

Tragwerksverstärkung mit memory[®]-steel

Bemessungsbeispiele

Daniel Schmidig, re-fer

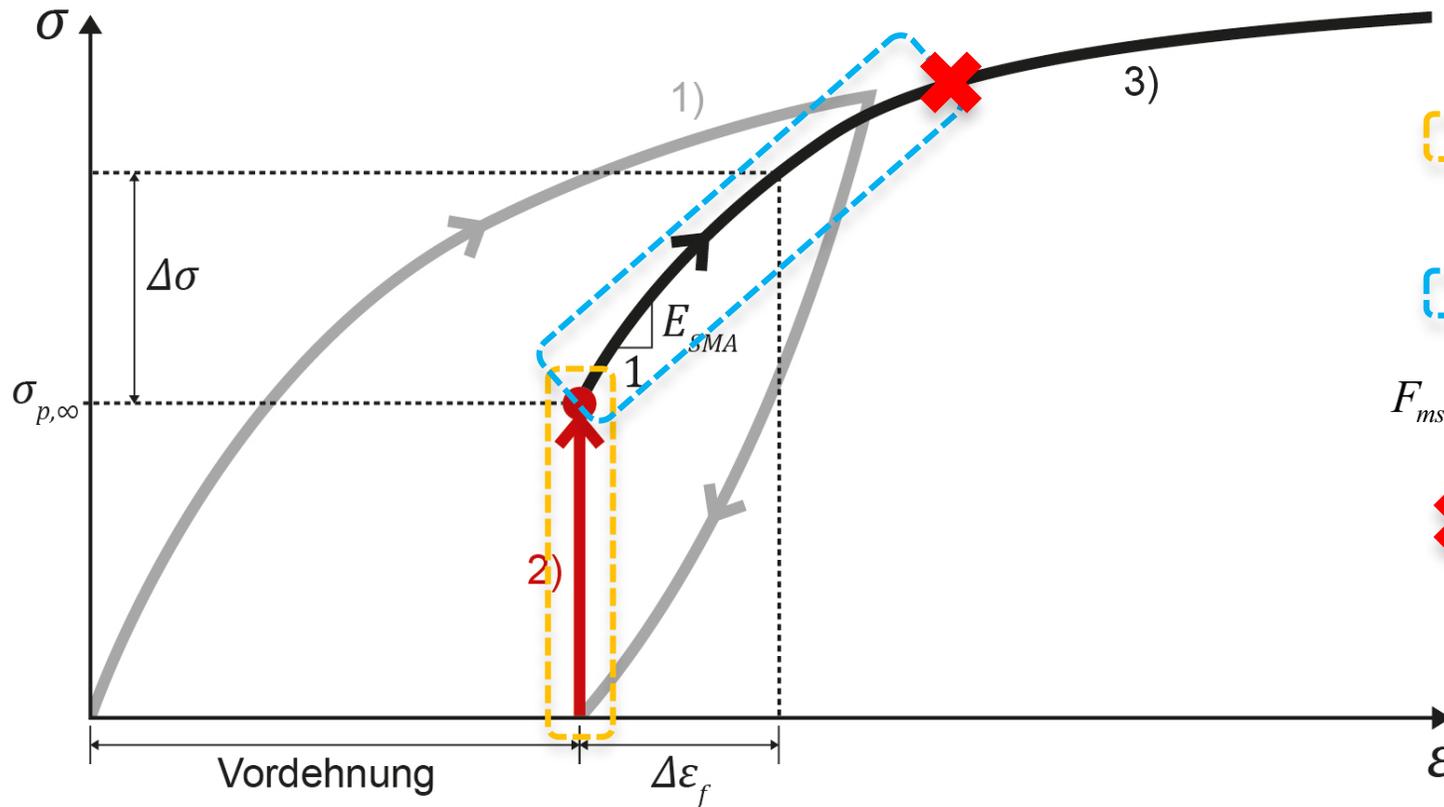


Übersicht

1. Materialverhalten
2. Wirkungsweisen
 - re-plate «Lamelle»
 - re-bar «Rippenstahl»
 - re-bar R18 «Rundstab»
3. Bemessungsbeispiele
 - Biegeverstärkung einer Betondecke mit re-plate
 - Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



Materialverhalten



 Installieren und Erhitzen
Relaxation 15% über t_{∞} $F_{p,\infty}$

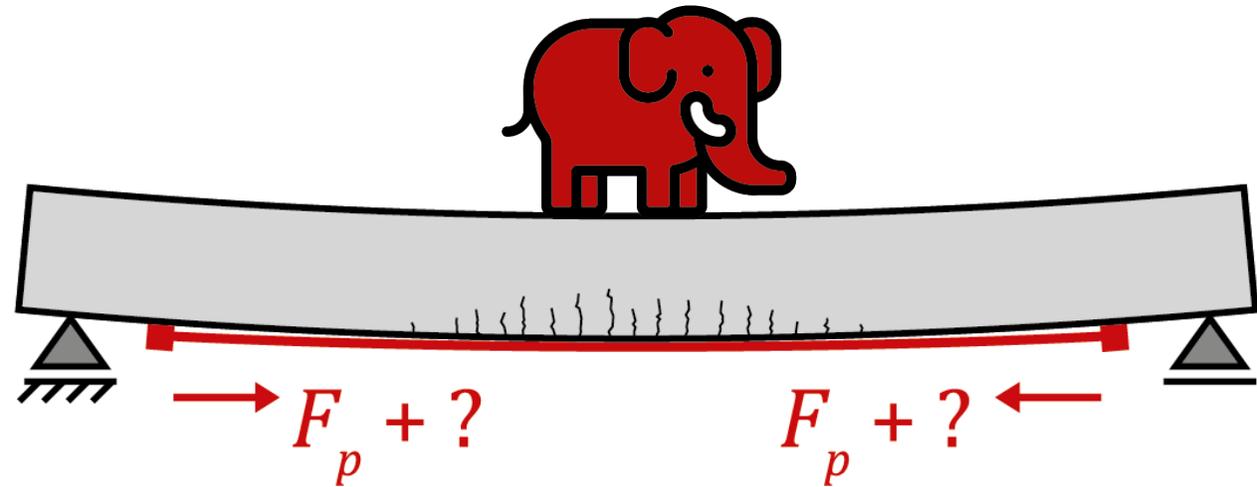
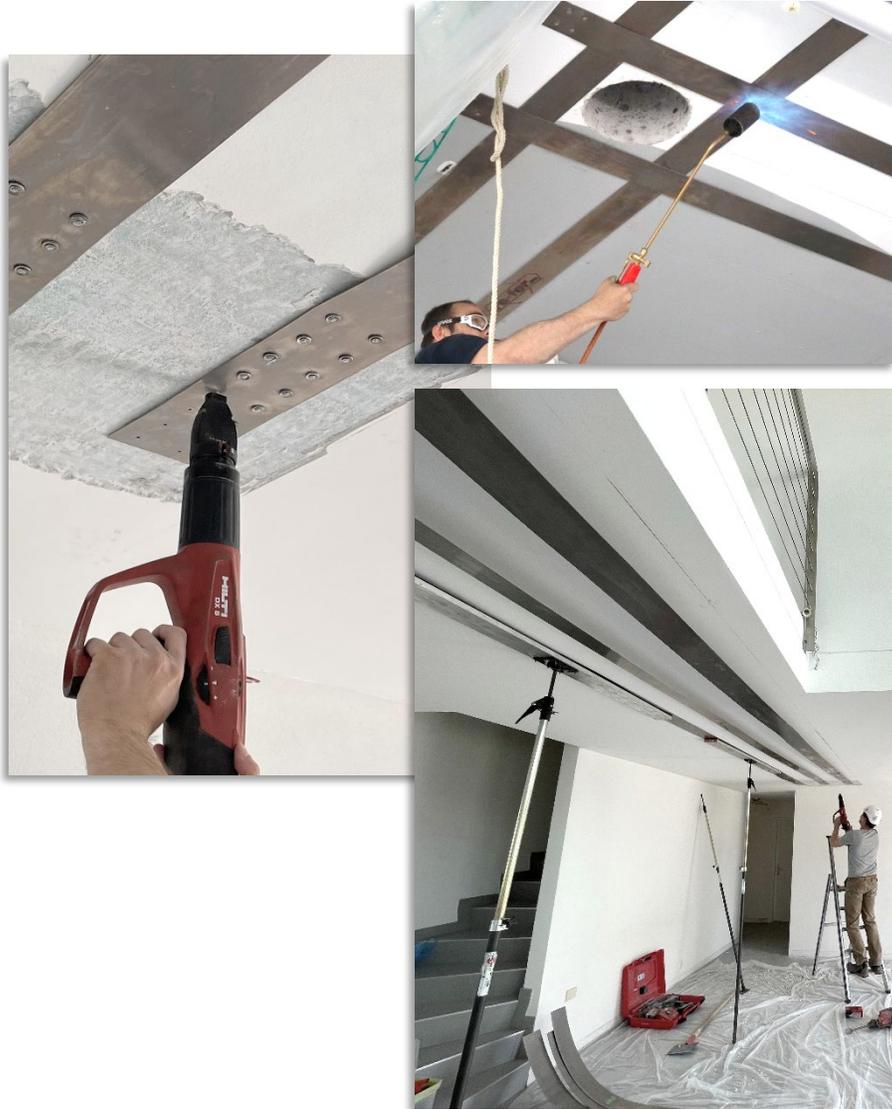
 Zusatzbelastung durch Verformung
des Bauwerks ($E_{SMA} = 70 \text{ kN/mm}^2$)

$$F_{ms,u} = F_{p,\infty} + A_f * \Delta\sigma_f = A_f * (\sigma_{p,\infty} + \Delta\varepsilon_f * E_{SMA})$$

 **Bemessungswert**

- re-plate: 460 N/mm² (Verankerung + Sicherheitsbeiwert 1.3)
- re-bar: 520 N/mm² (bei etwa $\Delta\varepsilon_f = 10\text{‰}$ / effektiv: $f_{tk} \geq 750 \text{ N/mm}^2$ bei $\geq 20\%$ Bruchdehnung)

re-plate | Wirkungsweise



- Stahlband mechanisch im Beton endverankert
- Externes Zugband ohne Verbund
- Keine Dehnungskompatibilität bei Querschnittsanalyse
- Technischer Ansatz von *Kordina & Hegger*

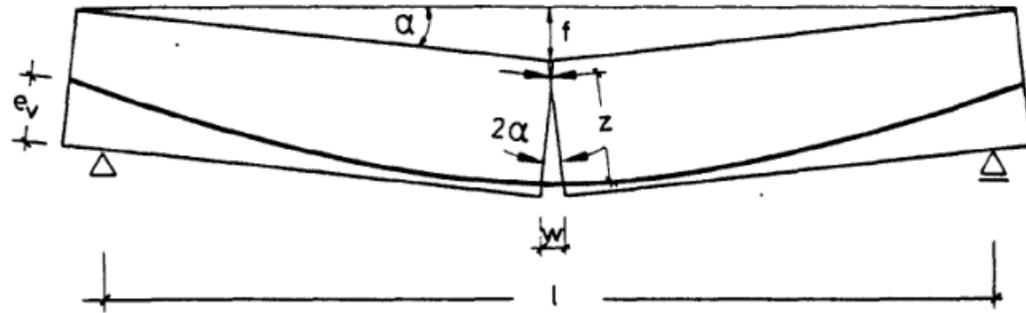


Bild 3.2 Bruchmechanismus nach Bruggeling /6/

- Ansatz von *Kordina & Hegger* empirisch hergeleitet anhand diverser Versuche mit Vorspann-Elementen ohne Verbund
- Rechenansätze basieren auf Grundsätzen der Plastizitätstheorie für trägerartige Strukturen

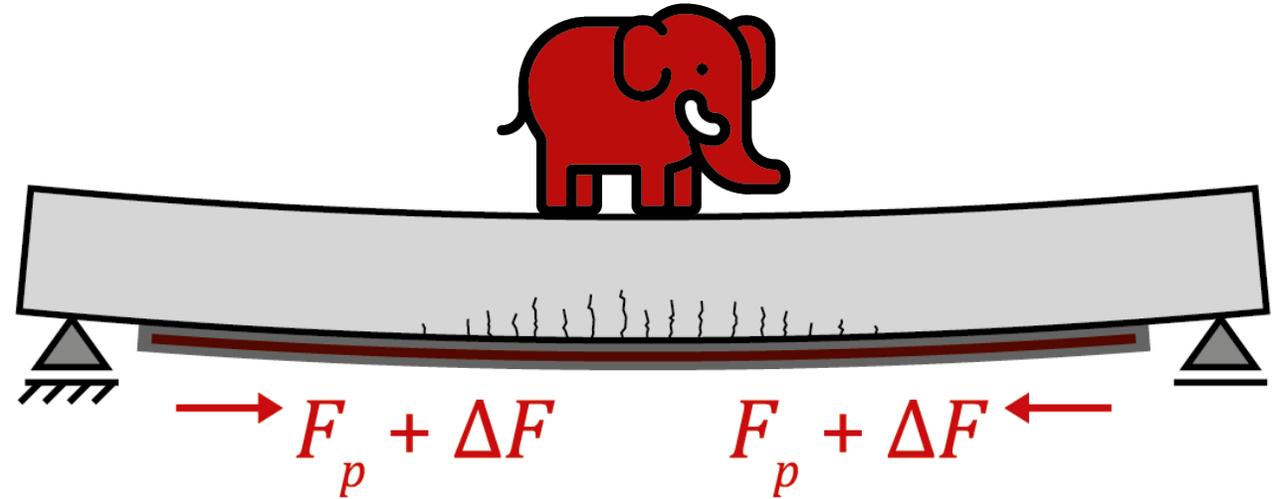
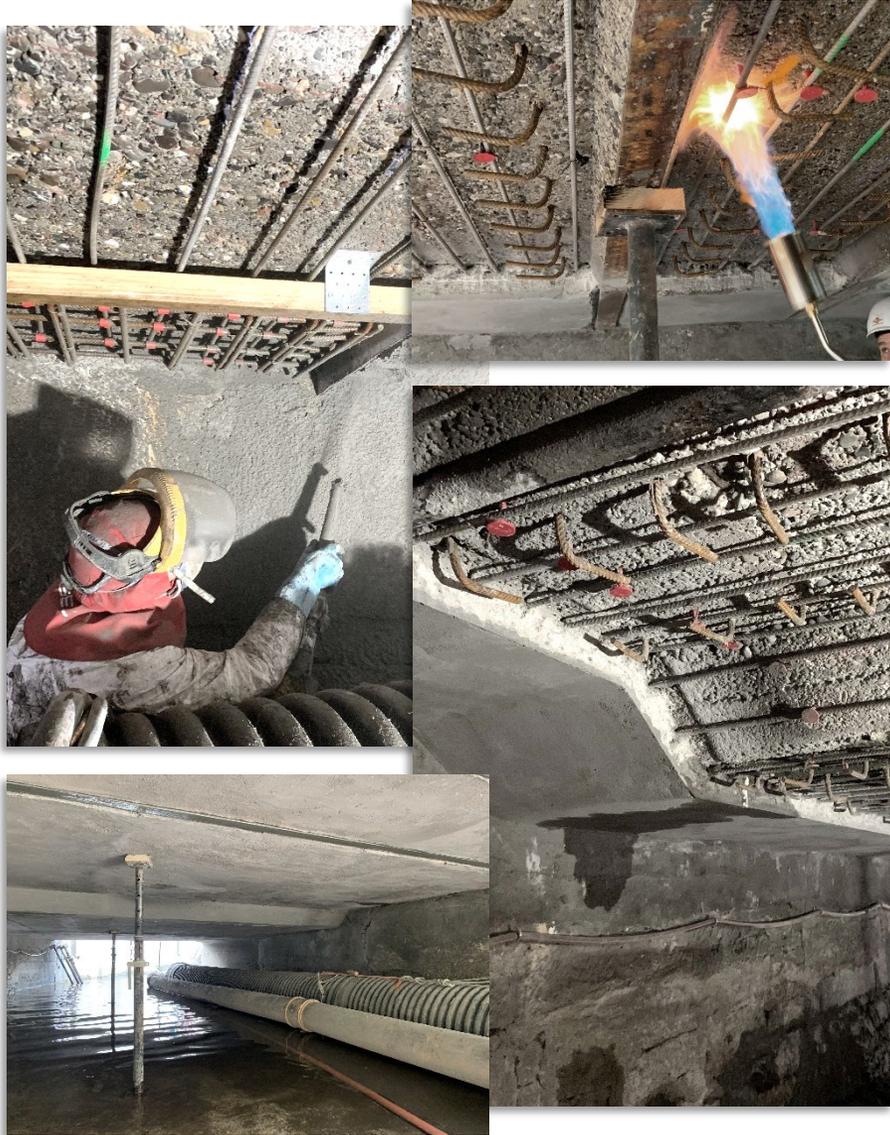
$$\Delta l = \frac{4f \cdot z}{l}$$

$$f = 0,9 h_v - e_v$$

$$f \leq 0,02 l$$

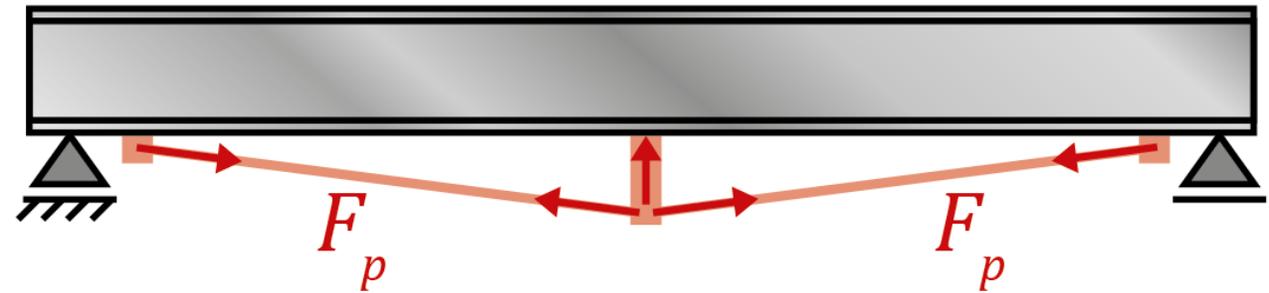
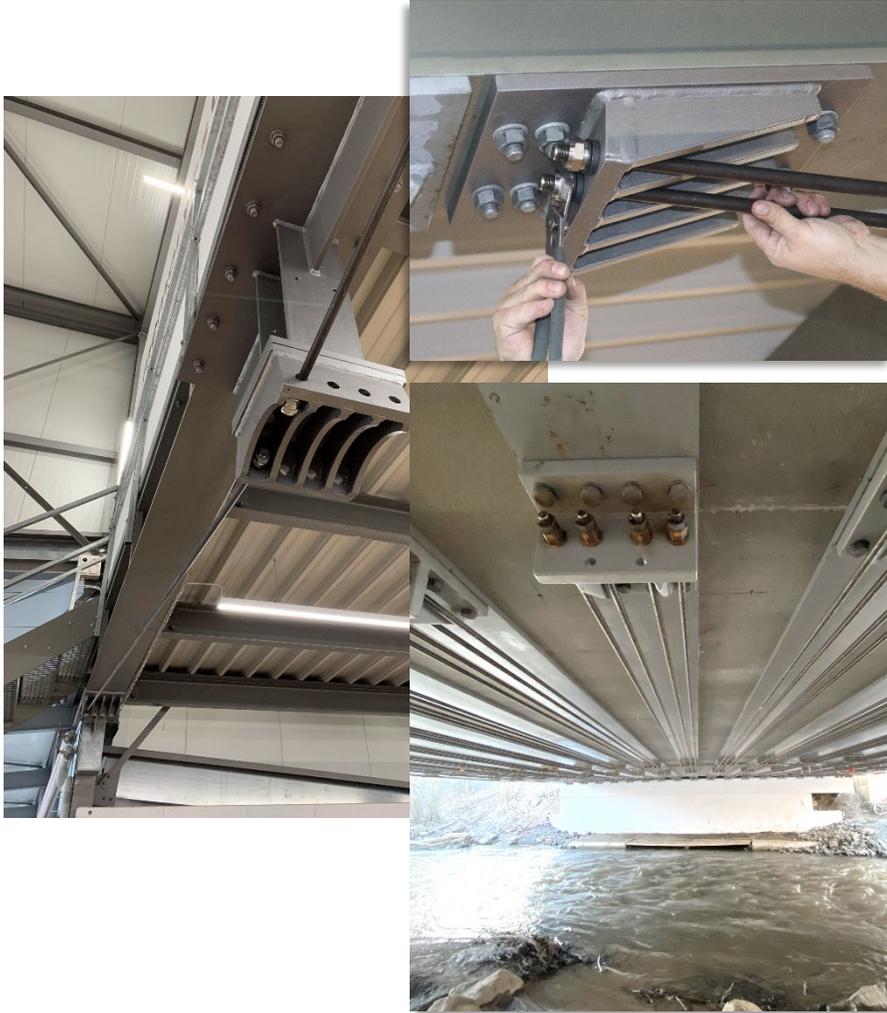
Bruggeling / 6/ stellt für die Berechnung des Spannungszuwachses eine **Beziehung zwischen Gelenkrotation und Durchbiegung** her. Er nimmt an, daß sich z. B. bei einem Einfeldträger (vergl. Bild 3.2) die **gesamten Verformungen in einem Rißquerschnitt in Feldmitte konzentrieren**. Aus den Beziehungen für die Rißöffnung w und die Durchbiegung f

re-bar | Wirkungsweise

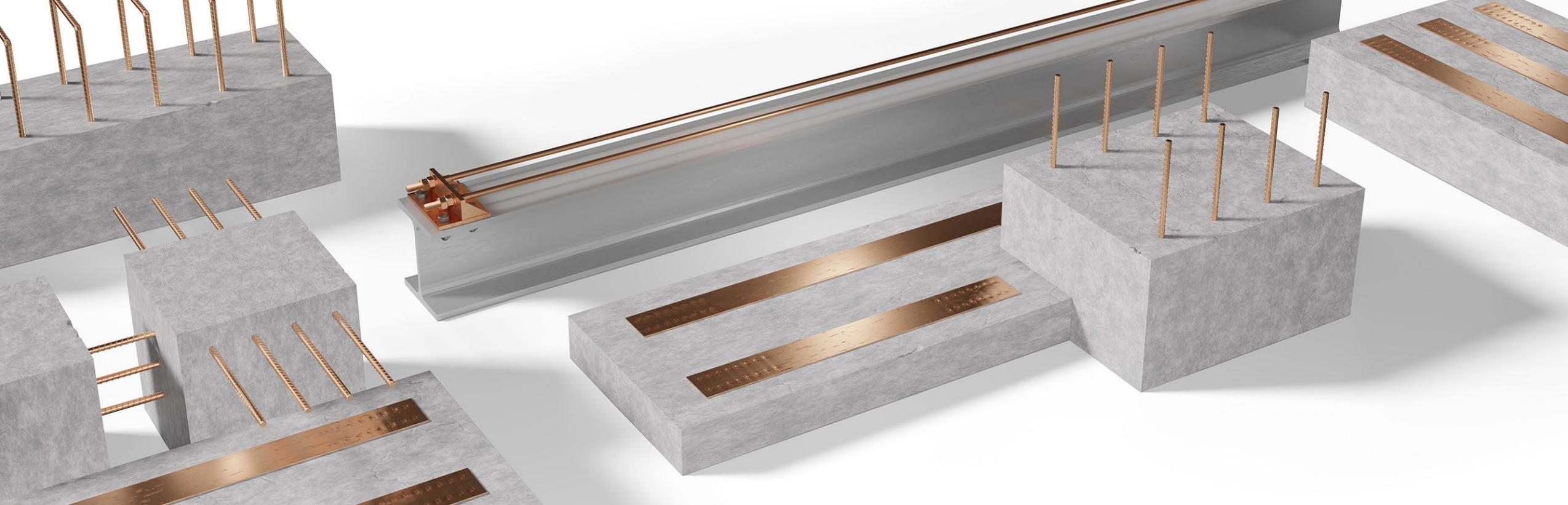


- Rippenstahl zum Einlegen in Sika Betonersatzmörtel
- innenliegende Bewehrung im Verbund
- Querschnittsanalyse mit bspw. CUBUS FAGUS

re-bar R18 | Wirkungsweise



- Rundstahl über Endverankerung am Stahlträger fixiert
- externer Zugstab ohne Verbund
- Empfehlung: reine Vorspannkraft ohne Spannungszuwachs ansetzen



Bemessungsbeispiele

Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate



Durchbiegungen Betondecke und Risse in Mauerwerk

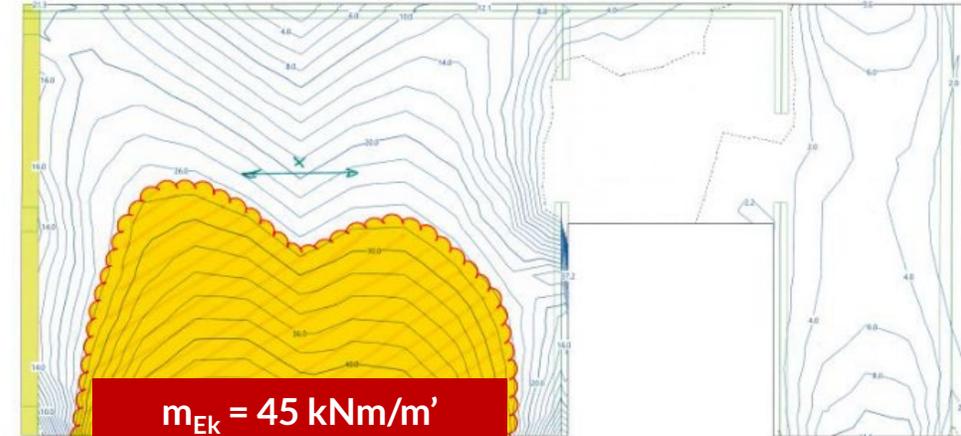
- Biegeverstärkungen (positives Moment)
- Risschliessung (rot) dank Vorspannung

Verwendete Produkte:

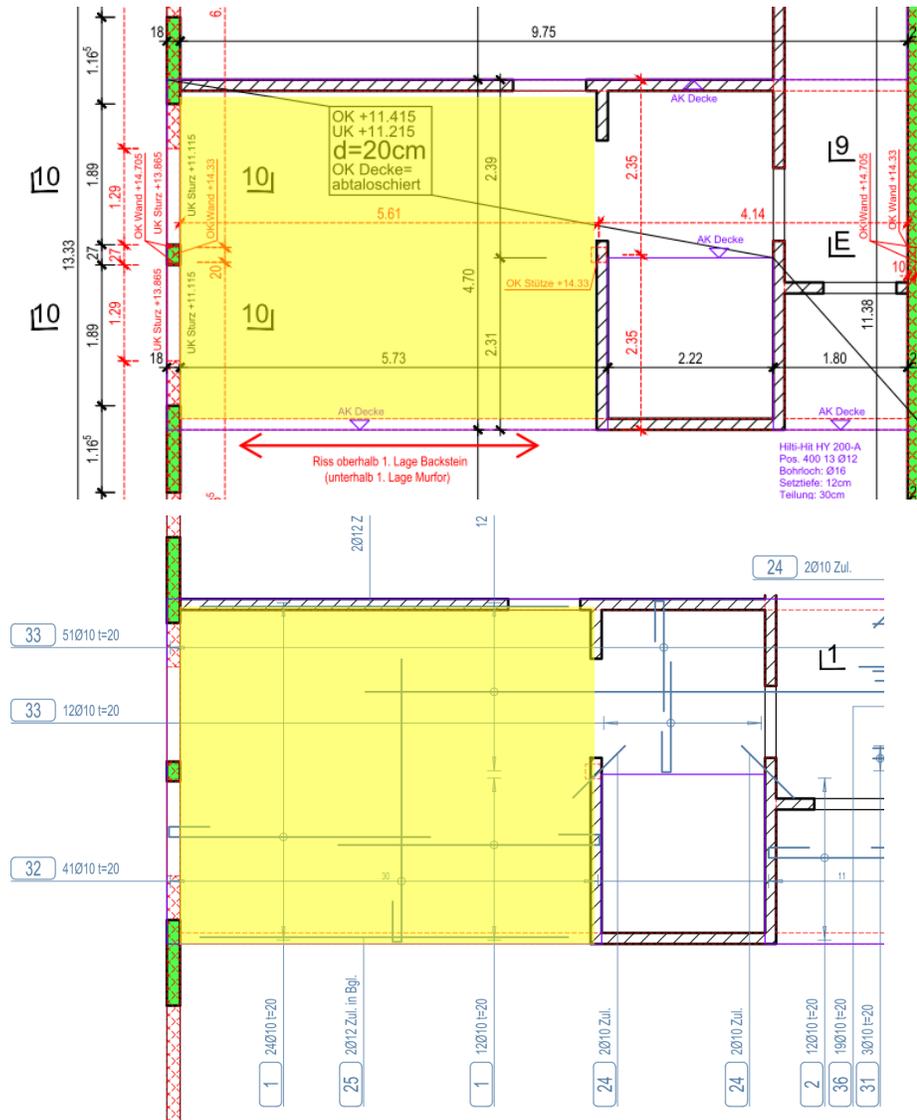
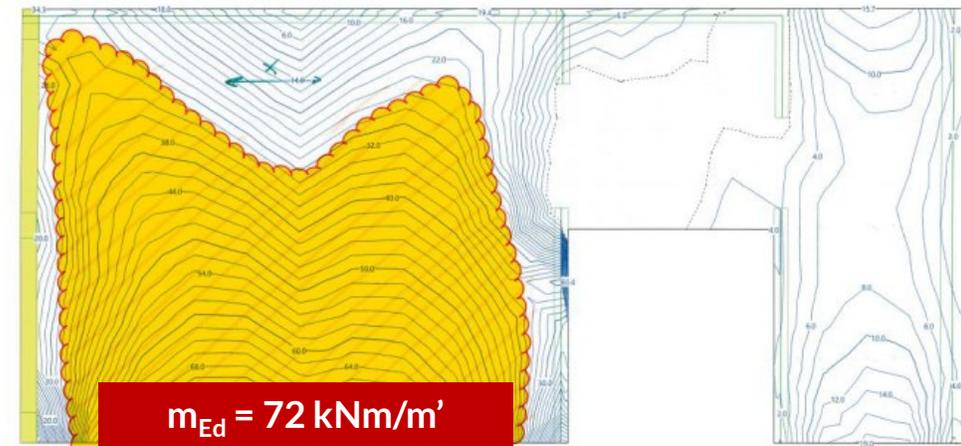


Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

Grenzwerte Bewehrungsmoment m_{axb} [kNm/m']
Quasi-ständiger Lastfall

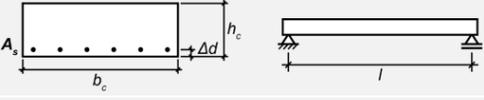


Grenzwerte Bewehrungsmoment m_{axb} [kNm/m']
Grenzzustand der Tragsicherheit



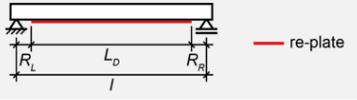
Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

Materialparameter Bestand	
Beton:	Betonsorte wählen: C25/30
f_{cd} :	16.5 N/mm ² Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
f_{ctm} :	2.6 N/mm ² Mittelwert der Betonzugfestigkeit
f_{cm} :	33 N/mm ² Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
E_c :	32'075 N/mm ² Elastizitätsmodul von Beton
Geometrie:	h_c : 200 mm Höhe des Betonquerschnittes
	b_c : 1'000 mm Breite des Betonquerschnittes (max. 1'000 mm für Platte)
	l : 5.65 m Spannweite des Trägers
Betonstahl:	f_{ed} : 435 N/mm ² Bemessungswert der Fließgrenze
	ϵ_{ud} : 5.00 % Bemessungswert der Bruchdehnung
	E_s : 205'000 N/mm ² Elastizitätsmodul des Betonstahls
	A_s : 393 mm ² Bewehrungsgehalt auf der Breite des Betonquerschnittes
	Δd : 35 mm Abstand Achsenmitte der Zugbewehrung zum Zugrand



Angaben re-plate 120/1.5	
re-plate:	Heizvorgang wählen: Gas 300-350°C
$\sigma_{p,i}$:	380 N/mm ² Vorspannung im re-plate
$F_{p,i}$:	68.4 kN Vorspannkraft pro re-plate
$F_{p,w}$:	58.1 kN Vorspannkraft pro re-plate nach Relaxation $t = \infty$
E_{SMA} :	70'000 N/mm ² Elastizitätsmodul von re-plate nach der Aktivierung
Geometrie:	A_r : 180 mm ² Querschnitt des Verstärkungsbandes
	R_L : 50 mm Abstand re-plate zum Auflager der Spannweite "LINKS"
	R_R : 50 mm Abstand re-plate zum Auflager der Spannweite "RECHTS"
	L_D : 5.50 m Länge von re-plate

Das Erhitzen von re-plate mit dem Gasbrenner ist die Standardlösung. Falls eine Korrosionsbeschichtung auf re-plate vorhanden ist oder bei Brandgefahr der Umgebung kann mit einem Infrarot-Heizgerät gearbeitet werden (Achtung: reduzierte Temperatur und Vorspannung).



Eingabe der Einwirkungen	
Biegemoment bei Installation re-plate (Bauzustand):	Biegemoment Grenzzustand Tragsicherheit (Typ 2):
M_{Ed} : 20.0 kNm	M_{Ed} : 72.0 kNm
Biegemoment Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:	Biegemoment im Brandfall (gem. SIA normalerweise = $M_{Ed,quasi-ständig}$):
M_{Ed} : 45.0 kNm	M_{Ed} : 45.0 kNm

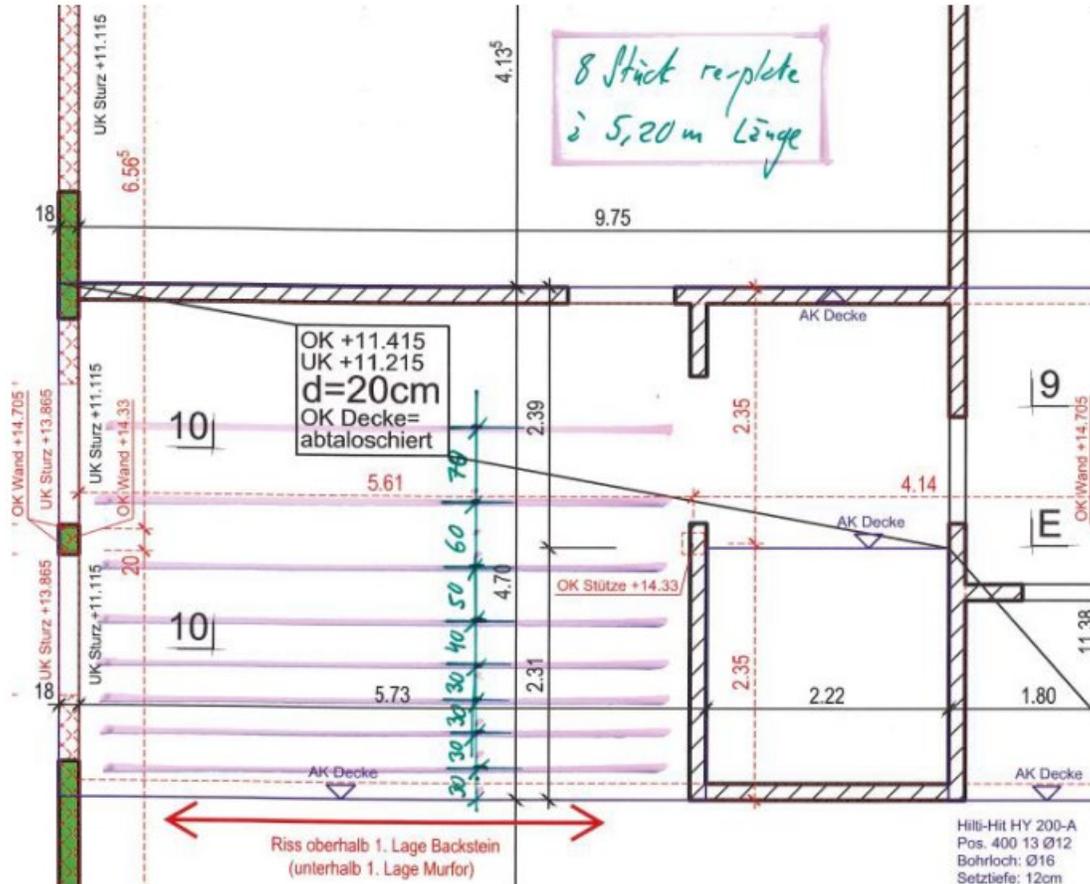
Auswahlbereich	
Auswahl Anzahl re-plate pro Breite des Betonträgers (1000 mm):	3

Achtung: Mindestabstände gemäss Produktdatenblatt einhalten. Alternative Verankerungslösungen (bspw. Stahlschuh) sind möglich.

Resultate	
Gebrauchsniveau	
Die Vorspannung bewirkt bei richtiger Anordnung eine Reduktion der Durchbiegung. Das Bemessungstool rechnet diesen Einfluss mit der nebenstehenden Formel. Massgebend ist hierbei auch, ob der Betonquerschnitt als bereits gerissen angenommen wird. Falls ein gerissener Querschnitt angenommen wird, reduziert sich der Berechnungswert $E_c I$ zu $E_c I/3$.	
$w = \frac{M * l^2}{8 * E_c I}$	
Soll der Betonquerschnitt als "gerissen" angenommen werden? JA	
Kraft pro re-plate (Annahme reine Vorspannkraft mit nach Relaxation): $F_{ms,eff}$: 58.1 kN	Höhe der Nulllinie (Hebelarm von re-plate): z_{GG} : 156 mm
re-plate Vorspannmoment unter Gebrauchslast: $M_{p,GZ}$: 27.3 kNm	Reduktion der Durchbiegung aufgrund Vorspannung: $w_{p,red}$: 14.3 mm
Resultierende Stahlspannung der innenliegenden Bewehrung: σ_s: 354 N/mm²	Dank der Vorspannung mit re-plate kann die Stahlspannung der Innenbewehrung um rund 19% gesenkt werden.
Grenzzustand der Tragsicherheit	
Resultierende Dehnung in re-plate im Bruchzustand: $\Delta \epsilon_r$: 2.8 ‰	Resultierende Kraft pro re-plate im Bruchzustand: $F_{p,u}$: 83.1 kN
Resultierende Dehnung in re-plate im Bruchzustand: $\Delta \epsilon_r$: 2.8 ‰	Höhe der Nulllinie (Hebelarm von re-plate): z_{GZ} : 186 mm
Biege widerstand des verstärkten Trägers: $M_{Rd,GZ}$: 72.0 kNm	Anteil des Biege widerstandes aus re-plate: $M_{p,GZ}$: 46.3 kNm
<input checked="" type="checkbox"/> Biegenachweis im Grenzzustand Tragsicherheit ist erfüllt. <input checked="" type="checkbox"/> Das Biegemoment im Brandfall ist abgedeckt.	

Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

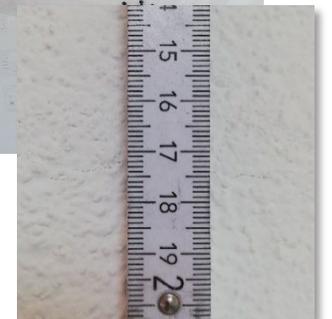
Konzeptvorschlag:



Ausführung:



Riss vor/nach Verstärkung



Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

In anderen Fällen:

Biegenachweis im Grenzzustand Tragsicherheit ist nicht erfüllt.

Das Biegemoment im Brandfall ist abgedeckt.

Option 1: Anzahl re-plate erhöhen.

Option 2: Übrige Traglast mit Sika® CarboDur® CFK-Lamellen abdecken. Für die Berechnung mit der Sika Software kann das einwirkende Moment um das Vorspannmoment von re-plate reduziert werden (27.3 kNm).

Brandfall

Wenn der Biege widerstand des unverstärkten Betonträgers das Biegemoment im Brandfall abdecken kann, ist die Verstärkungsmassnahme nicht zusätzlich zu schützen.

$M_{Rd, Best}$: 27.5 N/mm²

<

M_{Ede} : 45.0 N/mm²

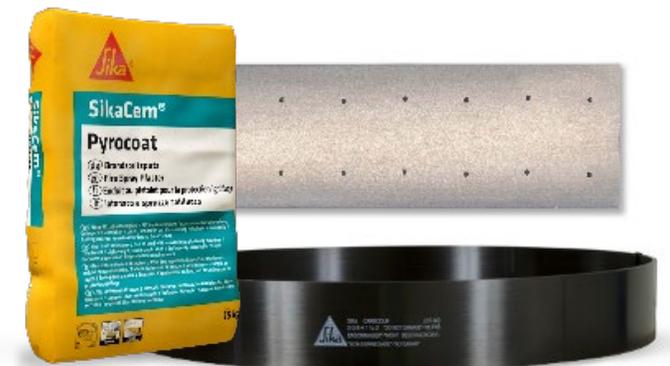
re-plate muss im Brandfall geschützt werden!

SikaCem® Pyrocoat Brandschutzspritzputz

R30: Schichtstärke 12 mm | R60: Schichtstärke 15 mm | R90: Schichtstärke 23 mm



- re-plate: SikaCem® Pyrocoat Brandschutzspritzputz
- re-bar: Einhalten der normativen min. Bauteilabmessungen, Bewehrungsüberdeckungen (Bsp. SIA262 Tab. 16)
- Hinweis: SikaCem® Pyrocoat auch für Betonschutz (Überdeckungsäquivalent)



Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



Alterung der Betonbrücke

- Robuste Biegeverstärkungen der Träger
- Schutz der innenliegenden, korrodierten Bewehrung
- Erhöhung der Lebensdauer

Verwendete Produkte:



Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar

Voruntersuchungen:

Stahlgerüfen AG Qualitätsprüfung QP
Druckdatum: 25.11.2021

Parametertabelle

Prüfung	ZV-44-P	Durchm. dD	12.0 mm
Profil	T-Profil	Kunde	LAM-P 3280 Murat
Vorwahl	S	Probentyp	L-Dübel
Prüfgeschwindigkeit	0.008 1/s		

Prüfergebnisse:

Nr	Charge	FN	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	
1	09-20-01431	21-12441	100	100.20	112.23	181.00	281.9	275.5	364.3	332	18.0	25.2	32.8										

Seriengrafik:

Statistik:

Statistik	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20			
U1	119.71	112.23	181.00	281.9	275.5	364.3	332	18.0	25.2	32.8													

Emplacements des sondages

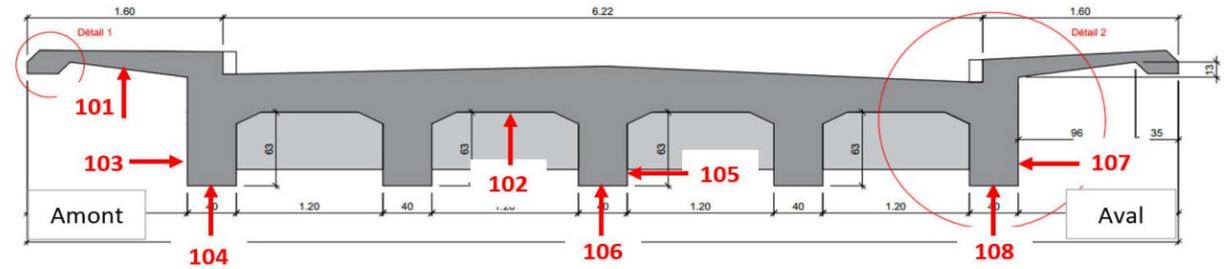
Projet : 03-03-01435
Ouvrage : Pont Rue de la Gare - Soneboz SA

Poutre 1 / Trottoir amont
Sondage / Mouture 101, 103 et 104

LEGENDE:

- Mesure Ferriscan
- Sondage
- Mouture
- Carotte compression
- Carotte RAG

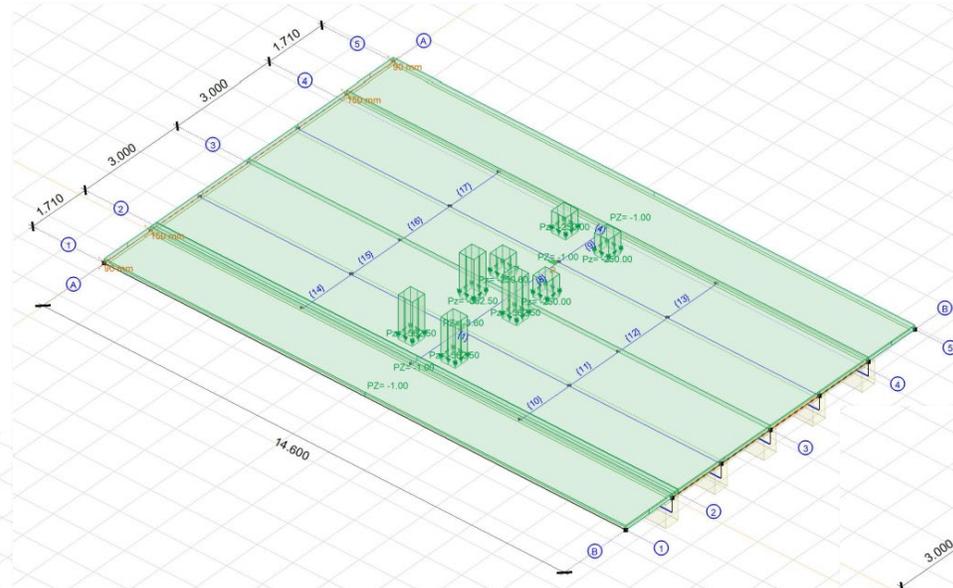
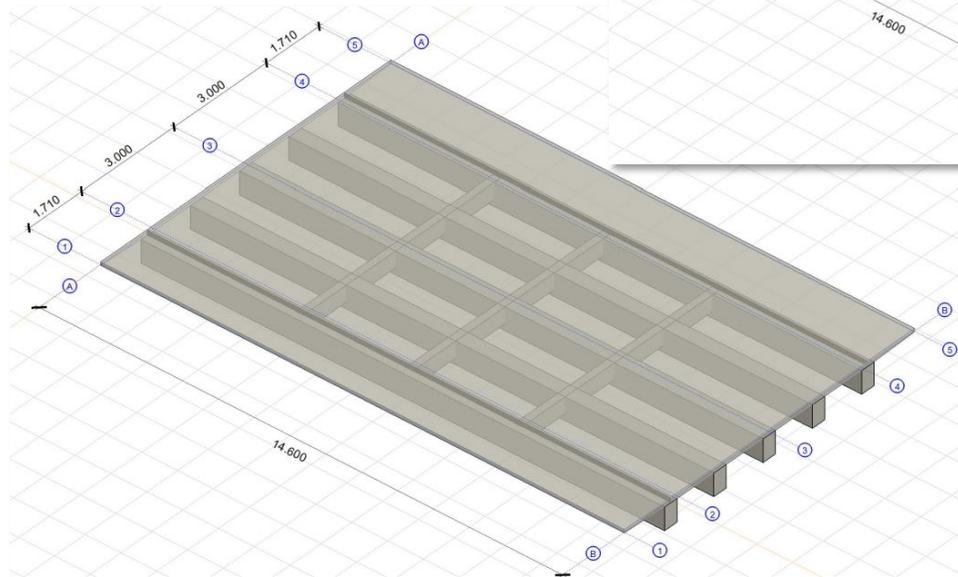
Voruntersuchungen:



$$M_{Rd} = 1'348 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd} = 404 \text{ kN}$$

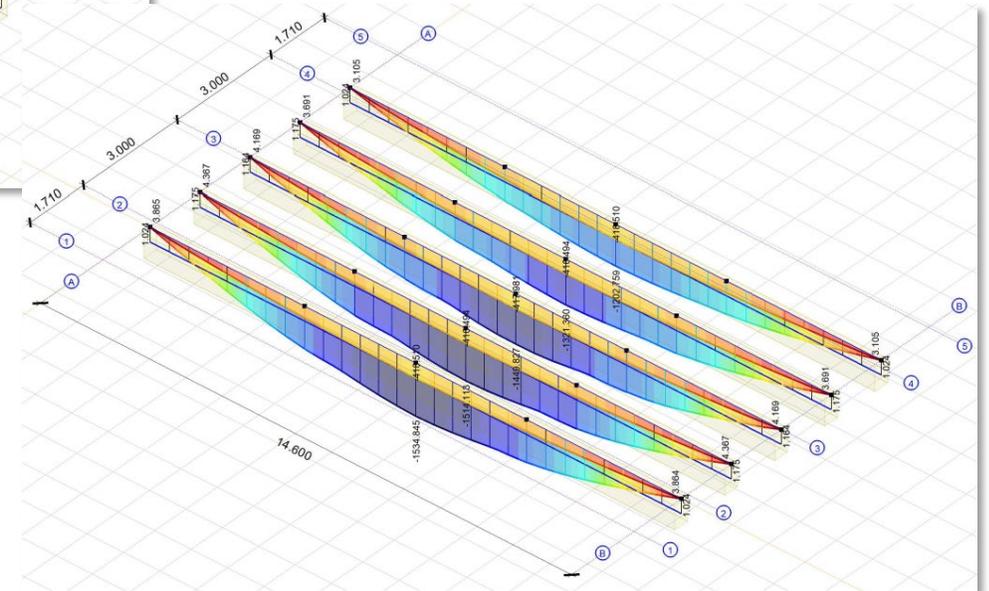
Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



$M_{Ed} = 1'534 \text{ kNm}$

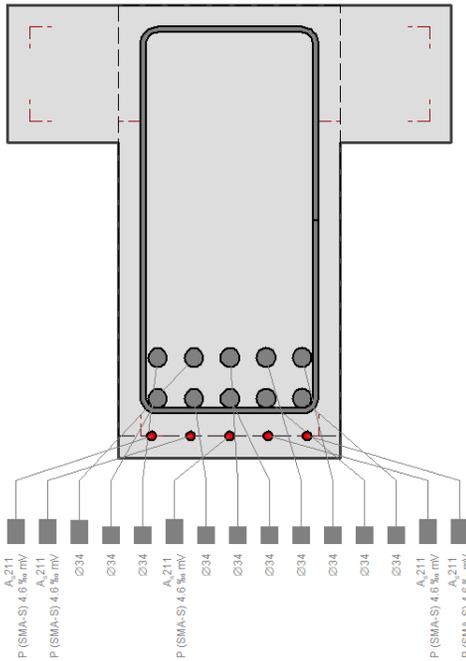


$V_{Ed} = 320 \text{ kN}$

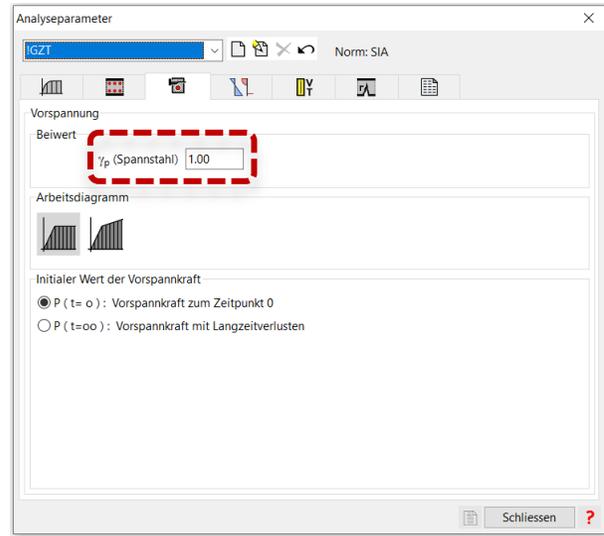


Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar

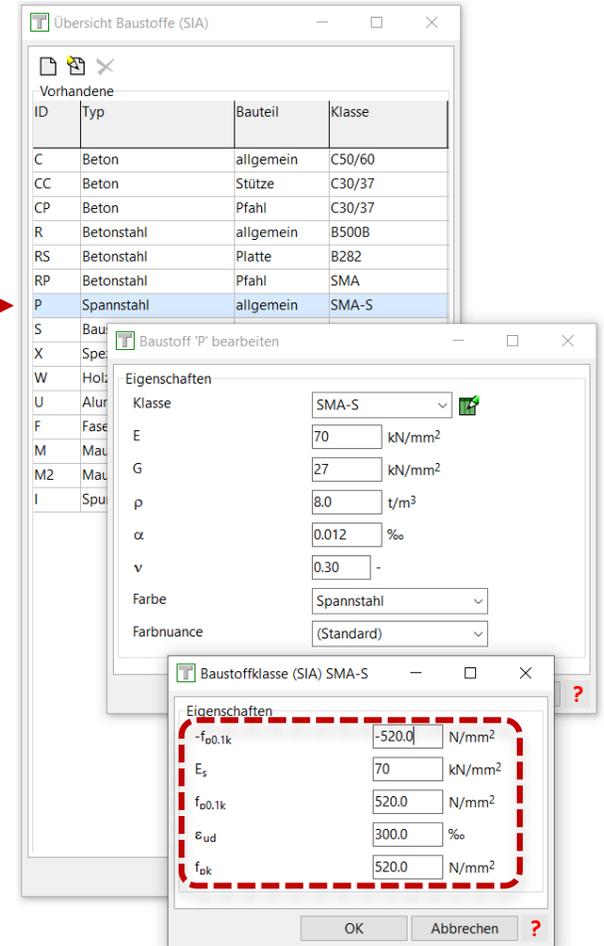
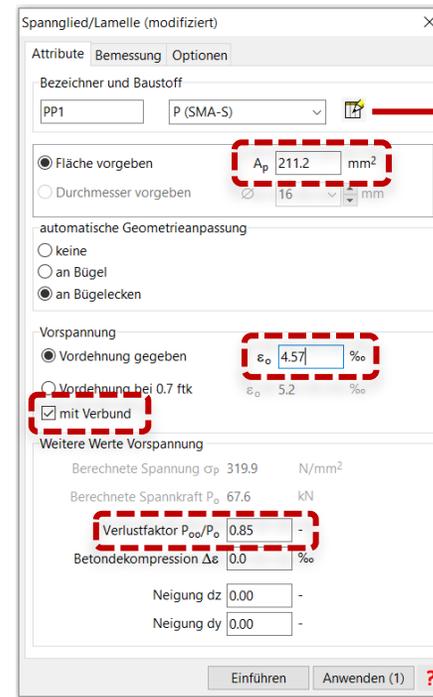
Spannglied wählen und
neues Material definieren



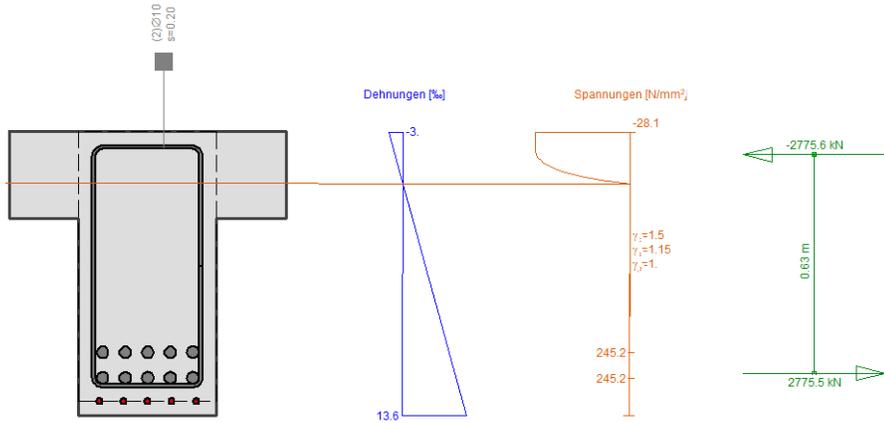
Sicherheitsbeiwert kann
auf 1.00 gesetzt werden



Parameter-Eingabe
gemäss Dokumentation
oder Excel Tool



Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



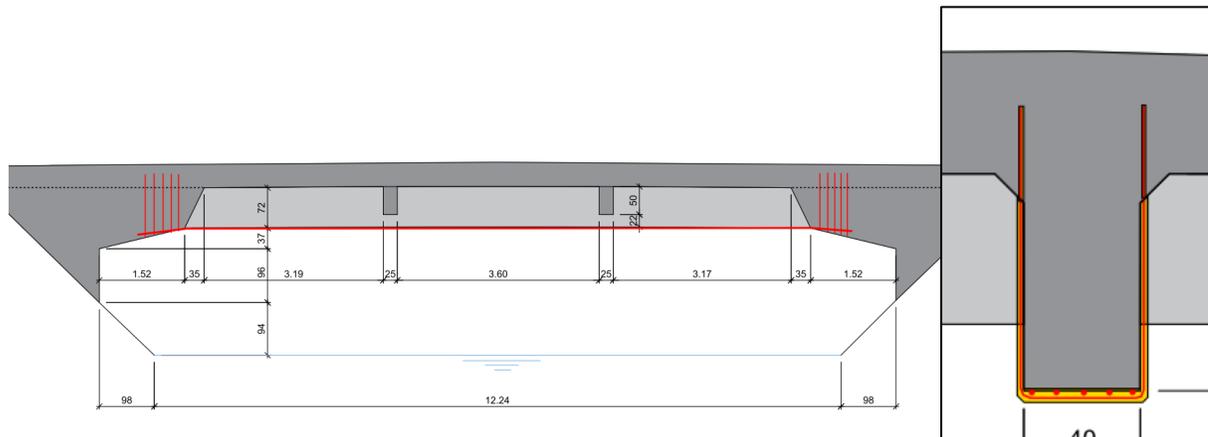
$M_{Ed} = 1'690 \text{ kNm}$ ✓

$\sigma_{d,s} = 174 \text{ N/mm}^2$ ✓

- ✓ **Gebrauchstauglichkeit**
 - ✓ Rechnerische Durchbiegung um rund 6 mm reduziert
 - ✓ Spannung der bestehenden Innenbewehrung im elastischen Zustand gehalten
 - ✓ Rissöffnung reduziert

- ✓ **Tragsicherheit**
 - ✓ Biege Widerstand erhöht

- ✓ **Lebensdauer erhöhen**
 - ✓ Innenliegende Bewehrung entlastet
 - ✓ Spätere Rissöffnung
 - ✓ Neue Mörtelschicht als schützendes Alkalidepot
 - ✓ Zusätzlicher Korrosionsschutz mit SikaTop® Armatec®-110 EpoCem



Wir unterstützen gerne

Dienstleistungen



- Jahrelange Erfahrung in Forschung, Planung und Umsetzung von Verstärkungsprojekten
- Statische Bemessung, Konzepte erarbeiten
- Grobkostenschätzungen
- Ausschreibungen
- Kontaktvermittlung mit ausführenden Unternehmen



Dr. Julien Michels



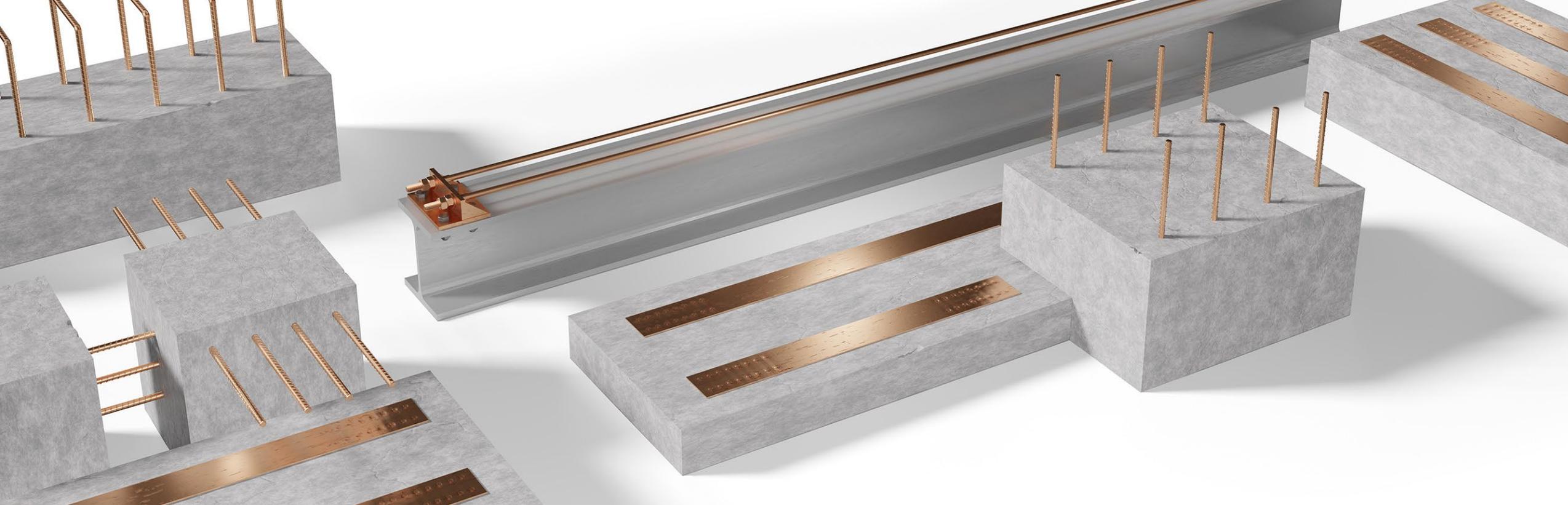
Daniel Schmidig



Dr. Bernhard Schranz

www.re-fer.eu/bemessung

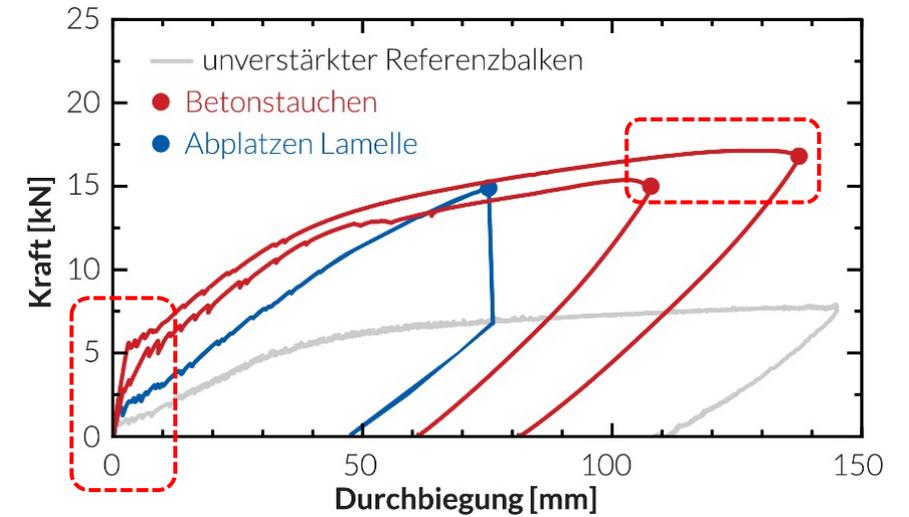




Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit



Vergleich re-plate mit CFK-Lamellen

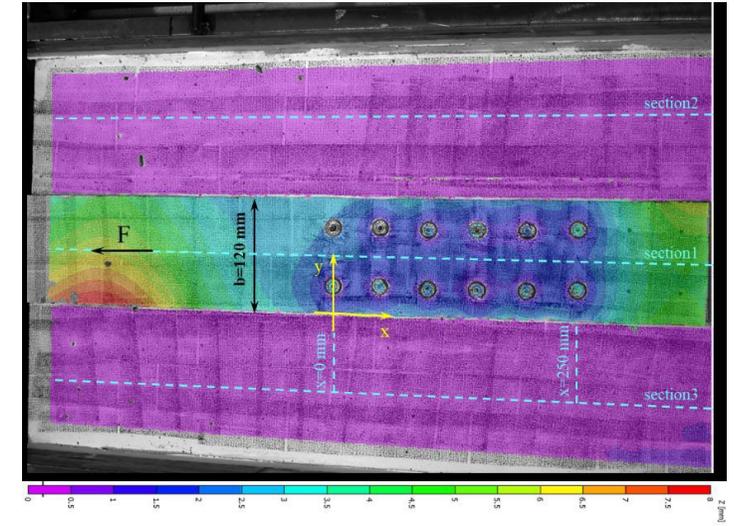
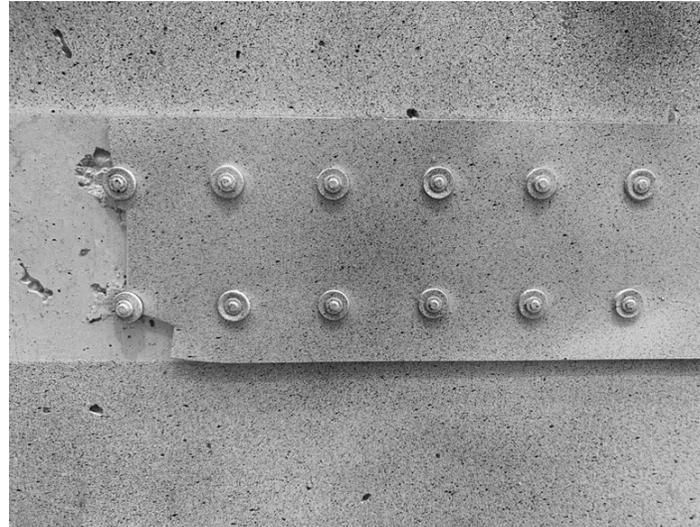
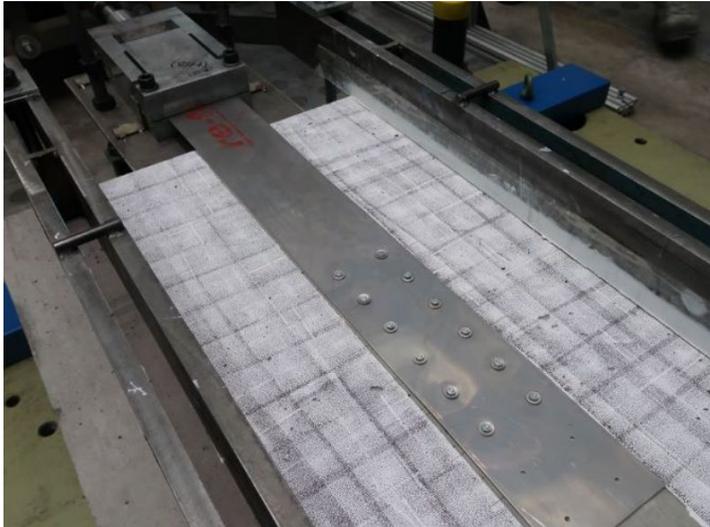


	re-plate	CFK-Lamelle
Axiale Steifigkeit EA [kN]	$\sim 10 \cdot 10^3$	$\sim 11 \cdot 10^3$
Risslast [kN]	3.4 - 5.4	2.0

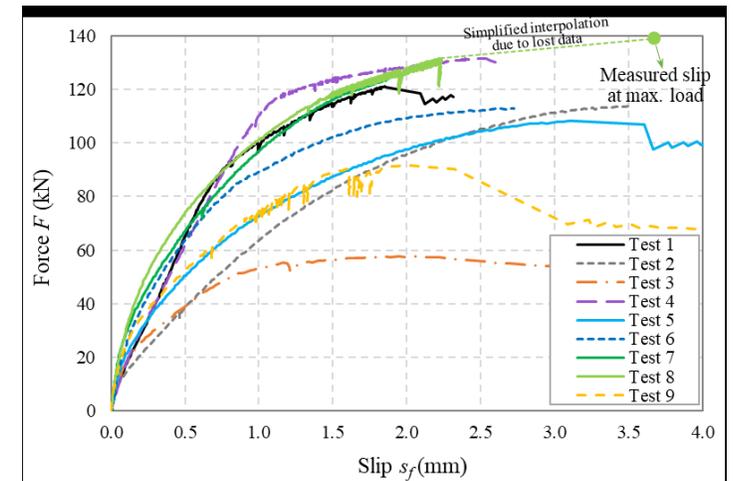
70 - 170% Erhöhung der Risslast im Vergleich zu CFK-Lamellen

Erhöhung der Tragsicherheit

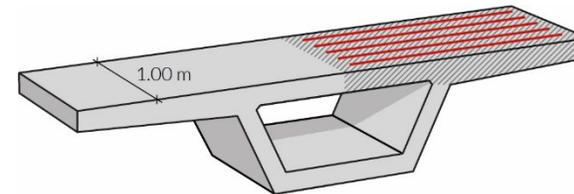
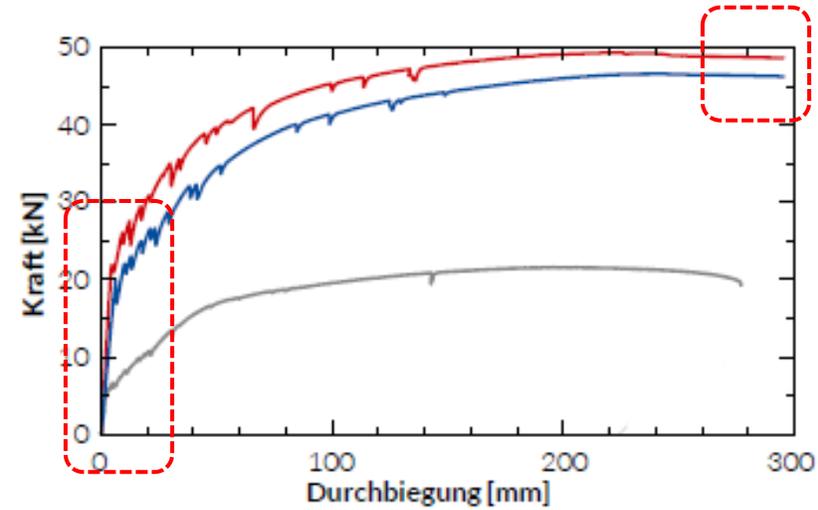
Verankerungsversuche Direktbefestigung



- Versagen durch Abscheren der Nägel oder Zugbruch von re-plate in der vordersten Nagelreihe ab $f_{cm,cube} > 20 \text{ N/mm}^2$



Grossversuch: Verstärkung Brückenplatte



	Referenz- balken	re-bar in Betonnut	re-bar im Re- profiliermörtel
Risslast [kN]	5.9	20.0	21.9
Bruchlast [kN]	21.6	46.6	49.4

Risslast wurde verdreifacht, Bruchlast verdoppelt!

Spannungsreduktion der Innenarmierung



Höhere Lebenserwartung des Bauwerks

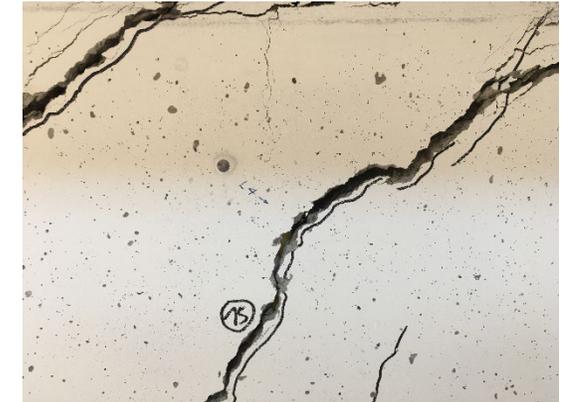
Grossversuch: Schubverstärkung an T-Träger



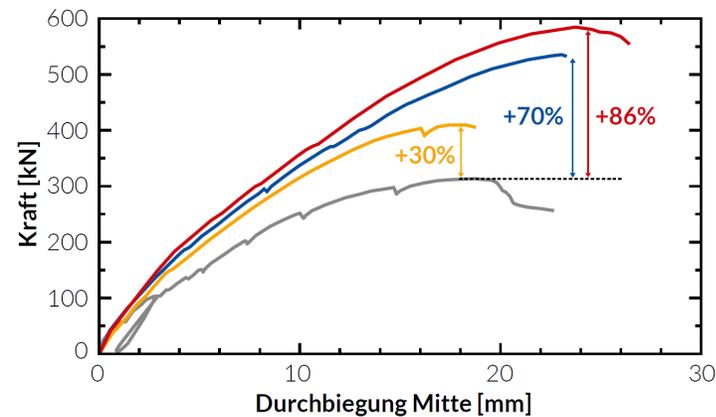
Dehnmessstreifen fixieren



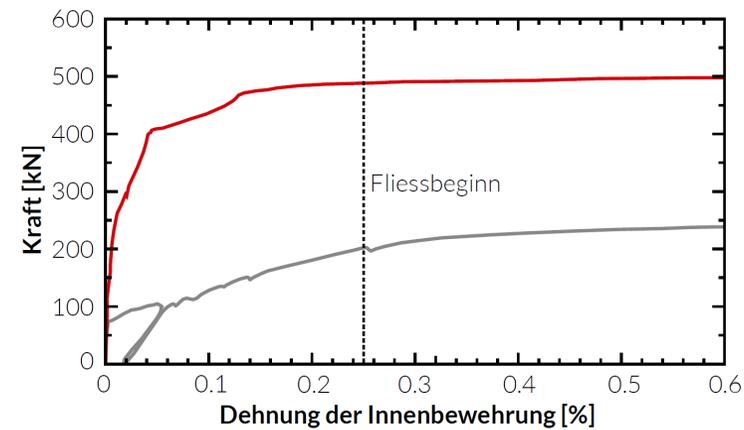
Traglastversuch bis zum Bruch der innenliegenden Schubbügel



Klaffende Risse beim teilzerstörten Referenzträger

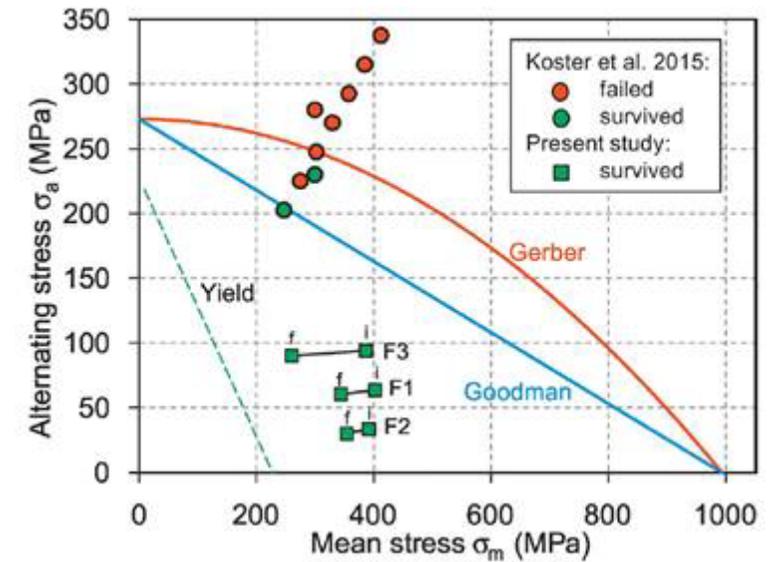


Steigerung Traglast des teilzerstörten Referenzträgers um 30 %



Entlastung der inneren Schubbügel, verbessertes Ermüdungsverhalten

Ermüdungsversuche



Dank Vorspannung kann Mittelwert der Spannung im Bauwerk gesenkt werden und damit die Lebensdauer erhöht werden.

Diverse Dauerbelastungsversuche für re-bar und re-bar R18, inkl. allen Kupplungen und Schweissungen