

re-fer AG
Oelistrasse 6
6440 Brunnen
Switzerland



memory-steel

Inhalt: Material- und Tragwerksverhalten, Bemessung
V1.0

Datum: Oktober 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	2
2	Materialverhalten.....	3
2.1	Zugverhalten.....	3
2.2	Aktivieren.....	3
2.3	Relaxation.....	7
2.4	Korrosion.....	8
2.5	Ermüdung.....	9
2.6	Verhalten unter hoher Temperatur.....	9
3	Verankerungen.....	9
3.1	Verankerung für re-plate.....	9
3.1.1	Verankerungstyp und Versuchsaufbau.....	9
3.1.2	Resultate.....	11
3.1.3	Brandverhalten X-CR.....	11
3.2	Verankerung für re-bar.....	12
3.2.1	Versuchsaufbau.....	12
4	Balkenversuche.....	13
4.1	Balken mit 're-plate'.....	13
4.1.1	Versuchskörper.....	13
4.1.2	Verstärkung.....	14
4.1.3	Statische Belastungsversuche.....	15
4.1.4	Resultate.....	16
4.2	Balken mit 're-bar' (Prototyp).....	18
4.2.1	Versuchskörper und Verstärkung.....	18
4.2.2	Statische Belastungsversuche und Resultate.....	19
5	Bemessung.....	21
5.1	Einführung.....	21
5.2	Bauzustand.....	21
5.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	21
5.4	Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	21
5.4.1	re-plate.....	21
5.4.2	re-bar.....	23
6	Referenzen.....	24

1 Einführung

Die Firma re-fer AG vertreibt Verstärkungssysteme zur Tragwerksertüchtigung mittels einer neuartigen Formgedächtnislegierung auf Stahlbasis, dem 'memory-steel'. Diese Legierung hat die Eigenschaft, sich nach einer anfänglich permanent hervorgerufenen Verformung wieder zum Teil in ihren Anfangszustand zusammenzuziehen. Dieser Formgedächtniseffekt wird durch Hitzezufuhr im Bereich von 150 bis 200°C ausgelöst. Die Produkte der Firma re-fer AG, welche im Werk vorgedehnt und auf die Baustelle geliefert werden, sind in zwei Kategorien unterteilt:

- ‚re-plate‘ ist eine 120 mm breite und 1.5 mm dicke Lamellen, welche in variablen Längen appliziert werden kann. Die Lamelle wird an beiden Enden mittels einem Direktbefestigungssystem der Firma Hilti gegen das Betontragwerk verankert und anschliessend erwärmt. Es entsteht somit ein externes vorgespanntes Zugband ohne Verbund zur Biegezugverstärkung.
- ‚re-bar‘ ist ein gerippter Bewehrungsstab mit einem Durchmesser von 12 mm. Dieser kann in einer ersten Variante als Biegezugverstärkung in einen vorgängig applizierten und nach Aktivieren zementös verfüllten Schlitz appliziert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Stab in eine Schicht aus Ausgleichsmörtel oder Spritzbeton zu legen. Neben der Biegezugtragfähigkeit kann ebenfalls das Schubtragverhalten mit dieser Methode verbessert werden. Die Variante ‚re-bar‘ agiert als im Verbund liegendes Vorspannglied.

Im Folgenden werden die wichtigsten Materialparameter sowie das Tragwerksverhalten mit Verstärkungselementen aus dem ‚memory-steel‘ vorgestellt. Die Applikationsschritte können den speziell dafür vorgesehenen Broschüren entnommen werden. Versuchsergebnisse der über 15-jährigen Entwicklung der Legierung an der Empa, der anschliessenden Prototypproduktion sowie die Herstellung auf Industrielevel ist in mehreren Prüfberichten und wissenschaftlichen Fachartikeln dokumentiert [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15].

2 Materialverhalten

2.1 Zugverhalten

Das einaxiale Zugverhalten wurden in mehreren Versuchen mittels Kraft- und Dehnmessung an der Empa untersucht. Spannungs-Dehnungskurven für re-plate und re-bar können den folgenden Kurven in Fig. 1 entnommen werden. In Bezug auf re-plate sowie re-bar (mit einem Durchmesser $\varnothing 16$ mm) gilt es, neben der Zugfestigkeit R_m von >900 MPa und höher besonders die sehr hohe Duktilität mit einer Bruchdehnung ε_u von über 30% hervorzuheben. re-bar mit einem Durchmesser $\varnothing 12$ mm zeigt eine geringere Bruchdehnung sowie Zugfestigkeit auf. Die Ursache liegt in einer nicht angemessenen Temperaturspanne beim Walzen. Dieses wird aktuell untersucht und für die nächste Walzung optimiert. Die Versuche sind in den Empa Prüfberichten [2],[16],[17] hinterlegt. Mechanische Eigenschaften beider Produkte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

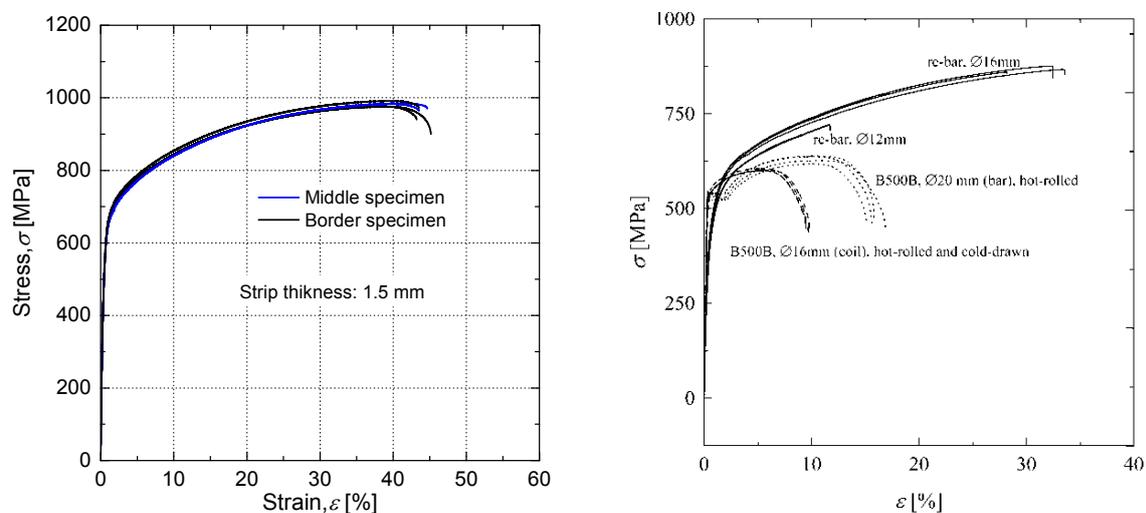


Fig. 1 Spannung-Dehnung für re-plate (links) [13] und re-bar (rechts) [14]

2.2 Aktivieren

Grundsätzlich wird zwischen Aktivierungsversuchen in einer sogenannten ‚Zwick‘-Maschine inklusive Klimakammer und solchen unter Umgebungstemperaturen unterschieden. Bei ersteren wird den die Proben auf eine gewünschte Längenänderung vorgedehnt und anschliessend in die Versuchsmaschine eingebaut. Das Aktivieren erfolgt durch kontinuierliches Aufheizen und Abkühlen (ca. $1^\circ\text{C}/\text{min}$) der Kammer, in welcher die Probe sich befindet (siehe Fig. 2). Die Verhinderung der Rückverformung erfolgt durch eine spezielle Regelung, bei welcher die Anfangsdehnung der Probe durchgehend konstant bleibt und ebenfalls eventuelle sekundären Effekte wie Ausdehnung des Kontrollweggebers selbst kompensiert werden. Bei einer zweiten Aktivierungsmöglichkeit werden die Proben zwischen zwei Stahlstützen mittels einer Klemmvorrichtung (re-plate) oder eines Gewindes und dazugehöriger Mutter verankert, siehe Fig. 2 und Fig. 3. An einer Seite wird zusätzlich eine Kraftmessdose installiert. Das Aufheizen erfolgt hier durch eine spezielle Widerstandsheizung, welche die Proben mittels Stromzufuhr sehr schnell (30 bis 60 Sekunden) aufheizt. Das Abkühlen erfolgt hier unter Raumtemperatur. re-plate Proben (Breite 10 mm) werden in beiden Einrichtungen geprüft, re-bar Proben generell in der Stützeinrichtung aufgrund der Kraftlimitierung von 20 kN in der Zwick-Prüfmaschine mit Klimakammer.

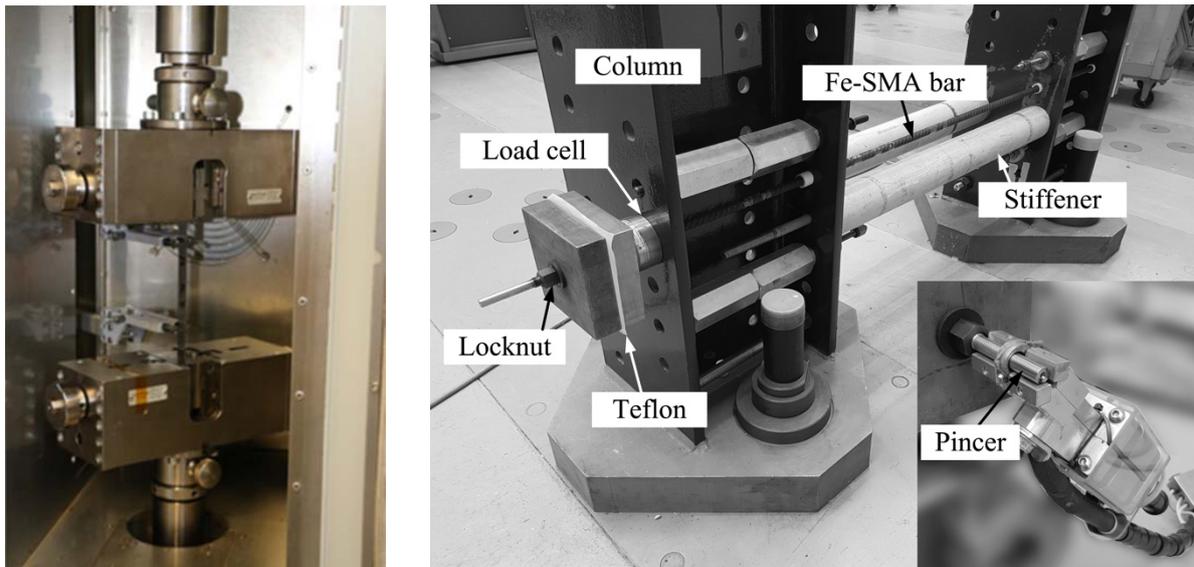


Fig. 2 Einrichtung für Aktivierungsversuche: Klimakammer mit re-plate Probe (links) und Stützenkonstruktion mit Kraftmessdose und re-bar Probe (rechts). [13], [14]

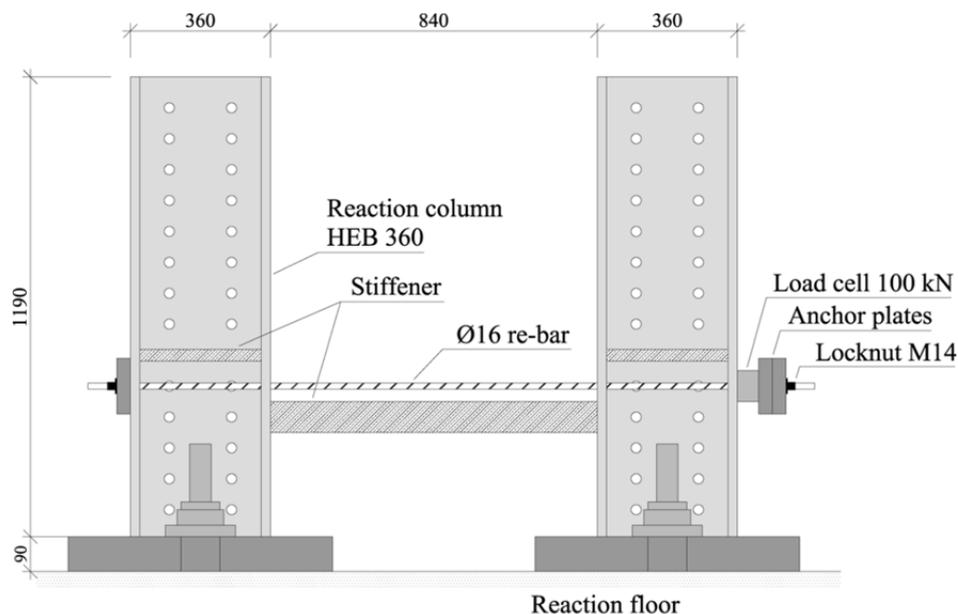


Fig. 3 Skizze des Stützaufbaus für Aktivierungsversuche [14]

Das Vordehnen sowie die Aktivierungsversuche an den Produkten ‚re-plate‘ und ‚re-bar‘ (Ø16 mm) sind in den folgenden Fig. 4 und Fig. 5 präsentiert. Sämtliche Versuchs- und Aktivierungsdetails können den referenzierten Empa Prüfberichten [1],[2] sowie diversen Fachartikeln [13],[14],[18] entnommen werden.

‚re-plate‘ wird grundsätzlich bis auf 2% vorgedehnt. Die erzielte Anfangsvorspannung (vor Relaxation) $\sigma_{p,0}$ bei einer Aktivierungstemperatur von 160°C liegt bei 320 MPa. Grössere Vordehnungen bis hin zu 10% erzeugen keine höheren Vorspannungen [13]. Bei ‚re-bar‘ sind andererseits höhere Vordehngrade notwendig. Dies wird u.a. in Fig. 5 mit einem Probendurchmesser von Ø16 mm deutlich: Während eine Vordehnung von 2% bei einer Aktivierungstemperatur von 170°C lediglich eine Vorspannung von 125 MPa hervorruft, sind es bei 4% bereits 240 MPa. Ein weiteres Vordehnen auf 6% bringt ein zusätzliches Mass an Vorspannung auf 250 MPa. Die gleichen Vorspannwerte gelten für

einen Durchmesser $\varnothing 12$ mm. Wie in Fig. 6 gezeigt, erzeugt eine höhere Aktivierungstemperatur ebenfalls höhere Vorspannwerte. Allerdings deuten beide gezeigten Grafiken an, dass eine maximale Vorspannung bei einer Aktivierungstemperatur zwischen 300 und 400°C erreicht ist. Weitere Versuche mit höheren Temperaturwerten wären notwendig, um dies zu bestätigen. Allerdings sind solche hohen Temperaturen aus mehrfacher Hinsicht schwierig umzusetzen und/oder praktisch nicht relevant:

- a) die Heizvorrichtung muss imstande sein, hohe Temperaturen zu erzeugen.
- b) Versuchseinrichtungen müssen die hohen Temperaturen aufbringen und aushalten können. Die Zwickmaschine ist begrenzt auf 200°C, der Stützenversuchsstand durch die maximal anwendbare Temperatur auf die Kraftmessdosen.
- c) Der darunterliegende oder sich darum befindende Beton oder Mörtel darf durch die hohen Temperaturen nicht beschädigt werden. Werte von über 250°C sind hierfür nicht zu empfehlen.

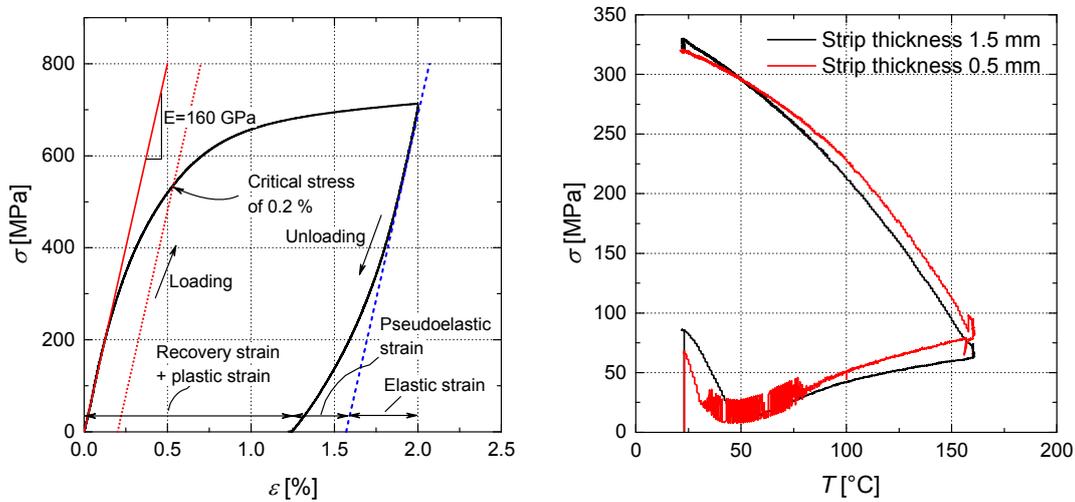


Fig. 4 Vordehnen auf 2% (links) und Aktivieren einer re-plate Probe in der Klimakammer (rechts) [13]

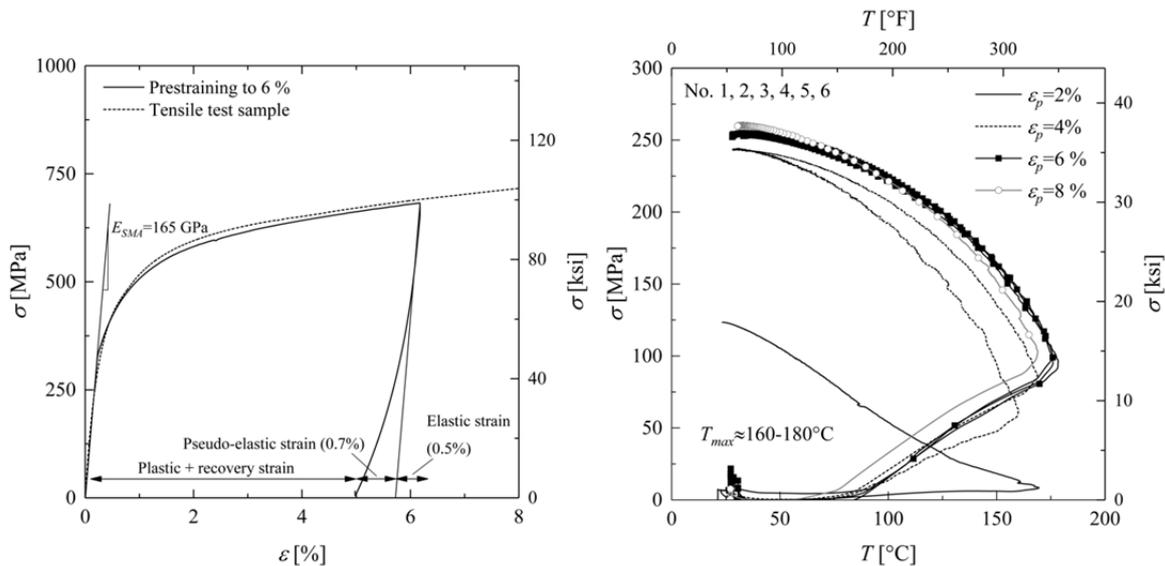


Fig. 5 Vordehnen auf 6% (links) und Aktivieren von re-bar Proben $\varnothing 16$ mm in der Stützeinrichtung (rechts) [14]

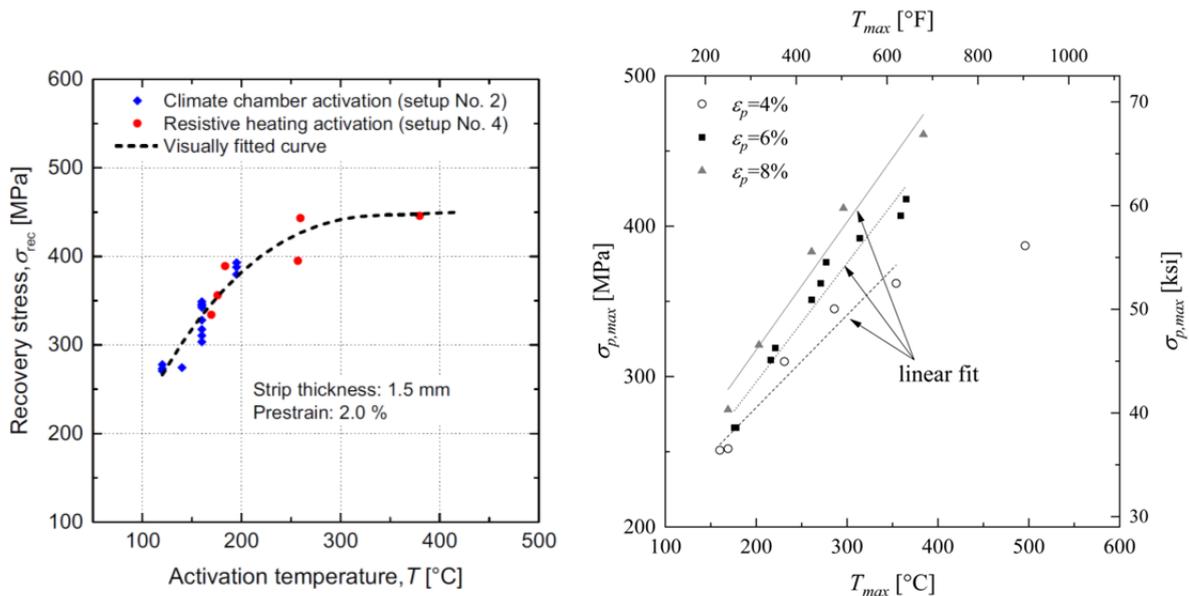


Fig. 6 Vorspannung ('recovery stress') infolge maximaler Aktivierungstemperatur für re-plate imt 2% Vordehnung (links) und re-bar mit verschiedenen Vordehnwerten (rechts) [13],[14]

Für das Erfassen des Tragverhaltens der Struktur ist es wichtig, jenes des memory-steel nach dem Vorspannen zu kennen. Fig. 7 zeigt das Vordehnen auf 2% (schwarze Linie) sowie einen einen Aktivierungsversuch auf 160°C (rote Linie) an einer re-plate Probe mit anschließendem Zug (blaue Linie). Der E-Modul E_2 nach dem Aktivieren, also jener welche das Last-Durchbiegungsverhalten einer mit memory-steel vorgespannten Struktur beeinflusst, beträgt 75 GPa [13]. Erste Versuche mit re-bar Proben sind in [19] zusammengefasst.

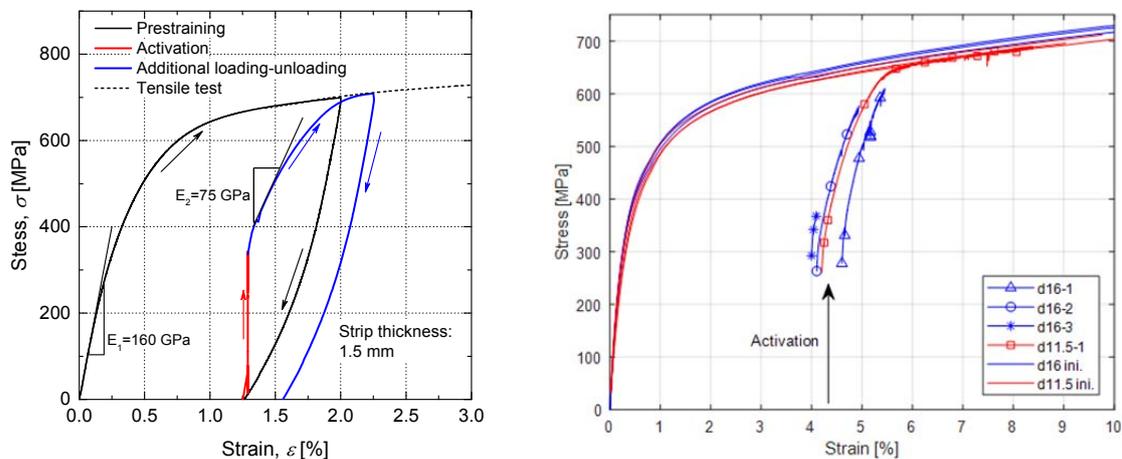


Fig. 7 Zugverhalten nach dem Aktivieren (blaue Kurve) von einer re-plate Probe (links) [13] und re-bar Probe (rechts) [19]

Tabelle 1 Zusammenfassung der mechanischen Eigenschaften auf Zug sowie Aktivierung nach Vordehnen (*Aktivierungstemperatur von 160°C mit 2% Vordehnung für re-plate und 6% für re-bar / **wird zukünftig höher ausfallen)

	R_m (MPa)	ϵ_u (%)	E_1 (GPa)	* $\sigma_{p,0}$ (MPa)	E_2 (GPa)
re-plate	>900	35	160	320	75
re-bar Ø 12mm	>700	**10	165	250	80
re-bar Ø16 mm	>850	30	165	250	80

2.3 Relaxation

Die Erfassung der Relaxation über die Zeit wurde an die gängigen Prüfnormen [20] angelehnt. Die Proben wurden nach dem Vordrehen verankert und aktiviert. Die Messung der Kraft erfolgte über einen Zeitraum von mindestens 1'000 Stunden. Die re-plate Probe wurde in der Empa Prüfhalle in der Stützenkonstruktion getestet, die re-bar Proben in einer speziell angefertigten Rohrkonstruktion (in Fig. 8 dargestellt), welche sich in einem Prüfraum mit kontrollierter Temperatur (20°C) befindet, geprüft. Die Kraftmessung über die Zeit erfolgte mit einem Wireless-Monitoring System der Firma decentlab [21].

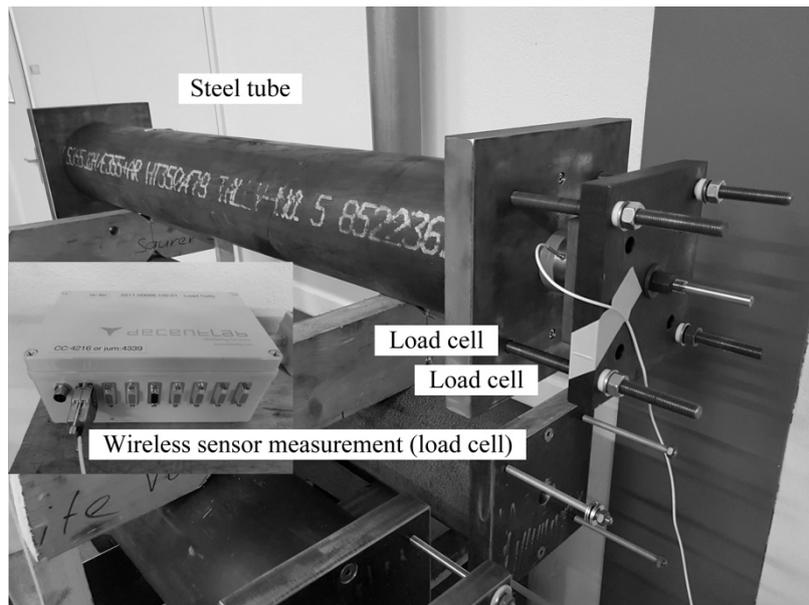


Fig. 8 Prüfvorrichtung für die Relaxationsversuch unter kontrollierten Bedingungen (20°C) [14]

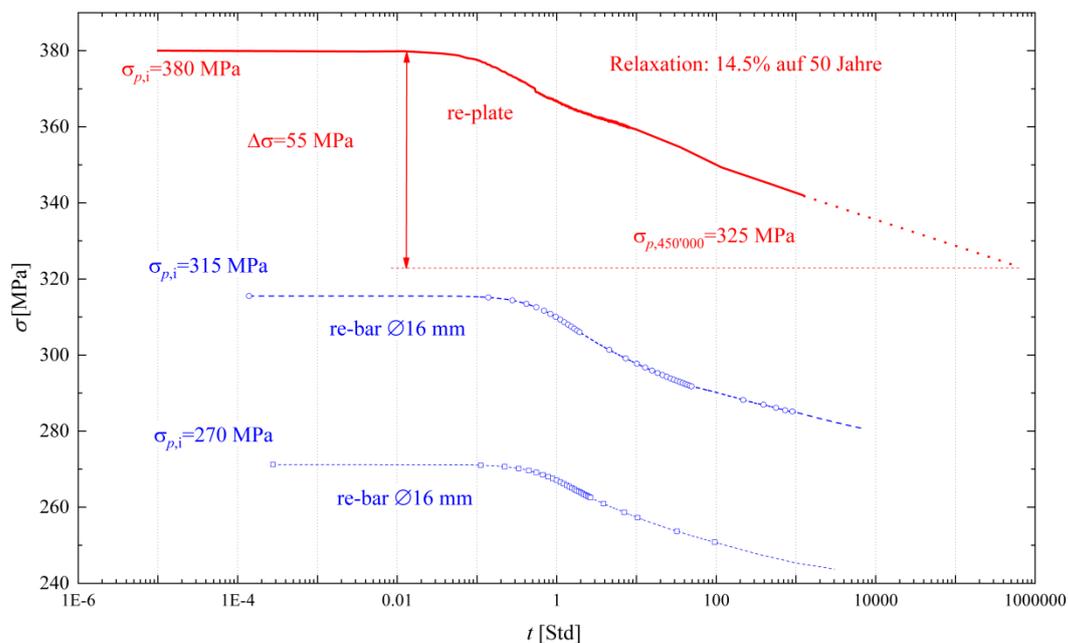


Fig. 9 Spannungsrelaxation für re-plate (rot) und re-bar (grau) / Zeitachse in logarithmischer Unterteilung

Die Versuchsergebnisse können der Fig. 9 entnommen werden. Die re-plate Probe wurde mit einer Anfangsspannung von 380 MPa geprüft, jene vom Produkt re-bar mit einem Anfangswert von 316 MPa

und 275 MPa. Bei allen Proben ist zu erkennen, dass sich ein starker Spannungsabfall innerhalb der ersten 100 Stunden einstellt. Anschliessend fällt die Relaxation deutlich geringer aus. Für die re-plate Probe kann mit einer linearen Verlängerung über die logarithmische Zeitachse eine Restspannung von 325 MPa nach 50 Jahren (ca. 450'000 Stunden) bestimmt werden. Dies stellt einen relativen Spannungsverlust von 14.5% dar. Bei der etwas tiefer angelegten Vorspannung beim re-bar zeigt die gleiche Prozedur einen Restwert von 275 MPa nach 50 Jahren, gleichbedeutend mit einem Verlust von 12.5%. Sämtliche Resultate sowie genaue Details zur Prüfung sind in den Empa Prüfberichten [1] und [2] sowie den Fachartikeln [13] und [14] dokumentiert.

2.4 Korrosion

Die Korrosionseigenschaften sowie das Materialverhalten gegenüber Wasserstoff-induzierter Spannungsrisskorrosion (SRK) wurde an der Empa anhand mehrerer Versuche untersucht. Für letztere wurden zwei vorgängig vorgedehnte re-plate Proben abermals in die Stützenkonstruktion eingebaut, aktiviert und zusätzlich weiterer Zugspannung ausgesetzt. Die vorgespannten Proben mit einem Spannungslevel von 413 MPa und 385 MPa wurden einer NH_4SCN Lösung mit geschlossenem Kreislauf (d.h. ohne Sauerstoffzufuhr) ausgesetzt (siehe Fig. 10). Das Verfahren ist an die ISO 15630-3 [22] angelehnt, mit dem Unterschied, dass das Spannungsniveau bei etwa 40% anstatt den vorgeschriebenen 80% der Zugfestigkeit liegt, sowie einer dehnungsgeregelten Versuchsdurchführung im Gegensatz zu einer gängigen Regelung mit konstanter Spannung. Die Reduzierung des Spannungsniveaus wurde gewählt angesichts der tieferen Auslastung der re-plate im Gebrauch im Vergleich zu Spannlitzen, welche im Normalfall auf 70 bis 80% ihrer Zugfestigkeit belastet sind. Es konnte eine Standzeit bis zum Bruch von 435 Stunden für die erste Probe mit einer Anfangsspannung von 413 MPa festgestellt werden. Der zweite Versuch mit einer Anfangsspannung von 385 MPa wurde nach 500 Stunden ohne Bruch beendet. Sämtliche Versuche sind im Empa Projektbericht [23] dokumentiert. Weitere Korrosionsversuche sind in [24] gezeigt.

Vergleichsuntersuchungen mit gängigen rostfreien Stählen konnten den memory-steel als gleichwertig zum Top12-Stahl einordnen, also einer Korrosionswiderstandsklasse 1 (KWK1) nach dem SIA-Merkblatt 2029 [25].

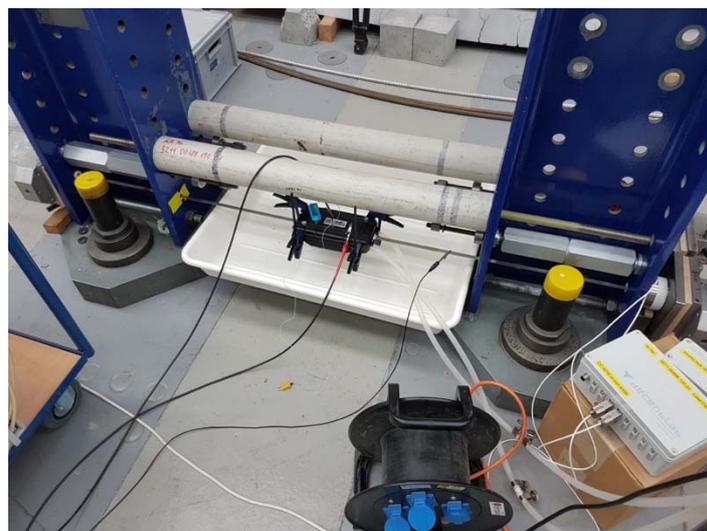


Fig. 10 Versuchseinrichtung für SRK Versuche an vorgespannter re-plate Probe

2.5 Ermüdung

Dehnungsgeregelte Ermüdungsversuche wurden an re-plate Proben durchgeführt. Hierfür wurden die Proben auf 2% vorgedehnt und anschliessend auf 160°C aktiviert. Nach der Aktivierung erfolgte eine dehnungsgesteuerte Ermüdung ($\Delta\varepsilon$ von 0.035 bis 0.1%), welche Spannungsunterschiede $\Delta\sigma$ von 60 bis 190 MPa hervorrufen. Nach $2 \cdot 10^6$ Zyklen konnte bei keiner der Proben ein Bruch festgestellt werden. Die Resultate sind im Fachartikel [15] präsentiert und kommentiert.

2.6 Verhalten unter hoher Temperatur

Das Verhalten unter erhöhter Temperatur wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der ETH Zürich untersucht [26]. Es wurden diverse Versuche unter verschiedensten Aktivierungsszenarien untersucht. Neben Zugversuchen unter erhöhter Temperatur wurden ebenfalls Standversuche mit konstanter Spannung oder konstanter Dehnung durchgeführt. Der Abfall der Zugfestigkeit von re-plate Proben (rote Punkte) bei erhöhter Temperatur ist in Fig. 11 zu beobachten. Die Reduzierung der Festigkeit erfolgt dem gleichen Schema wie beim herkömmlichen Stahl (schwarze Punkte). Bezüglich Brandschutzanforderungen und den relevanten Mindestüberdeckungen kann der memory-steel identisch zur konventionellen Stahlbewehrung behandelt werden.

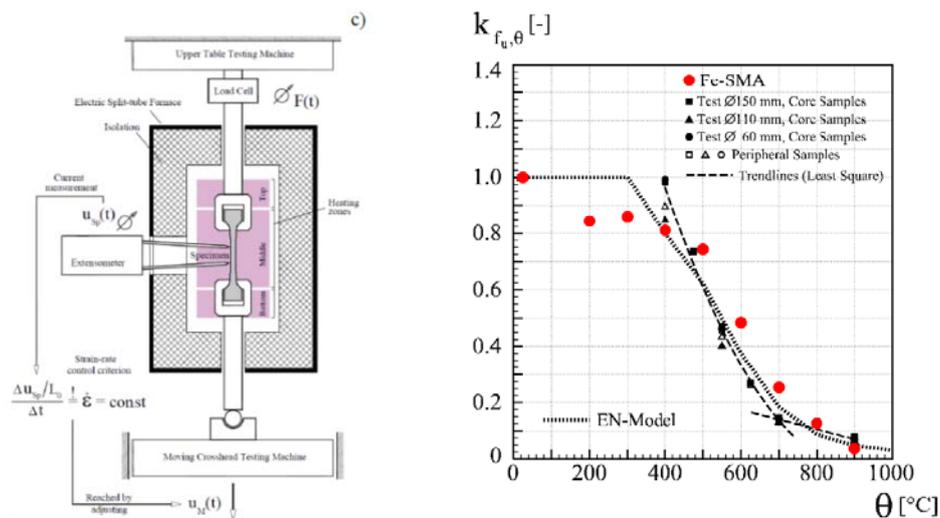


Fig. 11 Versuchseinrichtung für Versuche mit erhöhter Temperatur (links) und relativer Abfall der Zugfestigkeit bei erhöhter Temperatur (rechts)

3 Verankerungen

3.1 Verankerung für re-plate

3.1.1 Verankerungstyp und Versuchsaufbau

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur in Wien [27] wurden verschiedene Verankerungsmöglichkeiten für die re-plate Verstärkung untersucht. Fokus wurde auf eine einfache Installation, genügend hohe Steifigkeit bei der Aktivierung in Bezug auf Spannungsverluste sowie eine ausreichend hohe Verankerungskraft beim Bruch gelegt. Die effizienteste Variante ist eine

Direktbefestigung der Firma Hilti. Es wurden sowohl der Typ NPH2 sowie später der korrosionsbeständige X-CR 48 P8 S15 geprüft (siehe Fig. 12).



Fig. 12 X-CR 48 P8 S15 (links) und Direktbefestigung der Lamelle an den Beton (rechts)

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 13 gezeigt. Die re-plate wird mittels der Direktbefestigung am Betonblock befestigt und anschliessend bis zur maximalen Verankerungskraft belastet. Verformungen des Gesamtsystems wurden entweder mittels Bildkorrelation oder einfacher Wegmessung an der vordersten Nagelreihe (siehe Foto in Fig. 13) erfasst. Bei letzterer Variante wurden die Weggeber bei etwa 50 kN Belastungskraft (entsprechend etwa 330 MPa Zugspannung im Lamellenquerschnitt) abgebaut. Die Kraftmessung erfolgte bis zum Bruch mit einer Kraftmessdose im Bereich des Belastungszyinders. Der Nagelabstand beträgt 50 mm in Haupt- und Querrichtung. Der Randabstand bis zur Nagelachse betrug 25 mm.



Fig. 13 Abzugsversuch mit Messung des Schlupfes

3.1.2 Resultate

Die maximale Verankerungskraft wurde in jedem Fall durch Ausbruch eines Betonkegels oder durch Abscheren der Nägel erreicht. Fig. 14 zeigt das Kraft-Schlupf Verhalten einer 10 cm breiten re-plate mit 8 bzw. 10 Nägeln von jedem Typ. Die Versuche mit NPH2 wurden mittels Bildkorrelation überwacht, jene mit X-CR lediglich mit zwei Weggebern an der vordersten Nagelreihe. Bei beiden Varianten wurde bezüglich des Vorbohrens vom Beton mit Unterlass (Bohrloch 0.5 mm enger als der Nageldurchmesser selbst) gearbeitet.

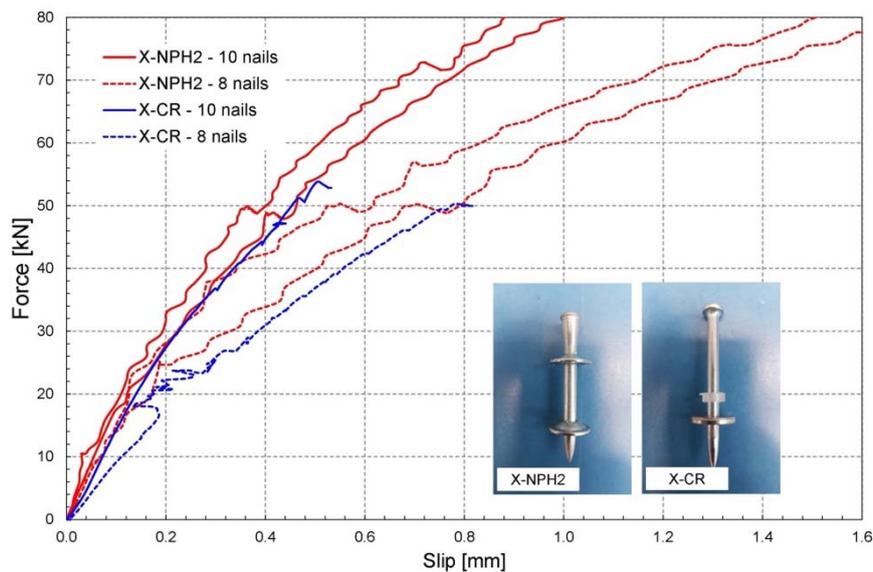


Fig. 14 Kraft-Schlupf Diagramm für die Abzugsversuche mit NPH2 und X-CR Nägeln

Grundsätzlich zeigen beide Variante die gleiche hohe Systemsteifigkeit auf. Bei einer Kraft von 50 kN betragen die Schlüpfen an der massgebenden Stelle für vorderste Nagelreihe lediglich 0.4 bzw. 0.8 mm. Die maximale Verankerungskraft lag bei jedem Versuch über 100 kN. Der Bruch erfolgte beim System mit den NPH2 Nägeln durch Ausreißen eines Betonkegels, bei den übrigen mit X-CR durch Abscheren der Nägel, beide dargestellt in Fig. 15. Die Betonqualität entsprach einem C45/55. In einer zukünftigen Versuchsserie werden ebenfalls schwächere Betone hinsichtlich der Bruchart des Systems einbezogen.

Die maximalen Verankerungskräfte können mit Hilfe der ETAG001 [28] für Betonausreißen („pry out“) oder Abscheren der Nägel („shear failure“) berechnet werden.

3.1.3 Brandverhalten X-CR

Bezüglich des Brandverhaltens haben Versuche an der Empa an den X-CR Nägeln [29] gezeigt, dass die Scherfestigkeit bei erhöhter Temperatur nur geringfügig abnimmt. Massgebendes Element bezüglich des Brandverhaltens ist die re-plate. Anhand der vorher gezeigten Resultate kann festgehalten werden, dass der Brandschutz analog zum konventionellen Bewehrungsstahl nach den SIA Richtlinien erfolgen kann.



Fig. 15 Ausreißen des Betonkegels bei NPH2 (links) und Abscheren der Nägel bei X-CR (rechts)

3.2 Verankerung für re-bar

3.2.1 Versuchsaufbau

Die Verankerung der re-bar Verstärkung im eingefrästen Schlitz wird zurzeit im Rahmen der Dissertation von Bernhard Schranz an der ETH Zürich untersucht. Hierfür wurden in einer ersten Phase einige Ausreißversuche an im Mörtel (SikaGrout 314/311) eingebetteten re-bar Proben durchgeführt. Einige Probekörper sind in Fig. 16 dargestellt. Die Versuche sind an die RILEM-Vorschläge [30] für die Erfassung der Verbundeigenschaften von Bewehrungsstahl angelehnt.



Fig. 16 Probekörper für die Ausreißversuche mit eingeschlitztem re-bar im Grout Resultate

Die Fotos in Fig. 17 zeigen Beispiele von Bruchbildern des beschriebenen Systems. Eine Bemessungsverbundspannung f_{bd} von 6 MPa kann nach einer Aushärtezeit des Mörtels von 1 Tag bei ausreichender Überdeckung von 10 mm zurückbehalten werden.



Fig. 17 Bruchbilder (links und Mitte) und Erfassung der Rissentwicklung mittels Bildkorrelation (rechts)

4 Balkenversuche

4.1 Balken mit 're-plate'

4.1.1 Versuchskörper

Die Versuchskörper sind in Fig. 18 dargestellt. Die Gesamtlänge der Balken beträgt 4.4 m, die für die Belastungsversuche angewendete Spannweite 4 m. Es wurde ein Beton C20/25 und eine untere Zug- sowie obere Druckbewehrung von jeweils 3 Ø10 mm (B500 B) gewählt. Schubhügel mit Ø8 mm wie in Fig. 18 gezeigt wurden über die gesamte Balkenlänge verteilt.

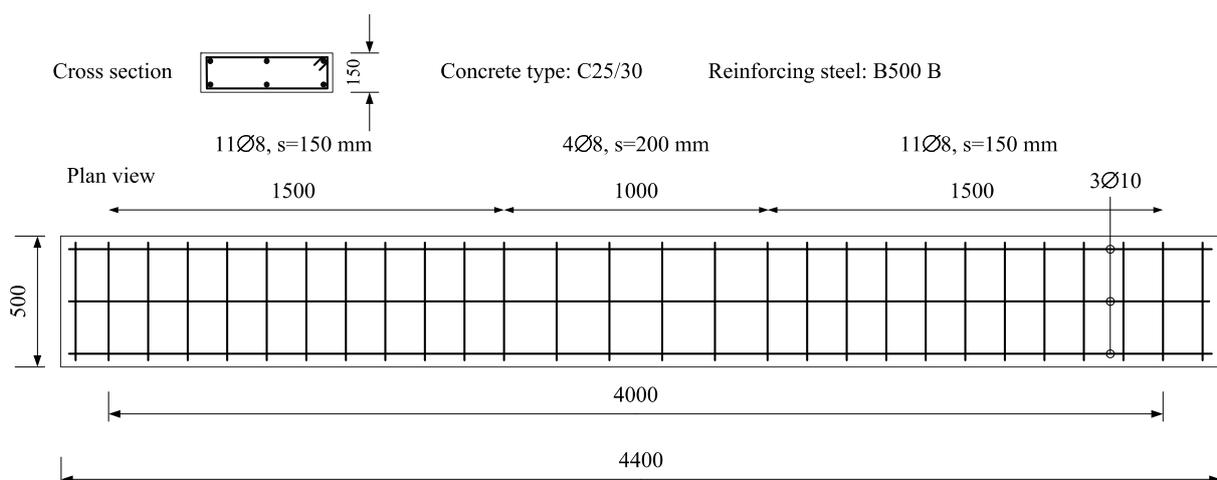


Fig. 18 Querschnitt der Stahlbetonträger [18]

Insgesamt wurden 5 Balken geprüft:

- Balken 1: Referenzträger ohne zusätzliche externe Verstärkung

- Balken 2: Ein Träger mit einer mittels Epoxidharz geklebten 50 mm x 1.2 mm CFK Lamelle als Biegezugverstärkung. Der Querschnitt der CFK Lamelle wurde gewählt, um nach der Risslast eine etwa äquivalente axiale Steifigkeit zur re-plate Lamellen zu haben ($EA \sim 12 \cdot 10^6 \text{ N}$)
- Balken 3, 4, 5: Drei Träger mit einer endverankerten re-plate Verstärkung mit einem Querschnitt 100 mm x 1.5 mm.
-

4.1.2 Verstärkung

Die einzelnen Schritte sind in Fig. 19 dargestellt. Die Lamelle wurde vorgängig vorgebohrt und anschliessend an beiden Enden am Betontraggrund verankert. Anschliessend erfolgte das Vorbohren des Betons sowie das Setzen der Direktbefestigung. Die Aktivierung der re-plates erfolgte bei Balken 3 und 4 durch Stromzufuhr (Fig. 20), bei Balken 5 durch Heizen mittels Infrarotstrahler (Fig. 21). Die maximal applizierten Temperaturen sowie die daraus resultierenden Vorspannkraften sind in XX zusammengefasst.

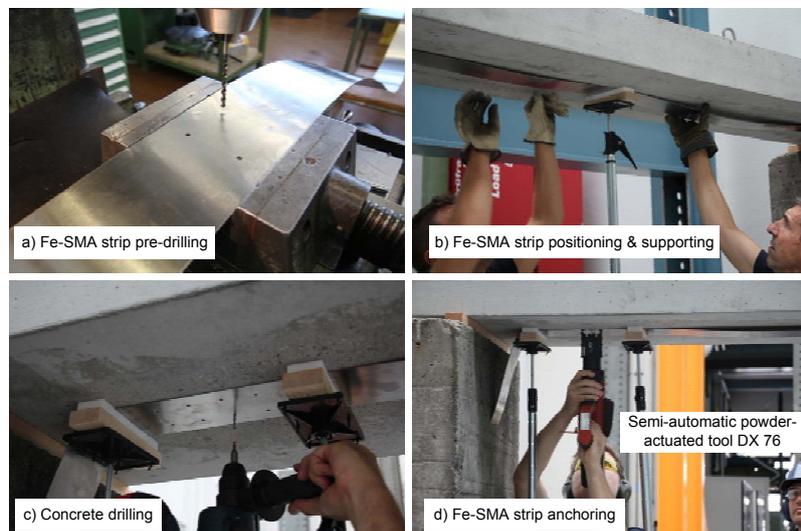


Fig. 19 Arbeitsschritte für das Verankern der re-plate [18]



Fig. 20 Aktivieren durch Stromzufuhr (Widerstandsheizern) [18]



Fig. 21 Segmentweises Heizen durch Infrarotstrahler

Tabelle 2 Aktivierungstemperaturen und Vorspannkraften für die Balkenversuche mit re-plate [18] (ausser *)

	Aktivierungstemperatur (°C)	Vorspannkraft (kN)
Balken 3	270	66
Balken 4	230	61.5
Balken 5*	170	45

4.1.3 Statische Belastungsversuche

Die statischen Belastungsversuche erfolgten nach dem Prinzip der 4-Punktbiegung wie in Fig. 22 dargestellt. Neben Kraft- und Durchbiegungsmessung in Balkenmitte wurden ebenfalls Dehnungsmessungen in der Betondruckzone an der Balkenoberseite sowie im Zugbereich auf den re-plates durchgeführt (siehe Fig. 23). Bildkorrelationsmessungen wurden im Bereich der Verankerungen aufgenommen. Sämtliche Details der Versuchsanordnung sind im Fachartikel [18] zusammengefasst.

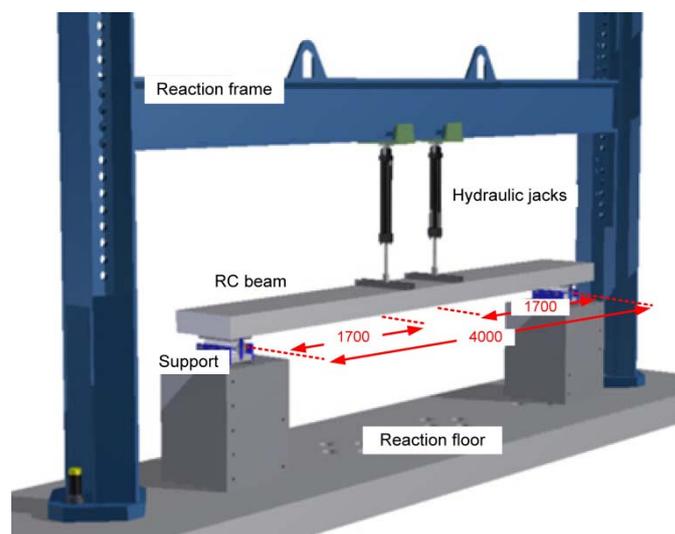


Fig. 22 Versuchsaufbau für die 4-Punktbiegeversuche an Balken [18]

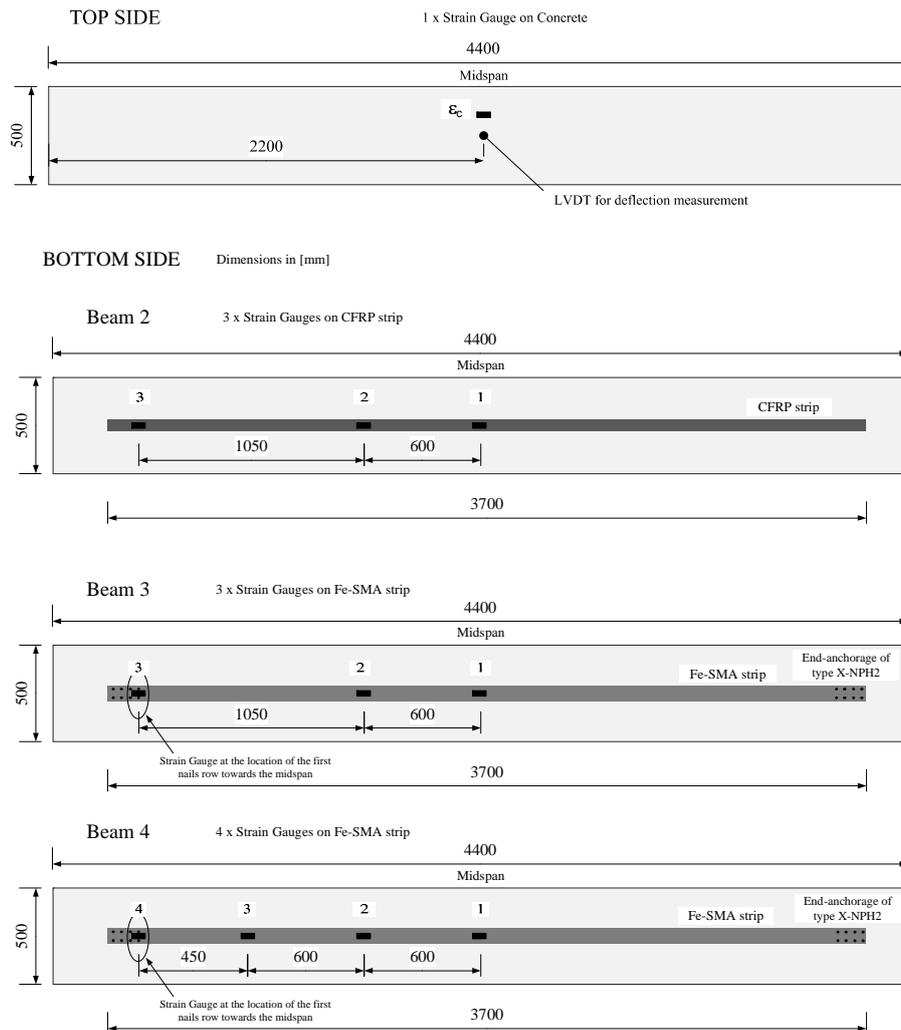


Fig. 23 Durchbiegungs- und Dehnungsmessungen für die Platten 1 bis 4 an der Balkenober- und Unterseite [18]

4.1.4 Resultate

Die Last-Durchbiegungskurven für Balken 1 bis 5 sind in Fig. 24 gezeigt, die dazugehörigen Dehnungsmessungen für Balken 1 bis 4 in Fig. 25. Bezüglich Risslasten kann festgehalten werden, dass die Vorspannung wie erwartet einen positiven Effekt hervorruft. Die anfängliche Risslast von 1 kN beim Referenzträger kann durch die schaffe CFK Lamelle leicht erhöht werden, durch die Vorspannung wird sie aber mindestens verdreifacht. Auch nach dem Auftreten der ersten Risse sind die Balken 3, 4 und 5 deutlich steifer mit geringeren Verformungen bei gleicher Last. Dies ist ein entscheidender Vorteil für den Gebrauchszustand.

Die Kraftzunahme bei allen verstärkten Trägern verläuft anschliessend gleich, da wie erwähnt die axiale Steifigkeit bei allen vier Trägern nahezu identisch ist. Die maximale Traglast beim Referenzträger wurde wegen des zu geringen maximalen Zylinderweges nicht erreicht, würde aber durch Betonstauchen hervorgerufen werden. Beim CFK-verstärkten Balken ist beim plötzlichen Abplatzen der Lamelle bei einer Lamellendehnung ϵ_f von 0.69% erreicht. Die restlichen drei Balken mit re-plate verhalten sich deutlich duktiler. Bezüglich der Traglast war in allen drei Fällen das Stauchen der oberen Betondruckzone bei einer Dehnung ϵ_c von etwa 0.25% in Balkenmitte massgebend (siehe Fig. 25). Die erreichte Last im Vergleich zur CFK Verstärkung wurde leicht, die maximale

Durchbiegung deutlich erhöht. Beide Versagensarten sind in Fig. 26 gezeigt. Sämtliche Versuchsergebnisse sind im Fachartikel [18] präsentiert und analysiert.

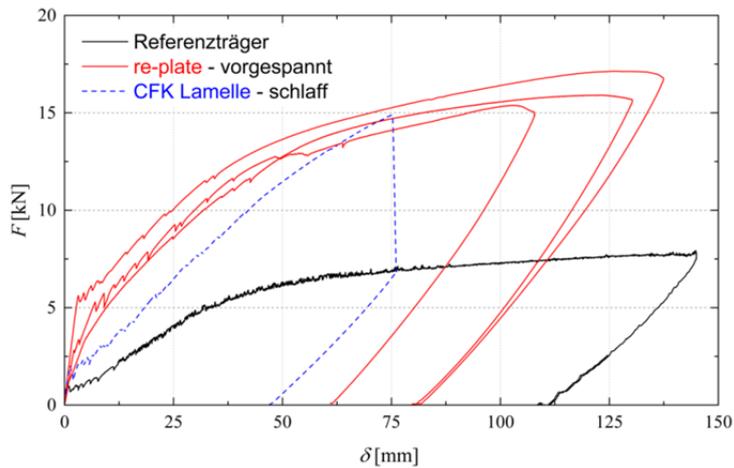


Fig. 24 Kraft-Durchbiegungskurve für alle Balkenversuche 1 bis 5 [18]

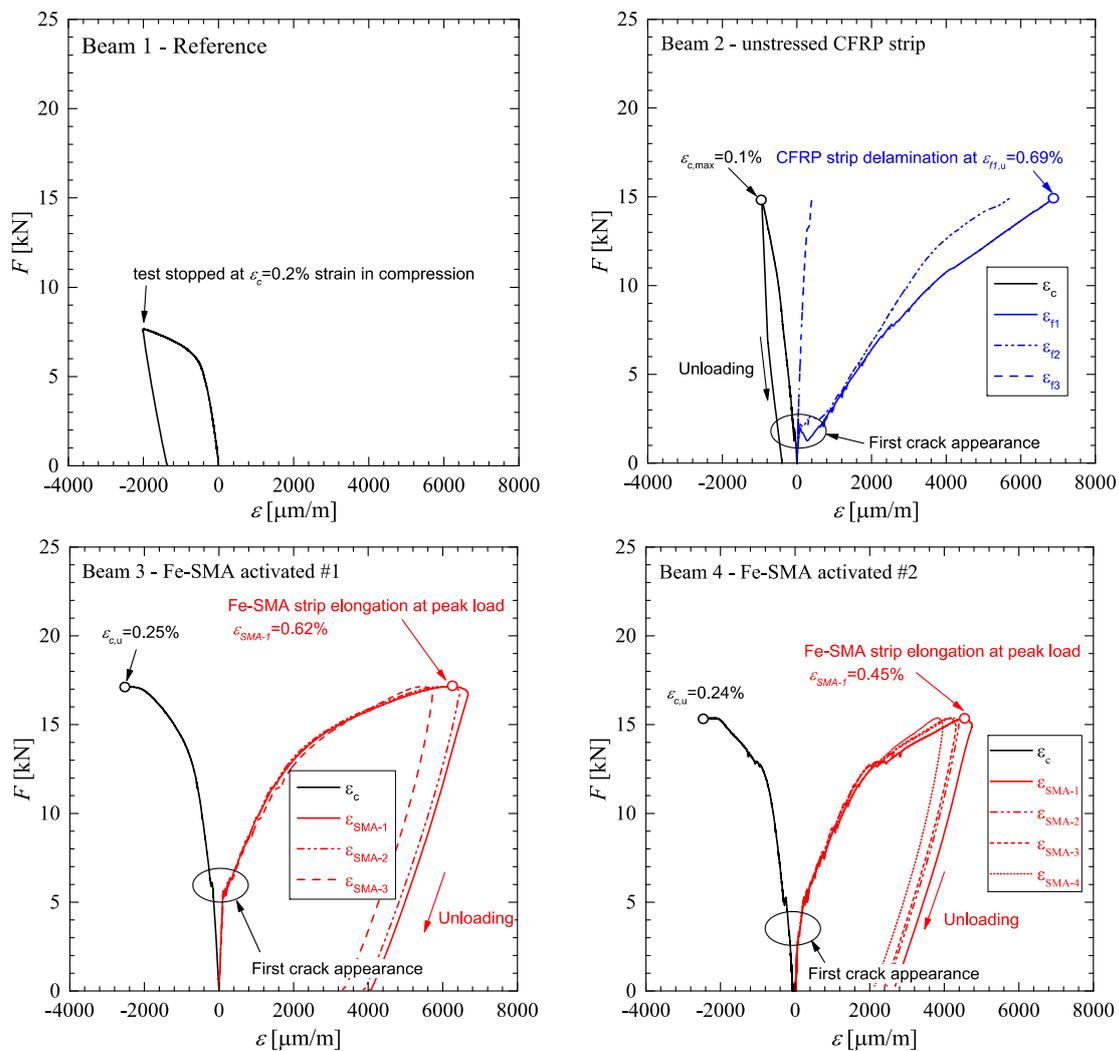


Fig. 25 Kraft-Dehnungskurven für die Balkenversuche 1 bis 4 [18]



Fig. 26 Versagensmodus: Abplatzen der CFK Lamelle (links) und Betonstauchen der oberen Druckzone bei einer re-plate Verstärkung (rechts) [18]

4.2 Balken mit 're-bar' (Prototyp)

4.2.1 Versuchskörper und Verstärkung

Die Applikationsvariante ‚re-bar‘ wurde anhand von Balkenversuchen mit den Abmessungen 250 mm x 120 mm geprüft. Zum Einsatz kamen Prototyp-Produkte, d.h. gerippten Lamellen (Abmessungen 20 mm x 1.5 mm) sowie Rippenstäbe mit einem Durchmesser $\varnothing 8$ mm (siehe Foto in Fig. 27). Erstere wurden in einen vorgängig gefrästen Schlitz eingelegt, welcher anschliessend zementös verfüllt wurde. Die Rippenstäbe wurden gegen die aufgeraute Betonoberfläche fixiert und danach eine Spritzbetonschicht appliziert. Beide Querschnitte sind in Fig. 28 gezeigt. Nach ausreichender Aushärtung wurden bei beiden Balkentypen die ‚memory-steel‘ Prototypen durch Stromzufuhr aktiviert (vorgespannt, siehe Fig. 29). Die Fachartikel [11],[12] fassen sämtliche Parameter der Verstärkungsmassnahmen zusammen.



Fig. 27 Prototypen einer memory-steel Lamelle mit Rippung (links) und gerippter Stab (rechts)

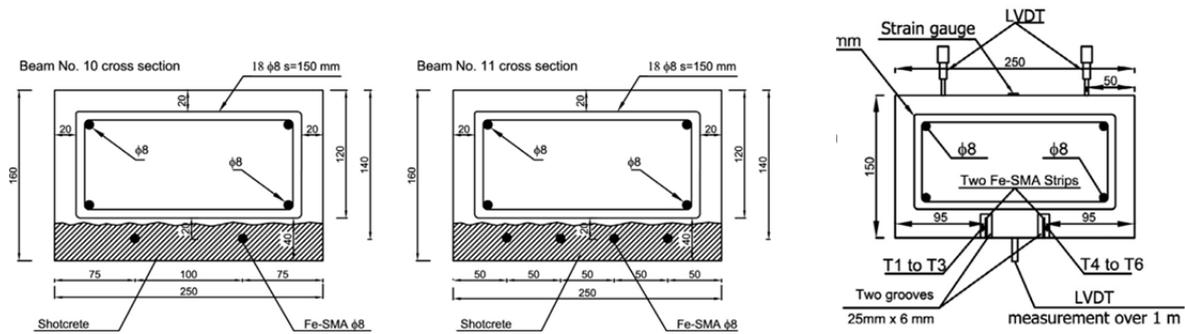


Fig. 28 Prototyp einer memory-steel Lamelle mit Rippung

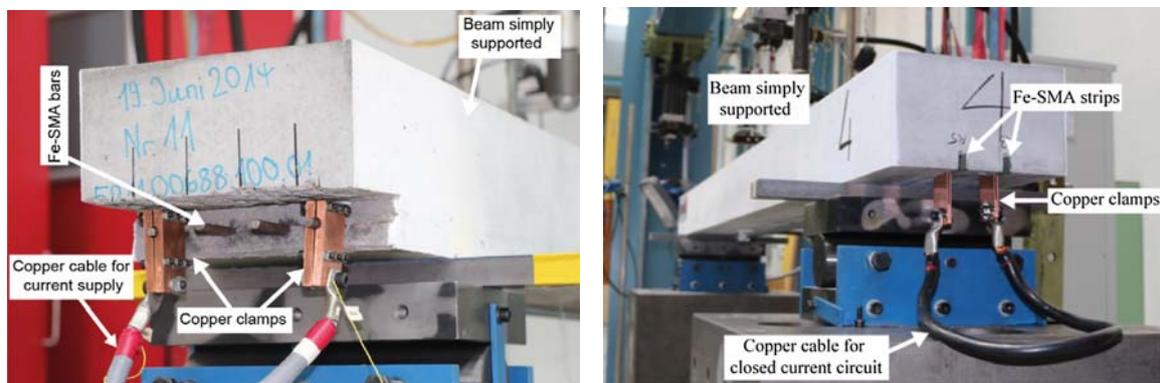


Fig. 29 Prototyp einer memory-steel Lamelle mit Rippung

4.2.2 Statische Belastungsversuche und Resultate

Sämtliche Balken wurden wie jene mit der re-plate Verstärkung unter 4-Punktbiegung bis zum Bruch belastet. Die Kraft-Durchbiegungskurven sind in Fig. 30 und Fig. 31 gezeigt. Der Effekt der Vorspannung bei beiden Varianten wird durch die erhöhte Risslast sowie eine deutlich geringere Verformung bei gleicher Belastung im Vergleich zu nicht vorgespannten Verstärkungen deutlich. Die Maximallast erfolgte bei allen mit memory-steel verstärkten Balken durch Betonstachen in der Druckzone. Betonabplatzungen oder Delaminieren zwischen der Spritzbetonschicht und dem Betonuntergrund konnten nicht beobachtet werden. Sämtliche Versuchsergebnisse sowie weitere Diskussionen sind in den Fachartikeln zusammengefasst [11],[12].

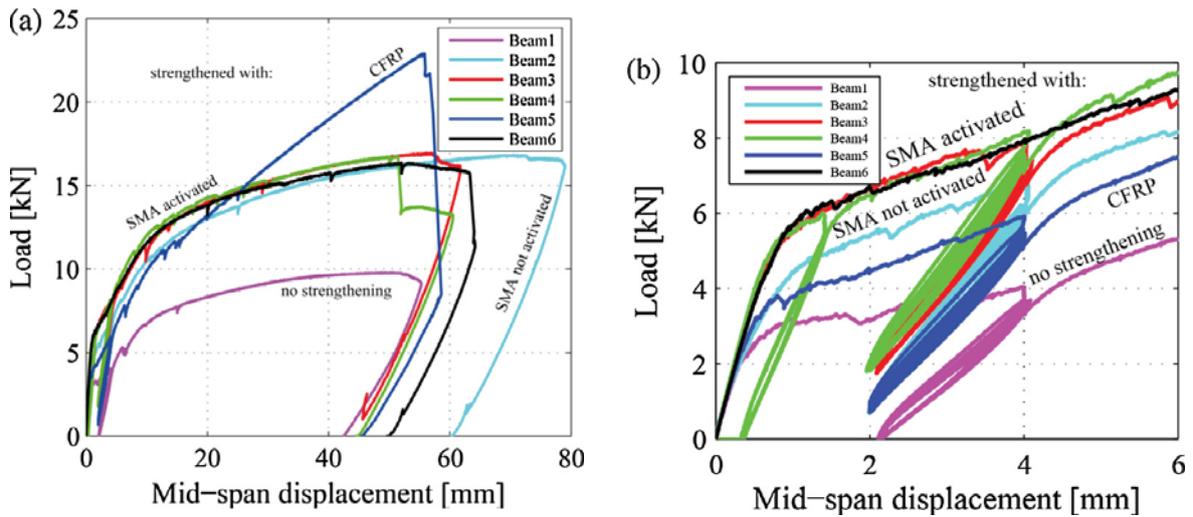


Fig. 30 Last-Durchbiegungsdiagramme für Balkenversuche mit eingeschlitzter memory-steel Lamelle mit Rippung [12]

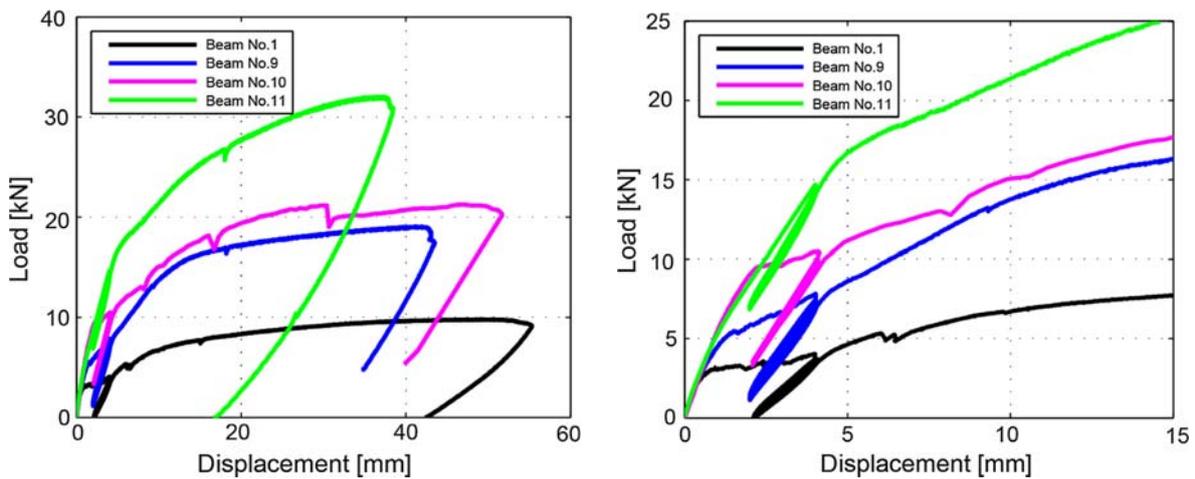


Fig. 31 Last-Durchbiegungsdiagramme (auf der rechten Seite ein Zoom im tieferen Verformungsbereich) für Balkenversuche mit memory-steel Rippenstab im Spritzbeton (schwarz=Referenzträger, blau=schlaffe Stahlarmierung, violett=2 aktivierte memory-steel Stäbe, grün=4 aktivierte memory-steel Stäbe) [11]

5 Bemessung

5.1 Einführung

Die Bemessung der beiden Systeme re-plate und re-bar erfolgt nach den gängigen Regeln der Tragwerksbemessung. Ersteres kann als externes Zugband mit Vorspannung ohne Verbund betrachtet werden, während der sich im Mörtel- oder Spritzbeton befindende Rippenstab als System im Verbund in die Bemessung einfließt.

Im Folgenden werden Bemessungsvorschläge für den Bauzustand, den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sowie den der Tragfähigkeit erläutert.

5.2 Bauzustand

Für den Bauzustand gilt es, eine mögliche Rissbildung an der Plattenoberseite infolge Vorspannung zu überprüfen. Hierfür ist die Anfangsvorspannung $\sigma_{p,i}$ anzusetzen. Die Vorspannung kann als konstantes Biegemoment $M_{p,BZ}$ zwischen den Verankerungen angesetzt werden:

$$M_{p,BZ} = F_{p,i} \cdot z = \sigma_{p,i} \cdot A_l \cdot z$$

5.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit über einen längeren Zeitraum muss die Anfangsvorspannung $\sigma_{p,i}$ wegen der Relaxation abgemindert werden. Über einen Zeitraum von 50 Jahren kann diese mit 15% abgeschätzt werden. Es gilt demnach:

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,i} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\sigma_{p,r}}{\sigma_{p,i}}\right) \approx \sigma_{p,i} \cdot 0.85$$

Das konstante Biegemoment $M_{p,GZ}$ zwischen den Verankerungen kann somit beschrieben werden (A =Fläche re-plate oder re-bar, z =Hebelarm):

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} \cdot z = \sigma_{p,\infty} \cdot A_l \cdot z$$

5.4 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit muss zwischen einem System ohne und mit Verbund zum Tragwerk unterschieden werden.

5.4.1 re-plate

Beim System re-plate erfolgt die Einleitung der Kräfte in das Tragwerk über die beiden Endverankerungen, in der freien Länge gibt es keinen Verbund zum Betonuntergrund. Dies bedingt, dass es keine herkömmliche Querschnittsanalyse mit abgeleiteter Dehnungskompatibilität und Kräftegleichgewicht nicht möglich ist.

Grundsätzlich sind zwei Varianten möglich:

- **Berechnung ohne Spannungszuwachs im ‚re-plate‘:**

Bei dieser vereinfachten Berechnungsmethode wird die Zugkraft $F_{ms,u}$ im re-plate bei grösser werdender Tragwerksverformung als konstant angenommen. Diese Annahme führt dazu, dass das Kräftegleichgewicht im Querschnitt mittels herkömmlicher Querschnittsanalyse realisiert und somit die Tragfähigkeit hergeleitet werden kann. Eine solche Berechnung kann von Hand, in einer Datenverarbeitung wie z.B. Excel oder aber mit Rechensoftware durchgeführt werden. Das ‚Fagus‘-Modul der Cubus-Reihe bedient sich dieser Vereinfachung.

Diese konservative Annahme führt zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Traglast. Das Konzept bietet sich an in Fällen, bei denen der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Tragwerksbemessung massgebend ist.

- **Berechnung mit Spannungszuwachs im ‚re-plate‘:**

Eine zweite Herangehensweise basiert auf der Abschätzung der zusätzlichen re-plate-Längenänderung bei grösser werdender Last. Als Basis dienen empirische Bemessungsansätze, welche anhand von Belastungsversuchen an Betonträgern mit nachträglicher Litzenvorspannung ohne Verbund hergeleitet wurden [31]. Zusammenfassend wird basierend auf den Querschnittsabmessungen eine zusätzliche maximale Durchbiegung f abgeschätzt, welche eine Längenänderung ΔL im re-plate hervorruft. Die Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass sich bei einem Einfeldträger sämtliche Verformungen in einem Rissquerschnitt in der Trägermitte konzentrieren [32]. Diese Längenänderung kann in eine zusätzliche Dehnung $\Delta\epsilon$ umgerechnet werden, welche dann anhand der bekannten Spannungs-Dehnungskurve nach dem Aktivieren den Spannungszustand $\sigma_{p,\infty} + \Delta\sigma$ im Lamellenquerschnitt ergibt.

Es gilt:

$$f = 0.9 \cdot d - e_v < 0.02 \cdot L$$

(d =statische Höhe, $e_v=0$ im Fall von geraden Lamellen)

$$\Delta L = \frac{4 \cdot f \cdot z}{L}$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Anhand der bekannten zusätzliche Dehnung und somit zusätzlichen Spannung ist die Zugkraft im ‚re-plate‘ bekannt und es kann ein Kräftegleichgewicht im Querschnitt berechnet und somit die maximale Tragfähigkeit bestimmt werden. Es gelten die Bemessungsgrundlagen für Betontragwerke (Betonstauchen und Zugversagen der Bewehrung(en)) der SIA 262 [33] mit angepassten Materialkennwerten. Sicherheitsfaktoren auf den Materialfestigkeiten für die re-plate sind identisch denen vom herkömmlichen Bewehrungsstahl anzunehmen.

Zusätzlich muss aber anhand der zusätzlichen Zugkraft im re-plate der Verankerungswiderstand überprüft werden. Hierfür können die ETAG001 Bemessungsvorschläge [28] herangezogen werden. Ausgehend von einem Scherversagen der Direktbefestigung ist folgende Überprüfung durchzuführen:

$$F_{ms,u} = (\sigma_{p,\infty} + \Delta\sigma) \cdot A_I \leq V_{Rd,s} = 100 \text{ kN}$$

Der Verankerungswiderstand von 100 kN gilt für eine Anzahl von 12 X-CR Nägeln unter Annahme eines Abscherens der Nägel bei Maximallast. Dieser Versagensmodus muss noch zukünftig für Betone mit tiefer Festigkeit überprüft werden.

5.4.2 re-bar

Beim System re-bar kann ein starrer Verbund zwischen dem eingelegten Rippenstahl und dem umgebenden Mörtel/Spritzbeton angenommen werden. Für eine Tragwerksbemessung können hier die Bemessungskonzepte nach SIA 262 [33] mit angepassten Materialkennwerten angewendet werden. Sicherheitsfaktoren für die ‚re-plate‘ können identisch denen vom herkömmlichen Bewehrungsstahl anzunehmen.

6 Referenzen

1. Shahverdi, M. and M. Motavalli, *Test Report No. 5211.00688.100.01-01: Activation and Stress-relaxation of 'memory-steel' (Fe-SMA) of type 're-bar'*. 2018, Empa: Dübendorf, Switzerland.
2. Shahverdi, M. and M. Motavalli, *Test Report No. 5211.00688.100.01-02: Activation and Stress-Relaxation of 'memory-steel' (Fe-SMA) strips of type 're-plate'*. 2018, Empa: Dübendorf, Switzerland.
3. Janke, L., et al., *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2005. **38**(279): p. 578-592.
4. Moser, K., et al., *Feasibility of concrete prestressed by shape memory alloy short fibers*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2005. **38**(279): p. 593-600.
5. Dong, Z., et al., *A novel Fe-Mn-Si shape memory alloy with improved shape recovery properties by VC precipitation*. Advanced Engineering Materials, 2009. **11**(1-2): p. 40-44.
6. Lee, W.J., et al., *Phase transformation behavior under uniaxial deformation of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy*. Materials Science and Engineering A, 2013. **581**: p. 1-7.
7. Cladera, A., et al., *Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview*. Construction and Building Materials, 2014. **63**: p. 281-293.
8. Czaderski, C., et al., *Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures*. Construction and Building Materials, 2014. **56**: p. 94-105.
9. Lee, W.J., B. Weber, and C. Leinenbach, *Recovery stress formation in a restrained Fe-Mn-Si-based shape memory alloy used for prestressing or mechanical joining*. Construction and Building Materials, 2015. **95**: p. 600-610.
10. Koster, M., et al., *Cyclic deformation and structural fatigue behavior of an Fe-Mn-Si shape memory alloy*. Materials Science and Engineering A, 2015. **637**: p. 29-39.
11. Shahverdi, M., et al., *Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer*. Engineering Structures, 2016. **117**: p. 263-273.
12. Shahverdi, M., C. Czaderski, and M. Motavalli, *Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 28-38.
13. Shahverdi, M., et al., *Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization*. Construction and Building Materials, 2018. **173**: p. 586-599.
14. Michels, J., et al., *Mechanical Performance of Fe-SMA Ribbed Bars for Concrete Prestressing*. ACI Materials Journal, 2018. accepted manuscript.
15. Ghafoori, E., et al., *Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening*. Materials and Design, 2017. **133**: p. 349-362.
16. Ebschner, P. and G.P. Terrasi, *Kurzbericht Nr. 5214013070-04: Bestimmung mechanischer Kennwerte an gerippten Betonstählen 're-bar' bestehend aus einer Formgedächtnislegierung*. 2017, Empa: Dübendorf, Switzerland.
17. Ebschner, P. and G.P. Terrasi, *Kurzbericht Nr. 5214013070-70: Bestimmung mechanischer Kennwerte an gerippten Betonstählen 're-bar' bestehend aus einer Formgedächtnislegierung*. 2018, Empa: Dübendorf, Switzerland.
18. Michels, J., M. Shahverdi, and C. Czaderski, *Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips*. Structural Concrete, 2018. **19**: p. 876-891.
19. Schranz, B., et al., *Ribbed iron-based shape memory alloy bars for pre-stressed strengthening applications*, in *IABSE 2019*. 2019: Guimaraes, Portugal.
20. Standard, E., *FprEN 10138-2: Spannstähle - Teil 2: Draht*. 2009: Brussels, Belgium.
21. decentlab. www.decentlab.com. 2017 [cited 2017].
22. Standard, I., *ISO15630-3: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods*. 2010: Geneva, Switzerland.
23. Suter, T., et al., *Project Report Nr. 5211.00688.100.02: Corrosion Studies of Shape Memory Alloys*. 2017, Dübendorf: Dübendorf, Switzerland.
24. Lee, W.J., et al., *Electrochemical characterization and corrosion behavior of an Fe-Mn-Si shape memory alloy in simulated concrete pore solutions*. Materials and Corrosion, 2016. **67**(8): p. 839-846.
25. SIA, *SIA 2029: Nichtrostender Betonstahl*. 2013.

26. Zemp, V., *Behavior of Iron-Based Shape Memory Alloy Subjected to Elevated Temperatures*. 2017, Master Thesis at ETH Zürich: Zürich, Switzerland.
27. Schranz, B., *Strengthening of reinforced concrete structures with iron-based shape memory alloy strips*. 2017, Master Thesis at University of Natural Resources and Life Sciences: Vienna, Austria.
28. EOTA, *ETAG001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for use in Concrete (Annex C)*. 1997, European Organisation for Technical Approvals: Brussels, Belgium.
29. Bertschinger, R. and R. Kieselbach, *Prüfbericht Nr. 409258: Ermittlung der Warmscherfestigkeit*. 2000, Empa: Dübendorf, Switzerland.
30. RILEM, *Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test*, in *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. 1994. p. 218-220.
31. Hegger, J. and K. Kordina, *Bericht 30-0107/001: Ermittlung der Biegetragfähigkeit bei Bauteilen mit Vorspannung ohne Verbund*. 1985, TU Braunschweig: Braunschweig, Germany.
32. Bruggeling, A.S.G., *Voorspanning zonder aanhechting, enkelstrengsystemen*. 1976, TU Delft: Delft, The Netherlands.
33. SIA, *SIA262: Betonbau*. 2013, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich, Switzerland.