

Bemessungs- und Planungshilfe Memory®-Stahl re-bar

18.09.2025 / V2.1 / 3S Structural Solutions GmbH



Inhalt

1	Allgemeines	5
1.1	Einleitung	5
1.2	Berechnungsgrundlagen	5
1.3	Memory®-Stahl.....	5
1.3.1	Tragverhalten	5
1.3.2	Materialverhalten.....	6
1.4	Theoretische Bemessungsgrundlagen	7
1.4.1	Allgemeines	7
2	Bemessung re-bar 10 & 16	8
2.1	Bauzustand.....	8
2.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZG	8
2.3	Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT	8
2.4	Verankerung von re-bar.....	9
2.5	Querschnittsanalyse-Software.....	9
3	Planungshinweise	11
3.1	Korrosionsschutz	11
3.2	Brandschutz.....	11
3.3	Konstruktive Regeln.....	11
3.3.1	Biegeradien	11
3.3.2	Schraubkuppler	11
3.3.3	Minimale Abstände	12
3.3.4	Kritische Drittprodukte	13
3.4	Sonstige Nachweise	13
4	Bemessungsbeispiele	14
4.1	Schub- und Biegeverstärkung eines T-Trägers.....	14
4.1.1	Nachweis der Tragsicherheit:.....	15
4.1.2	Nachweis auf Gebrauchsniveau:	17
4.1.3	Nachweis der Verankerungsbereichen:	18
4.1.4	Schemaskizze der Verstärkung:.....	19
4.2	Abschließendes	19

Buchstabenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A_{SMA}	Querschnittsfläche re-bar
A_s	Gesamtquerschnittsfläche der Bewehrung
A_p	Bewehrungsquerschnitt eines Spannstahls
a_s	Bewehrungsquerschnitt pro Meter Breite
b	Breite des Betonquerschnittes
d	Statische Höhe der innen liegenden Bewehrung
d_f	Statische Höhe von re-bar
E_c	E-Modul Beton
E_{SMA}	E-Modul Memory®-Stahl nach Aktivierung
F_c	Beton Druckkraft
f_{cd}	Bemessungswert der Druckfestigkeit von Beton
$f_{sd,SMA}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit von re-bar
$F_{sd,SMA}$	Zugkraft Memory®-Stahl für Querschnittsanalyse
$F_{p,0}$	Vorspannkraft Memory®-Stahl, direkt nach Aktivierung, $t = 0$
$F_{p,\infty}$	Vorspannkraft Memory®-Stahl, nach Relaxation, $t = \infty$
f_{pk}	Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit von Spannstahl
$f_{p0.1k,sd}$	Charakteristischer Wert der 0.1%-Dehngrenzspannung von Spannstahl
F_s	Zugkraft im Bewehrungsquerschnitt
h_c	Dicke der Betonplatte
I	Trägheitsmoment
l	Spannweite Betonplatte/-träger
l_b	Verankerungslänge
M_{Ed}	Bemessungswert des Biegemoments
$M_{p,BZ}$	Vorspannmoment im Bauzustand
$M_{p,GZ}$	Vorspannmoment nach Relaxation (für Berechnung Grenzzustand bei $t = \infty$)
M_{Rd}	Bemessungswert Biegezugwiderstand
m_{Rd}	Bemessungswert Biegezugwiderstand pro Meter Breite
P_0	Vorspannkraft eines Spannglieds bei $t = 0$
P_∞	Vorspannkraft eines Spannglieds nach $t = \infty$
V_{Ed}	Bemessungswert der Querkraft
V_{Rd}	Bemessungswert des Querkraftwiderstands
w_{eff}	Vorhandene Durchbiegung
w_{zul}	Zulässige Durchbiegung
x	Höhe der Biegedruckzone
z	Hebelarm

Notiz: Eisenbasierte Formgedächtnislegierung (Abkürzung Fe-FGL, englisch ironbased shape memory alloy, Abkürzung Fe-SMA)

Griechische Buchstaben

γ_p	Sicherheitsbeiwert Spannstahl
ε_0	Vordehnung des Spannglieds
ε_c	Betondehnung auf Druck
$\varepsilon_{p,0}$	Vordehnung von re-bar im Werk
$\varepsilon_{p,sd}$	Bemessungswert Bruchdehnung von Betonstahl oder Spannstahl
ε_s	Dehnung der innenliegenden Stahlbewehrung
ε_{SMA}	Dehnung von re-bar
$\varepsilon_{SMA,u}$	Bemessungswert Bruchdehnung von re-bar
ε_{ud}	Bemessungswert Bruchdehnung von Betonstahl oder Spannstahl
$\Delta\varepsilon_{SMA}$	Dehnungszuwachs von re-bar aus Längenänderung
$\Delta\sigma_{SMA}$	Spannungsänderung im re-bar
$\sigma_{p,0}$	Anfangsvorspannung von re-bar direkt nach Aktivierung
$\sigma_{p,\infty}$	Endvorspannung nach Relaxation

1 Allgemeines

1.1 Einleitung

Wenn sämtliche produktspezifischen Vorgaben der jeweiligen Hersteller (Memory®-Stahl, Mörtel und Zusatzprodukte) sowie die relevanten normativen Anforderungen (z. B. Oberflächenrauigkeit, Betonvor- und Nachbehandlung) eingehalten werden, können die konventionellen Regeln der Tragwerksbemessung für Stahl- und Spannbetonbauten angewendet werden.

Der Rippenstahl **Memory®-Stahl re-bar 10 & 16** wird in den Betonersatzmörtel (R3 und R4 Mörtel für statische Instandsetzungen) eingelegt oder im Schlitz vergossen. Für die Bemessung wird ein starrer Verbund angenommen.

Im Folgenden werden Bemessungsvorschläge für Biege- und Schubverstärkungen sowohl im Bauzustand als auch in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit erläutert. Zum besseren Verständnis sind Bemessungsbeispiele aufgezeigt.

1.2 Berechnungsgrundlagen

Die Bemessung erfolgt nach den gängigen Regeln des Stahl- und Spannbetons. Für gewisse Anwendungen kann sich an Normen zu Mauerwerk angelehnt werden.

Materialkennwerte sind den aktuell gültigen Datenblättern der jeweiligen Produkte zu entnehmen (verfügbar auf Nachfrage info@3s-structures.de). Verwendete Werte in den Bemessungsbeispielen können aufgrund Materialoptimierungen von den gültigen Materialkennwerten abweichen und sind entsprechend zu überprüfen. Bei Unklarheiten oder speziellen Bemessungssituationen unterstützt Sie die Ingenieursabteilung der 3S Structural Solutions GmbH gerne. Für weitere Informationen besuchen Sie unsere Webseite.

1.3 Memory®-Stahl

1.3.1 Tragverhalten

Bei einer Biegeverstärkung werden die Vorspannkräfte beim re-bar System über den Endverankerungsbereich infolge des Verbundes zwischen Mörtel und Beton und gegebenenfalls Endhaken in die bestehende Konstruktion eingeleitet. Nach dem Aushärten des Mörtels im Verankerungsbereich an beiden Stabenden erfolgt das Aktivieren des Memory®-Stahls und damit der Vorspannvorgang in den meisten Fällen mittels Gasflamme bis zu einer Temperatur von etwa 300 °C.

Nach dem Aufheizen und dem anschließenden Abkühlen werden die re-bar Stäbe auch in der freien Länge zwischen den Verankerungen in Mörtel eingebettet und kann so im Verbund mit der bestehenden Struktur wirken (Abb. 1a). Infolge der Dehnungskompatibilität zwischen re-bar und dem Mörtel sowie der bestehenden Betonkonstruktion können die gängigen Regeln der Bemessung für Stahl- und Spannbeton angesetzt werden. Durch die etappenweise Applikation wird ausschließlich der bestehende Beton vorgespannt, während der in der freien Länge nachträglich applizierte Mörtel nicht vorgespannt wird.

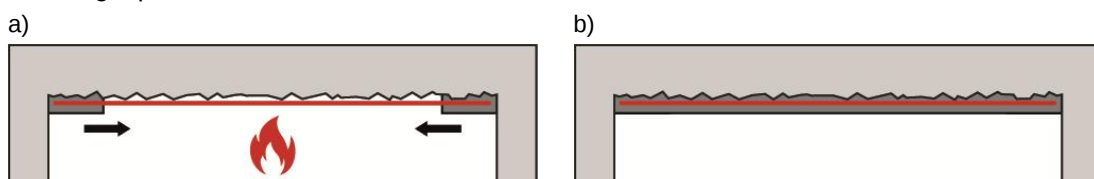


Abbildung 1: a) Vorspannkräfte in Endbereiche eingeleitet, b) nachträglich vollständiges Ausmörteln

Alternativ können die Stäbe zunächst vollständig vermörtelt und anschließend mittels elektrischem Widerstandsheizen nachträglich aktiviert werden. In diesem Fall agiert die Vorspannung konstant über die gesamte Stablänge. Die Stäbe sind dabei zwingend elektrisch von der Innenbewehrung zu trennen. Als Anschlussstellen dienen bspw. kleine Betonaussparungen oder aufgebogene Endhaken an re-bar. Diese werden zum Abschluss vermörtelt, respektive abgetrennt und versiegelt.

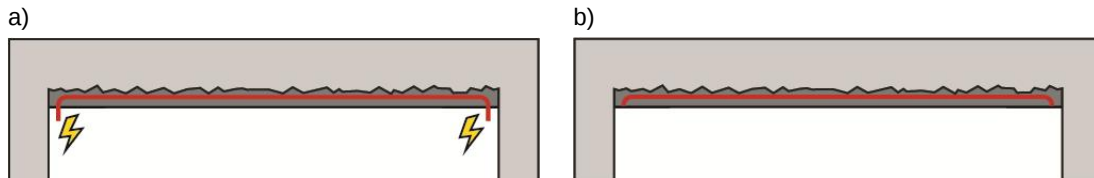


Abbildung 2: a) Elektrisches Erhitzen, Vorspannung über gesamte Länge, b) abgetrennte Endhaken

Dieselben Strategien gelten auch für weitere Anwendungen von re-bar, beispielsweise beim Einsatz als Schubverstärkung oder bei Umwicklungen von Stützen.

1.3.2 Materialverhalten

Memory®-Stahl hat kein konventionelles linear elastisches, ideal plastisches Materialverhalten. Einer initialen elastischen Verformung mit einem E-Modul von etwa 160 kN/mm^2 (E_{SMA}) folgt eine «pseudo-plastische» Verformung. Das Kristallgitter des Materials wandelt sich dabei von einem austenitischen in ein teilweise martensitisches Gefüge um. Diese Umwandlung des Kristallgefüges kann zu einem späteren Zeitpunkt mittels Erhitzens zu einem gewissen Anteil wieder rückgängig gemacht werden.

re-bar wird vorgängig im Werk auf eine verbleibende Dehnung $\varepsilon_{p,0}$ vorgedehnt und so auf die Baustelle geliefert. Wird re-bar am Untergrund verankert (Rückverformung verhindert) und erhitzt, wird über die Verankerung eine Vorspannung ($\sigma_{p,0}$) in den Untergrund eingeleitet (A). Falls re-bar keine Verankerung aufweist, zieht sich der Stab wieder zusammen und macht die anfängliche Vordehnung in Teilen wieder rückgängig (B).

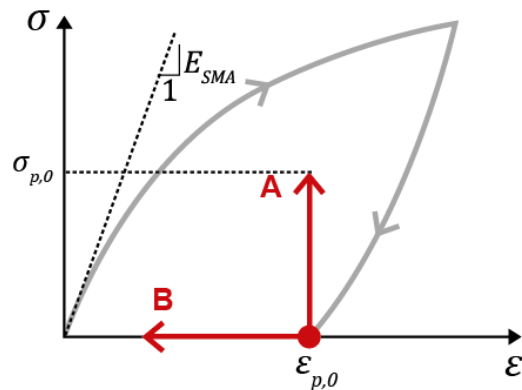


Abbildung 3: Schematisches Spannungsdehnungsdiagramm beim Vordehnen und bei der Aktivierung von re-bar

Für statische Tragwerks- oder Querschnittsanalysen ist das Materialverhalten nach dem Vorspannen von Interesse (Abb. 4):

- Die Vorspannung $\sigma_{p,0}$ reduziert sich aufgrund von Relaxation um 15% über 50 Jahre ($\sigma_{p,\infty}$).
- Bei der weiteren Belastung bzw. Verformung des Tragwerks entsteht über den Verbund von re-bar mit dem Mörtel/Beton ein Spannungszuwachs $\Delta\sigma_{SMA}$.
- Bis zu einem Spannungszuwachs von 50 N/mm^2 beträgt E_{SMA} 160.000 N/mm^2 , sinkt jedoch anschliessend auf einen Wert von rund 70.000 N/mm^2 .
- Die maximale Zugfestigkeit liegt bei $>700 \text{ N/mm}^2$, diese wird bei Bruchdehnungen von über 20% erreicht.
- Für die Bemessung wird deshalb mit einer maximalen Zugfestigkeit $f_{sd,SMA}$ von 520 N/mm^2 gerechnet und bis zum Bemessungswert der Bruchdehnung $\varepsilon_{SMA,u}$ von 10% kein weiterer Spannungszuwachs mehr angenommen.

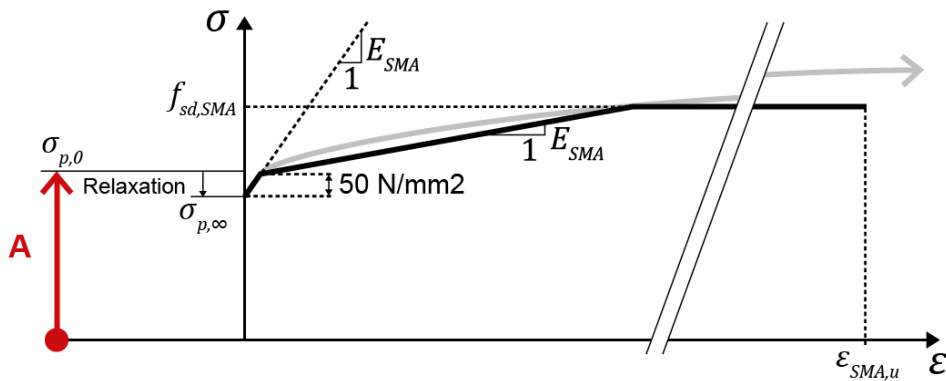


Abbildung 4: Spannungsdehnungsdiagramm von re-bar, nach der Vorspannung am Bauwerk

Das aufwändige Einbeziehen des initialen E-Moduls von 160 kN/mm² in einem Spannungszuwachs von 50 N/mm² macht bei detaillierten Untersuchungen von dynamisch dauerbelasteten Tragwerken Sinn. Dabei soll der Spannungszuwachs bei ständiger Dauerbelastung die 50 N/mm² nicht übersteigen. Für die simple Bemessung des Grenzzustandes der Tragsicherheit kann einfachheitshalber mit einem konstanten E_{SMA} von 70 kN/mm² gerechnet werden. Das unterschätzt die effektive Festigkeit und Steifigkeit des Materials geringfügig und stellt eine konservative Vereinfachung dar.

1.4 Theoretische Bemessungsgrundlagen

1.4.1 Allgemeines

Standardmässig werden die Verstärkungen in den Endbereichen am Traggrund verankert und der Mittelbereich erhitzt. Die entstehende Vorspannkraft wird über die Endverankerung in das Tragwerk eingeleitet. Für künftige Belastungen ist die Verstärkung also bereits aktiv tragend und auf einem definierten Spannungsniveau, was verschiedene Vorteile – speziell unter ständig-wirkenden Gebrauchslasten – mit sich bringt. Um das entstehende Vorspannmoment auch zum Beispiel in Punkto Durchbiegungen nutzbringend einzusetzen, sind die Krafteinleitungspunkte richtig zu wählen. Bei einem einfachen Biegebalken ist die Verformungsfähigkeit der Baustruktur gegeben und die Vorspannkraft wirkt direkt gegen Verformungen. Bei Durchlaufträger oder bei eingespannten Deckenplatten reduziert sich die Wirkung, da die Verformbarkeit der Struktur verringert ist und Vorspannkräfte teilweise direkt in andere Bauteile eingeleitet werden. Zudem gilt es zu beachten, dass die Vorspannmomente bei falscher Anordnung keine Vergrößerung vorhandener Momente oder Stützkräfte bewirken. Es gilt hier, die allgemeinen Regeln und Vorgehensweisen der Bemessung von Spannbeton zu beachten.

2 Bemessung re-bar 10 & 16

2.1 Bauzustand

Für den Bauzustand gilt es, eine mögliche Rissbildung an der Plattenoberseite infolge Vorspannung zu überprüfen. Hierfür ist die Anfangsvorspannung $\sigma_{p,0}$ anzusetzen. Die Vorspannung kann als konstantes Biegemoment $M_{p,BZ}$ zwischen den Verankerungen angesetzt werden, um dieses dem Rissmoment gegenüberzustellen.

$$M_{p,BZ} = F_{p,0} * z = \sigma_{p,0} * A_{SMA} * z \quad (1)$$

(A_{SMA} = Fläche re-bar, z = Hebelarm)

2.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZG

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit über einen längeren Zeitraum muss die Anfangsvorspannung $\sigma_{p,0}$ wegen der Relaxation abgemindert werden. Über einen Zeitraum von 50 Jahren kann diese mit 15% abgeschätzt werden. Es gilt demnach:

$$\sigma_{p,\infty} \approx \sigma_{p,0} * 0.85 \quad (2)$$

Das konstante Biegemoment $M_{p,GZ}$ zwischen den Verankerungen kann somit beschrieben werden als:

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_{SMA} * z \quad (3)$$

Verformungsreduzierungen bzw. -begrenzungen können anhand diesem Vorspannmoment berechnet werden.

Dynamisch dauerbelastete Spannungszuwächse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit müssen auf 50 N/mm² begrenzt werden:

$$\Delta\sigma_{SMA} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

2.3 Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfährt re-bar eine zusätzliche Dehnung $\Delta\epsilon_{SMA}$ und Spannung $\Delta\sigma_{SMA}$, welche sich zu der initialen Vorspannung addiert. Die Spannungsänderung bis zum Bemessungswert der maximalen Zugfestigkeit von re-bar setzt sich also aus der zusätzlichen Dehnung zwischen dem Zeitpunkt der Applikation/Vorspannung und dem Bruchzustand zusammen.

Dank der Spannungs-Dehnungs-Kompatibilität von re-bar mit dem Verbund zum Traggrund kann ein Kräftegleichgewicht errechnet werden. Die aufgezeigten Faktoren sind im Buchstabenverzeichnis beschrieben.

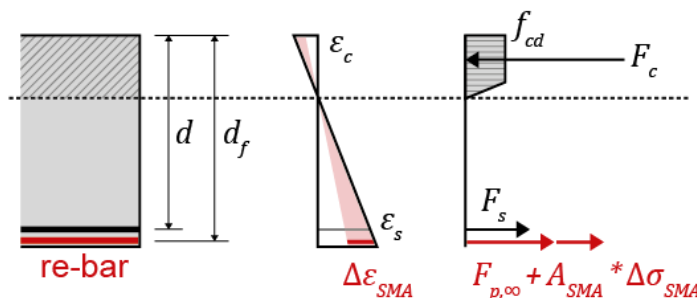


Abbildung 5: Schematische Darstellung für Querschnittsanalyse des Grenzzustandes der Tragfähigkeit

Das Kräftegleichgewicht wird nun mit einer äquivalenten Kraft im re-bar durchgeführt, welche sich wie nachstehend zusammensetzt. Ein E-Modul E_{SMA} von 70 kN/mm² wurde angesetzt. Die maximale Zugfestigkeit $f_{sd,SMA}$ von re-bar darf nicht überschritten werden.

$$F_{sd,SMA} = F_{p,\infty} + A_{SMA} * (\sigma_{p,\infty} + \Delta\epsilon_{SMA} * E_{SMA}) \leq A_{SMA} * f_{sd,SMA} \quad (5)$$

2.4 Verankerung von re-bar

Die Verarbeitungsrichtlinien und Datenblätter der 3S geben Richtwerte für die Einbindelänge von re-bar. Die Verankerungsbereiche sind abhängig von den zu erwartenden Zugkräften, Stabdurchmessern und Anwendungstyp (im Schlitz, Überbeton oder Spritzbeton, re-bar mit Endhaken) auszugestalten. Zudem sind Normvorgaben bezüglich Haftzugwerte, Rauigkeiten und Vorbereitungen des Untergrundes usw. einzuhalten. Für Betoninstandsetzungen sind ausschliesslich zugelassene R3- und R4-Mörtel zu verwenden. Üblicherweise wird ein Haftzugwiderstand des Betontraggrundes von 1,5 N/mm² vorausgesetzt (siehe auch Bemessungsbeispiel 4.1.3).

Grundsätzlich gilt es, Biegeverstärkungen hinter der Momenten-Nulllinie zu verankern und je nach Situation zu prüfen, ob die Zugbewehrung genügend über die Auflager gezogen/verankert sind. Die Einleitung der Vorspannkraft in den Betontraggrund wird im Normalfall über den reinen Mörtelverbund erreicht. Hierfür kann auch der Haftzugwiderstand des Betontraggrundes beigezogen werden, um die benötigte Verankerungsfläche für den Kräfteübertrag zu bemessen. Alternativ lassen sich auch Endhaken am re-bar einsetzen, welche die Kräfte punktuell in den Kernbeton einleiten. Spezialverankerungen über verschraubte oder angeschweisste Endplatten/Stahlprofile sind ebenfalls möglich.

2.5 Querschnittsanalyse-Software

Um Memory®-Stahl in Querschnittsanalyse-Tools zu verwenden, sind gewisse Voreinstellungen und Eingaben zu den Materialparametern erforderlich. Üblicherweise rechnen die Programme dabei mit bilinearen oder sogar mit trilinearen Arbeitsdiagrammen des Spannstahls (siehe schematische Spannungs-Dehnungs-Beziehung):

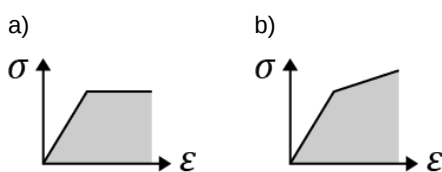


Abbildung 6: a) und b) Mögliche bilineare Verhalten der Software

Zu Beginn muss im entsprechenden Programm geprüft werden, nach welchem Prinzip die Software rechnet, um später die passenden Materialparameter zu verwenden. Zudem können gewisse Voreinstellungen eingegeben werden.

- **Sicherheitsbeiwerte:** Für Spannstahl wird im Grenzzustand der Tragsicherheit üblicherweise mit dem Sicherheitsbeiwert $\gamma_p = 1.15$ gerechnet. Der Bemessungswert des Spannstahls wird also zusätzlich abgemindert. Nach eigenem Ermessen ist es für Memory®-Stahl auch möglich, diesen Beiwert auf 1.00 zu setzen, da $f_{sd,SMA}$ bereits anwendungsbedingt stark reduziert ist und als Bemessungswert gelten kann.
- **Initialer Wert der Vorspannkraft:** Teilweise muss gewählt werden, ob mit einer vollen, initialen Vorspannung bemessen wird oder ob Langzeitverluste eingerechnet werden sollen. (siehe Überlegungen Kap. 2.1, 2.2 und 2.3)

Anschließend wird ein neues Material hinterlegt. Hier sind Angaben zum Baustoff-Typ und mechanische Eigenschaften zu definieren. Als Beispiel für ein bilineares Materialverhalten gilt die nachstehende Tabelle (Parameterbezeichnungen könnten je nach Software abweichen). Grundsätzlich soll sichergestellt werden, dass die Bemessungssoftware eine «Berechnung mit Verbund» ausführt. Andernfalls wird kein Spannungszuwachs im re-bar berechnet und der Beitrag zur Tragsicherheit sehr konservativ angesetzt.

Parameter	re-bar 16	re-bar 10
f_{pk} oder $f_{p0.1k, sd}$ etc.	520 N/mm ²	520 N/mm ²
$\varepsilon_{p, sd}$ oder ε_{ud}	100‰	100‰
E_s	70 kN/mm ²	70 kN/mm ²
A_p	211.2 mm ²	89.9 mm ²
Vordehnung ε_0	4.57‰ (Erhitzen bei 300°C) 3.71‰ (Erhitzen bei 200°C)	5.71‰ (Erhitzen bei 300°C) 5.00‰ (Erhitzen bei 300°C)
Verlustfaktor P_∞/P_0	0.85	0.85
Im Verbund rechnen	☒	☒

Sämtlich Werte sind immer auf aktuelle Datenblätter abzugleichen.

Vordehnung: Normalerweise bestimmt die Bemessungssoftware die aufgebrachte Vorspannung anhand des E-Moduls und der aufgebrachten Dehnung, welche beim konventionellen Spannbeton anhand des Dehnweges der Spannlitzen und ihrer Gesamtlänge berechnet wird. Für re-bar muss demnach die Vordehnung anhand des elastischen Materialgesetzes definiert werden, welche beim eingegebenen E-Modul die gewünschte Vorspannung $\sigma_{p,0}$ ergibt:

$$\varepsilon_0 = \sigma_{p,0} / E_{SMA} \quad (6)$$

Für detailliertere Bemessungen (bspw. für Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit begrenztem Spannungszuwachs) nach einem trilinearen Verhalten sind die Grundlagen aus Kapitel 1.3.2 oder 2.2 beizuziehen. Bei Fragen wird dem Planer empfohlen, den technischen Support der 3S Structural Solutions GmbH zu kontaktieren.

3 Planungshinweise

3.1 Korrosionsschutz

Ein bekanntes Risiko von Vorspannstählen ist die Spannungsrissskorrosion bei Anwesenheit von Chloriden, sonstigen Salzen und Säuren. re-bar wird in eine zementöse Matrix eingelegt, welche als Alkalidepot für die Innenbewehrung sowie als Schutzschicht gegen eindringende Chloridionen dient. Als Haftvermittler und leichten Korrosionsschutz auf re-bar und der Innenbewehrung kann SikaTop® Armatec®-110 EpoCem® appliziert werden.

Für Vorgaben bezüglich den planmässigen Bewehrungsüberdeckungen je nach Expositionsklasse des Bauteils können die Normenwerke für Betonbau beigezogen werden (bspw. Schweiz SIA 262, Tab. 18).

3.2 Brandschutz

Memory®-Stahl zeigt ein ähnliches Brandverhalten wie herkömmlicher Stahl und verliert bei rund 400°C deutlich an Festigkeit, respektive reduziert seine Vorspannung bei ca. 350°C auf null. Werden minimale Bauteilabmessungen und Betonüberdeckungen gemäss der lokalen Norm eingehalten, ist der Schutz im Brandfall in der Regel gewährleistet. 3S empfiehlt diese Werte, ähnlich wie es häufig für Spannbetonbauteile angewendet wird, noch um den Faktor 1.25 bis 1.50 zu erhöhen.

Falls der Brandschutz durch die Bewehrungsüberdeckung nicht gewährleistet werden kann, können auch Produkte wie der Brandschutz-Spritzputz SikaCem® Pyrocoat auf die fertiggestellte Fläche appliziert werden, um den Brandwiderstand zusätzlich zu erhöhen.

3.3 Konstruktive Regeln

Auch hinsichtlich konstruktiven Durchbildungen, Bewehrungsführungen usw. sind lokale Normen beizuziehen.

3.3.1 Biegeradien

Memory®-Stahl Stäbe wurden im Werk vorgedehnt. Abbiegungen dürfen die Vorgaben der nachstehenden Tabelle nicht unterschreiten.

Produkt	Abbiegedurchmesser Ø	Min. Länge Endhaken
Memory®-Stahl re-bar 10	60 mm	150 mm
Memory®-Stahl re-bar 16	110 mm	150 mm

3.3.2 Schraubkuppler

Memory®-Stahl wird als gerade Stangenware hergestellt. Um keinen Abschnitt zu produzieren, werden die Stäbe beidseitig mit Schraubmuffen versehen (Außen- und Innengewinde). Die Stäbe werden danach zu einem fortlaufenden Stab zusammengeschrubt und projektspezifisch abgelängt. Schraubkuppler können also an zufälligen Positionen vorkommen, beeinträchtigen die Wirkungsweise des Systems aber nicht. An Positionen mit Schraubkuppler können keine Abbiegungen vorgenommen werden. Die Aussendurchmesser der Kuppler sind unter anderem hinsichtlich Betonüberdeckungen zu beachten.

Produkt	Aussendurchmesser Kuppler
Memory®-Stahl re-bar 10	20 mm
Memory®-Stahl re-bar 16	28 mm

3.3.3 Minimale Abstände

Die statischen Anforderungen bestimmen die geometrische Anordnung von Memory®-Stahl re-bar. Es sind Vorgaben zu minimalen Stababständen gemäss lokal geltender Norm einzuhalten (bspw. damit Grösstkorn von Mörtel/Beton zwischen den Stäben fließen kann). 3S empfiehlt keine Abstände unter 50 mm.

re-bar in flächiger Mörtelschicht: Zur Berechnung der Verankerungslänge l_{bd} wird die initiale Vorspannkraft von re-bar über den Mörtelverbund von $>1,5 \text{ N/mm}^2$ (minimaler Haftzugwert des Betons mit Druckfestigkeit $>25 \text{ N/mm}^2$) in den Untergrund geleitet. 3S empfiehlt den Verankerungswiderstand mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,5 abzumindern. Die minimale Verankerungslänge soll 800 mm nicht unterschreiten.

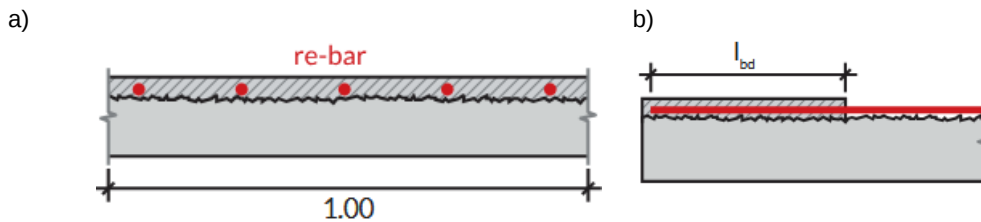


Abbildung 7: a) Querschnitt einer Betonplatte mit flächig aufgetragenen re-bar, b) Schnitt

re-bar im Betonschlitz: Die Verankerungslängen für die Vorspannkraft von re-bar im Schlitz beziehen sich auf Versuche an der Empa Schweiz. Die Versuchsergebnisse wurden mit einem Sicherheitsbeiwert von 1.5 abgemindert. Der minimal einzuhaltende Achsenabstand der Schlitz beträgt 100 mm. Bei kleinerer Teilung kann auf die Variante im Reprofilier- und Spritzmörtel umgestiegen werden oder es müssen Endhaken benutzt werden.

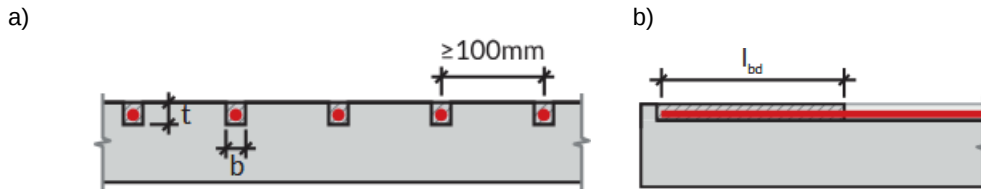


Abbildung 8: a) Querschnitt einer Betonplatte mit eingeschlitzten re-bar, b) Schnitt eines Frässchlitzes

Produkt	Schlitzbreite b	Min. Schlitztiefe t	Verankerungslänge l_{bd}
Memory®-Stahl re-bar 10	25 mm	25 mm**	150 mm
Memory®-Stahl re-bar 16	30 mm	30 mm**	150 mm

*mit Sicherheitsbeiwert 1.5 abgemindert

**Schlitztiefen sind allenfalls projektspezifisch zu erhöhen, um die gewünschte Betonüberdeckung für Korrosions- und Brandschutz zu erreichen.

Bestehende, innenliegende Bewehrung darf nicht verletzt werden und kann die Tiefe der Schlitz beschränken. Es ist möglich, mit einem Überprofil zu arbeiten, um die gewünschte Betonüberdeckung einzuhalten.

Elektrisches Widerstandsheizen: Falls re-bar durch elektrischen Strom erhitzt wird, kommen Kupferklemmen für den elektrischen Kontakt zum Einsatz (Abb. 9). Auch hierfür ist auf die notwendigen Platzverhältnisse zu achten:

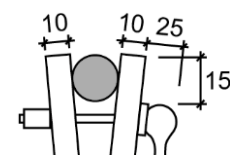


Abbildung 9: Wichtige Abmessungen der Kupferklemmen

3.3.4 Kritische Drittprodukte

Es dürfen keine Drittprodukte (Bauschaum, XPS (Polystyrol) und sonstige chemische und Chlorid-basierte Komponenten) benutzt werden; Diese können aggressive Zersetzungsprodukte beim Erhitzen von re-bar bilden, welche gefährlich für die Atemwege sind und zu Korrosion oder Säureangriff am Stahl führen können. Allgemein sind die entsprechenden Verarbeitungsrichtlinien und Vorgaben zu Mörtelarbeiten, -nachbehandlungen oder Untergrundvorbereitungen einzuhalten.

3.4 Sonstige Nachweise

Für sonstige Nachweise, bemessungs- oder ausführungstechnische Fragen wird auf die lokale Norm für Stahlbeton und Vorspannstahl oder Mauerwerk verwiesen. Ebenfalls kann der technische Support der 3S Structural Solutions GmbH unterstützen.

4 Bemessungsbeispiele

Die Bemessungsbeispiele sind immer mit aktuell gültigen, lokalen Normen abzugleichen. Abweichungen sind vorbehalten.

4.1 Schub- und Biegeverstärkung eines T-Trägers

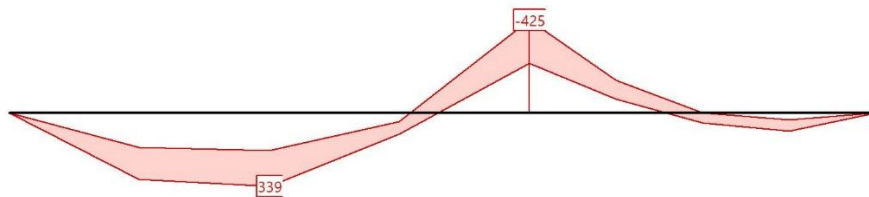
Aufgrund einer Nutzungsänderung und zusätzlichen Auflasten müssen diverse T-Träger einer Fabrikhalle statisch verstärkt werden. Die Beispielrechnung zeigt den Umgang mit einer unzulässigen Durchbiegung im Feld und Verstärkungen von Biege- und Schubproblemen eines solchen Trägers. Auf übrige Nachweise wird im Rahmen dieses Beispiels verzichtet. Die Träger überspannen zwei Felder von 12.00 und 8.00 m und sind einfach gelagert.



Abbildung 10: Zweifeldträger der Fabrikhalle, Modell Statik-8

Die bisherigen Schnittkräfte (Biegemomente und Querkkräfte) sind nachfolgend aufgezeigt; Normal- und Torsionskräfte sind keine Vorhanden.

a)



b)

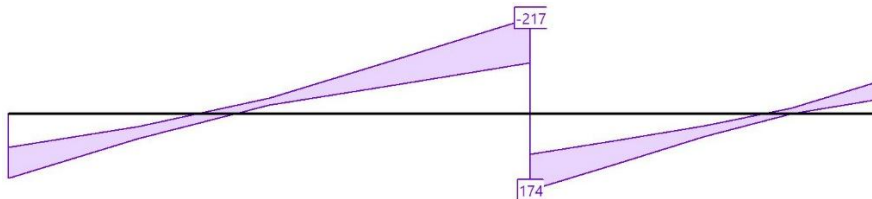


Abbildung 11: Schnittkräfte Grenzzustand Tragsicherheit a) Biegemoment M_y [kNm] b) Querkraft V_z [kN]

Den Einwirkungen entsprechend wurden die damaligen Träger wie in Abbildung 12 dargestellt dimensioniert und bewehrt. Die resultierenden Durchbiegungen des gerissenen Betonquerschnittes entsprechen den zulässigen Normvorgaben ($w_{eff} = 32$ mm / $w_{zul} = 34$ mm).

Aufgrund der Wünsche der Bauherrschaft müssen nun Auf- und Nutzlasten erhöht werden. Ebenfalls kommt ein grösseres Eigengewicht durch die zusätzliche Mörtelschicht zu tragen. Die resultierenden Schnittkräfte für den Grenzzustand der Tragsicherheit sind wie folgt:

	Bisherige Schnittkräfte	Bisherige Widerstände	Neue Schnittkräfte
Biegemomente [kNm]	M_{Ed} +339 -425	M_{Rd} +355 -440	M_{Ed} +449 -550
Querkkräfte [kN]	V_{Ed} 217	V_{Rd} 230	V_{Ed} 285

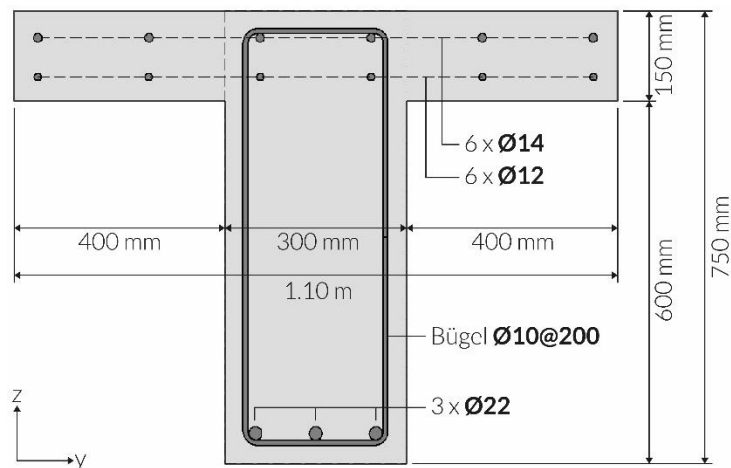
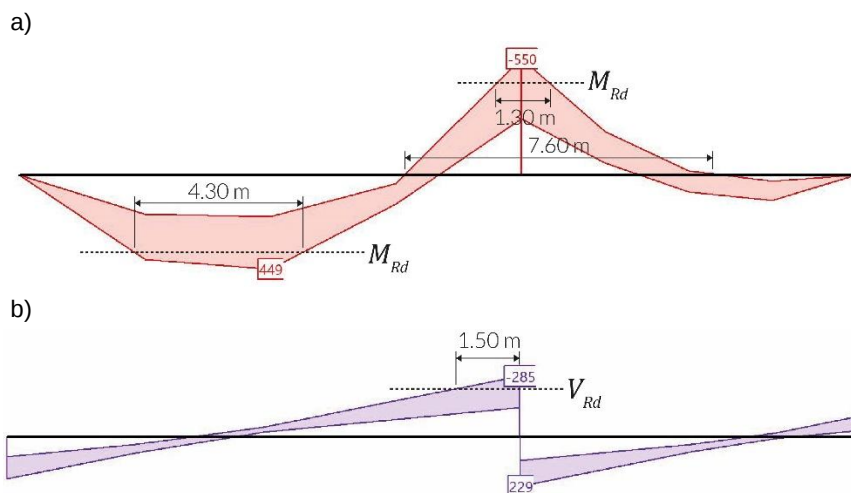


Abbildung 12: bestehender Querschnitt der T-Träger

4.1.1 Nachweis der Tragsicherheit:

In einem ersten Schritt wird der Grenzzustand der Tragsicherheit untersucht. Die neuen Schnittkräfte sind nachstehend im Detail dargestellt.

Abbildung 13: Neue Schnittkräfte Grenzzustand Tragsicherheit a) Biegemoment M_y [kNm] b) Querkraft V_z [kN]

Mit den zusätzlichen Lasten tritt in einem rund 1,5 m breiten Bereich neben dem mittleren Auflager ein Schubproblem auf. Die fehlenden Querkraften ca. 55 kN/m' werden mit re-bar 10 U-Profilen aufgenommen. Einfachheitshalber wird die reine Vorspannkraft (kein Spannungszuwachs bis zum Schubbruch) auf den zweischnittigen Bügeln angenommen.

$$V_{Rd,s} = \frac{2 \cdot \sigma_{p,\infty} \cdot A_f}{s} \cdot z \cdot \cot(45^\circ) = \frac{2 \cdot 350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0.85 \cdot 89.9 \text{ mm}^2}{0.5 \text{ m}} \cdot \sim 0.7 \text{ m} \cdot \cot(45^\circ) = 75 \text{ kN/m'}$$

Es sind demnach insgesamt drei re-bar 10 U-Profile im Abstand von 500 mm nötig, um den Bereich zu verstärken. Die Bügel werden um den bestehenden, aufgerauten Steg und über die zusätzlichen Längsverstärkungen mit re-bar geführt. Danach werden sie im Spritzmörtel eingebettet und im

Flansch eingegossen (Verankerung über der Nulllinie). Die re-bar Schubbügel werden elektrisch von oben geheizt/aktiviert. Mit Distanzhaltern wird sichergestellt, dass kein Kontakt mit der restlichen Bewehrung besteht (elektrische Isolation beim Heizvorgang).

Im grösseren Teilfeld überschreitet die neue Biegeeinwirkung den bisherigen Widerstand um rund 94 kNm. Über die gesamte Spannweite werden drei re-bar 16 auf der Unterseite des Steges angebracht und im Spritzmörtel eingebettet. Über dem mittleren Auflager übersteigt das negative Biegemoment über eine Länge von ca. 1.3 m die zulässige Belastung um ca. 110 kNm. In dieser Zone werden insgesamt vier re-bar 10 in den frischen Überbeton eingelegt (Achtung: Verankerung der Verstärkung hinter Momenten-Nulllinie). Die Verstärkungsstäbe werden jeweils im Verankerungsbereich vermörtelt und nach deren Aushärtung bspw. mit einem Gasbrenner erhitzt. Zum Schluss werden die übrigen Zonen ebenfalls verfüllt.

Der Biegenachweis des neuen Querschnittes wurde mit einer üblichen Bemessungssoftware erbracht. Die neuen Widerstände sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

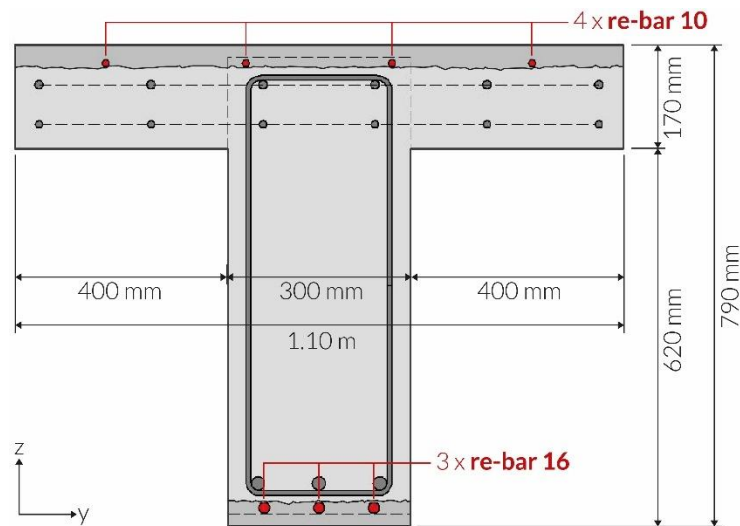


Abbildung 14: neuer Querschnitt der Träger mit re-bar Biegeverstärkung

	Bisherige Schnittkräfte	Bisherige Widerstände	Neue Schnittkräfte	Neue Widerstände
Biegemomente [kNm]	M_{Ed} +339 -425	M_{Rd} +355 -440	M_{Ed} +449 -550	M_{Rd} +569 -553
Querkkräfte [kN]	V_{Ed} 217	V_{Rd} 230	V_{Ed} 285	V_{Rd} 315

Zur Modellierung wurden unter anderem die folgenden Eingabeparameter benutzt:

Spannglied-Attribute:

- Vordehnung $\varepsilon_0 = 0.57\%$ für re-bar 10 und 0.46% für re-bar 16 (ergibt rechnerische Vorspannung von $E\text{-Modul} \cdot \varepsilon_0 = 400 \text{ N/mm}^2$, respektive 320 N/mm^2)
- Vorspannung mit Verbund
- Verlustfaktor $P_\infty/P_0 = 0.85$ (Relaxation)

Baustoffeigenschaften:

- $E\text{-Modul} = 70 \text{ kN/mm}^2$ (E-Modul re-bar nach Aktivierung)
- $f_{p0.1k} = 520 \text{ N/mm}^2$ (Bemessungswert mit Sicherheitsbeiwert abgemindert)
- $\varepsilon_{ud} = 10\%$

4.1.2 Nachweis auf Gebrauchsniveau:

Durch das Einsetzen von im Mörtel eingebetteten, vorgespannten Verstärkungselementen werden Rissöffnungen beschränkt und die bestehende Bewehrung entlastet. Nebst der verbesserten Dauerhaftigkeit wird in diesem Beispiel auch die Durchbiegung untersucht. Durch die neuen Lasten wird die Vertikalverschiebung im grossen Feld zu rund 39 mm berechnet. Die Biegeverstärkung mit drei re-bar 16 impliziert ein konstantes Biegemoment, welches der Durchbiegung entgegenwirkt. Die überschrittenen 5 mm ($w_{eff} = 39 \text{ mm} / w_{zul} = 34 \text{ mm}$) sollen so überdrückt werden.

Die durch die Vorspannung implizierte Verformung des statisch unbestimmten Systems kann auf verschiedene Weisen berechnet werden. Hier wird die Arbeitsgleichung für das einfach statisch unbestimmte System angewendet. Als Grundsystem (GS) wird beim mittleren Auflager ein Gelenk eingeführt. Die Vorspannung im negativen Biegebereich wird einfachheitshalber nicht berücksichtigt; diese hätte zusätzlich einen positiven Effekt.

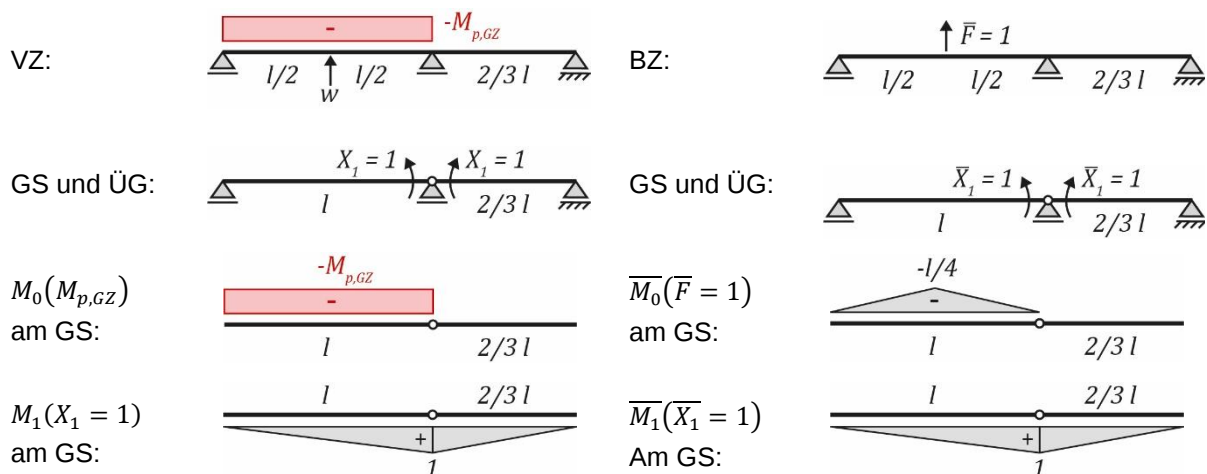


Abbildung 15: Vereinfachung und Reduktion des statisch unbestimmten Systems und Arbeitsgleichung

$$\delta_{10} = \int M_1 * \frac{M_0}{E_c I} dx = \frac{1}{2} * (+1) * (-M_{p,GZ}) * \frac{l}{E_c I} + 0 = -\frac{M_{p,GZ} * l}{2 * E_c I}$$

$$\delta_{11} = \int M_1 * \frac{M_1}{E_c I} dx = \frac{1}{3} * (+1)^2 * \left(1 + \frac{2}{3}\right) l = \frac{5 * l}{9 * E_c I}$$

$$\delta_{10} + X_1 * \delta_{11} = 0 \rightarrow X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{9}{10} M_{p,GZ}$$

Daraus lässt sich die Verformung w wie folgt herleiten:

$$\begin{aligned}
 w &= \int \overline{M}_0 * \frac{M_0}{E_c I} dx + X_1 * \int \overline{M}_0 * \frac{M_1}{E_c I} dx \\
 &= \frac{1}{2} * \left(-\frac{l}{4}\right) * (-M_{p,GZ}) * \frac{l}{E_c I} + \left(\frac{9}{10} M_{p,GZ}\right) * \frac{1}{4} * \left(-\frac{l}{4}\right) * (+1) * \frac{l}{E_c I} \\
 &= \frac{M_{p,GZ} * l^2}{E_c I} * \left(\frac{1}{8} - \frac{9}{160}\right) = \frac{11 * M_{p,GZ} * l^2}{160 * E_c I}
 \end{aligned}$$

Das konstante Biegemoment $M_{p,GZ}$ über die Spannweite von 12.00 m ergibt sich aus Formel (3):

$$M_{p,GZ} = F_{p,\infty} * z = \sigma_{p,\infty} * A_f * z = 3 * 320 \frac{N}{mm^2} * 0.85 * 211.2 mm^2 * \sim 0.66 m = 114 kNm$$

Zudem wird eine abgeminderte, gerissene Biegesteifigkeit des Betonquerschnitts angesetzt ($E_c I_{gerissen} = E_c I / 3$) und in die Formel eingesetzt.

$$w = \frac{11 * M_{p,GZ} * l^2}{160 * \left(\frac{E_c I}{3}\right)} = \frac{11 * 114 kNm * (12.00 m)^2}{160 * \frac{647'000 kNm^2}{3}} = 5.2 mm$$

Die drei eingelegten re-bar zur Erhöhung der Tragsicherheit tragen also zu einer Verringerung der Durchbiegung von rund 5 mm bei. Der Nachweis gilt als erfüllt.

4.1.3 Nachweis der Verankerungsbereichen:

Die negativen und positiven Biegegrößen wurden mit einer Querschnittsanalyse-Software ermittelt. Zur Berechnung der Verankerungslänge wird sogleich die maximale Zugkraft über eine Schubverbundspannung von 1.5 N/mm² verankert. Der Widerstand wird noch mit einem Sicherheitsbeiwert von 1.5 abgemindert. Bei der negativen Biegeverstärkung werden vier re-bar 10 eingesetzt. Daraus ergibt sich folgende Rechnung für die erforderliche Länge l_b der Kontaktfläche:

$$F_{p,i}(negativ) = 4 * \sigma_{p,i} * A_f = 4 * 520 \frac{N}{mm^2} * 89.9 mm^2 = 187.0 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 1.10 m * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 170 mm$$

Die Verstärkung wird in eine vollflächige Überbetonschicht eingelegt. Der Endverankerungsbereich wird konservativ mit 300 mm Länge projektiert.

Im Falle der positiven Biegeverstärkung müssen drei Stück re-bar 16 auf der Unterseite des Steges (Breite 30 cm) angebracht werden. Ebenfalls soll gleich die maximale Zugkraft verankert werden.

$$F_{p,i}(positiv) = 3 * \sigma_{p,i} * A_f = 3 * 520 \frac{N}{mm^2} * 211.2 mm^2 = 329.5 kN$$

$$F_{p,i} \leq \frac{l_b * 300 mm * 1.5 \frac{N}{mm^2}}{1.5} \rightarrow l_b = 1'098 mm$$

Dieser Wert kann mit Sonderlösungen auch abgemindert werden. Als Beispiel wird hier der Effekt des Überdrückens mittels drei re-bar U-Profilen aufgezeigt. Die Schubverbundspannung (im Beispiel 1.5 N/mm²) erhöht sich dank der zweischnittigen Vertikalkraft des vorgespannten U-Profils (Relaxation Vorspannkraft 0.85 / Sicherheitsbeiwert 1.5).

$$F_{p,i} = 329.5 \text{ kN} \leq \frac{l_b \cdot b \cdot \left(1.5 \frac{N}{\text{mm}^2} + \frac{3 \cdot 2 \cdot \sigma_{p,\infty} \cdot A_f}{l_b \cdot b} \right)}{1.5} =$$

$$\frac{l_b \cdot 300 \text{ mm} \cdot \left(1.5 \frac{N}{\text{mm}^2} + \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.85 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 \cdot 89.9 \text{ mm}^2}{l_b \cdot 300 \text{ mm}} \right)}{1.5} \rightarrow l_b = 742 \text{ mm}$$

Beim linken Auflager A werden analog zur Schubverstärkung beim mittigen Auflager B drei re-bar 10 U-Profile eingesetzt. Der Verankerungsbereich wird über eine Länge von 750 mm vermörtelt.

4.1.4 Schemaskizze der Verstärkung:

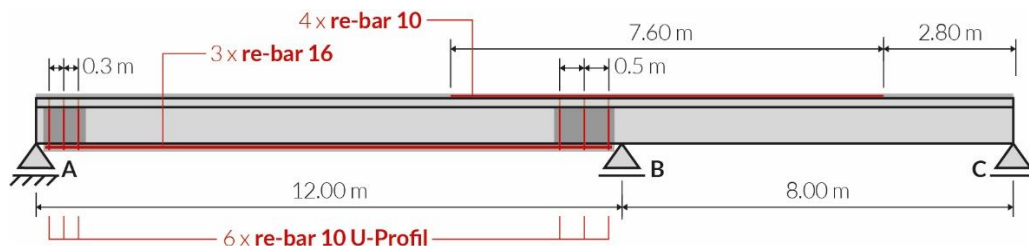


Abbildung 16: Schema der Verstärkungsarbeiten mit re-bar Längsbewehrung und Schubbügel

Konventionell können Endbereiche von re-bar Biegeverstärkungen auch mit schlaff verlegten Schubbügel (B500B) optimiert werden.

4.2 Abschließendes

Die 3S Structural Solutions GmbH ist exklusiver Vertriebspartner der in der Schweiz ansässigen re-fer AG für Memory®-Stahl Bewehrung.

3S Structural Solutions GmbH

DE-30173 Hannover

info@3s-structures.de
www.3s-structures.de

re-fer AG

CH-6423 Seewen

info@re-fer.eu
www.re-fer.eu