



A Simpson Strong-Tie® Company

S&P ARMO-System Bemessungsgrundlagen FRCM

Fiber Reinforced Cementitious Matrix

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Vergleich FRP / FRCM Systeme	4
3.	Verankerung und Überlappung von <i>S&P ARMO-mesh</i>	6
3.1	Versuche S&P In-house	6
3.2	Versuche FH Fribourg/CH	7
4.	S&P Verankerungselement Alu	8
5.	Biegezugverstärkung mit S&P FRCM System FH Fribourg/CH	10
5.1	Ergebnisse der Belastungsversuche FH Fribourg/CH	12
5.1.1	Tragverhalten im Gebrauchszustand	12
5.1.2	Tragverhalten im Bruchzustand	15
6.	<i>S&P ARMO-flexion</i> Software für Biegezugverstärkung	18
7.	<i>S&P ARMO-axial</i> Software für Axialverstärkung	19
8.	Anwendungen FRCM im Tunnel- und allgemeinen Tiefbau	19
9.	Seismische Verstärkung von Mauerwerk Vergleich FRP / FRCM	23
9.1	Verstärkung mit FRP Systemen	23
9.2	Verstärkung mit S&P FRCM System	24
10.	Brandversuche mit S&P FRCM System EMPA Dübendorf/CH und Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH	26
10.1	Versuche an der EMPA Dübendorf/CH	26
10.2	Brandversuche im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH	29
10.3	Beurteilung der Brandversuche	33
11.	Qualitätskontrolle <i>S&P ARMO-mesh</i>	34
12.	Publikationen/Prüfberichte [P] sowie Normhinweise [N]	36

1. Einleitung

Zur Verstärkung von Stahlbetonbauwerken im Hoch-, Tief-, Stollen- und Tunnelbau stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung:

- Nachträglicher Einbau von Betonstützen oder Träger
- Nachträglicher Einbau von Stahlträger
- Einspritzen oder Anbetonieren von Zusatzbewehrungen aus Stahl
- Klebebewehrung aus Stahl oder FRP (Fibre Reinforced Polymer)
- usw.

S&P ist ein weltweit führender Entwickler, Hersteller und Vertreiber von FRP-Verstärkungen. Die S&P FRP Systeme werden als Gelege, Gewebe oder vorgefertigte Lamine mit systemgeprüften Klebstoffen auf bestehende Bauteile geklebt. Für Klebebewehrungen aus FRP Faserverbundwerkstoffen bestehen verschiedene Landesnormen und Bemessungsrichtlinien:

- SIA 166 Norm für Klebebewehrung (CH)
- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-68/70 (Deutschland)
- Richtlinien für FRP Verstärkungen:
 - ACI 440 (USA)
 - TR 55 (UK)
 - CUR 91 (NL)
 - CNR-DT 200/2004 (IT)
 - usw.

Zusätzlich liegen in weiteren Ländern wie Frankreich oder Korea bauaufsichtliche Zulassungen für S&P FRP Verstärkungssystem vor. FRP Verstärkungssysteme entsprechen weltweit dem Stand der Technik und haben sich als wirtschaftliche und dauerhafte Bauweise zur nachträglichen Verstärkung in den letzten 20 Jahren etabliert.

Während im Stahlbeton die Spannung des Stahls festgelegt wird, wird bei FRP im Allgemeinen eine Dehnlime „Grenzdehnung“ festgelegt. Die zulässige Grenzdehnung ist von der Beanspruchung (Biegezug, Schub- oder Axialverstärkung) und dem FRP System abhängig.

Die Grenzdehnungen werden in gültigen FRP Normen, Richtlinien, respektive Landeszulassungen je nach Sicherheitskonzept unterschiedlich festgelegt. Folgende Grenzdehnungen (Bemessungsniveau) werden derzeit in Normen und Richtlinien angewendet:

Erhöhung der Steifigkeit mit C-FRP (Carbon-Verstärkungen)

Biegezugverstärkung

CFK Lamelle (oberflächig geklebt)	~ 0.6 – 0.8 %
Carbon Gelege (oberflächig geklebt)	~ 0.8 – 1.0 %
CFK Lamellen (in Schlitze verklebt)	~ 0.8 – 1.0 %
CFK Lamellen (extern vorgespannt bei 6 ‰)	~ 1.0 – 1.2 %

Drucksäulenverstärkung

Umschnürung mit Carbon FRP (C-FRP)	~ 0.4 %
------------------------------------	---------

Schubverstärkung

Umschnürung mit Carbon FRP (C-FRP)	~ 0.2 – 0.4 %
------------------------------------	---------------

Erhöhung der Duktilität mit G- / A-FRP (Glas / Aramid-Verstärkungen)

Umschnürung mit Glas FRP (G-FRP)	3 – 4 %
Umschnürung mit Aramid FRP (A-FRP)	2 – 3 %

S&P hat ein neues FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) Verstärkungssystem *S&P ARMO-System* entwickelt und im Jahr 2009/10 zum Patent angemeldet. Die Bemessung für das FRCM Verstärkungssystem wird durch S&P in Anlehnung an gültige FRP Bemessungskonzepte vorgeschlagen. Im *S&P ARMO-System* werden Carbonfasern in Form von Gittern auf der Baustelle abgerollt und in einen reaktiven mineralischen Spritzmörtel verlegt. Für FRCM Systeme existieren in den USA seit Oktober 2011 erste Richtlinien (AC 434). Dank der Beschichtung des *S&P ARMO-mesh* mit amorphem Silica und der Vergütung des Spritzmörtels mit einer Reaktiv-Komponente wächst Calcium-Silikat-Hydrat aus dem Spritzmörtel zwischen die Carbonfilamente der S&P Bewehrung (Bild 1 / 2). Dies führt zu einer intensiven Verkrallung und Verankerung des *S&P ARMO-mesh* im Spritzmörtel.

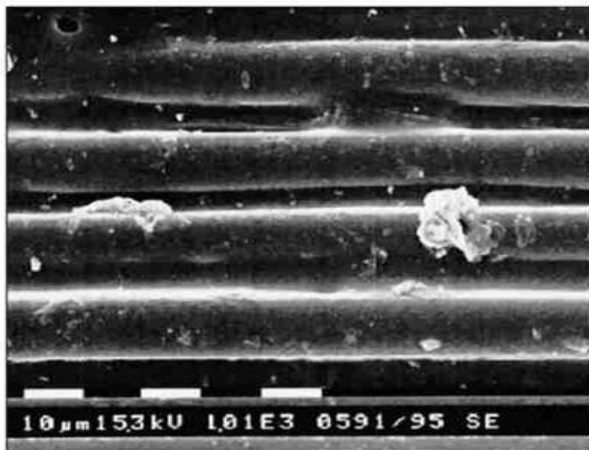


Bild 1: S&P ARMO-mesh im traditionellen Spritzmörtel

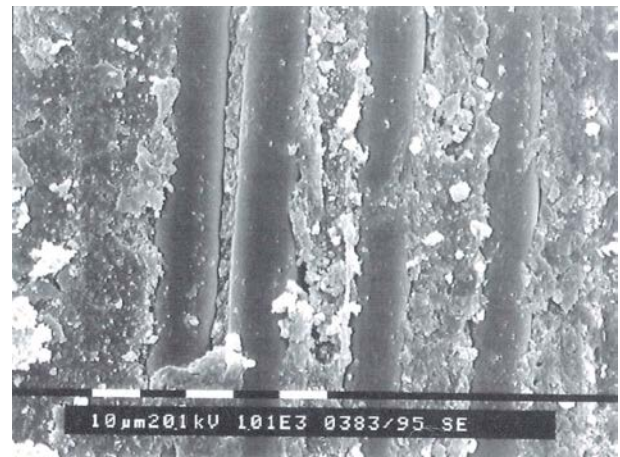


Bild 2: S&P ARMO-mesh in ARMO-crete

Unterschiedliche Spritzmörtel mit Reaktiv-Komponente werden durch S&P für verschiedene Applikationen angeboten:

- *S&P ARMO-crete d* Trockenspritzmörtel (unterschiedliche Körnung, Zusätze und Zement)
- *S&P ARMO-crete w* Nassspritzmörtel
- *S&P ARMO-mur* Verputzmörtel für Mauerwerk (historische Bauten)

Die Beschichtung des *S&P ARMO-mesh* ist zusätzlich vergütet. Die Vergütung bewirkt eine Sauerstoffsperre bei hohen Temperaturen. Die C-Faserbündel sind somit gegen Oxidation im Brandfall geschützt.

2. Vergleich FRP / FRCM Systeme

FRP Verstärkungen werden mit Epoxidharz-Klebstoff auf Traggrund aus Beton, Holz oder andere schubfest verklebt. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) von Epoxidharzklebstoffen ist ca. viermal geringer als der E-Modul von Beton. Entsprechend wird die Dicke des Klebstoffes beim Verkleben von CFK Lamellen auf 3 - 5 mm limitiert. Bei einer dickeren Klebstoffschicht ist die Krafteinleitung aus der CFK Lamelle in den Betontraggrund nicht mehr gewährleistet. Beim Verkleben von FRP Systemen ist entsprechend die Unebenheit des Traggrundes vor der Klebearbeit mit einem systemgeprüften Mörtel zu reprofiliert. Üblicherweise werden

Reprofiliermörtel auf Epoxyharzbasis verwendet. Beim S&P FRCM System hingegen ist die Matrix *S&P ARMO-Spritzmörtel* auf den Traggrund Beton optimal abgestimmt. Der E-Modul des mineralischen Spritzmörtels liegt im Bereich des Betons. Der mineralische Spritzmörtel weist einen hohen pH-Wert auf und ist wasserdampffest. In einem Arbeitsgang wird gleichzeitig reprofiliert und die Carbonbewehrung eingespritzt.

Beim S&P FRCM System kann auf eine vorgängige Reprofilierung verzichtet werden. Die Reprofilierung und die Erstellung der Spritzmörtelschicht erfolgt je nach Spritzverfahren in einem Arbeitsgang.

Damit die Ebenheit des *S&P ARMO-mesh* gewährleistet ist, sind die S&P Verlegehinweise zu beachten. Die erste Spritzmörtellage egalisiert Unebenheiten damit die Carbonbewehrung eingearbeitet werden kann. Zur Befestigung des *S&P ARMO-mesh* stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung:

- Wird der Nassspritzmörtel *S&P ARMO-crete w* oder der Verputzmörtel *S&P ARMO-mur* verwendet, kann das *S&P ARMO-mesh* in die erste ausgeglichene Mörtelschicht ohne zusätzliche Befestigungsmassnahme eingearbeitet werden.
- Wird der Trockenspritzmörtel *S&P ARMO-crete d* verwendet, sind drei Befestigungssysteme möglich:
 - provisorische Fixierung des *S&P ARMO-mesh* und einspritzen mit *S&P ARMO-crete d*
 - S&P Haftklammern (zur Fixierung im leicht erhärteten Spritzmörtel)
 - S&P Dübel (zur Fixierung im ausgehärteten Traggrund)

In Tabelle 1 werden FRP und FRCM Systeme verglichen:

	FRP System Carbon in Epoxy Matrix	S&P FRCM System Carbon in mineralischer Matrix
Feuchtigkeit Traggrund	< 4% Restfeuchtigkeit	erdfeuchter Traggrund
Untergrund Vorbehandlung	leicht aufrauen (Schleifen oder Sandstrahlen)	stark aufrauen (3 bis 5 mm) (Sandstrahlen oder hydromechanisch bearbeiten)
Reprofilierarbeit	grosser Aufwand für Ausgleichen / Reprofilieren	kein Zusatzaufwand
Applikation	leicht / handlich	grosser Aufwand für Installation (putzen, abdecken)
Bauphysik	zusätzliche Abklärungen sind nötig FRP wirkt als lokale Dampfsperre	zusätzliche Abklärungen nicht nötig <i>S&P ARMO-System</i> ist mineralisch und dampfdurchlässig
Korrosionsschutz Innenbewehrung	aufwendige zusätzliche Massnahmen sind nötig – Korrosionsschutz Stahleinlage – Imprägnierung oder Dünnbeschichtung zwischen FRP Verstärkungen	pH-Wert 12 im <i>S&P ARMO-System</i> Keine zusätzlichen Massnahmen sind nötig. Das <i>S&P ARMO-System</i> bietet Alkalischutz für Innenbewehrung.
Brandschutz	Nachweis der Restsicherheit im Brandfall und allenfalls Brandschutzmassnahmen.	normalerweise ist bei 2 cm Überdeckung des <i>S&P ARMO-mesh</i> R 120 im Hochbau gewährleistet

Tabelle 1: Vergleich FRP und FRCM Verstärkungssystem

3. Verankerung und Überlappung von S&P ARMO-mesh

Damit im Stahlbeton die Kraftübertragung vom Stahl in den Beton gewährleistet ist, wird gerippter Bewehrungsstahl verwendet. Für den gerippten Bewehrungsstahl beträgt die Verankerungslänge im Zugbereich 40 - 60 x Durchmesser.

Die Zugfestigkeit der Carbonfaser ist sieben- bis achtmal höher als jene des Baustahls. Die Carbonfaserrovings weisen zudem eine glatte Oberflächenstruktur auf. Das S&P ARMO-mesh ist nicht wie Stahlgittereinlagen an den Knotenpunkten verschweisst. Um die Verankerung des S&P ARMO-mesh im Spritzmörtel zu verbessern, wurde durch S&P eine spezielle Beschichtung der Gitteroberfläche entwickelt. Die Beschichtung aus einem wässrigen Polymer ist mit amorphem Silica vergütet. Die Reaktivkomponente befindet sich im Spritzmörtel S&P ARMO-crete resp. S&P ARMO-mur. Die benötigte Verankerungslänge des S&P ARMO-mesh L500 wurde mit Ausreissversuchen am Doppelbetonkörper bei S&P In-house [P11] sowie extern bei der FH Fribourg nachgewiesen [P23]. Die Bilder 3 / 4 / 5 zeigen den Versuchsaufbau der In-house Versuche.

3.1 Versuche S&P In-house



Bild 3: Doppelbetonkörper vor Versuch



Bild 4: Applikation von Spritzmörtel und S&P ARMO-mesh L500

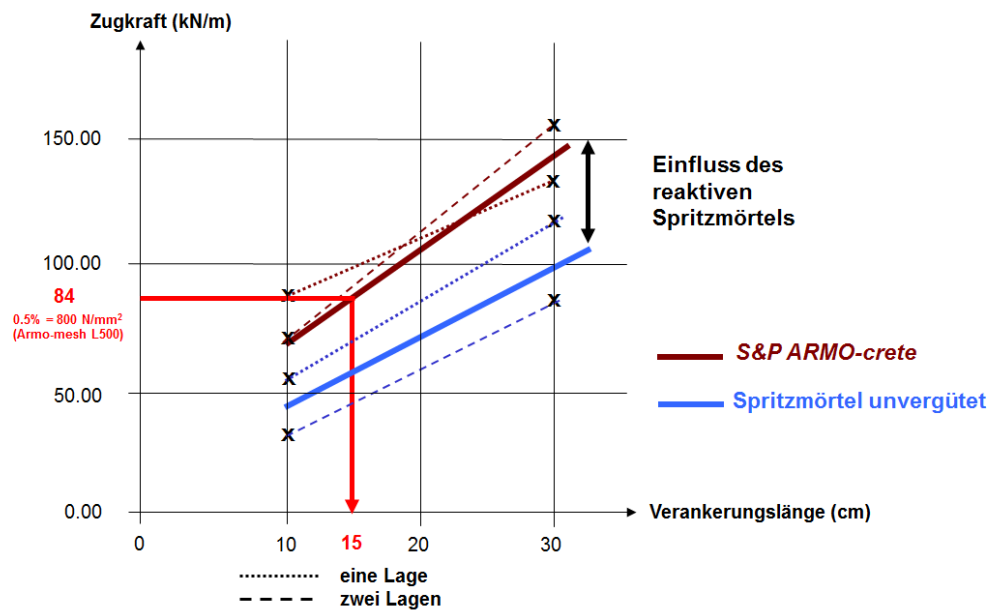


Bild 5: Versuchskörper nach Versuch

Im Versuch an total 12 Versuchskörpern wurden folgende Parameter variiert:

- Verankerungslänge (10 oder 30 cm)
- Spritzmörtel traditionell (ohne Reaktivkomponente)
- Spritzmörtel S&P ARMO-crete w (mit Reaktivkomponente)
- Einspritzen von einer respektive zwei Lagen S&P ARMO-mesh L500

Grafik 1 zeigt die Resultate der Ausreissversuche. Das S&P ARMO-mesh L500 wurde immer aus dem Probekörper gezogen.



Grafik 1: Resultate Ausreissversuche

Der Einfluss der Reaktivkomponente ist in Grafik 1 klar ersichtlich. Wird S&P ARMO-mesh L500 bei der Biegezugbelastung im Bemessungszustand bei 5 ‰ Grenzdehnung eingesetzt, muss die Kraft von 84 kN/m verankert werden (Tabelle 2). Dies entspricht der Zugspannung von ca. 800 N/mm² im S&P ARMO-mesh L500.

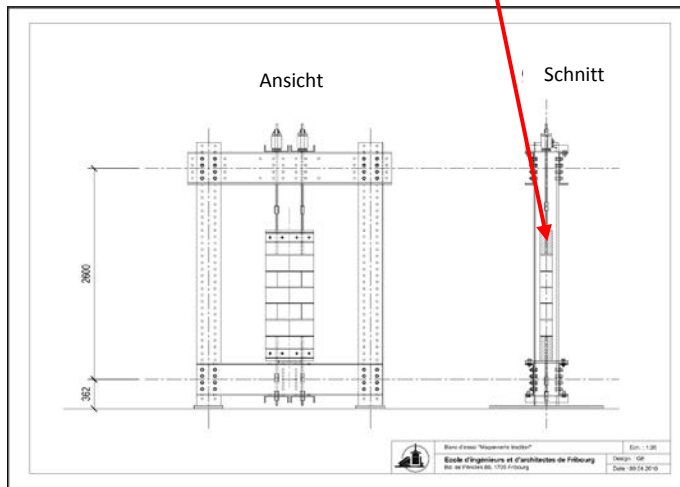
Die Reaktivkomponente im Spritzmörtel reduziert die Verankerungslänge um ca. 30 %.

Die S&P In-house Versuche wurden durch die FH Fribourg/CH verifiziert.

3.2 Versuche FH Fribourg/CH

Das S&P ARMO-System wurde auf einem Mauerwerk appliziert und oben sowie unten auf einer Betonoberfläche von 30 cm Länge verankert. Das S&P ARMO-mesh wurde im Zugversuch aus der Verankerung gezogen. Die Spannung im S&P ARMO-mesh beim Ausreissversuch wird in Grafik 2/Bild 6 sowie Tabelle 2 aufgezeigt.

Ankerlänge auf Beton L = 30 cm



Grafik 2 / Bild 6: Versuchsanordnung FH Fribourg/CH

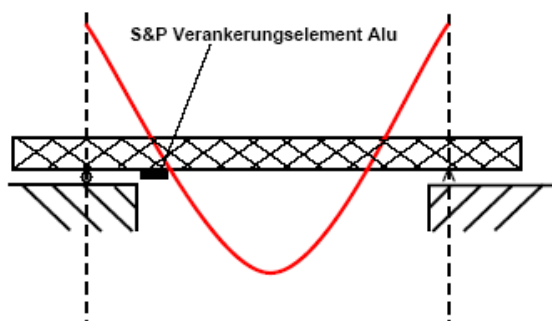
	L200	L500
Spannung im S&P ARMO-mesh (Ausreissversuch)	1304 N/mm ²	943 N/mm ²
Bemessungsspannung im S&P ARMO-mesh (S&P Empfehlung gemäss technisches Datenblatt)	~ 800 N/mm ² (Biegezug) ~ 650 N/mm ² (Axial)	

Tabelle 2: Resultate FH Fribourg/CH

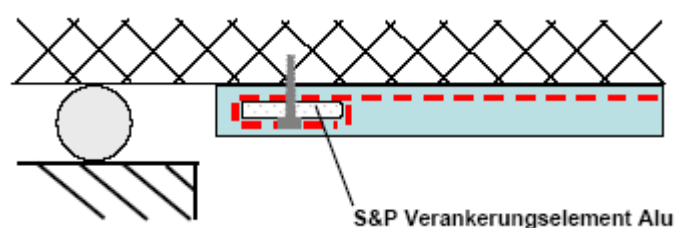
Die minimale Verankerungslänge im Bemessungszustand für das S&P ARMO-mesh L500 soll 300 mm nicht unterschreiten.

4. S&P Verankerungselement Alu

Bei der Biegezugverstärkung mit dem S&P ARMO-mesh kann der Fall eintreten, dass die Verankerung der Bewehrung beispielsweise hinter dem Momenten-Nullpunkt nicht möglich ist (Grafik 3).



Grafik 3: Verankerung hinter Momenten-Nullpunkt

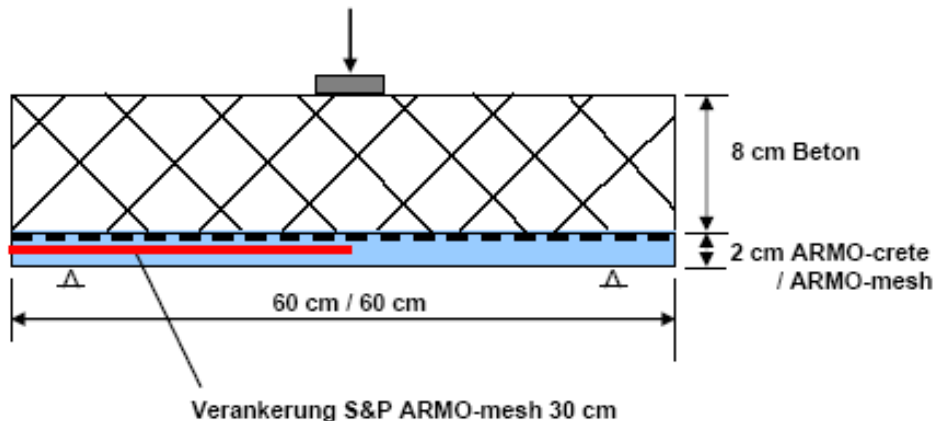


Grafik 4: S&P Verankerungselement Alu

Unter diesen Umständen wird die verbleibende Kraft im S&P ARMO-mesh hinter dem Momenten-Nullpunkt durch das S&P Verankerungselement aus Aluminium (Grafik 4) eingeleitet.

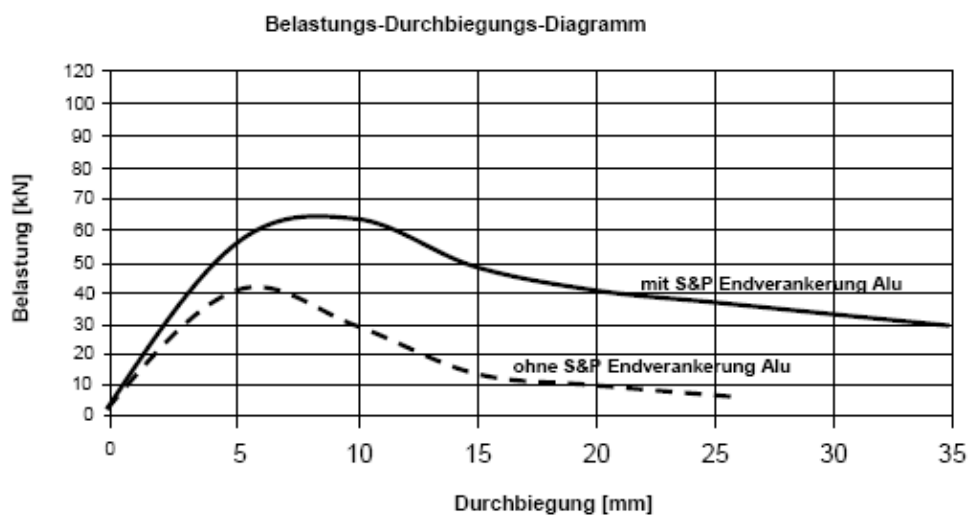
Die Krafteinleitung in den Traggrund erfolgt primär über die Stirnseite des Verankerungselements (Anschlussfuge Spritzmörtel/Traggrund). Der Dübel des S&P Verankerungselements Alu wird für den notwendigen Anpressdruck bemessen, damit das Verankerungselement im Mörtel fixiert werden kann.

Mit Plattenbiegeversuchen im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH [P 10 / P 20] wurde die Wirkung des S&P Verankerungselements Alu nachgewiesen. Grafik 5 zeigt den Versuchsaufbau mit einer Spannweite von 60 cm und beidseitigen Verankerungslängen von 30 cm (Grafik 5).

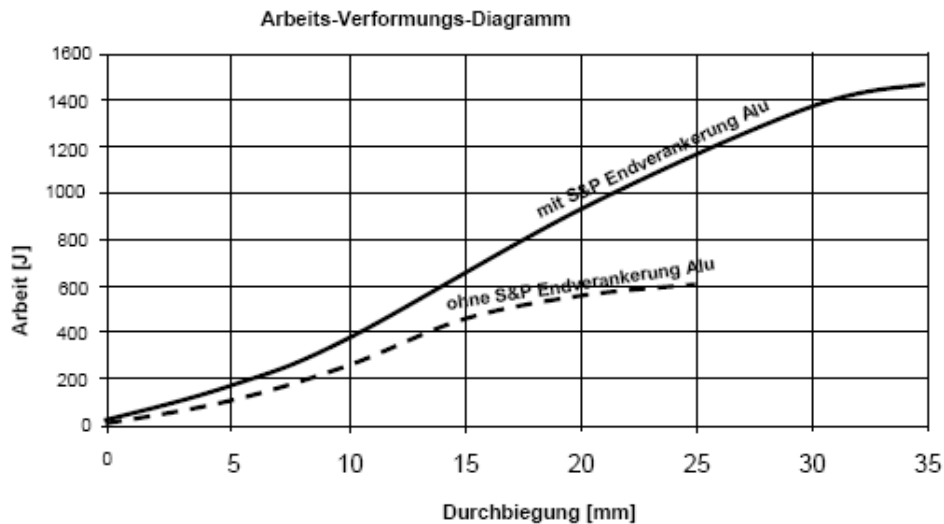


Grafik 5: Versuchsaufbau Plattenbiegeversuch VSH

Im VSH wurden drei Versuche mit S&P ARMO-mesh L500 (mit und ohne) Endverankerung durchgeführt. Für den Versuch wurde der Spritzmörtel S&P ARMO-crete d (4 mm Korn) eingesetzt. Grafiken 6 und 7 zeigen die Versuchsergebnisse des VSH (Mittelwert aus je drei Prüfkörpern).



Grafik 6: Belastungs-Durchbiegungs-Diagramm verankerte und unverankerte Prüfkörper



Grafik 7: Arbeits-Verformungs-Diagramm verankerte und unverankerte Prüfkörper

Resultate: **626 J** Arbeitsvermögen **ohne** S&P Verankerungselement Alu

1139 J (+ 82%) Arbeitsvermögen **mit** S&P Verankerungselement Alu

Beim Plattenbiegeversuch (*Bilder 7/8*) ohne Verankerung des *S&P ARMO-mesh* wurden die Carbonrovinge in den Prüfkörper hineingezogen. Dank dem S&P Verankerungselement Alu war dies nicht mehr der Fall. Der Bruch erfolgte durch Delamination des Spritzmörtels. Das Arbeitsvermögen (J) konnte dank des Verankerungselements um 82 % gesteigert werden.



Bild 7: Versuchsaufbau VSH



Bild 8: Prüfling VSH im Bruchzustand

5. Biegezugverstärkung mit S&P FRCM System FH Fribourg/CH

Die statische Bemessung für das *S&P ARMO-System* wird in Anlehnung an gültige FRP Bemessungsrichtlinien, Normen resp. bauaufsichtliche Zulassungen ausgeführt. An der FH Fribourg/CH wurden Grundlagenversuche [P 15 / Pub.10] mit dem *S&P ARMO-System* in Anlehnung an bestehende Versuchsreihen mit S&P FRP Systemen getätigt.

Bild 9 sowie Grafik 8 zeigen den Versuchsaufbau an der FH Fribourg/CH

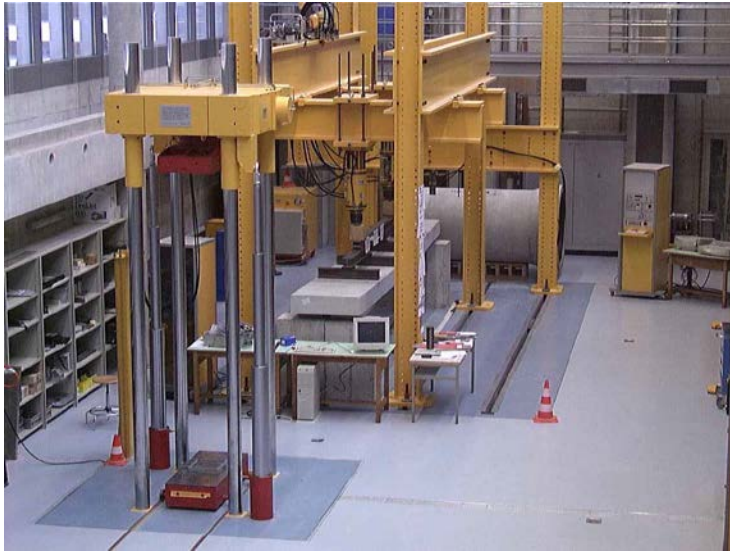
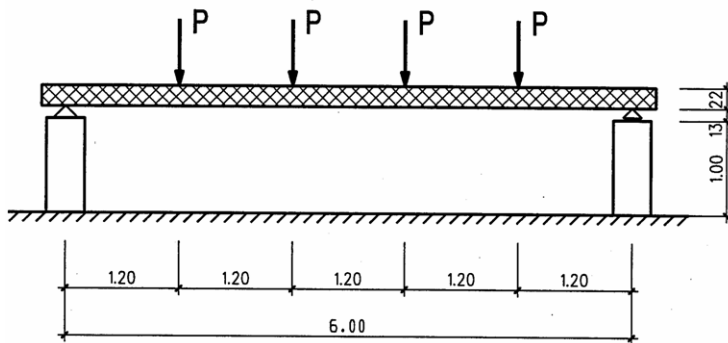


Bild 9: Versuchsaufbau FH Fribourg/CH



Grafik 8: Versuchsaufbau FH Fribourg/CH

Abmessung Stahlbetonplatte:

Dicke 22 cm

Breite 85 cm

Länge total 6.3 m

Spannweite 6.0 m

Innenbewehrung:

längs 6 Ø 12 (S 500)

quer Ø 8 s = 150 (S 500)

Die unverstärkte Referenzplatte (D0) wurde mit einer 1-lagigen (Platte D1) und einer 2-lagigen (Platte D2) S&P ARMO-mesh L500 Verstärkung verglichen. Als Spritzmörtel wurde der zementöse Nassspritzmörtel S&P ARMO-crete w (mit Reaktivkomponente) verwendet (Bild 10).

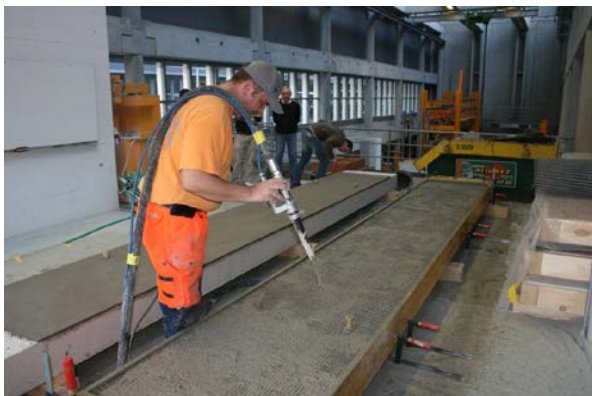


Bild 10: Applikation S&P FRCM System

5.1 Ergebnisse der Belastungsversuche FH Fribourg/CH

5.1.1 Tragverhalten im Gebrauchszustand

Ungerissener Zustand

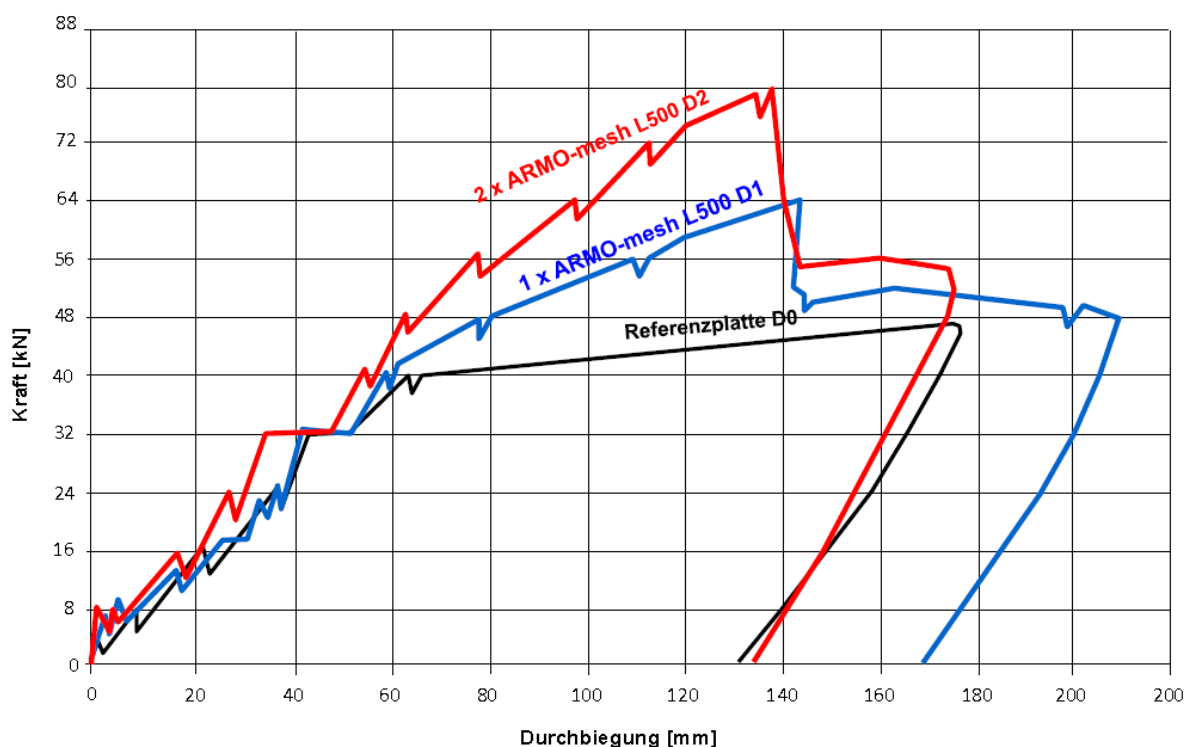
Wie die Last-Durchbiegungskurven (Grafik 9) zeigen, weisen die Versuchsträger im ungerissenen Zustand I nur geringfügige Unterschiede im Tragverhalten auf. Die wesentlichsten Unterschiede bestehen bezüglich Biegesteifigkeit und Risslast (Tabelle 3).

Die Referenzplatte D0 verhält sich deutlich weicher als die verstärkten Plattenstreifen; dies hängt sicher von den grösseren Trägheitsmomenten der verstärkten Plattenstreifen ab, lässt sich aber nicht allein dadurch erklären. Die Biegesteifigkeit des Referenzbalkens ist wohl aus anderen, nicht näher untersuchten Gründen tiefer als nach einer elastischen Berechnung; die Steifigkeitsunterschiede zwischen den beiden verstärkten Trägern entsprechen hingegen etwa den Unterschieden in den Plattenstärken inkl. Spritzmörtelverstärkung.

Die aus den Rissmomenten (unter Berücksichtigung der Eigenlasten des Plattenstreifens und des Belastungsaufbaus) abgeleiteten Biegezugspannungen entsprechen ungefähr den Biegezugfestigkeiten. Das ungerissene Verhalten zeigt somit keine wesentlichen Überraschungen.

Versuch	δ [mm] bei $Q_{tot} = 4$ kN		I_n [-]	Rissmoment [kNm]	Biegespannung [N/mm ²]
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

Tabelle 3: Kennzahlen des ungerissenen Zustands



Grafik 9: Last-Durchbiegungskurven für alle Versuchsträger

Steifigkeiten im gerissenen Zustand

Die Versuchsplatte D0 weist im gerissenen Zustand II eine 5.40 mal tiefere Biegesteifigkeit auf als im ungerissenen Zustand I (*Tabelle 4 und Tabelle 5*, für die Durchbiegungszunahme von 8 kN auf 16 kN). Für die Lastzunahme von 8 kN auf 24 kN resp. auf 32 kN wird die Biegesteifigkeit um einen Faktor 5.00 resp. 4.88 abgemindert; die Steifigkeitsabminderung nimmt also mit zunehmender Beanspruchung etwas ab. Die Steifigkeitsreduktion wird für den vorhandenen Bewehrungsgehalt durch den in der Schweizer Norm SIA 262 vorgeschlagenen, empirischen Ausdruck [N1, Gleichung 102] mit einem Faktor von etwa 5.6 in der Grössenordnung bestätigt. Die Be- und Entlastungszyklen führen zu einem weiteren Steifigkeitsverlust von knapp 14 %.

Das Verhalten der Versuchsplatte D1 nähert sich mit zunehmender Rissbildung demjenigen der Referenzplatte an. Die Steifigkeitsabnahme im gerissenen Zustand für die Platten D0 und D1 ist etwa vergleichbar mit den Steifigkeitsunterschieden im ungerissenen Zustand. Die Biegesteifigkeit im gerissenen Zustand wird für D1 um einen Faktor 10.86 der ungerissenen Steifigkeit reduziert (wiederum von 8 kN auf 16 kN). Für die Lastzunahme von 8 kN auf 24 kN resp. auf 32 kN wird die Biegesteifigkeit um einen Faktor 10.07 resp. 9.39 abgemindert; die Steifigkeitsabnahme nimmt also mit zunehmender Beanspruchung deutlicher ab als dies bei der Referenzplatte D0 der Fall ist. Die Be- und Entlastungszyklen fordern eine weitere Steifigkeitsreduktion von gut 17 %.

δ [mm] bei $Q_{tot} =$									
Versuch	8 kN		16 kN		24 kN		32 kN (vor Zyklen)		32 kN (nach Zyklen)
D0	8.98	100%	22.66	252%	34.31	382%	46.03	513%	52.32
D1	5.81	65%	20.89	233%	33.60	374%	44.67	498%	52.39
D2	4.41	49%	16.89	188%	28.51	317%	39.38	438%	48.02

Tabelle 4: Kennzahlen der Steifigkeiten im gerissenen Zustand

Der Versuchsplatte D2 verhält sich grundsätzlich etwas steifer als die beiden anderen Versuchsplatten. Die Steifigkeitsabnahme im gerissenen Zustand für die Platten D0 und D2 ist gleich den Steifigkeitsunterschieden im ungerissenen Zustand. Die gerissene Biegesteifigkeit der Platte D2 ist 10.09 mal tiefer als seine ungerissene Steifigkeit (wiederum für die Durchbiegungszunahme von 8 kN auf 16 kN); für die Lastzunahme von 8 kN auf 24 kN resp. auf 32 kN wird die Biegesteifigkeit um einen Faktor 9.72 resp. 9.40 abgemindert. Die Steifigkeitsreduktion infolge Rissbildung verläuft etwa analog zur Referenzplatte, aber auf einem höheren Lastniveau. Die Be- und Entlastungszyklen führen zu einer weiteren Steifigkeitsreduktion von 22 %.

Die Versuchsplatte D2 zeigt den Einfluss der stärkeren S&P ARMO-mesh Bewehrung recht deutlich. Dieser verhält sich von Beginn der Rissbildung an steifer. Im Vergleich zur Platte D1 sind die Durchbiegungen bei gleicher Last und vergleichbarem E-Modul des Betons deutlich tiefer. Im Vergleich zum Referenzplatte kann die erhöhte Steifigkeit der Zugzone ebenfalls einfach abgelesen werden. Hingegen zeigt der stärker gekrümmte Anstieg für den Plattenstreifen D1, dass bei diesem Versuchskörper die Carbonbewehrung erst mit zunehmender Rissbildung Kräfte übernimmt.

Gebrauchslasten für Durchbiegungsgrenzen

Tabelle 5 zeigt einen Vergleich der erreichten Lasten für übliche Gebrauchsgrenzen. Die aus den im Versuch gemessenen Durchbiegungen ermittelten Kräfte berücksichtigen das Tragverhalten unter wiederholten Lasten nicht; dieser Einfluss könnte z.B. mit dem Steifigkeitsverlust infolge Lastzyklen abgeschätzt werden. Die Vergleiche der erreichten Lasten für eine gegebene Durchbiegungsgrenze zeigen, dass die carbongitterbewehrte Spritzmörtelschichten für tiefe Lastniveaus wirksamer sind als für höhere.

Q_{exp} [kN]							$(Q_u/Q)_{exp}$					
für eine Durchbiegung in Feldmitte bei												
Versuch	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%

Tabelle 5: Gebrauchslasten für gegebene Durchbiegungsgrenzen

Beim Versuch D1 ist die Verstärkungswirkung mit zunehmender Gebrauchsgrenze praktisch nicht mehr vorhanden; beim Versuch D2 bleibt auch bei höheren Lastniveau noch eine Reserve. Dies deutet darauf hin, dass bei geringen Beanspruchungen in erster Linie der Steifigkeitszuwachs aus der Spritzmörtelschicht von Bedeutung ist und weniger die Carbongitterbewehrung. Werden Rissbreiten anstelle der Durchbiegungen als Gebrauchstauglichkeitskriterium benützt, könnten allenfalls auch höhere Lasten als gemäss Tabelle 5 zugelassen werden.

Rissbreiten

Tabelle 6 enthält die grössten, in den Laststufen gemessenen Rissweiten. Bei den tiefen Lastniveaus kann kein signifikanter Einfluss der Spritzmörtelschichten respektive Carbongitterbewehrung festgestellt werden, im Gegenteil: mit grösserer Schichtstärke des Spritzmörtels nehmen auch die gemessenen Rissbreiten zu. Unter Berücksichtigung der möglichen Genauigkeit von Rissbreitenmessungen ist erst ab etwa Laststufe 24 kN ein Einfluss der Verstärkung auf die Rissbreiten erkennbar.

Die gemessenen Rissbreiten weisen erneut darauf hin, dass die Steifigkeit der Carbongitter erst nach einer gewissen Streckung aktiviert wird. Die grösseren gemessenen Rissbreiten bei tiefen Lastniveaus hängen mit der grösser gewordenen Betonüberdeckung der Betonstahlbewehrung zusammen; bei gleicher Stahldehnung ist mit zunehmender Betonüberdeckung eine grössere Rissbreite zu erwarten. Wird eine maximale Rissbreite von 0.3 mm als Gebrauchstauglichkeitskriterium definiert, könnte für die geprüften Platten unabhängig von der Verstärkung eine Gesamtlast von 24 kN als Gebrauchslast akzeptiert werden. Dass dieser Wert unabhängig von der aufgetragenen Verstärkung ist belegt wiederum, dass die Verstärkungen erst nach Überschreiten der üblichen Gebrauchslastniveaus aktiviert werden.

Versuch	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

Tabelle 6: Grösste gemessene Rissbreiten [mm]

Massgeblichkeit der Gebrauchstauglichkeit

Für die Bemessung von Tragwerken gemäss [N2] sind die Nachweise jeweils für die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu erbringen. Je nach Geometrie und Lastfallkombination werden entweder die Tragsicherheit oder die Gebrauchstauglichkeit massgebend. Wie anhand der Ergebnisse von Tabelle 7 ersichtlich wird, wird bei der vorliegenden Testanordnung der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei allen Platten massgebend. Die Begründung liegt in der minimalen Stärke der carbongitterbewehrte Spritzmörtelschicht und der damit geringen Steifigkeitserhöhung. Daraus kann abgeleitet werden, dass Konstruktionen bei denen die Grenze der Gebrauchstauglichkeit erreicht ist, eine Verstärkung mit dem S&P ARMO-System nur limitierte Möglichkeiten aufweist.

5.1.2 Tragverhalten im Bruchzustand

Fliessbeginn der Betonstahlbewehrung

Das Tragverhalten der Plattenstreifen ändert sich deutlich mit dem Fliessbeginn der Betonstahlbewehrung. Überschreitet die Dehnung im Betonstahl die Fliessdehnung, müssen in erster Linie die Carbongitter die zusätzlichen inneren Zugkräfte übernehmen; die Betonstähle nehmen nur noch Kräfte im Verhältnis zu ihrem Verfestigungsmodul auf, der noch unter 1 % der elastischen Steifigkeit beträgt – die Betonstähle übernehmen also im Gegensatz zu den Carbongittern kaum noch Kräfte. Der Fliessbeginn der Betonstähle markiert somit den Beginn der eigentlichen Tragwirkung der Carbongitter; die entsprechenden Kräfte und Durchbiegungen in Feldmitte können aus den Last-Durchbiegungsdiagrammen geschätzt werden.

Die Vergleiche in Tabelle 7 zeigen, dass sich die Fliesslasten und zugehörigen Durchbiegungen in Feldmitte mit zunehmendem Carbongitterquerschnitt nur begrenzt erhöhen; gewisse Abweichungen sind hier auch der Ablesegenauigkeit zuzuschreiben. Dennoch lässt sich die Tendenz feststellen, dass die Fliesslasten mit stärkerer Carbongitterbewehrung zunehmen; die Steifigkeit der Carbongitter wird also bereits vor dem Fliessen der Betonstähle etwas aktiviert, wenn auch nicht in vollem Ausmasse. Die grösseren Fliesslasten bei zunehmendem Carbongitterquerschnitt belegen auch, dass zwischen Carbongitter und umgebendem Spitzmörtel im gerissenen Zustand eine zwar eher geringe, aber nicht vernachlässigbare Verbundwirkung vorhanden ist.

Aufgrund der Durchbiegungszuwachse $w_u - w_y$ vom Fließen der Betonstähle bei Q_y bis zum Erreichen der Höchstlast Q_u können im Vergleich zu den Durchbiegungszuwachsen bei Gebrauchslasten (von 8 kN auf 16 kN, siehe auch Tabelle 6) Abminderungsfaktoren ermittelt werden für die Biegesteifigkeit EI_y bei plastischem Zustand der Betonstähle zu derjenigen im gerissenen mit elastisch bleibender Betonstahlbewehrung EI_{II} (Tabelle 7).

Hier zeigt sich der Einfluss der Dehnsteifigkeit der Carbongitter deutlich; im Gegensatz zu der für den vorhandenen Zugbewehrungsgehalt zu erwartenden Abnahme der Biegesteifigkeit um einen weiteren Faktor von etwa 8 bei der Referenzplatte beträgt die Abminderung bei der Platte D1 knapp unter 2; bei der Platte D2 nimmt die Steifigkeit lediglich um etwa 25 % ab.

Dieser sehr günstige Einfluss der Carbongitter wird auch durch die Zuwachse Q_u/Q_y von etwa 30 % pro Lage Carbongitter von der Fließlast auf die Bruchlast des jeweiligen Versuchs bestätigt.

	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%

Tabelle 7: Kennwerte des Bruchzustands und bei Fließen der Betonstähle

Verstärkungsgrade

Anhand der Verhältnisse der Bruchlasten Q_u der verstärkten Plattenstreifen kann bezüglich des Referenzversuchs der Verstärkungsgrad infolge der Carbongitter ermittelt werden (Tabelle 7). Die Werte zeigen, dass eine Verdoppelung des Carbongitterquerschnitts eine Verdoppelung der zusätzlich aufnehmbaren Last bei Bruch bewirkt; für das geprüfte Tragsystem bedeutet dies ein Lastzuwachs von etwa 16.5 kN oder 35 % pro Lage Carbongitter.

Rissbilder und Dehnungen der Zugzone

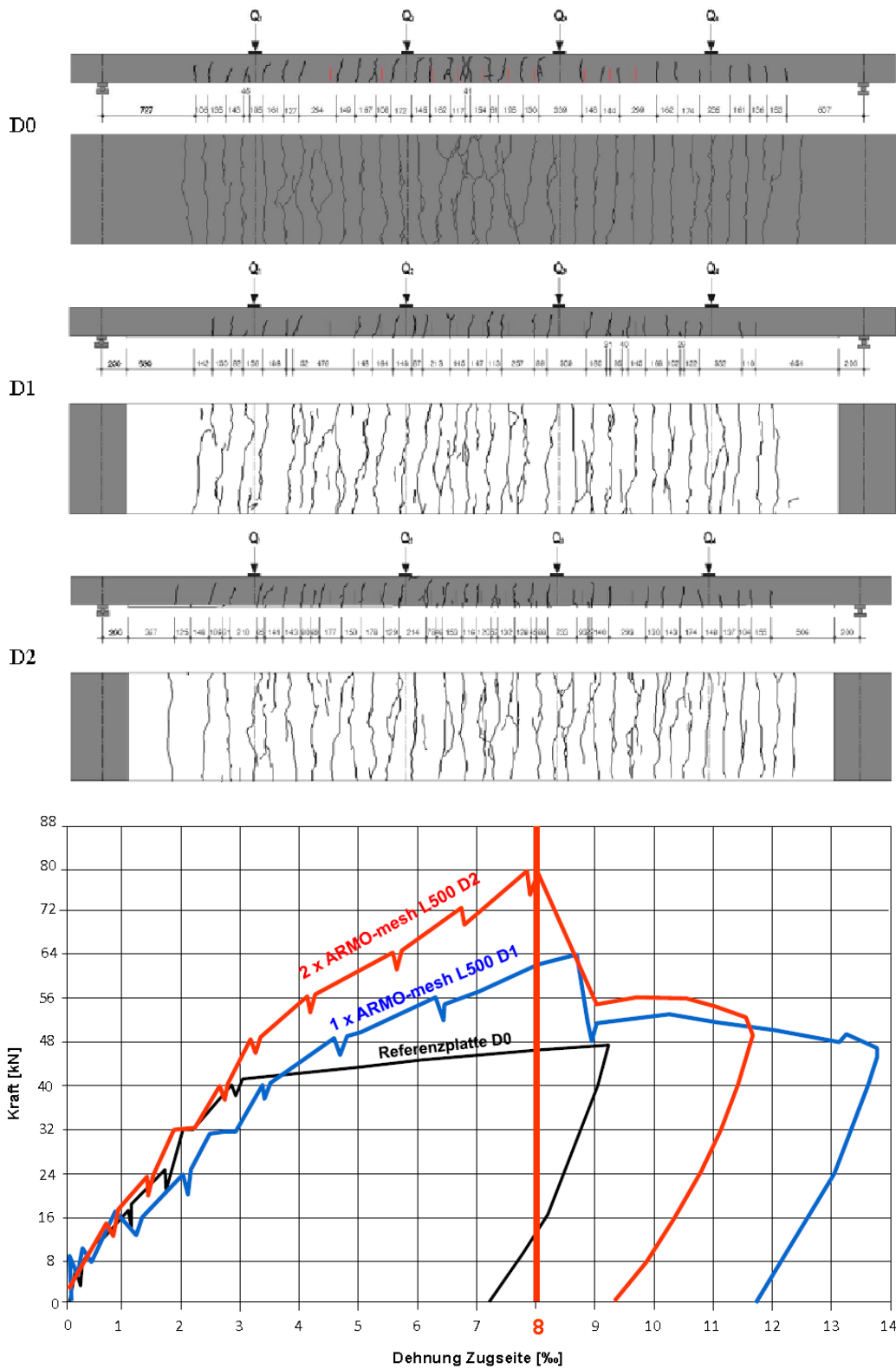
Grafik 10 zeigt die Rissbilder aller Versuchsträger nach Erreichen des Bruchs sowie die bei Maximallast gemessenen Dehnungen entlang des Zugrands.

Die Rissbilder zeigen in allen Versuchen eine ausreichend feine Verteilung der Risse. Im Referenzversuch D0 entsprechen die Rissabstände erwartungsgemäss etwa dem Abstand der Querbewehrung von 150 mm. Bei den Versuchen D1 und D2 mit Spritzmörtelverstärkung nehmen die Rissabstände tendenziell etwas ab; dies kann aufgrund der leicht versteifenden Wirkung der Verstärkung ebenfalls erwartet werden. Diese versteifende Wirkung wird auch durch die Dehnungen beim Maximallast bestätigt, nehmen diese doch mit zunehmender Verstärkung ab (Grafiken 9 / 10).

Verhalten bei Bruch

Der definitive Bruch erfolgt bei allen Versuchsträgern grundsätzlich auf Druck in der Betondruckzone; bei keinem der Träger zerriss die Betonstahlbewehrung. Sowohl der Verbund zwischen Spritzmörtelschicht und Betonuntergrund als auch die Carbongitterquerschnitte waren bei den beiden verstärkten Trägern nach Erreichen des Bruchs der Biegedruckzone noch intakt.

Im Kraft/Dehnungsdiagramm (Grafik 10) werden die gemessenen Dehnungen auf der Betonzugseite aufgezeigt. Die Dehnung im S&P ARMO-mesh wurde nicht gemessen.



Grafik 10: Rissbilder sowie Kraft / Dehnungsdiagramm in Plattenmitte auf Zugseite

Die maximale Dehnung auf der Betonzugseite von 0.8 % wurde herangezogen um die theoretische Dehnung sowie Spannung im S&P ARMO-mesh zu ermitteln. Die Resultate bestätigen, dass zur Aktivierung des S&P ARMO-mesh eine zusätzliche Streckung notwendig war. Entsprechend wird im Bemessungskonzept der S&P einerseits der theoretische E-Modul des S&P ARMO-mesh um den Faktor 1.5 abgemindert, und andererseits die Grenzdehnung im Bemessungszustand bei 0.5 % (Biegezug) respektive bei 0.4 % (Axial) angesetzt.

theoretischer E-Modul S&P ARMO-mesh	240 kN/mm²
Abminderungsfaktor (Empfehlung S&P)	1.5
E-Modul S&P ARMO-mesh für Bemessung	160 kN/mm²
Dehnung S&P ARMO-mesh für Bemessung:	
Biegezug	0.5 % (~ 800 N/mm²)
Axial	0.4 % (~ 650 N/mm²)

6. S&P ARMO-flexion Software für Biegezugverstärkung

S&P ARMO-flexion (Bild 11) ist ein Bemessungsprogramm für die Verstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter einachsiger Biegung und Normalkraft mit Hilfe des S&P ARMO-System. Das Programm lässt sich sowohl für den Entwurf von Verstärkungsmassnahmen als auch für die Erstellung prüffähiger Nachweise im Rahmen einer statischen Berechnung verwenden. Das Programm liefert dem Anwender den erforderlichen Carbonfaserquerschnitt für die verschiedenen ARMO-mesh. Zusätzlich führt das Programm die notwendigen Nachweise für die Verankerung gemäss den S&P ARMO-System Bemessungsgrundlagen. Als systemgeprüfte Spritzmörtel werden S&P ARMO-crete d sowie S&P ARMO-crete w verwendet. Die Bemessung erfolgt in Anlehnung an Zulassungen sowie Normen und Richtlinien für Klebebewehrungen sowie FRP Verstärkungen.

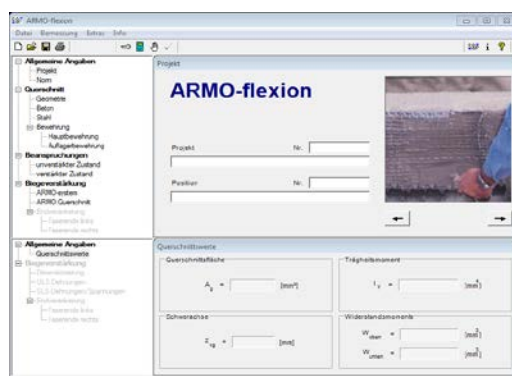


Bild 11: Bemessungssoftware ARMO-flexion

7. S&P ARMO-axial Software für Axialverstärkung

S&P ARMO-axial (Bild 12) ist eine Bemessungssoftware für die Verstärkung von zentrisch gedrückten Stahlbetonstützen mit dem S&P ARMO-System. Die Verstärkung basiert darauf, dass die Umschnürung das Ausdehnen der Stütze in Querrichtung (Querdehnung) behindert. Dadurch wird ein dreiaxialer Spannungszustand im Beton erzeugt, der zu einer Erhöhung der Betondruckfestigkeit führt.

S&P ARMO-axial lässt sich sowohl für den Entwurf von Verstärkungsmassnahmen als auch für die Erstellung prüffähiger Nachweise im Rahmen einer statischen Berechnung verwenden. Für eine vorgegebene Belastung berechnet das Programm die erforderliche Anzahl Umschnürlagen mit den verschiedenen *S&P ARMO-mesh*. Als systemgeprüfte Spritzmörtel werden *S&P ARMO-crete d* sowie *S&P ARMO-crete w* verwendet. Die Bemessung erfolgt in Anlehnung an Zulassungen sowie Normen und Richtlinien für Klebebewehrungen sowie FRP Verstärkungen.

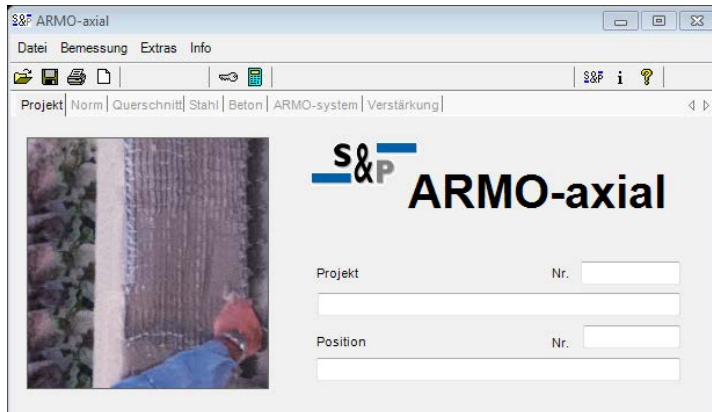


Bild 12: Bemessungssoftware ARMO-axial

8. Anwendungen FRCM im Tunnel- und allgemeinen Tiefbau

Spritzbeton wird im Tunnelbau als Vortriebssicherung sowie als bewehrte Schale eingesetzt. In der Vortriebssicherung kommt primär Spritzbeton mit Stahlfasern zur Anwendung. Für die Spritzbetonschalen werden üblicherweise Stahlgitter verwendet. Speziell beim konventionellen Vortrieb sind die Unebenheiten der Tunneloberfläche ausgeprägt. Stahlgitter können somit nicht eng anliegend an das Tunnelgewölbe fixiert werden. Zusätzlicher Spritzbeton ist somit zum Verfüllen der Unebenheiten erforderlich.

Bei der Verwendung von *S&P ARMO-mesh* wird die Spritzbetondicke geringer. Das flexible Carbongitter und somit die Spritzbetonschale folgt besser den Unebenheiten des Tunnelprofils.

Bei unebenen Traggründen liegen die Stahlbewehrungen über grosse Flächen in Distanz zum Traggrund. Beim Spritzvorgang vibriert die Stahleinlage. Dies führt zu erhöhtem Rückprall sowie zu Spritzschattenbildung hinter den Stahleinlagen (Bild 13).



Bild 13: Spritzschatten hinter Stahlbewehrung

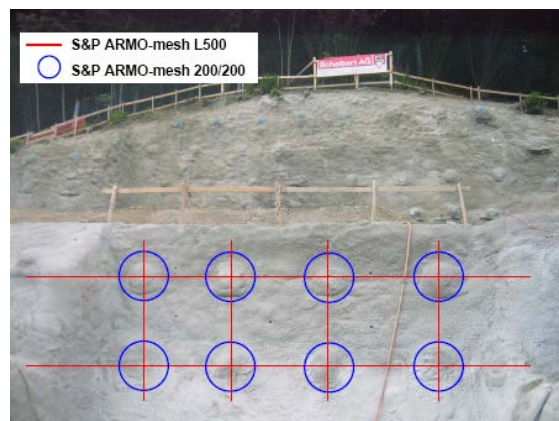


Bild 14: Fixierung mit Haftklammern

Vorteile des S&P ARMO-System:

- Die Schichtstärke des Spritzbetons kann reduziert werden (weniger Ausgleichen von Profilunebenheiten / weniger Überdeckung der C-Faserbewehrung).
- Die Carbonfaser ist inert und unterliegt somit keiner Korrosion. Aggressives Bergwasser oder Wechselstrom im Bahntunnel kann die Bewehrung langfristig nicht beschädigen.
- Der pH-Wert im Spritzbeton ist für den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht relevant. Die Carbonatisierung des Betons, beispielsweise im Strassentunnel, beeinträchtigt die Funktion der Carbonbewehrung nicht. Auch Chloride, welche im Portalbereich in den Spritzbeton penetrieren, beschädigen die Carboneinlage nicht.
- Eine nachträgliche Aufweitung des Tunnels (Pilotstollen) ist problemlos möglich. Die Carboneinlage beeinträchtigt den nachträglichen Fräsvortrieb nicht.

Im allgemeinen Tiefbau bieten sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Bilder 15 und 16 zeigen eine Spritzbetonwand. Der Spritzbeton wurde mit Stahlfasern vergütet. Im Bereich der Verankerungen erfolgt die Verstärkung lokal mit dem S&P ARMO-mesh 200/200. Zusätzlich wurden Streifen des S&P ARMO-mesh L500 über die Ankerköpfe verlegt und eingespritzt. Die Befestigung des S&P ARMO-mesh erfolgt mit den S&P Haftklammern.



Bilder 15 / 16: lokale Verstärkung im Bereich der Ankerköpfe

Vergleich Spritzbetonschale mit Stahlbewehrung / S&P ARMO-mesh

Als Vergleichskriterium von bewehrten Spritzbetonschalen wird das Arbeitsvermögen Schweizer Norm SIA 162/6 (1999) für den Versuch herangezogen.

Eine 10 cm starke Spritzbetonschicht mit einer in der Mitte liegenden Stahlbewehrung kreuzweise $\varnothing 6 \text{ s} = 150 \text{ mm}$ weist üblicherweise ein Arbeitsvermögen von $\sim 800 \text{ J}$ auf. Dieses Arbeitsvermögen wird auch mit $25 - 30 \text{ kg/m}^3$ Stahlfasern erreicht. Im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH [P10 / P19] wurde das Arbeitsvermögen einer 10 cm starken Spritzbetonschale mit dem S&P ARMO-mesh geprüft.

Im Versuch wurde ein traditioneller Spritzbeton 8 cm stark appliziert. Danach wurde das S&P ARMO-mesh in 2 cm S&P ARMO-crete d verlegt.

Zwei Gitter-Varianten wurden geprüft:

- S&P ARMO-mesh L500 (C-Faser uni-direktional)
- S&P ARMO-mesh 200/200 (C-Faser bi-direktional)

Bilder 17, 18 und 19 zeigen die Applikation. In Tabelle 8 werden die Resultate mit einer Stahlbewehrung kreuzweise $\varnothing 6 \text{ s} = 150 \text{ mm}$ verglichen.



Bilder 17 / 18 / 19: Applikation der Probekörper für Arbeitsvermögen

Versuchskörper	Arbeitsvermögen
10 cm Standardspritzbeton mit Stahleinlage in Mitte (Netz $\varnothing 6 \text{ mm } 150/150$)	800 Joule
8 cm bestehende Spritzbetonschale als Druckzone mit 1-Lage S&P ARMO-mesh L500 in 2 cm ARMO-crete d (verankert)	1'139 Joule
8 cm bestehende Spritzbetonschale als Druckzone mit 1-Lage S&P ARMO-mesh 200/200 in 2 cm ARMO-crete d	824 Joule

Tabelle 8: Resultate VSH [P10 / P19]

Das S&P ARMO-System eignet sich speziell zur Instandstellung und statischen Verstärkung von beschädigten Beton- oder Spritzbetonschalen im Stollen- und Tunnelbau.

Der massgebliche Vorteil des S&P ARMO-System besteht darin, dass die Spritzbetonschicht um einige Zentimeter reduziert werden kann und somit nach der Instandstellung mehr Durchfluss- respektive Lichtraumprofil zur Verfügung steht.

Werden bei der Instandstellung Stahlgitter eingespritzt, beträgt die Spritzbetonschicht ca. 8 cm. Diese minimale Schichtstärke ist notwendig um die Unebenheiten auszugleichen, das Stahlgitter einzuspritzen und die minimale Überdeckung der Stahleinlage von 3 cm zu gewähren. Eine 3 cm starke Überdeckung der Stahleinlage ist nötig um die Feuerwiderstandsdauer (R 60) zu garantieren und die Innenbewehrung gegen Korrosion zu schützen (pH-Wert 12 im Spritzbeton). Das *S&P ARMO-mesh* muss hingegen nur 1 cm überdeckt werden um die Feuerwiderstandsdauer R 60 zu gewährleisten (*Kapitel 10*). Eine minimale Überdeckung aus Gründen des Korrosionsschutzes ist nicht notwendig. Aus diesem Grund wird sich die Schichtstärke des Spritzbetons um ca. 50 % reduzieren (*Tabelle 9*).

	Dicke Spritzbetonschicht in cm	
	Traditionell mit Stahlgitter	<i>S&P ARMO-System</i>
Ausgleichen Unebenheiten Profil	3	1 - 2
Bewehrung einspritzen	1 - 2	nicht relevant
Bewehrung überdecken	3	1 - 2
Total	7 - 8	2 - 4

Tabelle 9: Reduktion Spritzbetonschicht

Bei der Instandsetzung des Druckstollens eines Wasserkraftwerkes beispielsweise, werden aus logistischen Gründen meistens ofengetrocknete Spritzbetone als Silo- oder Sackware eingesetzt. S&P bietet vorgefertigte Spritzbetone für das Trockenspritzverfahren an. Der Spritzmörtel *S&P ARMO-crete d* (dry) wird in unterschiedlicher Körnung mit unterschiedlichen Zusätzen und verschiedenem Zement hergestellt. Die Lieferung der Silo- resp. Sackware erfolgt ab verschiedenen Produktionsstandorten.

Nachfolgend werden die Kosten für 8 cm traditionellen Spritzbeton mit Stahleinlage mit einer 4 cm starken Spritzbetonschale aus dem *S&P ARMO-System* verglichen.

8 cm Spritzbeton traditionell mit Stahleinlage

Materialkosten Spritzbeton (Sackware), 8 cm à ca. CHF 9.00 – 11.00 / cm	CHF	80.00/m ²
Applikationskosten	CHF	25.00/m ²
Liefern und Versetzen der Stahleinlage (erschwerte Bedingungen)	CHF	35.00/m ²
Total inkl. 20 % Endzuschlag	CHF	<u>168.00/m²</u>

4 cm *S&P ARMO-crete d* mit *S&P ARMO-mesh 200/200*

Materialkosten <i>S&P ARMO-crete d</i> , 4 cm à ca. CHF 12.00 – 13.00 cm (+ 30 %)	CHF	50.00/m ²
Applikationskosten (+ 25 %, da weniger Spritzleistung)	CHF	35.00/m ²
Liefern und Versetzen des <i>S&P ARMO-mesh</i>	CHF	30.00/m ²
Total inkl. 20 % Endzuschlag	CHF	<u>138.00/m²</u>

Kosteneinsparnis ca. 20 % bei 4 cm Reduktion der Schichtstärke!

Für den Bauherrn bietet das *S&P ARMO-System* weitere Vorteile:

- Das *S&P ARMO-mesh* substituiert die Stahleinlage; die Spritzbetonschicht wird reduziert.
- Keine Spritzschatten hinter dem *S&P ARMO-mesh*.
- Weniger Rückprall da keine Vibration wie bei der Stahlarmierung auftritt.
- 3 x höhere Hitzebeständigkeit und somit 1 cm Überdeckung für R 60.
- Keine Korrosion in der Carbonbewehrung und entsprechend minimale Überdeckung.
- Grösseres Lichtraum- oder Durchflussprofil des Tunnels resp. Stollens.

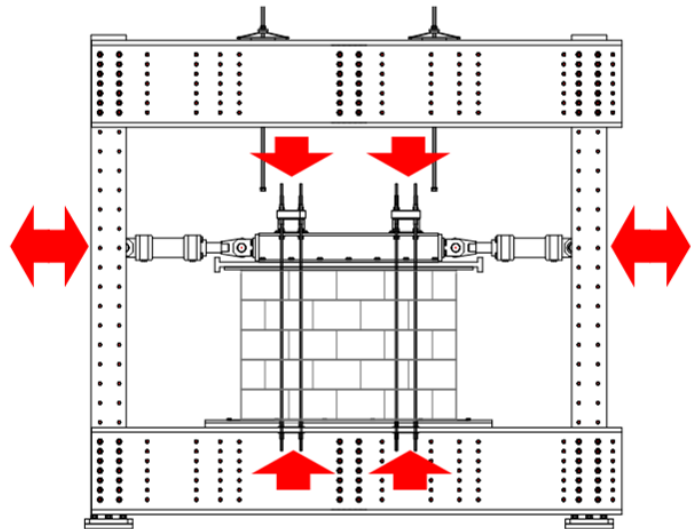
9. Seismische Verstärkung von Mauerwerk Vergleich FRP / FRCM

9.1 Verstärkung mit FRP Systemen

An der FH Fribourg/CH wurden im Jahr 2007/08 15 Mauerwerkswände statisch-zyklisch belastet. Die Mauerwerke wurden mit unterschiedlichen S&P FRP Systemen (Lamellen, Sheets, usw.) ertüchtigt. Die FRP Verstärkung wurde im Anschlussbereich aus Beton immer verankert. Bild 20 / Grafik 11 zeigen den Versuchsaufbau.



Bild 20: Versuchsaufbau FH Fribourg/CH



Grafik 11: Versuchsaufbau FH Fribourg

Zwei unterschiedliche Serien A und B wurden getestet.

Serie A Vertikallast 1.0 N/mm² [P16]

Serie B Vertikallast 0.5 N/mm² [P17]

In Serie A wurde die Vertikallast sehr hoch gewählt. Da die Vertikallast unter seismischer Einwirkung reduziert wird (vertikales Abheben des Bauteils), wurde in der Serie B die Vertikallast tiefer gewählt. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe B. Das Mauerwerk wurde mit dem S&P C-Sheet 240, 200 g/m² (Bänder von 300 mm Breite) in unterschiedlicher Anordnung einseitig und beidseitig verstärkt (Bilder 21 / 22 / 23).

	Horizontallast [%]	Horizontalverformung [%]
B1: Referenz	100	100
B2: 2 Bänder vertikal	118	105
B3: 2 Bänder vertikal + 2 Bänder 45°	149	110
B4: 4 Bänder vertikal + 45°	170	107
B5: 2 Bänder vertikal + 60°	167	102

Tabelle 10: Resultatübersicht S&P C-Sheet 240, 200 g/m² in unterschiedlicher Anordnung



Bilder 21 / 22 / 23: Unterschiedliche Anordnung der S&P C-Sheet 240

Folgerungen:

Die Resultate der statisch zyklischen Belastungsversuche haben gezeigt, dass die FRP verstärkten Wände wesentlich höhere Horizontalkräfte aufnehmen können als die unverstärkten Wände. Die einseitigen resp. beidseitigen Verstärkungen zeigten vergleichbare Resultate. Der erhöhte Widerstand der verstärkten Mauerwerkswände kann jedoch nur vollumfänglich ausgenutzt werden, wenn die Steine und die Fugen den durch die Verstärkung erhöhten Beanspruchungen widerstehen können. Die Verformungen der verstärkten Mauerwerkswände konnten im Allgemeinen bis 10 % erhöht werden. Es sollte somit möglich sein, tragende Mauerwerkswände von bestehenden Bauwerken zu verstärken, insbesondere in nicht zu stark durch Erdbeben gefährdeten Zonen und für Bauten, die in die Bauwerksklassen I oder II fallen.

9.2 Verstärkung mit S&P FRCM System

Um die Wirkung des *S&P ARMO-mesh* zu untersuchen, wurde eine weitere Versuchs-Serie C [P18] an der FH Fribourg ausgeführt. Die identischen Versuche wurden diesmal mit dem *S&P ARMO-mesh L500* (~ 200 g/m²) anstelle des FRP Systems *S&P C-Sheet 240* (200 g/m²), ausgeführt. Die Breite der Verstärkungsbänder wurde identisch gewählt.

Auch das *S&P ARMO-System* wurde im Anschlussbauteil aus Beton endverankert und einseitig appliziert. Bilder 24 und 25 zeigen die Applikation des *S&P ARMO-Systems*.



Bilder 24 / 25: Applikation des S&P ARMO-System

Als Spritzmörtel wurde *S&P ARMO-mur*, ein Verputzmörtel mit Reaktiv-Komponente eingesetzt. Der Verputzmörtel ist von Hand oder maschinell applizierbar. Die in Serie C verwendete Vertikallast ist identisch mit der Serie B.

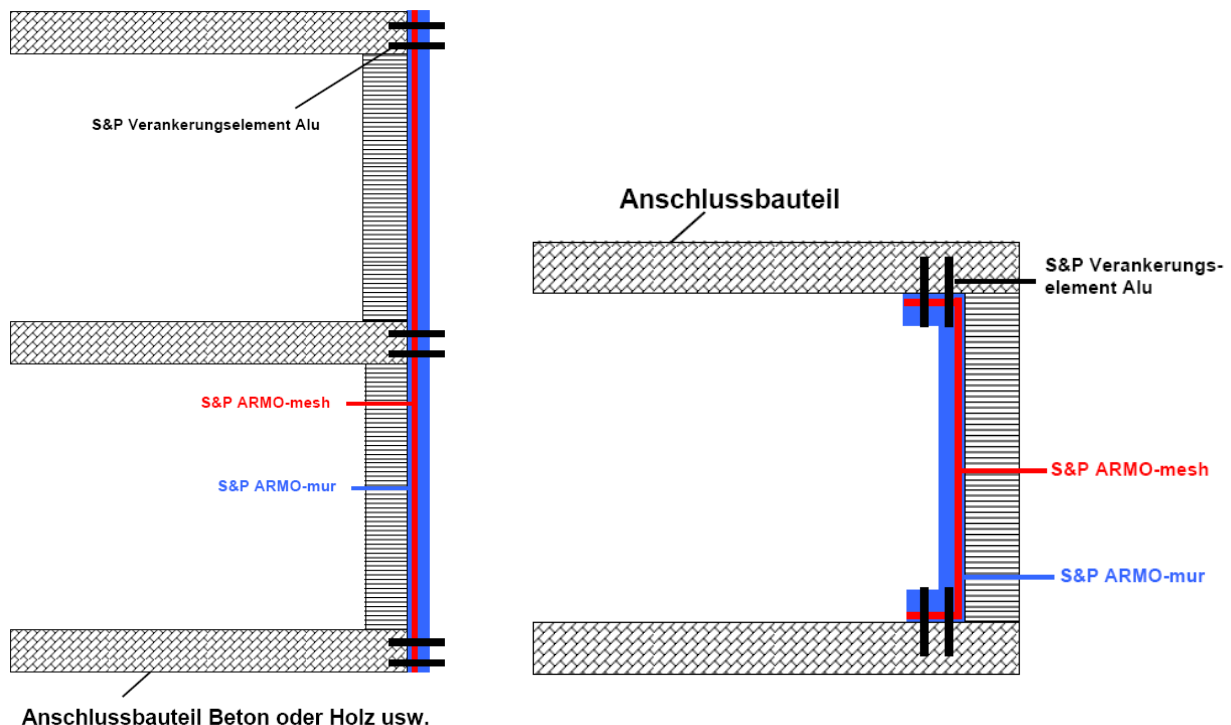
Tabelle 11 zeigt die Resultate der Serie C, bei welcher die Verstärkung mit dem S&P ARMO-System erfolgt. Die Vergleichswerte für Serie B (S&P C-Sheet 240) sind in Tabelle 11 ebenfalls aufgeführt.

	Horizontallast [%]	Horizontalverformung [%]
C1: Referenz	100	100
C2: 2 Bänder vertikal	145 118 (B2)	138 105 (B2)
C3: 2 Bänder vertikal + 2 Bänder 45°	147 149 (B3)	111 110 (B3)
C4: 4 Bänder vertikal + 45°	159 170 (B4)	119 107 (B4)
C5: 2 Bänder vertikal + 60°	161 167 (B5)	108 102 (B5)

Tabelle 11: Resultatübersicht S&P ARMO-System in unterschiedlicher Anordnung / Vergleich

Die Verstärkungswirkung mit dem S&P FRCM System ist vergleichbar mit den Resultaten der FRP Verstärkung.

Bei allen Versuchen „seismische Verstärkung von Mauerwerk“ mit S&P Produkten wurden die Verstärkungsbänder immer im Anschlussbauteil verankert. In der Praxis ist dies mit dem S&P Verankerungselement Alu (Grafik 12) möglich. Bilder 26, 27 und 28 zeigen eine Baustellenanwendung seismische Verstärkung eines Mauerwerks und Endverankerung mit S&P ARMO-mesh.



Grafik 12: Details Anschlussbauteil

Die Zugkraft im S&P ARMO-mesh wird in diesem Fall zu 100 % über die Dübel im Betonanschlussbauteil verankert.



Bilder 26 / 27 / 28: seismische Verstärkung sowie Verankerung eines Mauerwerks mit S&P ARMO-mesh

Das Verstärken von Mauerwerkswänden durch in Spritzmörtel eingelegte Carbonfaserbewehrung S&P ARMO-mesh stellt eine neue, wirtschaftliche und innovative Technik dar.

10. Brandversuche mit S&P FRCM System EMPA Dübendorf/CH und Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH

Gemäss DIN Norm 4102 (Kapitel 5.2.7) darf die Stahltemperatur im Brandfall an keiner Messstelle die kritische Temperatur von 500 °C überschreiten. In der ASTM E119-12 [N3, Kapitel 8.7.6.3]. beträgt die kritische Temperatur 427 °C. Während in Deutschland nicht unter Gebrauchslast getestet wird, erfolgen die Prüfungen in den USA sowie in diversen anderen Ländern unter Gebrauchslast. Durch S&P wurden Brandversuche für das S&P ARMO-System an der EMPA Dübendorf/CH und im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH ausgeführt.

10.1 Versuche an der EMPA Dübendorf/CH

An der EMPA Dübendorf/CH [P24] wurde die kritische Temperatur des S&P Carbongitters untersucht. Aus dem S&P ARMO-mesh L500 wurden die Carbonfaserovinge in Längsrichtung ausgeschnitten. Danach erfolgte eine ein-axiale Zugbelastung nach Lagerung bei hoher Temperatur während 30 Minuten. Bild 29 zeigt den Heizofen.



Bild 29: Rohofen

Die Gesamtlänge der Carbonprüflinge betrug ungefähr 1.6 m. Lediglich ein mittleres Stück über eine Länge von ca. 40 cm wurde im Rohrofen der Hitze ausgesetzt. Die Ende der Carbonrovinge wurden beim Aufheizen ausserhalb des Ofens bei Raumtemperatur gehalten.

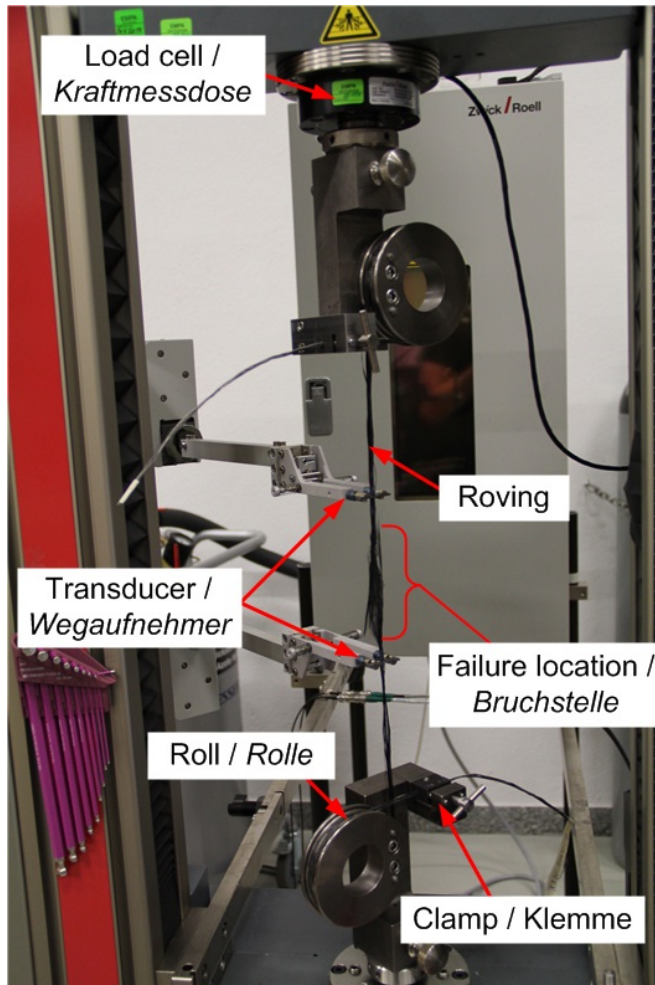


Bild 30: Versuchsaufbau

Bild 30 zeigt den Versuchsaufbau. Die Carbonrovinge wurden an beiden Enden dreimal um Rollen gewickelt und in die Spannvorrichtung eingeklemmt. Die Zugkraft wurde weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/Min. aufgebracht.

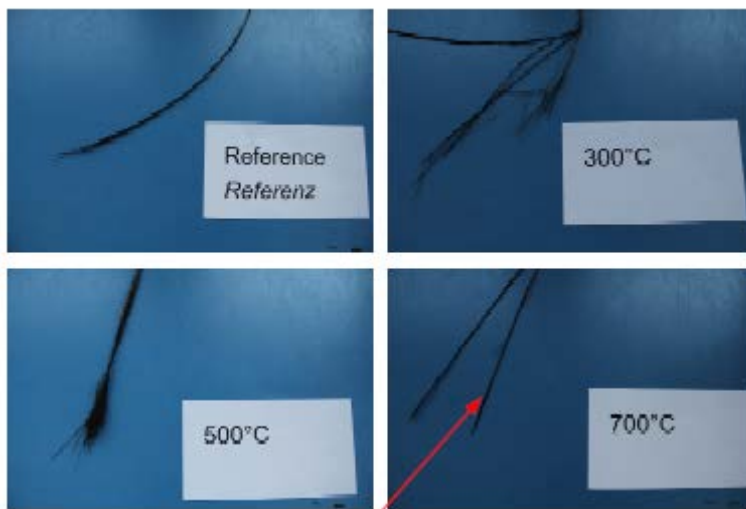
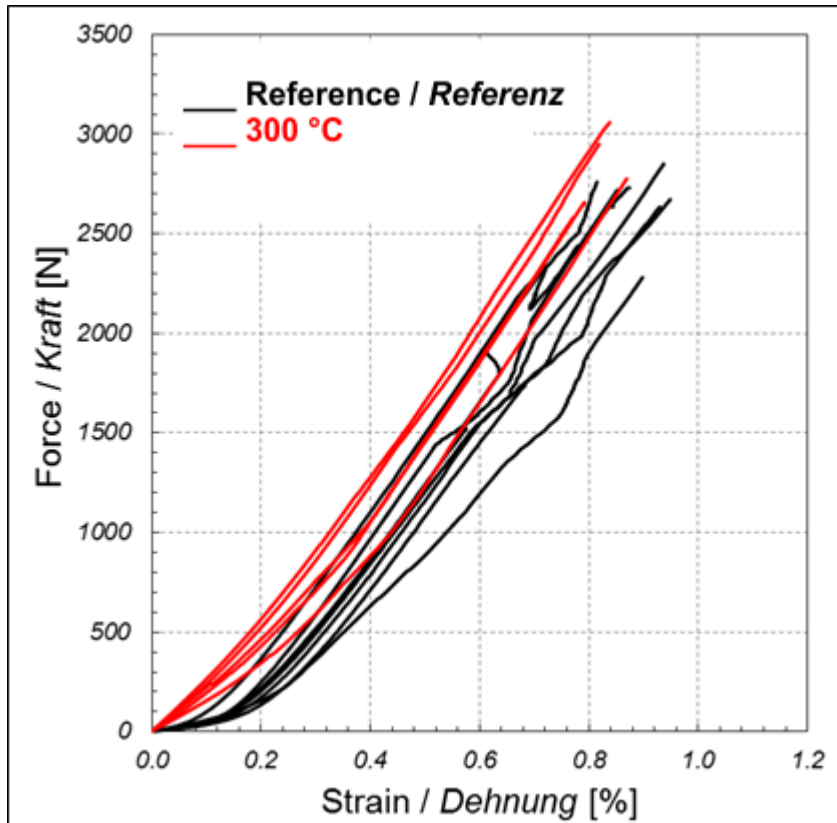


Bild 31: Prüflinge nach Versuch

Bild 31 zeigt die Prüflinge nach dem Versuch sowie die Versagensstelle (roter Pfeil). Infolge Hitzeeinwirkung schwindet die Beschichtung des Carbonrovings im aufgeheizten Bereich. Im Zugversuch ist entsprechend eine zusätzliche Vordehnung erforderlich. Der ein-axiale Zugversuch erfolgte im abgekühlten Zustand bei Raumtemperatur (22 °C). Das Aufheizen während 30 Minuten erfolgte bei Temperaturen von 300, 500, 700 und 1000 °C. Nebst den aufgeheizten Prüflingen wurde zusätzlich ein Referenzroving geprüft.



Grafik 13: Kraft-/Dehnungskurve

Die Kraft-/Dehnungskurve (Grafik 13) zeigt den Vergleich des Referenzrovings mit dem Roving, welches bei 300 °C aufgeheizt wurde. Ein Abfall des Zug E-Modul ist nicht erfolgt. Die Reduktion der Zugfestigkeit ist klar ersichtlich (Tabelle 12 / Grafik 14).

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

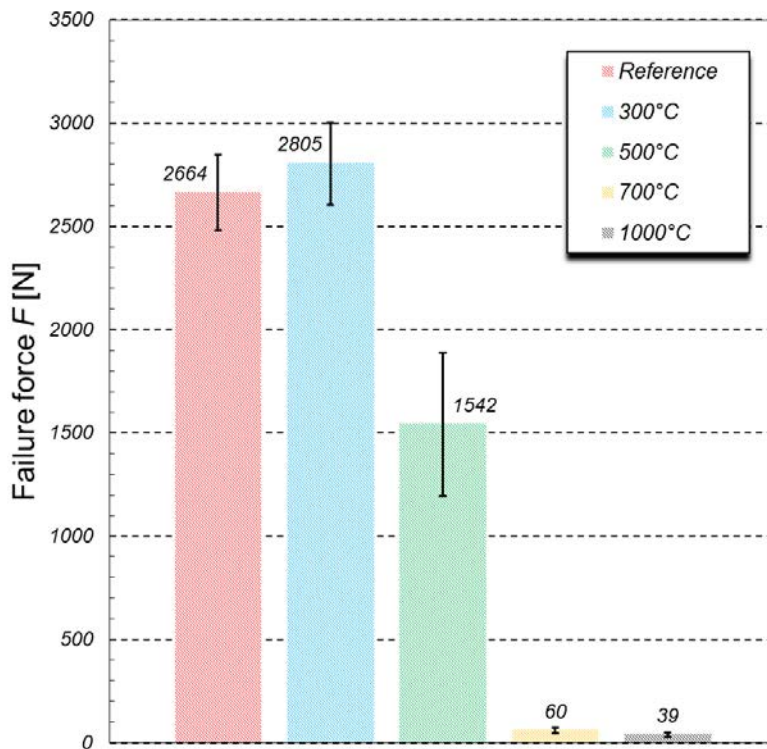


Tabelle 12 / Grafik 14: Mittelwerte der maximalen Zugfestigkeit

Resultate / Zusammenfassung Versuche EMPA/CH

Die Versuche am der EMPA Dübendorf/CH zeigen deutlich, dass 30 Minuten heizen unter 300 °C einen leichten Anstieg von ca. 5 % der mittleren maximalen Zugkraft zur Folge hat (Anstieg von 2664 auf 2805 N). Infolge der zusätzlichen Vordehnung der geheizten Rovinge ist die Bruchdehnung bei allen Serien etwa gleich. Die Steifigkeit (E-Modul) ist somit für den Referenz- sowie die aufgeheizten Rovinge praktisch identisch. Eine Erhöhung der Temperatur auf 500 °C bringt einen mittleren Kraftabfall im Vergleich zu den Referenzversuchen von 1122 N mit sich, gleichbedeutend mit einem Traglastverlust von 43 %. Da das S&P ARMO-mesh im Bemessungszustand bei ca. 20 % der theoretischen Bruchlast des Carbonrovings (800 N/mm²) eingesetzt wird, ist dieser Traglastverlust im Brandfall nicht entscheidend. Entsprechend wird durch den Hersteller empfohlen, als kritische Temperatur für das S&P ARMO-mesh, 500 °C zu verwenden.

10.2 Brandversuche im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH

Um hohen Brandbelastungen beispielsweise im Tunnelbau standzuhalten, werden Brandschutzmörtel mit speziellen Aggregaten (Vermiculit oder andere) sowie Spezialzementen angeboten. Solche Produkte halten den Brandbelastungen nur Stand, wenn der Traggrund Beton den Belastungen ebenfalls standhalten kann. Bild 32 zeigt eine Abplatzung des Traggrundes welche mit einem Spezialmörtel geschützt wurden. Damit Abplatzungen im Traggrund vermieden werden, kann im Brandversuch der Beton des Traggrundes beispielsweise mit PP Fasern vergütet werden. Bild 33 zeigt die einwandfreie Oberfläche des Spezialproduktes, welches auf dem PP faservergüteten Beton appliziert wurde nach der Brandbelastung. Solche Resultate sind jedoch trügerisch. Nur in Ausnahmefällen sind bestehende Betonbauwerke, welche geschützt werden müssen, faservergütet.



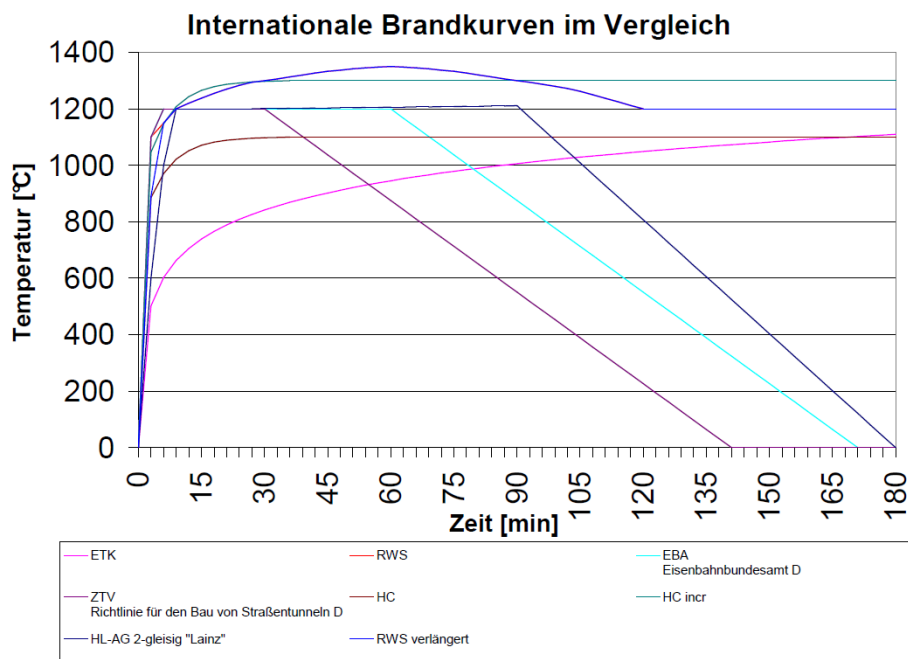
Bild 32: Abplatzung des Traggrundes



Bild 33: keine Abplatzung des Traggrundes da Beton mit PP Fasern vergütet

Entsprechend ist es wichtig, dass der Planer im Brandversuch den Traggrund sowie die gewählte Brandkurve auf die Gegebenheit des zu schützenden Objektes abstimmt.

Im Versuchsstollen Hagerbach VSH/CH [P22] erfolgte die Brandbelastung einer Betonplatte, welcher mit dem *S&P ARMO-System* verstärkt wurde. Im *S&P ARMO-System* werden herkömmliche Aggregate sowie ein normaler Portlandzement verwendet. Gemäss unterschiedlichen europäischen Normen stehen verschiedene Brandkurven (*Grafik 15*) je nach Einsatzgebiet, beispielsweise Brand im allgemeinen Hoch- und Tiefbau oder Tunnelbau zur Verfügung.



Grafik 15: Internationale Brandkurven

Im VSH/CH erfolgte die Prüfung gemäss Einheits-Temperatur-Kurve (ETK) und RWS Kurve. Die ETK Kurve wird in Europa normalerweise im allgemeinen Hoch- und Tiefbau verwendet. Die Brandbelastung am VSH/CH nach ETK erfolgte im Versuch während 120 Minuten. Die RWS Kurve wird üblicherweise in den Niederlanden für Tunnelbauten unterhalb des Meeresspiegels angewendet. Die Brandbelastung am VSH/CH nach RWS erfolgte im Versuch während 60 Minuten. Im Prüfkörper war die Restfeuchtigkeit bei 4 % limitiert.

Versuchsaufbau

Eine Stahlbetonplatte der Spannweite 2.0 m sowie der Breite von 0.95 m und Dicke von 0.2 m wurde hergestellt. Die bestehende Innenbewehrung aus Stahl (5 Ø 8 mm) wurde 3 cm mit Beton überdeckt. Danach erfolgte der hydromechanische Abbau um 2 cm. Die verbleibende Überdeckung der Stahleinlage betrug somit 1 cm. Danach wurde das S&P ARMO-System wie folgt appliziert:

- 1 cm S&P ARMO-crete w im Nassspritzverfahren gespritzt
- 2 Lagen S&P ARMO-mesh 200/200 wurden in die erste Spritzmörtel-Lage eingearbeitet
- 2 cm Ueberdeckung der S&P ARMO-mesh Lagen mit S&P ARMO-crete w im Nassspritzverfahren

Somit:

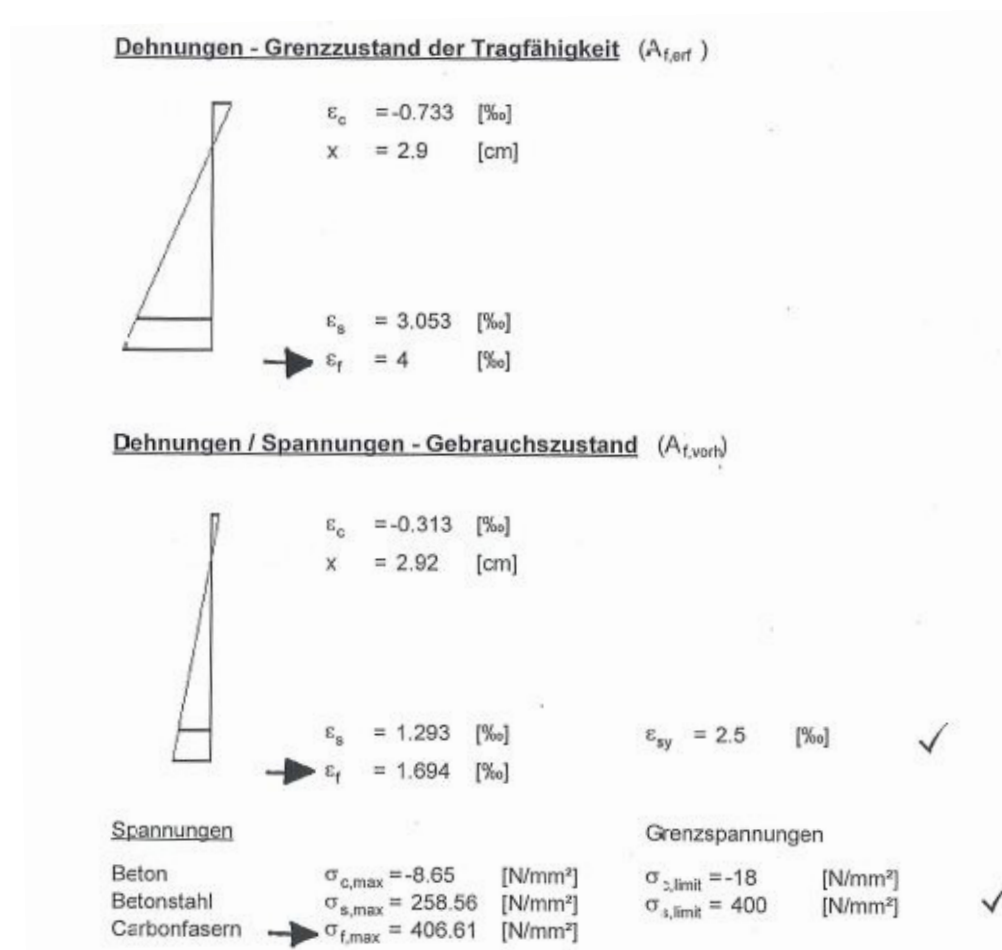
Überdeckung der Bewehrung:	Stahl	total 4 cm
	Carbon	total 2 cm

Der Brandversuch erfolgte unter der Gebrauchslast (Bilder 34 / 35):

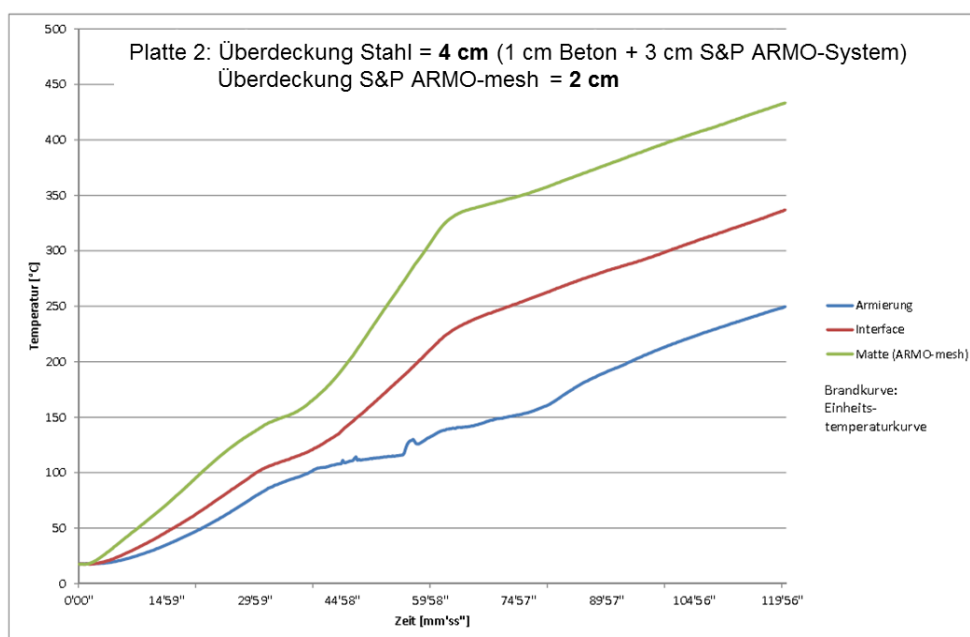


Bilder 34 / 35: Gebrauchslast beim Versuch

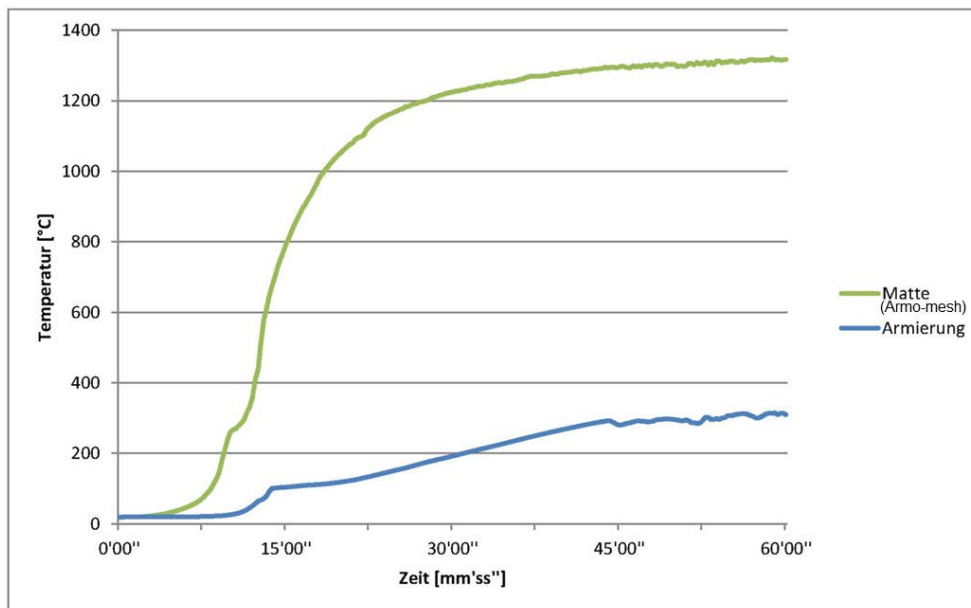
Als Gebrauchslast wurden zwei Einzellasten von je 24 kN aufgebracht. Das Bruchmoment im Grenzzustand (Eigengewicht Platte sowie Einzellasten) betrug 27.2 kNm. Das entsprechende Biegemoment unter Gebrauchslast betrug 18.3 kNm. Die Spannungen und Dehnungen der verstärkten Platte im Grenz- sowie Gebrauchszustand wurden mit der Bemessungssoftware *ARMO-flexion* ermittelt und sind nachfolgend aufgezeigt:



Grafik 16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen in der Lage der Stahl- sowie der Carbonbewehrung.



Grafik 16: Resultate Brandversuche ETK Kurve VSH/CH



Grafik 17: Resultate Brandversuche RWS Kurve VSH/CH

Resultate:

Nach 120 Minuten ETK Brandbelastung unter Gebrauchslast betrug die Temperatur im S&P ARMO-mesh (Matte) 440 °C und im Bewehrungsstahl 250 °C. Die kritische Temperatur wurde weder im Carbongitter noch im Bewehrungsstahl erreicht.

Nach 60 Minuten RWS Brandbelastung unter Gebrauchslast betrug die Temperatur im S&P ARMO-mesh (Matte) 1'300 °C und im Bewehrungsstahl 300 °C. Die kritische Temperatur von 500 °C (DIN) wurde im Bewehrungsstahl nicht erreicht.

10.3 Beurteilung der Brandversuche

In Anlehnung an FRP Verstärkungen sind für die Beurteilung zwei Fälle möglich:

Fall 1:

Bei einem tiefen Verstärkungsgrad mittels S&P ARMO-System beträgt die Restsicherheit beim Versagen der ARMO-Verstärkung > 1.2 . In diesem Falle wird das S&P ARMO-System einerseits für die Erhöhung der Sicherheit im Bruchzustand und andererseits als zusätzlicher Brandschutz für die Innenbewehrung aus Stahl appliziert. Für die Beurteilung im Brandfall ist die kritische Temperatur in der Stahlbewehrung massgebend.

Fall 2:

Bei einem hohen Verstärkungsgrad mittels S&P ARMO-System beträgt die Restsicherheit beim Versagen der ARMO-Verstärkung < 1.2 . In diesem Falle wird das S&P ARMO-System für die Erhöhung der Sicherheit im Bruchzustand appliziert. Für die Beurteilung im Brandfall ist die kritische Temperatur im Carbongitter (S&P ARMO-mesh) massgebend.

11. Qualitätskontrolle S&P ARMO-mesh

Zur Qualitätskontrolle von Faserbewehrungen wird oft der Zugversuch am breiten Streifen nach EN ISO 10319 angewendet. Grundsätzlich ist dieser Versuch für spröde Materialien wie die Carbonfaser, nicht geeignet. Da die Carbonfaser im S&P ARMO-mesh mit einem amorphen Silikastaub beschichtet ist, liegen feine Körner zwischen Klemme und Carbonroving. Dies führt zu punktuellen Belastungen der Filamente, welche sich an der Rovingoberfläche befinden. Der Roving versagt entsprechend frühzeitig. Eine Qualitätskontrolle am fertigen, beschichteten S&P ARMO-mesh, nach EN ISO 10319 ist somit nicht möglich. Die Qualitätskontrolle des S&P ARMO-mesh erfolgt am imprägnierten Carbonstrang. Der Carbonstrang in Längs-, oder Querrichtung, besteht aus einem oder mehreren Rovingen, je nach Produktionsart des Gitters. Infolge der vorgängigen Imprägnierung des Stranges mit Epoxy ist die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Carbonfilamenten im Strang gewährleistet. Der Klemmbereich im Zugversuch muss speziell ausgebildet werden damit ein kontinuierlicher Anpresspunkt auf den Carbonstrang über die gesamte Klemmlänge entsteht (*Bild 36*). Im Prüfbericht Nr. 461'199 [P26] an der EMPA Dübendorf/CH wurden die folgenden, mittleren Zugkräfte gefunden:

Faserstrang bestehend aus 1 x 1600 tex	2759 N
Faserstrang bestehend aus 2 x 1600 tex	4938 N

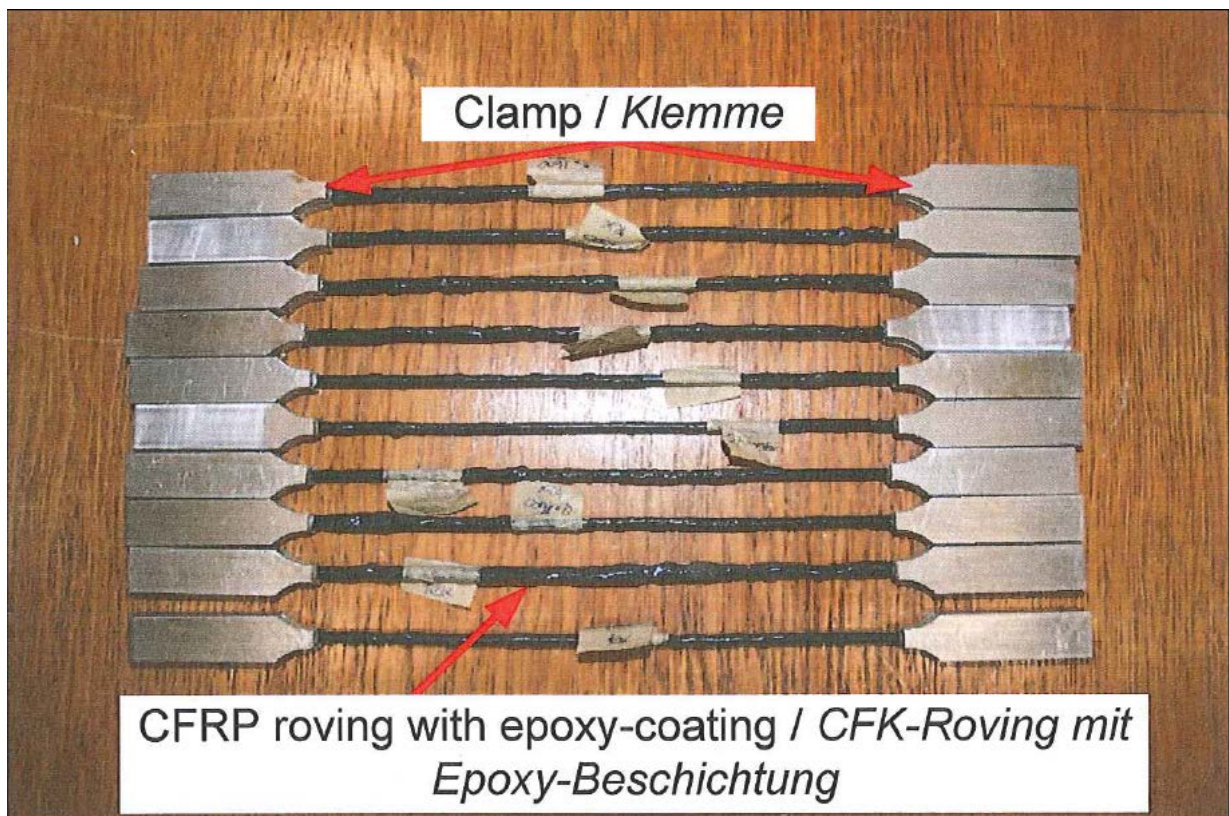


Bild 36: Faserstränge des S&P ARMO-mesh epoxy-beschichtet mit Klemmdetail

In Tabelle 13 werden die Resultate von Zugversuchen ausgeführt an der EMPA Dübendorf/CH mit den theoretischen Faserkennwerten des *S&P ARMO-mesh L500* verglichen.

<i>S&P ARMO-mesh L500</i>	Zugkraft / Strang (2 Rovinge/Strang)	Zugkraft / m (58.5 Stränge/m)	Vergleich %
theoretische Zugkraft der C-Faser	7718 N	450 kN/m	100 %
Zugkraft am Halbfabrikat mit Epoxy beschichtet EMPA/CH	4938 N	288 kN/m (58.5 x 4938 N)	64 %
Zugkraft bei Raumtempe- ratur des Fertigprodukt mit Silikastaub EMPA/CH	2664 N (Kapitel 10.1 Tabelle 12)	155 kN/m	34 %
Zugkraft bei 500 °C des Fertigprodukt mit Silikastaub EMPA/CH	1542 N (Kapitel 10.1 Tabelle 12)	90 kN/m	20 %
Zugkraft für Bemessung mit ~ 800 N/mm ²	1435 N	84 kN/m	19 %
Zugkraft unter Gebrauchs- lasten mit ~ 450 N/mm ²	807 N	47 kN/m	10 %

Tabelle 13: Vergleich Zugkraft S&P ARMO-mesh

Abschliessend ist zu bemerken, dass in der Anwendung des *S&P ARMO-Systems* die Krafteinleitung über die gesamte Faserlänge erfolgt und somit keine Probleme im Klemmbereich entstehen. Unter Berücksichtigung dieser Argumentation ist klar ersichtlich, dass auch beim silika-beschichteten Roving eine genügende Sicherheitsreserve im Bruchzustand vorhanden ist.

12. Publikationen/Prüfberichte [P] sowie Normhinweise [N]

S&P In-house Versuch

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

Zugversuche / Endverankerung FH Fribourg/CH

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

Plattenbiegeversuche VSH/CH

- P10 Prüfberichte Nr. 20100468A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung, endverankert)
Plattenbiegeversuch, 09.04.2010, VSH/CH
- P19 Prüfbericht Nr. 20101027 S&P ARMO-mesh 200/200
Plattenbiegeversuch, 07.05.2010, VSH/CH
- P20 Prüfbericht Nr. 20093882A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung)
Plattenbiegeversuch, 09.04.2010, VSH/CH

Brandversuche VSH/CH und 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

Zugversuche an CFK-Rovingen mit Epoxy-Beschichtung EMPA/CH

- P26 Prüfbericht Nr. 461'199

Biegezugverstärkung schlanker Stahlbetonplatten mit Carbongittern FH Fribourg/CH

- P15 Renforcement de dalles en beton 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

Erdbeben-Verstärkung von Mauerwerk mit S&P Systemen FH 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, octobre 2010, FH Fribourg/CH

- N1 SIA 262 (2013) Betonbau, Schweizer Norm SN 505 262, SIA, Zürich
- N2 SIA 260 (2013) Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Schweizer Norm SN 505
260, SIA, Zürich
- N3 ASTM E119-12, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and
Materials, American Society for Testing and Materials (ASTM)