

Berechnung vorgespannter Schraubverbindungen mit dem Programm 4H-EC3FS

Im Programm 4H-EC3FS – Stirnplattenstoß mit frei definierbaren Schraubenbild – kann die Vorspannung der Schrauben (i.A. Regelvorspannung) berücksichtigt werden. Daraus ergab sich die Fragestellung, inwieweit die Vorspannung sich auf das Tragverhalten auswirkt, und ob die Ergebnisse der Berechnung mit den Vorgaben nach EC3-1-8 vergleichbar sind.

Im Folgenden wird die Problematik der Vorspannung erläutert und an Hand von Testrechnungen dargestellt.

Vorspannung

Die Vorspannung einer Schraube bewirkt, dass die verbundenen Bleche bei Aufbringen einer äußeren Zugkraft zunächst den Kontakt halten und somit eine Verformung der Verbindung verhindern. Dies wird insbesondere bei dynamischer Belastung sowie verformungsempfindlichen Systemen genutzt.

Dabei ist darauf zu achten, dass die Tragfähigkeit der Schraube nicht überschritten wird. Im EC3-1-8 ist die charakteristische Zugtragfähigkeit in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse in Tab. 3.1 angegeben:

Tabelle 3.1 — Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben

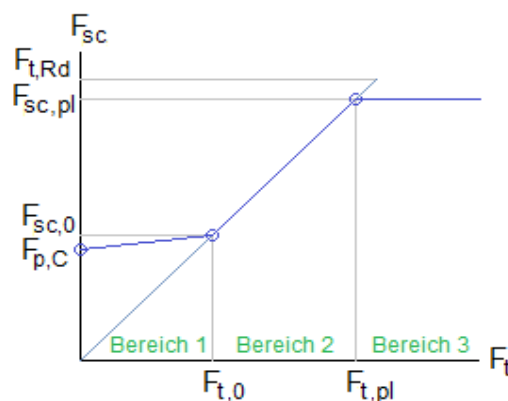
Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Bei Zugverbindungen wird nur die Zugfestigkeit f_{ub} der Schrauben betrachtet (EC3-1-8, Tab. 3.4). Die Zugtragfähigkeit wird – bezogen auf das Nachweinsniveau der Schrauben (EC3-1-8, Tab. 2.1) –

berechnet mit
$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Die Vorspannung geht hingegen mit ihrem charakteristischen Wert $F_{p,C} \leq F_{tk} = k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ in die Berechnung ein.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Wagenknecht (,Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3', Band 2, 4. Auflage, S. 13ff) bzw. Lohse (,Stahlbau Teil 2', 20. Auflage, S. 297ff).



Dargestellt ist die Beziehung der inneren Schraubenkraft F_{sc} zur einwirkenden Zugkraft F_t .

Ohne Vorspannung entspricht die innere Schraubenkraft der Zugkraft, bis die Schraubentragfähigkeit $F_{t,Rd}$ erreicht ist. Die Schraube kann keine weitere Kraft aufnehmen.

- Bei elastischer Schraubenberechnung ist die Tragfähigkeit erreicht.
- Bei plastischer Schraubenberechnung entspricht die plastische Schraubentragfähigkeit der ggf. abgeminderten Zugtragfähigkeit $F_{sc,pl} = f_{t,f} \cdot F_{t,Rd}$. Bei Laststeigerung kann diese Schraube keine weitere Kraft aufnehmen, jedoch erfolgt eine Umlagerung auf die Stirnplatte und noch nicht ausgelastete Schrauben.

Bei plastischer Schraubenberechnung mit Vorspannung werden 3 Bereiche unterschieden:

- Im Bereich 1 ist die Vorspannung wirksam (keine Klaffung). Die Schraubenkraft steigt von $F_{p,C}$ auf $F_{sc,0}$ nur leicht an, da wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten von Schraube und umgebendem Blechkörper der Blechzylinder einen Großteil der Belastung übernimmt bis die Zugkraft $F_{t,0}$ erreicht ist. Die Vorspannkraft wird als äußere Kraft verstanden und geht daher mit ihrem charakteristischen Wert (s.o.) in die Beziehung ein. Näherungsweise wird für die Berechnung die Schraubenkraft gleich der Vorspannkraft gesetzt $F_{sc,0} = F_{t,0} \approx F_{p,C}$.
- Im Bereich 2 ist die Vorspannung im Blechzylinder nicht mehr wirksam, d.h. die Verformungen des Stirnblechs nehmen zu (Klaffung). Die Schraube verhält sich linear-elastisch bis die plastische Schraubentragfähigkeit erreicht ist. In diesem Bereich kann die Schraube noch eine zusätzliche Zugkraft von $\Delta F_t = F_{t,pl} - F_{t,0}$ aufnehmen.
- Im Bereich 3 kann die Schraube keine weitere Kraft mehr aufnehmen. Sie plastiziert bis zum Versagen (Grenzdehnung überschritten).

Testrechnungen

Die Ergebnisse der folgenden Beispiele sollen die Zuverlässigkeit der Berechnungen mit dem Programm 4H-EC3FS im Hinblick auf die Norm EC3-1-8 zeigen, damit auch nicht genormte Verbindungen vertrauenswürdige Ergebnisse liefern.

Es ist zu beachten, dass bei der Berechnung mit 4H-EC3FS nur die Stirnplatten-Schrauben-Interaktion berücksichtigt wird. Lokale Beanspruchungen des Trägerprofils, die sich aus der Verformung der Stirnplatte ergeben (z.B. der Schweißnähte, des Trägerdruckflanschs oder Trägerstegs), werden nicht berücksichtigt.

Aus der Überlegung heraus, dass die Stirnplatte im 4H-EC3FS elastisch, bei der Komponentenmethode jedoch plastisch berechnet wird, werden die FEM-Ergebnisse lokal begrenzt geglättet. Dies führt zu einer besseren Abschätzung der Gesamtausnutzung.

Die folgenden Beispiele sind dem DASt-Ringbuchs (2013) entnommen und mit dem veröffentlichten Grenzmoment belastet. Sie wurden für verschiedene Stirnplattendicken mit dem Programm 4H-EC3BT (Komponentenmethode n. EC3-1-8) und 4H-EC3FS (FE-Methode, elastisch-plastische Berechnung der Stirnplatte, plastische Schraubenberechnung mit $f_{t,f} = 1.0$, Ausnutzung aus Laststeigerung) ausgewertet.

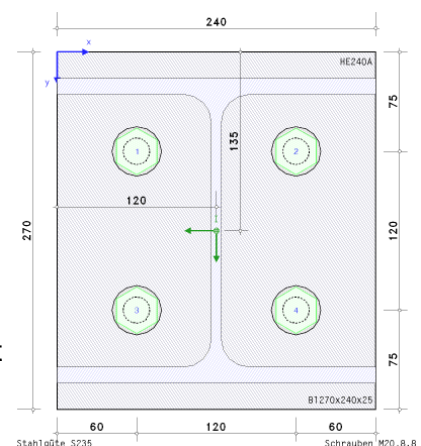
Die Ergebnisse der Komponentenmethode (4H-EC3BT) wurden nicht analysiert. Sie zeigen in einigen Fällen ein unplausibles Verhalten (bei geringerer Plattendicke eine geringere Tragfähigkeit) und enthalten ggf. die o.a. lokalen Effekte. Mit (*) werden die Ausnutzungen gekennzeichnet, bei denen die Schraubenkräfte nach EC3-1-8, 6.2.7.2(9) aus Linearisierung gewonnen wurden.

Beispiel 1: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 25$ mm der typisierten Verbindung Nr. 429 / M8.8 des DASt-Ringbuchs.

Das Beispiel wurde mit dem Grenzmoment $M_{y,Ed} = 51,7$ kNm belastet.

Ergebnis:

- Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.
- Die Tragfähigkeit wird bei dünnen Platten über-, bei dickeren unterschätzt (keine Vorspannung). Die Grenze der Tragfähigkeit wird näherungsweise erfasst.
- Bei kompakten Stirnplatten ($b/l \approx 1$) mit dickeren Platten ($t/b > 0.1$) sollte – auf der sicheren Seite liegend – der plastische Auslastungsfaktor reduziert werden.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
15 mm	107%	177%	173%
20 mm	100% (*)	106%	102%
25 mm	100% (*)	90%	84%
30 mm	100% (*)	85%	80%
35 mm	100% (*)	81%	76%

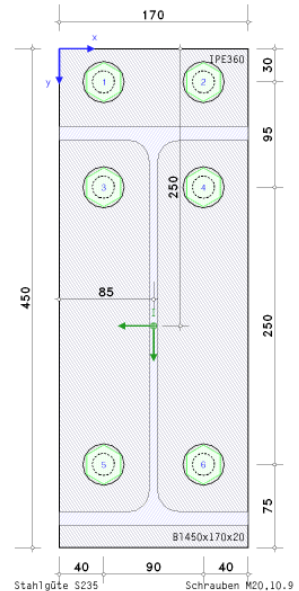
Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

Beispiel 2: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 20$ mm der typisierten Verbindung Nr. 104 / M10.9 des DAST-Ringbuchs.

Das Beispiel wurde mit den Grenzmomenten $M_{y,Ed} = -195,8$ kNm / $110,8$ kNm belastet.

Ergebnis:

- Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.
- Die Tragfähigkeit wird bei längeren Platten häufig unterschätzt (keine Vorspannung).



Ausnutzungen:

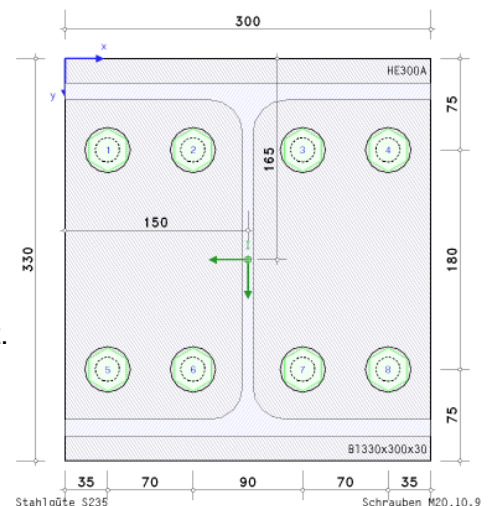
Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
10 mm	207% / 182%	402% / 460%	353% / 416%
15 mm	118% / 122%	211% / 223%	178% / 205%
20 mm	100% / 100%	143% / 137%	116% / 124%
25 mm	90% / 102% (*)	121% / 95%	94% / 90%
30 mm	84% / 102% (*)	114% / 94%	90% / 88%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

Beispiel 3: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 30$ mm der typisierten Verbindung Nr. 458 / M10.9 des DAST-Ringbuchs.

Das Beispiel wurde mit dem Grenzmoment $M_{y,Ed} = 136,3$ kNm belastet.

Die Vorgehensweise zur Berechnung von vier Schrauben je Reihe ist im EC3-1-8 nicht vorgeschrieben. Das DAST-Ringbuch verwendet hierzu das Verfahren aus einem AIF-Forschungsbericht. Wagenknecht hat eine aktuellere Methode vorgestellt, die in die Bemessung von Verbindungen mit vier Schrauben je Reihe eingeflossen ist und hier angewendet wird.



Ergebnis:

- Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.
- Die Tragfähigkeit wird bei dünnen Platten über-, bei dickeren unterschätzt (keine Vorspannung). Die Grenze der Tragfähigkeit wird näherungsweise erfasst.
- Bei kompakten Stirnplatten ($b/l \approx 1$) mit dickeren Platten ($t/b > 0.1$) sollte – auf der sicheren Seite liegend – der plastische Auslastungsfaktor reduziert werden.

Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
20 mm	117% (140%)	168%	152%
25 mm	104% (118%)	110%	99%
30 mm	92% (100%)	80%	76%
35 mm	92% (92%)	76%	72%
40 mm	92% (92%)	75%	70%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (DAST-Ergebnisse), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

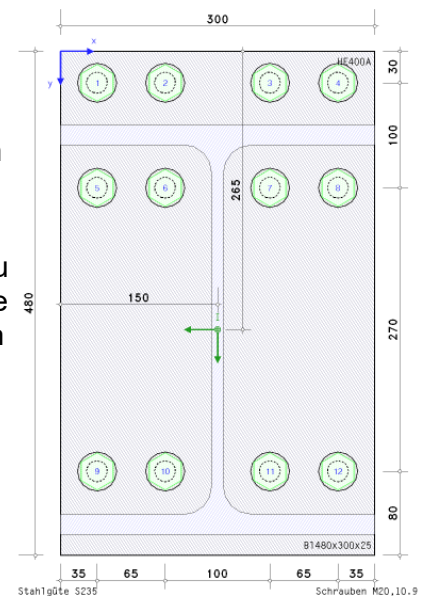
Beispiel 4: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 25$ mm der typisierten Verbindung Nr. 496 / M10.9 des DAST-Ringbuchs.

Das Beispiel wurde mit den Grenzmomenten $M_{y,Ed} = -393,2 / 158,0$ kNm belastet.

Die Vorgehensweise zur Berechnung von vier Schrauben je Reihe ist im EC3-1-8 nicht vorgeschrieben. Das DAST-Ringbuch verwendet hierzu das Verfahren aus einem AIF-Forschungsbericht. Wagenknecht hat eine aktuellere Methode vorgestellt, die in die Bemessung von Verbindungen mit vier Schrauben je Reihe eingeflossen ist und hier angewendet wird.

Ergebnis:

- Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.
- Die Tragfähigkeit wird häufig unterschätzt (keine Vorspannung). Die Grenze der Tragfähigkeit wird jedoch näherungsweise erfasst.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
15 mm	150% / 112% (146% / 145%)	243% / 239%	199% / 216%
20 mm	108% / 101% (117% / 121%)	168% / 139%	133% / 127%
25 mm	95% / 89% (100% / 100%)	133% / 92%	105% / 85%
30 mm	91% / 78% (91% / 84%)	103% / 67%	89% / 64%
35 mm	83% / 77% (83% / 72%)	87% / 65%	81% / 62%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (DAST-Ergebnisse), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

Beispiel 5: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 20$ mm der typisierten Verbindung Nr. 408 / M10.9 des DAST-Ringbuchs.

Der Träger befindet sich nicht genau im Schwerpunkt der Platte, daher ergibt sich eine leichte Unsymmetrie bzgl. der Grenzschnittgrößen.

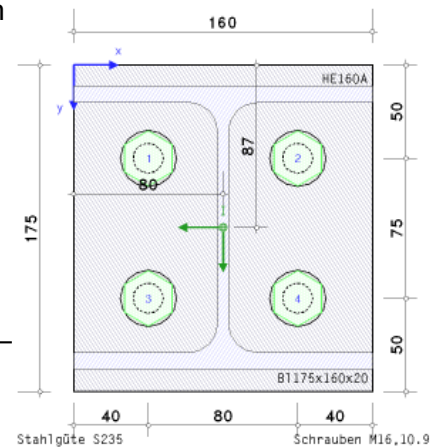
Hier wurde das Beispiel mit dem Grenzmoment $M_{y,Ed} = 27,2$ kNm belastet.

Ergebnis:

→ Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.

→ Die Tragfähigkeit wird bei dünnen Platten über-, bei dickeren unterschätzt (keine Vorspannung). Die Grenze der Tragfähigkeit wird näherungsweise erfasst.

→ Bei kompakten Stirnplatten ($b/l \approx 1$) mit dickeren Platten ($t/b > 0.1$) sollte – auf der sicheren Seite liegend – der plastische Auslastungsfaktor reduziert werden.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
10 mm	129%	304%	274%
15 mm	99%	150%	138%
20 mm	100% (*)	102%	88%
25 mm	100% (*)	95%	82%
30 mm	100% (*)	91%	79%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

Beispiel 6: Die Systemabmessungen entsprechen bei $t_p = 35$ mm der typisierten Verbindung Nr. 258 / M8.8 des DAST-Ringbuchs.

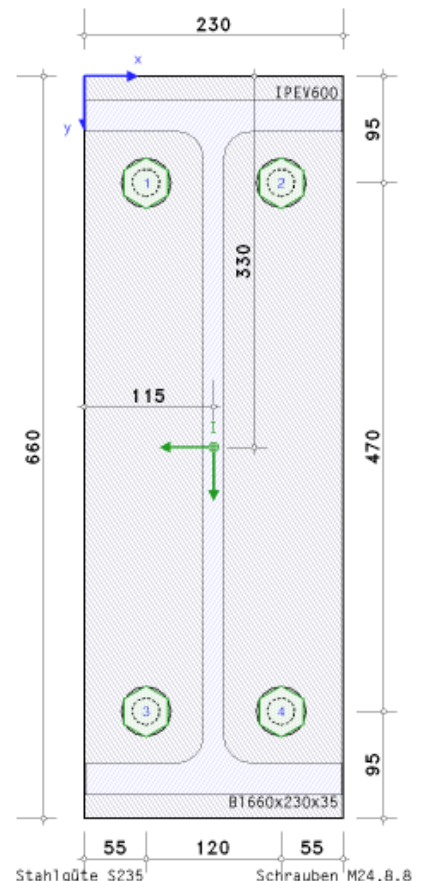
Hier wurde das Beispiel mit dem Grenzmoment $M_{y,Ed} = 218,3$ kNm belastet.

Ergebnis:

→ Die Vorspannung wirkt sich stets günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.

→ Die Tragfähigkeit wird bei längeren Platten häufig unterschätzt.

→ Bei längeren Stirnplatten sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – der plastische Auslastungsfaktor reduziert werden.



Ausnutzungen:

Plattendicke	4H-EC3BT	keine Vorspannung	Regelvorspannkraft
25 mm	100% (*)	94%	91%
30 mm	100% (*)	93%	90%
35 mm	100% (*)	92%	88%
40 mm	100% (*)	91%	87%
45 mm	100% (*)	90%	87%

Erläuterung: Erste Spalte: Variation der Stirnplattendicke um die Referenzgröße (gelb unterlegt), zweite Spalte: maximale Ausnutzung der Berechnung mit 4H-EC3BT (* linearisiert), dritte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS ohne Vorspannung, vierte Spalte: maximale Ausnutzung nach Laststeigerung mit 4H-EC3FS bei Ansatz der Regelvorspannkraft.

Fazit

Die Tragfähigkeiten der Referenzbeispiele aus dem DAST-Ringbuch werden mit dem Programm 4H-EC3FS gut erfasst.

Aus dem Vergleich lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

- Die Vorspannung wirkt sich günstig aus. Sie sollte daher – auf der sicheren Seite liegend – nicht berücksichtigt werden.
- Der plastische Auslastungsfaktor sollte – auf der sicheren Seite liegend – reduziert werden.
- Lokale Beanspruchungen des Trägers aus der Verformung der Stirnplatte werden nicht erfasst. Daher sollten höhere Sicherheiten in der resultierenden Ausnutzung vorgesehen werden.

Voreinstellungen in 4H-EC3-FS:

- die Schrauben werden ohne Vorspannung plastisch berechnet
- der Auslastungsfaktor wird gesetzt auf $f_{t,f} = 0.95$
- die Stirnplatte wird elastisch berechnet und plastisch nachgewiesen
- der Bettungsmodul der Stirnplatte wird berechnet mit $c_b = E / t_p$