relation avec la surface de rupture du BFUP pour comparaison.

2. Couches de protection

Une des premières applications du BFUP aux structures porteuses est sous la forme de couches de protection.

C'est lors de la remise en état des joints de chaussée des ponts de la Cornallaz sur l'A9 en 2009 que le bureau INGPHI a fait sa première application du BFUP aux structures porteuses. Lors des travaux de démolition du joint de chaussée existant, il a été observé que les barres d'armature supérieures de la dalle de roulement avaient un enrobage très faible. Une couche de BFUP de type Ductal a été mise en place afin de compenser au mieux la faible protection des barres comme illustré à la Fig. 1.



Fig. 1 Mise en place de BFUP lors de la remise en état de joint de chaussée

Depuis, plusieurs applications sous la forme de couches de protection ont été réalisées avec succès comme décrites par Moreillon et Menétrey [9] dont deux applications sont rappelées ci-dessous.

Premier exemple, le pont routier de Vuarrens construit en 1964 dont l'étanchéité a été remplacée en 2013 par une couche de 30 mm de BFUP. La couche de BFUP a été appliquée sur la dalle de roulement en béton qui avait été préalablement giclée au jet à haute pression. La couche de BFUP a été introduite sous les nouvelles bordures bétonnées au préalable comme illustré à la Fig. 2 afin d'assurer l'étanchéité aux extrémités.

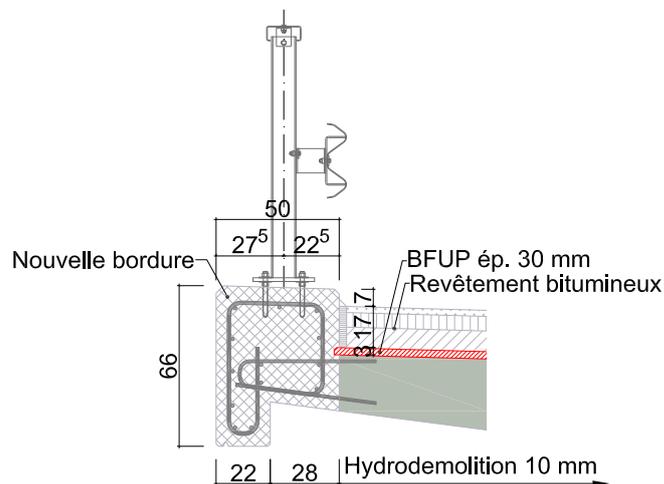


Fig. 2 Extrémité du tablier étanché avec une couche de BFUP et une nouvelle bordure

Deuxième exemple concerne plusieurs estacades au-dessus de Montreux. Une des estacades existante a été recouverte d'une couche de BFUP de 30 mm d'épaisseur sans armature comme illustré à la Fig. 3.

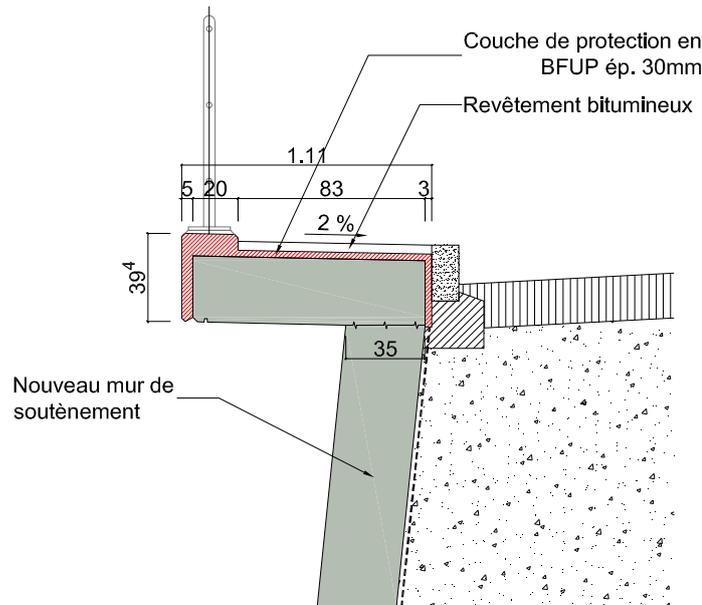


Fig. 3 Nouveau trottoir recouvert d'une couche de protection en BFUP

Il a été clairement constaté que le BFUP est idéal pour assurer une protection durable des infrastructures routières.

Pour ces applications comme couche de protection, l'état de contrainte dans le BFUP est très faible et il peut être assimilé à zéro : $\sigma \approx 0$ MPa.

3. Couches de renforcement

L'application du BFUP sous la forme de couches de renforcement se différencie de l'application sous la forme de couches de protection par la contribution du BFUP à la résistance.

Le bureau INGPHI a appliqué avec succès sur différentes structures des couches de renforcement en BFUP. Le projet le plus conséquent est un immeuble de bureaux au centre de Genève construit en 1920 qu'il a fallu renforcer sur tous étages totalisant une surface de 3'000 m².

Lors des vérifications statiques, il a été constaté que les dalles existantes étaient des dalles nervurées particulièrement fines et que les exigences des normes n'étaient plus satisfaites. Le renforcement a été réalisé en disposant une couche de BFUP fourni par Ductal de 30 mm d'épaisseur sur la dalle existante comme illustré à la Fig. 4. Cette dernière a été nettoyée au préalable par sablage afin d'assurer la rugosité nécessaire. De plus, un treillis de renforcement $\phi 6$ s=100 mm a été disposé dans la nouvelle couche en BFUP pour augmenter la résistance mais aussi pour permettre d'améliorer l'ancrage de la dalle aux extrémités dans les murs en maçonnerie.

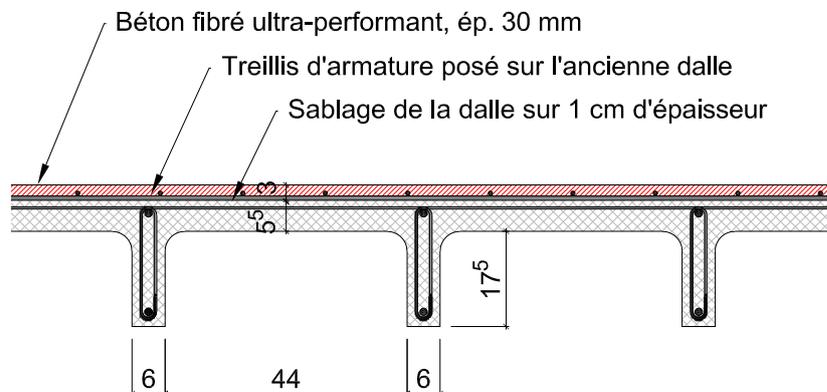


Fig. 4 Renforcement d'une dalle nervurée avec une couche de BFUP

Cette application a été possible grâce aux récentes recherches qui ont démontré la contribution de nouvelles couches en BFUP, à la flexion par Oosterlee [10] et à la flexion et au cisaillement par

Noshiravani [11]. En effet, des essais en laboratoire ont permis de montrer qu'une couche de BFUP avec de l'armature permettent d'augmenter significativement la rigidité et la résistance des dalles en limitant la fissuration de flexion. Les armatures garantissent une capacité de déformation élevée des couches en BFUP et retardent la formation de micro-fissures. De plus, la mise en place de barres d'armatures permet de réduire la sensibilité du BFUP à l'orientation des fibres.

Finalement, il a pu être constaté que la mise en place de barres d'armatures permet de faire accepter plus facilement l'application du BFUP par le client et les différents intervenants.



Fig. 5 Mise en place d'une couche de renforcement en BFUP sur dalle nervurée

Pour cette application, l'état de contrainte dans la couche de BFUP à l'état de service est principalement une contrainte de cisaillement qui atteint environ: $\tau = 1$ MPa.

4. Renforcement au cisaillement

Le renforcement au cisaillement est parfaitement illustré par le renforcement du pont de la Chandelar réalisé en 2013. Il s'agit d'un pont en béton précontraint, construit en 1967 avec une longueur totale de 81 m et une largeur de chaussée de 11.50 m. Le tablier est une dalle évidée de 1.06 m de hauteur dans la partie centrale avec des ailes en béton armé pour les trottoirs à chaque extrémité.

La résistance au cisaillement du pont existant n'était pas suffisante et il a fallu le renforcer. Les évidements de la dalle étant réalisés avec du polystyrène expansé, le renforcement a été effectué en hydrodémolisant le polystyrène expansé et en le remplaçant par un béton fibré à haute performance comme illustré à la Fig. 6.

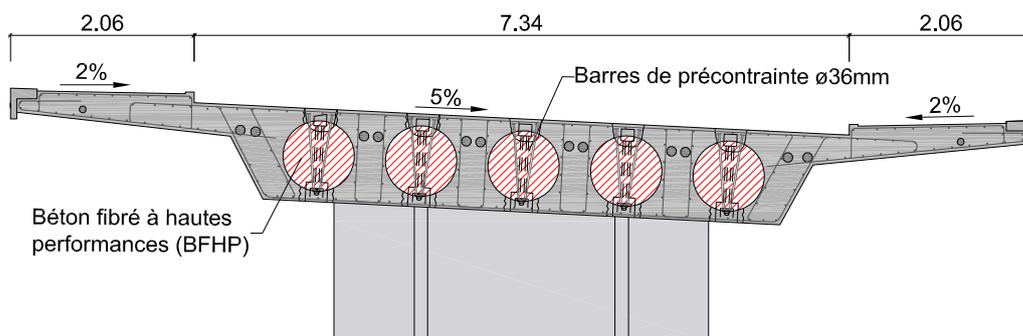


Fig. 6 Renforcement au cisaillement avec BFHP d'un tablier de pont évidé

Pour cette application, un béton fibré à haute performance (BFHP) a été préféré à un BFUP pour des raisons de coûts, parce que les sollicitations n'étaient pas très élevées et aussi parce que les évidements à combler étaient importants et que le retrait devait être réduit. Le remplissage des évidements est illustré à la Fig. 7.



Fig. 7 Renforcement au cisaillement par le remplissage des évidements

Les travaux de recherche effectués par Moreillon [12] ont permis de quantifier la capacité des BFHP et des BFUP à reprendre des sollicitations de cisaillement.

Pour cette application, la sollicitation du béton fibré à haute performance est principalement une sollicitation de cisaillement de : $\tau = 0.4$ MPa.

5. Eléments de façade

L'application du BFUP pour des éléments de façade est très bien illustrée par le projet du musée national du Qatar, projet d'un budget de plus de USD 500 millions. Le projet du musée développé par les Ateliers Jean Nouvel consiste à créer une gigantesque rose des sables. La rose des sables est composée de plus de 130 lentilles qui se croisent de manière aléatoire et qui créent ainsi des volumes pour les espaces d'exposition pour le musée.

Le bureau INGPHI a été impliqué pour développer la façade minérale du musée sur une surface de plus de 120'000 m² comme détaillé par Menétray [13]. Après plusieurs essais en béton coulé en place, en chaux, en béton projeté et en béton préfabriqué, la solution en BFUP préfabriqué a été développée et choisie et elle est en cours de construction.

La composition de la façade est présentée en coupe sur la Fig. 8 avec de l'intérieur vers l'extérieur :

- Charpente métallique principale
- Tôle métallique de support
- Isolation sous forme de verre cellulaire et étanchéité
- Potelet de fixation traversant l'isolation
- Charpente métallique secondaire appuyée sur les potelets
- Panneaux préfabriqués en BFUP appuyés sur la charpente métallique secondaire

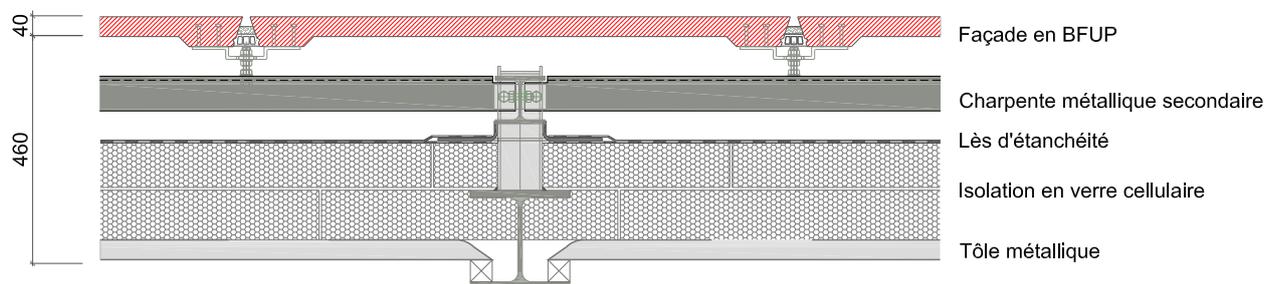


Fig. 8 Elément de façade en BFUP avec sous-construction

L'utilisation de BFUP a permis de réduire l'épaisseur des panneaux à 40 mm et à 60 mm dans les bords ceci sans utilisation d'armature de renforcement même si les panneaux ont des dimensions importantes de l'ordre de 4.0 m x 1.0 m et que les sollicitations de vent et les variations de température sont particulièrement importantes. L'utilisation du BFUP a permis de garantir les exigences de durabilité particulièrement sévères notamment liées à la présence de la mer et d'eau chargée en chlorures. Mais en plus, l'utilisation du BFUP a permis de réduire considérablement la

quantité de ciment et de sable utilisée et comme on se plaît à le dire, on a ainsi pu sauver une plage aux Maldives ...

Une vue de la construction du musée est présentée à la Fig. 9.



Fig. 9 Construction du musée national du Qatar avec ses éléments de façade

L'état de contrainte dans les panneaux de façade est un état de contrainte flexionnel de: $\sigma = \pm 1.6$ MPa.

6. Dallettes

L'application du BFUP pour des dallettes est en phase de projet pour les gares CEVA et elle devrait être réalisée en 2016. En effet, le projet des gares CEVA prévoit la construction d'une nouvelle ligne de train entre Genève et Annemasse avec la construction de cinq gares ou stations. L'architecture de ces gares a été proposée par les architectes des Ateliers Jean Nouvel à Paris et Eric Maria architecte à Genève et le bureau INGPHI a participé déjà lors du concours en 2006 puis à toutes les phases de projet comme ingénieurs pour les superstructures.

La structure proposée est similaire pour toutes les stations. Elle consiste à disposer de grandes briques de verre pour composer les planchers, les murs et les toitures. Toutes les briques de verre ont les mêmes dimensions particulièrement importantes de 5.40 m x 2.70 et sont supportées par une ossature métallique composée de caissons métalliques élancés. La station de Chêne-Bourg présentée à la Fig. 10 est illustrative du système constructif.



Fig. 10 Station de Chêne Bourg du projet CEVA avec ses briques de verre

Or, pour quelques parties de plancher, le verre est remplacé par du béton ; une brique en BFUP a ainsi été développée. Elle a les mêmes dimensions que la brique de verre et la même disposition des raidisseurs. L'épaisseur de la dalle est de 50 mm et elle est renforcée par des raidisseurs périphériques et transversaux comme visible sur la vue 3D de la Fig. 11. La dalle est renforcée par un treillis d'armature et les raidisseurs sont renforcés avec des barres d'armatures. Le poids de la brique en BFUP est de 2'770 kg permettant sa mise en place avec une grue.

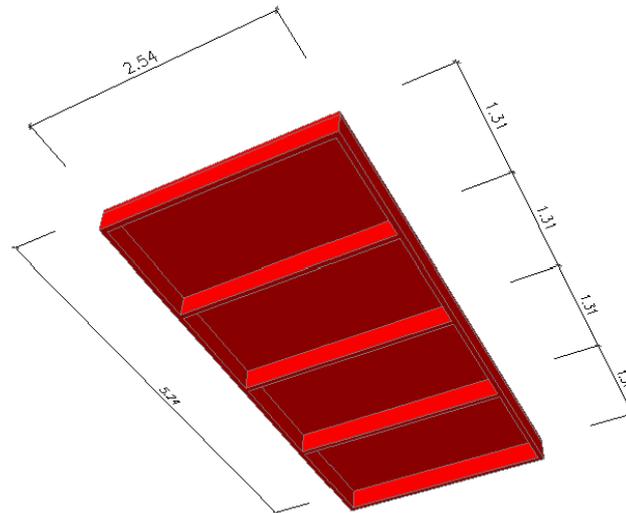


Fig. 11 Vue 3D de la brique en BFUP

Le comportement de la brique en BFUP a été déterminé en la modélisant comme une coque avec un programme d'éléments finis. Il a pu être observé que sous charge de service comme présenté à la Fig. 12, les déplacements sont faibles puisque la flèche est inférieure à 0.5 mm pour 2.70 m de portée soit un rapport flèche / portée de 1/5400.

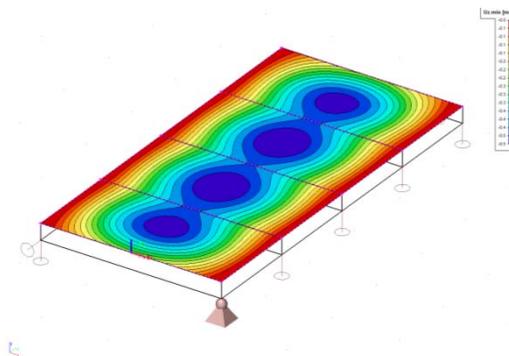


Fig. 12 Déplacement modélisé de la brique en BFUP

L'état de contrainte dans la brique en BFUP est caractérisé par des contraintes maximales de flexion de : $\sigma = \pm 3$ MPa.

7. Élément en compression

L'élargissement du tablier des ponts sur la Paudèze situé sur l'autoroute N09 près de Lausanne nécessite la construction de béquilles inclinées. Ces béquilles sont disposées entre les âmes et le tablier et permettent de limiter le moment de flexion dans le tablier afin de réaliser l'élargissement sans devoir disposer de l'armature de flexion supplémentaire dans le tablier. Dans le sens longitudinal, les béquilles forment un treillis comme illustré sur la Fig. 1313 afin d'augmenter la résistance longitudinale. Le projet devrait être réalisé à partir de 2017.

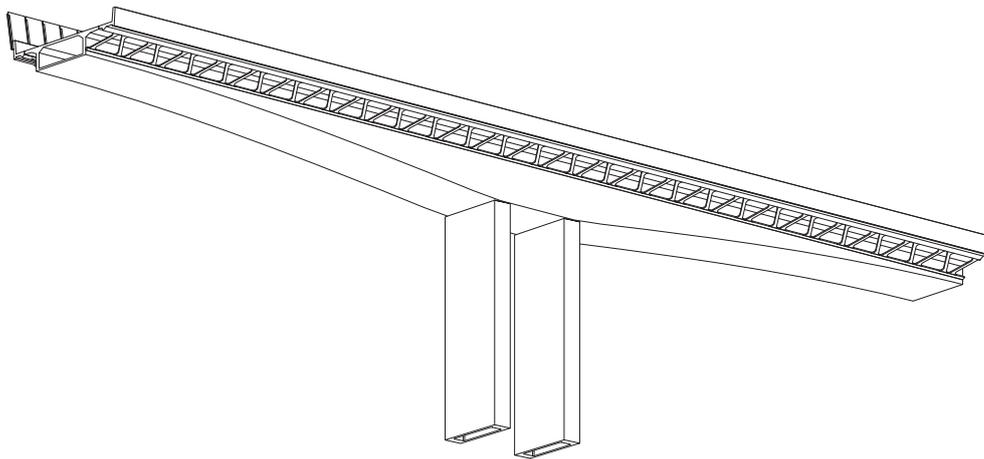


Fig. 13 Élargissement du pont sur la Paudèze avec des béquilles inclinées

Les béquilles auraient pu être réalisées en acier, mais afin de conserver l'aspect minéral du pont et aussi pour limiter l'entretien, une solution d'élargissement entièrement en béton a été préférée. Or, pour limiter l'augmentation de poids du tablier, les béquilles ont été prévues en BFUP. Les béquilles sont préfabriquées, elles ont une épaisseur de 10 cm avec des extrémités arrondies pour favoriser l'introduction des efforts dans le tablier et les âmes.

L'état de contrainte dans les béquilles sous charge de service est principalement de la compression avec : $\sigma = - 25 \text{ MPa}$.

8. Pièces d'assemblage

Le projet d'élargissement des ponts de la Paudèze permet d'illustrer une application particulièrement intéressante du BFUP comme pièce d'assemblage. En effet, la jonction entre la béquille BFUP préfabriquée décrites préalablement et l'âme du pont est réalisé en BFUP coulé en place.

Cette application s'appuie sur les essais de frottement réalisés en 2003 par Menétrey et Brühwiler [14] pour l'élargissement du viaduc de Felsenau à Berne, qui n'a en fait pas été réalisé. Ces essais ont permis d'étudier plusieurs inclinaisons et plusieurs variantes d'assemblage avec des entailles remplies de BFUP et des pièces métalliques comme rappelé à la Fig. 14.

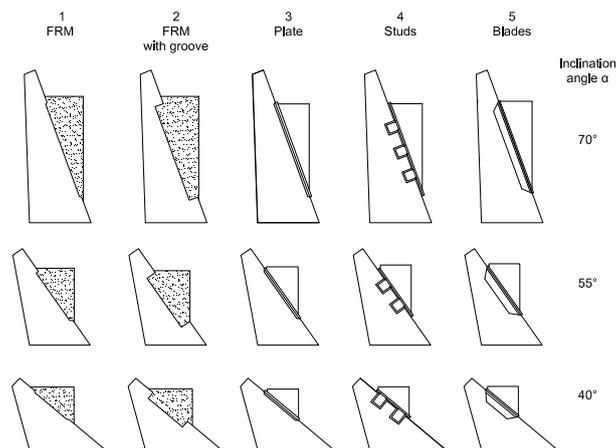


Fig. 14 Différentes variantes de pièces d'assemblage testées selon [14]

Ces essais ont permis de montrer que l'assemblage d'éléments en béton réalisé avec une entaille et du BFUP coulé en place permet d'atteindre des niveaux de résistance très intéressants.

L'assemblage des béquilles inclinées et de l'âme est réalisé comme illustré à la Fig. 15. Une entaille est créée dans le béton d'enrobage de l'âme du caisson, puis la béquille préfabriquée est positionnée et ensuite l'espace entre les deux est coffré et rempli avec du BFUP pour créer sur mesure une pièce d'assemblage.

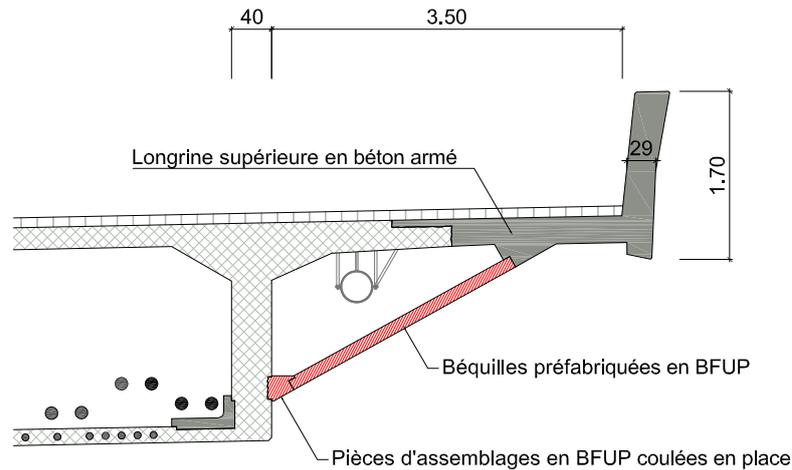


Fig. 15 Elargissement du tablier avec béquilles et pièces d'assemblage en BFUP

L'état de contrainte à l'état de service dans la pièce d'assemblage est très variable avec les valeurs extrêmes suivantes : à l'extrémité de la béquille: $\sigma = - 25$ MPa; au bord de l'âme: $\sigma = - 4$ MPa et $\tau = 2$ MPa.

9. Passerelles

Plusieurs projets de passerelles ont été proposés par le bureau INGPHI mais n'ont hélas pas aboutis. Toutefois, un projet a été primé dans un concours en 2006 et il est particulièrement intéressant pour être présenté dans cet article. Il s'agit du concours de la passerelle du bois de Finges. Pour ce projet, nous avons collaboré avec le bureau ECDM de Paris.

La passerelle de 270 m a été proposée sous la forme d'une poutre continue de 32.50 m de portée avec une auge en BFUP de 1.25 m de hauteur. L'auge était précontrainte longitudinalement et la forme parabolique des câbles de précontrainte était visible à l'intérieur de l'auge. Ceci permet de donner une forme un peu plus nerveuse à l'intérieur de l'auge mais surtout il permet de réduire le poids et la quantité de BFUP comme illustré sur les coupes de la Fig. 16.

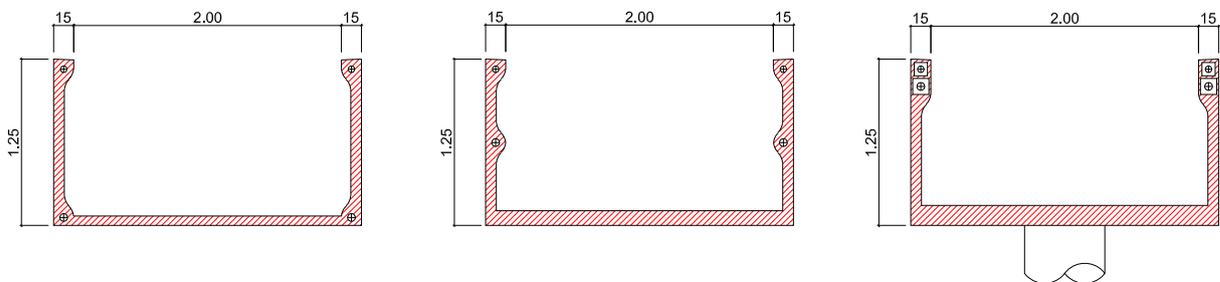


Fig. 16 Passerelle piétonne sur le Rhône avec une section en BFUP précontraint

10. Ponts

La dernière application présentée dans cet article concerne un projet de pont routier partiellement en BFUP. Le projet a été présenté dans le cadre d'un concours pour un nouveau pont à Givisiez en 2014 dénommé le pont du Tiguellet. Même si le projet n'a pas été primé par le jury du concours, il est présenté ci-dessous car il montre une application intéressante du BFUP dans le domaine des ponts.

Le pont proposé est une poutre continue de 270 m de longueur dont la travée principale de 84.3 m est surmontée d'une poutre triangulée en forme d'arc entièrement en BFUP. Cette poutre permet de franchir toutes les voies ferrées comme illustré à la Fig. 1717.

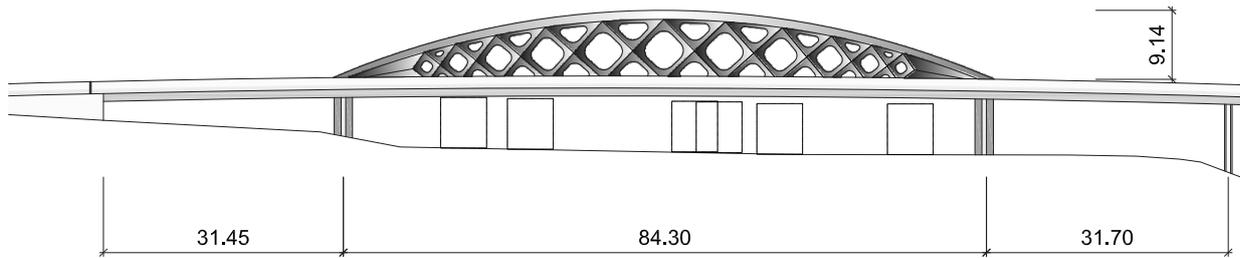


Fig. 17 Coupe longitudinale du pont routier avec arc en BFUP

La poutre triangulée est encastrée dans le tablier (membrure comprimée et diagonale) pour stabiliser l'arc comprimé au déversement. Elle est en BFUP pour reprendre les efforts et assurer une grande durabilité puisqu'elle est située au-dessus de la chaussée.

L'état de contrainte est variable spécialement dans les diagonales de sorte qu'il n'est pas décrit. Par contre, dans l'arc, l'état de contrainte est principalement une compression qui atteint au niveau de service : $\sigma = -65$ MPa.

11. Synthèses des applications et niveaux de sollicitations

Les états de contrainte dans le BFUP des applications présentées sont reportés à la Fig. 18. Il s'agit d'un diagramme $\xi-\rho$ soit les deux premiers invariants du tenseur contrainte avec comme décrit par Chen et Han [15] :

$$\sigma_{ij} = 1/3 \sigma_{kk} \delta_{ij} + s_{ij} \text{ ou } \xi = 3^{-1/2} \sigma_{ii} \text{ et } \rho = (s_{ij} s_{ji})^{1/2} \quad (1)$$

Le premier invariant ξ représente la contrainte hydrostatique et le deuxième invariant ρ représentant la contrainte déviatorique. Dans le même graphique, la surface de rupture du béton selon Menétrey et Willam [16] mais adaptée au BFUP est reportée pour les deux méridiens de traction et de compression.

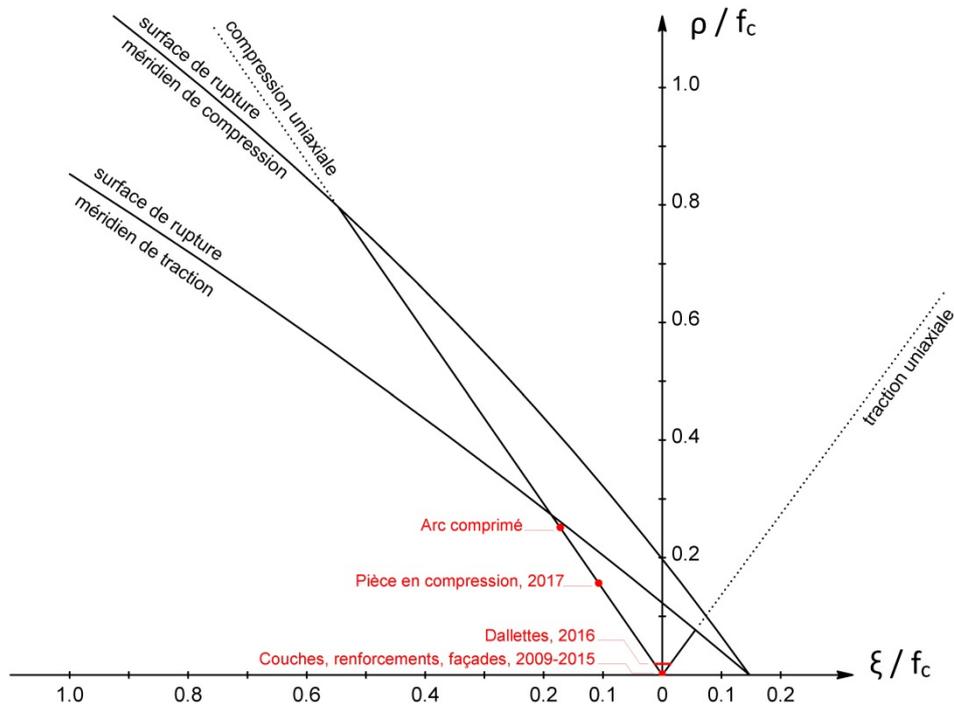


Fig. 18 Etat de contrainte dans le BFUP des diverses applications avec la surface de rupture $\xi-\rho$

Il peut être constaté que toutes les applications réalisées par le bureau INGPHI sont caractérisées par un niveau de contrainte à l'état de service qui est faible en regard de la surface de rupture du BFUP. En effet, pour toutes les applications réalisées qui sont des couches de protection, des couches de renforcement, des renforcements au cisaillement et des éléments de façade, l'état de contrainte est proche de zéro.

Toutefois, pour les applications à venir, l'état de contrainte augmente, légèrement pour les dalles et de manière plus conséquente pour les éléments en compression. Il existe donc une corrélation entre le niveau de contrainte et l'année de réalisation de l'application.

12. Conclusions

Le BFUP avec sa résistance élevée, son comportement ductile et sa faible porosité est idéal pour être utilisé dans les structures porteuses.

Dans cet article, diverses applications développées par le bureau INPGHI au cours des onze dernières années ont été présentées. Elles sont regroupées dans les catégories suivantes : couches de protection, couches de renforcement, renforcements au cisaillement, éléments de façade, dalles, éléments en compression, pièces d'assemblage, passerelles et ponts.

Pour toutes ces applications, la contribution mécanique du BFUP est décrite et quantifiée. Le niveau de contrainte est reproduit dans un graphique $\xi-\rho$ en relation avec la surface de rupture du BFUP. Il ressort très clairement, que pour les applications réalisées le niveau de contrainte dans le BFUP est particulièrement faible. Il est donc étonnant de constater que pour ces premières applications, le BFUP n'a pas été choisi pour sa haute résistance, puisqu'elle n'est pas sollicitée, mais plutôt pour sa faible porosité et sa rigidité.

La présentation des différentes applications du BFUP aux structures porteuses permet d'extraire les enseignements suivants :

- Les applications présentées sont diversifiées et démontrent d'encourageantes potentialités.
- L'utilisation combinée du BFUP et de l'armature est intéressante car elle permet d'augmenter la résistance, la ductilité et d'éliminer la critique liée à l'orientation des fibres ; il a même pu être constaté que cette combinaison facilite l'acceptation du BFUP dans les structures porteuses.
- La résistance élevée du BFUP n'est pas ou peu utilisée et elle n'est donc pas nécessaire pour toutes les applications ; l'utilisation de béton fibré à haute performance BFHP avec une résistance plus faible que celle du BFUP et plus économique peut donc s'avérer judicieuse.
- L'utilisation du BFUP comme pièces d'assemblage est particulièrement prometteuse.

Il ressort également que pour les applications à venir, comme les pièces comprimées, les passerelles et les ponts, le niveau de sollicitations augmente et donc le risque! La normalisation du BFUP devient indispensable ; un clin d'œil pour la recherche.

Finalement, il est clair que l'application du BFUP aux structures porteuses débute prudemment mais sûrement. Et c'est correct, les applications doivent se développer par étapes pour maîtriser les risques. Jusqu'à ce jour, les résultats sont encourageants et les applications peuvent évoluer. Les projets à venir sont prometteurs et il existe encore un large potentiel de développements et d'innovations.

13. Références

Les références suivantes ont été utilisées:

- [1] TOUTLEMONDE, F. et RESPLENDINO, J. Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, Proceedings of UHPFRC symposium in Marseille (France), November 17-18, 2009, London, 2011.
- [2] TOUTLEMONDE, F. et RESPLENDINO, J. Designing and Building with UHPFRC: from innovation to large-scale realizations, Proceedings of UHPFRC symposium in Marseille (France), October 1-3, 2013, Rilem Publication, 2013.
- [3] SCHMIDT, E. et al. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of the 3rd HiPerMat Symposium, Kassel, Deutschland, 2012.
- [4] BRÜHWILER, E. Entwurf, Bemessung und Ausführung von Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauteilen. Béton fibré Ultra-Performant, EIF Fribourg, 2011.
- [5] SPASOJEVIC, A., BURDET, O. et MUTTONI, A. Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts, OFROU, 2008.

- [6] Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete, Interim Recommendations, *Setra*, 2002.
- [7] PERRET, J., MÜHLBERG, H., SCHÄR, Ph. et CUENNET, S. Renforcement des viaducs de Chillon, *Tracés* 19, 2014.
- [8] MUTTONI, A. Une nouvelle toiture pour le musée olympique à Lausanne, Construction en béton en Suisse, fib-CH, *Journée Suisse du béton*, 2014.
- [9] MOREILLON, L. et MENÉTREY, Ph., Rehabilitation and Strengthening of Existing Structures with UHPFRC, Various Applications, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, Marseille, 2013.
- [10] OESTERLEE, C. Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members. *Thesis EPFL*, Lausanne, 2010.
- [11] NOSHIRAVANI, T. Shear Structural Response of R-UHPFRC – RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear. *Thesis EPFL*, Lausanne, 2012.
- [12] MOREILLON, L. Shear and punching shear strength of high performance fibre reinforced concrete structures. *Thesis Université Paris-Est SIE*, 2013.
- [13] MENÉTREY, Ph., UHPFRC Cladding for the Qatar National Museum, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, Marseille, 2013.
- [14] MENÉTREY, Ph. et BRÜHWILER, E. Design and experimental Investigation of the joints of inclined struts for the widening of bridge deck slabs. *Structural Engineering International*, 4, 2008.
- [15] CHEN, W. F. et HAN, D. J. Plasticity for structural Engineers, Springer-Verlag, 1988.
- [16] MENÉTREY, Ph. et WILLAM, K. J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization, *ACI Structural Journal*, 92(2):311-318, 1995.

Flexion et cisaillement de poutres précontraintes en BFUP avec des ouvertures circulaires

João TOMAS, Lionel MOREILLON, Joanna NSEIR, Dario REDAELLI,
René SUTER

Institut des Technologies de l'Environnement Construit (ITEC)
Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR)

Résumé

Sont exposés dans cet article les résultats d'une étude théorique et expérimentale sur des poutres précontraintes en BFUHP et en BFHP avec des ouvertures circulaires soumises à des sollicitations combinées de flexion et de cisaillement. La demande architecturale naissante d'inclure ce type d'ouvertures est due au fait que les éléments à âme pleine constituent un obstacle au passage des tuyaux techniques.

La Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg a réalisé une vaste campagne dans ce domaine (des tests sur 12 poutres grandeur nature sont présentés) afin d'acquérir les connaissances scientifiques nécessaires et d'amener des recommandations de dimensionnement en fonction de différents paramètres. De plus, cette banque de données est utilisée pour fournir quelques recommandations de dimensionnement sur la capacité de flexion et de cisaillement des poutres à ouvertures circulaires. Ces directives techniques sont basées sur les principales conclusions des analyses des résultats expérimentaux. Enfin, cet article conclut par une brève comparaison entre le dimensionnement analytique des modèles concernant la flexion et le cisaillement à l'état ultime de ces éléments structuraux et l'analyse des résultats expérimentaux.

Mots-clés: BFHP, BFUP, Flexion, Cisaillement, Ouvertures circulaires.

1. Introduction

Dans la construction de bâtiments industriels en préfabrication béton, les toitures et planchers sont souvent constitués, dans le sens transversal, de poutres maîtresses précontraintes sur lesquelles sont disposés des éléments de couverture. Les poutres maîtresses, généralement réalisées avec une âme pleine, constituent un obstacle dans le sens longitudinal du bâtiment. Elles ne permettent pas le passage de conduites et câbles provenant des équipements de climatisation, de chauffage, sanitaires et électriques. Ces conduites et câbles doivent donc être placés sous les planchers ce qui entraîne une perte de la hauteur utile à chaque étage. Afin d'éviter ces inconvénients, il s'avère nécessaire de créer des ouvertures dans les âmes des poutres maîtresses (Fig. 1).

Dans la construction métallique, des poutres à ouvertures circulaires ou polygonales (poutres ajourées) sont connues depuis des décennies. Dans la construction en béton, la réalisation des ouvertures est plus difficile et nécessite des dispositions d'armatures de cisaillement et de traction oblique compliquées (figure 2). Afin de pouvoir réaliser des poutres économiquement compétitives, il paraît intéressant de remplacer cette armature par l'ajout de fibres métalliques dans le béton. Aussi, les fibres ont un effet positif sur les efforts de traction oblique dans les zones d'ancrage des câbles précontraints. Dans certains cas, il peut s'avérer opportun de réaliser des poutres précontraintes en béton fibré ultra-performant, en renonçant ainsi à la mise en place d'une armature passive.

Pour analyser ce problème, l'Institut des Technologies de l'Environnement Construit (ITEC) de la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR) a effectué, en collaboration avec des entreprises de préfabrication et des producteurs d'additifs, des études théoriques et expérimentales sur des poutres précontraintes en béton fibré à hautes et à ultra-hautes performances, avec des ouvertures circulaires.

Les objectifs de ces études étaient les suivants :

- analyser le comportement de poutres précontraintes en BFHP ou en BFUP avec des ouvertures circulaires aux états limites de service et ultime ;
- déterminer l'influence du diamètre et de l'espacement des ouvertures, du dosage en fibres métalliques, de l'intensité de la précontrainte et d'une éventuelle armature au cisaillement sur le comportement des poutres aux états limites de service et ultime ;
- appréhender le comportement sous charge des poutres précontraintes avec des ouvertures circulaires par une simulation numérique ;
- élaborer des indications pour le dimensionnement de poutres précontraintes avec des ouvertures circulaires.



Fig.1 Poutres ajourées en béton



Fig. 2 Armature correspondante

1.1. Bétons fibrés à hautes et ultra-hautes performances

La recherche active dans le domaine des matériaux cimentaires a mené au développement de bétons à hautes et à ultra-hautes performances. Les performances de ces bétons ne se limitent pas aux seules caractéristiques mécaniques, mais englobent également leur comportement rhéologique favorable ainsi que leur durabilité élevée. La connaissance de plus en plus pointue des différents bétons a permis de définir leurs qualités, mais aussi leurs faiblesses, et de remédier à ces dernières. Par rapport aux bétons ordinaires ou aux bétons à hautes performances, les bétons à ultra-hautes performances présentent une homogénéité et une compacité nettement plus élevées. Ceci se traduit par une résistance à la compression et un module d'élasticité plus hauts ainsi qu'une meilleure étanchéité aux agents extérieurs. Ces propriétés sont atteintes par l'abaissement du rapport eau/liant, par l'emploi d'adjuvants réducteurs d'eau et en optimisant le squelette granulaire ce qui favorise une diminution des pores.

La granulométrie des bétons ultra-performants ne comporte généralement pas de granulats grossiers. La quantité de liant qui se compose de ciment et d'additions réactives, est généralement supérieure à 500 kg/m^3 , elle peut atteindre des valeurs dépassant les 1000 kg/m^3 . Néanmoins, l'augmentation de la compacité et de la résistance à la compression rend ces bétons plus fragiles.

Depuis quelques années, les bétons à fibres sont sujets à de nombreux développements expérimentaux et industriels (figures 3 et 4). Ces matériaux composites particuliers présentent des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des bétons ordinaires, notamment au niveau de ses résistances à la traction et au cisaillement, de sa rigidité à l'état fissuré ainsi que de sa ductilité. Les bétons fibrés ultra-performants (BFUP) ont une matrice cimentaire similaire aux bétons ultra-performants, dans laquelle est ajouté un volume en fibres métalliques ou synthétiques important, souvent supérieur à 1%. Les BFUP ont généralement un comportement écrouissant en flexion, voir même en traction directe. Cette caractéristique permet dans certains cas de réaliser des éléments de structure sans armature passive soumis à des sollicitations de traction ou de flexion.



Fig. 3 Toiture de la station de péage du Viaduc de Millau

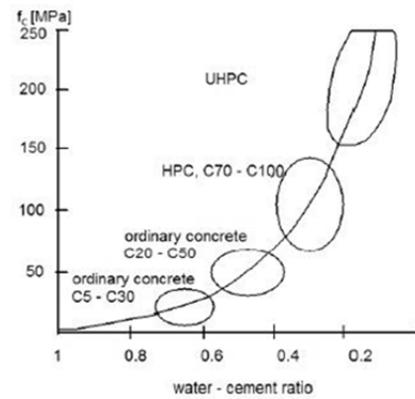


Fig. 4 Évolution des qualités de béton

Plusieurs types de BFUP sont actuellement commercialisés et se différencient principalement par leur composition et par la quantité, la nature et la géométrie des fibres. Malgré leurs performances exceptionnelles, les applications structurales des BFUP demeurent encore limitées. Comme tout nouveau matériau, un temps d'adaptation est nécessaire afin de développer des formes, des procédés et des règles de dimensionnement tenant compte de ses performances. Associés aux procédés traditionnels du béton armé et précontraint, les BFUP ouvrent de nouvelles voies dans la conception de structures plus élancées et de systèmes porteurs innovants et durables (figure 3).

1.2. Études expérimentales

Les études expérimentales effectuées à la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg sur les poutres ajourées en béton étaient divisées en deux séries d'essais. La première série, PU, comprenait cinq poutres quasi-rectangulaires en béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP). Les poutres avaient une longueur de 9.00 m, une hauteur de 1000 mm et une épaisseur de 80/100 mm. Les paramètres variables étaient l'intensité de précontrainte, le diamètre des ouvertures et l'espacement de béton entre les ouvertures. La deuxième série expérimentale PH comprenait sept poutres rectangulaires en béton fibré à hautes performances (BFHP). Les poutres avaient également une longueur de 9.00 m et une hauteur de 1000 mm, mais une épaisseur de 160 mm. Les paramètres variables étaient le taux de fibres métalliques, l'intensité de précontrainte, les dimensions des ouvertures et l'armature de cisaillement.

Les douze poutres ont été soumises à des essais de charge 4 points, sur une portée de 8.00 m, par l'application de deux charges concentrées disposées à 2.50 m des appuis et écartées de 3.00 m (voir la figure 12). L'objectif des essais consistait à analyser le comportement des poutres sous l'effet des sollicitations de flexion et de cisaillement. Il s'agissait, en particulier, de déterminer la résistance au cisaillement en fonction du taux de fibres et du diamètre des ouvertures.

Parallèlement aux études expérimentales, des études théoriques ont été entreprises dans le but d'analyser le comportement des poutres précontraintes en BFHP et en BFUP par une modélisation numérique à l'aide d'éléments finis. L'analyse numérique a été confrontée aux résultats des mesures. Cette confrontation a permis de vérifier les hypothèses de base ainsi que les modèles développés. Elle a également permis de donner des indications statiques et constructives concernant le dimensionnement de poutres précontraintes avec des ouvertures circulaires.

2. Série expérimentale PU (béton fibré ultra-performant)

2.1. Éléments d'essai

La première série expérimentale, PU, comprend cinq poutres quasi-rectangulaires en BFUP. Quatre de ces poutres ont des ouvertures circulaires ; la cinquième poutre, de référence, n'a pas d'ouvertures. Les poutres ont une longueur de 9.00 m, une hauteur de 1000 mm et une épaisseur de 80 mm en inférieur et de 100 mm en supérieur. L'armature de flexion est composée de quatre torons précontraints, d'un diamètre de 0,6' et d'une section de 150 mm². Trois de ces torons sont placés en inférieur et un toron en supérieur (figure 5). Afin d'éviter des contraintes à la compression trop

élevées à la fibre inférieure ou des contraintes à la traction trop élevées à la fibre supérieure, les torons ne sont pas tendus au maximum de leur capacité.

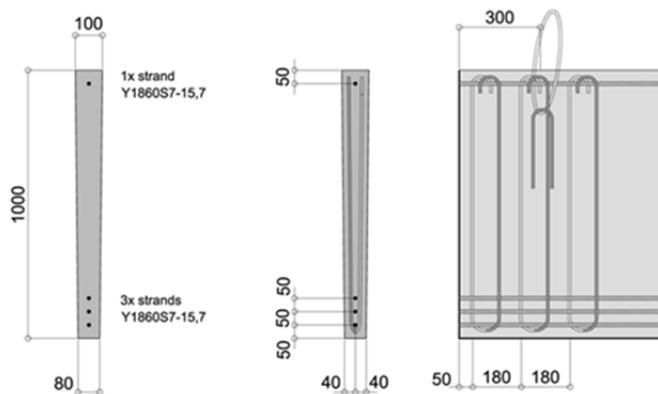


Tableau 1 – Caractéristiques des poutres testées

	ϕ [mm]	P_0 [kN]
PU 1	-	4 x 125
PU 2	400	4 x 125
PU 3	500	4 x 125
PU 4	500	4 x 175
PU 5	600	4 x 125

Fig. 5 Section des poutres en BFUP et détail d'armature aux extrémités

Le dimensionnement des poutres d'essais est effectué de façon à ce que la rupture se produise respectivement en flexion pour la poutre de référence et pour celle avec des ouvertures de faible diamètre et au cisaillement pour les poutres à ouvertures de plus grand diamètre. Hormis quelques étriers aux extrémités, les poutres ne comportent pas d'armature d'effort tranchant. Les paramètres variables sont le diamètre des ouvertures (400/500/600 mm), l'espacement de béton qui reste entre les ouvertures (600/500/400 mm) et le taux de précontrainte (4 x 125 kN et 4 x 175 kN). Le tableau 1 donne les caractéristiques des différentes poutres d'essai ; les figures 5 et 6 illustrent leur géométrie.

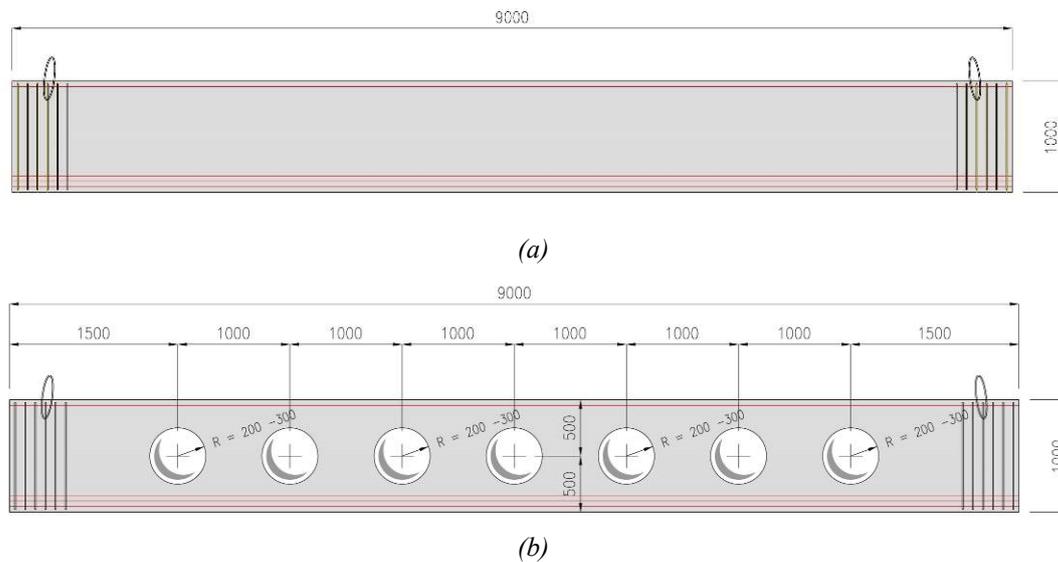


Fig. 6 Géométrie de (a) la poutre de référence PU 1 et (b) des poutres avec ouvertures

Les poutres d'essai de la première série expérimentale PU ont été bétonnées dans les usines de MFP Préfabrication SA à Cheyres (Suisse) dans un coffrage métallique. Ce coffrage fut conçu pour la réalisation des poutres de toiture en BFUP recouvrant l'agrandissement du Musée Olympique à Lausanne (Architecte : U. Brauen & D. Wälchli ; Ingénieur : A. Muttoni & M. Fernandes-Ruiz). Contrairement aux poutres de toiture du Musée Olympique, la plupart des poutres d'essai comportaient des ouvertures circulaires (figure 6-b).

2.2. Caractéristiques des matériaux

Les éléments d'essai de la première série expérimentale sont réalisés en béton fibré ultra-performant du type BSI (Béton Spécial Industriel) avec un dosage en fibres métalliques de 2.5% (200 kg/m³). Le BSI, développé par les entreprises Eiffage SA et Sika (France) SA, correspond à la définition de BFUP donnée par la recommandation de l'Association Française de la Construction (AFGC, 2013).

Le durcissement du béton s'est fait sans traitement thermique. Les mesures de consistance (slump flow test) sur le béton frais donnent un étalement (slump) de 650 mm en moyenne. L'air occlus varie entre 1 et 2 %. Les caractéristiques du béton durci, déterminées sur des échantillons cylindriques de dimensions ϕ 70/140 mm, donnent une densité ρ_c de 2'720 kg/m³, une résistance à la compression sur cylindre à 28 jours f_{cm28} de 190 MPa et un module d'élasticité E_{cm28} de 57 GPa. En ce qui concerne le comportement post-fissuration des BFUP, les recommandations de l'AFGC proposent deux types d'essai : des essais de flexion trois ou quatre points sur des plaques minces et des essais de flexion trois points sur des prismes entaillés. Pour les essais sur les plaques minces, de 30 mm, les figures 7 et 8 présentent l'installation de flexion quatre points ainsi que les déformations verticales au centre en fonction de la contrainte de flexion. Ces essais ont mis en évidence un comportement écrouissant avec une résistance équivalente à la traction par flexion de 19 MPa en moyenne.

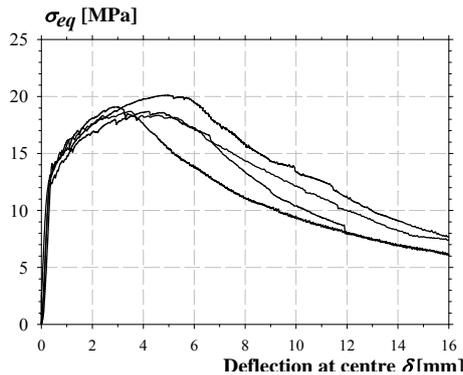


Fig. 7 Contrainte de flexion équivalente



Fig. 8 Dispositif d'essai de flexion 4 points

Pour déterminer le comportement à la traction post-fissuration des poutres dans les trois directions, verticale, horizontale et diagonale à 45°, l'entreprise a bétonné une plaque carrée de 1000 mm de hauteur, de 1000 mm de longueur et de 80 mm d'épaisseur. Cette plaque, coulée verticalement de la même manière que les poutres, fût découpée après son décoffrage en 12 prismes de 80 x 80 x 400 mm, selon l'esquisse de la figure 9. Les essais de flexion 3 points sur les prismes entaillés ont mis en évidence une variation importante de la résistance à la flexion en fonction de l'orientation des prismes dans la plaque carrée. La figure 10 donne l'évolution des ouvertures de la fissure dans l'entaille au centre CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) en fonction des contraintes de flexion équivalentes ; le tableau 2 donne les différentes valeurs de la résistance à la traction par flexion déterminées par la méthode inverse préconisée par la recommandation française (AFGC, 2013).

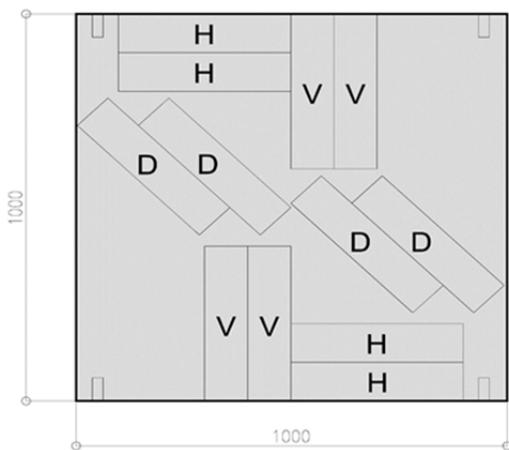


Fig. 9 Position et orientation des prismes

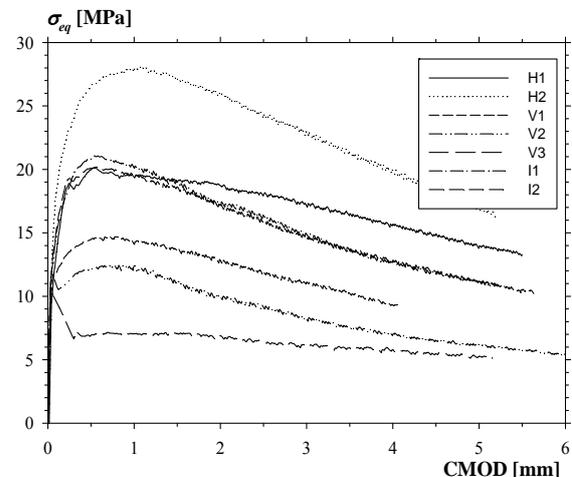


Fig. 10 Ouverture de la fissure d'entaille

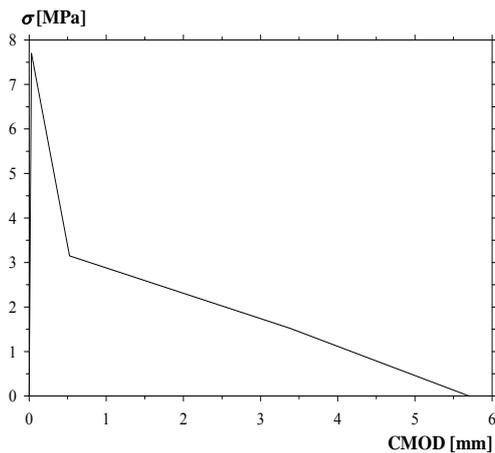


Tableau 2 Contraintes de traction en fonction de la direction

Direction	f_{fu} [MPa]
Horizontale	8.0
Diagonale	6.9
Verticale	4.1

Fig. 11 Résistance à la traction (méthode inverse)

Sur la base des résultats de mesure, les remarques suivantes peuvent être faites :

- En raison de la géométrie des échantillons le comportement des prismes entaillés avec un élancement de $l/h = 5$ est jugée plus représentatif des grandes poutres d'essai ($l/h = 8$) que celui des plaques fines ($l/h = 17$). Aussi, l'application de la méthode inverse à ces dernières donne une bonne estimation de la résistance à la traction d'un BFUP, soit une valeur finale de $f_{ct,f} = 8.9$ MPa.
- Les valeurs obtenues pour les résistances de flexion équivalentes (σ_{eq}) montrent de grandes différences en fonction de la direction, la résistance σ_{eq} variant de 24.0 MPa pour les prismes découpés en horizontal à 20.6 MPa (86 %) pour les prismes découpés en diagonale, et à 11.3 MPa (47 %) pour les prismes découpés en verticale. Ces résultats confirment donc l'importance de l'orientation des fibres et son influence sur le comportement d'un élément en BFUP, en particulier, sur sa résistance à la traction. Ce phénomène doit être pris en compte dans le dimensionnement de structures en BFUP.
- La figure 11 et le tableau 2 concernent la résistance à la traction directe déterminée selon la méthode inverse de la AFGC (2013) à partir des essais sur prismes entaillés. Cette résistance correspond à la valeur prise en considération pour le dimensionnement d'un élément en BFUP à la flexion et au cisaillement.

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des aciers de précontrainte et des aciers passifs, elles ont été déterminées par des essais classiques de traction. Pour les aciers passifs, la limite d'élasticité se situait à 497 MPa et la résistance à la traction à 555 MPa. Pour les aciers de précontrainte, ces valeurs étaient de 1'750 MPa, respectivement de 1'900 MPa.

2.3. Dispositif d'essai

Les poutres en BFUP ont été soumises à des essais de charge sur une portée de 8.00 m et sollicitées à la flexion et au cisaillement par l'application de deux charges concentrées et espacées de 3.00 m (figure 12). Les appuis sont formés par des rouleaux en acier durci permettant des déplacements horizontaux libres et symétriques par rapport au centre. Pour assurer une introduction des forces sans excentricités, les charges sont appliquées par des tiges en traction, articulées aux deux extrémités et ancrées dans le sol d'essai. Des systèmes de guidage sont disposés aux appuis et au milieu de la travée, afin d'éviter une instabilité des poutres très élancées. Les charges sont augmentées par paliers auxquels les mesures et observations sont faites. Dans la première partie, linéaire-élastique, les essais sont dirigés par la force ; dans la seconde partie, les essais sont dirigés par la déformation verticale.

Les charges sont mesurées par 4 cellules de force disposées sur les vérins, et les déformations verticales (flèches) par des capteurs inductifs LVDT en sept points. La mesure des déformations relatives longitudinales, en inférieur et en supérieur, ainsi que les déformations relatives verticales dans les zones entre les ouvertures, est effectué par des capteurs inductifs LVDT et des capteurs du type Omega. Les déformations sous un angle de 45° dans les ouvertures circulaires et entre les ouvertures sont observées par des capteurs inductifs LVDT. Toutes les mesures sont enregistrées en

temps réel par une chaîne de mesure du type HBM Spyder, à l'aide d'un logiciel Catman. L'évolution de la fissuration est observée aux différents niveaux de chargement et enregistrée par voie photographique.

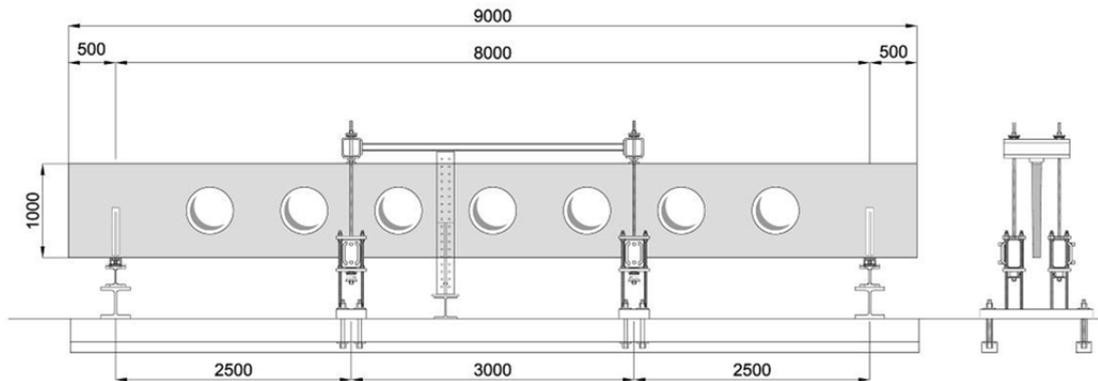


Fig. 12 Dispositif d'essai pour les poutres en BFUP

2.4. Résultats des essais

L'évolution des déformations verticales à mi-travée en fonction de l'augmentation des charges est reportée, pour les poutres PU1 à PU5, dans la figure 13. Le tableau 3 donne les charges ultimes mesurées et les flèches à mi-travée correspondantes. Pour toutes les poutres on observe, dans une première phase, une évolution linéaire des flèches correspondant au stade I, non fissuré. Cette évolution linéaire dû à l'effet de la précontrainte, se termine avec l'apparition des premières fissures, pour une charge correspondant à la résistance à la traction du béton dans la fibre inférieure. Dans une deuxième phase, les courbes s'inclinent et poursuivent une évolution quasi-linéaire, correspondant au stade II fissuré, jusqu'à une charge maximale, dictée par la résistance à la flexion ou au cisaillement des différentes poutres.

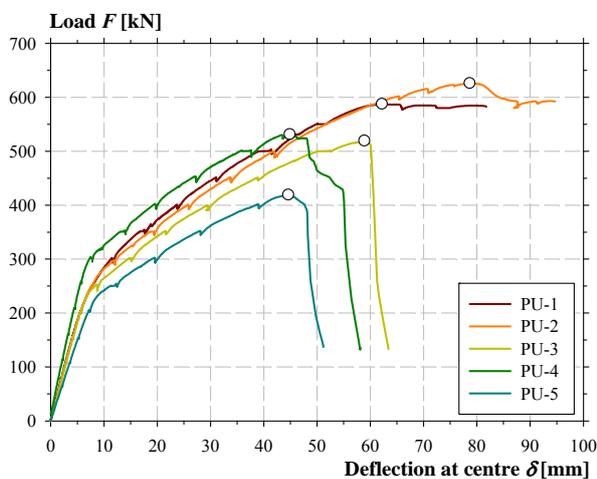


Fig. 13 Déplacements verticaux à mi-portée

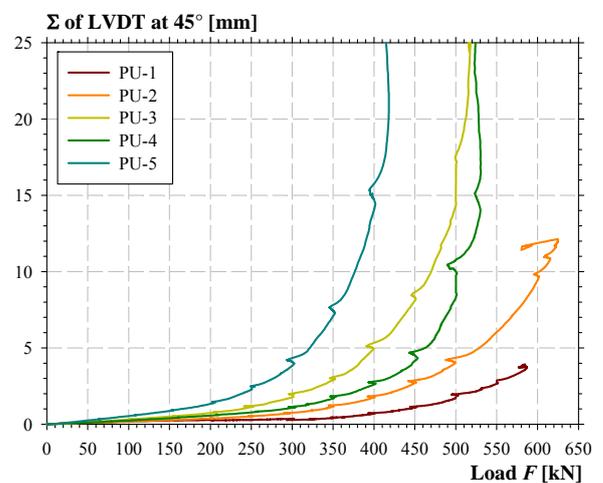


Fig. 14 Déplacements obliques à 45°

Pour les poutres PU1 et PU2, les déformations augmentent encore après le niveau de charge maximum (stade III) jusqu'à l'épuisement de la résistance à la flexion. Pour les poutres PU3 à PU5, la rupture, dictée par la résistance au cisaillement, intervient avant l'épuisement de la résistance à la flexion.

Tab. 3 Charges ultimes expérimentales et déplacements à mi-portée

Echantillon	F_u [kN]	δ_u [mm]
PU 1	587	62.3
PU 2	625 (+5 %)	78.8
PU 3	519 (-16 %)	59.0
PU 4	531 (-15 %)	45.0
PU 5	418 (-30 %)	44.7

La poutre PU1, de référence et sans ouvertures, subit une rupture à la flexion avec un écrasement du béton comprimé et une rupture partielle des torons de précontrainte. Le dosage en fibres élevé limite la formation de fissures obliques et permet d'éviter une rupture au cisaillement (figure 15-a). L'ouverture des fissures verticales de flexion reste fine jusqu'à des charges élevées en raison notamment de la précontrainte et du dosage important en fibres métalliques. Après avoir atteint la charge maximale, les déformations augmentent encore jusqu'à l'épuisement de la résistance et de la déformabilité à la flexion de la section de ruine. En raison d'une accumulation de l'énergie cinétique très élevée, la rupture est brutale, malgré une certaine modération par la présence des fibres métalliques.

Pour la poutre PU2, on observe également une augmentation des déformations après la charge maximale, jusqu'à l'épuisement de la résistance à la flexion de la section de ruine. Les ouvertures de 400 mm n'influencent donc pas de façon significative la résistance au cisaillement (figure 15-b). Contrairement à la poutre PU1, la rupture n'intervient pas dans la section médiane, mais dans une section ajourée proche de l'introduction de la charge. La charge de ruine de 625 kN est légèrement supérieure à celle de la poutre de référence PU1 (587 kN). Cette augmentation de la résistance est probablement due à une orientation plus favorable des fibres dans la section ajourée.

Les deux poutres PU3 et PU4 subissent une rupture au cisaillement avec une fissuration dictée par l'effort tranchant et la présence des ouvertures (figure 15-c). La rupture s'est produite de façon très brutale en raison de la diminution de la résistance au cisaillement due à la présence des ouvertures. La charge de rupture est réduite de 587 kN à 519 kN (-11.6 %) pour la poutre PU3 et à 531 kN (-9.5 %) pour la poutre PU4. L'augmentation de la précontrainte de 30% a ainsi eu pour effet une augmentation de la charge de ruine de 2 %. Mais, la précontrainte a permis d'élever le niveau de la charge de fissuration de 30 % environ. A la ruine, on observe une réduction de la flèche de 25 % pour la poutre PU4, ce qui rend son comportement plus fragile.

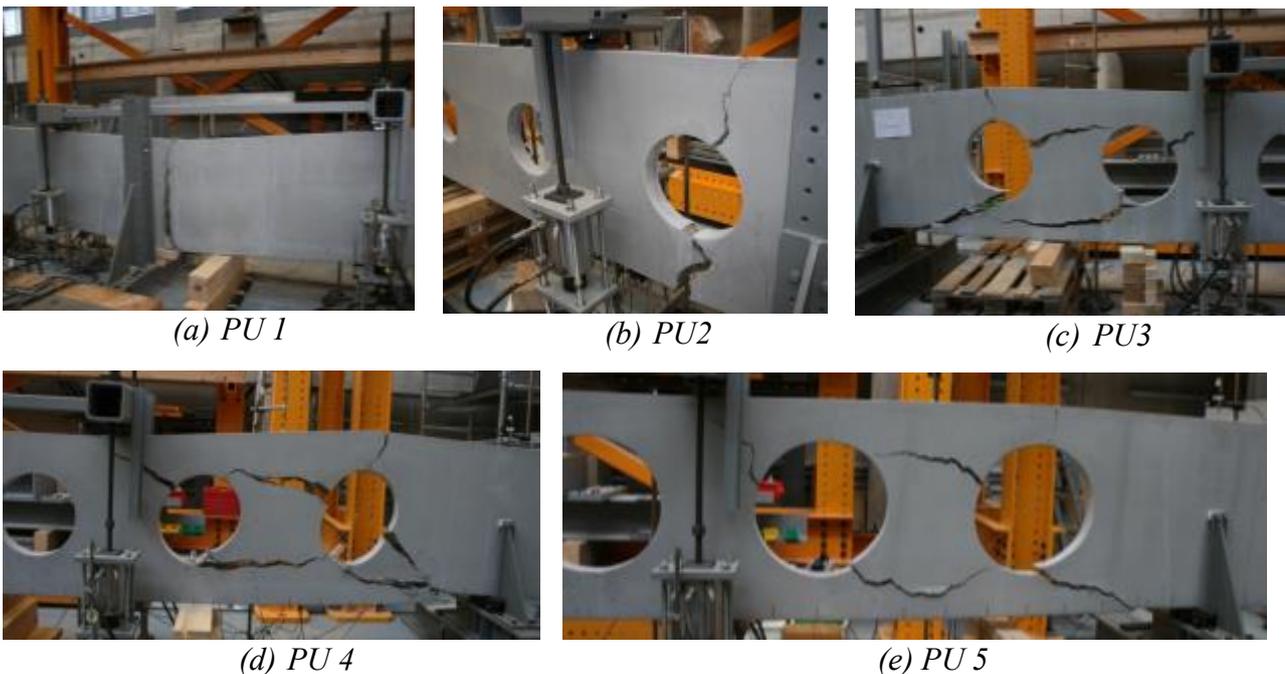


Fig. 15 Mécanisme de rupture des poutres de la série PU

Pour la poutre PU5 avec des ouvertures de 600 mm, on observe une nette diminution de la charge ultime à 418 kN (-28.8 %) et un mécanisme de ruine au cisaillement particulier (figure 15-e). Les grandes ouvertures et les zones restreintes de béton intermédiaire provoquent une réduction sensible de la résistance au cisaillement. Le mécanisme de ruine particulier est dicté par deux fissures horizontales entre deux ouvertures proches de l'introduction d'une charge et d'une fissure de cisaillement entre la dernière ouverture et l'appui. Une analyse du mode de rupture montre que le mécanisme peut être assimilé à celui d'une poutre Vierendeel.

2.5. Analyse des résultats

Les essais de charge effectués sur les cinq poutres précontraintes en BFUP avec des ouvertures circulaires ont permis de faire les observations suivantes :

- Les ouvertures circulaires provoquent une diminution de la résistance des poutres en fonction de la taille des ouvertures. Cette diminution reste faible pour des ouvertures inférieures à 400 mm où la rupture est provoquée par la flexion. Pour des ouvertures de 500 mm, où la rupture est provoquée par le cisaillement, la perte de résistance est de 11.6 % (PU3). Pour des ouvertures de 600 mm, la rupture est également provoquée par le cisaillement, avec une perte de résistance de 28.8 % (PU5).
- On constate que des ouvertures d'un diamètre inférieur à 40 % de la hauteur des poutres n'influencent que faiblement la résistance au cisaillement. Des ouvertures d'un diamètre de 50 % ou supérieures provoquent une réduction sensible de la résistance au cisaillement. Des ouvertures d'un diamètre correspondant à 50 % de la hauteur constituent donc une valeur qui ne devrait pas être dépassée pour ce type d'éléments.
- La zone de béton entre les ouvertures doit être supérieure à 50 % de la hauteur de la poutre, afin d'assurer une résistance suffisante au cisaillement.
- Une comparaison des différentes poutres en BFUP montre que, dans la partie en stade I, la rigidité baisse en fonction de l'augmentation des ouvertures. Cette baisse peut être déterminée par la prise en compte de la diminution de l'inertie due aux ouvertures.
- La rupture des différentes poutres se fait de façon brutale à très brutale. Pour une rupture à la flexion, la résistance à la compression très élevée provoque une forte accumulation de l'énergie cinétique qui se libère instantanément. Pour une rupture au cisaillement, la ductilité restreinte du BFUP pour des éléments de grande hauteur statique constitue la cause principale de la rupture brutale.

Ces affirmations ne peuvent être généralisées, elles concernent des poutres similaires aux poutres testées avec un dosage en fibres métalliques égal ou supérieur à 2.5 % (200 kg/m³).

3. Série expérimentale PU (béton fibré ultra-performant)

3.1. Éléments d'essai

La deuxième série expérimentale comprend sept poutres de section rectangulaire, en béton fibré à hautes performances. Six de ces poutres ont des ouvertures circulaires de 400 mm et 500 mm, la septième poutre de référence n'a pas d'ouvertures. Les poutres ont une longueur de 9.00 m, une hauteur de 1'000 mm et une épaisseur de 160 mm. L'armature de flexion est composée de huit torons précontraints, d'un diamètre de 0.6' et d'une section de 150 mm². Six de ces torons sont placés en inférieur et deux torons en supérieur. Afin d'éviter des contraintes trop élevées dans le béton les torons ne sont pas tendus au maximum de leur capacité. Le dimensionnement des poutres d'essais est fait de façon à ce que la rupture se produise au cisaillement. Hormis quelques étriers aux extrémités, les poutres PH 1 à PH 5 ne comportent pas d'armature d'effort tranchant. Les paramètres variables sont le diamètre des ouvertures (400 et 500 mm), le taux de précontrainte (8 x 125 kN et 8 x 175 kN), le dosage en fibres (30 et 40 kg/m³) et la présence d'une armature de cisaillement. Le tableau 4 donne les caractéristiques des différentes poutres d'essai.

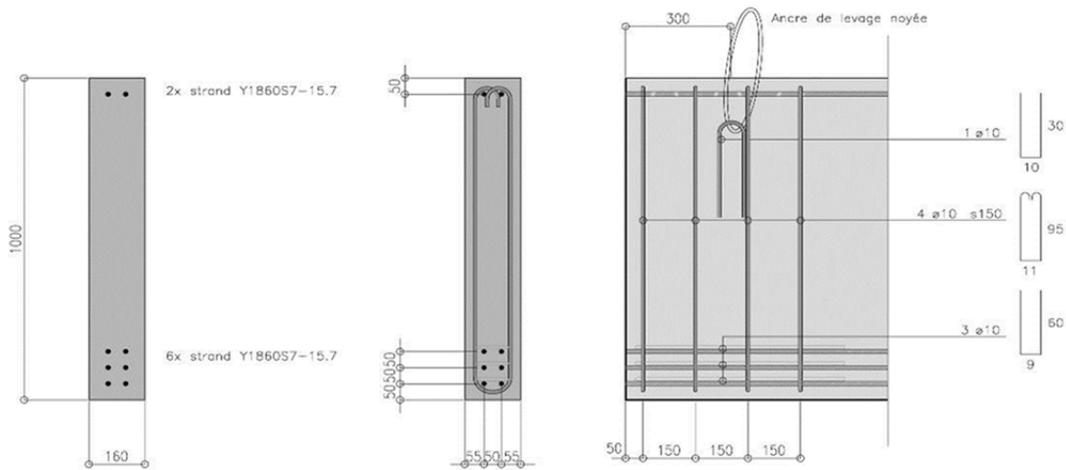
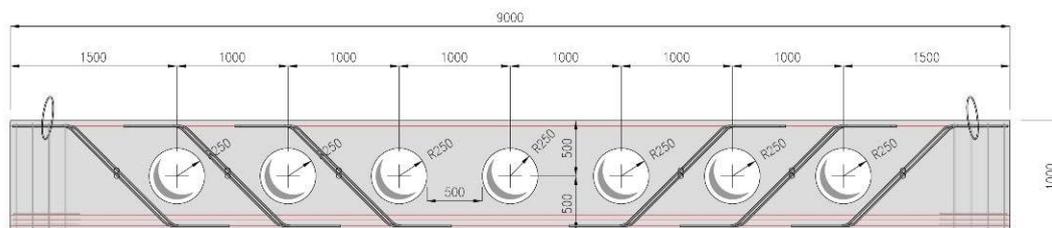


Fig. 16 Section transversale série PH et détail de renforcement aux extrémités

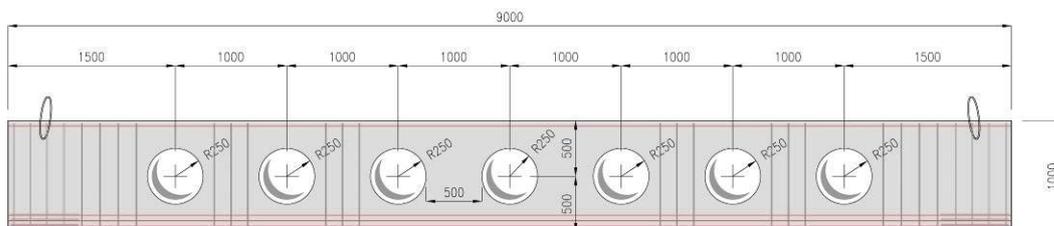
La géométrie d'ensemble des poutres PH est similaire à celle de la série PU (figures 6 et 16) à l'exception des deux poutres PH 6 et PH 7, qui présentent une armature de cisaillement, l'une avec des barres obliques à 45° et l'autre avec des étriers verticaux (figure 17).

Tableau 4 Spécifications des poutres PH

	ϕ [mm]	P_0 [kN]	Fibres [kg/m ³]	A_{sw}
PH 1	-	8 x 125	30	-
PH 2	400	8 x 125	30	-
PH 3	500	8 x 125	30	-
PH 4	500	8 x 125	40	-
PH 5	500	8 x 175	30	-
PH 6	500	8 x 125	30	2 ϕ 16
PH 7	500	8 x 125	30	3 ϕ 10



(a) PH 6



(b) PH 7

Fig. 17 Géométrie et plans d'armature des poutres PH 6 et PH 7

3.2. Propriétés des matériaux

Les poutres d'essai ont été réalisées dans les usines de préfabrication Element SA à Tavel (Suisse). Le béton fibré à hautes performances de qualité C80, dont la composition fut déterminée par Element SA, comporte une matrice de ciment Portland avec des ajouts de laitier ainsi qu'une teneur en fibres de 30 et 40 kg/m³. Les fibres métalliques en double-crochet de type *Dramix 5D-65/60-BG* correspondent à la nouvelle génération de fibres développées par Bekaert SA. Parallèlement au bétonnage des poutres d'essai, des échantillons cylindriques (ϕ 110/220 mm) et prismatiques (550/150/150 mm) ont été confectionnées pour déterminer les propriétés mécaniques du béton. Les essais sur les échantillons cylindriques ont donné une densité du béton ρ_c de 2530 kg/m³, un module d'élasticité $E_{c,90}$ de 45 GPa et une résistance à la compression f_{c28} de 90 MPa.

En ce qui concerne le comportement post-fissuration, des essais de flexion 3 points ont été effectués sur des prismes entaillés (550/150/150 mm) conformément aux directives de la RILEM (2001) et du fib Model Code (2010). La figure 18 présente l'évolution de l'ouverture de la fissure dans l'entaille au centre (*CMOD*) en fonction des contraintes à la traction des prismes avec une teneur en fibres de 30 kg/m³ respectivement de 40 kg/m³. Le tableau 5 donne une comparaison des deux compositions de béton, où f_{rj} ($j = 1, 2, 3, 4$) indique les résistances résiduelles pour des valeurs de *CMOD* = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 mm.

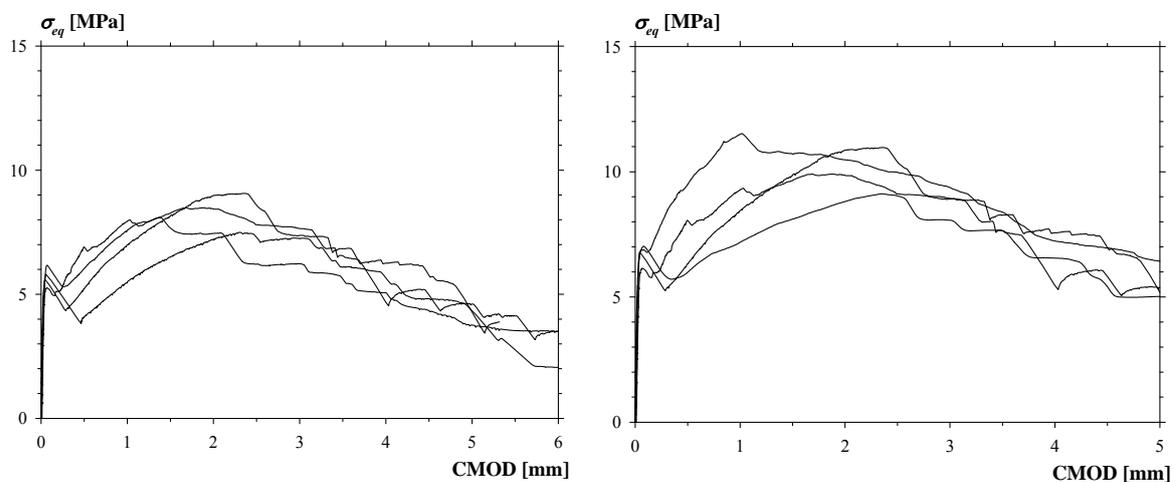


Fig. 18 Contrainte de flexion v.s. *CMOD* (béton de 30 kg/m³ et 40 kg/m³)

Afin d'évaluer les résistances caractéristiques du BFHP soumis à un effort de traction, les résultats des essais sont traités selon les recommandations de l'AFGC (2013) et du Model Code 2010 (méthode inverse, modèle rigide-plastique). Partant des courbes de la figure 18 ainsi que du tableau 5, la contrainte résiduelle de traction préconisées par le Model Code 2010 vaut $f_{Ftu} = 2.5$ MPa pour le béton avec 30 kg/m³ respectivement $f_{Ftu} = 3.2$ MPa pour le béton avec 40 kg/m³ de fibres.

Tableau 5 Comparaison entre les BFHP avec 30 et 40 kg/m³

	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
30 kg/m ³	5.6	7.8	7.5	5.9
40 kg/m ³	7.5	9.6	9.6	8.0
Différence	+ 34 %	+23 %	+28 %	+36 %

3.3. Dispositif et méthode d'essai

Le dispositif d'essai pour les poutres de la série expérimentale PH est similaire à celui de la série PU, avec les ajustements nécessaires pour s'adapter à la section plus large des poutres en BFHP. En outre, le guidage latéral à mi-portée n'a pas été mis en place. Les poutres de la série PH étant plus larges, le risque de déversement n'existe pratiquement plus.

3.4. Résultats des essais

La figure 19 présente les déformations verticales en fonction de la charge appliquée aux vérins et le tableau 6 donne les charges maximales atteintes pour les déformations verticales correspondantes. Pour toutes les poutres, on observe dans une première phase en stade non fissurée une augmentation

linéaire des déformations verticales, due aux effets de la précontrainte. La légère différence de pente entre les poutres correspond à la diminution de l'inertie flexionnelle, due aux effets des ouvertures circulaires. Après l'apparition des fissures, verticales et obliques, le comportement des poutres diffère fortement.

Pour la poutre de référence PH 1, on constate une seconde partie quasi-linéaire correspondant à l'évolution en stade II, fissuré. La résistance à la flexion ne peut être atteinte en raison d'un épuisement prématuré de la résistance au cisaillement à 830 kN. Le dosage en fibres n'est en effet pas suffisant pour remplacer une armature de cisaillement.

La poutre PH 2 (ouvertures de 400 mm), poursuit une brève évolution en stade fissuré avant de subir une rupture au cisaillement à 560 kN. Pour les poutres PH 3, PH 4, PH 5 (ouvertures de 500 mm), l'évolution en stade fissuré reste très limitée. La résistance au cisaillement est réduite à 390 kN, 380 kN et 436 kN.

Les poutres PH 6 et PH 7 (ouvertures de 500 mm et armature d'effort tranchant légère) poursuivent une évolution bilinéaire similaire à celle de la poutre de référence et atteignent des charges de 870 kN et 696 kN. Les armatures obliques permettent ainsi d'augmenter la charge de ruine et de diminuer les flèches en stade II. Les armatures verticales (étriers) ont une efficacité légèrement moindre.

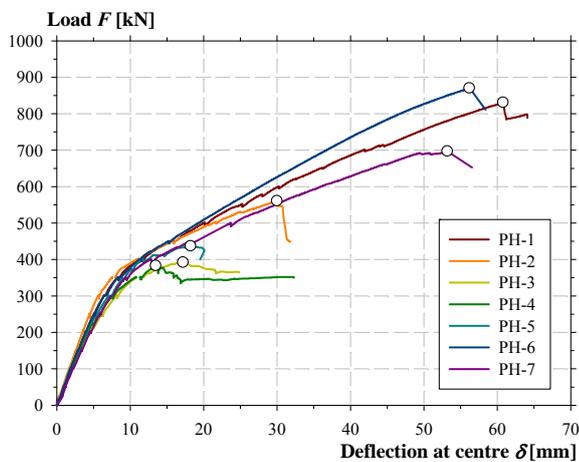


Fig. 19 Déplacements verticaux à mi-portée

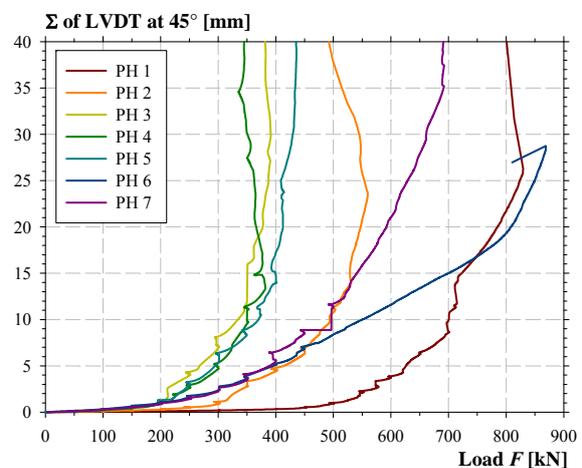


Fig. 20 Déplacements obliques à 45°

La figure 20 donne les déformations observées à 45° dans les ouvertures. On y constate, pour les poutres PH 3, PH 4, PH 5 une forte augmentation des déformations et une importante ouverture des fissures obliques qui interviennent de manière précoce et mènent à une rupture par effort tranchant avant d'avoir atteint la résistance à la flexion.

Tableau 6 – Charges ultimes et déplacements verticaux correspondants

Échantillon	F_u [kN]	δ_u [mm]
PH 1	830	64.1
PH 2	560 (-33 %)	31.8
PH 3	390 (-53 %)	24.9
PH 4	380 (-54 %)	32.3
PH 5	436 (-48 %)	20.1
PH 6	870 (+5 %)	58.4
PH 7	696 (-16 %)	56.6

Les résultats obtenus lors de la réalisation de chaque essai comprennent la charge expérimentale de rupture (F_u) et le déplacement vertical correspondant à mi-portée (δ_u), comme présenté au tableau 6. En outre, les valeurs expérimentales concernant l'influence des ouvertures circulaires sur la rupture à la flexion et au cisaillement sont données dans le tableau 6.

3.5. Analyse des résultats

Sur la base des résultats expérimentaux, les remarques suivantes peuvent être faites:

- Toutes les poutres en BFHP testées présentent une rupture au cisaillement et un comportement fragile à la rupture ; cette fragilité est plus prononcée pour des ouvertures circulaires plus grandes.
- Concernant les trois premières poutres PH 1, PH 2, PH 3, une augmentation du diamètre de l'ouverture produit un effet négatif sur la charge ultime de la poutre. Les expériences montrent en effet qu'une ouverture qui représente 50% de la hauteur de l'âme, résulte en une perte de 50 % de la résistance d'une poutre ajourée.
- Une augmentation de la teneur en fibres devrait augmenter la charge ultime d'une poutre dans les mêmes proportions. Entre les poutres PH 3 et PH 4, avec des ouvertures de 500 mm et une addition de 33 % de fibres pour la seconde, la charge ultime était quasi-similaire, ce qui est, d'une certaine façon, un résultat contradictoire. Ce résultat, qui peut en partie dépendre d'une distribution et d'une orientation défavorable des fibres dans la zone de rupture, démontre probablement que le taux de fibre utilisé n'est pas suffisant pour garantir une contribution significative de ces dernières à la résistance ultime de la poutre. Ce résultat renforce l'importance de la distribution et de l'orientation des fibres sur le comportement structural des éléments en béton fibré, ainsi que l'idée d'un taux minimal de fibres.



PH 1



PH 2



PH 3



PH 4



PH 6



PH 7

Fig. 21 Mécanismes de rupture des poutres PH 1 à PH 7

- Une augmentation au niveau de la force de précontrainte n'affecte que le comportement avant la fissuration ; elle n'engendre ainsi pas d'augmentation significative de la résistance. La charge de fissuration est augmentée de 10 % environ, les flèches à mi-portée sont diminuées de 12 %.
- L'armature passive produit un effet bénéfique contre la rupture au cisaillement et augmente la résistance au cisaillement de la poutre. Les armatures d'effort tranchant de la poutre PH 7 peuvent être considérées comme simples en ce qui concerne leur mise en place. Elles sont donc nettement moins complexes qu'une armature de cisaillement pour une poutre en béton non fibré avec des ouvertures circulaires.
- On constate ainsi qu'un léger renforcement au cisaillement à l'aide d'étriers verticaux ou d'une armature en diagonale, combiné avec un béton fibré donne des résultats positifs. Les poutres PH 6 et PH 7 présentent des charges de rupture équivalentes ou plus élevées que la poutre de référence.
- Pour les deux poutres PH 6 et PH 7, on observe en correspondance d'une des ouvertures un mécanisme de rupture au cisaillement localisée dans la membrure supérieure et la membrure inférieure, qui ne sont pas renforcées par des armatures d'effort tranchant.
- L'évolution des flèches à mi-portée et des déplacements en diagonale reportés au figures 19 et 20 mettent en évidence un comportement bilinéaire, avec en première phase un stade I, non-fissuré, et en deuxième phase un stade II, fissuré, avec une rigidité plus faible. En raison d'une rupture prématurée au cisaillement, le stade II ne peut se développer que de façon partielle.

4. Recommandations de dimensionnement

4.1. Réflexions générales

Ce chapitre présente des possibilités de modélisation ainsi qu'une série de recommandations pour le dimensionnement à la flexion et au cisaillement de poutres en BFUP et en BFHP à ouvertures circulaires, sur la base des études expérimentales effectuées. Ces recommandations sont utilisées pour procéder à la détermination des résistances à la flexion et au cisaillement ainsi qu'à la comparaison avec les charges ultimes expérimentales. Avant de considérer individuellement les deux classes de béton (BFUP et BFHP), des réflexions plus générales sont proposées, qui consistent en des recommandations pratiques applicables aux poutres en béton fibré à ouvertures circulaires :

- La présence de fibres d'acier influence le comportement structural de poutres précontraintes à ouvertures circulaires par une amélioration des déformations et de la fissuration. L'effet bénéfique provenant de la présence de fibres est dépendant de leur quantité, distribution et orientation le long de l'élément. En l'absence d'une armature de cisaillement, la résistance au cisaillement d'une poutre à ouvertures circulaires est essentiellement déterminée par la contribution des fibres à la reprise des efforts de traction dans le mécanisme de ruine.
- L'augmentation de la charge ultime et de la ductilité est plus marquée pour du béton présentant une teneur en fibres plus élevée. Il paraît donc indispensable de prescrire un dosage minimum en fibres afin de limiter des ruptures fragiles et dangereuses.
- Pour des efforts de flexion, la contribution des fibres métalliques au comportement structural de poutres ajourées intervient principalement à l'état limite de service. Concernant la résistance à la flexion, les résultats analytiques et expérimentaux montrent que ce sont principalement les câbles de précontrainte qui la gouvernent.
- Les essais de charge ont montré que la résistance au cisaillement de poutres ajourées pouvait fortement être améliorée par une armature passive au cisaillement sous forme d'étriers verticaux ou de barres longitudinales relevées à 30° ou 45°. Pour reprendre des charges concentrées, une telle armature passive est nettement plus efficace qu'un taux plus élevé de fibres. Néanmoins, un certain taux minimal de fibres permet de renoncer à une armature compliquée de répartition et d'ancrage.

4.2. Recommandations de dimensionnement pour des éléments en BFUP

Ce chapitre traite les principales conclusions concernant le dimensionnement d'éléments de structure en BFUP, issues de la confrontation entre les études expérimentales et les réflexions analytiques selon les codes et normes actuelles (AFGC, 2013 et Model Code, 2010). L'analyse porte, d'une part, sur la détermination de la résistance en flexion au moyen d'un équilibre des contraintes σ et des déformations ε dans la section transversale (figure 22) et, d'autre part, sur la résistance au cisaillement, déterminée par une comparaison des différents modèles de dimensionnement :

- La contribution à la résistance à la flexion provenant de l'utilisation d'un BFUP se trouve essentiellement dans la résistance à la compression élevée de ce dernier ($f_{ck} = 190$ MPa), qui équilibre les forces mobilisées par les câbles de précontrainte. Le comportement en traction des fibres après fissuration n'augmente la résistance en flexion que de façon insignifiante ; elle rend la contribution des fibres presque négligeable. Les calculs analytiques confirment que plus de 90 % de la résistance ultime des poutres ajourées proviennent de la résistance des câbles de précontrainte.
- Quant à la résistance au cisaillement, le choix parmi les différents modèles considérés s'est fait en faveur des formules décrites dans les recommandations de l'AFGC (2013) et d'un modèle simplifié basé sur l'équilibre global (Figure 23). Les premières décrivent la résistance à la traction des tirants dans le béton d'âme en fonction de la contrainte de traction résiduelle $\sigma_{r,f}$ du béton fibré (tableau 7). Le modèle simplifié est basé sur l'hypothèse que la résistance au cisaillement provient de la résistance à la traction $f_{ct,f}$ du béton fibré entre les ouvertures.
- Le mécanisme de ruine au cisaillement observé expérimentalement a mis en évidence que la meilleure valeur de la résistance en traction du béton était donnée par les essais sur des prismes entaillés, en diagonale et en verticale. En ne considérant que les valeurs verticales les résultats mèneraient à des valeurs de dimensionnement trop conservatrices (tableau 2).
- Sur la base des réflexions précédentes, le modèle simplifié (figure 23) conduit à une estimation satisfaisante de la résistance au cisaillement d'une poutre ajourée en béton, surtout dans le cas d'ouvertures majeures. Néanmoins, la formulation simple du modèle n'intègre pas les effets défavorables de la traction concentrée aux abords des ouvertures et l'influence bénéfique de la diffusion graduelle de la plasticité due à la présence des fibres.

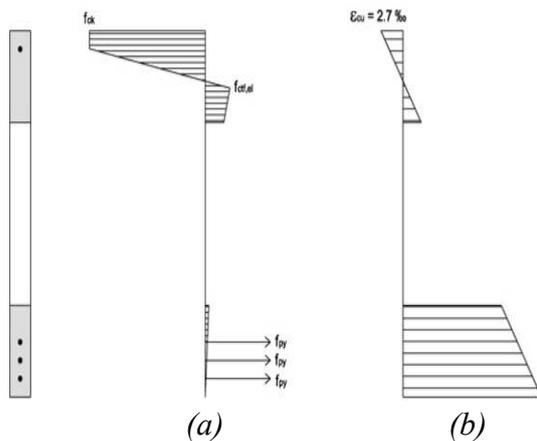


Fig. 22 Répartition des contraintes σ et des déformations ε dans une section

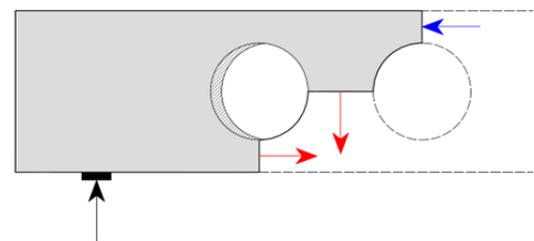


Fig. 23 Modèle de calcul simplifié pour la résistance au cisaillement

Tableau 7 : Charges ultimes de dimensionnement au cisaillement pour le BFUP

Specimen	ϕ [m]	AFGC 2013			Modèle de calcul simplifié		
		$\sigma_{r,f}^{10}$ [MPa]	$V_{r,f}$ [kN]	$V_{r,f}/P_u$	$f_{ct,f}^{11}$ [MPa]	$V_{r,f}^{12}$ [kN]	$V_{r,f}/P_u$
PU 1	0.0	2.8	377		5.5	294	-
PU 2	0.4	2.8	226		5.5	313	-
PU 3	0.5	2.8	188	72.5 %	5.5	260	95.0 %
PU 4	0.5	2.8	188	70.9 %	5.5	266	93.0 %
PU 5	0.6	2.8	151	72.4 %	5.5	209	95.0 %

4.3. Recommandations de dimensionnement pour des éléments en BFHP

Comme déjà indiqué pour la première série expérimentale PU pour les éléments en BFUP, la contribution à la traction des fibres est également négligeable pour la résistance en flexion des éléments en BFHP. La résistance de la poutre dépend essentiellement de la résistance mobilisée par les câbles de précontrainte. En ce qui concerne la résistance au cisaillement, la comparaison entre les différents modèles de dimensionnement conduit aux conclusions suivantes:

- La résistance à l'effort tranchant assurée par le béton fibré entre les ouvertures circulaires détermine la résistance au cisaillement. Cette contribution (tableau 8, $V_{r,f}$) peut être estimée de manière satisfaisante et généralement conservatrice par le modèle simplifié représenté à la figure 23. Les différences entre les charges ultimes expérimentales et les valeurs calculées pour les cinq premières poutres se situent entre un maximum de -20% (conservateur) et un minimum de $+7\%$.
- Néanmoins, la contribution des fibres métalliques, où le mécanisme de rupture est déclenché, ne devrait être prise en considération qu'en présence d'un comportement durcissant du béton en traction, ce qui signifie que la résistance de la poutre reste assurée après fissuration.
- La contribution provenant de l'armature de cisaillement correspond environ à la moitié de la résistance au cisaillement, ce qui est également confirmé par les études expérimentales. Pour la poutre PH6 (armature en diagonale), la partie correspondant à l'armature de cisaillement représente 45% de la résistance et 55% pour la poutre PH 7 (étriers verticaux).

Tableau 8 : Charges ultimes de dimensionnement au cisaillement pour le BFHP

Specimen	$f_{ct,f}^{13}$ [MPa]	$V_{r,f}^{14}$ [kN]	$V_{r,s}^{15}$ [kN]	V_r [kN]	P_U [kN]	V_r/P_u
PH 1	2.5	416	-	416	415	100 %
PH 2	2.5	250	-	250	280	89 %
PH 3	2.5	208	-	208	195	107 %
PH 4	3.2	280	-	280	190	131 %
PH 5	2.5	208	-	208	218	95 %
PH 6	2.5	208	145	353	435	81 %
PH 7	2.5	208	158	366	348	105 %

¹⁰ $\sigma_{r,f}$ calculé selon 6.2(2) dans (AFGC, 2013)

¹¹ $f_{ct,f}$ résultats en considérant un modèle rigide-plastique rapporté dans le Model Code 2010

¹² $V_{r,f} = b_w (1-\phi) f_{ct,f}$

¹³ $f_{ct,f}$ résultats en considérant un modèle rigide-plastique rapporté dans le Model Code 2010

¹⁴ $V_{r,f} = b_w (1-\phi) f_{ct,f}$

¹⁵ $V_{r,s}$ calculé en fonction de 6.2 dans (AFGC, 2013), et dépendant du type d'armature de cisaillement

5. Conclusions

Durant les années 2012 et 2013, la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg a procédé à des études théoriques et expérimentales sur le comportement en flexion et en cisaillement de poutres précontraintes en BFHP et en BFUP avec des ouvertures circulaires (poutres ajourées). Les résultats expérimentaux ainsi que les principales analyses qui en découlent, permettent de tirer un certain nombre de conclusions pour la conception de poutres ajourées en béton. Ainsi, et au vu de ce qui a été mentionné dans les chapitres précédents, les résultats suivants peuvent être dégagés:

- Les poutres précontraintes en BFHP et en BFUP constituent des solutions intéressantes au problème architectural étudié qui consiste à introduire des ouvertures circulaires dans les âmes afin de créer un passage pour toute sorte de conduites (chauffage, climatisation, électriques ou sanitaires).
- Les essais ont montré que les poutres en BFUP sont particulièrement adaptées pour des charges réparties, faibles à moyennes. Dans ce domaine, leur légèreté et leur élégance peuvent particulièrement être mis en évidence.
- Dans le domaine des charges plus élevées, réparties et concentrées, des poutres ajourées en BFHP légèrement armées sont mieux appropriées que des poutres en BFUP sans aucune armature passive. Les efforts de cisaillement provenant des charges concentrées, peuvent être repris par des armatures passives simples. La contribution des fibres à la reprise de l'effort tranchant peut être déterminée par un modèle simplifié. Pour des charges concentrées élevées ou pour des géométries différentes de celles testées, il faudra faire appel à des méthodes de calcul plus évoluées aux éléments finis, linéaires ou non linéaires.
- Les ouvertures circulaires produisent un effet négatif en ce qui concerne la capacité de résistance au cisaillement de poutres ajourées en béton. Les essais ont montré que la diminution de charge était plus marquée pour les poutres en BFHP en raison du taux de fibres métalliques nettement plus élevé.
- Le diamètre des ouvertures doit être limité à 50 % de la hauteur totale de l'âme des poutres. Pour des ouvertures plus grandes, la résistance au cisaillement baisse de façon très marquée. Un autre critère géométrique concerne la zone de béton entre les ouvertures. La distance entre deux ouvertures doit être supérieure à la moitié de la hauteur de l'âme, afin de disposer d'une bielle suffisante pour résister aux efforts de cisaillement. La limitation du diamètre des ouvertures et leur espacement permettent également d'éviter une rupture trop fragile.
- Le dosage en fibres métalliques doit être supérieur à 40 kg/m^3 afin d'assurer un comportement structurel correct en flexion d'un élément en BFHP. Ces fibres métalliques doivent être de très haute résistance. En cas de fibres ordinaires, le dosage doit être supérieur.
- Les modèles analytiques concernant la résistance à la flexion et au cisaillement de poutres ajourées en béton ont montré une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Il est cependant recommandé de procéder à des études plus avancées pour le dimensionnement de poutres dont les ouvertures circulaires seraient différentes de celles rencontrées durant ces campagnes expérimentales.

Le présent travail de recherche constitue une contribution au dimensionnement de poutres précontraintes en BFHP et en BFUP, avec des ouvertures circulaires. Des analyses théoriques plus avancées (analyses au moyen d'éléments finis non-linéaires) et expérimentales (variation d'autres paramètres) sont cependant nécessaires pour améliorer les connaissances dans ce domaine.

6. Remerciements

Les études théoriques et expérimentales ont été financées par un fond de recherche de la Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg. Elles ont eu le soutien de plusieurs entreprises : *MFP Préfabrication SA* et *BSI Eiffage* pour les poutres en BFUP et, pour les poutres en BFHP, *Element SA*, *Bekaert AG* et *Sika AG*. Les auteurs tiennent à remercier sincèrement ces entreprises pour leur soutien de ces recherches.

7. Références

- [1] AFGC-SETRA, Interim recommendations, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. Paris, 2013
- [2] BRÜHWILER, E., MOREILLON, L., SUTER, R. Bétons fibrés ultra-performants, Proceedings of the UHPC Symposium in Fribourg (Switzerland), October 26, 2011, Fribourg, 2011, 207 pp.
- [3] Fédération Internationale du Béton (fib). Shear and punching shear in RC and FRC elements – Workshop October 15-16, 2010, Salò. Bulletin 57, Lausanne, 2010.
- [4] Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), March 2012
- [5] MOREILLON, L., Shear and punching shear behaviour of structural elements in high performance fibre reinforced concrete, PhD Thesis of the Université Paris-Est, March 2013.
- [6] MOREILLON, L., NSEIR, J., TOMAS, J., SUTER, R., Structural behaviour of cellular beams in UHPFRC, RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, October 1-3, 2013, Marseille, France
- [7] RILEM TC 162-TDF, "Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete", *Materials and Structures*, 34(1), 3-6 (2001)
- [8] SUTER, R., TOMAS, J., MOREILLON, L., NSEIR, J., Bending and shear of prestressed UHPFRC beams with circular openings, Proceeding of the 4th International fib Congress 2014 Mumbai, February 2014
- [9] SCHMIDT, M., FEHLING, E., GLOTZBACH, C., FRÖHLICH, S., PIOTROWSKI, S. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat 2012 Symposium in Kassel, March 7-9, 2012, 1058 pp.
- [10] Swiss Society of Engineers and Architects. Recommendation - Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – Materials, design and construction (in french), Project E-12, February, 2014
- [11] TOMAS, J., MOREILLON, L., NSEIR, J., SUTER, R. (2013). *Bending and Shear of Prestressed UHPFRC Beams with Circular Openings*. Fribourg, Switzerland: École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg
- [12] TOMAS, J., MOREILLON, L., NSEIR, J., SUTER, R. (2013). *Bending and Shear of Prestressed HPFRC Beams with Circular Openings*. Fribourg, Switzerland: École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg
- [13] TOUTLEMONDE, F., RESPLENDINO, J., Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, Proceedings of UHPFRC Symposium , Marseille (France), November 17-18, 2009, London, 2011, 814 pp.

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

Schlussentwurf FprSIA 2052

Einspracheverfahren, Fassung 21. Mai 2015

(Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.)

SIA Cahier technique 2052 : Béton fibré ultra- performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement, et exécution

Projet finale FprSIA 2052

Procédure d'opposition, projet 21 mai 2015

(Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.)

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

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

Fassung 21.Mai 2015

Schlussentwurf FprSIA 2052 Einspracheverfahren

2052

Referenznummer
FprSNR 592052:2015 de

Gültig ab: 2015-xx-xx

Herausgeber
Schweizerischer Ingenieur-
und Architektenverein
Postfach, CH-8027 Zürich

SIA Merkblätter

Zur Erläuterung und ergänzenden Regelung von speziellen Themen gibt der SIA Merkblätter heraus.

Die Merkblätter sind Bestandteil des SIA-Normenwerks.

Merkblätter sind nach ihrer Veröffentlichung drei Jahre gültig. Die Gültigkeit kann wiederholt um jeweils drei Jahre verlängert werden.

Entwurf

Allfällige Korrekturen und Kommentare zur vorliegenden Publikation sind zu finden unter www.sia.ch/korrigenda.

Der SIA haftet nicht für Schäden, die durch die Anwendung der vorliegenden Publikation entstehen können.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Vorwort	4
0 Geltungsbereich	5
0.1 Abgrenzung	5
0.2 Normative Verweisungen	5
0.3 Abweichungen	6
1 Verständigung	7
1.1 Fachausdrücke	7
1.2 Bezeichnungen	8
2 Grundsätze	12
2.1 Allgemeines	12
2.2 UHFB-Bauweise	12
2.3 UHFB-Beton-Verbundbau	13
2.4 Tragwerksanalyse und Bemessung	13
2.5 Dauerhaftigkeit	14
2.6 Qualitätssicherung	14
3 Baustoffe	15
3.1 Zusammensetzung von UHFB	15
3.2 Eigenschaften von UHFB	15
3.3 Eigenschaften von bewehrtem UHFB	18
4 Tragwerksanalyse und Bemessung	19
4.1 Grundsätze	19
4.2 Tragwerksteile aus UHFB	19
4.3 UHFB-Beton-Verbundbauteile	22
5 Konstruktive Durchbildung	25
5.1 Grundsätze	25
5.2 Bewehrungsführung	25
5.3 UHFB-Fertigteile und zusammengesetzte Bauteile	25
5.4 UHFB-Beton-Verbundbauteile	25
6 Ausführung	27
6.1 Herstellung von UHFB	27
6.2 Einbau und Nachbehandlung von UHFB	27
6.3 Prüfungen	28
6.4 Eigenschaften der UHFB Oberfläche	28
6.5 Arbeitssicherheit	29
Anhang	
A Eigenschaften von UHFB (informativ)	30
B Qualitätssicherung (normativ)	31
C UHFB Prüfungen (normativ)	33
D Prüfung des Zugverhaltens (normativ)	34
E Biegezugprüfung (normativ)	37
F Verzeichnis der Begriffe (informativ)	42

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

VORWORT

Das vorliegende Merkblatt hat zum Ziel, den Entwurf, die Bemessung und die Ausführung von Tragwerken unter Verwendung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) zu regeln. Im Vordergrund stehen zwei grundlegende Konzepte:

- Bau von Tragwerken bestehend aus Bauteilen aus UHFB oder UHFB mit Bewehrung, die in der Regel in Fertigteilbauweise hergestellt werden.
- Instandsetzung und/oder die Verstärkung von bestehenden Tragwerken aus Stahlbeton durch Ergänzen des Stahlbetons mit UHFB. Dabei entstehen Verbundbauteile. Dieses Konzept ist auch für den Bau von neuen Tragwerken anwendbar.

Dieses Merkblatt basiert auf den Tragwerksnormen des SIA und richtet sich an die Fachleute der Projektierung, Bauherrschaften und Fachleute der Bauausführung.

UHFB ist ein mit Kurzfasern hochgradig verstärkter, zementgebundener Verbundbaustoff. UHFB ist kein Beton gemäss der Definition in der Norm SN EN 206. Trotzdem wird in verschiedenen Kapiteln auf diese Norm verwiesen (z.B. Prüfungen). Die Gesteinskörnung ist in der Regel kleiner als 1mm, und die Packungsdichte der Komponenten ist sehr hoch und optimiert. Das Mischwasser wird beim Erhärten von UHFB vollständig verbraucht, womit sich keine kommunizierende Kapillarporen bilden können und ein Wassereintritt von aussen in den UHFB vernachlässigbar gering ist.

Im Vergleich zu herkömmlichem Faserbeton unterscheidet sich UHFB durch die feine Gesteinskörnung, den wesentlich höheren Fasergehalt, die hohe Packungsdichte und hohe mechanische Eigenschaften.

Das Tragverhalten von Tragwerken aus UHFB bei Erdbebeneinwirkung und hinsichtlich des Durchstanzens von Platten wird in diesem Merkblatt nicht behandelt, da die Kenntnisse noch nicht genügend abgesichert sind.

Arbeitsgruppe UHFB der Kommission SIA 262

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

0 GELTUNGSBEREICH

0.1 Abgrenzung

- 0.1.1 Das vorliegende Merkblatt gilt für die Bemessung und Ausführung von Tragwerken unter Verwendung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). Zwei Konzepte stehen im Vordergrund:
- Tragwerke und Bauteile aus UHFB, bewehrtem und vorgespanntem UHFB
 - UHFB-Beton-Verbundbauweise für den Neubau sowie für die Instandsetzung und Verstärkung bestehender Betonbauten.
- 0.1.2 Das vorliegende Merkblatt gilt in Verbindung mit den folgenden Normen:
- | | |
|----------------|---|
| Norm SIA 260 | Grundlagen der Projektierung von Tragwerken |
| Norm SIA 261 | Einwirkungen auf Tragwerke |
| Norm SIA 262 | Betonbau |
| Norm SIA 262/1 | Betonbau – Ergänzende Festlegungen |
| Norm SIA 263 | Stahlbau |
| Norm SIA 269 | Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken |
| Norm SIA 269/1 | Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen |
| Norm SIA 269/2 | Erhaltung von Tragwerken – Betonbau |

0.2 Normative Verweisungen

Im Text dieser Norm wird auf die nachfolgend aufgeführten Publikationen verwiesen, welche im Sinne der Verweisungen ganz oder teilweise mitgelten. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe, bei datierten Verweisungen die entsprechende Ausgabe der betreffenden Publikation.

0.2.1 Publikationen des SIA

Empfehlung SIA 179 Befestigungen in Beton und Mauerwerk

0.2.2 Europäische Normen

SN EN 196-1	Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
SN EN 197-1	Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
SN EN 206-1	Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
SN EN 206-1/NE:2013	Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Nationale Elemente NE zur Norm SN EN 206-1:2000
SN EN 206-9	Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB)
SN EN 413-2	Putz- und Mauerbinder - Teil 2: Prüfverfahren
SN EN 934-1	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen
SN EN 934-2	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel - Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung
SN EN 1542	Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken: Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreissversuch
SN EN 1925	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung
SN EN 12350-6	Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte
SN EN 12350-7	Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren
SN EN 12350-8	Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch
SN EN 12390-2	Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
SN EN 12390-3	Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

SN EN 12390-4	Prüfung von Festbeton – Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit – Anforderungen an Prüfmaschinen
SN EN 12390-13	Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)
SN EN 13057	Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken: Prüfverfahren – Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme
SN EN 13263-1	Silikastaub für Beton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien
SN EN 13892-3	Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 3: Bestimmung des Verschleisswiderstandes nach Böhme
SN EN 14889-1	Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität
SN EN 14889-2	Fasern für Beton - Teil 2: Polymerfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität

0.2.3 Weitere Publikationen

AFGC (2013)	Recommendations: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Annex 6 «Suitability tests – Additional considerations and examples of determination of K factors ».
-------------	--

0.3 Abweichungen

- 0.3.1 Abweichungen von diesem Merkblatt sind zulässig, wenn sie durch Theorie oder Versuche ausreichend begründet werden oder wenn neue Entwicklungen und Erkenntnisse dies rechtfertigen.
- 0.3.2 Liegen Verhältnisse vor, die in diesem Merkblatt nicht erfasst werden, ist das gewählte Vorgehen in der Nutzungsvereinbarung und in der Projektbasis zu dokumentieren.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

1 VERSTÄNDIGUNG

1.1 Fachausdrücke

Im vorliegenden Merkblatt werden die nachstehend definierten, spezifischen Fachausdrücke verwendet. Diese Begriffe sind im Anhang F in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet. Allgemeine hier verwendete Fachausdrücke werden in den Normen SIA 260 bis 262 und SIA 269, SIA 269/1 und SIA 269/2 definiert.

- 1.1.1 **Ultra-Hochleistungs-Faserbeton** *béton fibré ultra-performant, calcestruzzo Fibrorinforzato ad Altissime Prestazioni, ultra-high performance fiber reinforced concrete*
Aus Zement, Zusatzstoffen, feiner Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzmittel und Kurzfasern hergestellter Verbundwerkstoff. Durch seine hohe Packungsdichte ist er flüssigkeitsdicht. Der charakteristische Wert seiner Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen ist in der Regel höher als 120 MPa.
- 1.1.2 **Premix** *prémix, premix, premix*
Trockenmischung bestehend aus Zement, feiner Gesteinskörnung und gegebenenfalls Zusatzmittel in vorgegebenen Mengenverhältnissen.
- 1.1.3 **Bewehrter UHFB** *BFUP armé, CFAP armato, reinforced UHPFRC*
UHFB, dessen Bewehrung aus Betonstahl besteht.
- 1.1.4 **Vorgespannter UHFB** *BFUP précontraint, CFAP precompresso, prestressed UHPFRC*
UHFB, dessen Bewehrung teilweise aus vorgespanntem Spannstahl besteht.
- 1.1.5 **Verbundsystem** *système composite, sistema composito, composite system*
Resultat einer monolithischen Verbindung zweier oder mehrerer Baustoffe.
- 1.1.6 **Zugfestigkeit** *résistance à la traction, resistenza alla trazione, tensile strength*
Spannung, die unter einachsiger Zugbeanspruchung aus der maximal erreichten Zugkraft, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt des Prüfkörpers, ermittelt wird.
- 1.1.7 **Elastische Grenzzugfestigkeit** *résistance limite élastique à la traction, resistenza limite elastico alla trazione, elastic limit tensile strength*
Spannungswert bei Erreichen der Elastizitätsgrenze von UHFB unter einachsiger Zugbeanspruchung.
- 1.1.8 **Einspanngrad** *degré d'entrave, grado di vincolo, degree of restraint*
Verhältnis zwischen den im UHFB auftretenden Zugspannungen, die sich im Verbundbauteil durch Verbund mit dem Untergrund infolge Verformungsbehinderung bilden, und den Zugspannungen, die in einem vollständig eingespannten Verbundsystem auftreten würden.
- 1.1.9 **Entfestigung** *comportement adoucissant, comportamento softening, strain softening*
Mechanische Eigenschaft eines Baustoffs, die durch eine kontinuierliche Abnahme der Zugspannungen nach Überschreiten der Zugfestigkeit charakterisiert ist
- 1.1.10 **Reife** *maturité, maturità, maturity*
Äquivalentes Alter in Bezug auf eine mechanische Eigenschaft, ermittelt auf der Grundlage des Temperaturverlaufs während der Erhärtung eines gegebenen Bauteils.
- 1.1.11 **Verfestigung** *comportement écrouissant, comportamento hardening ; strain hardening*
Mechanische Eigenschaft eines Baustoffs, die durch eine Zunahme der Zugspannungen bei zunehmender Verformung nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze charakterisiert ist.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

1.2 Bezeichnungen

1.2.1 Lateinische Grossbuchstaben

A_c	Querschnittsfläche des Betons
A_{sc}	Querschnittsfläche der passiven (Biege-)Bewehrung des Betons eines Verbundbauteils
A_{sU}	Querschnittsfläche der passiven (Biege-)Bewehrung des UHFB eines Verbundbauteils
A_{sw}	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
A_U	Fläche des UHFB-Querschnitts oder der UHFB-Schicht
E_c	Elastizitätsmodul von Beton
E_i	Sekantenmodul (Einzelwert) gemäss D.8 und E.8
E_m	Mittelwert aus 10 Einzelwerten des Sekantenmoduls gemäss D.8 und E.8
E_U	Elastizitätsmodul von UHFB
E_{Ud}	Bemessungswert des Elastizitätsmoduls von UHFB
E_{Um}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls von UHFB
E_{Ut}	Elastizitätsmodul von UHFB unter Zugbeanspruchung
F_A	gemessener Kraftwert am Ende des elastischen Tragverhaltens des Prüfkörpers
F_B	gemessener maximaler Kraftwert des Tragverhaltens des Prüfkörpers
F_{ccd}	Bemessungswert der auf den Beton einwirkenden, resultierenden Druckkraft
F_i	Kraftwert (Einzelwert) gemäss D.8 und E.8
F_{scd}	Bemessungswert der Zugkraft der passiven Bewehrung des Betons
F_{sUd}	Bemessungswert der Zugkraft der passiven Bewehrung des UHFB
F_{tVd}	Bemessungswert der Längszugkraft infolge Querkraft
F_{Ucd}	Bemessungswert der auf den UHFB einwirkenden, resultierenden Druckkraft
F_{Utd}	Bemessungswert der auf den UHFB einwirkenden, resultierenden Zugkraft
G_{FU}	spezifische Bruchenergie von UHFB
M	Biegemoment
M_{Rd}	Bemessungswert des Biege widerstands des UHFB-Beton-Verbundbauteils
$M_{R,D}$	Dauerfestigkeit unter Biegebeanspruchung eines Bauteils aus UHFB mit Bewehrung oder eines UHFB-Beton-Verbundbauteils
$M_{Rd,RU}$	Bemessungswert des plastischen Biege widerstands von UHFB mit Bewehrung
N	Normalkraft
R_d	Bemessungswert des Tragwiderstands
T	Temperatur
V_d	Bemessungswert der Querkraft
V_{Rd}	Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands
$V_{Rd,c}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des Betons
$V_{Rd,s}$	Bemessungswert des Tragwiderstands der vertikalen Querkraftbewehrung
$V_{Rd,U}$	Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands von UHFB mit Bewehrung

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

1.2.2 Lateinische Kleinbuchstaben

a_0	Distanz zwischen dem massgebenden Querschnitt und dem Auflager
a, b	Beiwerte zur Ermittlung der zeitabhängigen Kriechzahl von UHFB
a_d	Bemessungswert der Abmessung eines Bauteils
b_m	Mittelwert der gemessenen Breiten des Prüfkörpers
b_w	Stegbreite
c, d	Beiwert für die Berechnung der Schwindverformung von UHFB
c_{nom}	nominale, auf Plänen anzugebende Bewehrungsüberdeckung
d_{eq}	äquivalente statische Höhe eines UHFB-Beton-Verbundbauteils
d_s	statische Höhe
d_{sc}	statische Höhe der Bewehrung in der Zugzone im Stahlbeton eines Verbundbauteils
d_{scc}	statische Höhe der Bewehrung in der Druckzone im Stahlbeton eines Verbundbauteils
d_{sU}	statische Höhe der Bewehrung im UHFB-Teil eines Verbundbauteils
d_U	statische Höhe der UHFB-Schicht eines Verbundbauteils
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
f_{pd}	Bemessungswert der Fließgrenze von Spannstahl
f_{sd}	Bemessungswert der Fließgrenze von Betonstahl
f_{sUd}	Bemessungswert der Fließgrenze von Betonstahl im UHFB
f_{Uc}	Druckfestigkeit von UHFB
f_{Ucd}	Bemessungswert der Druckfestigkeit von UHFB
f_{Uck}	charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit von UHFB (5%-Fraktilwert)
f_{Ucm}	Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit von UHFB
$f_{Ucm,28}$	Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit von UHFB nach 28 Tagen
f_{Ud}	Bemessungswert der Festigkeit von UHFB
f_{Ute}	elastische Grenzzugfestigkeit von UHFB
f_{Uted}	Bemessungswert der elastischen Grenzzugfestigkeit von UHFB
f_{Utek}	charakteristischer Wert der elastischen Grenzzugfestigkeit von UHFB
f_{Utud}	Bemessungswert der Zugfestigkeit von UHFB
f_{Utuk}	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit von UHFB
f_{UtU}	Zugfestigkeit von UHFB
h	Trägerhöhe
h_U	Schichtdicke von UHFB, Dicke des Bauteils aus UHFB
h_c	Höhe des Stahlbetonquerschnitts oder Schichtdicke des Untergrunds aus Stahlbeton eines Verbundbauteils
h_m	Mittelwert der gemessenen Dicken des Prüfkörpers
k_T	Beiwert zur Berücksichtigung der Temperatur
l_m	gemessene Spannweite des Prüfkörpers für die Biegezugprüfung
l_{mes}	Messlänge des Wegaufnehmers
l_U	Referenzlänge zur Ermittlung der Dehnung aus der Rissöffnung
l_z	mitwirkende Länge der UHFB-Schicht in einem Verbundbauteil
s	Stababstand

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

t	Zeit in Tagen, Dauer, Alter
t_0	Alter in Tagen des UHFB bei Beginn der Beanspruchung
t_{∞}	als unendlich angenommene Dauer
W_{Ut}	Öffnung des diskreten Risses im UHFB
W_{Uti}	zum Kraftwert gehörender Verformungswert (Einzelwert) gemäss D.8 und E.8
$W_{Ut,max}$	maximale Öffnung des diskreten Risses im UHFB
W_{Uel}	elastische Durchbiegung von Tragwerksteilen aus UHFB mit Bewehrung im Gebrauchszustand
$W_{U\phi}$	Durchbiegung von Tragwerksteilen aus UHFB mit Bewehrung unter Berücksichtigung des Kriechens von UHFB
x	Höhe der (Biege)Druckzone
z	Hebelarm der inneren Kräfte

1.2.3 Griechische Kleinbuchstaben

α	Druckfeldneigung
α_c	Neigungswinkel des kritischen Schubrisses im Beton eines Verbundbauteils
α_i	Verhältnis zwischen der Höhe der plastifizierten Zone und der Gesamthöhe des Biegeprüfkörpers gemäss Anhang E
α_{min}	minimale Druckfeldneigung
α_U	Temperaturausdehnungskoeffizient von UHFB
β	Neigung der Querkraftbewehrung oder einer aufgebogenen Längsbewehrung
γ_{U1}	Widerstandsbeiwert für UHFB
γ_{U2}	Widerstandsbeiwert für bewehrten UHFB
δ	Durchbiegung des Biegezugprüfkörpers gemäss Anhang E
δ_i	Einzelwert der Durchbiegung des Biegezugprüfkörpers gemäss Anhang E
ϵ_c	Verformung des Betons unter Druckbeanspruchung
ϵ_s	Dehnung von Betonstahl
ϵ_{sc}	Dehnung des Betonstahls im Beton eines Verbundbauteils
ϵ_{sU}	Dehnung des Betonstahls im UHFB eines Verbundbauteils
ϵ_U	Dehnung von UHFB
ϵ_{Uc}	Stauchung von UHFB
ϵ_{Ucc}	Kriechdehnung von UHFB
ϵ_{Uel}	elastische Dehnung von UHFB
ϵ_{Us}	Schwindmass von UHFB
$\epsilon_{Us\infty}$	Endschwindmass von UHFB
ϵ_{Ut}	Dehnung von UHFB unter Zugbeanspruchung
ϵ_{Utu}	Dehnung von UHFB bei Erreichen der Zugfestigkeit (Verfestigung)
$\epsilon_{Ut,soft}$	Entfestigungsdehnung von UHFB
λ_i	Parameter zur Ermittlung des Koeffizienten α_i bei der vereinfachten Analyse gemäss Anhang E
η_K	Faserorientierungsbeiwert von UHFB, abhängig vom Bauteil und vom Herstellungsprozess (unregelmässige Faserverteilung)
η_{rU1}	Beiwert zur Berücksichtigung des Verformungsvermögens von UHFB unter Druckbeanspruchung
η_{rU2}	Beiwert zur Berücksichtigung des Tragverhaltens von Druckgliedern

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

η_{hU}	Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Schichtdicke von UHFB oder Bauteildicke sowie des Herstellungsprozesses auf die Faserorientierung
η_t	Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer
μ_U	Einspanngrad der UHFB Schicht im Verbundsystem
ν_U	Querdehnungszahl von UHFB
ρ_U	Trockenrohdichte von UHFB
σ_{sc}	Zugspannung in der Bewehrung des Betons eines UHFB-Beton-Verbundbauteils
σ_{sU}	Zugspannung in der Bewehrung des UHFB eines UHFB-Beton-Verbundbauteils
σ_{Uc}	Druckspannung im UHFB
$\sigma_{U,D}$	Dauerfestigkeit von UHFB
σ_{Ue}	unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Verbundsystems auftretende Zugspannung im UHFB
$\sigma_{Ue,max}$	die in einem vollständig eingespannten Verbundsystem auftretende Zugspannung im UHFB
$\sigma_{Ufat,max}$	maximale Zugspannung im UHFB infolge ständiger Einwirkungen und der Ermüdungseinwirkungen
σ_{Ut}	Zugspannung im UHFB
σ_{Utd}	Bemessungswert der Zugspannung im UHFB
σ_{Uti}	Zugspannung (Einzelwert) in der untersten Faser des Prüfkörperquerschnitts gemäss Anhang E
τ_{bU}	Verbundfestigkeit zwischen Betonstahl und UHFB
$\varphi_U(t, t_0)$	Kriechzahl von UHFB
$\varphi_{U\infty}(t_\infty, t_0)$	Endkriechzahl von UHFB
χ_i	elastische Krümmung im Bereich des konstanten Biegemoments des Biegeprüfkörpers gemäss Anhang E
ω_m	gesamter mechanischer Bewehrungsgehalt im UHFB-Beton-Verbundbauteil

1.2.4 Sonderbezeichnungen

\varnothing_s	Durchmesser eines Bewehrungsstabs
-----------------	-----------------------------------

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

2 GRUNDSÄTZE

2.1 Allgemeines

- 2.1.1 Die Wahl der Baustoffe, insbesondere von UHFB, ist auf die Anforderungen des Entwurfs und die Möglichkeiten der Herstellung abzustimmen. Die geforderten Eigenschaften sind in der Projektbasis festzuhalten. Die Eigenschaften von Beton, Betonstahl und Spannstahl sind in den Normen SIA 262 und SIA 269/2 festgelegt.
- 2.1.2 UHFB, der hauptsächlich eine Tragfunktion wahrnimmt, wird in der Regel aus Stahlfasern hergestellt und ist in der Haupttragrichtung mit Bewehrung versehen.
- 2.1.3 UHFB wird in der Regel in Bauwerksbereichen eingesetzt, die starken Umwelteinflüssen, Eigenspannungen oder hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind:
- Starke Umwelteinflüsse treten bei Bauteilen der Expositionsklassen XD2b, XD3 und XF4 sowie bei chemischem Angriff auf.
 - Hohe mechanische Beanspruchungen ergeben sich: (1) in Bereichen grosser Beanspruchungen infolge andauernder oder vorübergehender Überprüfungs- oder Bemessungssituationen, (2) bei aussergewöhnlichen Einwirkungen (Anprall, Explosion, Erdbeben) sowie (3) infolge von Abrasion.
 - Hohe lokale Beanspruchungen ergeben sich bei Kräftekonzentration und Bereichen von Krafteinleitungen oder Kraftumlenkungen. Diese führen in der Regel zu hohen Anforderungen an die Duktilität.
- 2.1.4 Tragwerke und Fertigteile aus UHFB werden entworfen mit dem Ziel, die Bauteilabmessungen und Eigenlasten zu minimieren. Im Vordergrund stehen hochbeanspruchte Tragwerke für weitgespannte Dächer, Hochbaudecken sowie Brücken und andere Kunstbauten. Zudem bestehen Anwendungsmöglichkeiten im Bereich von UHFB-Fassadenelementen, wo oft synthetische Fasern verwendet werden.
- 2.1.5 Bei der Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauten und deren Bestandteilen stehen folgende Anwendungen im Vordergrund:
- Abdichtung (Schutzbeschichtung von Brückenfahrbahnplatten, Randabschlüssen, Leitmauern, Pfeilern, Wänden und Bedachungen)
 - Erhöhung der Tragfähigkeit oder der Steifigkeit von Brückenfahrbahnplatten und Hochbaudecken
 - Ausrüstungsteile in Fertigteilbauweise (Randabschlüsse, Leitmauern, Vorrichtungen für Dilatationsfugen)
 - Verankerungsblöcke für das Verbinden von neuen und bestehenden Bauteilen.
- 2.1.6 UHFB kann auch im Verbund mit Stahlbeton, Stahl oder Holz eingesetzt werden. Die Regeln der entsprechenden Verbundbauweisen gelten sinngemäss.
- 2.1.7 Neben den in SIA 260 aufgeführten Entwurfsrandbedingungen sind folgende Punkte zu beachten und gegebenenfalls projektspezifisch festzulegen:
- Anforderungen an das Erscheinungsbild der Oberflächen und Kanten des UHFB, beispielsweise durch Vorgaben zur Faserart (synthetische Fasern)
 - Anforderungen an den Feuerwiderstand
 - Arbeitsfugen in Bezug auf Flüssigkeitsdichtheit
 - Ausführungsabfolge und Giessvorgang (Giessrichtung) beim Einbau des Frisch-UHFB
 - Angaben zu Einlagen für die Gebäudetechnik in Bauteilen aus UHFB.

2.2 UHFB-Bauweise

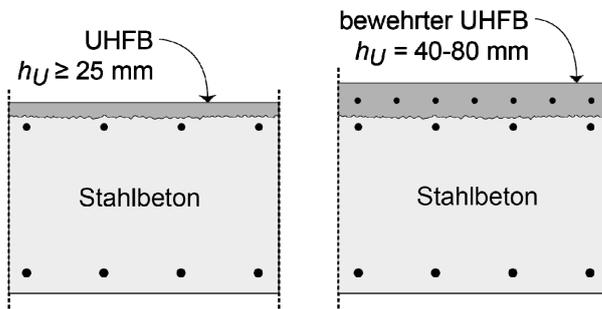
- 2.2.1 Tragwerke aus UHFB sind in der Regel aus UHFB-Fertigteilen zusammengesetzt. Sie können auch auf der Baustelle in Schalungen gegossen werden.
- 2.2.2 UHFB muss kein ausgeprägtes Verfestigungsverhalten aufweisen, wenn das Bauteil unter Druckbeanspruchung steht, z.B. infolge Vorspannung. Jedoch kann bei Beanspruchungen quer zur Haupttragrichtung (z.B. infolge Querkraft, Querbiegung in Flanschen und Stegen, Einleitung von konzentrierten Kräften) ein Verfestigungsverhalten erforderlich sein.
- 2.2.3 Mechanisch hochbeanspruchte Tragwerke und Bauteile bestehen in der Regel aus bewehrtem oder vorgepanntem UHFB.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

2.3 UHFB-Beton-Verbundbau

- 2.3.1 UHFB-Beton-Verbundbauteile bestehen aus einem Stahlbetonquerschnitt und einer darauf haftenden Schicht aus UHFB oder UHFB mit Bewehrung gemäss Figur 1.

Figur 1 Grundkonfigurationen des UHFB-Beton-Verbundbaus



Die Herstellung eines UHFB-Beton-Verbundbauteils führt zu einem Eigenspannungszustand im Bauteil, in der Regel mit Zugeigenspannungen im UHFB.

- 2.3.2 UHFB-Beton-Verbundbauteile verhalten sich im Gebrauchszustand und bis zum Erreichen des Tragwiderstands monolithisch, d.h. es treten keine Ablösungen an der Grenzschicht zwischen UHFB und Beton auf. Der Tragwiderstand wird am monolithischen Querschnitt ermittelt.
- 2.3.3 Um im Gebrauchszustand eine Verformungskonzentration in einem Riss zu vermeiden, wird bei der Herstellung von UHFB-Beton-Verbundbauteilen ein verfestigender UHFB (Sorten UA und UB) verwendet.
- 2.3.4 Trotz Zugeigenspannungen ist eine UHFB-Schicht aus verfestigendem UHFB (Sorten UA oder UB) im Gebrauchszustand flüssigkeitsundurchlässig.
- 2.3.5 Mit UHFB mit Bewehrung werden der Tragwiderstand und die Steifigkeit des UHFB-Beton-Verbundbauteils erhöht.

2.4 Tragwerksanalyse und Bemessung

2.4.1 Allgemeines

- 2.4.1.1 Die Tragwerksanalyse und die Bemessung von Tragwerken aus UHFB mit Bewehrung und Bauteilen aus UHFB sind gemäss SIA 260 vorzunehmen.
- 2.4.1.2 Die Tragwerksanalyse und Bemessung von UHFB-Beton-Verbundbauteilen sind bei bestehenden Tragwerken gemäss SIA 269 und bei neuen Tragwerken gemäss SIA 260 vorzunehmen.

2.4.2 Grenzzustände der Tragsicherheit

- 2.4.2.1 Für den Bemessungswert des Tragwiderstands gilt:

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

- 2.4.2.2 Der Bemessungswert des Tragwiderstands kann auch aus Versuchen abgeleitet werden, falls diese repräsentativ sind und mit Hilfe theoretischer Modelle interpretiert werden. Dabei soll die gleiche Zuverlässigkeit erreicht werden wie mit der Anwendung dieses Merkblatts.

- 2.4.2.3 Der Bemessungswert der Zugfestigkeit von UHFB beträgt:

$$f_{Utd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utk}}{\gamma_U} \quad \text{und} \quad f_{Uted} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utek}}{\gamma_U} \quad (2) \text{ und } (3)$$

Die Beiwerte η_t , η_{hU} und η_k sind gemäss 4.2 zu bestimmen.

- 2.4.2.4 Der Bemessungswert der Druckfestigkeit von UHFB:

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

Die Beiwerte η_t , η_{fU1} und η_{fU2} sind gemäss 4.2 zu bestimmen.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

2.4.2.5 Für den Nachweis der Tragsicherheit beträgt der Widerstandsbeiwert $\gamma_U = 1,50$.

2.4.2.6 Für den Bemessungswert des Elastizitätsmoduls von UHFB unter Zug- und Druckbeanspruchung darf angenommen werden:

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

2.4.2.7 Die Bemessungswerte und Überprüfungswerte von Beton, Betonstahl und Spannstahl sind in SIA 262 bzw. in SIA 269/2 gegeben.

2.4.3 **Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit**

Gebrauchsgrenzen, wie zulässige Verformungen oder Schwingungen, sind in der Projektbasis festzulegen.

2.5 **Dauerhaftigkeit**

Für Bauteile und Oberflächen aus UHFB oder bewehrtem UHFB, die den Expositionsklassen XC, XD, XA und XF gemäss 2.4.2 SIA 262 ausgesetzt sind, sind in der Regel zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit keine besonderen Massnahmen zu treffen.

2.6 **Qualitätssicherung**

2.6.1 Die Qualitätssicherung stellt sicher, dass die eingesetzten Produkte und Systeme mit diesem Merkblatt und den objektspezifischen Anforderungen übereinstimmen. Die Qualitätssicherung besteht aus Erstprüfungen, Eignungsprüfungen und Qualitätsprüfungen gemäss Anhang B. Die Versuche sowie die zugehörigen Abnahmekriterien und Konsequenzen bei Nichterfüllen der Anforderungen sind in der Projektbasis und in den Ausschreibungsunterlagen aufzuführen.

2.6.2 Die grundsätzliche Eignung eines UHFB wird durch Erstprüfungen nachgewiesen.

2.6.3 Die Eignung eines UHFB und seiner Komponenten im Hinblick auf eine spezifische Anwendung ist anhand von Eignungsprüfungen nachzuweisen, die in der Regel aus repräsentativen Versuchen hinsichtlich der Bauteilabmessungen, des Giessvorgangs und der Nachbehandlung bestehen. Während der Bauausführung ist das Einhalten der Anforderungen anhand von Qualitätsprüfungen zu kontrollieren.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

3 BAUSTOFFE

3.1 Zusammensetzung von UHFB

- 3.1.1 UHFB besteht aus einer hydraulisch erhärtenden Matrix, die mit Fasern verstärkt ist:
- Die Matrix besteht aus Zement, Zusatzstoffen, feiner Gesteinskörnung, Wasser und Zusatzmitteln.
 - Die Fasern werden durch Form, Werkstoff, Abmessungen (Länge, Durchmesser) und Gehalt im UHFB definiert. Der notwendige Fasergehalt zur Erzielung der geforderten mechanischen Eigenschaften des UHFB hängt von der Schlankheit, der Form, dem Werkstoff der Fasern und dem Verbund mit der Matrix ab.
- 3.1.2 Die Art, Menge und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe eines UHFB ist spezifisch für jede Sorte. UHFB wird als Premix angeboten oder aufgrund einer Rezeptur gemischt. Er wird in einem Betonwerk oder auf der Baustelle produziert. UHFB kann mit allen Zementarten, die gemäss SN EN 206-1 zugelassen sind, hergestellt werden.

3.2 Eigenschaften von UHFB

3.2.1 Allgemeines

- 3.2.1.1 UHFB wird durch folgende Eigenschaften charakterisiert:
- Zugverhalten definiert durch die Zugfestigkeit f_{UtU} , elastische Grenzzugfestigkeit f_{Ute} , Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit ε_{UtU} und Entfestigung (spezifische Bruchenergie G_{FU} , maximale Rissöffnung $w_{Ut,max}$)
 - Druckfestigkeit f_{Uc}
 - Elastizitätsmodul E_U
 - Querdehnungszahl ν_U
 - Temperaturausdehnungskoeffizient α_U
 - Schwindmass ε_{Us} ; Kriechzahl $\varphi_U(t, t_0)$.

Richtwerte der Eigenschaften gebräuchlicher UHFB sind in Tabelle 3 in Anhang A.2 angegeben.

- 3.2.1.2 Die UHFB-Sorten werden mit Hilfe des nach den Anhängen D und E ermittelten Zug- und Biegezugverhaltens festgelegt. Die Zuordnung zu den UHFB-Sorten erfolgt gemäss den Angaben in Tabelle 1.

Tabelle 1 UHFB-Sorten

Sorte		U0	UA	UB
f_{Utek}	MPa	$\geq 7,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$
f_{Utuk} / f_{Utek}		$> 0,7$	$> 1,1$	$> 1,2$
ε_{UtU}	%	f_{Utek}/E_{Ut}	$> 1,5$	$> 2,0$
f_{Uck}	MPa	≥ 120	≥ 120	≥ 120

- 3.2.1.3 Ergänzende Anforderungen an UHFB-Sorten betreffen im Allgemeinen folgende Eigenschaften:
- Druckfestigkeit gemäss C.1
 - Elastizitätsmodul gemäss SN EN 12390-13
 - Abriebwiderstand gemäss SN EN 13892-3
 - Gefälleignung des Frisch-UHFB gemäss C.5.
- 3.2.1.4 Eignungsprüfungen ermöglichen eine Festlegung des erforderlichen Setzfließmasses, um eine genügende Verarbeitbarkeit des verwendeten UHFB zu erhalten.
- 3.2.1.5 Die in 3.2.2 und 3.3 angegebenen Beziehungen zwischen einzelnen UHFB-Eigenschaften liefern Richtwerte und gelten für die UHFB-Sorten gemäss Tabelle 1.

3.2.2 Festigkeitseigenschaften

- 3.2.2.1 Das Zugverhalten von UHFB wird mit den Materialgesetzen nach Figur 2 beschrieben:
- a) bilineares Spannungs-Dehnungs-Gesetz zur Beschreibung des elastischen Verhaltens und der Verfestigung des UHFB als Kontinuum;
 - b) Spannungs-Rissöffnungs-Gesetz zur Beschreibung des Entfestigungsverhaltens. Die Rissöffnung wird gemäss folgender Beziehung in eine Dehnung umgerechnet:

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

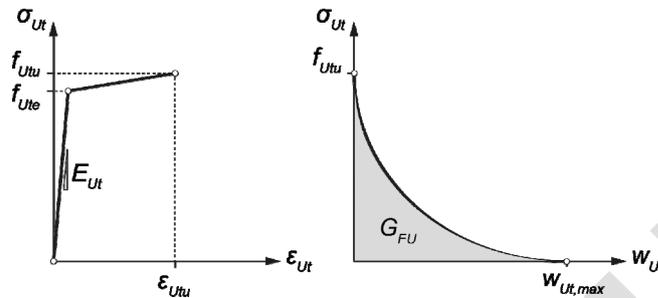
$$\epsilon_{U_t,soft} = \frac{w_{U_t}}{l_U} \tag{6}$$

Für die Referenzlänge darf angenommen werden: $l_U = \frac{2}{3} h_U$.

Die maximale Rissöffnung $w_{U_t,max}$ entspricht der halben maximalen Faserlänge.

Figur 2 Idealisierte Materialgesetze für UHFB der Sorten UA und UB unter Zugbeanspruchung

a) Verfestigungsverhalten b) Entfestigungsverhalten



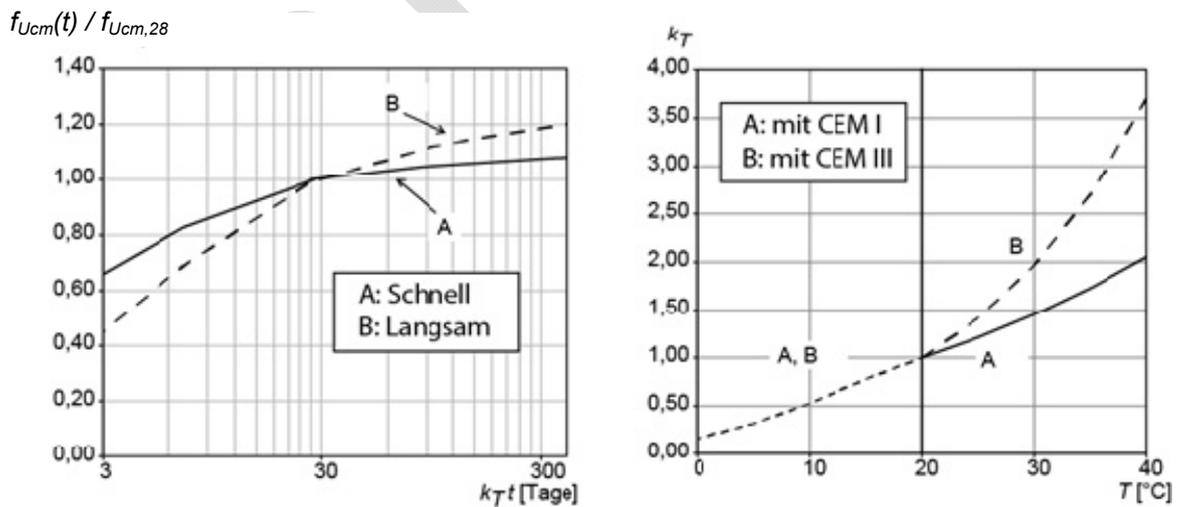
3.2.2.2 Das Verhalten von UHFB unter Druckbeanspruchung wird mit einer linearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung bis zum Erreichen der Druckfestigkeit beschrieben. Alternativ darf für den aufsteigenden Ast des Spannungs-Dehnungs-Diagramms eine nichtlineare Beziehung unter Berücksichtigung einer Steifigkeitsreduktion verwendet werden.

3.2.2.3 Die zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von UHFB hängt von der Zusammensetzung, der allfälligen thermischen Behandlung und der Nachbehandlung ab. Für UHFB ohne thermische Behandlung dürfen die Richtwerte der Figur 3 entnommen werden. Für UHFB mit thermischer Behandlung sind die Richtwerte projektspezifisch, gegebenenfalls anhand von Versuchen, festzulegen.

Figur 3 Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit und Verlauf der Hydratation in Abhängigkeit der Zementart von UHFB ohne thermische Behandlung

a) Druckfestigkeit

b) Verlauf der Hydratation

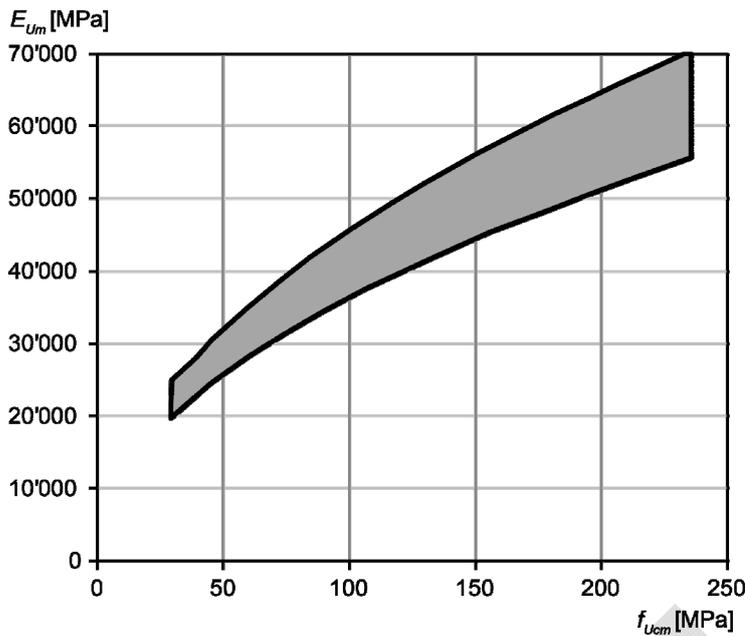


Es darf angenommen werden, dass die zeitliche Entwicklung der Zugfestigkeit derjenigen der Druckfestigkeit gemäss Figur 3 folgt.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

3.2.2.4 Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls von UHFB darf mit Figur 4 abgeschätzt werden.

Figur 4 Mittlerer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der mittleren Würfeldruckfestigkeit von UHFB



Für UHFB unter Zug- und Druckbeanspruchung darf der gleiche Wert verwendet werden.

3.2.2.5 Für den Bereich elastischer Verformungen darf eine Querdehnungszahl ν_U von 0,20 angenommen werden.

3.2.3 Kriechen und Schwinden

3.2.3.1 Eine thermische Behandlung in jungem Alter führt zu einer bedeutenden Begrenzung des Kriechens und Schwindens.

3.2.3.2 Für UHFB ohne thermische Behandlung und auf Basis von CEM I, der bei Beginn der Beanspruchung t_0 Druckspannungen bis 40% der mittleren Druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Belastung ausgesetzt ist, werden die Verformungen infolge Kriechen aus den elastischen Dehnungen wie folgt bestimmt:

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

$$\text{mit der Kriechzahl: } \varphi_U(t, t_0) = \varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^a}{(t - t_0)^a + b}$$

Die Endkriechzahl und die Beiwerte a und b zur Ermittlung der zeitabhängigen Kriechzahl von UHFB können der Tabelle 2 entnommen werden:

Tabelle 2 Endkriechzahl und Beiwerte

t_0 [Tage]	Nachbehandlung	$\varphi_{U,\infty}(t_\infty, t_0)$	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
-	thermisch – 2 Tage bei 90°C und unter Dampf	0,3	0,6	10

Für UHFB-Druckspannungen grösser als 40% der mittleren Druckfestigkeit sind besondere Untersuchungen notwendig.

3.2.3.3 Für UHFB unter Zugspannungen $\sigma_{Ut} \leq f_{Ute}$ werden die Verformungen infolge Kriechen entsprechend 3.2.3.2 ermittelt. Für UHFB-Zugspannungen $\sigma_{Ut} > f_{Ute}$ ist der Einfluss des Beanspruchungsniveaus auf das Kriechen zu berücksichtigen (nichtlineares Kriechen).

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

- 3.2.3.4 Das Schwinden von UHFB ist zu einem überwiegenden Teil auf autogenes Schwinden und zu einem begrenzten Teil auf Trocknungsschwinden zurückzuführen. Für UHFB ohne thermische Behandlung darf das Gesamtschwinden mit Hilfe folgender Beziehung abgeschätzt werden:

$$\epsilon_{Us}(t) = \epsilon_{Us\infty} \cdot e^{\frac{c}{\sqrt{t+d}}} \quad (8)$$

Für UHFB mit CEM I betragen die Beiwerte $c = 2,48$ und $d = -0,86$, und für den Endwert des Schwindens darf ein Wert $\epsilon_{Us\infty} = 0,6 - 0,8 \text{ ‰}$ angenommen werden.

Für UHFB mit CEM III/B betragen die Beiwerte $c = 1,3$ und $d = -0,86$, und für den Endwert des Schwindens darf ein Wert $\epsilon_{Us\infty} = 0,95 \text{ ‰}$ angenommen werden.

Das Alter t wird in Tagen angegeben. Für andere Zementarten sind in Fällen, bei denen Schwinden von grosser Bedeutung ist, Versuche durchzuführen.

3.2.4 Ermüdung

Der Ermüdungswiderstand von UHFB der Sorten UA und UB unter Zugbeanspruchung wird durch seine Dauerfestigkeit beschrieben:

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

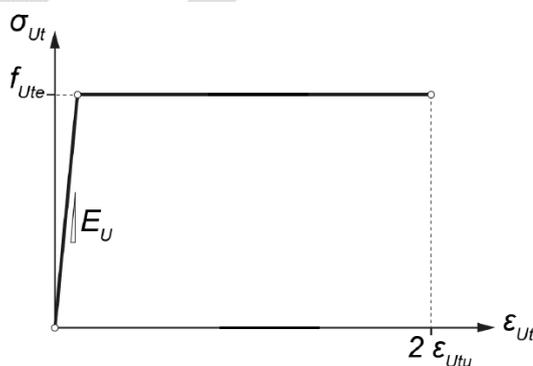
3.2.5 Feuerwiderstand

- 3.2.5.1 Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Feuerwiderstands dürfen nur dann angewendet werden, wenn der Widerstand gegen Abplatzen nachgewiesen ist.
- 3.2.5.2 Mit der Zugabe von z.B. Polypropylenfasern kann ein Abplatzen des UHFB vermieden werden. Die Wirksamkeit der Massnahmen ist anhand von Versuchen nachzuweisen.

3.3 Eigenschaften von bewehrtem UHFB

- 3.3.1 Bewehrter UHFB enthält Betonstahl in Form von Stabstahl und geschweissten Matten oder Spannstahl in Form von Drähten, Stäben und Litzen gemäss SIA 262.
- 3.3.2 Betonstahl, der die Anforderungen gemäss SIA 262 an die bezogene Rippenfläche erfüllt, kann als Betonstahl mit hoher Verbundwirkung betrachtet werden. Da wegen der hohen Verbundwirkung im entfestigenden Bereich vergleichsweise frühzeitig Stabbrüche erfolgen können, darf gerippter Betonstahl der Duktilitätsklasse A nicht verwendet werden.
- 3.3.3 Das Tragverhalten von bewehrtem UHFB unter Zugbeanspruchung wird anhand einer linearen Superposition der Materialgesetze von UHFB und Betonstahl erhalten. In der Regel wird durch die mittragende Wirkung des Betonstahls das Verfestigungsvermögen von UHFB erhöht. Für UHFB der Sorten UA und UB dürfen das Materialgesetz gemäss Figur 5 angenommen werden.

Figur 5 Idealisiertes Stoffgesetz für UHFB der Sorten UA und UB für Bauteile aus bewehrtem UHFB unter Zugbeanspruchung



Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

4 TRAGWERKSANALYSE UND BEMESSUNG

4.1 Grundsätze

4.1.1 Allgemeines

4.1.1.1 Die Tragwerksanalyse erfolgt unter Beachtung von 4.1.2 und 4.1.3 nach den Grundsätzen der Norm SIA 262.

4.1.1.2 Die Bemessungswerte der Tragfähigkeit von UHFB werden gemäss 2.4.2 ermittelt.

4.1.2 Berechnungsverfahren

4.1.2.1 Für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit werden die Schnittgrössen in statisch unbestimmten Systemen in der Regel gemäss der linearen Elastizitätstheorie ermittelt.

4.1.2.2 Methoden der Plastizitätstheorie dürfen angewendet werden, falls ein ausreichendes Verformungsvermögen nachgewiesen werden kann.

4.1.2.3 Zwangsschnittgrössen, welche in statisch unbestimmten Systemen durch aufgezwungene oder behinderte Verformungen entstehen, dürfen vernachlässigt werden, falls ein ausreichendes Verformungsvermögen nachgewiesen werden kann.

4.1.3 Nachweis des Verformungsvermögens

4.1.3.1 Beim Nachweis des Verformungsvermögens sind die begrenzte Duktilität des UHFB sowie die Abminderung der Bruchdehnung der gerippten Betonstahlbewehrung durch die ausgeprägte Zugversteifung des UHFB zu berücksichtigen.

4.1.3.2 Bei Verbundbauteilen sind die Vordehnungen gemäss 4.3.1.4 zu beachten. Beanspruchungen infolge Verformungsbehinderungen im jungen Alter sind zu berücksichtigen.

4.1.3.3 Beim Nachweis des Verformungsvermögens ist in Fällen, bei denen die Zugfestigkeit anhand von Versuchen an Prüfkörpern aus dem Bauteil bestimmt werden muss, auch das Kraft-Verformungs-Verhalten des UHFB gemäss diesen Versuchen anzusetzen.

4.2 Tragwerksteile aus UHFB

4.2.1 Allgemeines

4.2.1.1 Für den Nachweis der Tragsicherheit sind folgende Grenzzustände zu untersuchen:

- Erschöpfung des Querschnittswiderstands,
- Stabilitätsversagen der Bauteile oder deren Elemente,
- Erschöpfung des Tragwiderstands der Verbindungen,
- Ermüdung.

4.2.1.2 Das Stabilitätsversagen der Bauteile oder deren Elemente darf in Analogie mit den Methoden des Stahlbaus gemäss SIA 263 untersucht werden.

4.2.1.3 Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind insbesondere Verformungen (Durchbiegungen) und Schwingungen zu untersuchen.

4.2.1.4 Der Bemessungswert der Zugfestigkeit von UHFB ist im Rahmen der Eignungsprüfungen anhand von prismatischen Prüfkörpern zu verifizieren. Diese Prüfkörper werden aus einem Prototyp, der unter gleichen Herstellungsbedingungen hergestellt wird wie die Tragwerksteile, herausgeschnitten und im 3-Punkt Biegeversuch geprüft. Die Probekörpergeometrie, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgt nach den Empfehlungen AFGC (2012), Anhang 6. Versuche an Probekörpern aus dem Bauteil sind nur dann erforderlich, wenn der Anteil des UHFB zum Tragwiderstand mehr als 30% beträgt. In den anderen Fällen darf die Zugfestigkeit gemäss Ziffer 2.4.2.3 und den Beiwerten gemäss Ziffer 4.2.2 ermittelt werden.

4.2.2 Beiwerte

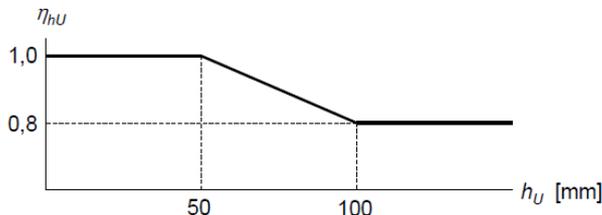
4.2.2.1 Der Faserorientierungsbeiwert η_K hängt von der Bauteilgeometrie und vom Herstellungsprozess ab. Er beträgt:

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

- $\eta_K = 0,90$ bei globalem Tragverhalten (Spannungsumlagerungen sind möglich, z.B. Platten oder statisch unbestimmte Systeme),
- $\eta_K = 0,75$ bei lokalem Tragverhalten (Spannungsumlagerungen sind nicht möglich, z.B. Verankerungszonen).

4.2.2.2 Der Beiwert η_{hU} berücksichtigt den Einfluss der Bauteildicke auf die Faserorientierung. Die Bauteildicke wird unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses festgelegt. Für den Beiwert gelten die Angaben in Figur 6.

Figur 6 Beiwert zur Berücksichtigung der Bauteildicke sowie des Herstellungsprozesses



4.2.2.3 Der Beiwert η_{JU1} zur Berücksichtigung des relativ geringen Verformungsvermögens von UHFB unter Druckbeanspruchung beträgt: $\eta_{JU1} = 0,85$.

4.2.2.4 Der Beiwert η_{JU2} zur Berücksichtigung des Tragverhaltens von Druckgliedern im Sinne von 4.3.7 SIA 262 beträgt: $\eta_{JU2} = 0,67$.

4.2.2.5 Der Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer beträgt im Allgemeinen: $\eta_t = 1,0$. Für stossartige Einwirkungen wie z.B. Anprall und Explosion darf ein Beiwert $\eta_t > 1,0$ angesetzt werden, falls dies durch Versuche ausreichend abgesichert ist.

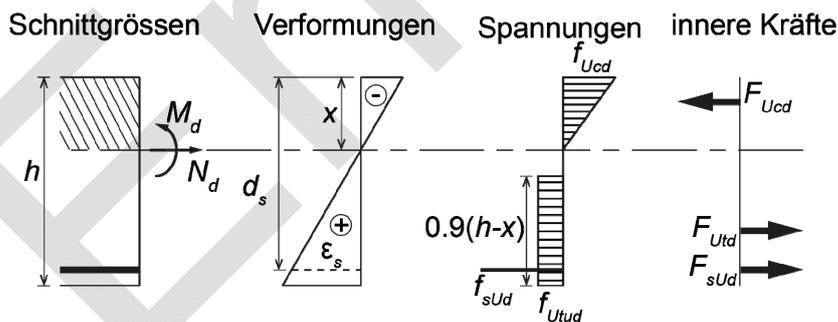
4.2.2.6 Die Beiwerte gemäss 4.2.2.1 und 4.2.2.2 betragen 1,0, falls der Bemessungswert des Tragwiderstands gemäss 2.4.2.2 aus Versuchen ermittelt wird.

4.2.3 Nachweis der Tragsicherheit

4.2.3.1 Biegung

Der Bemessungswert des Tragwiderstands unter reiner Biegung oder Biegung mit Normalkraft wird mit dem Widerstandsmodell gemäss Figur 7 ermittelt.

Figur 7 Biege- und Druckwiderstand eines Querschnitts aus bewehrtem UHFB



4.2.3.2 Querkraft

4.2.3.2.1 Für die Bemessung von Trägerstegen wird angenommen, dass die Übertragung der Querkraft durch den Steg allein erfolgt. Grundlage für die Bemessung ist ein Spannungsfeld mit variabler Neigung des Druckfelds und senkrecht dazu wirkendem Zugfeld.

4.2.3.2.2 Für Bauteile aus UHFB der Sorten UA oder UB wird der Bemessungswert des Querkraftwiderstands aus der Superposition der Querkraftwiderstände von UHFB und der Querkraftbewehrung ermittelt:

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

mit:

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

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

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

Die Druckfeldneigung darf innerhalb folgender Grenzen gewählt werden: $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 45^\circ$. Die minimale Druckfeldneigung α_{\min} beträgt:

- $\alpha_{\min} = 30^\circ$ im Normalfall,
- $\alpha_{\min} = 25^\circ$ wenn im Steg eine bedeutende Drucknormalkraft wirkt,
- $\alpha_{\min} = 40^\circ$ wenn im Steg eine Zugnormalkraft wirkt oder wenn im betrachteten Trägerabschnitt plastische Gurtverformungen zu erwarten sind.

Für die gewählte Druckfeldneigung sind die Stegabmessungen zu überprüfen. Der Widerstand ist begrenzt auf:

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

Analog zu SIA 262 beträgt die von der Längsbewehrung aufzunehmende Längszugkraft infolge des biaxialen Spannungsfelds im UHFB:

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

Diese Längszugkraft muss je zur Hälfte vom Druck- bzw. vom Zuggurt aufgenommen werden.

4.2.3.2.3 Für Bauteile aus UHFB der Sorte U0 wird der Bemessungswert des Querkraftwiderstands des Stegs im elastischen Zustand ermittelt über die Berechnung der Hauptzugspannung, die maximal den Bemessungswert der elastischen Grenzzugfestigkeit f_{Uted} erreichen darf.

4.2.3.3 Ermüdung

4.2.3.3.1 Der Ermüdungsnachweis für Biegebauteile aus UHFB mit Bewehrung erfolgt für die Dauerfestigkeit von folgendem Wert:

$$M_{R,D} = 0,5 \cdot M_{Rd} \quad (15)$$

Zusätzlich ist die Dauerfestigkeit für Betonstahl gemäss SIA 262 nachzuweisen.

4.2.3.3.2 Der Ermüdungsnachweis für Biegebauteile aus UHFB ohne Bewehrung erfolgt für die Dauerfestigkeit des UHFB:

$$\sigma_{Ufat,max} \leq \sigma_{U,D} \quad (16)$$

wobei die maximale Zugspannung $\sigma_{Ufat,max}$ infolge ständiger Einwirkungen und Ermüdungseinwirkungen im UHFB für elastisches Tragverhalten zu ermitteln ist.

4.2.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

4.2.4.1 Die Schnittgrössen werden unter Annahme eines elastischen Tragverhaltens des Tragwerks ermittelt.

4.2.4.2 UHFB der Sorten UA und UB unter Zugbeanspruchung ist rissfrei und flüssigkeitsdicht, falls die Dehnung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kleiner ist als 1 ‰. Im Fall von UHFB der Sorte U0 beträgt der entsprechende Wert $0,9 \cdot \frac{f_{Utek}}{E_{Ut}}$.

4.2.4.3 Die Durchbiegung infolge Kriechen darf wie folgt abgeschätzt werden:

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

Die Kriechzahl ist für Druck- resp. Zugspannungen im UHFB gemäss 3.2.3 zu ermitteln.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

4.3 UHFB-Beton-Verbundbauteile

4.3.1 Allgemeines

4.3.1.1 Die Herstellung eines Verbundbauteils aus UHFB auf einem Untergrund aus Stahlbeton führt zu einem Eigenspannungszustand im Bauteil. In der UHFB-Schicht bilden sich Zugspannungen infolge Behinderung der Verformungen durch Schwinden und temperaturabhängiger Vorgänge im UHFB. Das Kriechen des UHFB führt zu einer bedeutenden Reduktion dieser Eigenspannungen.

4.3.1.2 Der Eigenspannungszustand ist abhängig von den Baustoff- und Tragwerkseigenschaften und wird durch den Einspanngrad beschrieben:

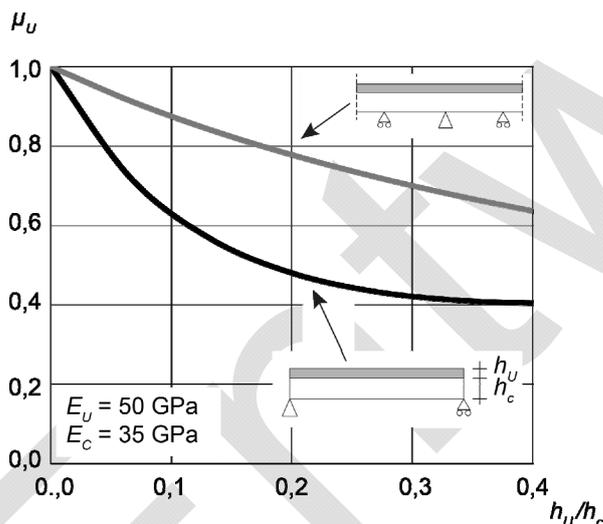
$$\mu_U = \frac{\sigma_{Ue}}{\sigma_{Ue,\max}} \quad (18)$$

mit :

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

4.3.1.3 Der Einspanngrad kann für jede Tragwerkskonfiguration unter Berücksichtigung der geometrischen Eigenschaften und der Elastizitätsmodule der beteiligten Baustoffe ermittelt werden. Der Einspanngrad darf mit Hilfe von Figur 8 ermittelt werden.

Figur 8 Ermittlung des Einspanngrads der UHFB-Schicht auf einem Betonuntergrund für zwei unterschiedliche Freiheitsgrade



4.3.1.4 Bei der Ermittlung von Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und von Tragwiderständen sind Vordehnungen infolge Verformungsbehinderung, Beanspruchungen im Betonbauteil zum Verstärkungszeitpunkt oder Vorspannung zu berücksichtigen. Im Grenzzustand der Tragsicherheit dürfen Beanspruchungen im Verbundsystem durch Verformungsbehinderung im jungen Alter, insbesondere Zugdehnungen im UHFB, vernachlässigt werden, falls UHFB der Sorten UA und UB eingesetzt wird.

4.3.2 Beiwerte

4.3.2.1 Der Faserorientierungsbeiwert η_K hängt von der Bauteilgeometrie und vom Herstellungsprozess ab. Er beträgt:

- $\eta_K = 0,90$ bei globalem Tragverhalten (Spannungsumlagerungen sind möglich, z.B. Platten oder statisch unbestimmte Systeme),
- $\eta_K = 0,75$ bei lokalem Tragverhalten (Spannungsumlagerungen sind nicht möglich, z.B. Verankerungszonen).

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

4.3.2.2 Für Schichtdicken von UHFB bis 80 mm beträgt der Beiwert $\eta_{hU} = 1,0$. Für Schichtdicken grösser als 80 mm beträgt der Beiwert $\eta_{hU} = 0,80$.

4.3.2.3 Der Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer beträgt im Allgemeinen: $\eta_t = 1,0$.

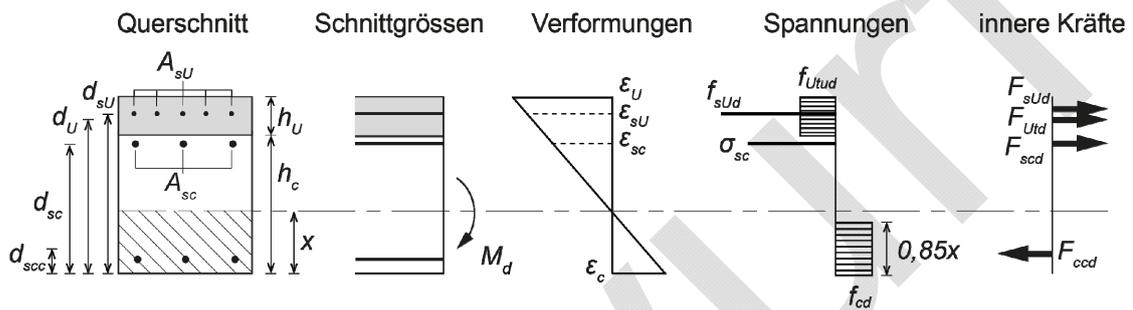
4.3.3 **Nachweis der Tragsicherheit**

4.3.3.1 Biegung

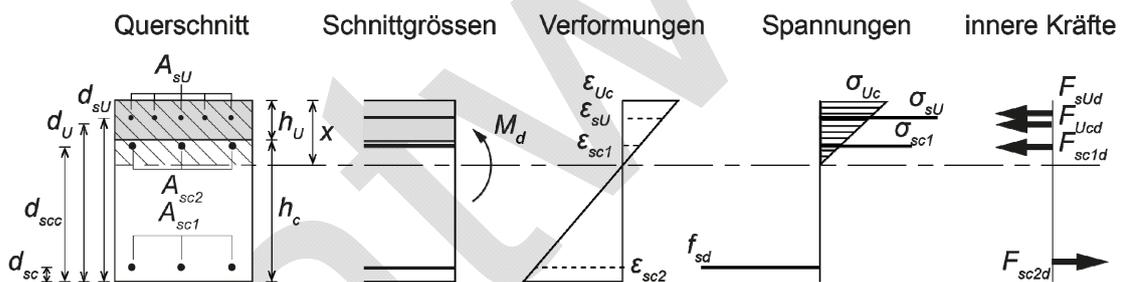
4.3.3.1.1 Der Tragwiderstand unter reiner Biegung darf mit dem Modell gemäss Figur 9 ermittelt werden. Vordehnungen sind gemäss 4.3.1.4 zu berücksichtigen. Für schiefe Biegung und Biegung mit Normalkraft ist das Modell analog anzuwenden.

Figur 9 Biegewiderstand von Verbundbauteilen im Grenzzustand der Tragsicherheit

a) für Biegemomente, wenn der UHFB unter Zugbeanspruchung steht



b) für Biegemomente, wenn der UHFB unter Druckbeanspruchung steht

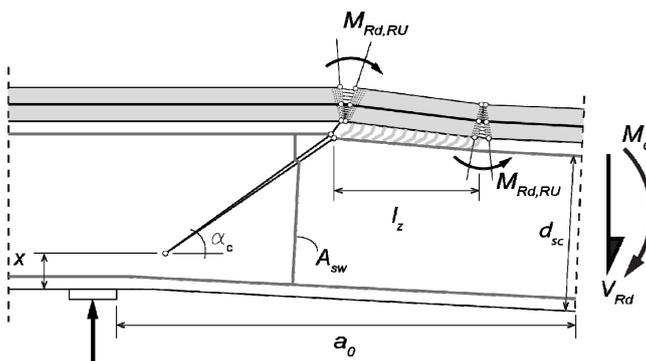


4.3.3.1.2 UHFB weist ein geringeres Verformungsvermögen als Betonstahl auf. Bei der Bildung von Fließgelenken darf für den UHFB eine mittragende Wirkung über eine Dehnung von bis zu $3 \cdot \epsilon_{Ult}$ bei einer Zugspannung von $\sigma_{Utd} = 0,9 \cdot f_{Utd}$ angenommen werden. Für Dehnungen grösser als $3 \cdot \epsilon_{Ult}$ darf keine mittragende Wirkung des UHFB mehr angenommen werden; in diesem Fall verbleibt einzig der Betonstahl im UHFB zur Aufnahme von Zugkräften.

4.3.3.2 Querkraft

Der Querkraftwiderstand von UHFB – Beton Verbundbauteilen wird aus der Superposition der Querkraftwiderstände des Stahlbetonteils und der bewehrten UHFB Schicht gemäss Figur 10 ermittelt:

Figur 10: Model für die Ermittlung des Querkraftwiderstands



Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Der Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands beträgt:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,U} \quad (19)$$

mit :

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

Für die Neigung α_c des Hauptschubrisses im Stahlbeton darf angenommen werden: $20^\circ \leq \alpha_c \leq 60^\circ$. In einem ersten Ansatz gilt: $\alpha_c = 35^\circ$.

Für die Höhe der Druckzone gilt: $x = 0.9 \cdot \omega_m \cdot d_{eq}$ (21)

mit: $\omega_m = \frac{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}{A_c f_{cd}}$ und $d_{eq} = \frac{d_{sc} A_{sc} f_{sd} + d_U A_U f_{Utd} + d_{sU} A_{sU} f_{sUd}}{A_{sc} f_{sd} + A_U f_{Utd} + A_{sU} f_{sUd}}$ (22,23)

- Bemessungswert des Tragwiderstands einer vertikalen Querkraftbewehrung:

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

- Bemessungswiderstand des Querkrafttragwiderstands von UHFB mit Bewehrung:

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

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

4.3.3.3 Ermüdung

Der Ermüdungsnachweis von Biegeelementen erfolgt für die Dauerfestigkeit analog zu 4.2.3.3.

4.3.3.4 Schubspannung im Bereich der Grenzschicht zwischen UHFB und Beton

4.3.3.4.1 Falls die Grenzschicht zwischen UHFB und Beton gemäss 5.4.2 und 6.2.3 hergestellt wird und die Festigkeit des Untergrundbetons höher ist als diejenige eines Betons C20/25, darf auf einen rechnerischen Nachweis der Tragsicherheit der Grenzschicht verzichtet werden.

4.3.3.4.2 Bei einer Festigkeit des Untergrundbetons kleiner als diejenige eines Betons C20/25 ist nachzuweisen, dass die Schubspannung entlang der Grenzschicht kleiner als 50% der Schubfestigkeit des Untergrundbetons gemäss SIA 262 ist.

4.3.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Die Tabelle 3 gibt die UHFB-Sorte in Abhängigkeit des Einspanngrads an, falls die UHFB-Schicht flüssigkeitsdicht sein muss.

Tabelle 3 Einspanngrad und erforderliche UHFB Sorte für eine flüssigkeitsdichte UHFB-Schicht

Einspanngrad μ_U	UHFB-Sorte
< 0,6	UA
0,6 – 0,8	UA ¹⁾ , UB
> 0,8	UB

¹⁾ Durch eine detaillierte Untersuchung des Tragverhaltens ist nachzuweisen, dass die Sorte UA den Anforderungen genügt.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

5 KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG

5.1 Grundsätze

- 5.1.1 Die Wahl der Abmessungen der UHFB-Bauteile und der UHFB-Schichten ist auf die Bewehrungsmenge und die Bewehrungsführung abzustimmen. Die Bewehrungsführung muss ein qualitativ einwandfreies Einbringen und Selbstverdichten des UHFB ermöglichen.
- 5.1.2 Die konstruktive Durchbildung muss dem der Tragwerksanalyse zugrunde gelegten Tragwerksmodell entsprechen.

5.2 Bewehrungsführung

- 5.2.1 In der Regel werden Bewehrungsstäbe mit Durchmessern \varnothing_s zwischen 8 mm und 20 mm verwendet.
- 5.2.2 Die Bewehrungsüberdeckung c_{nom} beträgt im Allgemeinen 15 mm. Schalungsseitig darf sie auf 10 mm oder die maximale Faserlänge reduziert werden. Für Spannglieder, die im Spannbettverfahren eingesetzt werden, entspricht die Bewehrungsüberdeckung c_{nom} dem zwei-fachen Litzen- oder Drahtdurchmesser. Der grössere Wert ist massgebend.
- 5.2.3 Der lichte Abstand zwischen zwei Bewehrungsstäben oder zwei Spanngliedern beträgt mindestens 20 mm oder 1,5-mal die Faserlänge. Der grössere Wert ist massgebend.
- 5.2.4 Für Verankerungen in zugbeanspruchten Bereichen beträgt der Grundwert der Verankerungslänge von gerippten Bewehrungsstäben und Matten aus Betonstahl mit einem charakteristischen Wert der Fließgrenze von 500 MPa mindestens $15 \varnothing_s$.
Innerhalb der Verankerungslänge darf die Kraftzunahme im Stab gemäss SIA 262 angenommen werden. Im Falle von Querdruck, z.B. über Auflagern, sowie bei Verwendung von Endhaken darf die Verankerungslänge um 30% reduziert werden.
Die Aufnahme örtlicher Querkraftkräfte im Verankerungsbereich von Bewehrungsstäben durch UHFB alleine ist nachzuweisen, oder es ist eine Querbewehrung vorzusehen.
- 5.2.5 Für Stösse, Umlenkungen und Krümmungen von Bewehrungsstäben gelten die Angaben gemäss SIA 262 sinngemäss.
- 5.2.6 Bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen sind Schweissungen der Bewehrung wegen der geringen Ermüdungsfestigkeit zu vermeiden. Verankerungen und Kupplungen von Spanngliedern sind in Bereichen kleiner Spannungsdifferenzen anzuordnen.

5.3 UHFB-Fertigteile und zusammengesetzte Bauteile

- 5.3.1 Bei der Projektierung von UHFB-Fertigteilen und daraus zusammengesetzten Bauteilen sind neben dem Endzustand auch die Bauzustände während Transport und Montage zu untersuchen. Dabei muss die zeitliche Entwicklung der UHFB-Festigkeit berücksichtigt werden.
- 5.3.2 Die Verankerungs- und Befestigungsvorrichtungen werden entsprechend dem mechanischen Verhalten und der Versagensart sowie aufgrund der Verträglichkeit mit den anderen Bauteilen gewählt. Ausserdem sind die Sicherheits- und Montageanweisungen zu berücksichtigen. Der Tragwiderstand der Befestigungen wird gemäss SIA 179 ermittelt.

5.4 UHFB-Beton-Verbundbauteile

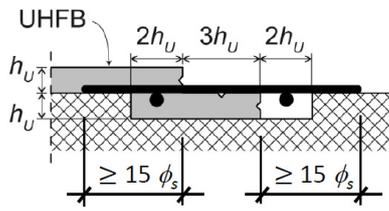
- 5.4.1 Die Schichtdicken des UHFB betragen üblicherweise 25 mm bis 80 mm.
- 5.4.2 Für das monolithische Tragverhalten von Verbundbauteilen ist ein kraftschlüssiger Verbund zwischen UHFB-Schicht und Betonuntergrund erforderlich, der gemäss 6.2.3 erhalten wird.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

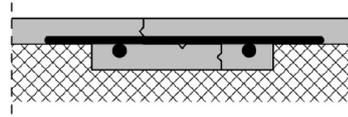
5.4.3 Arbeitsfugen können gemäss dem in Figur 11 angegebenen Detail ausgeführt werden. Der Gehalt der Anschlussbewehrung beträgt wenigstens 2,4% des UHFB-Querschnitts A_U (Schichtdicke h_U) ausserhalb der Fuge. Die Verankerungslänge dieser Anschlussbewehrung wird gemäss 5.2.4 bestimmt.

Figur 11 Konstruktives Detail für die Ausbildung einer Arbeitsfuge in UHFB

Schritt 1 :



Schritt 2 :



Entwurf

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

6 AUSFÜHRUNG

6.1 Herstellung von UHFB

- 6.1.1 Die Herstellung von UHFB erfolgt im Betonwerk oder in einer auf der Baustelle installierten Mischanlage. Die Mischfolge und die Mischzeit hängen von der UHFB-Sorte ab.
- 6.1.2 Hinsichtlich des Mischens sind folgende Hinweise zu beachten:
- Das Gesamtvolumen der Trockenkomponenten beträgt etwa das Zweifache des Frisch-UHFB-Volumens. In der Regel kann der Mischtrog bis zur Hälfte, maximal bis zu 2/3 der nominalen Kapazität, gefüllt werden.
 - Die Dosiertoleranz von Zement, Wasser, Silikastaub, Zusatzmittel (Fließmittel), Quarzsand und Stahlfasern beträgt $\pm 2\%$ (Massenprozent). Als Anmachwasser ist Frischwasser zu verwenden. Die Verwendung von Restwasser ist nicht zugelassen.
 - Der Mischtrog wird vor der erstmaligen Beschickung mit den UHFB-Ausgangsstoffen sorgfältig vorgeässt ohne Wasserlachen zu hinterlassen.
 - Die Mischzeit gebräuchlicher UHFB beträgt 5 bis 15 Minuten.
 - Nach dem Mischen dürfen weder Wasser noch Zusatzmittel (Fließmittel) dem Frisch-UHFB zugegeben werden.
 - Bei der Rezyklierung des Waschwassers im Betonwerk kann es zu einem mechanischen Abrieb von Pumpen und Leitungen durch Stahlfasern kommen. Es können sich Fasern in den Filtern ansammeln.
- 6.1.3 Frisch-UHFB wird in der Regel mit einem Betonfahrmischer transportiert. Dabei sind folgende Hinweise zu beachten:
- Vor der Befüllung des Frisch-UHFB ist die Trommel des Betontransporters vollständig zu entleeren.
 - Der Frisch-UHFB wird mit langsam drehender Trommel während der Fahrt transportiert. Zur vollständigen Entleerung des Betonfahrmischers empfiehlt es sich, die Trommel gegen Ende der Entleerung kurz ruhen zu lassen und anschliessend langsam drehend zu entleeren.
 - Vor der Entleerung ist der UHFB durch schnelles Drehen der Trommel während fünf Minuten zu mischen.
 - Je nach UHFB-Sorte kann eine wesentliche Menge an Frisch-UHFB in der Trommel kleben bleiben.

6.2 Einbau und Nachbehandlung von UHFB

- 6.2.1 Bei der Verarbeitung von UHFB sind folgende Hinweise zu beachten:
- Frisch-UHFB ist in der Regel viskos. Gewisse UHFB zeigen ein thixotropes Verhalten.
 - Die Verarbeitungszeit hängt von der Zusammensetzung des UHFB ab. In der Regel beträgt sie 2 Stunden bei Umgebungstemperaturen zwischen $+ 5\text{ °C}$ und $+ 30\text{ °C}$.
 - Die Schalung ist für den vollen hydrostatischen Frisch-UHFB-Druck zu bemessen.
 - Die Dichtheit der Schalung muss gewährleistet werden.
 - Vor dem Einbau ist ein detaillierter Einbauplan zu erstellen, der die Anzahl herzustellender Chargen berücksichtigt.
 - Beim Einbau mit einem Betonierkübel ist auf einen dichten Verschluss der Auslassklappe zu achten.
 - Der Frisch-UHFB wird dosiert aus dem Kübel oder Dumper abgelassen, damit der Aufwand für das anschliessende Ausbreiten und Egalisieren auf die erforderliche Schichtdicke gering bleibt.
 - Die Herstellung der UHFB-Schichtdicke erfordert eine hohe Präzision, welche durch Distanzhalter und Höhenanzeiger erreicht werden kann. Beim Einbau von dünnen UHFB-Schichten können unregelmässige Oberflächen des Betonuntergrunds zu einem deutlichen Mehrverbrauch führen. Dies ist bei der Vorbereitung der Ausschreibung zu beachten.
 - UHFB ist in der Regel nach 12 bis 24 Stunden begehbar und nach 48 bis 60 Stunden befahrbar. Bei niedrigeren Temperaturen verzögert sich die Aushärtung.
 - Zur Pumpbarkeit von UHFB liegen erst wenige Erfahrungen vor. Mit weicher Konsistenz und reduziertem Fasergehalt kann UHFB gepumpt werden
 - Der UHFB ist solange vor schädlichen Erschütterungen zu schützen, bis er eine genügende Festigkeit entwickelt hat.
- 6.2.2 Die Abfolge des Einbaus von UHFB ist zu planen. Es wird ein kontinuierliches Giessen empfohlen oder es ist eine Arbeitsfuge gemäss Figur 11 vorzusehen.
- 6.2.3 Bei UHFB-Beton-Verbundbauteilen wird die Kontaktfläche (Oberfläche des Betonuntergrunds) mit Methoden wie Hochdruckwasserstrahlen oder Sandstrahlen aufgeraut. Dabei sind lose Partikel und den Verbund min-

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

dernde Substanzen (Fett, Öl) vollständig zu entfernen. Die erforderliche Rautiefe der Oberfläche beträgt 3 bis 5 mm, und allein das Entfernen der Zementhaut des Untergrunds ist nicht ausreichend. Im Übrigen gelten die Angaben gemäss SIA 269/2.

- 6.2.4 Vor dem Einbau des Frisch-UHFB wird die Verarbeitbarkeit nachgewiesen, welche die Anforderungen gemäss C.4 erfüllen muss. Der Frisch-UHFB wird auf einen vorgängig wassergesättigten, an der Oberfläche jedoch matfeuchten Untergrund gegossen. Stehendes Wasser auf dem Untergrund muss entfernt werden. Das Einbringen bei starkem Regen ist zu vermeiden.
- 6.2.5 Exponierte Oberflächen des eingebauten Frisch-UHFB müssen umgehend mit einer Kunststoffolie vor Austrocknung geschützt werden. Auf der Baustelle ist eine feuchte Nachbehandlung (tägliches Benetzen mit Wasser) während 7 Tagen und unmittelbar nach dem Ansteifen durchzuführen. Die Eignung von Curingmitteln ist nachzuweisen.
- 6.2.6 Bei 20 °C Umgebungstemperatur darf UHFB in der Regel frühestens 24 Stunden nach dem Einbringen ausgeschalt werden. Die Hinweise zur Festigkeitsentwicklung des UHFB sind zu beachten.
- 6.2.7 Bei Fertigteilen kann vor oder nach dem Erstarren des UHFB eine thermische Behandlung erfolgen, um Schwindprozesse zu verkürzen und verbesserte mechanische Eigenschaften zu erreichen.
- 6.2.8 Die Masstoleranzen für Bauteile aus UHFB und UHFB-Schichten sind projekt- und objektspezifisch festzulegen. Wenn keine Festlegungen getroffen werden, gelten die Angaben der SIA 262, SIA V414/10 und SIA 414/2.
Für die Abmessungen und die Bearbeitung von Bewehrungen gelten die Masstoleranzen gemäss Anhang A der Norm SIA 262.
- 6.2.9 Bei UHFB-Beton-Verbundbauteilen und bei winterlichen Verhältnissen darf die minimale Temperatur des Untergrunds +5°C nicht unterschreiten. Nach dem Einbau ist der UHFB umgehend mit thermisch isolierenden Matten zu schützen.

6.3 Prüfungen

- 6.3.1 Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit des Frisch-UHFB und die Kontrolle der Gleichmässigkeit seiner Herstellung erfolgt gemäss C.4.
- 6.3.2 Die Prüfungen zur Ermittlung der Eigenschaften von UHFB sind in den Anhängen B bis E definiert. Für den Konformitätsnachweis der Konsistenz, der Rohdichte und der Druckfestigkeit gelten sinngemäss die Regelungen der SN EN 206-1. Für andere Eigenschaften sind die Prüfungen und Kriterien projektspezifisch festzulegen.
- 6.3.3 Die Konformität von Bewehrungs- und Spannstahl wird gemäss SIA 262 nachgewiesen.
- 6.3.4 Für Ausgangsstoffe von UHFB gelten die Anforderungen an die Ausgangsstoffe von Beton gemäss SN EN 206-1, Abschnitt 5.1.

6.4 Eigenschaften der UHFB Oberfläche

- 6.4.1 Bei Kontakt mit (tausalzhaltigem) Wasser bilden Spitzen von Stahlfasern, welche sich an der Oberfläche befinden, Korrosionspunkte. Diese Korrosionsbildung kann durch die Verwendung einer Schalungsoberfläche aus Holz oder mit einer Wasser abführenden Schalungseinlage vermindert werden. Alternativ können nicht-rostende Stahlfasern verwendet werden. Korrosionserscheinungen an der Oberfläche haben keine nachteiligen Folgen für die Dauerhaftigkeit.
- 6.4.2 Glatte UHFB-Flächen auf der Fahrbahnplattenoberseite sind (für Strassenfahrzeuge) wegen ungenügender Griffigkeit nicht befahrbar, ausser es werden besondere Vorkehrungen beim Giessen des UHFB getroffen, um eine Oberflächentextur (z.B. in Form einer Riffelung, Einstreuen von Splitt auf die frisch eingebrachte UHFB-Oberfläche) mit einer genügenden Griffigkeit herzustellen. In der Regel wird auf UHFB-Oberflächen, die von Strassenfahrzeugen befahren werden, ein bituminöser Belag mit einem Haftvermittler aufgebracht.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

6.5 Arbeitssicherheit

- 6.5.1 Es gelten die für den Umgang mit Zement, Silikastaub und Quarz üblichen Sicherheitsvorkehrungen (Schutz der Haut, der Atemwege und der Augen).
- 6.5.2 Der Umgang mit Stahlfasern erfordert spezielle Vorkehrungen. Bei der UHFB-Herstellung und Verarbeitung, der Reinigung von Maschinen und Werkzeugen sowie dem Hantieren mit Prüfkörpern oder Fertigteilen besteht Verletzungsgefahr von Haut und Augen durch umherfliegende oder hervorstehende Stahlfasern. Das Tragen von Schutzhandschuhen und einer Schutzbrille ist unerlässlich.
- 6.5.3 Beim Transport von Fertigteilen oder Prüfkörpern können aus der Oberfläche herausstehende Stahlfasern die Hebezeuge (Tragschlingen usw.) beschädigen.

Entwurf

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang A (informativ) Eigenschaften von UHFB

- A.1 Die Konsistenz von UHFB kann zwischen selbstverdichtend (Ausbreitmass von 550 bis 800 mm gemäss SN EN 206-9) und thixotrop (mit Gefälleignung) liegen.
- A.2 Die Tabelle 4 enthält Richtwerte gebräuchlicher UHFB.

Tabelle 4 Richtwerte gebräuchlicher UHFB

Eigenschaft	Bezeichnung	Typische Werte (Alter: 28 Tage)
Elastizitätsmodul (Zug / Druck)	E_U	40 – 60 GPa
Querdehnungszahl	ν_u	0,2
Druckfestigkeit	f_{Uc}	120 – 200 MPa
Elast. Grenzzugfestigkeit	f_{Ute}	7 – 12 MPa
Zugfestigkeit	f_{Utu}	7 – 15 MPa
Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit (Verfestigung)	ϵ_{Utu}	0 – 5 ‰
Spezifische Bruchenergie	G_{FU}	8 – 25 kJ/m ²
Temperaturausdehnungskoeffizient	α_U	10 ⁻⁵ / °C
Endschwindmass	$\epsilon_{U\infty}$	ohne thermische Behandlung : 0,6 – 0,8 ‰ mit thermischer Behandlung ¹⁾ : 0 ‰
Endkriechzahl	$\varphi_{U\infty}(t_\infty, t_0)$	ohne thermische Behandlung: 1,0 ($t_0 = 7$ Tage); 0,8 – 1,0 ($t_0 = 28$ Tage) mit thermischer Behandlung ¹⁾ : 0,2 – 0,4
Rohdichte des erhärteten UHFB	ρ_U	2300 bis 2700 kg/m ³ je nach Menge und Art der Fasern

¹⁾ Behandlung bei 90°C und >95% relative Luftfeuchtigkeit während 48 Stunden.

- A.3 Richtwerte der Verbundfestigkeit von gerippten Bewehrungsstäben im UHFB betragen $\tau_{bU} = 35 – 45$ MPa. Richtwerte der Verbundfestigkeit von nicht profilierten Bewehrungsstäben (mit Walzhaut) im UHFB betragen $\tau_{bU} = 18 – 22$ MPa.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang B (normativ) Qualitätssicherung

B.1 Die Tabellen 5 und 6 legen die Prüfungen für UHFB fest, die bei den Erstprüfungen, den periodischen Qualitätsprüfungen des Herstellers sowie den Eignungs- und Qualitätsprüfungen auf der Baustelle durchzuführen sind. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Prüfungen für UHFB, der als Premix angeliefert wird (Tabelle 5), und UHFB bei einer Rezeptur mit separaten Komponenten (Tabelle 6).

Die Häufigkeiten der Eignungs- und Qualitätsprüfungen gemäss den Tabellen 5 und 6 sind Richtwerte, die aufgrund von vorhandenen Angaben zum UHFB, Ergebnissen von Versuchen an Bauteilen, der einzubauenden UHFB-Menge sowie projektspezifischen Annahmen bei der Tragwerksanalyse und Bemessung vom Projektverfasser angepasst werden dürfen.

Es wird empfohlen, die Prüfungen von mit der UHFB-Prüfung erfahrenen Prüflabors ausführen zu lassen.

Tabelle 5 Prüfungen für UHFB, der als Premix angeliefert wird

Art der Prüfung		Erstprüfungen		periodische Qualitätsprüfungen des Herstellers				Eignungsprüfungen		Qualitätsprüfungen	
Verantwortlich		Hersteller des UHFB-Premix		Hersteller des UHFB-Premix				Unternehmer		Unternehmer	
		UHFB mit Fasern		Premix Überwachung (ohne Fasern)		UHFB Überwachung (Premix und Fasern)		UHFB mit Fasern		UHFB mit Fasern	
Prüfmethode	Referenz		Häufigkeit		Häufigkeit		Häufigkeit		Häufigkeit		Häufigkeit
Verarbeitbarkeit	Ziffer C.4	X	5 Jahre	X	je 120 Tonnen, mind. alle 2 Produktionsmonate		2 pro Jahr	X	A	X	C
Druckfestigkeit	Ziffer C.1	X		X		X		X	A	X	C
Elastizitätsmodul	Ziffer C.1	X									
Biegezugprüfung	Anhang E	X				X		X	B	X	D
Zugverhalten	Anhang D	X				X	2,5 Jahre				
Dichtheit	Ziffer C.3	X									
Gefälleeignung	Ziffer C.5	X ¹⁾						X ¹⁾	A		
Haftzugfestigkeit	Ziffer C.6							X	A	X	C
Schwinden	Ziffer C.7	X									
Kriechen	Ziffer C.7	X									

X : Prüfung durchführen
1) nur falls der UHFB als gefällegeeignet deklariert ist
A: 1-mal vor jeder Ausführung
B: 1-mal vor jeder Ausführung, falls das einzubauende UHFB Volumen 10 m³ überschreitet
C: 1-mal pro Einbaustappe oder alle 10 m³ hergestelltem UHFB
D: mindestens 1-mal pro Ausführung oder alle 150 m³ eingebautem UHFB

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Tabelle 6 Prüfungen für UHFB bei einer Rezeptur mit separaten Komponenten

Art der Prüfung		Erstprüfungen		periodische Qualitätsprüfungen des Herstellers		Eignungsprüfungen		Qualitätsprüfungen	
Verantwortlich		Hersteller des UHFB		Hersteller des UHFB		Untnehmer		Untnehmer	
Prüfmethode	Referenz		Häufigkeit		Häufigkeit		Häufigkeit		Häufigkeit
Verarbeitbarkeit	Ziffer C.4	X	5 Jahre	X	je Produktionstag	X	A	X	C
Druckfestigkeit	Ziffer C.1	X		X	je 50 m ³ , mind. 1x je Produktionswoche	X	A	X	D
Elastizitätsmodul	Ziffer C.1	X							
Biegezugprüfung	Anhang E	X		X	je 150 m ³	X	B	X	E
Zugverhalten	Anhang D	X		X	alle 1000 m ³				
Dichtheit	Ziffer C.3	X							
Gefälleignung	Ziffer C.5	X ¹⁾					X ¹⁾	A	
Haftzugfestigkeit	Ziffer C.6						X	A	X
Schwinden	Ziffer C.7	X							
Kriechen	Ziffer C.7	X							

X : Prüfung durchführen
 1) nur falls der UHFB als gefällegeeignet deklariert ist
 A: 1-mal vor jeder Ausführung
 B: 1-mal vor jeder Ausführung, falls das einzubauende UHFB Volumen 50 m³ überschreitet
 C: 1-mal pro Einbaustappe. Bei jeder LKW-Lieferung UHFB für speziellen Einbau (z.B. Gefälle >5% oder maschineller Einbau)
 D: mindestens 1-mal pro Ausführung oder alle 50 m³ eingebautem UHFB
 E: mindestens 1-mal pro Ausführung oder alle 300 m³ eingebautem UHFB

- B.2 Die eingebauten Baustoffmengen (Komponenten) sind bei der Herstellung und beim Einbau des Frisch-UHFB detailliert zu kontrollieren.
- B.3 Für den Nachweis der Konformität des UHFB gemäss Erstprüfungen sind die Konformitätserklärung sowie das Zertifikat der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) bereitzustellen.
- B.4 Bezüglich der Produktionskontrolle von UHFB gelten sinngemäss die Bestimmungen von Anhang C der SN EN 206-1.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang C (normativ)

UHFB Prüfungen

- C.1 Die Zylinder- oder Würfeldruckfestigkeit wird gemäss SN EN 12390-3 ermittelt. Die Prüfkörper sind Zylinder mit einem Durchmesser von 70 mm und einer Höhe von 140 mm oder Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm. Als Verhältnis zwischen der Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit darf ein Richtwert von 0,95 angenommen werden. Die Druckfestigkeit wird im Prüfkörperalter von 28 Tagen ermittelt. Die Festigkeitswerte werden anhand von 3 Prüfkörpern ermittelt.
- Der Elastizitätsmodul ist gemäss SN EN 12390-13 zu ermitteln. Bei der Erstprüfung wird er anhand von 6 Prüfkörpern ermittelt. Bei der Eignungsprüfung oder Qualitätsprüfung genügen 3 Prüfkörper.
- Alternativ darf die Druckfestigkeit auch mittels Prismen mit einem Querschnitt von 40 mm x 40 mm und einer Länge von 160 mm ermittelt werden, wobei als Verhältnis zwischen der Prismendruckfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit (Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 100 mm) ein Wert von 1,4 gilt.
- C.2 Die Prüfungen zur Ermittlung des Zug- und Biegezugverhaltens gemäss den Anhängen D und E werden in der Regel an 28 Tage alten Prüfkörpern durchgeführt.
- Für die werkseigene Produktionskontrolle darf die Biegezugfestigkeit auch mittels Prismen mit einem Querschnitt von 40 mm x 40 mm und einer Länge von 160 mm ermittelt werden.
- C.3 Die Dichtheit der UHFB-Schicht wird mit dem Wasseraufnahmeversuch (Kapillaritätsmethode) gemäss SN EN 13057 oder alternativ nach SN EN 1925 nachgewiesen. Die Anforderungen für flüssigkeitsdichten UHFB werden erfüllt, falls die an Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von 30 mm gewonnenen Werte des Kapillaritätskoeffizienten für 28 Tage alten UHFB einen Mittelwert $\leq 100 \text{ g/m}^2 \text{ h}^{0.5}$ aufweisen. Die Dichtheit wird anhand von 6 Prüfkörpern ermittelt.
- C.4 Die Verarbeitbarkeit von Frisch-UHFB wird mit dem Setzfließmass nach SN EN 12350-8 nachgewiesen. Die Messungen erfolgen 1 Minute und 5 Minuten nach dem Hochheben des Hohlkegelstumpfs. Zusätzlich werden bei der Herstellung von Prüfkörpern für Prüfungen der mechanischen Eigenschaften die Rohdichte des Frisch-UHFB (nach SN EN 12350-6) und der Gehalt an eingeschlossener Luft (nach SN EN 12350-7) gemessen. Als Alternative sind Mörtelprüfverfahren für die Bestimmung von Dichte und Luftgehalt gemäss SN EN 413-2 ebenfalls zugelassen.
- C.5 Die Gefälleignung des Frisch-UHFB für Gefälle von mehr als 2% ist mit einer geneigten Platte mit Abmessungen von 3,0 m (in Gefällerrichtung) x 1,0 m (Breite) nachzuweisen. Die Plattenneigung entspricht dem erforderlichen Gefälle, und die Rauigkeit der Plattenoberfläche ist repräsentativ für die vorgesehene Anwendung. Die UHFB-Schicht weist eine Dicke von mindestens 25 mm oder die für die Anwendung vorgesehene Dicke auf. Falls eine Bewehrung im UHFB vorgesehen ist, so ist diese zu berücksichtigen. Das Akzeptanzkriterium wird projektspezifisch festgelegt und basiert auf einer visuellen Kontrolle allfälliger Verformungen der UHFB Schicht nach dem Einbau und nach dem Erhärten.
- C.6 Die Haftzugfestigkeit wird nach SN EN 1542 durchgeführt. Das Mindestalter des UHFB beträgt 7 Tage. Bei Eignungsprüfungen müssen der Untergrund und seine Oberflächenbeschaffenheit repräsentativ sein für das auszuführende Objekt. Die Anforderungen werden erfüllt, falls der Bruch im Betonuntergrund erfolgt und die projektspezifischen Anforderungen an die Haftzugfestigkeit des Betons erfüllt sind. Die Anzahl Prüfungen ist projektspezifisch festzulegen.
- C.7 Im Rahmen der Erstprüfungen sind das Schwind- und Kriechverhalten des UHFB zu ermitteln. Die Methode zur Ermittlung des Endschwindmasses und der Endkriechzahl sowie die Ergebnisse sind anzugeben. Die Methode zur Messung der Schwindverformung erfasst das autogene Schwinden und erfolgt unter isothermen Bedingungen ab der Herstellung des Prüfkörpers bis 6 Monate. Das Schwind- und Kriechverhalten wird anhand von jeweils 3 Prüfkörpern ermittelt.
- C.8 Im Hinblick auf die Erfüllung spezifischer Anforderungen sind im Rahmen der Erstprüfungen oder der Eignungsprüfungen der Feuerwiderstand und der Abriebwiderstand unter Angabe der jeweiligen Prüfmethode zu ermitteln.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang D (normativ) Prüfung des Zugverhaltens

D.1 Anwendungsbereich

Die nachfolgenden Ziffern legen ein Verfahren fest, mit dem die Kraft-Verformungs-Antwort unter einachsiger Zugbeanspruchung eines ungekerbten Prüfkörpers aus UHFB erhalten wird.

D.2 Definitionen

D.2.1 Die Kraft-Verformungs-Antwort eines Prüfkörpers aus UHFB wird durch seine vollständige Kraft-Verformungs-Kurve beschrieben bis zum Erreichen einer Restkraft von 20% der Maximalkraft oder einer mittleren Längenänderung des Prüfkörpers im Messbereich, die 20% grösser als die halbe maximale Faserlänge ist.

D.2.2 Die mittlere Verschiebung ist definiert als der Mittelwert der Messungen der beiden induktiven Wegaufnehmer, die auf den beiden gegenüberliegenden Seiten des Prüfkörpers befestigt werden.

D.2.3 Die Spannung ist definiert als das Verhältnis zwischen der gemessenen Kraft und dem Querschnitt des zentralen Bereichs des Prüfkörpers.

D.2.4 Die Dehnung im elastischen und verfestigenden Bereich ist definiert als das Verhältnis des Mittelwerts der Verformung und der Basismesslänge der Wegaufnehmer $l_{mes,1}$ (Wegaufnehmer zwischen den Punkten C und E sowie L und J) und $l_{mes,2}$ (Wegaufnehmer zwischen den Punkten O und P sowie Q und R).

D.3 Prinzip

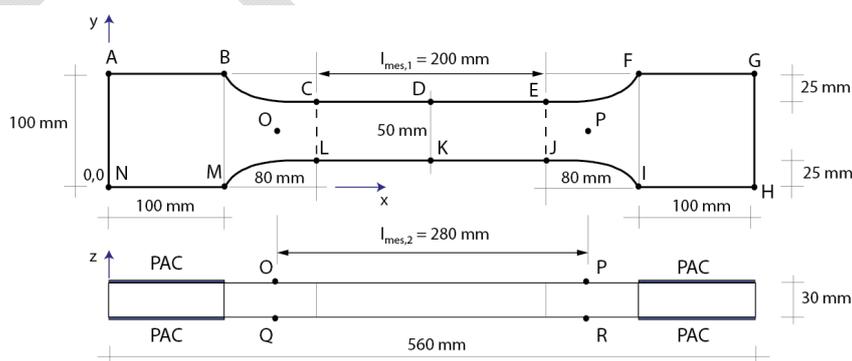
D.3.1 Der Versuch wird in einer Prüfmaschine mit einem Messbereich von 50 kN bis 200 kN kolbenweggesteuert oder verformungsgesteuert auf der Basis der Messwerte der Wegaufnehmer durchgeführt.

D.3.2 Die beiden Wegaufnehmer werden an den Punkten C und E auf der einen Seite sowie L und J auf der anderen Seite befestigt. Zwei weitere Wegaufnehmer werden auf den ebenen Seiten des Prüfkörpers bei den Punkten O und P auf der einen Seite sowie Q und R auf der anderen Seite befestigt, um die Messung der Verschiebung auch dann zu gewährleisten, falls der Bruch in unmittelbarer Nähe der Zone der Querschnittsänderung auftreten sollte.

D.3.3 Die Zugbeanspruchung wird entlang der x-Achse aufgebracht. Diese Zugbeanspruchung kann eingeleitet werden mit Hilfe von Aluminiumplatten (PAC) von 1,5 mm Dicke, die auf den Seitenflächen ABMN und FGHI aufgeklebt werden, und in der Prüfmaschine durch die Klemmbacken der Prüfmaschine festgehalten werden.

D.3.4 Die Auflagerbedingungen der Prüfkörperenden müssen der Art «eingespannt» entsprechen, also ohne Rotationsvermögen.

Figur 12 Einachsiger Zugversuch, Prüfkörper und Anordnung der Wegaufnehmer



PAC: aufgeklebte Aluminiumplatten von 1.5mm Dicke

Kurven B-C, E-F, I-J, L-M gemäss D.11

D.4 Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung besteht aus einer in zwei Richtungen (Zug/Druck) arbeitenden Prüfmaschine (Klasse 1) gemäss SN EN 12390-4, welche die Kraft mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2$ kN misst, Wegaufnehmer mit einem Verschiebungswert von ± 5 bis ± 30 mm und einer maximalen Abweichung von der Linearität von $\pm 0,2\%$ so-

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

wie Messinstrumente für die Messung der Dicke und Breite des Prüfkörpers mit einer maximalen Messungsgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm.

D.5 Herstellung und Vorbereitung der Prüfkörper

D.5.1 Für jede Versuchsreihe werden sechs Prüfkörper, einzeln und einer nach dem anderen, gemäss der in Figur 12 und D.11 gegebenen Geometrie in Schalungen gegossen, wobei das Profil der Prüfkörperverjüngung mit einer Einlage aus leicht verformbarem Material hergestellt wird. Beim Giessvorgang wird eine Ablaufrinne verwendet, um ein kontinuierliches Einbringen des UHFB in die Schalung von einem zum anderen Ende des Prüfkörpers zu gewährleisten, wobei die Dicke von 35 mm auf ± 2 mm einzuhalten ist. Vor der Versuchsdurchführung werden die Prüfkörper auf eine Dicke von 30 mm (± 1 mm) abgeschliffen.

D.5.2 Nach dem Herstellungsvorgang werden die Prüfkörper umgehend mit Hilfe einer Plastikfolie vor Austrocknung geschützt, bei einer Temperatur von 20 °C aufbewahrt, nach einem Tag ausgeschalt und bis 3 – 5 Tage vor dem Versuch gemäss den Angaben der Norm SN EN 12 390-2 aufbewahrt. Beim Transport und bei den Manipulationen beim Abschleifvorgang werden die Prüfkörper vor Austrocknung geschützt. 3 bis 5 Tage vor dem Versuch werden die Prüfkörper während 24 Stunden in der Umgebungsluft bei 20°C Temperatur zunächst getrocknet, bevor die Aluminiumbleche an den Prüfkörperenden und die Auflagerbolzen der Wegnehmer aufgeklebt werden. Danach werden die Prüfkörper wiederum mit einer Plastikfolie vor Austrocknung geschützt und bei einer Temperatur von 20 °C bis zur Versuchsdurchführung aufbewahrt.

D.5.3 Die Abmessungen (Länge und Breite im Mittelbereich) jedes Prüfkörpers werden gemessen. Die Dicke des Prüfkörpers ergibt sich aus dem Mittelwert der an 6 unterschiedlichen Orten gemessenen Dicken, 3 auf jeder Seite im Längssinn und in regelmässigen Abständen.

D.6 Durchführung

D.6.1 Die ersten drei der insgesamt sechs Prüfkörper werden wie folgt geprüft. Der Prüfkörper wird in den elastischen und verfestigenden Bereichen der Prüfkörperantwort einer monoton aufgebracht Verschiebung mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm pro Minute (entsprechend etwa einer Traversengeschwindigkeit von 0.2 mm par Minute) ausgesetzt, basierend auf dem Mittelwert der Wegaufnehmer. Für den entfestigenden Bereich kann die Verschiebungsgeschwindigkeit auf 0,5 mm pro Minute (entsprechend einer Traversengeschwindigkeit von etwa 0.4 mm par Minute) erhöht werden. Die Ablesefrequenz der Messwerte beträgt 5 Hz. Der Versuch ist beendet, wenn die mittlere Längenänderung des Prüfkörpers im Messbereich 20% grösser als die halbe maximale Faserlänge ist.

D.6.2 Bei den verbleibenden drei Prüfkörpern werden zunächst drei Belastungs-/Entlastungs-Zyklen mit der gleichen Geschwindigkeit bis zu einem Drittel des Mittelwerts der Maximalkraft der ersten drei Versuche gefahren. Danach werden die Prüfkörper gemäss D.6.1 geprüft.

D.7 Prüfergebnisse

Die Versuchsauswertung beinhaltet folgende Angaben:

Für jeden Prüfkörper:

- Vollständige Spannungs-Dehnungs-Kurve
- Spannungswert am Ende des elastischen Bereichs mit dazugehöriger Verformung und Elastizitätsmodul gemäss D.8
- Maximaler Spannungswert mit dazugehöriger Verformung
- Neigung des verfestigenden Bereichs (der UHFB-Sorten UA und UB) als Neigung der Geraden durch die elastische Grenzzugfestigkeit und Zugfestigkeit mit den entsprechenden Dehnungswerten
- Spezifische Bruchenergie ermittelt als Verhältnis der Bruchenergie (Fläche unter der Kraft-Verformungs-Kurve) und der kleinsten Querschnittsfläche. Für UHFB der Sorte U0 (ohne Verfestigung) entspricht die Bruchenergie der vollständigen Kraft-Verformungs-Kurve. Für verfestigende UHFB der Sorten UA und UB entspricht die Bruchenergie derjenigen Fläche, welche durch (1) eine von der Maximalkraft ausgehenden Entlastungsgeraden, die beim Null-Kraftwert bei einer Verschiebung von 40% derjenigen der Maximalkraft endet, sowie (2) dem vollständigen, von der Maximalkraft ausgehenden entfestigenden Teil der Kurve umschrieben wird.
- Ort und Verlauf des resultierenden, lokalisierten Risses.

Für die Versuchsreihe:

- Ermittlung der Mittelwerte der elastischen Grenzzugfestigkeit, der Zugfestigkeit, der Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit und der spezifischen Bruchenergie für die 6 geprüften Prüfkörper

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

- Klassifizierung der UHFB Sorte gemäss Tabelle 1, wobei die Mittelwerte der elastischen Grenzzugfestigkeit und der Zugfestigkeit als charakteristische Werte der elastischen Grenzzugfestigkeit f_{Utek} und der Zugfestigkeit f_{Utuk} gelten.

D.8 Ermittlung der elastischen Grenzzugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls

D.8.1 Der Elastizitätsmodul wird mit den Ergebnissen der nach D.6.2 geprüften Prüfkörper ermittelt. Dazu wird für jedes Wertepaar bestehend aus der Kraft F_i und der mittleren Verformung w_{Uti} der bei der letzten Wiederbelastung aufgenommenen Kraft-Verformungskurve vor Erreichen der maximalen Kraft der Sekantenmodul E_i ermittelt gemäss:

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

D.8.2 Danach wird für jeden Verformungswert w_{Uti} der Mittelwert E_{im} aus 10 vorhergehenden Werten des Sekantenmoduls E_i gebildet und graphisch in Abhängigkeit des Werts w_{Uti} aufgezeichnet. Der lineare Bereich ist durch einen konstanten Wert E_{im} gekennzeichnet. Der lineare Bereich endet bei demjenigen Kraftwert F_A , für welchen eine irreversible Reduktion des Sekantenmoduls E_i von mehr als 1% festgestellt wird.

D.8.3 Der Wert der elastischen Grenzzugfestigkeit wird schliesslich wie folgt ermittelt:

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

Der Elastizitätsmodul E_U entspricht dem Sekantenmodul E_i für die Kraft F_A .

D.9 Prüfbericht

Der Prüfbericht enthält folgende Angaben:

- Name und Adresse des Auftraggebers, Name des Objekts
- Name der Prüfinstitution und Name der für den Versuch verantwortlichen Person
- Bezugnahme auf dieses Dokument sowie Angabe von allfälligen Abweichungen zu diesem Dokument
- Bezeichnung der Prüfkörper mit Angabe des Herstellungs- und Prüfdatums
- gemessene Abmessungen jedes Prüfkörpers (Länge, Breite, Dicke)
- Prüfergebnisse gemäss D.7 und D.8.

D.10 Genauigkeit

D.10.1 Die Messgenauigkeit des Versuchs wird anhand eines Referenz-Prüfkörpers aus Aluminium mit gleichen Abmessungen erfasst. Die Reproduzierbarkeit der Kraft- und Verschiebungsmessungen (anhand der Ermittlung des Elastizitätsmoduls) wird im elastischen Bereich des Aluminiums mit 6 Belastungs-/Entlastungs-Zyklen untersucht.

D.10.2 Die Abgleichung zwischen Prüflabors erfolgt mit den gleichen Referenz-Prüfkörpern aus gleichen Baustoffen und Giess- und Nachbehandlungsbedingungen.

D.11 Punktkoordinaten für die Herstellung des Prüfkörpers

Tabelle 7 Punktkoordinaten des Segments B-C (gemäss Figur 12). Die Segmente (E-F, I-J, L-M) ergeben sich aufgrund der Symmetrie.

Punkt		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

Punkt		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

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang E (normativ) Biegezugprüfung

E.1 Anwendungsbereich

Die nachfolgenden Ziffern legen ein Verfahren fest, mit dem die Kraft-Durchbiegungs-Antwort unter 4-Punkt-Biegung eines Prüfkörpers aus UHFB erhalten wird.

E.2 Definitionen

E.2.1 Die Kraft-Durchbiegungs-Antwort eines Prüfkörpers aus UHFB wird beschrieben durch seine vollständige Kraft F – Durchbiegungs δ – Kurve bis zum Erreichen einer Restkraft von 20% der Maximalkraft oder einer mittleren Durchbiegung in Spannweitenmitte von 25 mm.

E.2.2 Die mittlere Durchbiegung in Spannweitenmitte ist definiert als der Mittelwert der Messungen der beiden induktiven Wegaufnehmer, die auf beiden gegenüberliegenden Seiten des Prüfkörpers befestigt werden.

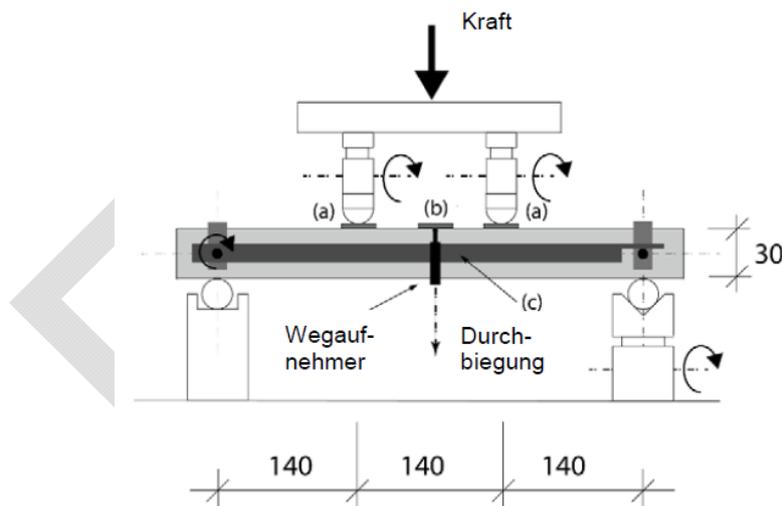
E.3 Prinzip

E.3.1 Der 4-Punkt-Biegeversuch wird gemäss Figur 13 in einer Prüfmaschine mit einem Messbereich von 50 bis 200 kN gesteuert über den Prüfkolbenweg durchgeführt.

E.3.2 Der Prüfkörper wird derart in die Prüfvorrichtung eingebaut, dass die abgeschliffene Seite auf Zug beansprucht wird. Die beiden Wegaufnehmer werden in Spannweitenmitte beidseitig des Prüfkörpers auf einem horizontalen Metallstab (c) befestigt, der auf halber Prüfkörperhöhe auf fest mit dem Prüfkörper verbundenen Auflagern gelenkig gelagert ist. Die Durchbiegung wird in Bezug auf ein auf dem Prüfkörper befestigtes Referenzplättchen (b) gemessen. Die Biegebeanspruchung wird gleichmässig über verformbare Plättchen (aus Hart-Pavatex oder Blei) verteilt, die unter den beiden Verschiebungsaufbringungspunkten (a) angebracht werden.

E.3.3 Ein unteres Prüfkörperauflager ermöglicht eine Rotation in der Querebene. Die beiden Vorrichtungen zur Aufbringung der Verschiebung über dem Prüfkörper müssen eine gleiche Rotationsfähigkeit aufweisen.

Figur 13 4-Punkt-Biegeversuch an Platten mit Abmessungen von 500 mm x 100 mm x 30 mm



E.4 Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung besteht aus einer in zwei Richtungen (Zug/Druck) arbeitenden Prüfmaschine (Klasse 1) gemäss SN EN 12390-4, welche die Kraft mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2$ kN misst, Wegaufnehmer mit einem Verschiebungswert von ± 20 bis ± 30 mm und einer maximalen Abweichung von der Linearität von $\pm 0,2\%$ und Messinstrumente für die Messung der Dicke und Breite des Prüfkörpers mit einer maximalen Messgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm. Die Figur 13 legt fest, wo die Verschiebung aufgebracht wird.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

E.5 Herstellung und Vorbereitung der Prüfkörper

- E.5.1 Die Prüfkörper sind Plattenstreifen mit Abmessungen von 500 mm x 100 mm x 30 mm.
- E.5.2 Bei *Erst- und Qualitätsprüfungen* wird der Prüfkörper wie folgt hergestellt: Für jede Versuchsserie werden 6 Prüfkörper, einzeln und einer nach dem anderen, mit Abmessungen von 500 mm x 100 mm x 35 mm in Schalungen hergestellt, wobei die Dicke von 35 mm auf ± 2 mm einzuhalten ist. Beim Giessvorgang wird eine Ablaufrinne verwendet, um ein kontinuierliches Einbringen des UHFB in die Schalung von einem zum anderen Ende des Prüfkörpers zu gewährleisten. Vor der Versuchsdurchführung werden alle Prüfkörper auf eine Dicke von 30 mm (± 1 mm) abgeschliffen.
- E.5.3 Bei *Eignungsprüfungen* werden zwei Platten mit Abmessungen von 700 mm x 700 mm x 35 mm auf gleiche Weise gegossen, wobei die Dicke von 35 mm auf ± 2 mm einzuhalten ist. Die Giessrichtung wird nach dem Ausschalen auf der Schalung und der Platte markiert. Aus einer der beiden Platten werden sechs Prüfkörper mit der Längsachse parallel zur Giessrichtung ausgeschnitten. In der anderen Platte werden sechs Prüfkörper mit der Längsachse quer zur Giessrichtung ausgeschnitten. Die Giessrichtung wird auf jedem Prüfkörper eindeutig markiert. Vor der Versuchsdurchführung werden alle Prüfkörper auf eine Dicke von 30 mm (± 1 mm) abgeschliffen.
- E.5.4 Der Giessvorgang der Platten im Labor oder auf der Baustelle entspricht den Bedingungen beim Giessen des UHFB bei der Ausführung (z.B. horizontal oder vertikal zwischen zwei geschalteten Seitenflächen). Für selbstverdichtende oder leicht thixotrope UHFB (Setzfließmass ≥ 400 mm) erfolgt der Einbau des UHFB manuell. Dabei wird eine Ablaufrinne verwendet, um ein kontinuierliches Einbringen des UHFB von einem zum anderen Ende der Platte zu gewährleisten. Für stark thixotrope UHFB (Setzfließmass < 400 mm) werden die Platten entsprechend der Einbaumethode bei der Ausführung hergestellt.
- E.5.5 Nach dem Herstellungsvorgang werden die Platten umgehend mit Hilfe einer Plastikfolie vor Austrocknung geschützt, bei einer Temperatur von 20 °C aufbewahrt, nach einem Tag ausgeschalt und bis 3 – 5 Tage vor dem Versuch gemäss den Angaben der Norm SN EN 12 390-2 aufbewahrt. Während des Transports und bei den Manipulationen beim Ausschneidevorgang werden die Prüfkörper vor Austrocknung geschützt. 24 Stunden vor der Versuchsdurchführung werden die Prüfkörper in der Umgebungsluft bei 20°C Temperatur getrocknet und danach in eine Plastikfolie eingepackt.
- E.5.6 Die Abmessungen (Länge und Breite im Mittelbereich) jedes Prüfkörpers werden gemessen. Die Dicke des Prüfkörpers ergibt sich aus dem Mittelwert der an 6 unterschiedlichen Orten gemessenen Dicken, 3 auf jeder Seite im Längssinn und in regelmässigen Abständen.

E.6 Durchführung

- E.6.1 Die ersten drei der insgesamt sechs Prüfkörper werden wie folgt geprüft. Der Prüfkörper wird einer monoton aufgebrachten Beanspruchung ausgesetzt mit einer Geschwindigkeit der Kolbenwegverschiebung von 0,5 mm pro Minute bis zum Erreichen der Maximalkraft und danach mit einer Geschwindigkeit von 5 mm pro Minute, bis eine mittlere Durchbiegung in Spannweitenmitte von 25 mm erreicht wird. Die Ablesefrequenz der Messwerte beträgt 5 Hz.
- E.6.2 Bei den verbleibenden drei Prüfkörpern werden zunächst drei Belastungs-/Entlastungs-Zyklen mit der gleichen Geschwindigkeit bis zu einem Drittel des Mittelwerts der Maximalkraft der ersten drei Versuche gefahren. Danach werden die Prüfkörper gemäss E.6.1 geprüft.

E.7 Prüfergebnisse

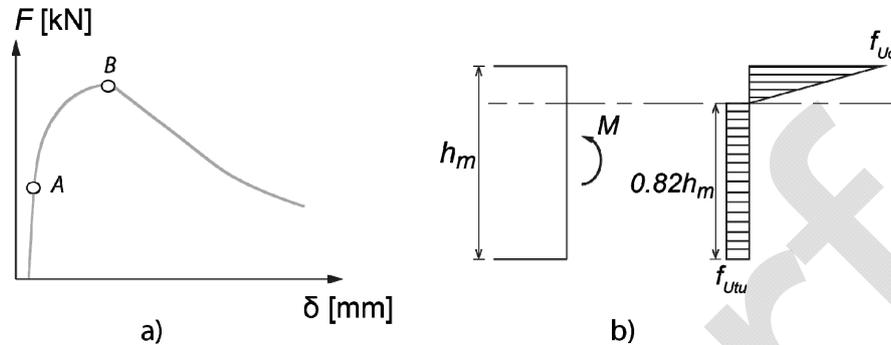
- E.7.1 Vollständige (mittlere) Kraft-Durchbiegungs-Kurve, die für jeden Prüfkörper aufgenommen wurde.
- E.7.2 Mit der inversen Analyse der aufgenommenen Kraft-Durchbiegungs-Kurve werden ermittelt: (1) die elastische Grenzzugfestigkeit des UHFB f_{Ute} , (2) die Zugfestigkeit f_{Utu} , (3) gegebenenfalls die Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit ϵ_{Utu} (Verfestigung) und (4) die spezifische Bruchenergie G_{FU} . Die inverse Analyse wird mit einem Finite-Elementen-Rechenmodell durchgeführt, oder es wird das vereinfachte Verfahren gemäss E.8 verwendet.
- E.7.3 Für die Versuchsreihe werden die Mittelwerte der elastischen Grenzzugfestigkeit, der Zugfestigkeit, der Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit und der spezifischen Bruchenergie jeweils für die 6 Prüfkörper gemäss E.5.2 respektive für alle 12 Prüfkörper gemäss E.5.3 ermittelt. Mit diesen Werten wird der geprüfte UHFB gemäss der Tabelle 1 klassifiziert, wobei die Mittelwerte der elastischen Grenzzugfestigkeit und der Zugfestigkeit als charakteristische Werte der elastischen Grenzzugfestigkeit f_{Utek} und der Zugfestigkeit f_{Utuk} gelten.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

E.8 Vereinfachte inverse Analyse

E.8.1 Das Prinzip der vereinfachten inversen Analyse besteht darin, die Prüfkörperantwort in Form der Kraft-Durchbiegungs-Kurve in die in der Figur 14 dargestellten Bereiche aufzuteilen. Jeder Bereich wird jeweils mit einem Modell des Tragverhaltens analysiert, um die gesuchten Werte einzeln zu bestimmen:

Figur 14 a) Prinzip der inversen Analyse, b) angenommene Spannungsverteilung im Querschnitt bei Maximalkraft (Punkt B).



(1) Der Punkt A kennzeichnet das Ende des elastischen Tragverhaltens des Prüfkörpers und ermöglicht unter Annahme eines linear-elastischen Modells, die elastische Grenzzugfestigkeit f_{Ute} wie folgt zu ermitteln:

Der Elastizitätsmodul wird mit den Ergebnissen der nach E.6.2 geprüften Prüfkörper ermittelt. Dazu wird für jedes Wertepaar, bestehend aus der Kraft F_i und der Durchbiegung δ_i , der bei der letzten Wiederbelastung aufgenommenen Kraft-Durchbiegungs-Kurve vor Erreichen der maximalen Kraft der Sekantenmodul E_i ermittelt gemäss:

$$E_i = 0,212 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3} \quad (29)$$

Danach wird für jeden Wert der Durchbiegung δ_i der Mittelwert E_{mi} aus den 10 vorhergehenden Werten des Sekantenmoduls E_i gebildet und graphisch in Abhängigkeit des Werts δ_i aufgezeichnet. Der lineare Bereich ist durch einen konstanten Wert E_{mi} gekennzeichnet. Das Ende des linearen Bereichs erfolgt für denjenigen Kraftwert F_A , für welchen eine irreversible Reduktion des Sekantenmoduls E_i von mehr als 1% festgestellt wird.

Der Wert der elastischen Grenzzugfestigkeit wird schliesslich wie folgt ermittelt:

$$f_{Ute} = F_A \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (30)$$

Der Elastizitätsmodul E_U wird gemäss Formel (29) für den Kraftwert F_A mit dem dazugehörigen Wert der Durchbiegung ermittelt.

(2) Der Punkt B kennzeichnet den grössten gemessenen Kraftwert während des Versuchs. Bei Maximalkraft F_B darf eine Spannungsverteilung im Querschnitt gemäss Figur 14b angenommen werden. Entsprechend beträgt die Zugfestigkeit f_{Utu} :

$$f_{Utu} = 0,383 \cdot F_B \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (31)$$

(3) Der Bereich zwischen den Punkten A und B vor Erreichen der Maximalkraft beschreibt die fortschreitende Aktivierung eines gegebenenfalls verfestigenden Verhaltens und den Beginn der Entfestigung.

Falls der ermittelte f_{Utu} -Wert kleiner ist als der f_{Ute} -Wert, dann weist der UHFB kein verfestigendes Verhalten auf.

Falls der ermittelte f_{Utu} -Wert grösser ist als der f_{Ute} -Wert, dann wird eine inverse Analyse des Bereichs zwischen den Punkten A und B durchgeführt mit Hilfe einer analytischen Methode ermittelt, die auf Angaben in den Recommendations AFGC (2013) beruht. Dabei wird für ein Wertepaar F_i und δ_i die Zugspannung σ_{Uti} in der untersten Faser des Prüfkörperquerschnitts im Bereich des konstanten Moments ermittelt:

$$\sigma_{Uti} = 0,5 \cdot (1 - \alpha_i \cdot h_m \cdot \chi_i \cdot E_U) \quad (32)$$

mit:

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

$$\lambda_i = \frac{46}{216} \cdot \frac{F_i}{\delta_i \cdot E_U} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m} \quad \text{und} \quad \chi_i = \frac{216}{23} \cdot \frac{\delta_i}{l_m^2} \quad (33) \text{ und } (34)$$

sowie $\alpha_i(\lambda_i)$ gemäss Tabelle 8.

Die zur Zugspannung σ_{Uti} gehörende Dehnung beträgt:

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E_U} + \chi_i \cdot \alpha_i \cdot h_m \quad (35)$$

Dazu werden 10 Wertepaare F_i und δ_i zwischen den Punkten A und B verwendet, wobei der Kraftwert des ersten Punkts gleich $F_A + (F_B - F_A)/4$ ist. Die 9 nachfolgenden Wertepaare werden gleichmässig entlang der Achse der Kraftwerte zwischen dem ersten Kraftwert und F_B verteilt.

Das Rechenverfahren wird solange durchgeführt, bis der ermittelte Spannungswert erstmals grösser ist als die unter (2) ermittelte Zugfestigkeit f_{Utu} . Der dazugehörige Wert der Dehnung entspricht der Dehnung ε_{Utu} bei Erreichen der Zugfestigkeit (Verfestigung).

Tabelle 8: Koeffizienten α_i für einen gegebenen Wert 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 **Prüfbericht**

Der Prüfbericht enthält folgende Angaben:

- Name und Adresse des Auftraggebers, Name des Objekts
- Name der Prüfinstitution und Name der für den Versuch verantwortlichen Person
- Bezugnahme auf dieses Dokument sowie Angabe von allfälligen Abweichungen zu diesem Dokument

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

- Bezeichnung der Prüfkörper mit Angabe der Entnahmerichtung in Bezug auf die Giessrichtung
- Rohdichte jedes Prüfkörpers vor dem Versuch
- gemessene Abmessungen jedes Prüfkörpers (Länge, Breite und Dicke)
- vollständige (mittlere) Kraft-Durchbiegungs-Kurven für jeden Prüfkörper
- Maximalkraft und dazugehörige Durchbiegung für jeden Prüfkörper
- Ort und Verlauf der lokalisierten Risse für jeden Prüfkörper mit fotografischer Dokumentation
- Prüfergebnisse gemäss E.7 und Resultate der inversen Analyse
- Klassifizierung der UHFB Sorte gemäss Tabelle 1.

E.10 **Genauigkeit**

- E.10.1 Die Messgenauigkeit des Versuchs wird anhand eines Referenz-Prüfkörpers aus Aluminium mit gleichen Abmessungen erfasst. Die Reproduzierbarkeit der Kraft- und Verschiebungsmessungen (anhand der Ermittlung des Elastizitätsmoduls) wird im elastischen Bereich des Aluminiums mit 6 Belastungs-/Entlastungs-Zyklen untersucht.
- E.10.2 Die Abgleichung zwischen Prüflabors erfolgt mit den gleichen Referenz-Prüfkörpern aus gleichen Baustoffen und Giess- und Nachbehandlungsbedingungen.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Anhang F (informativ) Verzeichnis der Begriffe

In Tabelle 9 sind die im Kapitel 1 definierten Begriffe in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Tabelle 9: Verzeichnis der Begriffe

Begriff deutsch	Begriff französisch	Begriff italienisch	Begriff englisch	Ziffer
bewehrter UHFB	BFUP armé	CFAP armato	reinforced UHPFRC	1.1.3
Einspanngrad	degré d'entrave	grado di vincolo	degree of restraint	1.1.8
elastische Grenzzugfestigkeit	résistance limite élastique à la traction	resistenza limite elastico alla trazione	elastic limit tensile strength	1.1.7
Entfestigung	comportement adoucissant	comportamento softening	strain softening	1.1.9
Premix	prémix	premix	premix	1.1.2
Reife	maturité	maturità	maturity	1.1.10
Ultra-Hochleistungs-Faserbeton	béton fibré ultra-performant	calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni	ultra-high performance fiber reinforced concrete	1.1.1
Verfestigung	comportement écrouissant	compartemento hardening	strain hardening	1.1.11
Verbundsystem	système composite	sistema composito	composite system	1.1.5
vorgespannter UHFB	BFUP précontraint	CFAP precompresso	prestressed UHPFRC	1.1.4
Zugfestigkeit	résistance a la traction	resistenza alla trazione	tensile strenght	1.1.6

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Entwurf

In der Kommission SIA 262 vertretene Organisationen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

Kommission SIA 262

Präsident	Prof. Dr. Walter Kaufmann, dipl. Ing. ETH/SIA, Zürich	Beratung
Mitglieder	Dr. Manuel Alvarez, dipl. Ing. ETH/SIA, Ittigen Daniel Buschor, dipl. Ing. ETH/SIA, Burgdorf Christoph Czaderski, dipl. Ing. ETH/SIA, Dübendorf Dr. Stephan Etter, dipl. Ing. ETH/SIA, Zürich Blaise Fleury, dipl. Ing. ETH/SIA, Eclépens Dr. Hans-Rudolf Ganz, dipl. Ing. ETH/SIA, Bösingen Dr. Daniel Heinzmann, dipl. Ing. ETH/SIA, Visperterminen Ernst Honegger, dipl. Ing. ETH/SIA, Bern Dr. Bernard Houriet, dipl. Ing. ETH/SIA, Tramelan Dr. Fritz Hunkeler, dipl. Ing. ETH/SIA, Wildegg Rudolf Lagger, dipl. Ing. ETH, Thun Dr. Peter Lunk, dipl. Ing., Würenlingen Prof. Dr. Aurelio Muttoni, dipl. Ing. ETH/SIA, Lausanne Dr. Sylvain Plumey, dipl. Ing. ETH/SIA, Porrentruy Dr. Ana Spasojevic, dipl. Ing. ETH, Fribourg Kerstin Wassmann, Dipl.-Ing., Würenlingen	ASTRA Projektierung EMPA Projektierung Projektierung Beratung Fachhochschule Industrie Projektierung Materialprüfung Unternehmung Industrie EPFL Projektierung Projektierung Industrie
Protokoll	Luca Trachsler, dipl. Ing. ETH, Zürich	Projektierung

Arbeitsgruppe UHFB der Normkommission SIA 262

Vorsitz	Prof. Dr. Eugen Brühwiler, dipl. Ing. ETH/SIA, Lausanne (bis 21. April 2015)	EPFL
Mitglieder	Blaise Fleury, dipl. Ing. ETH/SIA, Neuchâtel Dr. Lionel Moreillon, dipl. Ing., Lausanne Prof. Dr. Cornelius Oesterlee, dipl. Bauing. TU, Burgdorf Dr. Agnes Petit, dipl. Geologie-Ing. UNIL, Lyss Juan Francisco Rivero, dipl. Bauing. ETH/SIA, St. Gallen Prof. Dr. René Suter, dipl. Bauing. ETH/SIA, Fribourg Richard Thürler, dipl. Ing. ETH/SIA, Bern	Projektierung Projektierung Fachhochschule Unternehmung Verwaltung Fachhochschule Projektierung

Genehmigung und Gültigkeit

Die Zentralkommission für Normen des SIA hat das vorliegende Merkblatt SIA 2052 am XXXX genehmigt.

Es ist gültig ab XXXXXX.

Copyright © 201X by SIA Zurich

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie, CD-ROM usw.), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung, sind vorbehalten.

Dieser Entwurf hat keine Gültigkeit und darf nicht angewendet werden.

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

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

projet : 21 mai 2015

Projet finale FprSIA 2052 Procédure d'opposition

2052

Numéro de référence
FprSNR 592052:2015 fr

Valable dès: 2015-xx-xx

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

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.

Projet

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.

201y-mm 1^e édition

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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	12
2.1 Généralités	12
2.2 Construction en BFUP	12
2.3 Construction mixte BFUP-béton.....	13
2.4 Analyse structurale et dimensionnement	13
2.5 Durabilité.....	14
2.6 Assurance de la qualité.....	14
3 Matériaux	15
3.1 Composition du BFUP	15
3.2 Propriétés du BFUP	15
3.3 Propriétés du BFUP armé.....	18
4 Analyse structurale et dimensionnement	19
4.1 Principes	19
4.2 Eléments de structure en BFUP.....	19
4.3 Eléments mixtes BFUP-béton	22
5 Dispositions constructives	25
5.1 Principes	25
5.2 Disposition de l'armature	25
5.3 Eléments préfabriqués en BFUP et assemblages d'éléments	25
5.4 Eléments mixtes BFUP-béton.....	25
6 Exécution	27
6.1 Fabrication du BFUP.....	27
6.2 Mise en place et cure du BFUP	27
6.3 Essais	28
6.4 Propriétés de surface du BFUP	28
6.5 Sécurité du travail	29
Annexe	
A Propriétés des BFUP (informative)	30
B Assurance de la qualité (normative).....	31
C Essais sur BFUP (normative).....	33
D Essai de comportement à la traction (normative).....	34
E Essai de traction par flexion (normative).....	37
F Index des termes techniques (informative).....	42

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 granulats est inférieure 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 granulats, 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

PROJET

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.

0.1.2 L'ensemble des règles contenues dans le présent cahier technique s'applique en relation avec les normes suivantes :

- 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 262/1 Construction en béton - Spécifications complémentaires
- 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

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 concernent la dernière édition parue de la publication concernée, alors que les références datées ne concernent que l'édition mentionnée.

0.2.1 Publications de la SIA

Recommandation SIA 179 Les fixations dans le béton et dans la maçonnerie

0.2.2 Normes européennes

- 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 206-1 Béton - Partie 1: Spécification, performances, production et conformité
- SN EN 206-1/NE:2013 Béton - Partie 1: Spécification, performances, production et conformité - Eléments nationaux NE à la norme SN EN 206-1 :2000
- SN EN 206-9 Béton - Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant
- SN EN 413-2 Ciment à maçonner - Partie 2: Méthodes d'essai
- 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 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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

SN EN 12390-4	Essais pour béton durci - Partie 4 : Résistance en compression - Caractéristiques des machines d'essai
SN EN 12390-13	Essai 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
SN EN 13263-1	Fumée de silice pour béton - Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité
SN EN 13892-3	Méthodes d'essai des matériaux pour chapes - Partie 3 : Détermination de la résistance à l'usure Böhme
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

0.2.3 Autres publications

AFGC (2013)	Bétons fibrés à ultra-hautes performances - Recommandations - annexe 6 : Essais de convenance - précisions et exemples de détermination des coefficients K.
-------------	---

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.

1 TERMINOLOGIE

1.1 Termes techniques

Le présent cahier technique utilise sur 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 MPa.
- 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, reinforced 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, resistenza limite elastico 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 vincolo, 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, comportamento softening, strain softening*
Propriété mécanique d'un matériau caractérisée par une diminution continue des contraintes de traction après dépassement de la résistance à la traction.
- 1.1.10 **Maturité** *Reife, maturità, maturity*
Age 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, comportamento hardening, 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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
E_c	module d'élasticité du béton
E_i	module sécant (valeur particulière) selon D.8 et E.8
E_m	valeur moyenne de 10 valeurs particulières 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
-------	---

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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
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 mesurée 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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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
$w_{U\phi}$	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
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
ϵ_{Us-c}	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)
$\epsilon_{Ut,soft}$	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_{rU1}	coefficient pour la prise en compte de la capacité de déformation en compression du BFUP
η_{rU2}	coefficient pour la prise en compte du comportement en compression des éléments comprimés
η_{rU}	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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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
-----------------	---

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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, soit pour 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 la dilatation des joints)
 - 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, 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.

2.2 Construction en BFUP

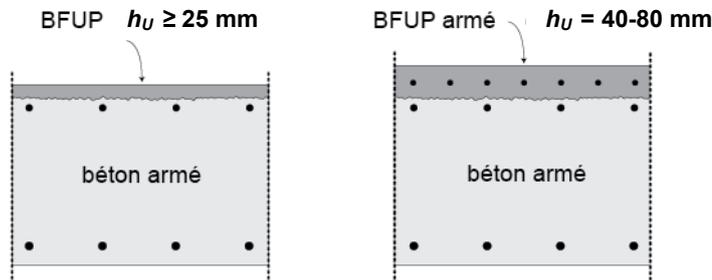
- 2.2.1 En règle générale, les structures porteuses en BFUP sont constituées d'éléments préfabriqués. Elles peuvent également être coulées au chantier dans des coffrages.
- 2.2.2 Lorsqu'un élément de construction est comprimé, par exemple sous l'effet de la précontrainte, le BFUP utilisé ne nécessite pas de comportement écouissant. Toutefois, le comportement écouissant 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 écouissant (sortes UA et UB) pour la fabrication des éléments de construction mixtes BFUP-béton.

2.3.4 Lorsque le BFUP présente un comportement écouissant (sortes 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.

2.4.2 Etats-limite 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 :

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

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

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

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

où les coefficients η_t , η_{fU1} et η_{fU2} sont déterminés selon le chiffre 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 **Etats-limite 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 le chiffre 2.4.2 de la norme SIA 262.

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.

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 liaison 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 en centrale à béton ou au chantier. Le BFUP peut être confectionné avec toutes les sortes de ciments admis dans la norme SN EN 206-1.

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 est atteinte ε_{Utu} 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 3 de l'annexe A2.

- 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. 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}	MPa	$\geq 7,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$
f_{Utuk} / f_{Utek}		$> 0,7$	$> 1,1$	$> 1,2$
ε_{Utu}	‰	f_{Utek} / E_{Ut}	$> 1,5$	$> 2,0$
f_{Uck}	MPa	≥ 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 le chiffre 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.
- 3.2.1.5 Les valeurs des relations entre les diverses propriétés du BFUP mentionnées aux chiffres 3.2.2 et 3.3 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 :

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

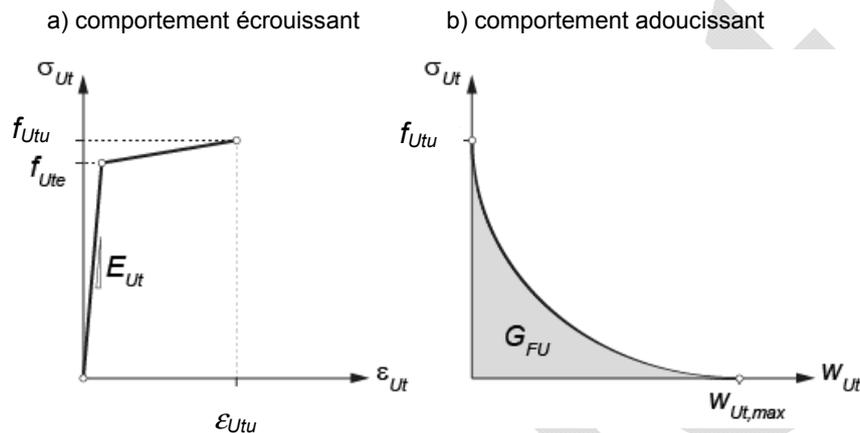
- a) loi contrainte-déformation bilinéaire, décrivant le comportement élastique et l'écroutissage du BFUP comme un milieu continu
- b) loi contrainte-ouverture de fissure décrivant le comportement adoucissant. L'ouverture de fissure sera convertie en déformation selon la relation suivante :

$$\epsilon_{Ut,sofi} = \frac{w_{Ut}}{l_U} \tag{6}$$

Pour la longueur de référence, on pourra admettre: $l_U = \frac{2}{3} h_U$

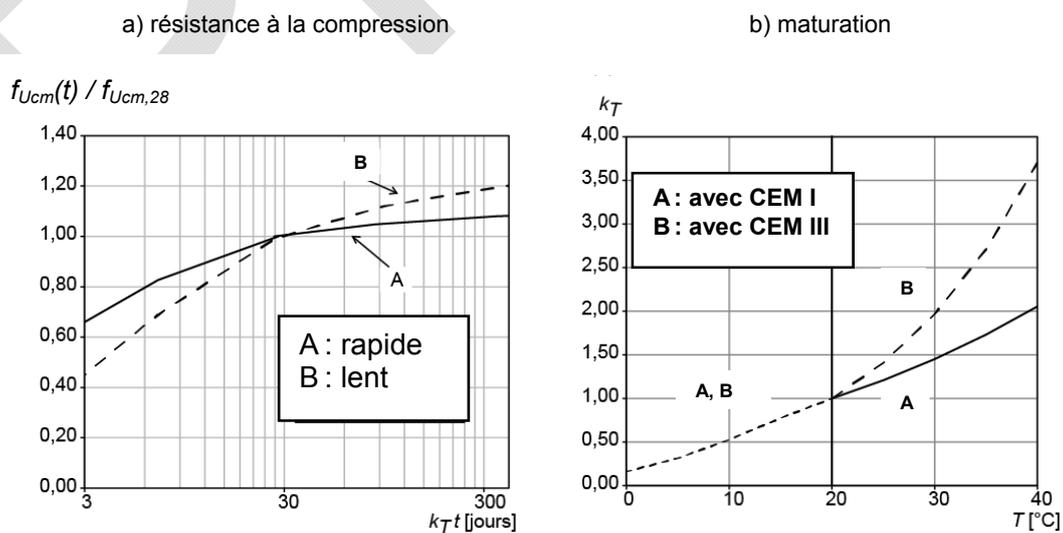
L'ouverture de fissure maximale $w_{Ut,max}$ correspond à la moitié de la longueur maximale des fibres.

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



- 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, cas échéant sur la base d'essais.

Figure 3 Evolution 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.

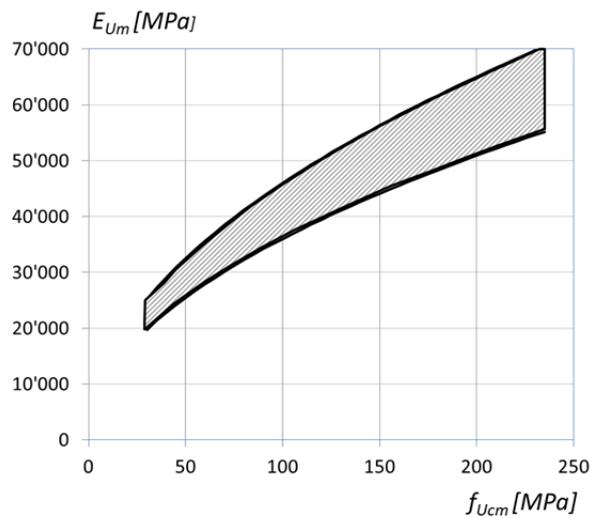


On pourra admettre que l'évolution de la résistance à la traction suit celle de la résistance à la compression donnée à la figure 3.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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.

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 :

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

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

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 $\sigma_{Ut} \leq f_{Ute}$ les déformations dues au fluage seront déterminées selon le chiffre 3.2.3.2. Pour des contraintes de traction $\sigma_{Ut} > f_{Ute}$ 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 :

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

$$\varepsilon_{Us}(t) = \varepsilon_{Us\infty} \cdot e^{\frac{c}{\sqrt{t+d}}} \quad (8)$$

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 $\varepsilon_{Us\infty} = 0,95\%$.

L'âge t s'exprime en jours. 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 :

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

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.

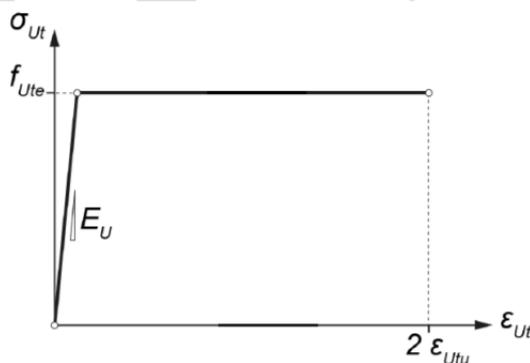
3.3 Propriétés du BFUP armé

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'écroutissage du BFUP est accrue par l'action concomitante de l'acier d'armature passive. En première approximation on pourra utiliser les lois de matériaux de la figure 5 pour le BFUP des sortes UA et UB.

Figure 5 Lois de matériaux idéalisées pour le BFUP des sortes UA et UB dans le cas d'éléments de construction en BFUP armé sollicités en traction



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 le chiffre 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 le chiffre 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 Eléments 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 (2012), annexe 6. On ne recourra à des éprouvettes prélevées sur l'élément de construction que dans le cas où la part de résistance du BFUP 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

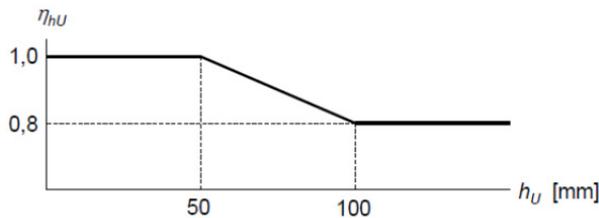
4.2.2.1 Le coefficient lié à l'orientation des fibres η_K dépend de la géométrie de l'élément de construction et du processus de fabrication. Sa valeur est la suivante :

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

- $\eta_K = 0,90$ en cas de comportement d'ensemble (redistribution des contraintes possible, par exemple dans des dalles ou des systèmes hyperstatiques)
- $\eta_K = 0,75$ 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 relativement faible capacité de déformation du BFUP sollicité en compression vaut $\eta_{fU1} = 0,85$.

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 $\eta_{fU2} = 0,67$.

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

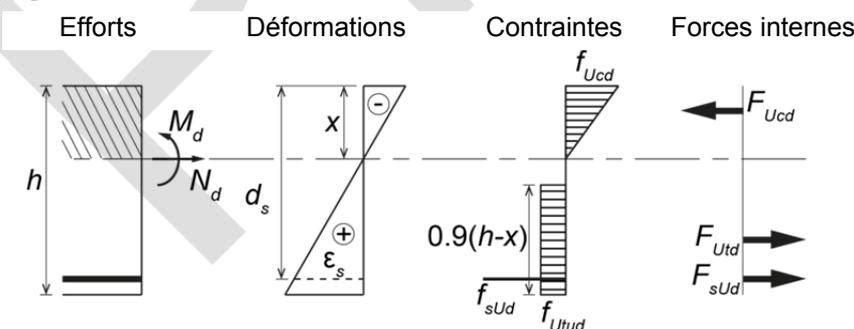
4.2.2.6 Les coefficients des chiffres 4.2.2.1 et 4.2.2.2 prennent la valeur 1,0 lorsque la valeur de dimensionnement de la résistance ultime selon le chiffre 2.4.2.2 a été déterminée par des essais.

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.



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:

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

avec :

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

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

Pour l'inclinaison des champs de compression, on admettra : $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 45^\circ$. L'inclinaison minimale α_{\min} pourra prendre les valeurs suivantes :

- $\alpha_{\min} = 30^\circ$ cas normal
- $\alpha_{\min} = 25^\circ$ lorsque l'âme est soumise à un important effort normal de compression
- $\alpha_{\min} = 40^\circ$ 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 :

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

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 :

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

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 :

$$M_{R,D} = 0,5 \cdot M_{Rd} \quad (15)$$

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 :

$$\sigma_{Ufat,max} \leq \sigma_{U,D} \quad (16)$$

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.

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 :

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

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 :

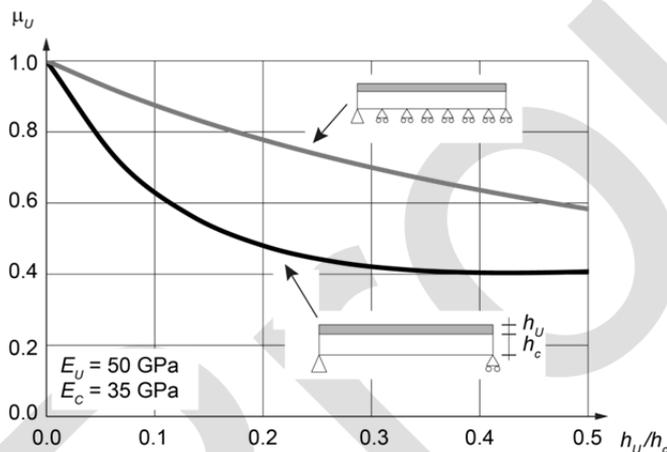
$$\mu_U = \frac{\sigma_{Ue}}{\sigma_{Ue,max}} \quad (18)$$

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.



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. A 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 η_K dépend de la géométrie de l'élément de construction et du processus de fabrication. Sa valeur est la suivante :

- $\eta_K = 0,90$ en cas de comportement d'ensemble (redistribution des contraintes possible, par exemple dans des dalles ou des systèmes hyperstatiques)
- $\eta_K = 0,75$ en cas de comportement localisé (aucune possibilité de redistribution des contraintes, par exemple dans les zones d'ancrages)

4.3.2.2 Pour des couches de BFUP d'une épaisseur jusqu'à 80 mm, le coefficient $\eta_{hU} = 1,0$. Pour des épaisseurs > 80 mm, il vaut $\eta_{hU} = 0,80$.

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

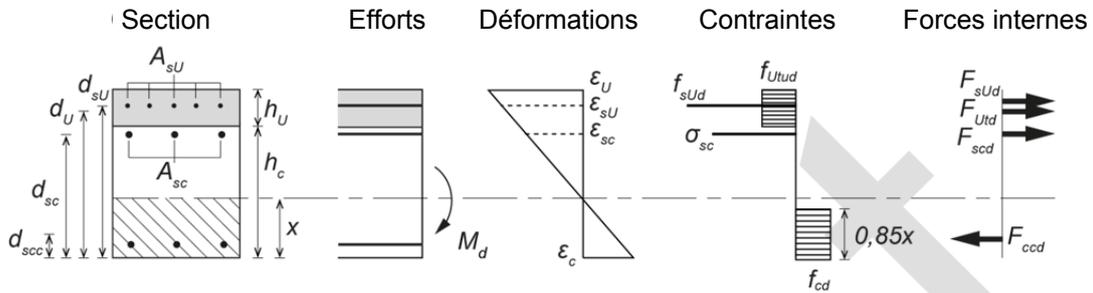
4.3.3 Vérification de la sécurité structurale

4.3.3.1 Flexion

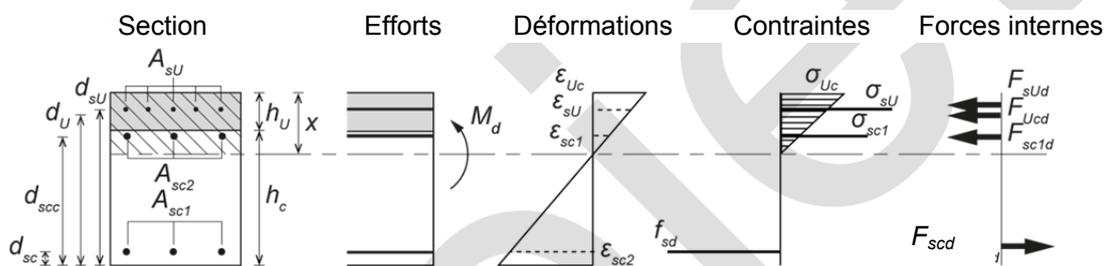
4.3.3.1.1 On pourra déterminer la résistance ultime en flexion simple à l'aide du modèle de la figure 9. Les déformations initiales seront prises en considération selon le chiffre 4.3.1.4. Pour la flexion oblique et la flexion composée, on utilisera le même modèle par analogie.

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

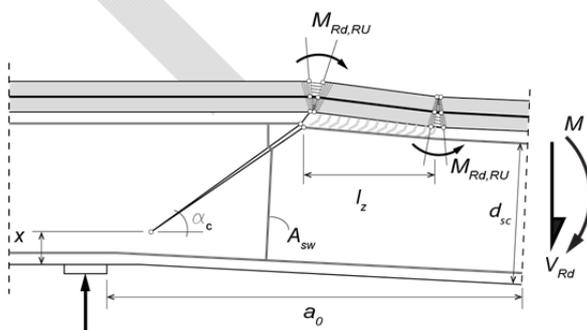


4.3.3.1.2 Le BFUP dispose d'une capacité de déformation plus limitée que l'acier d'armature passive. Lors de la formation de rotules plastiques, on pourra admettre un effet participant en traction de $\sigma_{Utd} = 0,9 \cdot f_{Utud}$ du BFUP pour une déformation allant jusqu'à $3 \cdot \epsilon_{Utu}$. Si les déformations spécifiques excèdent $3 \cdot \epsilon_{Utu}$, 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.

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 :

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

avec :

- Valeur de dimensionnement de la résistance ultime du béton :

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

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

La hauteur de la zone de compression est donnée par la relation : $x = 0.9 \cdot \omega_m \cdot d_{eq}$ (21)

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

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

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

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

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

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

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.

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.

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 MPa.
- 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 la recommandation SIA 179.

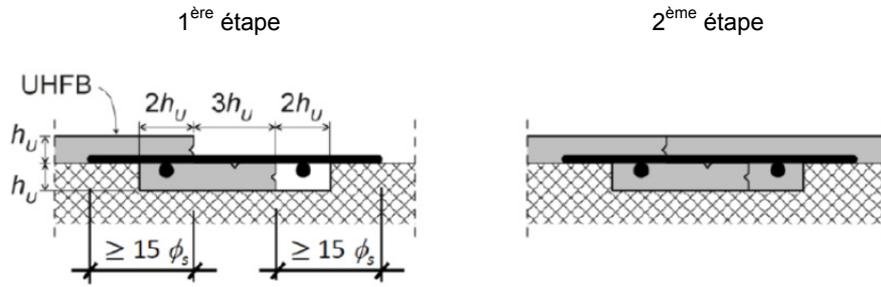
5.4 Éléments mixtes BFUP-béton

- 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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



Projet

6 EXÉCUTION

6.1 Fabrication du BFUP

- 6.1.1 La fabrication du BFUP s'effectue en centrale à béton ou au 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 2/3 de sa capacité nominale.
 - La tolérance de dosage en ciment, eau, fumée de silice, adjuvant (plastifiant), sable de quartz et fibres métalliques est de $\pm 2\%$ (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 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.
 - 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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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, SIA V414/10 et SIA 414/2. 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 206-1. 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 206-1, chiffre 5.1.

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 épannage 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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.).

Projet

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

Annexe A (informative)

Propriétés des BFUP

A.1 La consistance du BFUP frais peut se situer entre autoplaçant (mesure de l'étalement entre 550 et 800 mm, selon la norme SN EN 206-9) 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 GPa
Coefficient de Poisson	ν_u	0,2
Résistance à la compression	f_{Uc}	120 – 200 MPa
Résistance limite élastique à la traction	f_{Ute}	7 – 12 MPa
Résistance à la traction	f_{Utu}	7 – 15 MPa
Déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte (écrouissage)	ε_{Utu}	0 – 5 ‰
Energie spécifique de rupture	G_{FU}	8 – 25 kJ/m ²
Coefficient de dilatation thermique	α_U	10 ⁻⁵ /°C
Valeur finale du retrait	ε_{Uss}	sans traitement thermique : 0,6 – 0,8 ‰ avec traitement thermique ¹⁾ : 0 ‰
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 $\tau_{bU} = 35 – 45$ MPa.

La résistance par adhérence des aciers d'armature non-profilés (avec peau de laminage) dans le BFUP est comprise entre les valeurs indicatives suivantes $\tau_{bU} = 18 – 22$ MPa.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 au 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		2 fois par an	X	A	X	C	
Résistance à la compression	chiffre C.1	X		X		X			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					
Etanchéité	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 m³
C: 1 fois à chaque étape de mise en place, ou tous les 10 m³ de BFUP produit
D: au moins 1 fois par exécution, ou tous les 150 m³ de BFUP mis en place

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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					
Etanchéité	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 m³
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 m³ de BFUP mis en place
E: au moins 1 fois par exécution ou tous les 300 m³ 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 206-1.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 prismes de section 40 mm × 40 mm et de 160 mm de longueur, en tenant compte d'un rapport entre la résistance à la compression sur prisme et la résistance à la compression sur cube (éprouvettes cubiques 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 $\leq 100 \text{ g/m}^2 \text{ h}^{0.5}$. 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. Le comportement au retrait et au fluage seront déterminés chacun à l'aide de 3 éprouvettes.
- 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

mesure permettant de déterminer la longueur et l'épaisseur de l'éprouvette avec une incertitude de mesure maximale de $\pm 0,05$ 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. Les fourrures destinées à l'élégissement du profil seront réalisées 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 35 mm avec une tolérance de ± 2 mm. Avant d'exécuter l'essai, toutes les éprouvettes seront rectifiées jusqu'à une épaisseur 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.

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 de lecture 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. 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-déformation
- Contrainte en fin de domaine élastique avec déformation correspondante et module d'élasticité selon D.8
- Contrainte maximale et déformation correspondante
- Pente d'écrouissage (pour les sortes de BFUP UA et UB) définie comme pente de la droite passant par la résistance limite élastique à la traction et par la résistance à la traction avec leurs valeurs de déformation correspondantes.
- Energie de rupture spécifique déterminée comme ratio entre l'énergie de rupture (aire sous la courbe force-déplacement) et la plus petite section de l'éprouvette. Pour le BFUP de la sorte U0 (sans comportement écrouissant), l'énergie de rupture correspond à la courbe complète force-déplacement. Pour les BFUP à comportement écrouissant des sortes UA et UB, l'énergie de rupture correspond à l'aire délimitée par (1) une ligne fictive de décharge partant du pic de force mesuré et se terminant, pour une force nulle, à un déplacement égal à 40 % de celui mesuré au pic de force et (2) par la partie adoucissante complète de la courbe depuis le pic de force.
- Position et trajectoire de la fissure localisée finale

Pour la série d'essai :

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

- Détermination des valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction, de la résistance à la traction, de la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte et de l'énergie de rupture spécifique 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 de la résistance limite élastique à la traction et du module d'élasticité

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 valeur moyenne E_{im} à partir de 10 valeurs précédentes du module sécant E_i . Cette valeur moyenne sera reportée sur un graphique en fonction de w_{Uti} . Le domaine linéaire sera caractérisé par une valeur constante de E_{im} et se terminera avec la force de valeur F_A , pour laquelle une réduction irréversible du module sécant E_i de plus de 1 % aura été constatée.

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

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

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

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 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.

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 F – flèche 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.

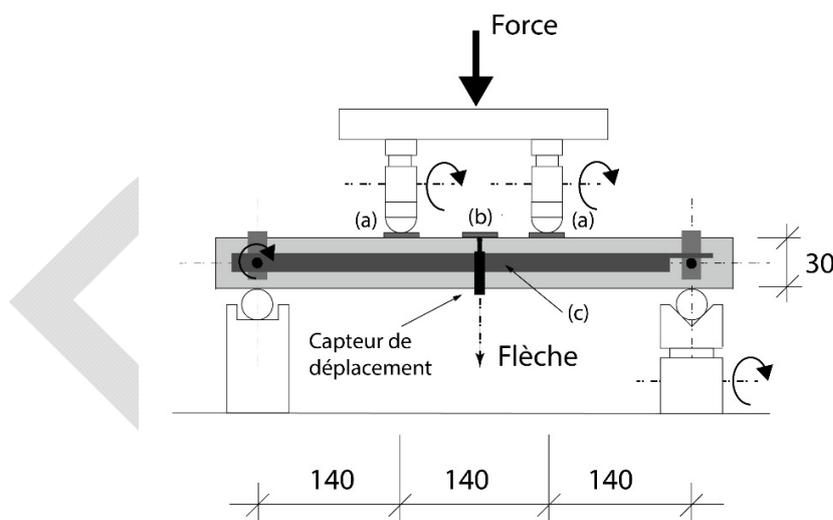
E.3 Principe

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 rectifiée à la traction. 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 (en Pavatex dur ou 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



E.4 Equipement d'essai

L'équipement comporte une machine d'essais de résistance en compression et en traction (classe 1) selon la norme SN EN 12 390-4, mesurant la force avec une précision de $\pm 0,2$ kN, des capteurs de déplacements de ± 20 à ± 30 mm de course présentant un écart maximal de $\pm 0,2$ % 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 $\pm 0,05$ mm. La figure 13 présente la géométrie des points d'application des déplacements à imposer.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 × 35 mm, à couler l'une après l'autre, en respectant l'épaisseur de 35 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. Avant d'exécuter l'essai, toutes les éprouvettes seront rectifiées jusqu'à une épaisseur de 30 mm (± 1 mm).
- E.5.3 Pour les *essais de convenance*, on coulera de manière identique deux plaques de dimensions 700 mm × 700 mm × 35 mm, en respectant l'épaisseur de 35 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. Avant d'exécuter l'essai, toutes les éprouvettes seront rectifiées jusqu'à une épaisseur de 30 mm (± 1 mm).
- E.5.4 Le processus de coulée des plaques en laboratoire ou au chantier 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.5.5 Après le processus de fabrication, les plaques 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.5.6 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 de lecture des valeurs mesurées doit être de 5 Hz.
- E.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. On leur appliquera ensuite le processus décrit sous E.6.1.

E.7 Résultats d'essais

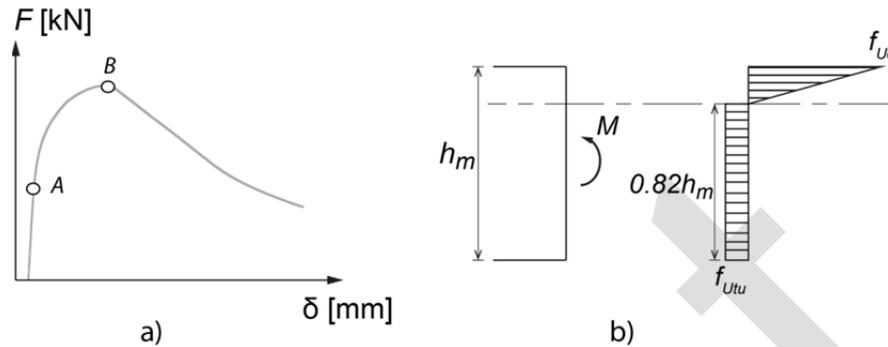
- E.7.1 Courbes complètes force-flèche moyennes, relevées pour chaque éprouvette.
- E.7.2 Une analyse inverse des courbes force-flèche relevées permettra de déterminer (1) la résistance limite élastique à la traction f_{Ute} du BFUP, (2) la résistance à la traction f_{Utu} , (3) cas échéant, la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte ε_{Utu} (écrouissage) et (4) l'énergie spécifique de rupture G_{FU} . L'analyse inverse est effectuée à l'aide d'un modèle de calcul par éléments finis ou par la méthode simplifiée selon E.8.
- E.7.3 Pour la série d'essais, on déterminera les valeurs moyennes de la résistance limite élastique à la traction, de la résistance à la traction, de la déformation lorsque la résistance à la traction est atteinte et de l'énergie spécifique de rupture. Ces valeurs moyennes seront déterminées pour les 6 éprouvettes selon E.5.2 ou pour les 12 éprouvettes selon E.5.3. Elles permettront de classer le 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} .

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

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 :

$$E_i = 0,212 \cdot \frac{F_i}{\delta_i} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m^3} \quad (29)$$

On déterminera ensuite pour chaque valeur de la flèche δ_i la valeur moyenne 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 sera caractérisé par une valeur constante de E_{mi} et se terminera avec la force de valeur F_A , pour laquelle une réduction irréversible du module sécant E_i de plus de 1 % aura été constatée.

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

$$f_{Ute} = F_A \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (30)$$

On déterminera le module d'élasticité E_U à l'aide de la formule (29) 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 14 b. La résistance à la traction correspondante f_{Utu} sera obtenue à l'aide de la relation :

$$f_{Utu} = 0,383 \cdot F_B \cdot \frac{l_m}{b_m \cdot h_m^2} \quad (31)$$

(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.

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 à l'aide d'une méthode analytique fondée sur des données figurant dans les Recommandations AFGC (2013). 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 :

$$\sigma_{Uti} = 0,5 \cdot (1 - \alpha_i \cdot h_m \cdot \chi_i \cdot E) \quad (32)$$

avec :

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

$$\lambda_i = \frac{46}{216} \cdot \frac{F_i}{\delta_i \cdot E_U} \cdot \frac{l_m^3}{b_m \cdot h_m} \quad \text{et} \quad \chi_i = \frac{216}{23} \cdot \frac{\delta_i}{l_m^2} \quad (33) \text{ et } (34)$$

et $\alpha_i(\lambda_i)$ selon le tableau 8.

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

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E_U} + \chi_i \cdot \alpha_i \cdot h_m \quad (35)$$

On utilisera 10 couples de valeurs F_i et δ_i entre les points A et B. La valeur de la force au premier point sera de $F_A + (F_B - F_A)/4$. Les 9 couples de valeurs suivants seront régulièrement répartis le long de l'axe des valeurs de la force, entre le premier point et 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).

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

- 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 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 moyennes pour chaque éprouvette
- Force maximale et flèche correspondante pour chaque éprouvette
- Position et évolution des fissures localisées pour chaque éprouvette avec documentation photographique
- Résultats d'essai selon E.7 et résultats de l'analyse inverse
- Classification de la sorte de BFUP selon tableau 1.

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.

Projet

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

Annexe F (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	comportamento softening	strain softening	1.1.9
comportement écrouissant	Verfestigung	compartamento hardening	strain hardening	1.1.11
degré d'entrave	Einspanngrad	grado di vincolo	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	resistenza limite elastico alla trazione	elastic limit tensile strength	1.1.7
système composite	Verbundsystem	sistema composito	composite system	1.1.5

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

Projet

Organisations représentées dans la commission SIA 262

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

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

Commission SIA 262

Président	Walter Kaufmann, prof. dr ing. dipl. EPF/SIA, Zurich	EPF Zurich
Membres	Manuel Alvarez, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Ittigen Daniel Buschor, ing. dipl. EPF/SIA, Berthoud Christoph Czaderski, ing. dipl. EPF/SIA, Dübendorf Dr. Stephan Etter, dipl Ing. EPF/SIA, Zurich Blaise Fleury, ing. dipl. EPF/SIA, Neuchâtel Hans Rudolf Ganz, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Bösinggen Daniel Heinzmann, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Zurich Ernst Honegger, ing. dipl. EPF/SIA, Bern Bernard Houriet, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Tramelan Fritz Hunkeler, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Wildegg Rudolf Lagger, ing. dipl. EPF, Thoune Peter Lunk, dr, ing. dipl., Würenlingen Aurelio Muttoni, prof. dr, ing. dipl. EPF/SIA, Lausanne Sylvain Plumey, dr, ing. dipl. EPF/SIA, Porrentruy Ana Spasojevic, dr ing. dipl. EPF, Fribourg Kerstin Wassmann, ing. dipl., Würenlingen	OFROU Bureau d'études EMPA Bureau d'études Bureau d'études Consultant HES Entreprise Bureau d'études Entreprise Entreprise Entreprise EPFL Bureau d'études Bureau d'études Entreprise
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
Membres	Blaise Fleury, ing. dipl. EPF/SIA, Neuchâtel Lionel Moreillon, dr, ing. dipl. ENPC, Lausanne Cornelius Oesterlee, prof. dr. ing. dipl. TU, Berthoud Agnes Petit, dr, ing. dipl. UNIL, Lyss Juan Francisco Rivero, ing. dipl. EPF/SIA, St-Gall René Suter, prof. dr, ing. dipl. EPF/SIA, Fribourg Richard Thürler, ing. dipl. EPF/SIA, Berne	Bureau d'études Bureau d'études HES Entreprise Administration HES Bureau d'études

Adoption et validité

La Commission centrale des normes de la SIA a adopté le présent cahier technique SIA 2052 le dd mmmm 20yy.
Il est valable à partir du 1^{er} mmmm 201y.

Copyright © 201X 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.

Ce projet n'a aucune validité et ne doit pas être utilisé.

EIA-FR
ISBN 978-2-940156-50-4

BFH
ISBN 978-3-9523787-6-2

Edité par / Herausgeber

Eugen Brühwiler
Cornelius Oesterlee
Dario Redaelli
René Suter