



Tragwerksverstärkung mit memory[®]-steel

Bemessungsbeispiele

Daniel Schmidig, re-fer

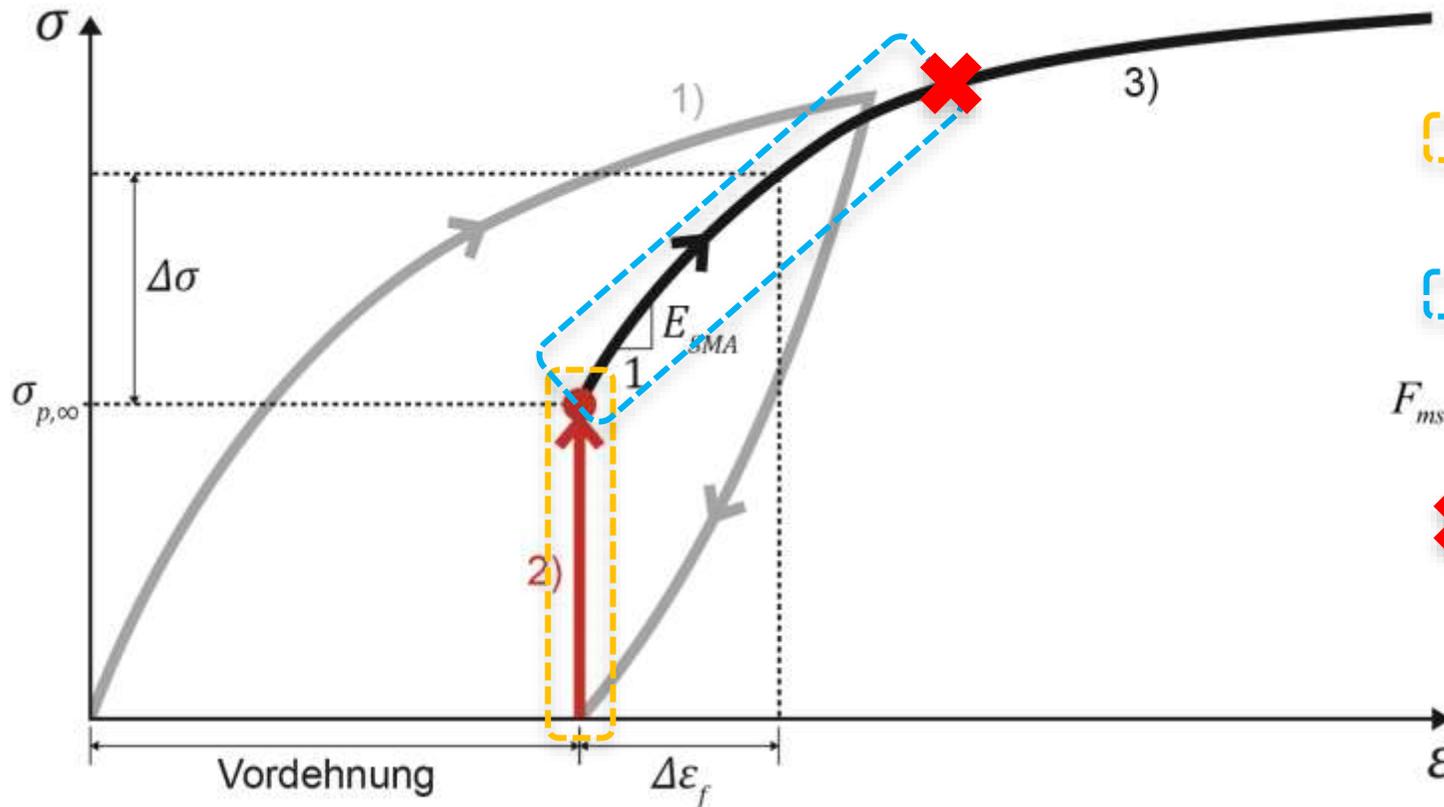


Übersicht

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_∞ $F_{p,\infty}$

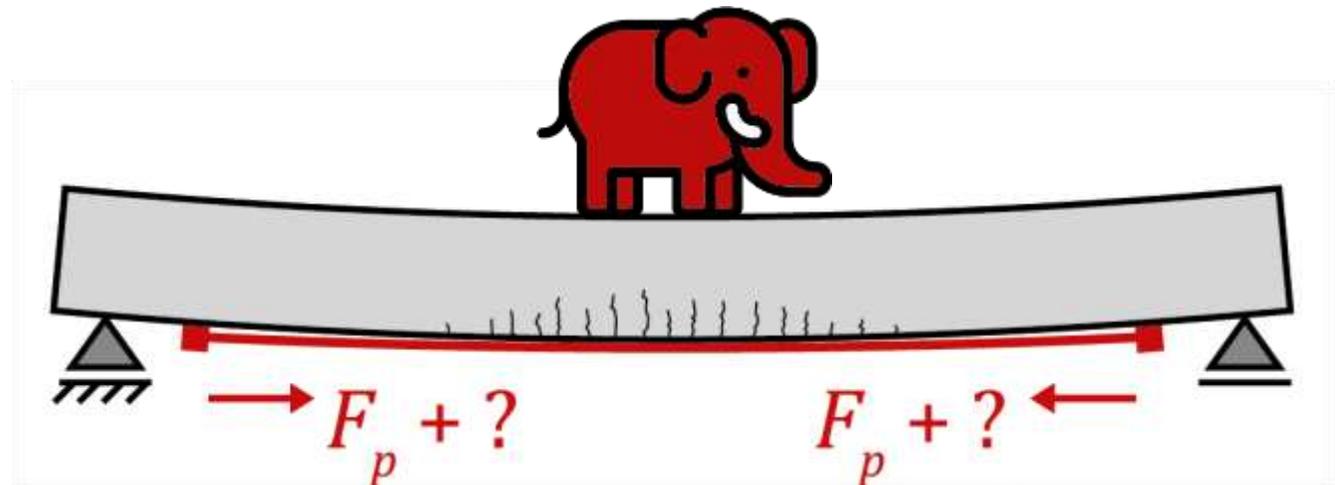
 Zusatzbelastung durch Verformung
des Bauwerks ($E_{SMA} = 70 \text{ kN/mm}^2$)

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

 Bemessungswert

- re-plate: 460 N/mm^2 (Verankerung + Sicherheitsbeiwert 1.3)
- re-bar: 520 N/mm^2 (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*

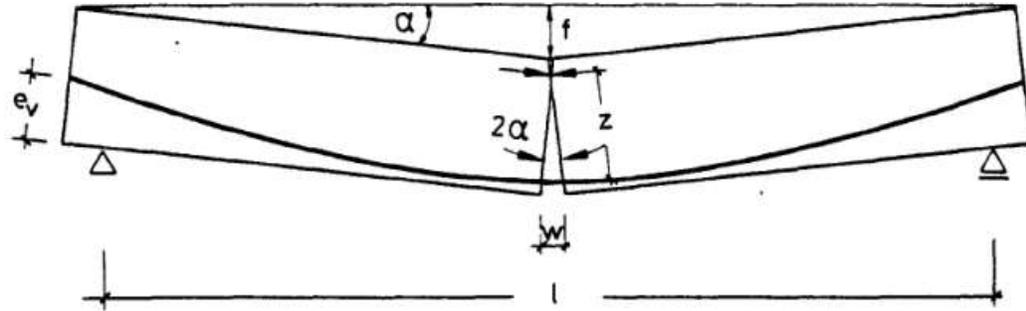


Bild 3.2 Bruchmechanismus nach Bruggeling /6/

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

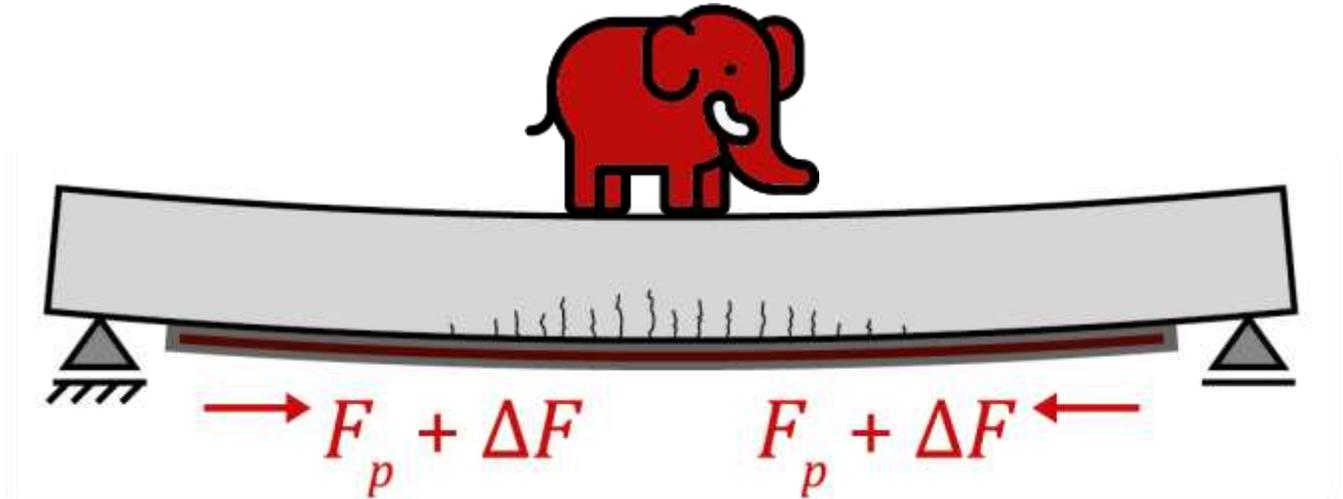
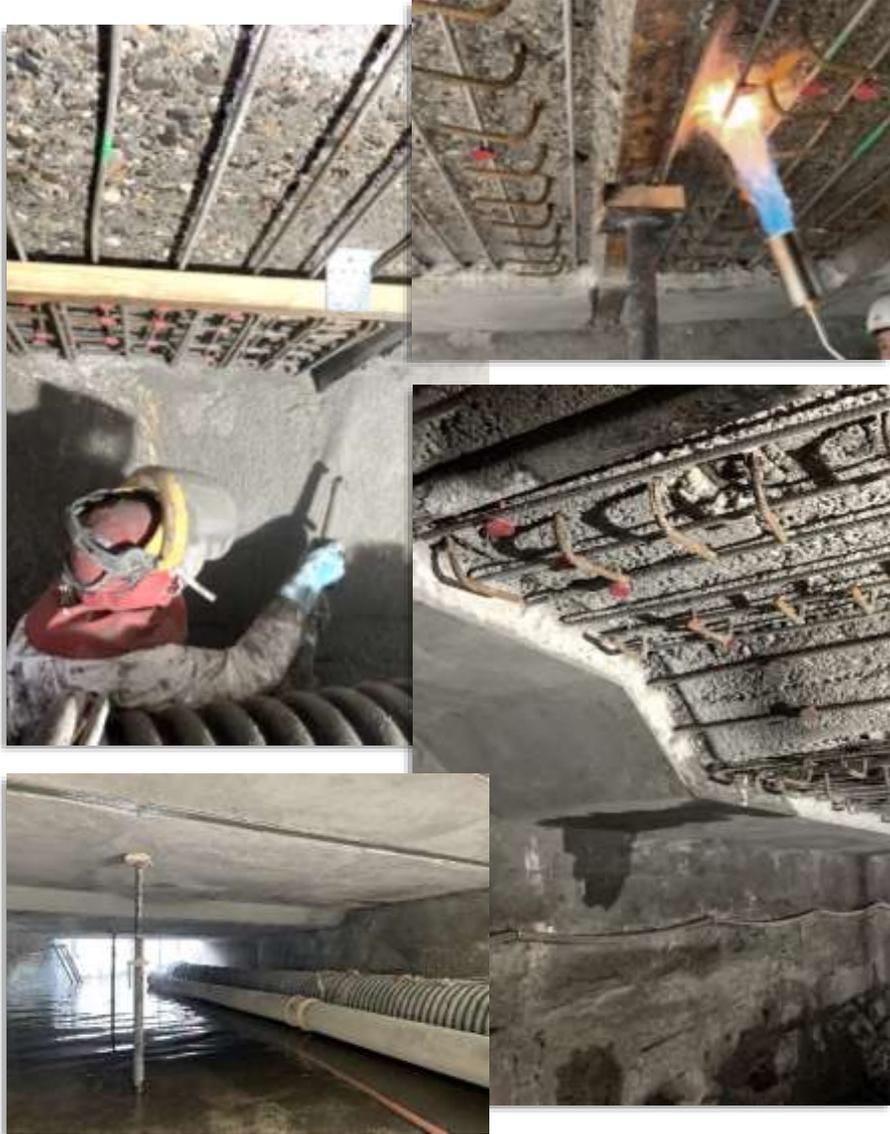
$$\Delta l = \frac{4f \cdot z}{l}$$

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

$$f \leq 0,02 l$$

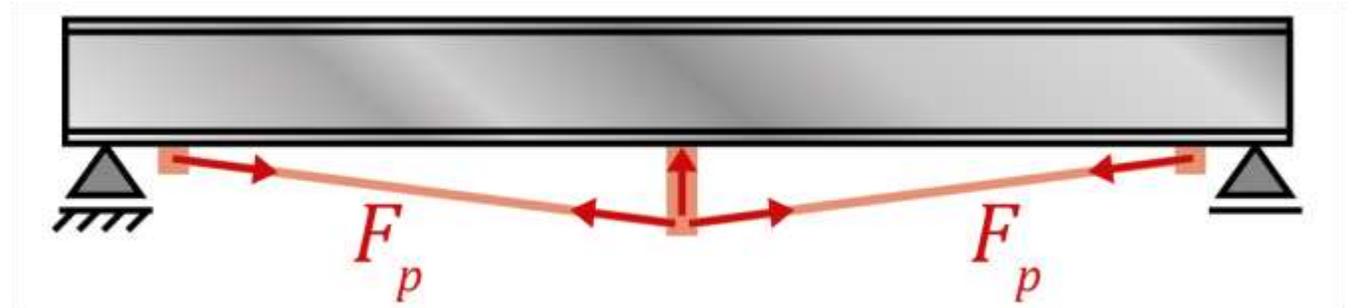
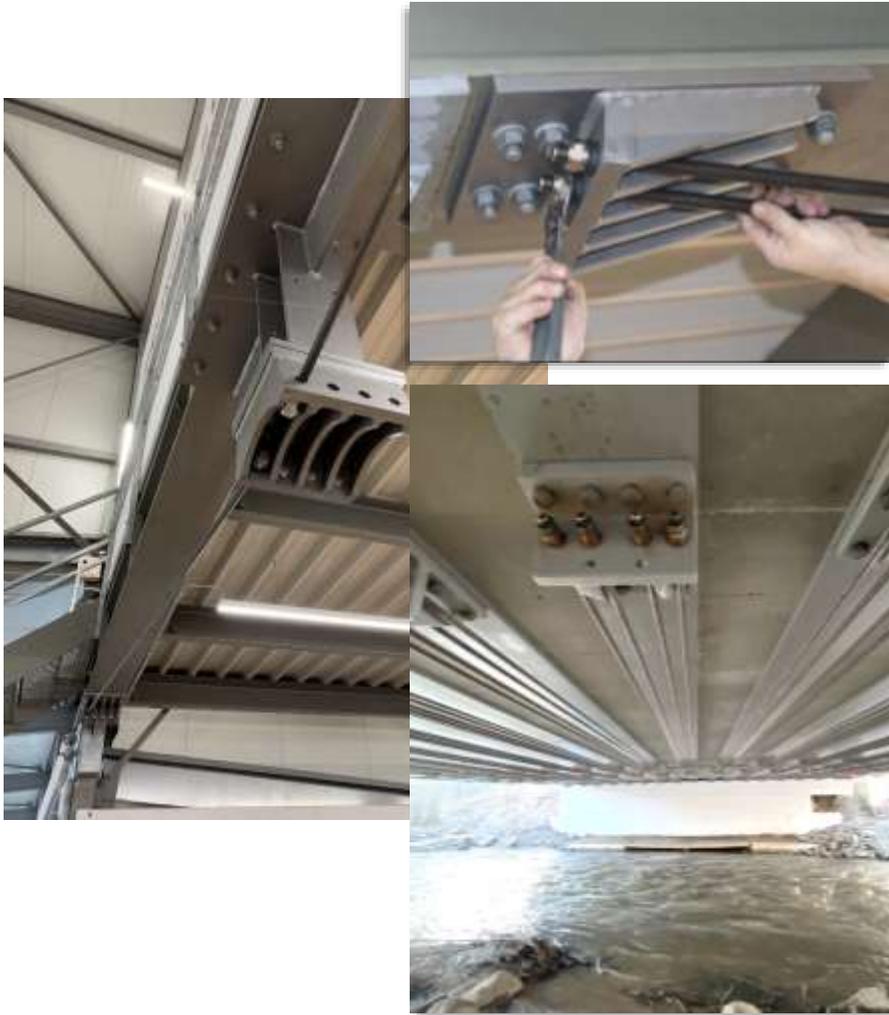
Bruggeling / 6/ stellt für die Berechnung des Spannungszuwachses eine **Beziehung zwischen Gelenkrotation und Durchbiegung** her. Er nimmt an, daß sich z. B. bei einem Einfeldträger (vergl. Bild 3.2) die **gesamten Verformungen in einem Rißquerschnitt in Feldmitte konzentrieren**. Aus den Beziehungen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



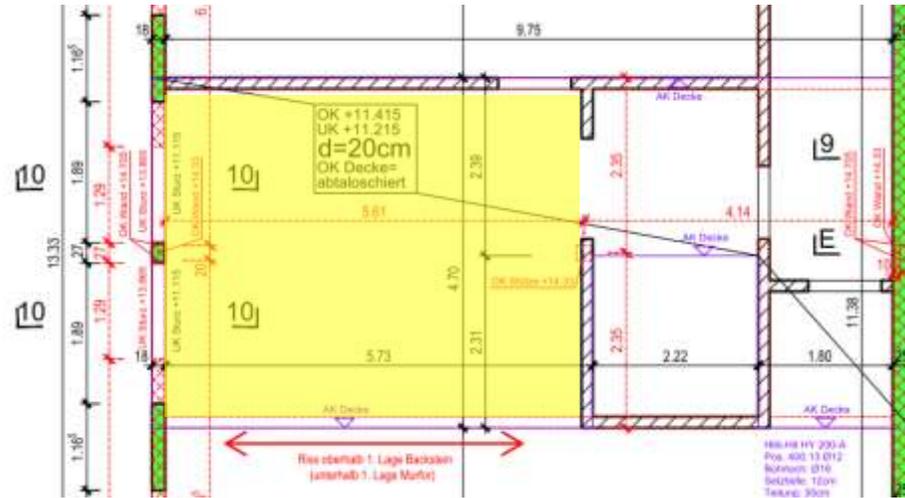
Durchbiegungen Betondecke und Risse in Mauerwerk

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

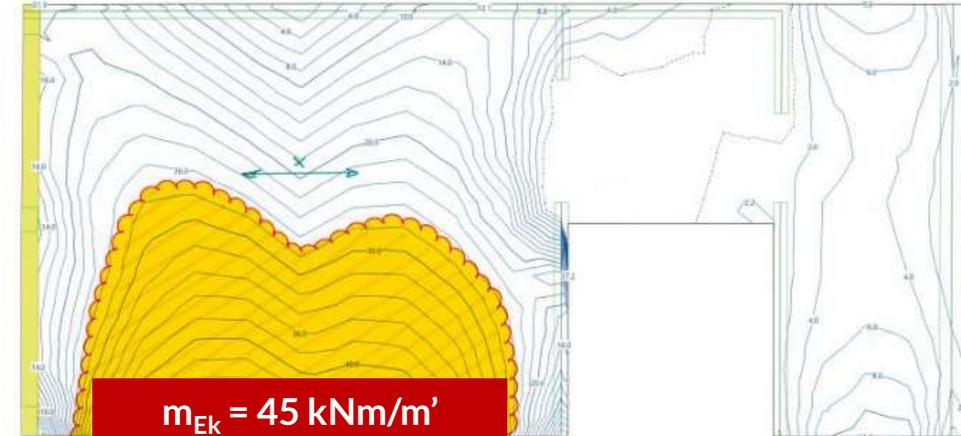
Verwendete Produkte:



Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

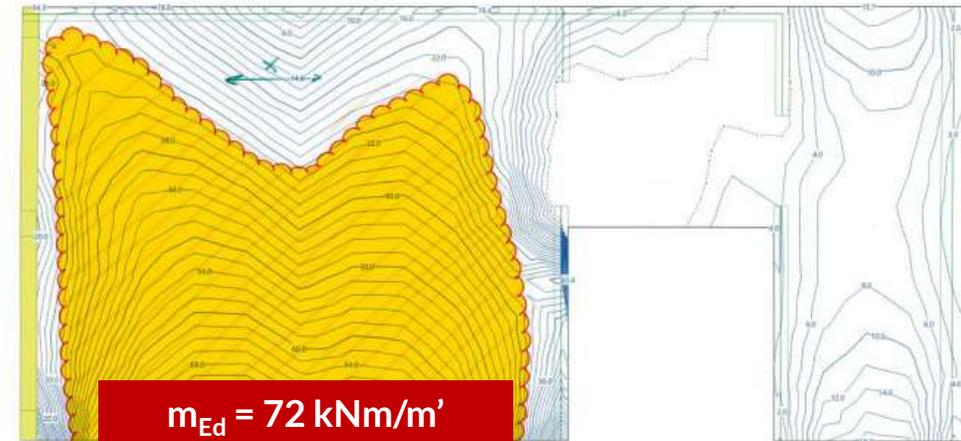


Grenzwerte Bewehrungsmoment m_{axb} [kNm/m']
Quasi-ständiger Lastfall

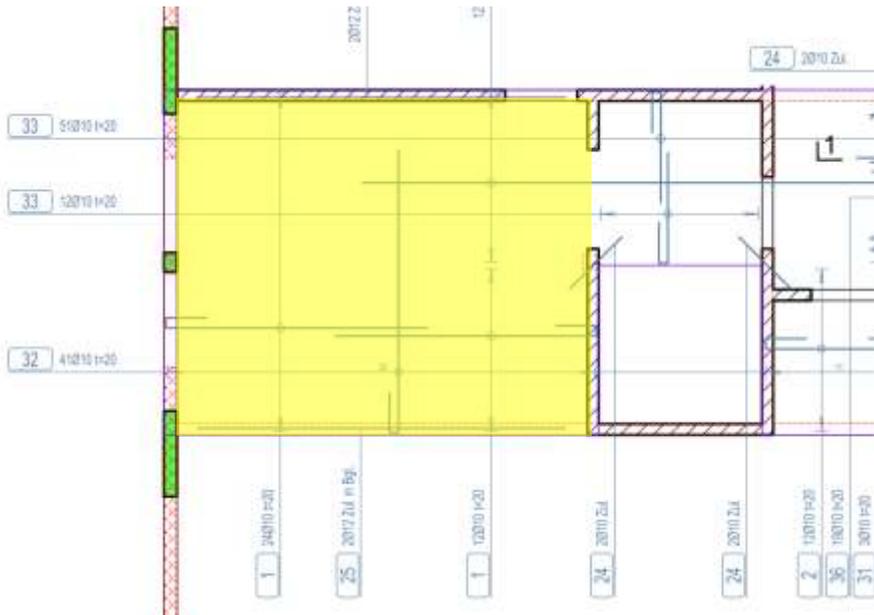


$m_{Ed} = 27 \text{ kNm/m'}$ überbelastet!

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



$m_{Ed} \approx 27 \text{ kNm/m'}$ stark überbelastet!



Biegeverstärkung einer Decke mit re-plate

Materialparameter Bestand

Beton:	Betonsorte wählen:	C25/30	Betonstahl:	f_{yk}	435 N/mm ²	Bemessungswert der Fließgrenze
	f_{ctd}	16.5 N/mm ²		ϵ_{yk}	5.00 ‰	Bemessungswert der Bruchdehnung
	f_{ctm}	2.6 N/mm ²		E_s	205000 N/mm ²	Elastizitätsmodul des Betonstahls
	$f_{ctk,0.05}$	33 N/mm ²		A_s	383 mm ²	Bewehrungsgehalt auf der Breite des Betonquerschnittes
	E_c	32075 N/mm ²		Δd	35 mm	Abstand Achsenmitts der Zugbewehrung zum Zugrand
Geometrie:	h_c	200 mm				
	b_c	1000 mm				
	l	5.65 m	Spannweite des Trägers			

Angaben re-plate 120/1.5

re-plate:	Heizvorgang wählen:	Gas 300-350°C	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).	
	σ_{pr}	380 N/mm ²		Vorspannung im re-plate
	F_{pr}	68.4 kN		Vorspannkraft pro re-plate
	$F_{pr,rel}$	58.1 kN		Vorspannkraft pro re-plate nach Relaxation $t = \infty$
	$E_{s,pr}$	70000 N/mm ²		Elastizitätsmodul von re-plate nach der Abwärtung
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	

Schemaskizze:

Eingabe der Einwirkungen

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

Auswahlbereich

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

Achtung: Mindestabstände gemäß Produktdatenblatt einhalten. Alternative Verankerungslösungen (z.B. Stahlstift) sind möglich.

Resultate

Gebrauchsniveau

Die Vorspannung bewirkt bei richtiger Anwendung 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 geeigneter Querschnitt angenommen wird, reduziert sich der Berechnungswert $E_c I$ zu $E_c I_D$.

$$w = \frac{M \cdot l^3}{8 \cdot E_c I}$$

Soll der Betonquerschnitt als "gerissen" angenommen werden? JA

Kraft pro re-plate (Annahme reine Vorspannkraft mit nach Relaxation): $F_{pr,rel}$ 58.1 kN

Höhe der Nulllinie (Hebelarm von re-plate): e_{00} 156 mm

re-plate Vorspannmoment unter Gebrauchslast: $M_{pr,02}$ 27.3 kNm

Reduktion der Durchbiegung aufgrund Vorspannung: w_{red} 14.3 mm

Resultierende Stahlspannung der innenliegenden Bewehrung: σ_s 304 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: $F_{pr,br}$ 83.1 kN

Höhe der Nulllinie (Hebelarm von re-plate): e_{02} 186 mm

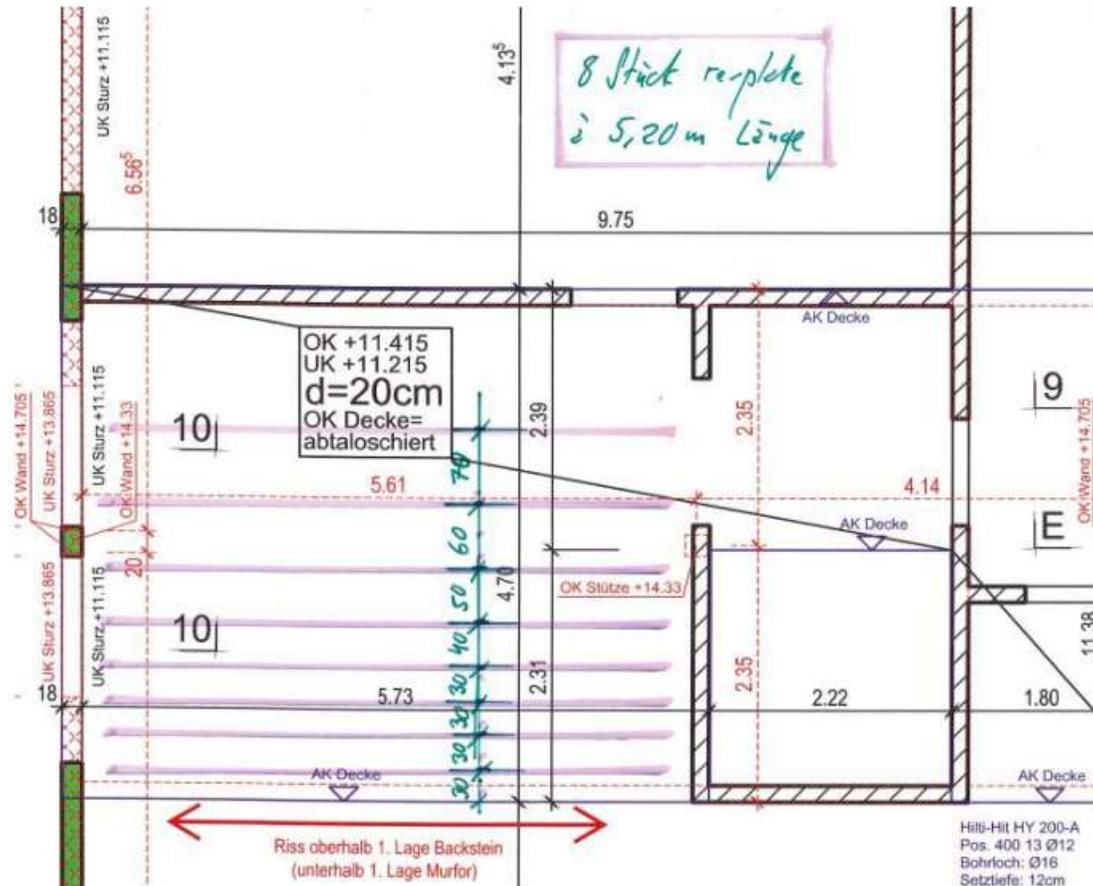
Biege Widerstand des verstärkten Trägers: $M_{Rd,02}$ 72.0 kNm

Anteil des Biege Widerstandes aus re-plate: $M_{R,02}$ 48.3 kNm

- Biegenachweis im Grenzzustand Tragsicherheit ist erfüllt.
- 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:

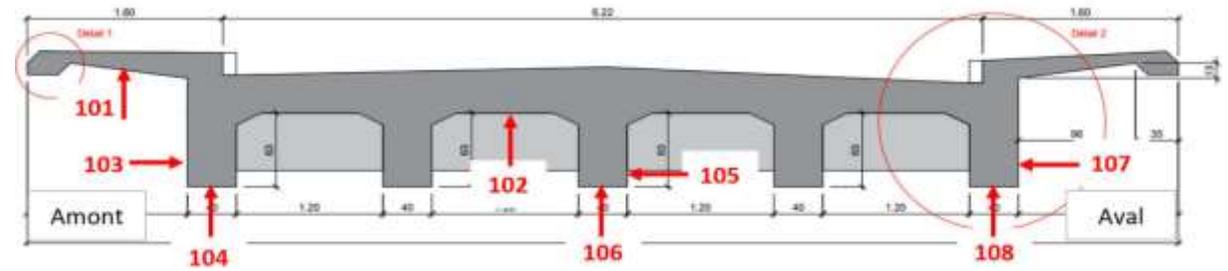


Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar

Voruntersuchungen:



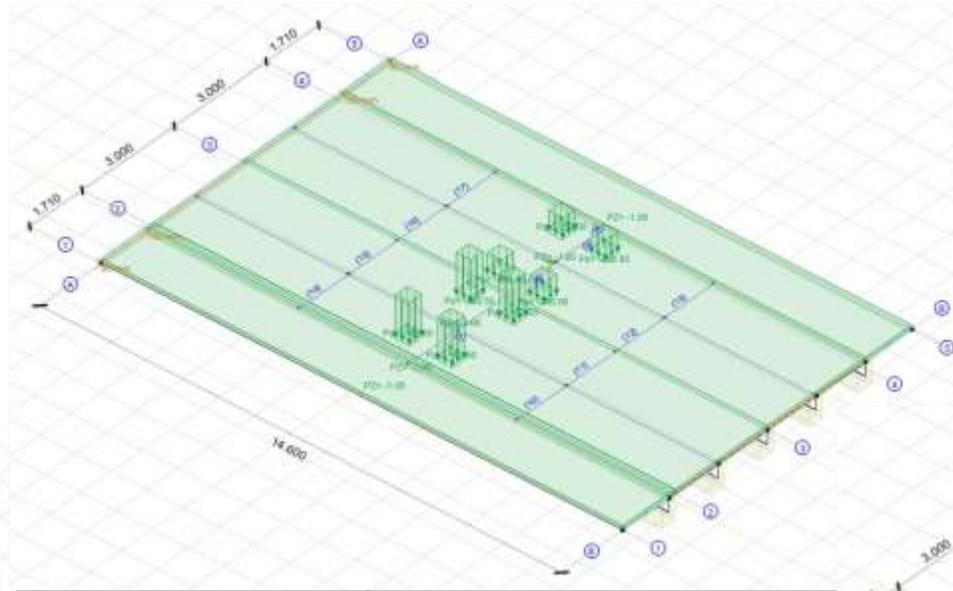
Voruntersuchungen:



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

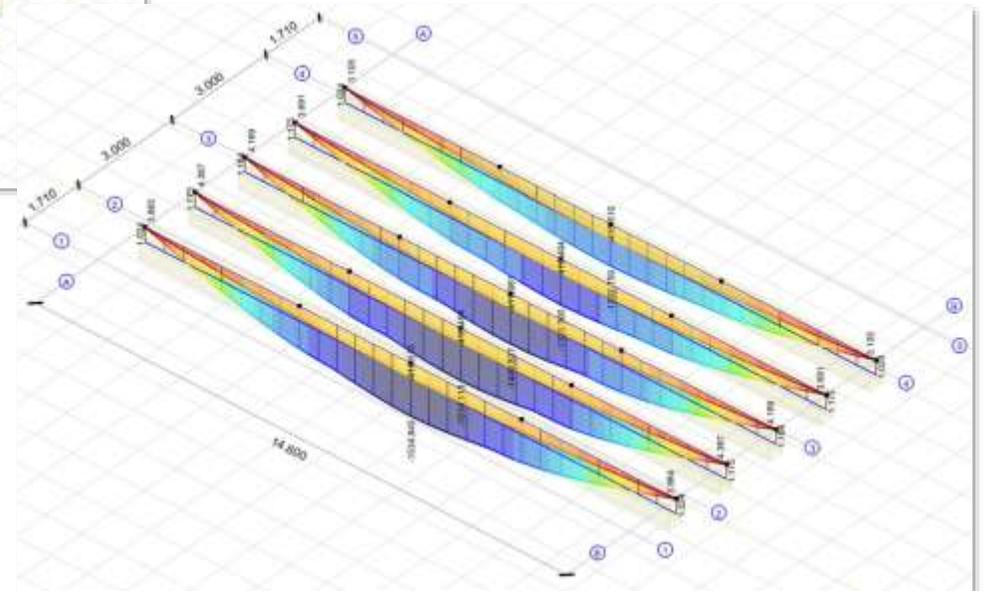
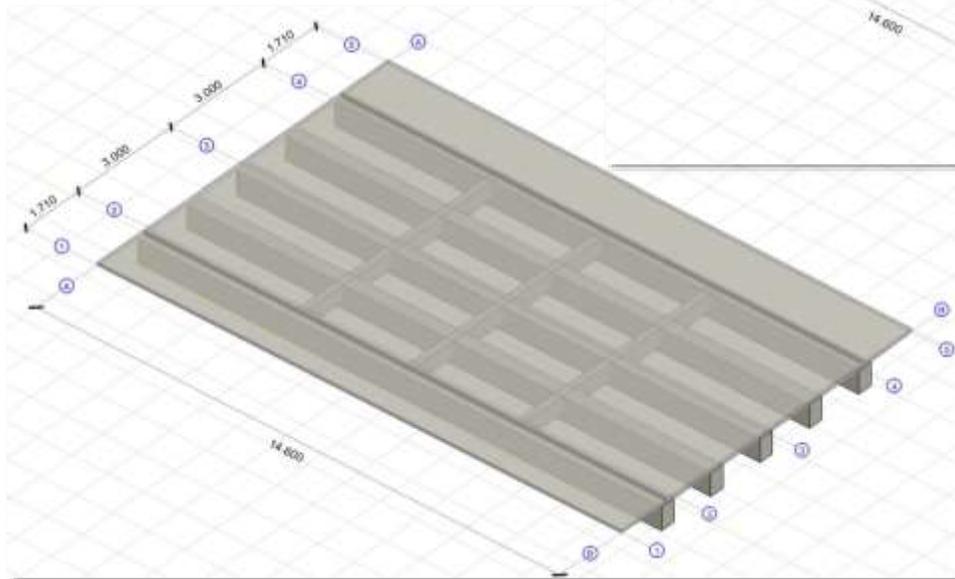
$$V_{Rd} = 404 \text{ kN}$$

Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



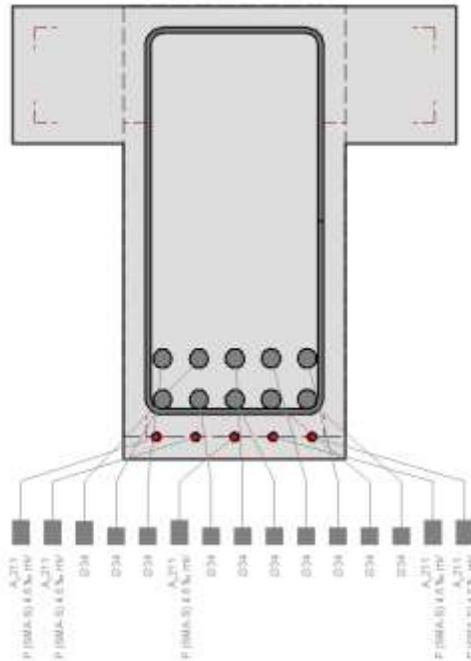
$M_{Ed} = 1'534 \text{ kNm}$ ❌

$V_{Ed} = 320 \text{ kN}$ ✅

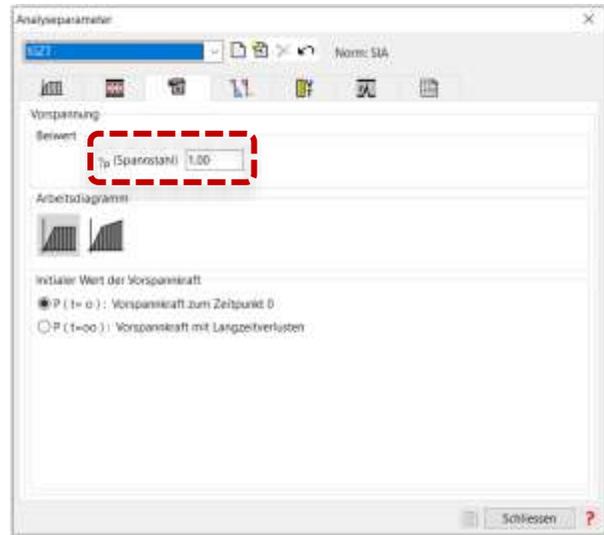


Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar

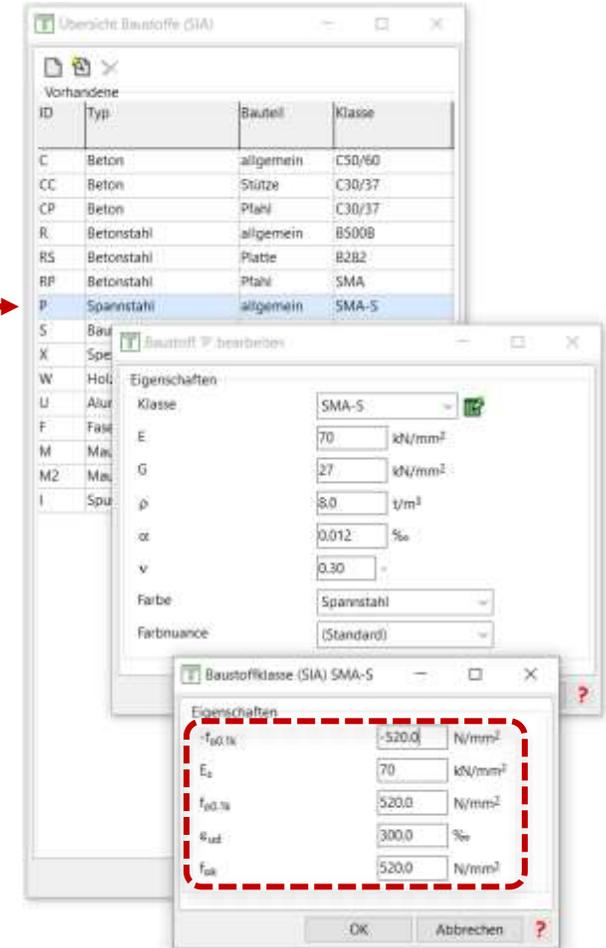
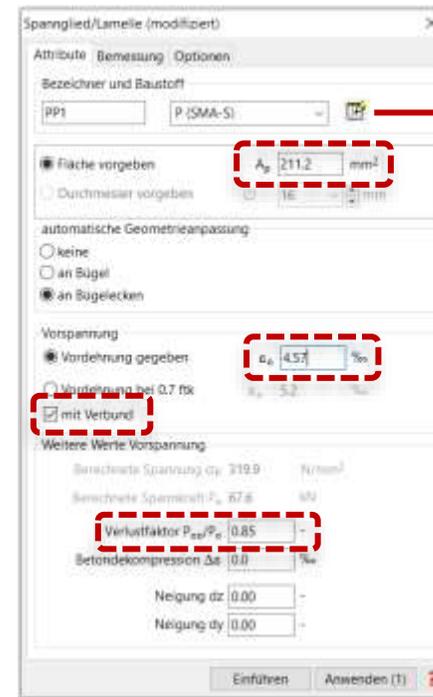
Spannglied wählen und
neues Material definieren



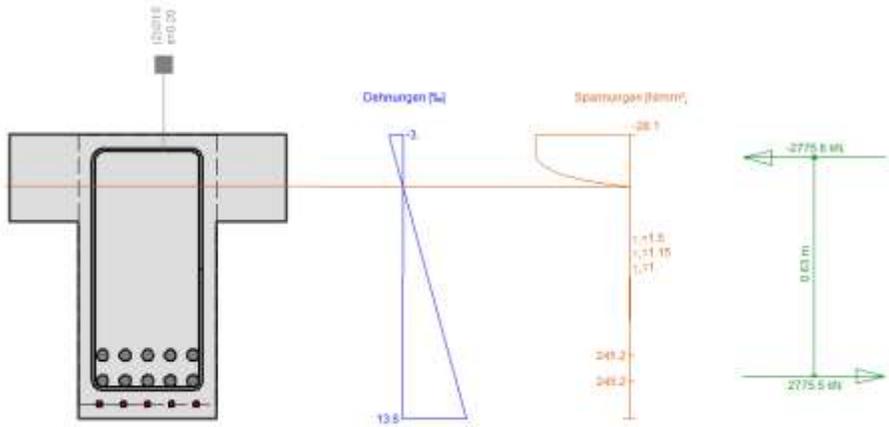
Sicherheitsbeiwert kann
auf 1.00 gesetzt werden



Parameter-Eingabe
gemäss Dokumentation
oder Excel Tool



Biegeverstärkung eines Brückenträgers mit re-bar



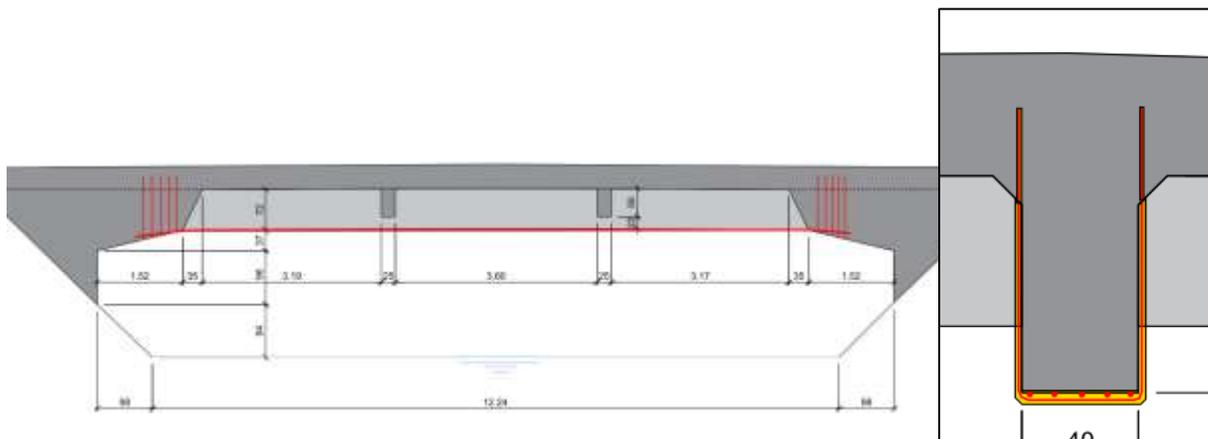
$M_{Ed} = 1'690 \text{ kNm}$ ✓

$\sigma_{d,s} = 174 \text{ N/mm}^2$ ✓

- ✓ **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

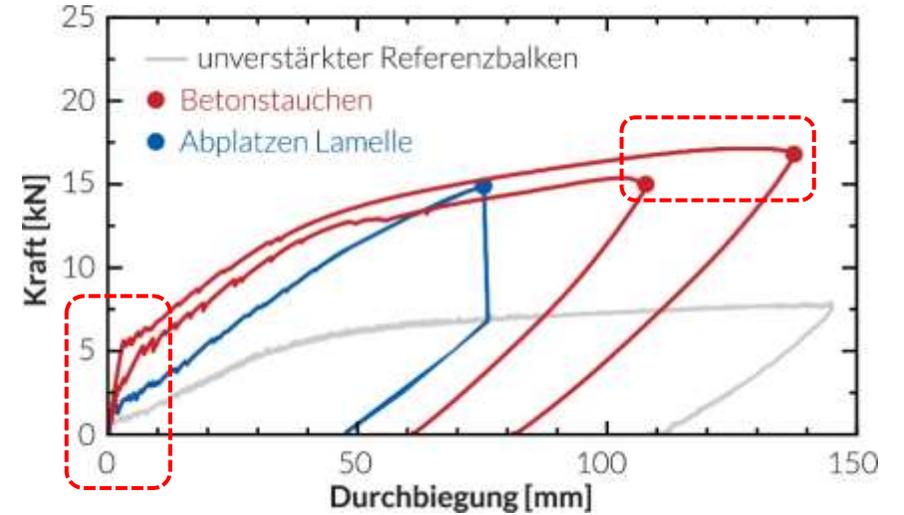




Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit



Vergleich re-plate mit CFK-Lamellen

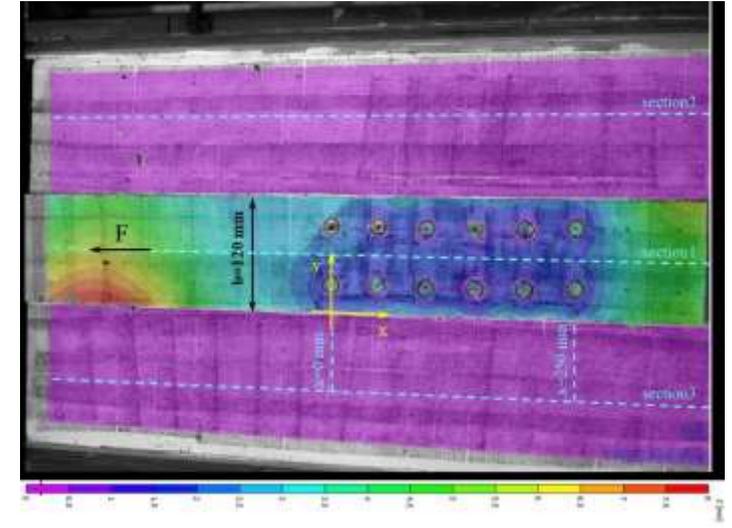
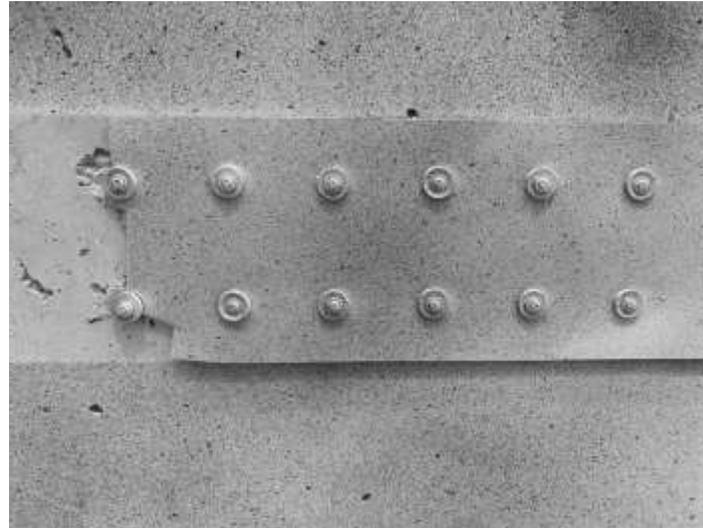


	re-plate	CFK-Lamelle
Axiale Steifigkeit EA [kN]	$\sim 10 \cdot 10^3$	$\sim 11 \cdot 10^3$
Risslast [kN]	3.4 - 5.4	2.0

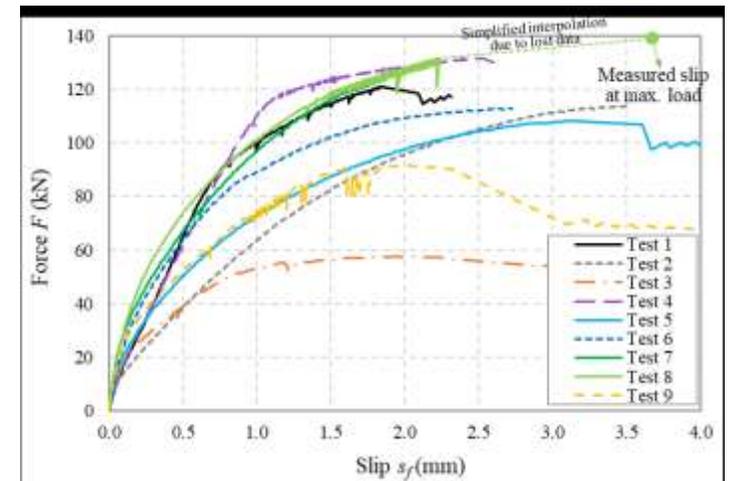
70 - 170% Erhöhung der Risslast im Vergleich zu CFK-Lamellen

Erhöhung der Tragsicherheit

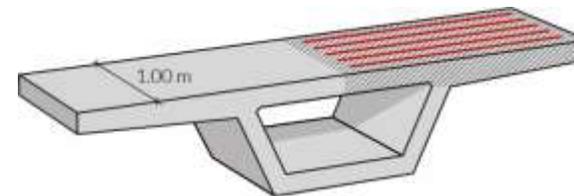
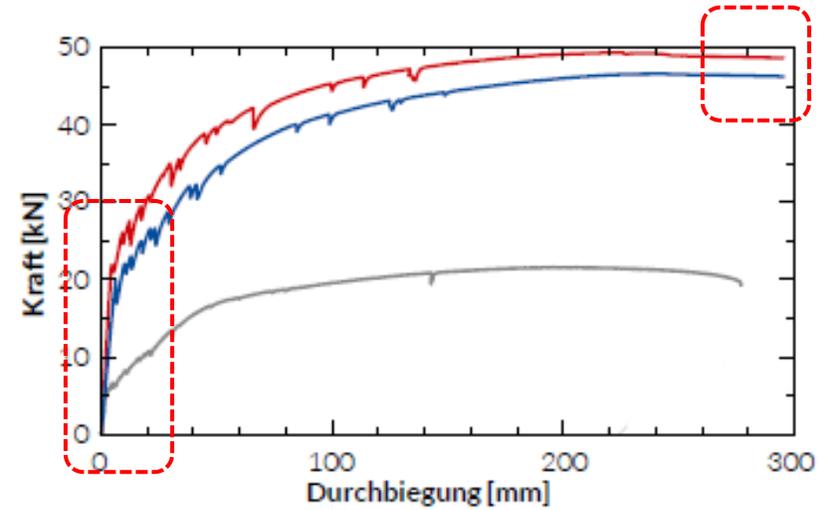
Verankerungsversuche Direktbefestigung



- 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- profillermörtel
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

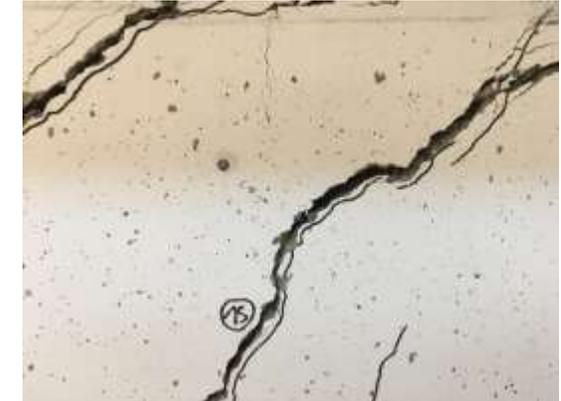
Grossversuch: Schubverstärkung an T-Träger



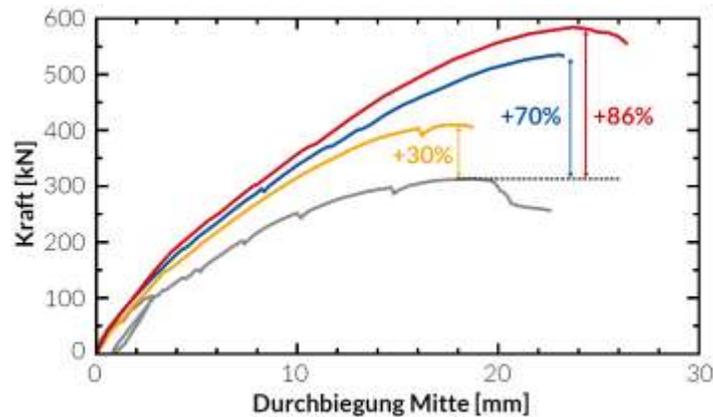
Dehnmessstreifen fixieren



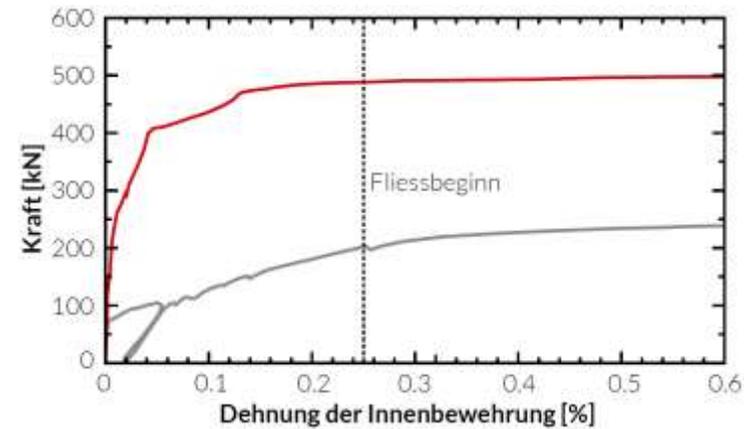
Traglastversuch bis zum Bruch der innenliegenden Schubdügel



Klaffende Risse beim teilzerstörten Referenzträger

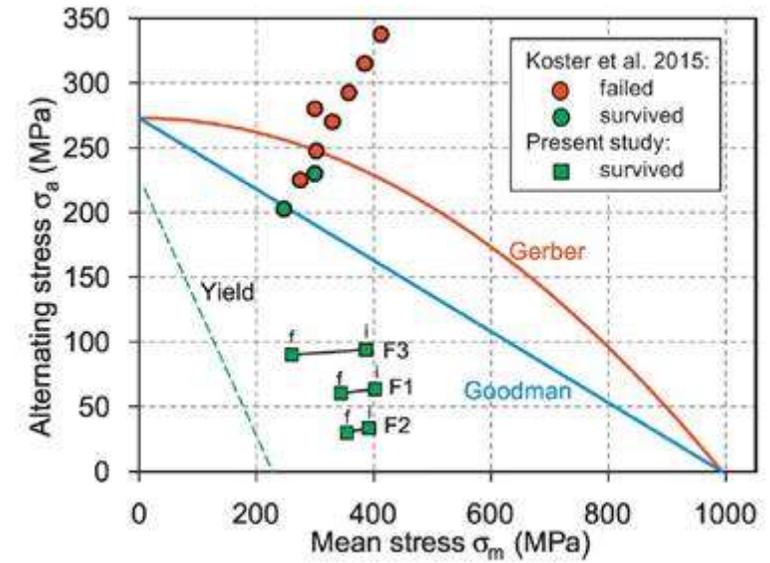


Steigerung Traglast des teilzerstörten Referenzträgers um 30 %



Entlastung der inneren Schubdügel, 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