



A Simpson Strong-Tie® Company

A decorative graphic on the left side of the page, consisting of a grid of squares. Some squares are light gray, some are dark gray with a fine grid pattern, and some are blue. The squares are arranged in a staggered, overlapping fashion, creating a 3D effect.

Systeme S&P ARMO

Base de dimensionnement FRCM

Fiber Reinforced Cementitious Matrix

Table des matières

1.	Introduction	3
2.	Comparaison des systèmes de renforcement FRP / FRCM	4
3.	Données techniques du S&P ARMO-mesh	6
4.	Ancrage, recouvrement de l'armature S&P ARMO-mesh	7
4.1	Essais internes S&P	7
4.2	Essais EIA Fribourg/CH	8
5.	Eléments d'ancrage en alu S&P	9
6.	Renforcement à la flexion avec le système FRCM S&P, EIA Fribourg/CH	11
6.1	Résultats des essais de résistance de la EIA Fribourg/CH [P15]	13
6.1.1	Comportement à l'Etat Limite de Service	13
6.1.2	Comportement à l'Etat Limite Ultime	16
7.	S&P ARMO-flexion, logiciel pour le renforcement à la flexion	19
8.	S&P ARMO-axial, logiciel pour le renforcement axial	19
9.	Application des FRCM dans les tunnels et autres ouvrages de génie civil	20
10.	Renforcement sismique de murs en maçonnerie, comparaison FRP/FRCM	23
11.1	Renforcement avec des systèmes FRP	23
11.2	Renforcement avec le système S&P FRCM	25
11.	Essais de résistance au feu du système FRCM S&P de l'EMPA Dübendorf/CH et dans l d'essais d'Hagerbach VSH/CH	27
11.1	Essais de l'EMPA à Dübendorf/CH	27
11.2	Essais de résistance à l'incendie dans la galerie d'essai Hagerbach VSH/CH	30
11.3	Analyse des essais de résistance au feu	34
12.	Contrôle de qualité S&P ARMO-mesh	35
13.	Données techniques du S&P ARMO-crete	37
13.1	S&P ARMO-crete d	37
13.2	S&P ARMO-crete w	38
14.	Ligne de produits du système S&P ARMO	39
15.	Publications / Rapports d'essais [P] / Normes [N]	40

Annexes:

Exemples de dimensionnement

1. Introduction

Il existe différentes méthodes pour renforcer des bâtiments ou des ouvrages de génie civil en béton armé :

- ajout de piliers ou sommiers en béton
- ajout de sommiers en acier
- béton coulé ou projeté avec une armature supplémentaire en acier
- collage d'une armature en acier ou FRP (Fibre Reinforced Polymer)
- etc.

Entreprise au bénéfice d'une position mondiale de pointe dans le domaine des renforcements d'ouvrage, S&P développe, produit et distribue notamment des systèmes FRP. Les systèmes FRP de S&P, comme les lamelles et les tissus, avec leurs colles certifiées, sont appliqués sur différents éléments de structure. L'application des systèmes FRP est soumise à différentes normes et directives nationales :

- Avis technique Z-36.12-68/70 (Allemagne)
- SIA 166 Armature collées (CH)
- Directives pour les renforcements en FRP :
 - ACI 440 (USA)
 - TR55 (UK)
 - CUR 91 (NL)
 - CNR-DT 200/2004 (IT)
 - etc.

En outre, dans certains pays (France, Corée, etc.) S&P possède des avis techniques pour la distribution et l'application de ses systèmes de renforcement FRP. Il est établi que les renforcements S&P FRP correspondent aux règles de l'art mondial et des méthodes de renforcement économiques et pérennes depuis plus de 15 ans.

Alors que dans le béton armé, c'est la contrainte de l'armature qui est limitée, pour les renforcements en FRP c'est une « limite d'allongement » qui est définie. La limite d'allongement admissible dépend du type d'effort (flexion, effort tranchant ou effort axial) et du système de renforcement FRP.

Les limites d'allongement pour le FRP sont données dans les normes et directives FRP en vigueur, respectivement les autorisations selon le pays en fonction des différents concepts de sécurité. Voici différentes limites d'allongement (valeurs de dimensionnement) appliquées actuellement selon les normes, directives ou autorisations en vigueur:

Renforcement avec des C-FRP (renforcement en carbone)

Renforcement à la flexion passive

Lamelles C-FRP (collées en surface) ~ 0.6 – 0.8 %

Tissus en carbone (collés en surface) ~ 0.8 – 1 %

Lamelles C-FRP (collées dans une rainure) ~ 0.8 – 1 %

Lamelles C-FRP (précontrainte externe à 6 ‰) ~ 1.0 – 1.2 %

Renforcement de colonnes à la compression

Frettage avec du carbone FRP (C-FRP) ~ 0.4 %

Renforcement à l'effort tranchant

Frettage avec du carbone FRP (C-FRP) ~ 0.2 – 0.4 %

Augmentation de la ductilité

<i>Frettage avec des fibres de verre FRP (G-FRP)</i>	3 – 4 %
<i>Frettage avec des fibres d'aramide FRP (A-FRP)</i>	2 – 3 %

S&P a développé un nouveau système de renforcement FRCM, le « Système S&P ARMO », et a déposé des brevets en 2009/2010. Pour ce système de renforcement FRCM, S&P propose une solution de dimensionnement en se basant sur des concepts existants. Le système S&P ARMO consiste à insérer un treillis en fibre de carbone dans un mortier projeté minéral et réactif. Depuis octobre 2011, il existe une directive aux États-Unis (AC 434) pour les systèmes de renforcement FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). Grâce à une couche de silice amorphe sur le treillis S&P ARMO-mesh et l'ajout d'un composant réactif dans le mortier projeté, un ancrage mécanique de la grille S&P ARMO-mesh est créé dans le béton projeté. En effet, les hydrates de silicate de calcium du béton projeté gonflent entre les fibres de carbone de l'armature S&P (images 1 et 2). Le résultat est une augmentation de l'ancrage entre les treillis ARMO-mesh et le mortier projeté.

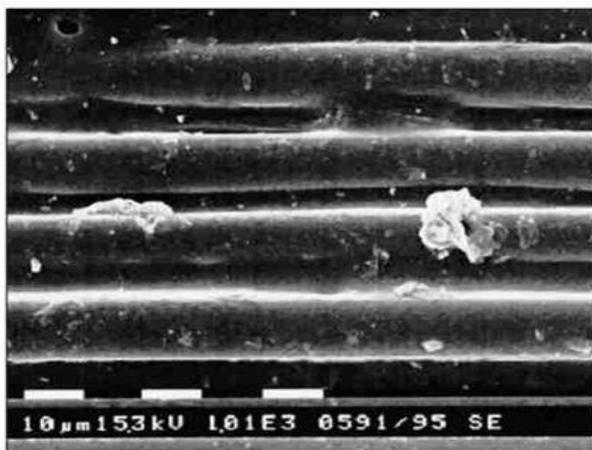


Image 1: S&P ARMO-mesh dans un mortier projeté traditionnel

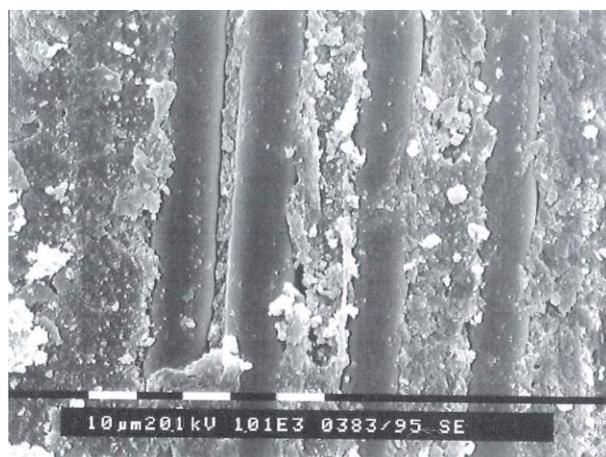


Image 2: S&P ARMO-mesh dans l'ARMO-crete

S&P propose des mortiers projetés avec des composants réactifs pour différentes applications :

- S&P ARMO-crete d mortier projeté par voie sèche (différentes granulométries, ajouts et ciments)
- S&P ARMO-crete w mortier projeté par voie humide
- S&P ARMO-mur mortier de crépissage pour diverses applications

Pour éviter l'oxydation des faisceaux de carbone en cas d'incendie, le revêtement du treillis S&P ARMO-mesh est saturé de céramique. Ceci crée une barrière anti-oxygène en cas de températures élevées.

2. Comparaison des systèmes de renforcement FRP / FRCM

Les renforcements FRP sont collés avec des colles à base de résine époxy sur un support en béton, en bois ou autres matériaux de manière à résister aux efforts de cisaillement. Le module d'élasticité de la résine époxy est environ 4 fois inférieur au module d'élasticité du béton. En conséquence, l'épaisseur de la résine pour coller les lamelles CFK est limitée à 3-5 mm. Si la couche de colle est plus épaisse, l'introduction des efforts des lamelles dans le support en béton n'est plus garantie. En fonction de la planéité du support, il est nécessaire de le reprofiler avec un mortier conforme au système avant de coller les lamelles. En général, on utilise des mortiers de

scellement à base de résine (PC, PCC). En revanche avec le système FRCM de S&P, la matrice « S&P ARMO - mortier projeté » est parfaitement adaptée au support en béton. Le module d'élasticité du mortier projeté est très proche de celui du support en béton. Le mortier projeté a une valeur de pH élevée et est perméable à la vapeur d'eau. En une seule étape de travail, on ragrée et pose l'armature de carbone.

Avec le système FRCM de S&P, il n'y a pas de couche de scellement. Le reprofilage et la couche de mortier sont exécutés, en fonction du type de projection, en une seule opération.

Pour que la planéité du treillis S&P ARMO-mesh soit assurée, il est nécessaire de suivre les consignes de pose S&P. La première couche de mortier projeté doit être lissée afin de pouvoir incorporer l'armature en carbone. Pour fixer le treillis S&P ARMO-mesh, il existe plusieurs possibilités :

- *L'utilisation du mortier projeté par voie humide S&P ARMO-crete w ou du mortier de crépissage S&P ARMO-mur permet d'incorporer le treillis S&P ARMO-mesh directement dans la première couche de mortier, sans fixation additionnelle.*
Si le mortier projeté par voie sèche S&P ARMO-crete d est utilisé, trois différents types de fixation sont envisageables :
 - *fixation provisoire du treillis S&P ARMO-mesh et projection du mortier S&P ARMO-crete d*
 - *Agrafe S&P (La fixation du treillis se fait dans le mortier partiellement durci)*
 - *Goujon S&P (La fixation du treillis se fait dans le support complètement durci)*

Vous trouverez un comparatif entre les systèmes FRP et FRCM dans le tableau 1 ci-dessous :

	Système FRP Carbone dans une matrice époxy	Système FRCM Carbone dans une matrice minérale
Humidité du support	< 4% d'humidité résiduelle	Support humide
Préparation de la surface de pose	Légère (ponçage ou sablage)	Lourde (sablage ou hydro-démolition)
Reprofilage	Gros travail	Pas de travail supplémentaire
Application	Facile / maniable	Grande installation de chantier (nettoyage, bâchage)
Physique du Bâtiment	Contrôles obligatoires (FRP agit comme pare-vapeur local)	Pas de contrôles nécessaires L'ARMO-Système est minérale et perméable à la vapeur
Protection contre la corrosion des armatures internes	Mesures complémentaires obligatoires - Protection de l'armature en acier contre la corrosion - imperméabilisation ou revêtement fin entre les renforcements FRP	Valeur du pH = 12 avec le système ARMO. Pas de mesures complémentaires, le système offre une protection supplémentaire de l'armature interne
Protection au feu	Vérification de la sécurité structurale en cas d'incendie obligatoire, mesures de protection supplémentaires souvent nécessaires	Normalement (dépend de l'enrobage des aciers), un enrobage \geq 20mm garantie, dans les bâtiments, une résistance F90.

Tableau 1: Comparaison entre systèmes FRP / FRCM

3. Données techniques du S&P ARMO-mesh

S&P propose différentes versions de treillis :

S&P ARMO-mesh L500 / S&P ARMO-mesh L200 / S&P ARMO-mesh L600 (dès 2013)

⇒ Treillis de renforcement statique dans le sens longitudinal (fibres de carbone dans le sens du déroulement)

S&P ARMO-mesh 200/200

⇒ Treillis de renforcement statique bidirectionnel

S&P ARMO-mesh C200

⇒ Treillis de renforcement statique dans le sens transversal (pontage de fissures)

Données techniques	ARMO-mesh L600 (disponible dès 2013)	ARMO-mesh L500	ARMO-mesh L200 (sens principal) ARMO-mesh C200 (sens transversal) ARMO-mesh 200/200 (bidirectionnel)
Construction (fibre de carbone sens principal)	3 x 1600 tex/brin 58.5 brins/m	2 x 1600 tex/brin 58.5 brins/m	1 x 1600 tex/brin 2 x 800 tex/brin 50.0 brins/m
Module d'élasticité (théorique) [kN/mm ²]	240	240	240
Facteur de réduction du module d'élasticité dû à la méthode de pose	1.5	1.5	1.5
Valeur de dimensionnement du module d'élasticité (réduit) [kN/mm ²]	160	160	160
Résistance à la traction des fibres de carbone (théorique) [N/mm ²]	4'000	4'000	4'000 – 4'800
Poids des fibres de carbone sens principal [g/m ²]	280.8	187.2	80 (2x80 pour S&P ARMO-mesh 200/200)
Densité des fibres de carbone [g/cm ³]	1.79	1.79	1.79 – 1.80
Allongement à la rupture (théorique) [%]	1.5	1.5	1.5 – 2.0
Epaisseur de dimensionnement des fibres de carbone (poids ÷ densité) [mm]	0.157	0.105	0.044
Section de dimensionnement des fibres de carbone [mm ² /m]	157	105	44
Effort de traction à la rupture (théorique) [kN/m]	628	420	176-211
Rupture à la traction mesurée sur une mèche enrobée d'époxy [kN/m]	450.2	288.9	137.9
Effort de dimensionnement (recommandation S&P)			
Flexion (~ 800 N/mm²) (Allongement limite de dimensionnement 0.5 %) [kN/m]	125.6	84.0	35.2
Axial (~ 650 N/mm²) (Allongement limite de dimensionnement 0.4 %) [kN/m]	102.1	68.3	28.6

Tableau 2: Données techniques des S&P ARMO-mesh

Armature en fibres de verre S&P ARMO AR

⇒ Treillis en fibres de verre alcalirésistant pour une armature constructive.

Données techniques dans les deux directions		ARMO-armature en fibre de verre AR
Largeur des mailles	[mm]	35
Allongement à la rupture (2 sens)	[%]	4.5
Force de rupture à la traction théorique (2 sens)	[kN/m]	25
Largeur / longueur des rouleaux	[m]	2.20 / 100

Tableau 3 : Données techniques de l'armature S&P ARMO en fibre de verre AR

4. Ancrage, recouvrement de l'armature S&P ARMO-mesh

Pour garantir la transmission des efforts de l'acier au béton, l'acier d'armature est nervuré. Une règle simple peut être appliquée pour calculer la longueur de recouvrement :

Longueur de recouvrement de l'acier d'armature = $60 \times \varnothing$ de l'acier d'armature.

La résistance à la traction de la fibre de carbone est sept à huit fois supérieure à celle de l'acier de construction et les fibres de carbone ne sont pas nervurées. Le S&P ARMO-mesh n'est pas soudé aux intersections des fibres. Afin d'améliorer l'ancrage des armatures S&P ARMO-mesh dans le mortier projeté, un revêtement de la surface du treillis a spécialement été développé par S&P. Le revêtement à base d'un polymère aqueux est enrichi d'un silicate amorphe. Le composant réactif se trouve dans le mortier projeté S&P ARMO-crete respectivement dans le S&P ARMO-mur. La longueur d'ancrage nécessaire du treillis S&P ARMO-mesh L500 a été déterminée par des tests d'ancrage chez S&P [P11] et par des tests externes de l'EIA Fribourg [P23]. Les images 3, 4 et 5 montrent le déroulement des essais S&P.

4.1 Essais internes S&P



Image 3 : éprouvette en béton avant essai



Image 4 : Application du mortier projeté et S&P ARMO-mesh L500

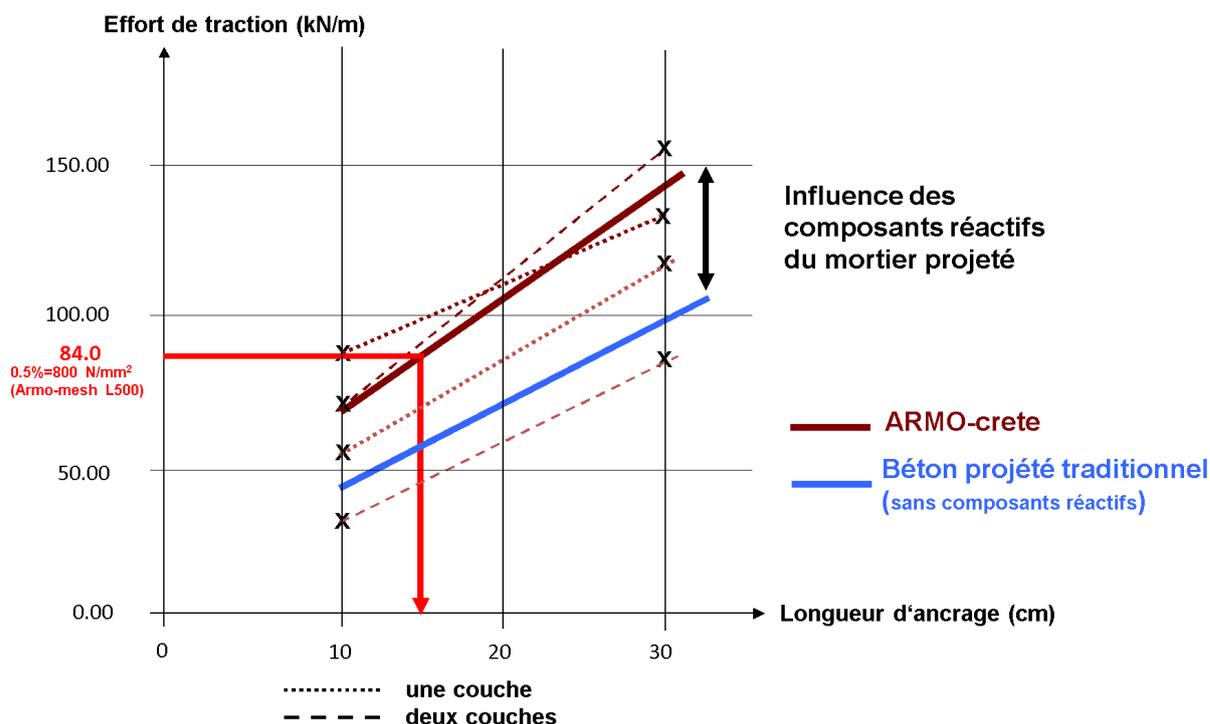


Image 5 : éprouvette après essai

Au total, 12 éléments ont été testés en faisant varier différents paramètres :

- la longueur d'ancrage : 10 / 30 cm
- utilisation de béton projeté traditionnel (sans composants réactifs)
- utilisation du mortier S&P ARMO-crete w (avec des composants réactifs)
- pose d'une respectivement deux couches de treillis S&P ARMO-mesh L500 treillis

Le graphique 1 montre les résultats des essais d'ancrage. Le treillis ARMO-mesh a glissé dehors de la matrice de béton à chaque essai.



Graphique 1: résultat de l'expérimentation

L'influence du composant réactif est clairement visible dans le graphique 1. Lors d'un dimensionnement à la flexion du treillis S&P ARMO-mesh L500 avec un allongement de 5‰, la force d'ancrage est de 84 kN/m (tableau 2). La contrainte de traction du S&P ARMO-mesh à cet état est de 800 N/mm².

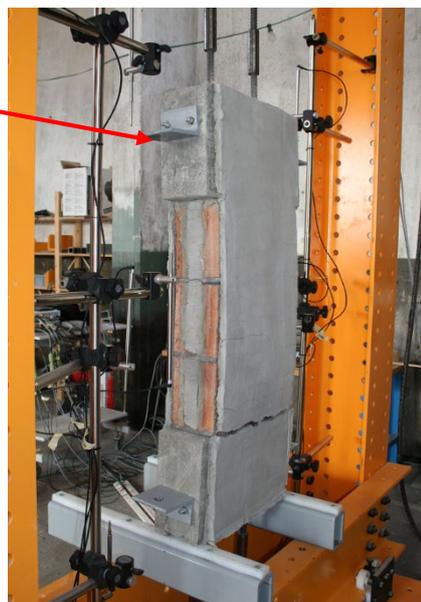
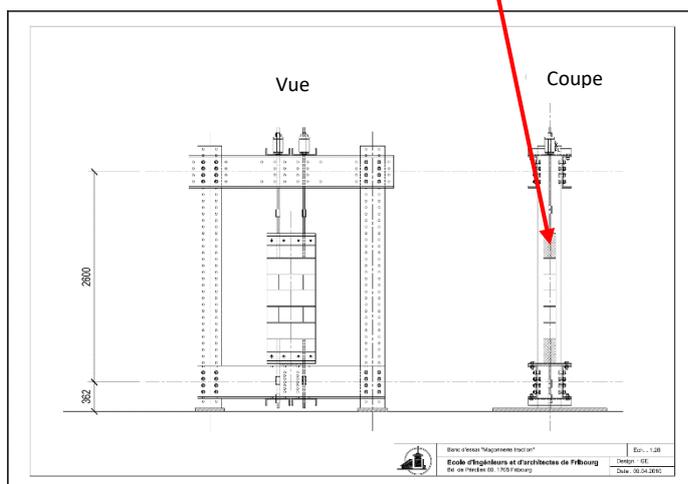
Grâce au composant réactif dans le mortier projeté, la longueur d'ancrage peut être réduite d'environ 30%.

Les essais internes de S&P ont été vérifiés par l'EIA Fribourg/CH [P23].

4.2 Essais EIA Fribourg/CH

Le système S&P ARMO-mesh a été appliqué sur un mur en maçonnerie et ancré en haut et en bas sur une longueur de 30 cm sur un support en béton. Le S&P ARMO-mesh a glissé hors de la matrice en béton lors de l'essai de traction. Le banc d'essai et les contraintes dans l'ARMO-mesh sont visibles dans le graphique 2, l'image 6 et le tableau 4.

Longueur d'ancrage sur béton L=30cm



Graphique 2/Image 6 : stand d'essai EIA Fribourg/CH

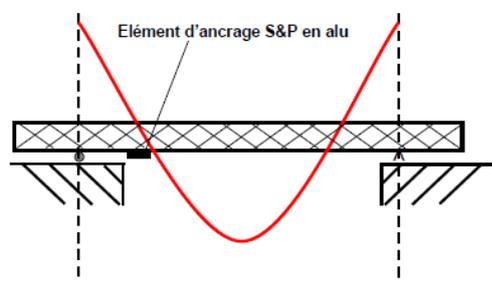
	S&P ARMO-mesh L200	S&P ARMO-mesh L500
Contrainte dans l'ARMO-mesh (essai d'ancrage)	1051 N/mm ²	1162 N/mm ²
Contrainte de dimensionnement de l'ARMO-mesh (recommandation S&P, tableau 2)	800 N/mm ² (renforcement à la flexion) 640 N/mm ² (renforcement axial)	

Tableau 4 : résultats EIA-FR Fribourg/CH

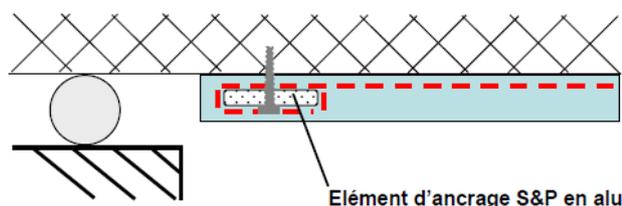
La longueur d'ancrage au dimensionnement du S&P ARMO-mesh L500 ne doit pas être inférieure à 300mm.

5. Éléments d'ancrage en alu S&P

Lors d'un renforcement à la flexion avec l'armature S&P ARMO-mesh, il peut arriver que l'ancrage de l'armature, par exemple derrière le point des moments nuls, ne soit pas possible (graphique 3).



Graphique 3 : Ancrage derrière point de moment nul

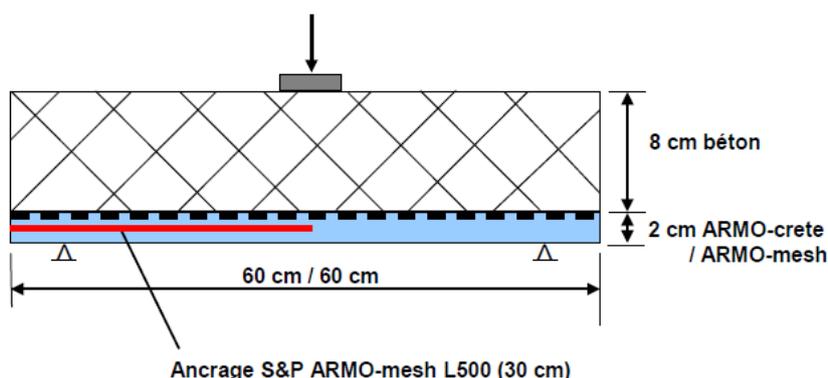


Graphique 4 : Élément d'ancrage en alu S&P

Dans ce cas, la force résiduelle dans le treillis S&P derrière le point de moment nul doit être introduite par un élément d'ancrage en alu S&P (graphique 4).

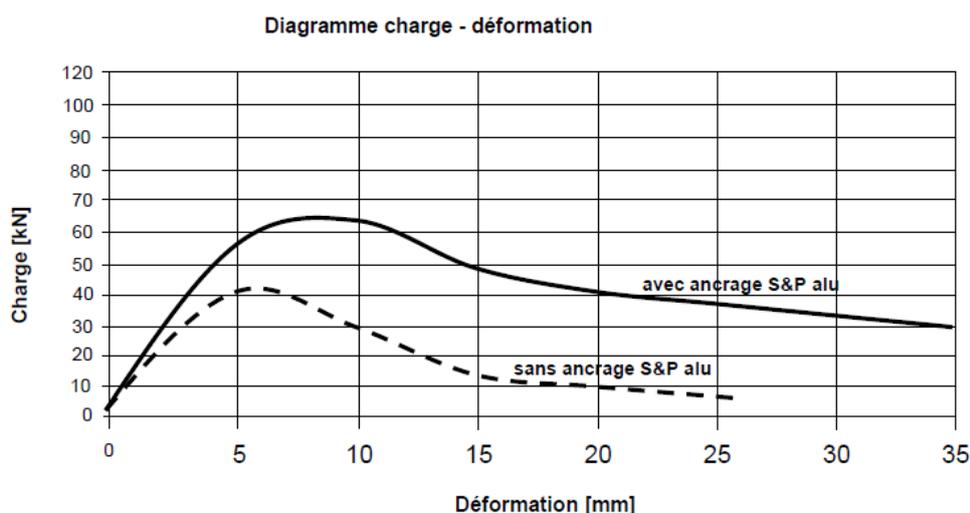
L'introduction de force dans le support se fait principalement sur la face avant de l'élément d'ancrage. L'effort est alors transféré dans l'interface entre le mortier projeté et le support. Les goujons de l'élément d'ancrage alu S&P sont dimensionnés pour mettre à disposition suffisamment de pression pour fixer l'élément d'ancrage dans le mortier.

L'efficacité de l'élément d'ancrage alu S&P a été vérifié par des essais de flexion sur des dalles dans la galerie d'essais de Hagerbach VSH [P20 / P10]. L'essai VSH est schématisé dans le graphique 5. La portée choisie pour l'essai de flexion sur dalles est de 60 cm. La longueur d'ancrage (longueur derrière l'introduction des forces) ne représente donc que 30 cm par côté.

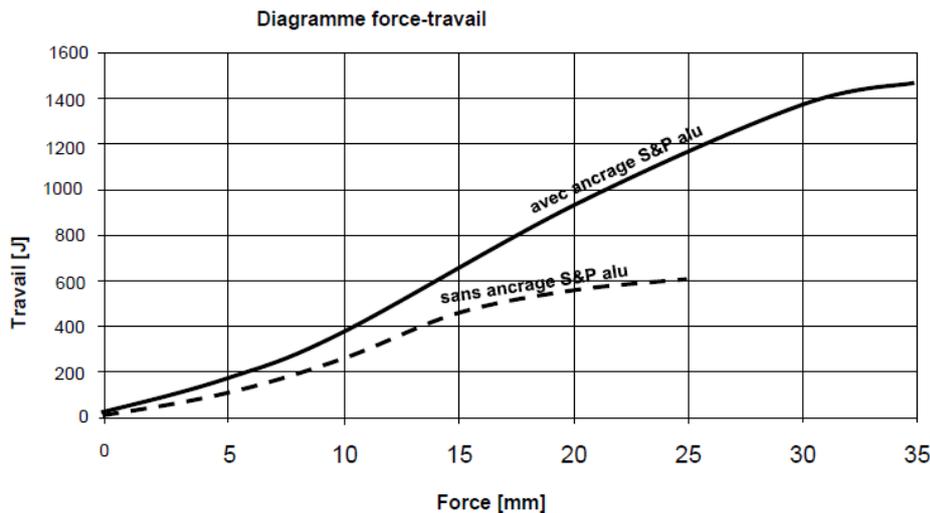


Graphique 5: Disposition de l'essai VSH sur dalles

Pour les essais dans la galerie d'essai VSH, trois échantillons ont été renforcés avec du treillis S&P ARMO-mesh L500 (avec et sans ancrage de bord) [P20 / P10]. Le mortier choisi pour l'essai est du mortier projeté S&P ARMO-crete d avec une granulométrie de 4mm. Les résultats des essais sont présentés dans les graphiques 6 et 7. (Valeurs moyennes sur trois essais)



Graphique 6: Diagramme charge-déformation des dalles renforcées avec et sans ancrage



Graphique 7: Diagramme force-travail des dalles renforcées avec et sans ancrage

Résultat: Energie de dissipation sans ancrage alu S&P: 626 J
 Energie de dissipation avec ancrage alu S&P: 1139 J (+ 82%)

Lors des essais (images 7 et 8) de flexion sans ancrage du treillis S&P ARMO-mesh, les faisceaux de carbone ont glissé hors du mortier. Grâce à l'ancrage de bord alu S&P, ce n'était plus le cas. La rupture avait alors lieu par délaminage du mortier du support. Le travail a alors pu être augmenté de 82%.



Image 7: Disposition de l'essai VSH



Image 8: Echantillon VSH à la rupture

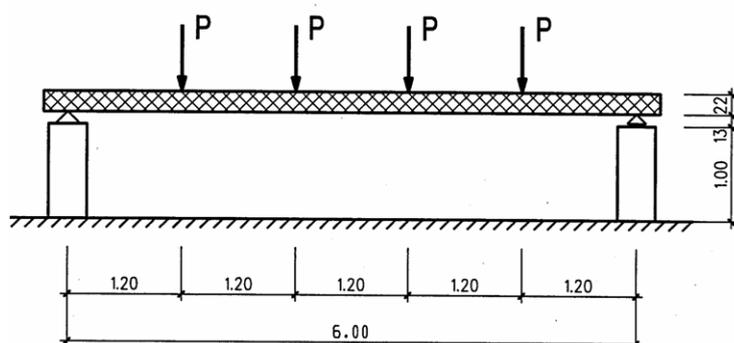
6. Renforcement à la flexion avec le système FRCM S&P à l'EIA Fribourg/CH

Le dimensionnement statique pour le système S&P ARMO est réalisé en se basant sur les directives de dimensionnement FRP, les normes, respectivement les autorisations en vigueur pour les différents pays. Une étude de base pour le système ARMO a été effectuée à l'Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (EIA Fribourg/CH) [P15]. Une série de tests ont été effectués sur des échantillons identiques aux systèmes testés avec du FRP de S&P.

L'image 9 et le graphique 8 montrent le dispositif d'essai à EIA Fribourg/CH.



Image 9 : Dispositif de l'essai EIA Fribourg/CH



Graphique 8 : Dispositif de l'essai EIA Fribourg/CH

Dimensions dalle en béton armé:

Épaisseur 22 cm Longueur totale 6.3 m
Largeur 85 cm Portée 6.0 m

Armature intérieure:

Longitudinal 6 Ø 12 (S 500)
Transversal Ø 8 ; s = 150 (S 500)

Une dalle de référence sans renforcement (essai D0) a été comparée à des dalles renforcées respectivement d'une couche (essai D1) et deux couches (essai D2) d'ARMO Mesh L500. Le mortier utilisé été le mortier projeté par voie humide ARMO-crete w avec les composantes réactives (image 10).

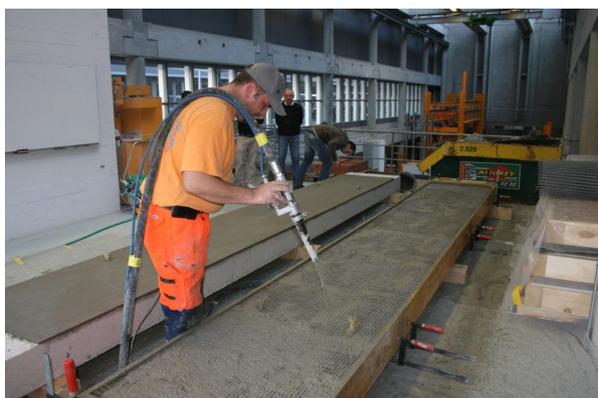


Image 10: Application du système S&P FRCM

6.1 Résultats des essais de résistance de l'EIA Fribourg/CH [P15]

6.1.1 Comportement à l'Etat-Limite de Service

État non fissuré

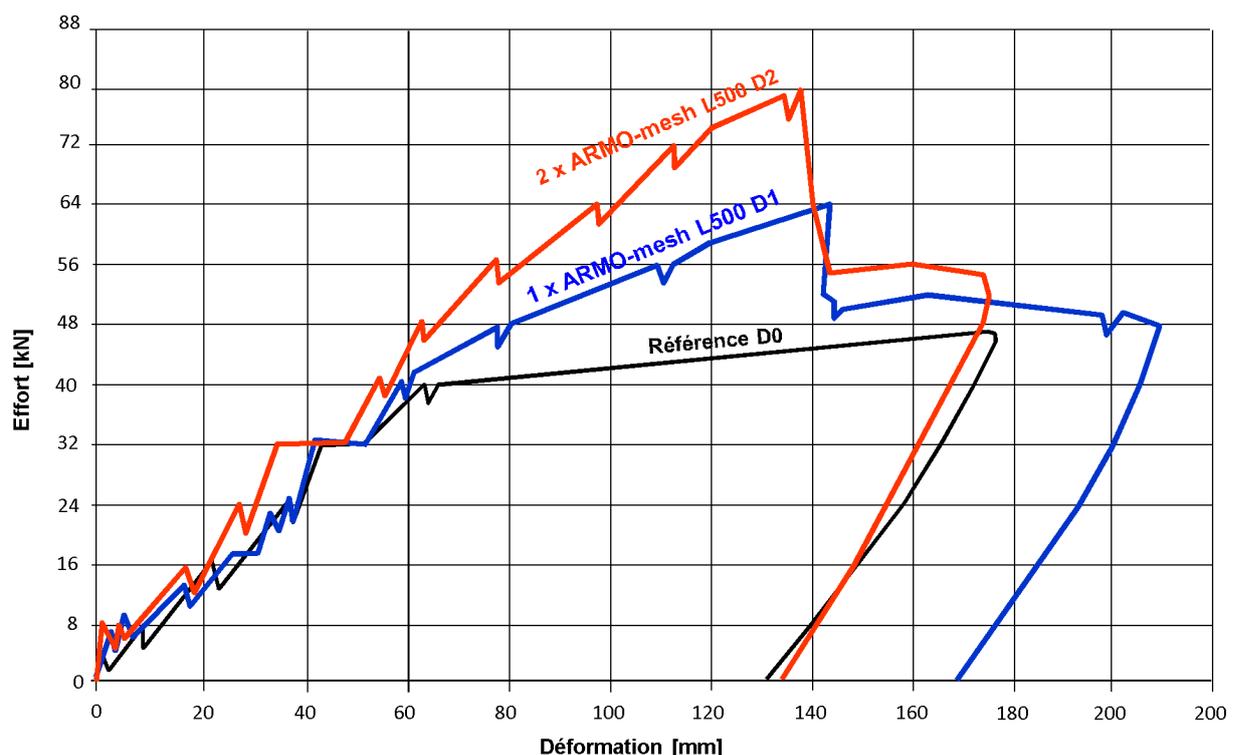
Sur les courbes charge-déformation (graphique 9), on constate peut de différence de rigidité entre les échantillons à l'état non fissuré (stade I). Les différences principales concernent la rigidité flexionnelle et la charge de fissuration (tablelle 5).

La dalle de référence D0 à un comportement sensiblement plus souple que les dalles renforcées. La raison principale de ce comportement est à chercher dans l'inertie plus grande des dalles renforcées mais n'est pas complètement justifiable par ce phénomène uniquement. La rigidité flexionnelle réduite de la dalle de référence n'est pas entièrement justifié par cette différence. La rigidité est plus basse que celle trouvée par un calcul élastique, ceci pour d'autres raisons qui n'ont pas été analysées. Les différences de rigidités des dalles renforcées correspondent par contre aux différences d'épaisseur dus au mortier appliqué pour les renforcements.

Les contraintes de flexion calculées à partir des moments de fissuration (en prenant en compte le poids propre et le dispositif d'essai) correspondent approximativement aux résistances flexionnelles. Le comportement à l'état non fissuré ne relève pas de comportement surprenant.

Essai	δ [mm] à $Q_{tot} = 4$ kN		I_n [-]	Moment de fissuration [kNm]	Contrainte flexionnelle [MPa]
D0	1.27	100%	100%	25.3	3.7
D1	0.69	55%	110%	26.6	3.4
D2	0.62	49%	115%	27.3	3.3

Tableau 5 : caractéristiques de l'état non fissuré



Graphique 9 : flèche en fonction de la charge totale de tous les échantillons

Rigidité à l'état fissuré

La bande de dalle D0 a une rigidité à l'état fissuré (stade II) qui est 5.40 fois plus petit que dans l'état non fissuré I (tableau 5 et tableau 6, augmentation de la flèche entre les charges de 8 kN et 16 kN). La réduction de rigidité est de 5.00 respectivement 4.88 pour l'intervalle de charge de 8 kN à 24 kN respectivement à 32 kN. La réduction de la rigidité proposé dans la norme SIA 262 avec la formule empirique ($[N1]$, formule 87) est dans le même ordre de grandeur avec 5.6. Les cycles de charge – décharge entraînent une perte de la rigidité de 14%.

Plus il y a des fissures qui se forment, plus le comportement de l'échantillon D1 se rapproche de celui de l'échantillon de référence. Les pertes de rigidité à l'état fissuré des échantillons D0 et D1 sont environ proportionnelles à la différence de rigidité à l'état fissuré. La rigidité à l'état fissuré de l'échantillon D1 est 10.86 fois plus petit qu'à l'état non fissuré (de 8 kN à 16 kN). Pour les augmentations de charges de 8 kN à 24 kN respectivement de 8 kN à 32 kN, les facteurs de perte de rigidité sont de 10.07 respectivement 9.39. La diminution de rigidité avec une augmentation de la charge est donc plus prononcée que dans l'essai de référence D0. Les cycles de charge – décharge réduisent la rigidité d'environ 17%.

δ [mm] avec Q_{tot}										
Essai	8 kN		16 kN		24 kN		32 kN (avant cycles)		32 kN (après cycles)	
D0	8.98	100%	22.66	252%	34.31	382%	460.3	513%	52.32	583%
D1	5.81	65%	20.89	233%	33.60	374%	44.67	498%	52.39	583%
D2	4.41	49%	16.89	188%	28.51	317%	39.38	438%	48.02	535%

Tableau 6 : caractéristiques des rigidités à l'état fissuré

La dalle D2 a un comportement généralement un peu plus rigide que les deux autres. La perte de rigidité à l'état fissuré des échantillons D0 et D2 est égale à la différence de rigidité à l'état non fissuré. La rigidité à l'état fissuré est 10.09 fois plus petit qu'à l'état non fissuré (8 kN à 16 kN). Pour les augmentations de charges de 8 kN à 24 kN respectivement de 8 kN à 32 kN les rigidités sont 9.72 respectivement 9.40 fois plus petit. La réduction de la rigidité due à la formation des fissures est comparable au comportement de l'échantillon de référence mais à un niveau de charge plus grand. Les cycles de charge – décharge réduisent la rigidité de 22%.

L'échantillon D2 montre bien l'influence du renforcement plus important en ARMO-mesh. Il a un comportement plus rigide dès le début de la formation des fissures. Les flèches, avec des charges égales et un module d'élasticité comparable des bétons, sont considérablement plus petits en comparaison avec la dalle D1. La rigidité élevée par rapport à l'essai de référence de la zone de traction est également visible.

Charges de service pour flèches limites

Le tableau 7 montre une comparaison des charges atteintes à différentes limites de services usuels. Les déplacements mesurés pour les limites de flèche ne prennent pas en compte des charges cycliques, cette influence peut être estimée avec la perte de rigidité due aux cycles de charge. La comparaison des charges atteintes pour les différents seuils de flèches montrent que les couches de mortier projeté armé avec des treillis de carbone sont plus efficaces pour des charges basses.

Q_{exp} [kN]						$(Q_u/Q)_{exp}$						
Pour une flèche de L/300 au milieu du champ												
Essai	L/500		L/350		L/300		L/500		L/350		L/300	
D0	9.40	100%	12.75	100%	14.34	100%	5.02	100%	3.70	100%	3.29	100%
D1	11.48	122%	13.16	103%	15.40	107%	5.56	111%	4.85	131%	4.15	126%
D2	13.00	138%	16.00	125%	17.47	122%	6.16	123%	5.00	135%	4.58	139%

Tableau 7 : Charges de service pour limites de flèches données

L'essai D1 montre que l'effet du renforcement est très faible pour une limite d'utilisation croissante, l'essai D2 a une réserve même aux niveaux de charges élevés. Cela indique qu'à des niveaux de charge faibles, l'augmentation de la rigidité est premièrement influencée par la couche de mortier projeté et secondairement par le treillis en carbone.

Des charges plus élevées que celles du tableau 7 peuvent être utilisées si le critère de service est la largeur des fissures plutôt que la flèche.

Largeurs des fissures

Le tableau 8 contient les largeurs des plus grandes fissures mesurées par palier de charge. Pour des niveaux de charges faibles, aucune influence significative des couches de mortier projeté armées de treillis en carbone ne peut être observée. Bien au contraire, avec une augmentation de la couche de mortier la largeur des fissures augmente. En prenant en compte la précision des mesures, une influence sur les largeurs des fissures n'est visible qu'à partir d'un niveau de charge de 24 kN.

Les largeurs de fissures mesurées indiquent que la rigidité des treillis en carbone est activée qu'à partir d'un certain allongement. Les largeurs plus grandes mesurées pour les niveaux de charges faibles sont liées à l'enrobage plus grand de l'armature en acier. Pour un allongement égal de l'acier une largeur des fissures plus grande est attendue. Si le critère de service est une largeur des fissures maximale de 0.3 mm, il faut une charge de service de 24 kN. Le fait que cette valeur est indépendante du niveau de renforcement prouve que les renforcements sont activés qu'après avoir franchis les niveaux usuels de service.

Essai	8 kN	16 kN	24 kN	32 kN	40 kN	48 kN	56 kN	64 kN	72 kN
D0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	--	--	--	--
D1	0.20	0.25	0.30	0.35	0.60	0.80	1.10	--	--
D2	0.25	0.30	0.30	0.45	0.55	0.60	0.65	0.75	1.00

Tableau 8 : plus grande fissure mesurée [mm]

Importance de l'aptitude au service pour le dimensionnement

La comparaison des charges de rupture et des charges de services admissibles permet de déduire quelle vérification est déterminante. En admettant un facteur de charge moyen de $\gamma_{G/Q} = 1.4$ pour les charges permanentes et variables et un facteur de résistance de $\gamma_R = 1.2$ pour le béton armé conforme à [N2]. En admettant également que le rapport entre la résistance moyenne et caractéristique du béton armé est défini uniquement par l'acier d'armature, soit : $\gamma_m = 540/519 = 1.04$. Avec ces données, on peut définir un facteur de sécurité globale de $\gamma_{gl} = \gamma_{G/Q} \cdot \gamma_R \cdot \gamma_m = 1.4 \cdot 1.2 \cdot 1.04 \cong 1.75$ qui correspond à peu près au rapport entre la combinaison de charges de rupture et la combinaison de charges de service rares d'après [N3]. Cette combinaison des charges pour l'état de service doit être comparée à la charge pour la flèche la plus petite. Si les combinaisons de charges des cas fréquents ou quasi permanents sont pris en compte, le facteur de sécurité globale est plus grand parce que les charges de service prises en compte sont plus petites. Si le

rapport entre les charges de rupture et de service déterminé expérimentalement est plus grand que le facteur de sécurité globale, la vérification de l'aptitude au service est déterminante pour le dimensionnement de la structure. Comme il est visible dans le tableau 7, la vérification de l'aptitude au service est déterminante pour le dimensionnement de tous les porteurs testés. Les rapports entre les charges de rupture et les charges de service sont largement plus grand que le facteur de sécurité globale estimé. Les renforcement apportent donc qu'une amélioration pour la vérification à la rupture et n'ont aucune influence pour une amélioration de la vérification à l'aptitude au service. Ce résultat est à attendre avec des renforcements avec du mortier projeté armé de treillis de carbone de faible épaisseur qui ont une contribution à la rigidité faible.

6.1.2 Comportement à l'Etat Limite Ultime

Début de l'écoulement de l'armature en acier

Le comportement des bandes de dalle change sensiblement avec le début de l'écoulement de l'armature en acier. Quand l'allongement des armatures en acier dépasse l'allongement d'écoulement, ce sont principalement les treillis en fibres de carbone qui doivent reprendre les efforts de traction supplémentaires. Les aciers d'armature ne reprennent que des forces en fonction de leur module d'érouissage qui est plus faible que 1% de la rigidité élastique. Par rapport aux treillis de carbone les aciers d'armature ne reprennent donc quasiment aucune force supplémentaire. Le début de l'écoulement marque par conséquent le début de la contribution des treillis en carbone à la portance des éléments. Les forces et flèches associées peuvent être estimées en fonction des diagrammes force – déplacement.

Les comparaisons dans le tableau 9 montrent que les forces pour mettre en écoulement l'armature en acier ne changent que peu en fonction des différents taux de renforcements avec des treillis en carbone. Différents écarts sont aussi dus à la précision de lecture. Malgré cela, on constate qu'une charge de mise en écoulement plus élevée est atteinte avec un renforcement plus fort à l'aide des treillis en carbone. La rigidité du carbone a donc déjà un certain effet limité avant l'écoulement de l'armature en acier. Les charges d'écoulement plus grandes avec des sections de carbone croissantes sont aussi une preuve qu'il existe un certain effet d'adhérence entre la matrice en mortier projeté et le treillis en carbone qui a une influence limité mais non négligeable dans l'état fissuré.

Avec les augmentations des flèches $w_u - w_y$ du début de l'écoulement de l'armature en acier jusque à l'atteinte de la charge maximale Q_u , une comparaison des accroissements de la flèche peut être faite avec l'intervalle de charge de 8 à 16 kN (voir tableau 6). L'abaissement de la rigidité flexionnelle EI_y plastique en comparaison avec la rigidité fissuré avec une armature en acier encore élastique EI_{II} est visible dans le tableau 9.

Ici l'influence des treillis en carbone se manifeste clairement. Contrairement à la baisse de rigidité d'un facteur d'environ 8 attendue avec le taux d'armature des dalles non-renforcées ; la réduction est un peu plus faible que 2 pour l'essai D1 ; la réduction de rigidité pour l'essai D2 est seulement d'environ 25%.

Cet effet très positif des treillis en carbone est également confirmé par l'augmentation du rapport Q_u/Q_y , entre la charge de rupture et la charge d'écoulement, d'environ 30% par couche de treillis en carbone.

	Q_y [kN]	w_y [mm]	EI_y/EI_{II}	Q_u [kN]	w_u [mm]	Q_u/Q_y	Q_{rest} [kN]	w_{rest} [mm]	$D_s = w_u/w_y$
--	------------	------------	----------------	------------	------------	-----------	-----------------	-----------------	-----------------

D0	38.7	100%	61	7.98	47.2	100%	176.5	122%	--	--	--	2.89	100%
D1	42.1	109%	62	1.95	63.8	135%	141.7	152%	52.4	82%	162.8	2.29	79%
D2	44.4	115%	58	1.34	80.0	170%	132.7	180%	56.2	70%	155.1	2.29	79%

Tableau 9 : valeurs caractéristiques à la rupture et à l'écoulement des armatures en acier

Degrés de renforcement

À l'aide des rapports entre les charges de rupture Q_u des dalles renforcées, il est possible de calculer un taux de renforcement des treillis de carbone par rapport à la dalle de référence (tableau 9). Les valeurs montrent qu'un doublement de la section de carbone entraîne un doublement de la charge supplémentaire de rupture. Pour le système porteur étudié, cela signifie une augmentation de 16.5 kN, soit 35% par couche de treillis de carbone.

Disposition des fissures et allongement dans la zone de traction

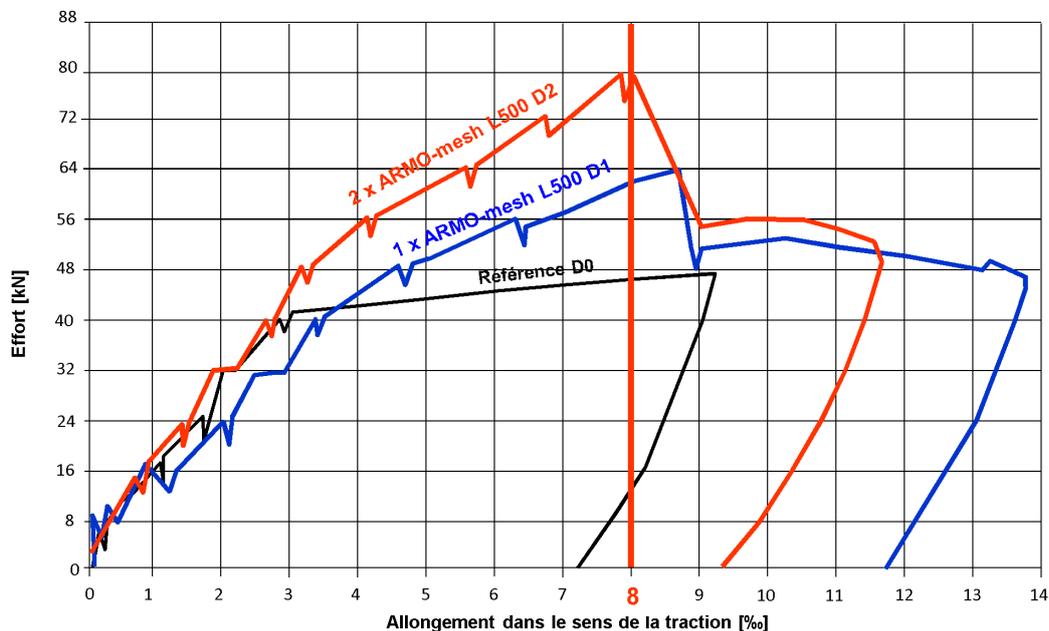
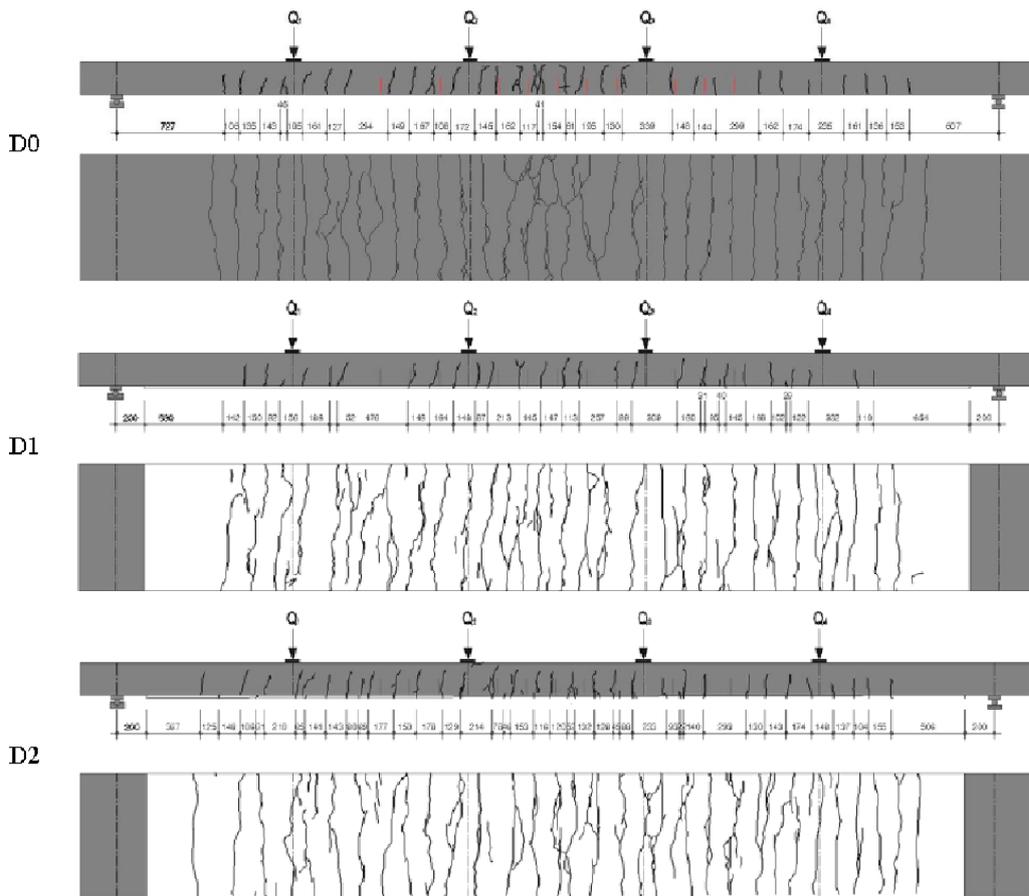
Le graphique 10 montre la disposition des fissures après la rupture et les allongements de la face en traction sous charge maximale.

On constate une répartition suffisamment fine des fissures dans tous les essais. Comme prévu, dans l'essai de référence D0 l'espacement des fissures correspondent à peu près à l'écartement de 150 mm des barres transversales. Dans les essais D1 et D2, les écartements diminuent un peu, ce qui était prévisible avec le léger renforcement de la rigidité. Cette rigidification est confirmée par les allongements sous la charge maximale, qui sont décroissants avec un renforcement plus fort (graphiques 9/10).

Comportement à la rupture et résistance résiduelle

La ruine définitive des dalles testées a eu lieu dans la zone de compression du béton ; pour aucun des échantillons l'armature en acier s'est rompue. L'adhérence du mortier projeté au béton et les sections des treillis en carbone étaient intacts après la rupture de la zone de compression.

Dans le diagramme Force/Déformation (graphique 10) les déformations données sont celles mesurées sur la face du béton. Les déformations dans l'ARMO-mesh ne peuvent pas être mesurées.



Graphique 10 : Disposition des fissures et allongements dans la zone de traction

La déformation maximale sur la face du béton de 0,8% a permis de déterminer les déformations et contraintes théoriques dans le S&P ARMO-mesh. Les résultats confirment que l'activation du treillis S&P ARMO-mesh nécessite un allongement supplémentaire. En conséquence, S&P conseil un concept de dimensionnement, avec d'une part une réduction du module d'élasticité théorique du treillis carbone de 1,5 et l'autre part la limitation de l'allongement à 0.5% en dimensionnement (pour la flexion).

Sur le même concept, les limites d'allongement en dimensionnement sont fixées à 0.4% pour les charges axiales et 0,2% pour le dimensionnement à l'effort tranchant.

Facteur de réduction pour le module d'élasticité du S&P ARMO-mesh	1.5
Module d'élasticité réduit pour le dimensionnement du S&P ARMO-mesh	160 GPa
Allongement limite du S&P ARMO-mesh à l'état de dimensionnement :	
flexion	0.5% (~ 800 N/mm²)
axial	0.4% (~ 640 N/mm²)
cisaillement	0.2% (~ 320 N/mm²)

7. S&P ARMO-flexion, logiciel pour le renforcement à la flexion

S&P ARMO-flexion (image 11) est un logiciel pour le dimensionnement de renforcements d'éléments en béton armé et en béton précontrainte sollicitée en flexion simple avec le système S&P ARMO. Le logiciel sert non seulement à conceptualiser des mesures de renforcement mais aussi à établir des notes de calcul dans le cadre de dimensionnements statiques. Il fournit à l'utilisateur la section de fibres de carbone nécessaire pour l'ARMO-mesh L500 resp. L200 ainsi que le 200/200. De plus, il vérifie les longueurs d'ancrage nécessaires selon les bases de dimensionnement du système S&P ARMO. Les mortiers vérifiés pour le système utilisés sont S&P ARMO-crete d ainsi que S&P ARMO-crete w. Le dimensionnement se base sur les autorisations ainsi que sur les directives et normes pour armatures collées et renforcements en FRP. Un exemple de dimensionnement est fourni en annexe.

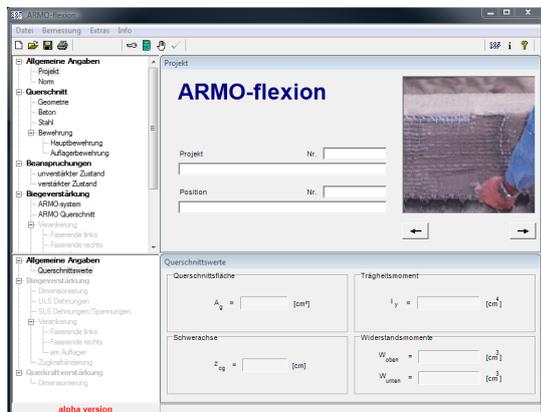


Image 11: Le logiciel de dimensionnement ARMO-flexion

8. S&P ARMO-axial, logiciel pour le renforcement axial

S&P ARMO-axial (image 12) est un logiciel pour le dimensionnement de renforcements de piliers en béton armé soumis à un effort normal selon le système S&P ARMO. Le renforcement se base sur l'effet de fretage, qui évite l'allongement du porteur dans la direction transversale. Ainsi un état de tension triaxial est créé dans le béton ce qui augmente la résistance à la compression du béton. S&P ARMO-axial sert non seulement à conceptualiser des mesures de renforcement mais aussi à établir des notes de calculs dans le cadre de dimensionnements statiques. Pour une charge donnée le logiciel calcule le nombre de couches de fretage nécessaires avec S&P ARMO-mesh L500 respectivement L200. En tant que mortier projeté testé pour le système, les caractéristiques des mortiers S&P ARMO-crete d ainsi que S&P ARMO-crete w sont utilisés par le logiciel. Le dimensionnement se base sur les autorisations ainsi que sur les directives et normes pour

armatures collées et renforcements FRP. Un exemple de dimensionnement est fourni en annexe.

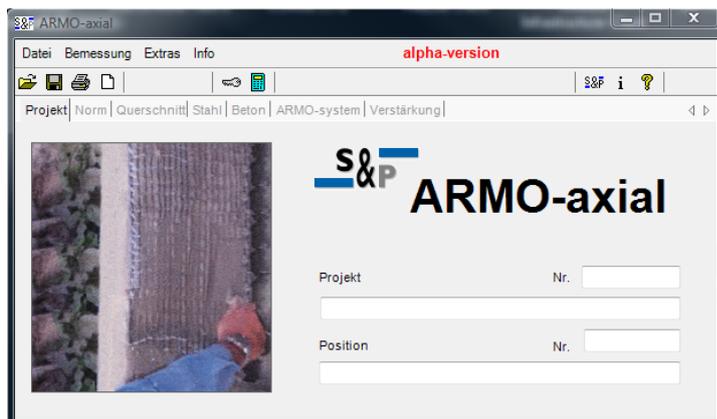


Image 12: Logiciel de dimensionnement ARMO-axial

9. Applications des FRCM dans les tunnels et autres ouvrages de génie civil

Le béton projeté est utilisé dans la construction des tunnels pour la sécurisation à l'avancement ainsi que pour stabilisation de la voûte. Pour la sécurisation à l'avancement, on utilise principalement du béton projeté avec des fibres d'acier. Poser de l'armature sans sécurisation à l'avancement est dangereux. Pour les couches de béton projeté on utilise principalement des treillis d'armature. Lors de l'avancement conventionnel la surface du tunnel est particulièrement irrégulière. Il n'est donc pas possible de fixer proprement les treillis d'armature sur la voûte du tunnel. Une couche supplémentaire de béton projeté est alors nécessaire pour lisser la surface.

Le treillis S&P ARMO-mesh diminue l'épaisseur du béton projeté. Le treillis de carbone est flexible et par conséquent, la couche de béton projeté suit les irrégularités du profil du tunnel ou de l'excavation.

Pour des supports avec de grandes irrégularités du profil, l'armature en acier est placée à une certaine distance du support. Pendant le processus de projection, le treillis d'armature vibre ce qui favorise rebond ainsi que le risque de cavités (image 13).



Image 13: Cavité

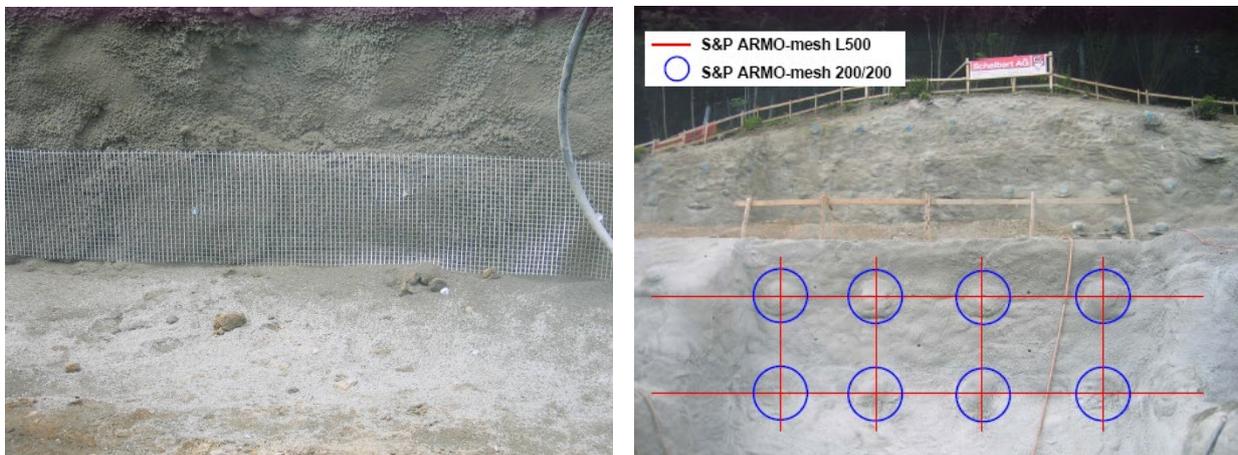


Image 14: Fixation du treillis S&P ARMO-mesh avec des agrafes

Les avantages du système S&P ARMO:

- La couche de renforcement de béton projeté peut être diminué (il faut moins niveler les irrégularités du profil / diminution de l'enrobage de l'armature en fibres de carbone).
- La fibre de carbone est inerte et donc pas sensible à la corrosion. Des flux d'eau de ruissellement agressifs ou des courants vagabonds dans des tunnels de chemin de fer ne peuvent pas endommager l'armature à long terme.
- Le pH du béton projeté n'a pas d'influence sur la protection anticorrosion de l'armature. La carbonatation dans l'exemple des tunnels routiers, ne nuit pas à l'armature en carbone. Les chlorures qui pénètrent dans le béton projeté en zone froide ne gênent pas non plus les treillis de carbone.
- Un agrandissement ultérieur de la galerie de reconnaissance est réalisable sans problèmes. Les treillis de carbone ne gênent pas l'avancement du perçage réalisé ultérieurement.

Dans le génie civil, nous proposons, en général, diverses possibilités d'applications. Les images 15 et 16 montrent une paroi en béton projeté renforcée avec des fibres métalliques. Des grilles S&P ARMO-mesh 200/200 ont été utilisées pour renforcer localement la zone des têtes d'ancrage. En plus, des bandes d'armature S&P ARMO-L500 sont posées entre les têtes d'ancrage et gicliées. La fixation des treillis S&P ARMO-mesh a été réalisée avec des platines.



Images 15 / 16: renforcement local de la zone des têtes d'ancrages

Comparaison: Coques en béton projeté avec armature en acier / S&P ARMO-mesh

Comme critère de comparaison de coques armées de béton projeté on se réfère à l'énergie de dissipation selon SIA 162/6, 1998.

Une couche de béton projeté de 10 cm avec une armature en acier de 150/150 Ø 6 mm (K188), se situant au milieu de la couche, offre habituellement une capacité de dissipation d'environ 800 joules. Cette énergie de dissipation peut également être atteinte avec des fibres en acier dosées à environ 30 kg/m³. Dans la galerie de test à Hagerbach/CH [P10 / P19] l'énergie de dissipation d'une coque de béton projeté de 10 cm a été testée avec les treillis S&P ARMO-mesh.

Dans les essais, un béton projeté traditionnel de 8 cm a été appliqué comme référence. Ensuite, un treillis S&P ARMO-mesh a été incorporé dans 2 cm de mortier S&P ARMO-crete.

Deux variantes de treillis ont été testées:

- S&P ARMO-mesh L500 (fibres de carbone unidirectionnel)
- S&P ARMO-mesh 200/200 (fibre de carbone bidirectionnel)

Les images 17, 18 et 19 montrent l'application. Dans le tableau 10 les treillis carbone ARMO-Mesh sont comparés à une armature en acier du type 150/150 Ø 6 mm (K188).



Images 17, 18, 19: réalisation des échantillons

Echantillon	Capacité de travail
10 cm de béton projeté traditionnel avec un treillis d'armature au centre (Treillis Ø 6mm 150/150)	800 Joules
8 cm de béton projeté existant avec 1-couche de treillis ARMO-mesh L500 dans 2cm ARMO-crete d ancré	1'139 Joules
8 cm de béton projeté existant avec 1-couche de treillis ARMO-mesh 200/200 dans 2cm ARMO-crete d	824 Joules

Tableau 10: Résultats VSH [P10 / P19]

Le système S&P ARMO se prête particulièrement bien pour la rénovation et le renforcement statique de coques en béton projeté abimées dans la construction de galeries ou la construction de routes et chemins de fer.

L'avantage déterminant du système S&P ARMO porte sur la réduction de la couche de béton projeté à quelques centimètres ce qui n'a pas d'influence sur le gabarit intérieur après le renforcement.

Si l'on incorpore des grilles en acier lors de la réparation, la couche de béton projeté est d'environ 8 cm. Cette épaisseur minimale est nécessaire pour le reprofilage de la voute, pour pouvoir intégrer le treillis en acier et pour garantir le recouvrement minimal de 3 cm. Le recouvrement de 3 cm de l'armature en acier est nécessaire pour garantir le temps de résistance au feu (F60) et pour protéger l'armature intérieure contre la corrosion (le pH du béton projeté est de 12). Le treillis S&P ARMO-mesh n'a besoin que de 2 cm de recouvrement pour garantir le même temps de résistance au feu (chapitre 11). La résistance à la chaleur de la fibre de carbone est 3 à 4 fois supérieure à celle de l'armature en acier. Un recouvrement minimal comme protection anticorrosion n'est pas nécessaire. C'est pour cela que l'épaisseur de la couche de béton projeté peut être réduite d'environ 50% (tableau 11).

	Epaisseur de la couche de béton projeté en cm	
	Traditionnel avec treillis en acier	Système S&P ARMO
Reprofilage	3	1 – 2
Armature noyée	1 - 2	-
Enrobage de l'armature	3	1 – 2
Total	8	2 – 4

Tableau 11: Réduction de l'épaisseur de la couche de béton projeté

Pour les réparations, par exemple de galerie sous pression on utilise pour des raisons logistiques le plus souvent des bétons projetés par voie sèche, livrés en sac ou en silo. S&P propose des bétons projetés prêt à l'emploi pour le procédé de projection par voie sèche. Le mortier S&P ARMO-crete d (dry) est produit dans des granulations diverses avec des additifs et ciments différents. La livraison du matériau se fait depuis les différents sites de production.

Ci-dessous le coût de 8 cm de béton projeté traditionnel avec de l'armature en acier est comparé à celui d'une coque en béton projeté de 4 cm du système S&P ARMO.

8 cm béton projeté traditionnel avec armature en acier

Matériau béton projeté (livré en sac), 8 cm à env. 9.00 - 11.00 CHF/cm	80.00 CHF/m ²
Mise en place	25.00 CHF/m ²
Livraison et pose de l'armature (conditions difficiles)	35.00 CHF/m ²
Total + 20% de divers	<u>168.00 CHF/m²</u>

4 cm S&P ARMO-crete avec S&P ARMO-mesh L500 ou 200/200

Matériau S&P ARMO-crete, 4 cm à env. 12.00 – 13.00 CHF/cm (+30%)	48.00 CHF/m ²
Mise en place (+ 25 %, diminution du rendement de projection)	35.00 CHF/m ²
Livraison et pose du treillis S&P ARMO-mesh (./. 15%)	30.00 CHF/m ²
Total + 20% de divers	<u>135.60 CHF/m²</u>

Le gain financier est d'environ 20% pour une épaisseur de 4cm de béton projeté au lieu de 8cm.

Le maître d'ouvrage bénéficie d'autres avantages grâce au système S&P ARMO :

- Le treillis ARMO-mesh se substitue à l'armature en acier, la couche de béton projeté est réduite.
- Pas de cavités derrière le treillis S&P ARMO-mesh.
- Moins de refus car pas de vibration comme avec l'armature en acier.
- Puisque la résistance à la chaleur est 3 fois supérieure, un recouvrement de 1 cm est suffisant pour garantir F60.
- Pas de corrosion dans l'armature en carbone, donc recouvrement minimal
- Augmentations du profil intérieur respectivement du gabarit du tunnel ou de la galerie.

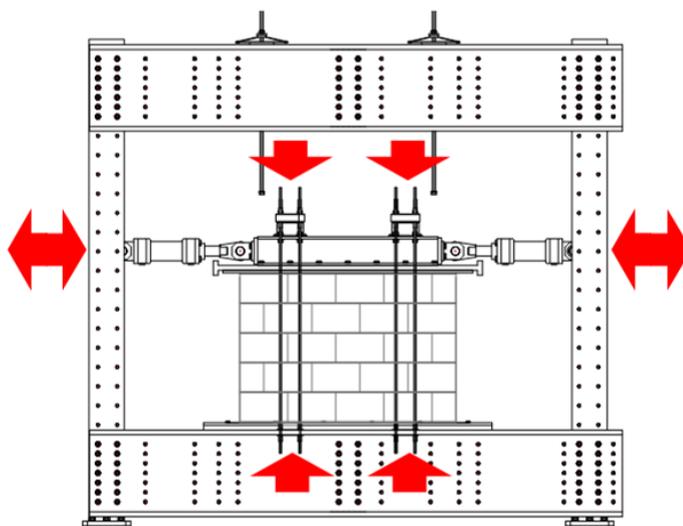
10. Renforcement sismique de murs en maçonnerie comparaison FRP/FRCM

10.1 Renforcement avec le système FRP

A l'EIA de Fribourg, 15 murs en maçonnerie ont été chargés cycliquement en 2007/2008. Les murs ont été renforcés avec différents systèmes FRP S&P (lamelles, sheets, etc.). Le renforcement FRP a toujours été ancré dans la zone de support en béton. L'image 20 et le graphique 11 montrent le dispositif de l'essai.



Image 20: banc d'essai à EIA Fribourg



Graphique 11: Montage expérimental

Deux différentes séries ont été testées.

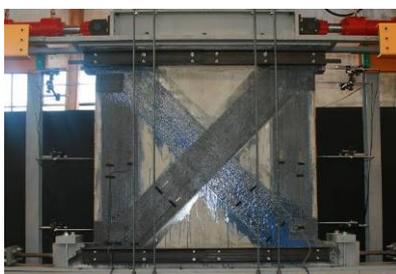
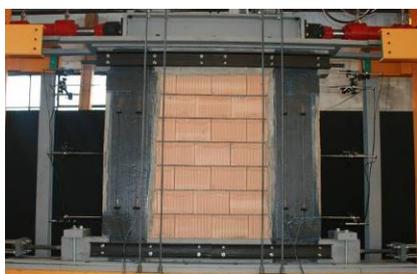
Série A Charge verticale de 1.0 N/mm² [P16]

Série B Charge verticale de 0.5 N/mm² [P17]

Pour la série A une charge verticale très élevée a été choisie. La charge verticale diminue donc l'effet sismique (l'élément de construction est soulevé verticalement), la charge verticale a donc été réduite pour la série B. Le tableau 12 montre les résultats de la série d'essais B. Les murs ont été renforcés avec du tissu C-Sheet 240 S&P, 200 g/m² (en bandes d'une largeur de 300 mm) qui ont été placées dans différentes dispositions ainsi que de manière unilatérale et bilatérale (images 21, 22, 23).

	Charge horizontale %	Déformation horizontale %
B1: Référence	100	100
B2: 2 bandes verticales	118	105
B3: 2 bandes verticales + 2 bandes 45°	149	110
B4: 4 bandes verticales + 45°	170	107
B5: 2 bandes verticales + 60°	167	102

Tableau 12: Résultats C-Sheet 240 S&P, 200 g/m² selon la disposition des bandes



Images 21, 22, 23: Dispositions différentes des C-Sheet 240 S&P

Conclusions:

Les résultats des tests statiques/cycliques ont montrés que les murs renforcés par du FRP pouvaient supporter des charges horizontales nettement plus élevées que les murs non-renforcés. Les renforcements unilatéraux respectivement bilatéraux ont fourni des résultats similaires. L'augmentation de la résistance des murs renforcés ne peut être exploitée dans toute son ampleur que si les briques et les joints arrivent à résister à la sollicitation plus élevée dû au renforcement. La déformation des murs renforcés a en général pu être augmentée jusqu'à 10%. Il devrait donc être possible de renforcer des murs porteurs de bâtiments existants, en particulier dans les zones non- ou peu menacées par des séismes et pour des bâtiments de classe I ou II.

10.2 Renforcements avec le système S&P FRCM

Afin de pouvoir examiner l'effet du treillis S&P ARMO-mesh, une série d'expériences C [P18] a été réalisée à l'EIA de Fribourg. Des expériences identiques ont été menées avec du treillis S&P ARMO-mesh L500 (environ 200 g/m²) au lieu du système S&P FRP C-Sheet 240 (200 g/m²). Pour les bandes, la même largeur a été choisie. Le système S&P ARMO a également été ancré dans le support en béton et appliqué de manière unilatérale. Les images 24 et 25 montrent l'application du système S&P ARMO.



Images 24, 25: Application du système S&P ARMO

Comme mortier projeté, du mortier crépi avec composant réactif S&P ARMO-mur, a été utilisé. Le mortier de crépi est applicable soit manuellement, soit mécaniquement. S&P propose deux produits, un pour l'application à l'intérieur, un pour l'application à l'extérieur. La charge verticale utilisée dans la série C est identique à celle de la série B.

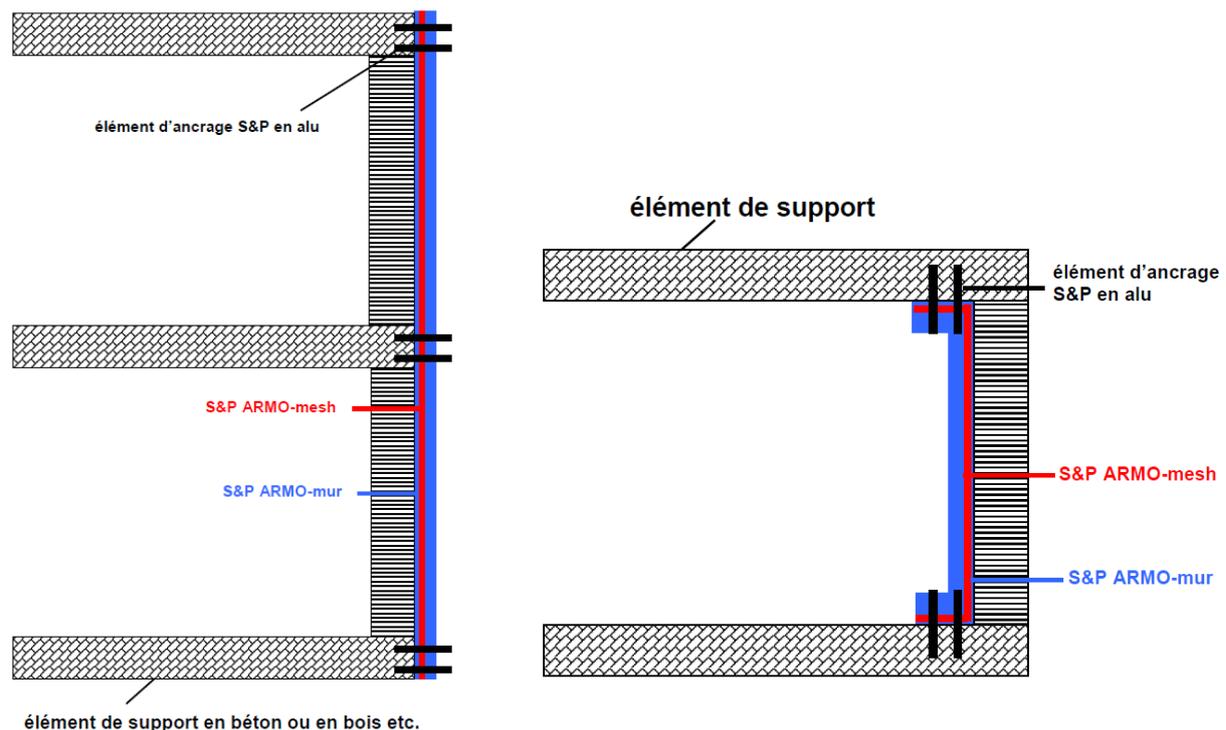
Le tableau 13 montre les résultats de la série C, où le renforcement est fait avec le système S&P ARMO. Les valeurs pour comparaison de la série B (C-Sheet 240 S&P) sont également indiquées dans le même tableau.

	Charge horizontale %	Déformation horizontale %
C1: Référence	100	100
C2: 2 bandes verticales	145 118 (B2)	138 105 (B2)
C3: 2 bandes verticales + 2 bandes 45°	147 149 (B3)	111 110 (B3)
C4: 4 bandes verticales + 45°	159 170 (B4)	119 107 (B4)
C5: 2 bandes verticales + 60°	161 167 (B5)	108 102 (B5)

Tableau 13: Résultats système S&P ARMO selon la disposition des bandes / Comparaison

L'effet des renforcements avec le système S&P ARMO est comparable aux effets du renforcement avec du FRP.

Dans tous essais les expériences du type «renforcement sismique d'un mur en maçonnerie» avec des produits S&P, les bandes de renforcement ont été ancrées dans l'élément de support en béton. Dans la pratique, ceci peut se faire à l'aide de l'élément d'ancrage S&P en alu (graphique 12). Les images 26 / 27 / 28 montrent le renforcement sismique d'un mur en maçonnerie avec treillis ARMO-mesh et des ancrages terminaux.



Graphique 12: Détails d'ancrage alu S&P

Dans ce cas, la force de traction est ancrée à 100% par les goujons dans l'élément de support en béton.



Images 26 / 27 / 28: renforcement sismique avec le système ARMO

Le renforcement de murs en maçonnerie avec des fibres de carbone noyées dans du mortier projeté est une nouvelle technique de renforcement économique et innovante.

11. Essais de résistance au feu du système FRCM S&P à l'EMPA à Dübendorf/CH et dans la galerie d'essai d'Hagerbach VSH/CH

D'après la norme DIN 4102 (chapitre 5.2.7) la température de l'acier d'armature ne doit jamais excéder la température critique de 500°C. Dans la norme ASTM E119-12 (chapitre 8.7.6.3) [N4]. La température critique est de 427 °C. Aux États-Unis et dans divers autres pays, l'essai au feu est effectué sous charges de service alors qu'en Allemagne ce n'est pas le cas. Des essais de résistance au feu ont été conduits par S&P à l'EMPA, à Dübendorf/CH et dans la galerie d'essai d'Hagerbach VSH/CH.

11.1 Essais de l'EMPA à Dübendorf/CH

À l'EMPA /CH des essais ont été effectués pour connaître la température critique des fuseaux de carbone. Les fuseaux longitudinaux d'un treillis S&P ARMO-mesh L500 ont été découpés. Ils ont été chargés d'une force uniaxiale à une température élevée. L'image 29 montre le fourneau.



Image 29: fourneau

La longueur totale des fuseaux était de 1.6m. Seule une partie d'environ 40cm au milieu a été chauffée. Les bouts des fuseaux en carbone étaient à température ambiante, en dehors du fourneau.

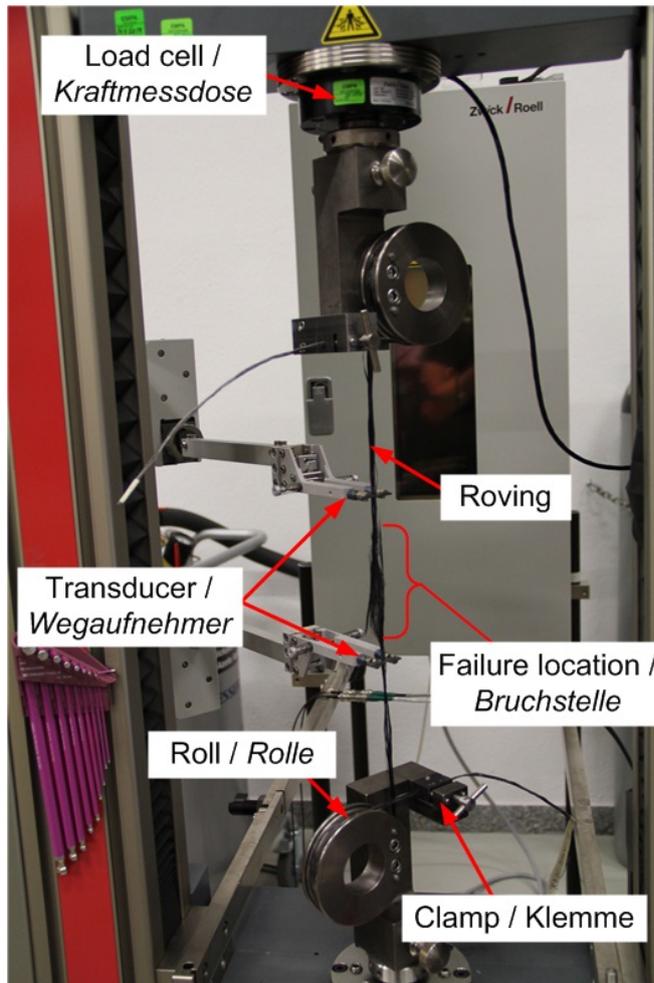


Image 30: configuration de l'essai

L'image 30 montre la configuration de l'essai. Les fuseaux de carbone sont enroulés trois fois autour d'une bobine à chaque bout et fixé dans le dispositif de traction. La traction est appliquée avec un déplacement de 5 mm/min.

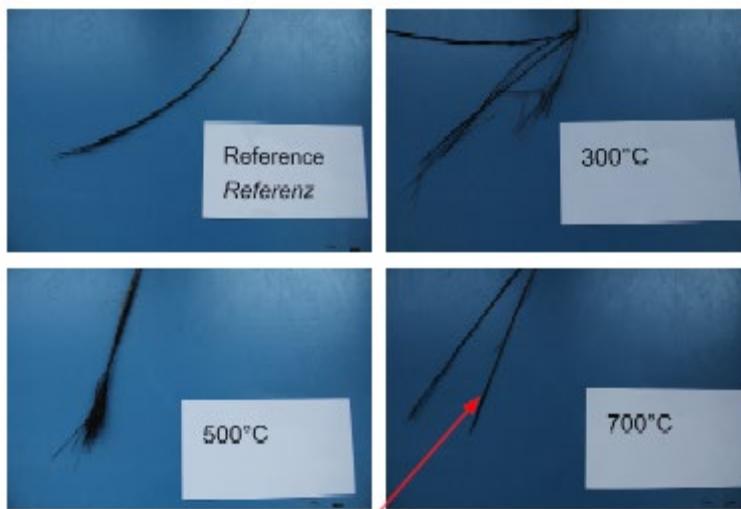
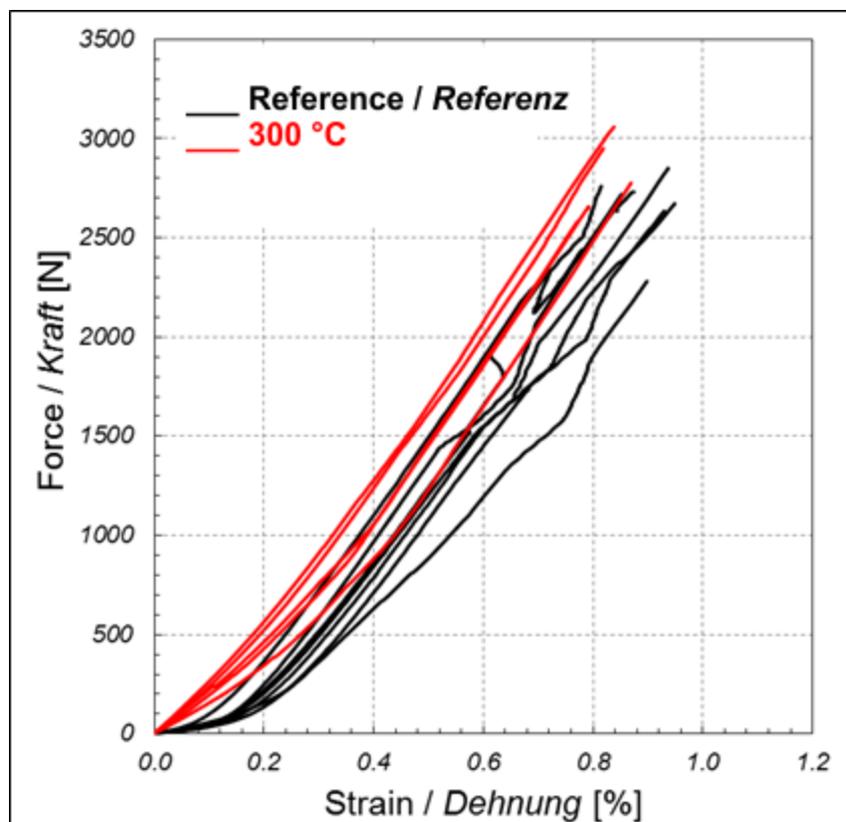


Image 31: échantillons après essais

L'image 31 montre les échantillons après l'essai et les endroits de rupture (flèche rouge). Sous la chaleur, le revêtement des fuseaux décroît aux endroits d'application de la chaleur. Un allongement préliminaire supplémentaire est donc nécessaire. L'essai uni-axial sur les fuseaux s'est déroulé à température ambiante (22 °C). L'application de la chaleur s'est fait pendant 30 minutes à 300, 500, 700 et 1000°C. En plus, un fuseau de référence a été testé.



Graphique 13 : graphique contrainte/allongement

Le graphique contrainte/allongement (graphique 13) montre la différence entre le fuseau chauffé à 300 °C et le fuseau de référence. Le module d'élasticité ne s'est pas réduit. Une réduction de la résistance est clairement visible, pour les températures dès 500 °C (tableau 14 / graphique 14).

	référence	300°C	500°C	700°C	1000°C
1	2731 N	2776 N	998 N	72 N	46 N
2	2281 N	3058 N	1930 N	66 N	36 N
3	2760 N	2657 N	1516 N	55 N	23 N
4	2672 N	2949 N	1729 N	45 N	50 N
5	2635 N	2582 N	1541 N		
6	2719 N				
7	2850 N				
moyenne	2664 N	2805 N	1542 N	60 N	39 N
s.d.	182 N	198 N	347 N	12 N	12 N

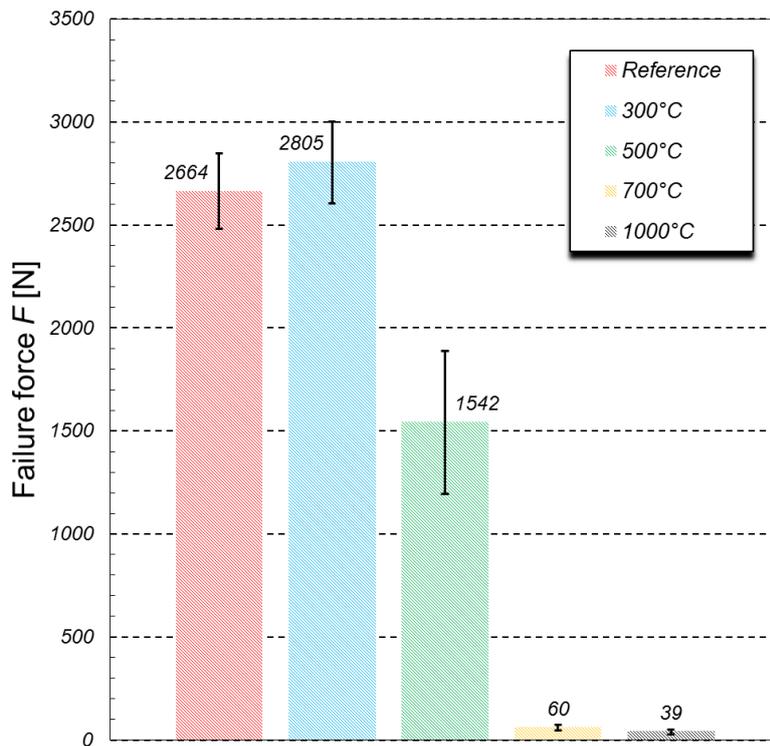


Tableau 14 / graphique 14: valeurs moyennes de la résistance en traction

Résultats et résumé des essais de l'EMPA/CH

Les essais de l'EMPA/CH montrent que l'application de 300°C pendant 30 minutes augmente la résistance à la traction moyenne d'environ 5% (augmentation de 2664 à 2805 N). Suite à l'allongement initial supplémentaire, l'allongement final de tous les échantillons est plus ou moins égal. La rigidité (module d'élasticité à la traction) est donc égale pour le fuseau de référence et les fuseaux chauffés. Une augmentation de la température à 500°C diminue la résistance moyenne à la traction de 1122 N ce qui signifie une perte de résistance de 43%. Vu que le S&P ARMO-mesh est utilisé qu'à 20% de la résistance théorique des fuseaux de carbone (800 N/mm²) cette perte de résistance n'est pas déterminante dans le cas d'un incendie. Par conséquent, le fabricant conseille d'utiliser 500°C comme température critique pour le S&P ARMO-mesh.

11.2 Essais de résistance à l'incendie dans la galerie d'essai Hagerbach VSH/CH

Pour résister à des charges de feu élevées comme rencontrée dans la construction des tunnels, par exemple, il existe des mortiers de protections avec des agrégats spéciaux (vermiculite ou autres) et des ciments spéciaux. Ces produits résistent uniquement si le béton de base sur lequel ils sont appliqués résistent aux expositions. L'image 32 montre un éclatement du matériel de base qui a été protégé par un produit spécial. Pour éviter l'éclatement du béton de base, il peut, par exemple, être amélioré avec des fibres PP. L'image 33 montre un essai dont le mortier spécial a été appliqué sur un béton avec des fibres PP. Les résultats de ces essais sont trompeurs parce que les ouvrages à protéger ont été construits qu'exceptionnellement avec des bétons fibrés.



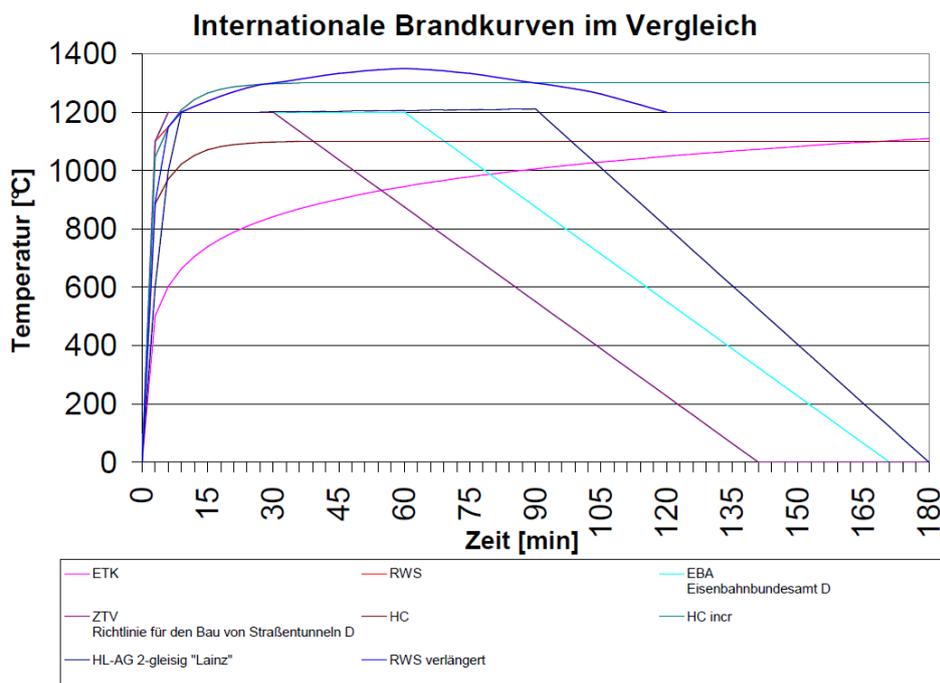
Image 32: éclatement de la base en béton



Image 33: pas d'éclatement en cas de béton fibré avec des fibres PP

Il est important que dans des essais de résistance au feu la base porteuse et la courbe des températures soient adaptées aux données de l'objet.

Dans la galerie d'essai d'Hagerbach VSH/CH une dalle en béton armé renforcé par le système S&P ARMO-mesh a été testée. Dans le système S&P ARMO, des ciments portland et agrégats normaux sont utilisées. Dans les différentes normes européennes, il existe différentes courbes de températures (graphique 15) en fonction du champ d'application, par exemple pour des incendies dans les bâtiments usuels ou dans les tunnels.



Graphique 15: courbes d'incendie internationales

À la galerie d'essai VSH, des essais selon la courbe ETK et RWS ont été menés. La courbe ETK est utilisée généralement comme courbe pour des incendies dans les bâtiments standards et la courbe RWS est utilisé aux Pays-Bas pour les tunnels sous le niveau de la mer. L'essai ETK a été mené pendant 120 minutes et l'essai RWS pendant 60 minutes. Dans les échantillons, l'humidité résiduelle était limitée à 4%.

Configuration de l'essai

Une dalle en béton armé d'une longueur de 2.0 m, largeur de 0.95 m et épaisseur de 0.2 m a été produite. Une armature de 5 barres de Φ 8 mm a été mise en place avec un enrobage de 3 cm. Une hydrodémolition de 2 cm a été exécutée. L'enrobage résiduel est donc de 1 cm. Le système S&P était appliqué de manière suivante :

- 1 cm ARMO-crete w appliqué par voie humide
- 2 couches ARMO-mesh 200/200 appliqué dans la première couche de mortier
- 2 cm d'enrobage des couches ARMO-mesh avec ARMO-crete w par voie humide

Ainsi :

Enrobage de l'armature:	- en acier	total 4 cm
	- en carbone	total 2 cm

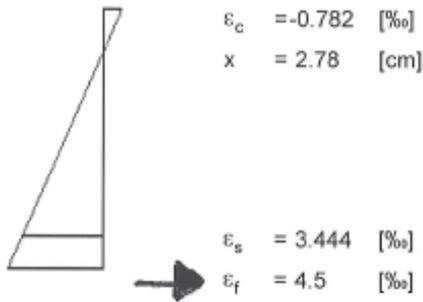
L'essai de résistance au feu a eu lieu sous charges de service (images 34 / 35):



Images 34 / 35: charges de service pendant l'essai

La charge de service était constituée de deux charges concentrées de 24 kN chacune. Le moment de rupture est de 27.2 kNm (poids propre et charges concentrées) et le moment à l'état-limite de service est de 18.3 kNm. Les contraintes et déformations ont été calculées avec le programme ARMO-flexion à l'état-limite ultime et de service et sont joint ici :

déformations - état limite ultime ($A_{t,min}$)



déformations / contraintes - état limite de service ($A_{t,eff}$)

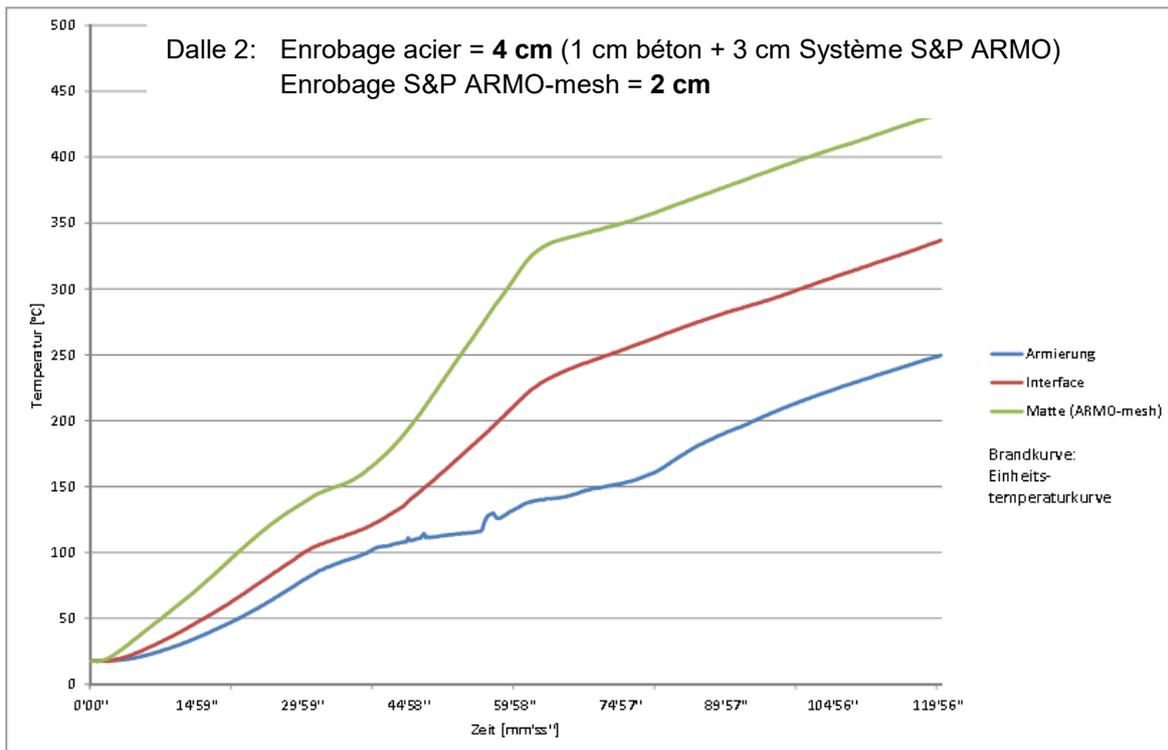


contraintes

➔	béton	$\sigma_{c,max} = -8.8$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,limite} = -18$ [N/mm ²]	✓
	acier à béton	$\sigma_{s,max} = 267.03$ [N/mm ²]	$\sigma_{s,limite} = 400$ [N/mm ²]	✓
	fibres de carbone	$\sigma_{f,max} = 419.66$ [N/mm ²]		

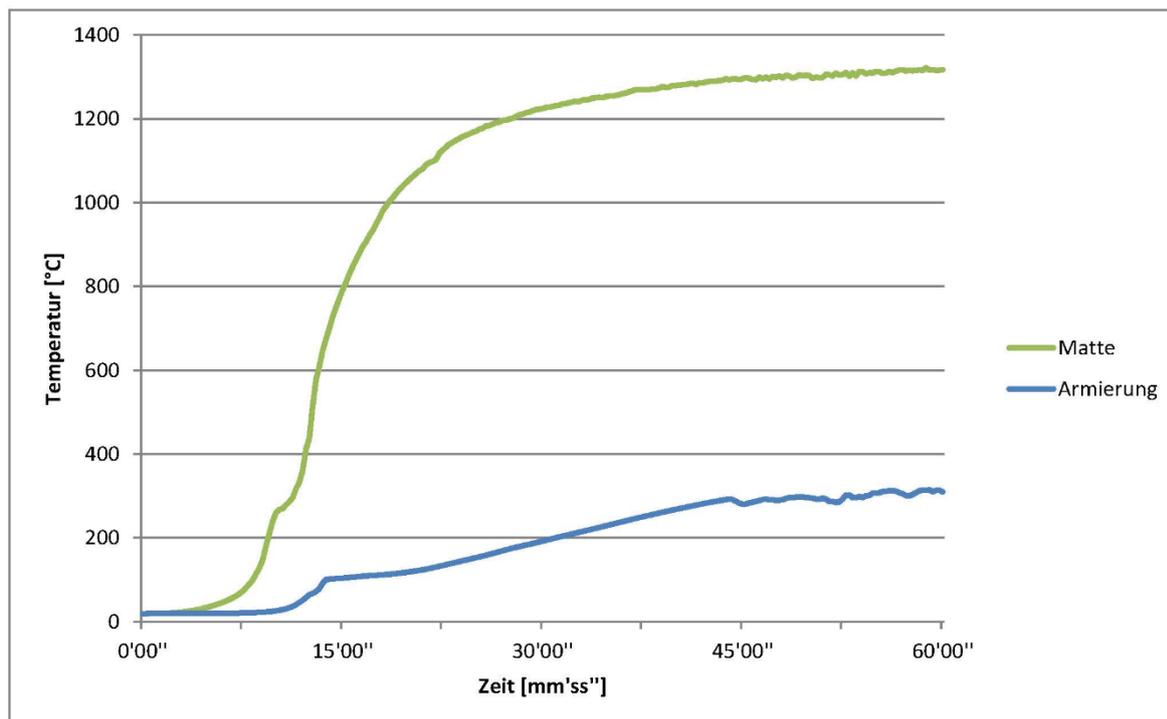
limitation des contraintes

Le graphique 16 montre l'évolution des températures dans la couche d'armature d'acier et de carbone en fonction du temps pour une courbe de feu utilisée dans les bâtiments.



Graphique 16: résultats des essais de résistance au feu ETK (Bâtiments) VSH/CH

Le graphique 17 montre l'évolution des températures dans la couche d'armature d'acier et de carbone en fonction du temps pour une courbe de feu utilisée dans les tunnels.



Graphique 17: résultats des essais de résistance au feu RWS (Tunnel) VSH/CH

Résultats :

Bâtiment

Après 120 minutes d'exposition au feu ETK sous charge de service, la température dans la couche d'armature ARMO-mesh était de 440 °C et de 250 °C dans la couche d'armature en acier. La température critique n'est pas atteinte, ni dans l'armature en carbone, ni dans l'armature en acier.

Tunnel

Après 60 minutes d'exposition au feu RWS sous charge de service, la température dans la couche d'armature ARMO-mesh était de 1300 °C et de 300 °C dans la couche d'armature en acier. La température critique n'est pas atteinte dans l'armature en acier. Le système S&P ARMO agit comme protection contre le feu de l'armature mais commence à se dégrader rapidement.

11.3 Analyse des essais de résistance au feu

Bâtiments

Le graphique 16 montre qu'un enrobage de 20mm du treillis ARMO-mesh garanti une résistance F120 de celui-ci. Dans ce cas, c'est l'enrobage de l'armature qui détermine la résistance au feu (Norme SIA 262, art. 4.3.10.5.1, tableau 15):

- Enrobage acier \geq 20mm : F60
- Enrobage acier \geq 30mm : F120

Tunnels

Dans les tests effectués avec un enrobage de 20mm du treillis ARMO-mesh (graphique 17) celui-ci a perdu rapidement de sa résistance. On ne peut donc pas compter sur le treillis carbone en cas de feu. Le système ARMO augmente la résistance au feu de l'armature existante en augmentant l'enrobage.

12. Contrôle de qualité S&P ARMO-mesh

Pour le contrôle qualité des armatures textiles, un essai de traction d'une bande (EN ISO 10319) est souvent utilisé. Cet essai n'est généralement pas approprié pour les matériaux fragiles comme les fibres de carbone. Le revêtement en poudre de silice amorphe des fibres de carbone met des granulats fins entre les mâchoires et les faisceaux de carbone. Par conséquent, les filaments à la surface des faisceaux sont chargés ponctuellement et le faisceau de carbone se rompt plus vite. Un contrôle de qualité des faisceaux S&P ARMO-mesh selon EN ISO 10319 n'est donc pas possible. Le contrôle de qualité de l'S&P ARMO-mesh est fait avec la corde de carbone revêtue. Une corde de carbone dans le sens longitudinal ou transversal est constituée de un ou deux faisceaux de carbone, ceci dépend de la production du treillis. Les cordes sont revêtues d'époxy ce qui garantit la transmission des efforts entre les filaments de carbone. La section d'ancrage doit être façonnée spécialement pour avoir une zone de pression continue (Image 36). Dans le rapport de test 461'199 [P29] de l'EMPA/CH, les forces de traction moyennes suivantes ont été trouvées :

Corde composé de 1 x 1600 tex	2759.1 N
Corde composé de 2 x 1600 tex	4937.8 N

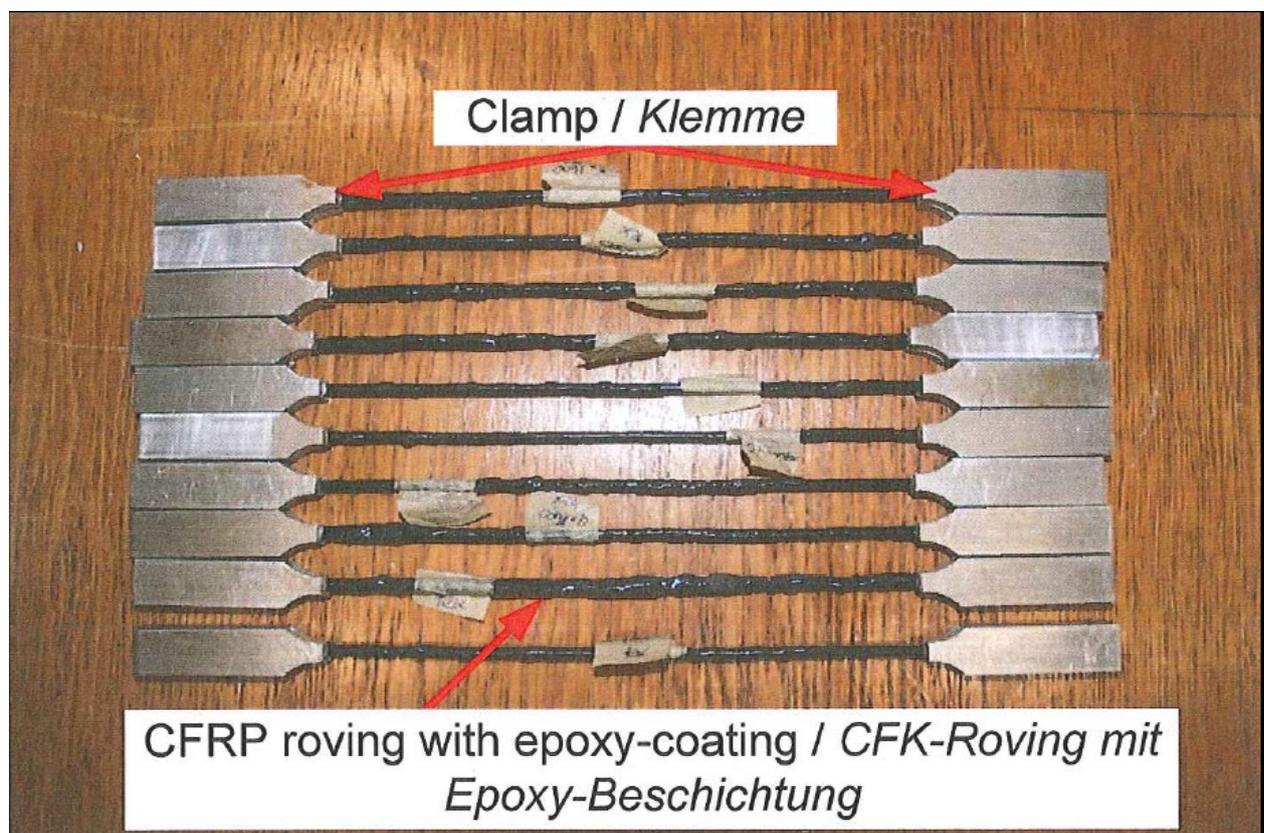


Image 36: Corde de S&P ARMO-mesh revêtue d'époxy avec mâchoires

Dans le tableau 15, les résultats des essais de traction menés à l'EMPA/CH sont comparés avec les caractéristiques théoriques de fibres S&P ARMO-mesh 500 :

S&P ARMO-mesh L500	Force de traction par corde (2 faisceaux/corde)	Force de traction par mètre (58.5 cordes/m)	Rapport %
Résistance à la traction théorique de la fibre en carbone	7179 N	420 kN/m (chapitre 3, tableau 2)	100 %
Force de traction au semi-produit revêtue d'époxy	4938 N	288.9 kN/m (58.5 x 4937.8 N)	68.8 %
Force de traction à température ambiante au produit fini avec poussière de silice EMPA/CH	2664 N (chapitre 11.1 Tabelle 14)	155.8 kN/m	37 %
Force de traction à 500 °C au produit fini avec poussière de silice EMPA/CH	1542 N (chapitre 11.1 Tabelle 14)	90.2 kN/m	21.5 %
Force de traction pour le dimensionnement (état-limite ultime à 800N/mm ²)	1435 N	84.0 kN/m	20 %
Force de traction pour l'aptitude au service (état-limite de service à 450N/mm ²)	807 N	47.3 kN/m	11.3 %

Tableau 15: comparaison force de traction ARMO-mesh

Précisons que dans l'utilisation du système S&P ARMO, l'introduction de force se fait sur toute la longueur de la fibre et il n'existe donc pas de problèmes dans la zone d'introduction des forces. En prenant en compte cet argument, il est clairement visible que le faisceau revêtue de poudre de silice amorphe a aussi une marge de sécurité suffisante à la rupture.

Le facteur de sécurité dans la situation d'incendie envers la charge de service est donc de 1.9 (21.5% / 11.3%)

13. Données techniques S&P ARMO-crete

13.1 S&P ARMO-crete d

Béton projeté de haute qualité pour le renforcement statique d'éléments de béton armé par voie sèche avec composant réactif

Variantes du produit

Granulométrie: 4 mm ⇒ S&P ARMO-crete d4
8 mm ⇒ S&P ARMO-crete d8

Additifs: Microsilica: ⇒ S&P ARMO-crete d4M Accélérateur de prise: ⇒ S&P ARMO-crete d4S
⇒ S&P ARMO-crete d8M ⇒ S&P ARMO-crete d8S

Ciment: Dans le produit standard du ciment de Portland est utilisé. Sur demande il est également possible d'utiliser du HS (ciment résistant aux sulfates)

Données techniques

Type	Béton projeté par voie sèche modifié
Livraison	Poudre (sac à 40 kg / silo)
Couleur	Gris
pH	12
Densité	~2.2 – 2.3 kg/dm ³
Granulométrie maximale	4 mm ou 8 mm
Température de travail	5 - 30 °C
Résistance à la compression	<u>Grain de 4mm:</u> Résistance à la compression après 7/28j: env. 35/45 N/mm ² avec accélérateur de prise (S) env. 30/35 N/mm ² avec Microsilica (M) env. 40/50 N/mm ² S et M env. 35/45 N/mm ² <u>Grain de 8 mm:</u> Résistance à la compression après 7/28j: env. 45/50 N/mm ² avec accélérateur de prise (S) env. 35/40 N/mm ² avec Microsilica (M) env. 50/55 N/mm ² S et M env. 40/45 N/mm ²
Résistance à la traction par flexion	après 28 j: > 6 N/mm ²
Adhésion sur béton(EN 1542)	après 28 j: > 1.5 N/mm ²
Adhésion ARMO-System (Mortier projeté/ARMO-mesh/Surface d'application)	après 28 j: > 1.0 N/mm ² (base de dimensionnement pour l'introduction de la force dans la surface d'application)
Module d'élasticité	env. 25-30'000 N/mm ²
Résistance au gel	haute (toutes les versions)
Résistance au gel avec sel de déverglaçage	haute (version M)
Adsorption d'iodes de chlorures	après 6 mois < 0.6 % de la masse de ciment (version M)
Tolérance aux cycles thermiques	R4 (version M)
Capacité de rétention capillaire (EN 13057)	< 0.50 kg*m ⁻² *h ^{-0.5} (R4) (version M)
Epaisseurs d'application possibles	granulométrie 4 mm: 1.2 – 4 cm (version s 1.2 – 6 cm) granulométrie 8 mm: 3 – 8 cm (version s 3 – 12 m)
Ajout d'eau	env. 10% de masse
Indication sur la consommation	Valeurs indicatives dépendent fortement de la rugosité du support (25 – 30 kg/cm épaisseur).
Classe de béton selon DIN	SpC35/45

Tableau 16: Données techniques S&P ARMO-crete d

13.2 S&P ARMO-crete w

Du mortier projeté de haute qualité pour le renforcement statique d'éléments de béton armé par voie humide avec composant réactif.

Données techniques

Type	Mortier projeté par voie humide modifié
Livraison	Poudre (sac à 25 kg ou silo)
Couleur	Gris
pH	12
Densité	~2.05 kg/dm ³
Granulométrie maximale	2.5 à 3.0 mm
Ajout d'eau	15 à 17% de Masse
Température de travail	5 - 30 °C
Résistance aux sulfates SIA 262/1	$\Delta I \leq 0.5 \text{ ‰}$
Temps de prise (20 °C)	30 min
Étanchéité à l'eau SN EN 12390-8	Profondeur de pénétration moyenne < 20 mm Profondeur de pénétration maximale < 50 mm
Absorption d'eau SN EN 1062-3	$w \leq 0.2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$
Résistance à la compression SN EN 12504-1	> 45 N/mm ²
Adhésion sur béton SN EN 1542	$\geq 1.5 \text{ N/mm}^2$
Module d'élasticité SIA 262/1-G	$\leq 40'000 \text{ N/mm}^2$
Retrait SIA 262/1-F	$\epsilon_{cs}(28) \leq 0.80 \text{ ‰}$
Résistance à l'usure SN EN 13892-3 d'après Böhme	Épaisseur moyenne perdue < 3 mm
Résistance aux acides SN EN ISO 175	$\leq 20 \text{ ‰}$
Épaisseurs possibles	5 - 50 mm
Essai de résistance au feu ETK (bâtiment)	120 min. (2 cm d'enrobage de l'ARMO-mesh avec ARMO-crete)

Tableau 17: Données techniques S&P ARMO-crete w

14. Ligne de produits du système S&P ARMO

S&P ARMO-mesh (renforcement statique)

Armature unidirectionnelle dans le sens principal

Type	Effort de traction à la rupture longitudinale (kN/m)	Longueur du rouleau (m)	Largeur du rouleau (m)
L600 (à partir de 2013)	628	50	1.95
L500	420	50	1.95
L200	211	50	1.95

Armature unidirectionnelle dans le sens perpendiculaire

Type	Effort de traction à la rupture transversale (kN/m)	Longueur du rouleau (m)	Largeur du rouleau (m)
C200	176	50	0.975

Armature bidirectionnelle

Type	Effort de traction à la rupture longitudinale et transversale (kN/m)	Longueur du rouleau (m)	Largeur du rouleau (m)
200/200	211 / 176	50	1.95

S&P ARMO-armature en fibres de verre (constructif)

Armature bidirectionnelle constructive

Type	Effort de traction à la rupture longitudinale et transversale (kN/m)	Longueur du rouleau (m)	Largeur du rouleau (m)
Armature en fibre de verre	25	100	2.20

S&P ARMO-crete

S&P ARMO-crete d *Béton projeté par voie sèche
Livraison par silos ou par sacs*

S&P ARMO-crete w *Béton projeté par voie humide
Livraison par sacs*

S&P ARMO-mur

Mortier de nivellement pour application intérieure et extérieure

S&P ARMO plaques d'ancrage en aluminium

Les ancrages terminaux doivent faire l'objet d'une demande spécifique.

Livraison sur demande

Systemes de fixations S&P pour l'ARMO-mesh

Agrafes S&P

Chevilles S&P

15. Publications / Rapports d'essais [P] / Normes [N]

Essais internes S&P

P11 Endverankerungen von S&P ARMO-mesh L500, Okt.-Dez. 2009, S&P Clever Reinforcement Company AG, CH

Essais de traction / ancrage EIA Fribourg/CH

P23 Power Point Präsentation Prof. René Suter, FH Fribourg/CH

Essais de flexion de sur dalles VSH/CH

P10 Prüfberichte Nr. 20100468A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung, endverankert) Plattenbiegeversuch, 9.4.2010, VSH/CH

P19 Prüfbericht Nr. 20101027 S&P ARMO-mesh 200/200 Plattenbiegeversuch, 7.5.2010, VSH/CH

P20 Prüfbericht Nr. 20093882A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung) Plattenbiegeversuch, 9.4.2010, VSH/CH

Essais de résistance au VSH/CH et à l'EMPA/CH

P22 Prüfberichte Nr. 20120012 / Nr. 20120021 Brandprüfung S&P ARMO-System, VSH/ CH

P24 Test Report No. 460'742 / 460'794 Hitzebelastung S&P ARMO-mesh, EMPA/CH

Essais de traction avec de faisceaux CFK avec revêtement d'époxyde EMPA/CH

P29 Prüfbericht Nr. 461'199

Renforcement à la flexion de dalles étroites avec des treillis en carbone FH Fribourg/CH

P15 Renforcement de dalles en béton au moyen de treillis en fibres de carbone (Projet de recherche AGP 14'105)

Pub.10 Biegezugverstärkung schlanker Stahlbetonplatten mit Carbongittern Prof. Dr. Daia Zwicky, FH Fribourg/CH

Renforcement sismiques pour murs en maçonnerie à l'EIA Fribourg/CH

P16 Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-A, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, janvier 2010, FH Fribourg, CH

P17 Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-B, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, septembre 2010, FH Fribourg, CH

P18 Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-C, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, septembre 2010, FH Fribourg, CH

P21 Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MT-A, Essais de traction de murs renforcés en maçonnerie

N1 SIA 262 (2003). Construction en béton. Norme de la société suisse d'ingénieurs et d'architectes (SIA), Zürich, janvier 2003, 90 p.

N2 SIA 162 (1989/93). Betonbauten. Norme 1989 et révision partielle 1993, la société suisse d'ingénieurs et d'architectes (SIA), Zürich, juin 1993, 86 p.

N3 SIA 260 (2003). Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Norme de la société suisse d'ingénieurs et d'architectes (SIA), Zürich, janvier 2003, 44 p.

N4 ASTM E119-12

Exemples de dimensionnement

Exemple 1 : assainissement d'une dalle de garage avec le système S&P ARMO

Données de base

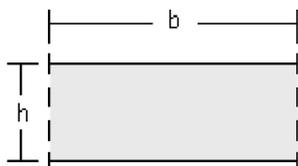
Epaisseur de la dalle : 28 cm
Qualité du béton : C 25/30
Acier S500 : 6.20 cm²/m¹

Efforts en section déterminé avec „CEDRUS“ :

M_{Ek0} = 48.4 kNm (Moment caractéristique au moment de la mise en place du renfort)
 M_{Edf} = 84.6 kNm (Moment de dimensionnement ELU)
 M_{Ekf} = 60.8 kNm (Moment de service ELS)
 M_{Edc} = 56.5 kNm (Moment cas accidentel)
Effort de cisaillement : 45 kN

S&P ARMO-flexion

renforcement à la flexion à l'aide de S&P ARMO-system



section

structure intérieure

géométrie

dalle

$$b = 100 \quad [\text{cm}]$$

$$h = 28 \quad [\text{cm}]$$

béton

classe: C 20/25

$$f_{ck} = 20 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\varepsilon_{cu} = 3.5 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_{c2} = 2 \quad [\%]$$

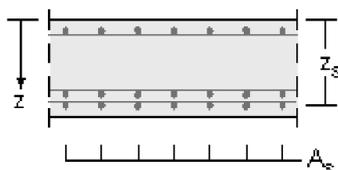
$$\alpha_{cc} = 1 \quad [-]$$

$$E_{cm} = 29962 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$f_{ctm} = 2.21 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\alpha_{ct} = 1 \quad [-]$$

$$\gamma_c = 1.5 \quad [-]$$



acier

$$\gamma_s = 1.15 \quad [-]$$

$$\kappa_s = 0.7 \quad [-]$$

armature

armature principale

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]	type d'acier	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]	ε_{su} [‰]
1	6.2	26	S 500	460	200000	20

sollicitations

<u>état non-renforcé</u>	moment en travée	force de compression
au moment de l'exécution du renfort	$M_{Ek0} = 48.4$ [kNm]	$N_{Ek0} = 0$ [kN]
précontrainte (isostatique)	$M_{p0} = 0$ [kNm]	$N_p = 0$ [kN]
zone tendue déjà fissuré		

<u>état renforcé</u>	moment en travée	force de compression
état limite ultime	$M_{Edf} = 84.6$ [kNm]	$N_{Edf} = 0$ [kN]
état de service	$M_{Ekf} = 60.8$ [kNm]	$N_{Ekf} = 0$ [kN]
coefficients de sécurité partiel	$\gamma_{M,m} = 1.39$ [-]	$\gamma_{N,m} = 0$ [-]
situation de projet exceptionnelle	$M_{Ede} = 0$ [kNm]	

renfort à la flexion

ARMO-system

S&P ARMO-mesh L500

S&P ARMO-crete d

$$E_{fk} = 240000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{fk} = 4300 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\varepsilon_{fuk} = 17.5 \text{ [‰]}$$

$$\gamma_f = 1.3 \text{ [-]}$$

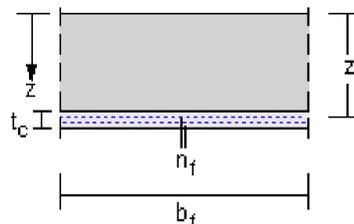
$$\eta_f = 0.8 \text{ [-]}$$

$$\gamma_E = 1.5 \text{ [-]}$$

$$\kappa_f = 0.9 \text{ [-]}$$

$$\varepsilon_{fud} = 10.769 \text{ [‰]}$$

$$\varepsilon_{f,lim,d} = 5 \text{ [‰]}$$



ARMO-mesh

N°	t_f [mm]	b_f [mm]	n_f [pce]	A_f [cm ²]	z_f [cm]
1	0.117	1000	1	1.17	28.5

ARMO-crete

t_c [cm]
1

proj.-no.:
pos.-no.:

projet: ARMO - flexion
position: garage souterrain

page _____
feuille 3

analyse

Eurocode 2

en référence au guide de conception FRP (armature collée)
SIA 166: 2004

état non-renforcé

résistance de la section non-renforcée:

$M_{Rd0} = 62$ [kNm]
 $M_{Re0} = 71.3$ [kNm]

état renforcé

degré de renforcement: $\eta_M = 1.37$ [-]

sécurité en cas de perte
du renfort: $\gamma_{Me} = 0$ [-]

dimensionnement

$A_{f,min} = 1.15$ [cm ²]	$M_{Edf} = 84.6$ [kNm]	$F_{f,Rd} = 93.6$ [kN]
$A_{f,eff} = 1.17$ [cm ²]	$M_{Rdf} = 84.9$ [kNm]	$F_{f,d} = 93.6$ [kN]

vérification

$M_{Rdf} > M_{Edf}$ ✓

$F_{f,d} \leq F_{f,Rd}$ ✓

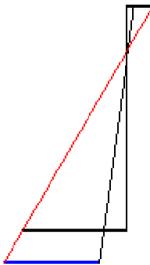
déformations initiaux



$$\begin{aligned}\epsilon_c &= -0.351 \quad [‰] \\ x &= 6.12 \quad [\text{cm}]\end{aligned}$$

$$\epsilon_s = 1.142 \quad [‰]$$

déformations - état limite ultime ($A_{f,min}$)



$$\begin{aligned}\epsilon_c &= -1.265 \quad [‰] \\ x &= 5.11 \quad [\text{cm}]\end{aligned}$$

$$\epsilon_s = 5.167 \quad [‰]$$

$$\epsilon_f = 4.5 \quad [‰]$$

déformations / contraintes - état limite de service ($A_{f,eff}$)



$$\begin{aligned}\epsilon_c &= -0.44 \quad [‰] \\ x &= 6.22 \quad [\text{cm}]\end{aligned}$$

$$\epsilon_s = 1.399 \quad [‰]$$

$$\epsilon_f = 0.291 \quad [‰]$$

$$\epsilon_{sy} = 2.3 \quad [‰]$$



contraintes

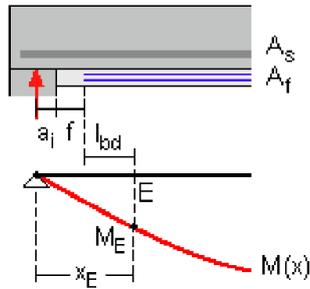
béton	$\sigma_{c,max} = -7.84$	[N/mm ²]
acier à béton	$\sigma_{s,max} = 279.88$	[N/mm ²]
fibres de carbone	$\sigma_{f,max} = 69.79$	[N/mm ²]

limitation des contraintes

$\sigma_{c,limite} = -12$	[N/mm ²]
$\sigma_{s,limite} = 368$	[N/mm ²]



ancrage d'extrémité du ARMO-system sur la gauche



géométrie de l'appui

$a_i = 10$ [cm]
élément sans renfort d'étriers

$\gamma_b = 1.5$ [-]

efforts internes au point E

$x_E = 0.95$ [m]
 $M_{Edf,E} = 61.9$ [kNm]
 $V_{Edf,E} = 0$ [kN]
 $N_{Edf,E} = 0$ [kN]

armature interne au point E

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	6.2	26

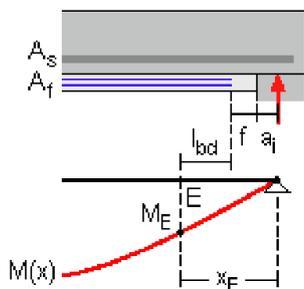
N°	force du carbone		résistance maximale de l'ancrage		longueur d'ancrage requise	
	$F_{b,d}''$ [kN]	$F_{b0,Rd}$ [kN]	l_{b0d} [cm]	$F_{b,Rd}$ [kN]	l_{bd} [cm]	f_{max} [cm]
1	30.85	93.6	39.33	30.85	12.96	72.04

vérification

$F_{b,d}'' < F_{b0,Rd}$
anchorage check ok



ancrage d'extrémité du ARMO-system sur la droite



géométrie de l'appui

$a_i = 10$ [cm]
élément sans renfort d'étriers

$\gamma_b = 1.5$ [-]

efforts internes au point E

$x_E = 0.95$ [m]
 $M_{Edf,E} = 61.9$ [kNm]
 $V_{Edf,E} = 0$ [kN]
 $N_{Edf,E} = 0$ [kN]

armature interne au point E

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	6.2	26

N°	<u>force du carbone</u>		<u>résistance maximale de l'ancrage</u>		<u>longueur d'ancrage requise</u>	
	$F_{b,d}''$ [kN]	$F_{b0,Rd}$ [kN]	l_{b0d} [cm]	$F_{b,Rd}$ [kN]	l_{bd} [cm]	f_{max} [cm]
1	30.85	93.6	39.33	30.85	12.96	72.04

vérification

$F_{b,d}'' < F_{b0,Rd}$
anchorage check ok



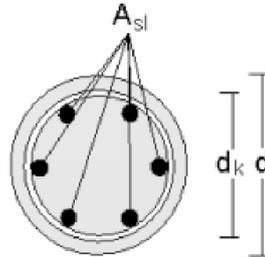
Exemple 2 : renforcement de colonne

Colonne existante circulaire d'un diamètre de 30 cm, qui doit être renforcée pour une nouvelle charge axiale de 1470 kN.

Qualité de béton : C 20/25
Qualité d'acier : S500
Aciers longitudinaux : 4 Ø 12 mm
Etriers : Ø 6 mm, a = 25 cm

ARMO-axial renforcement de colonnes avec S&P ARMO-system

section transversale



géométrie

$d = 30$ [cm]
 $d_k = 26$ [cm]

armature longitudinale

$A_{sl} = 4.52$ [cm²]
 $\varnothing_{sl} = 12$ [mm]

armature d'étriers

$\varnothing_t = 6$ [cm]
 $s_t = 25$ [cm]

matériaux

béton C 20/25

acier S 500

acier S 500

$f_{ck} = 20$ [N/mm²]
 $\varepsilon_{c0} = 2$ [‰]

$f_{yk} = 460$ [N/mm²]
 $\varepsilon_s = \varepsilon_c$
 $E_s = 200000$ [N/mm²]

$f_{yk} = 460$ [N/mm²]
 $\varepsilon_{su} = 20$ [‰]

$\alpha_{cc} = 1$ [-]
 $\gamma_c = 1.5$ [-]

$\gamma_s = 1.15$ [-]

renforcement

ARMO-system

S&P ARMO-mesh L500

résistance tri-axiale du béton

$E_{fk} = 240000$ [N/mm²]
 $\varepsilon_{fu} = 17.5$ [‰]
 $f_{fk} = 4300$ [N/mm²]
 $t_f = 0.117$ [mm]

$\gamma_E = 1.5$ [-]
 $\varepsilon_{f,lim} = 4$ [‰]

$\gamma_{cc} = 1.5$ [-]
 $\varepsilon_{c,lim} = 10$ [‰]
 $\nu = 0.5$ [-]

charge

force de compression de calcul $N_{Edf} = 1470$ [kN]

