



Fort York Bridge, Toronto, Kanada

Fußgängerbrücke

© Juan A. Sobrino, pedelta

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

Institut für
Metall- und Leichtbau

Aktuelle Entwicklungen in der internationalen Anwendung von vorgespannten Verbindungen aus nichtrostenden Stählen

Dr.-Ing. Dominik Jungbluth

Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

3. Fachtagung
**Mechanische Verbindungsmittel
im Stahlbau**

26. März 2021 | Online-Fachtagung

Fort York Bridge, Toronto, Kanada

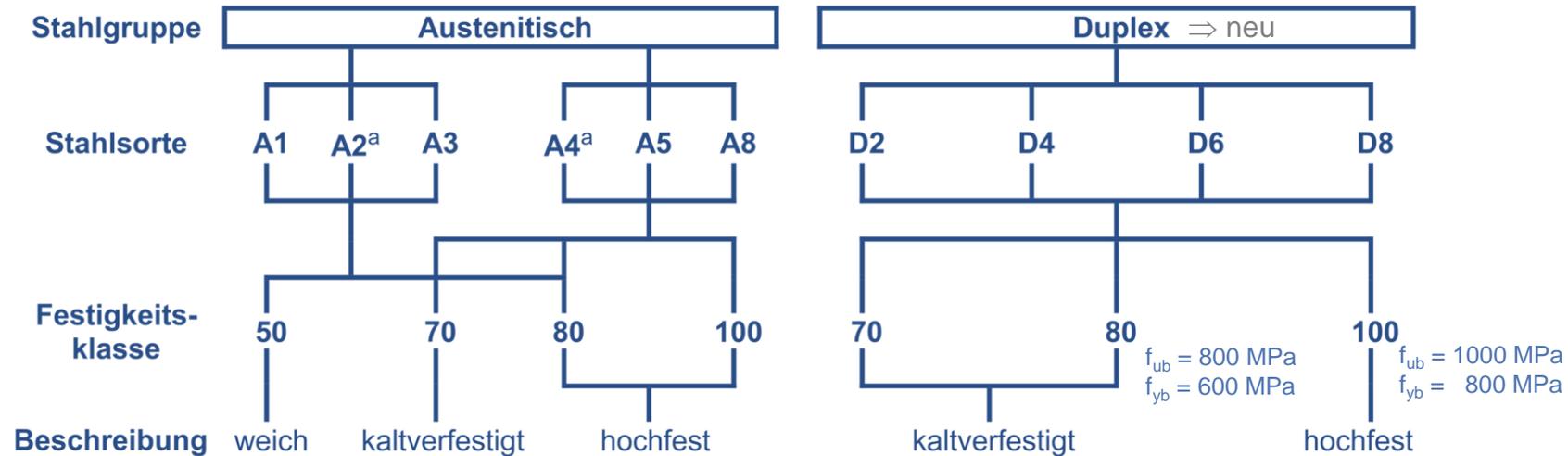
Fußgängerbrücke

© Juan A. Sobrino, pedelta



- Vorspannen von Garnituren aus nichtrostendem Stahl
- Schraubengarnituren aus nichtrostendem Stahl
- Korrosivitätskategorien
- Vorspannverhalten
- Gleitfeste Verbindungen
- Aktuelle Entwicklungen in der Normung
- Bolt Tightening Qualification Procedure (BTQP)
- Zusammenfassung

Überarbeitung der EN ISO 3506-1 und -2 Mechanische Eigenschaften für Schrauben und Muttern



a Austenitische nichtrostende Stähle mit einem niedrigen Kohlenstoffgehalt von höchstens 0,03 % dürfen zusätzlich mit einem „L“ gekennzeichnet werden. Beispiel: **A4L-80**.

Auch verfügbar:

Hochfeste nichtrostende Schrauben vergleichbar mit hochfesten Kohlenstoffschrauben

Bumax 88/109 (A) oder LDX/DX/SDX
mit

⇒ $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$, $f_{yb} = 640 \text{ MPa}$ oder

⇒ $f_{ub} = 1000 \text{ MPa}$, $f_{yb} = 900 \text{ MPa}$



Schirm-Produktnorm

⇒ Fixiert alle aus der Sicht des Stahlbaus wichtigen technischen Anforderungen an Garnituren aus Schrauben, Muttern und Scheiben, **ohne** auf einzelne spezielle Produkte einzugehen.

Zentrale Forderungen

- Maße und Toleranzen sind in einer europäischen oder internationalen Produktnorm beschrieben
- in Garnituren lieferbar
- CE-Kennzeichnung
- Zusatzkennzeichen „SB“ (Structural Bolting) auf Schrauben und Muttern

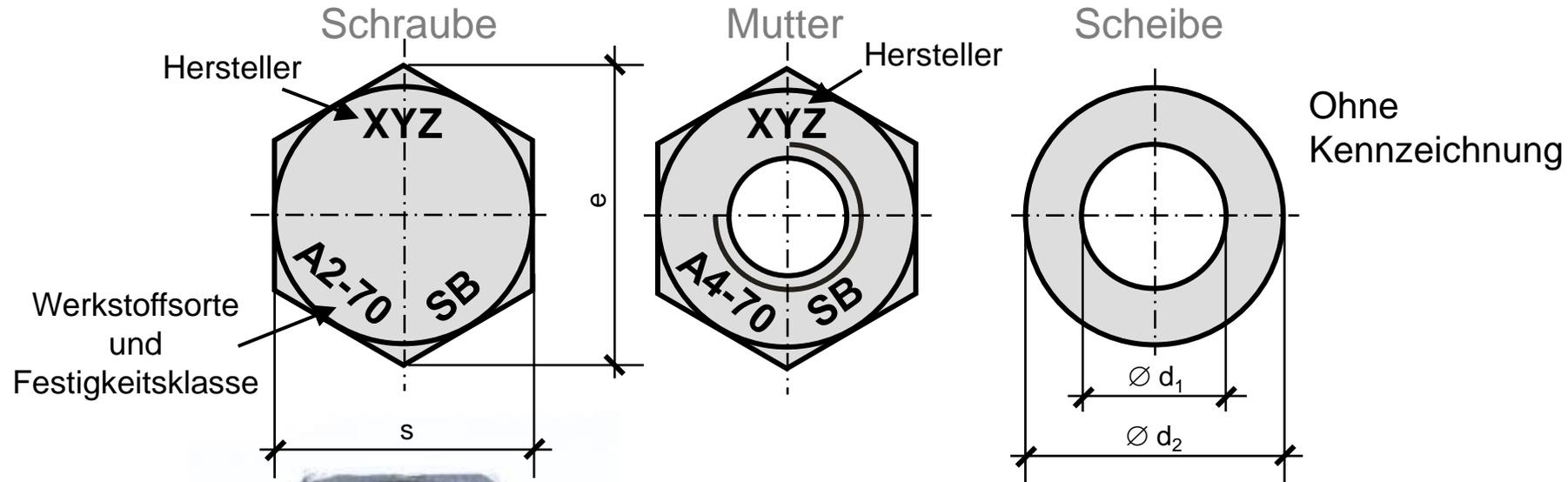
Beschränkungen hier nur mit Bezug auf nichtrostenden Stahl

- M12 – M36
- Nichtrostender austenitischer Stahl
- Festigkeitsklassen 50, 70, 80 (nach EN ISO 3506-1/-2)
- Kein Duplex-Stahl



Kennzeichnung Schraubengarnituren nach DIN EN 15048-2

Garnituren aus nichtrostendem Stahl



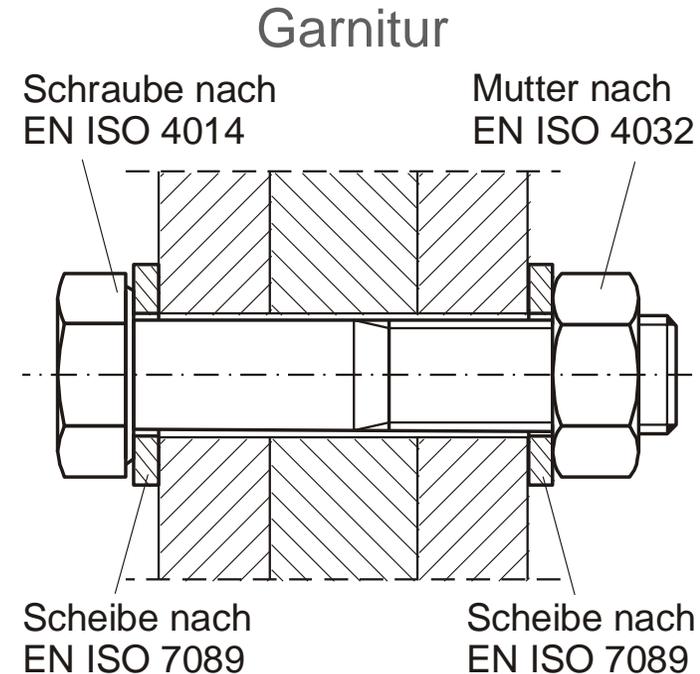
© Bumax

- Gute Praxis: Anordnung von Scheiben unter dem Schraubenkopf und unter der Mutter
- Korrosionswiderstand der Schrauben sollte mindestens genauso gut sein wie der Korrosionswiderstand der zu verbindenden Teile
 - ⇒ z. B. zur Verschraubung von nichtrostendem Stahl 1.4401 sollten A4- Schrauben oder besser verwendet werden (siehe auch Werkstoffauswahl)

Falsche Werkstoffauswahl für Komponenten einer Befestigung aus einem Straßentunnel



© Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

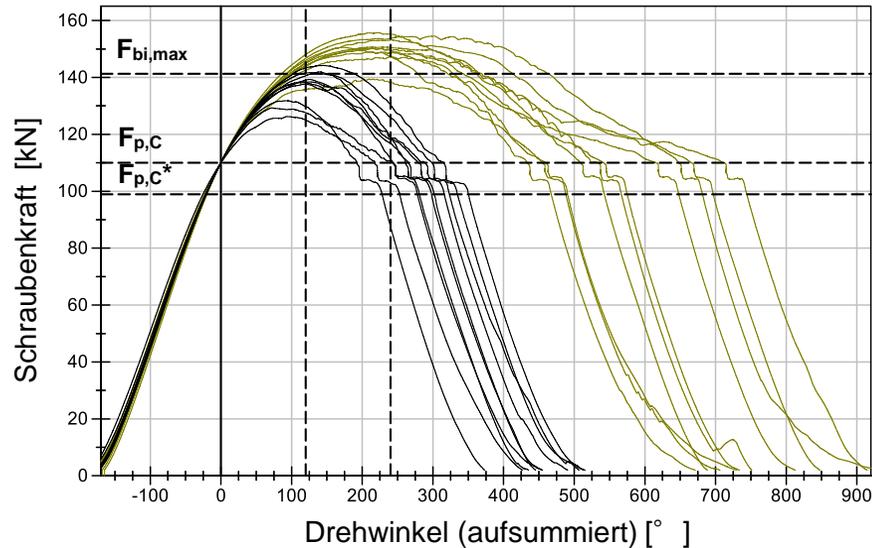


| Komponente | Stahlsorte | CRC | Einschätzung |
|------------------|------------|-----|---|
| Schraube | 1.4567 | II | keine ausreichende CRC ⇒ starke, die Tragfähigkeit gefährdende Korrosion |
| Mutter | 1.4301 | II | |
| Rechteck-scheibe | 1.4404 | III | |
| Unterleg-scheibe | 1.4529 | V | richtige Auswahl ⇒ keine Korrosion |

ISO 4017

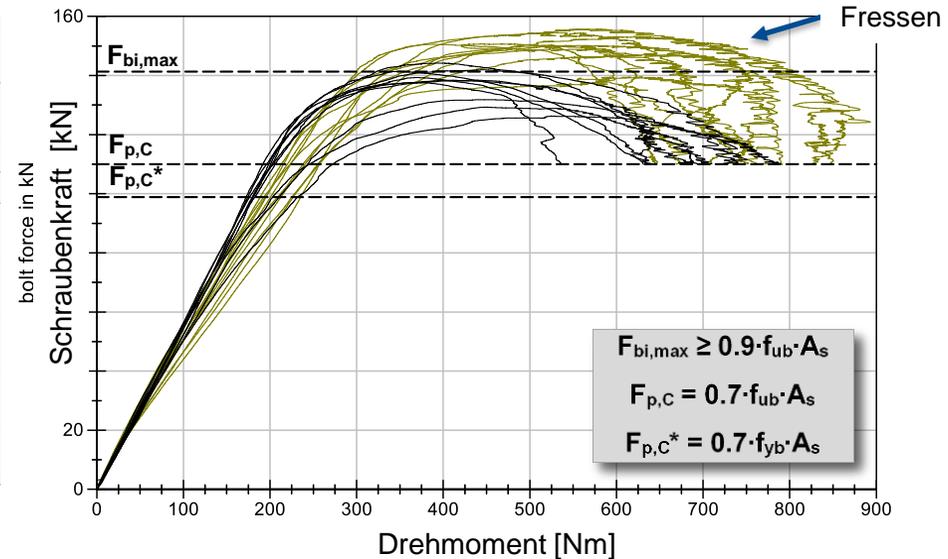


Schraubenkraft-Drehwinkel-Kurven



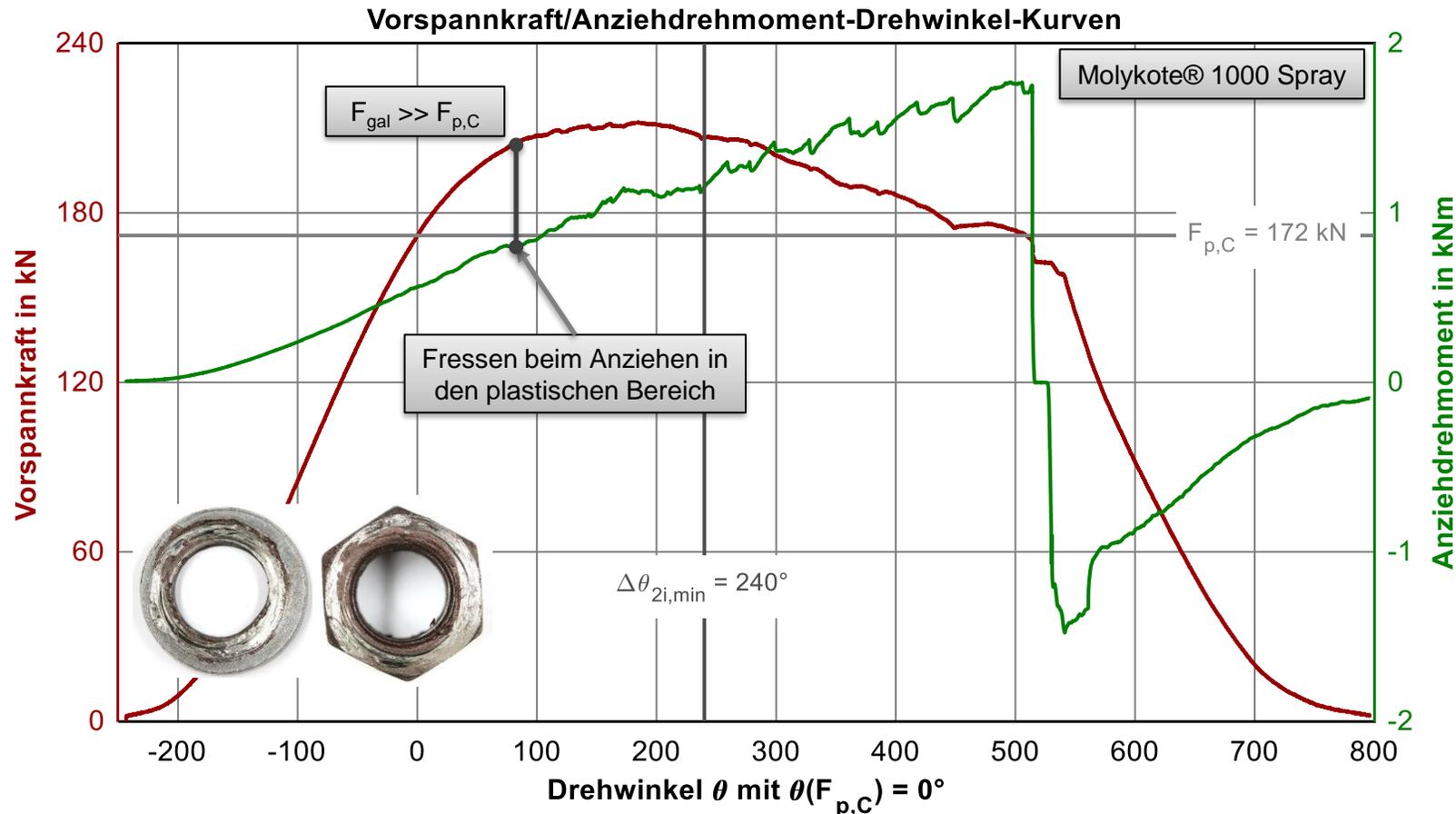
— Bumax LDX – M16x100 – Gleitmo 1952V
 — Bumax LDX – M16x100 – Molykote 1000 S

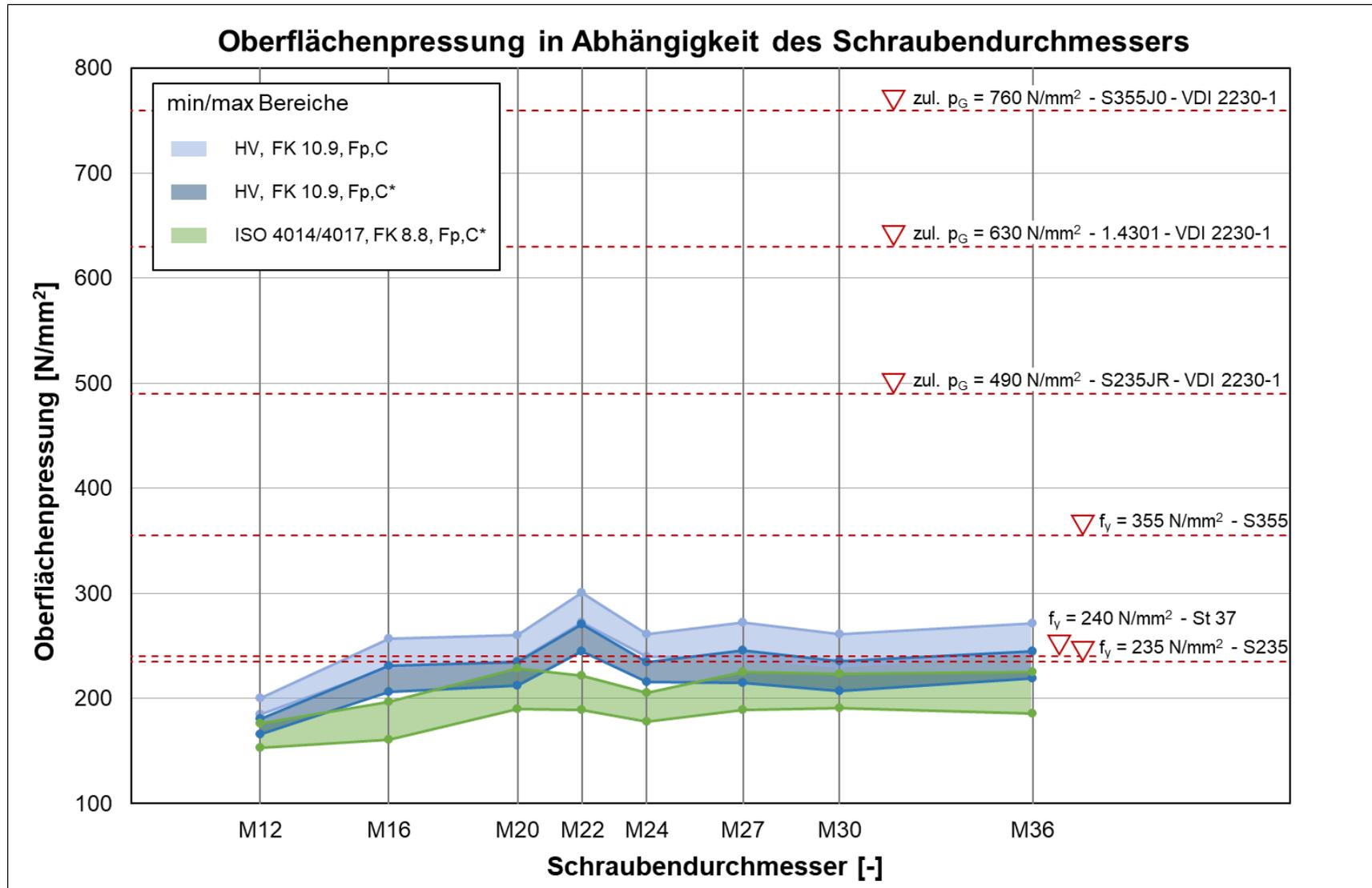
Schraubenkraft-Drehmoment-Kurven



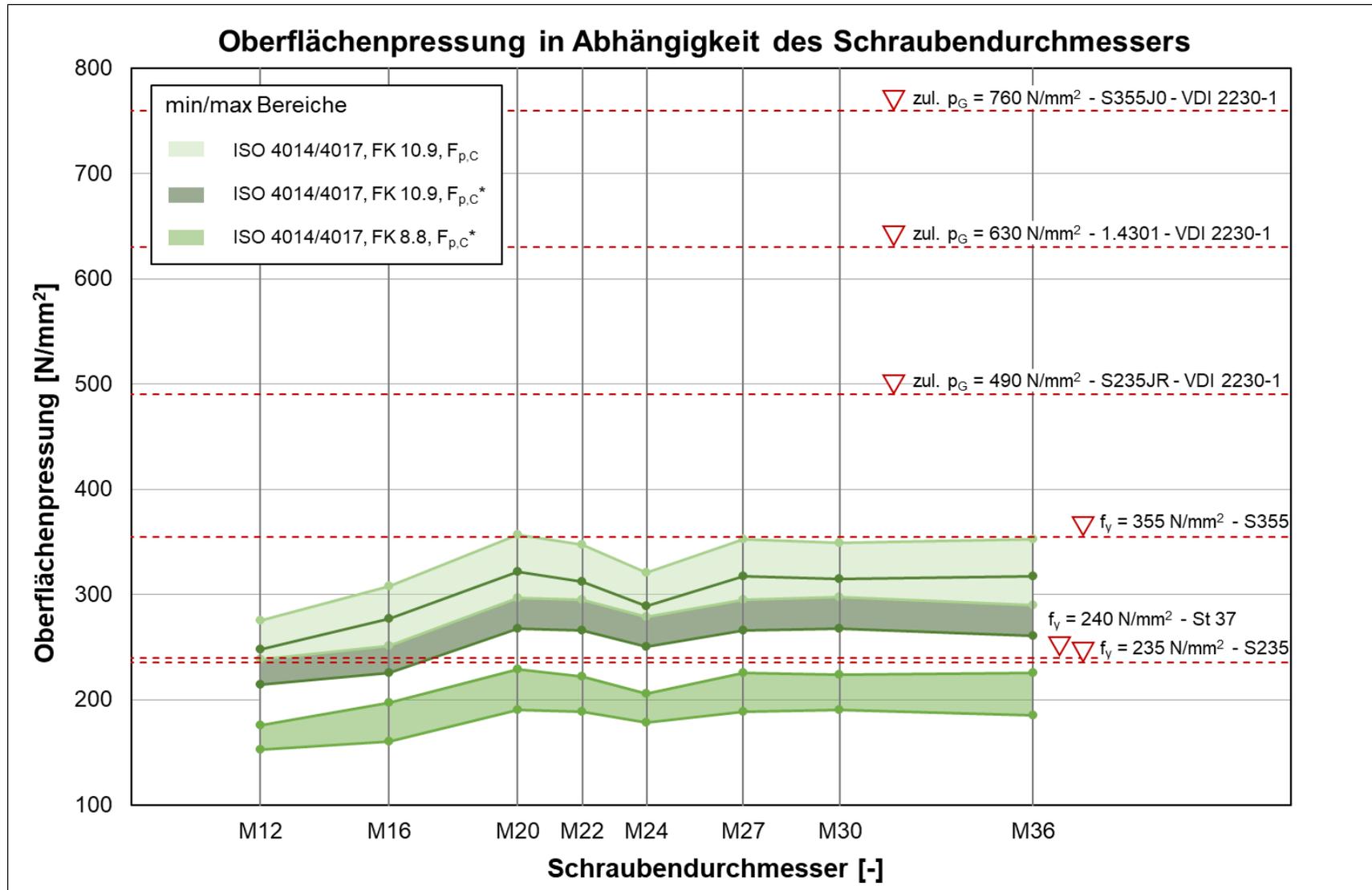
- Mit einer nicht kalibrierten Standardschmierung (Gleitmo 1952V), die ab Werk appliziert wird, lassen sich die Schrauben zwar vorspannen, allerdings nicht gezielt auf ein definiertes Vorspannkraftniveau
- Darüber hinaus wird in der Regel die maximal erforderliche Vorspannkraft $F_{bi,max} \geq 0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ nicht erreicht
- **Allerdings: mit einer geeigneten Schmierung, z. B. Molykote 1000 S, lassen sich die Vorspanneigenschaften deutlich verbessern!**

- Fressen tritt in der Regel erst bei vergleichsweise hohen Vorspannkräften auf.
- Fresserscheinungen lassen sich durch Peaks in den Anziehdrehmoment-Drehwinkel-Kurven anhand von unregelmäßigen Kurvenverläufen erkennen.

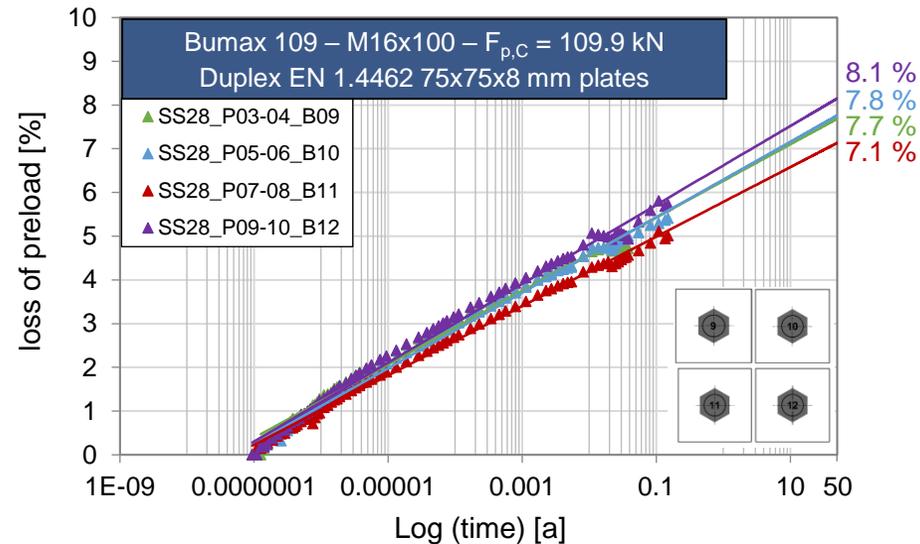
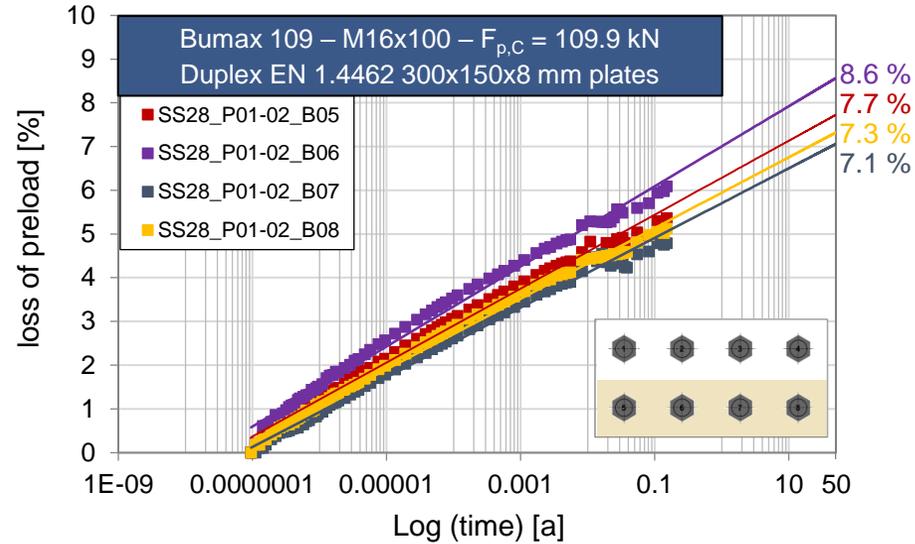




Oberflächenpressung – ISO 4014, FK 8.8 vs. 10.9



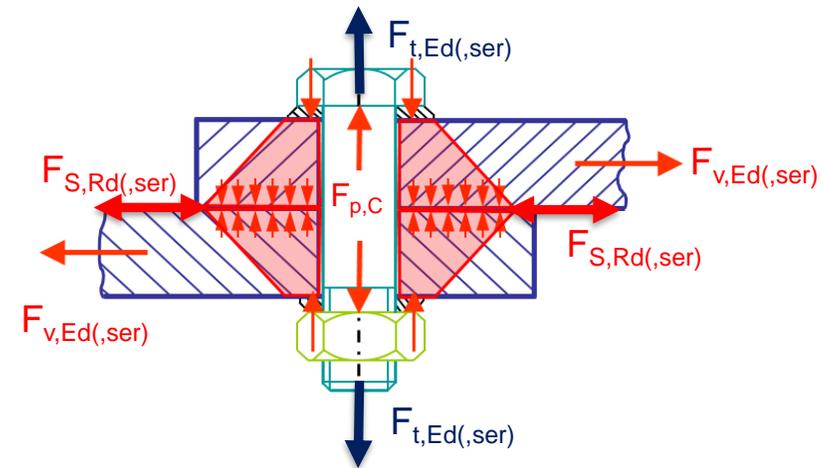
Relaxationsversuche - Vorspannkraftverluste



- ⇒ Höchste Vorspannkraft-Verlustrate
→ Versuchsbeginn, danach abnehmend
- ⇒ **Kriech-/Relaxationsverhalten**
→ **vergleichbar mit HV-Schrauben**

Gleitfeste Verbindungen aus nichtrostendem Stahl

Bestimmung der Haftreibungszahl nach Anhang G der DIN EN 1090-2

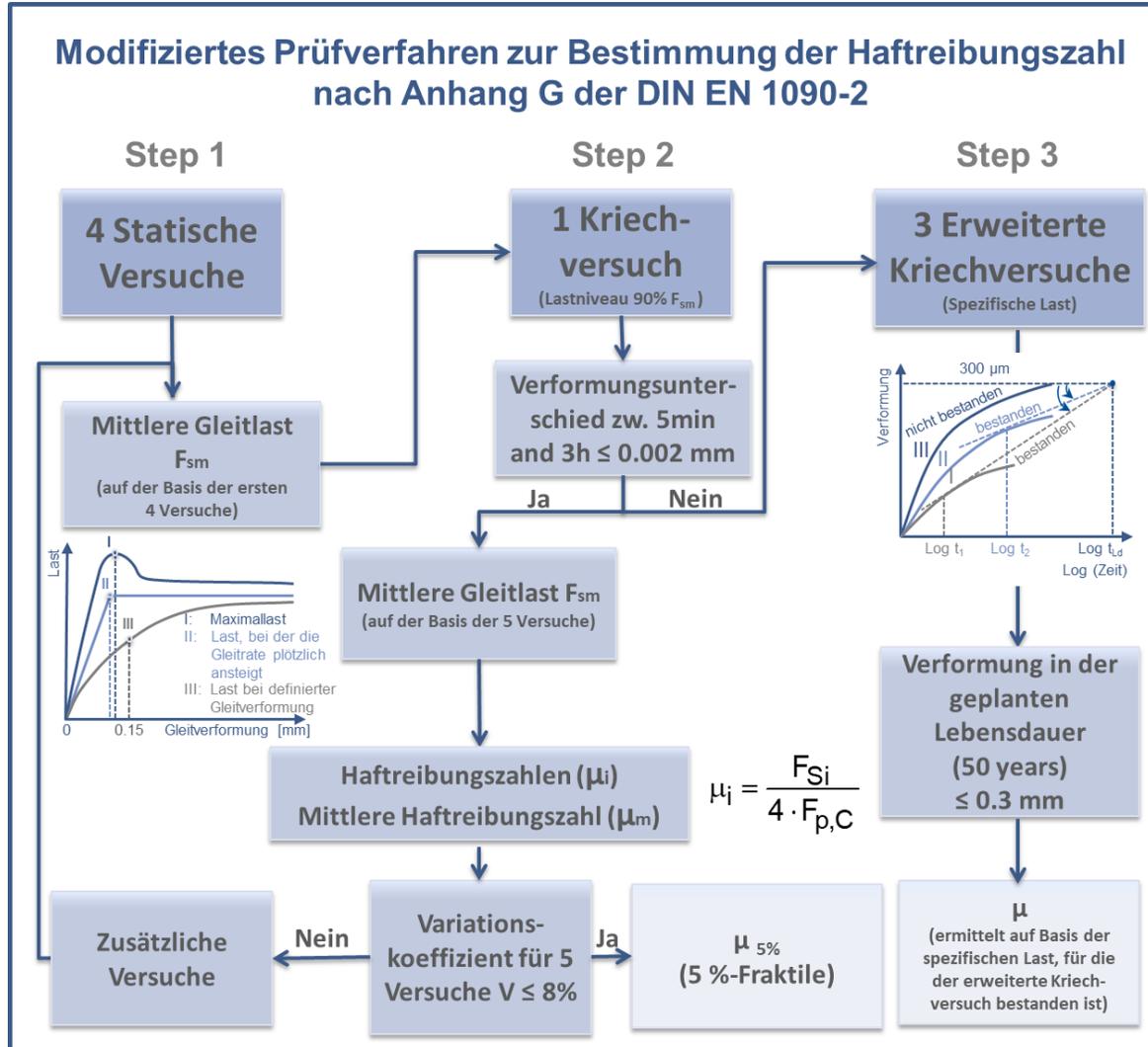


$$F_{S,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,C} - 0,8 \cdot F_{t,Ed})}{\gamma_{M3} (= 1,25)}$$

© Juan A. Sobrino, pedelta

Dr.-Ing. Dominik Jungbluth | Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghörer

Prüfung einer
GV-Verbindung M20 nach
DIN EN 1090-2, Anhang G



Erweiterte
Kriechversuche nach
DIN EN 1090-2,
Anhang G



Nichtrostender Stahl

Statische Versuche mit Bumax 88/109-Schrauben (EN ISO 4017)



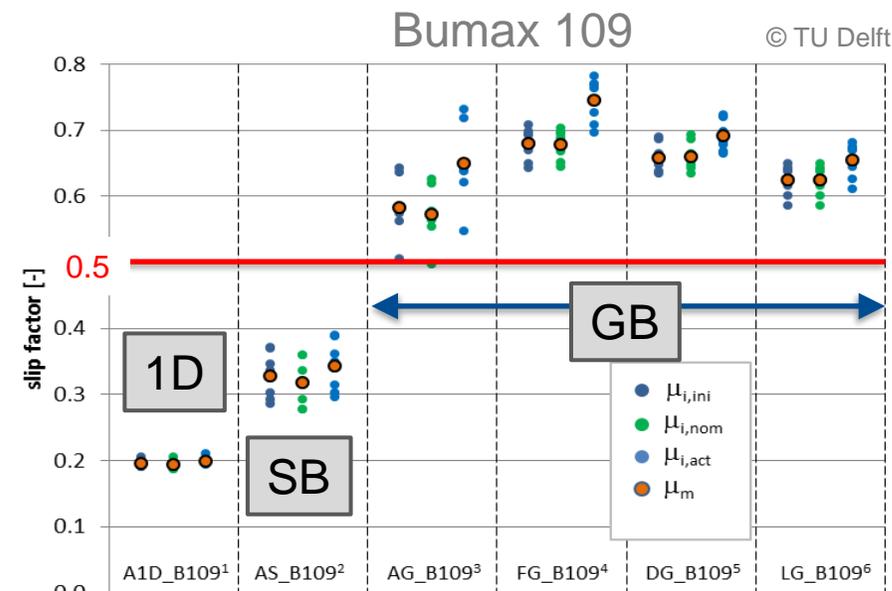
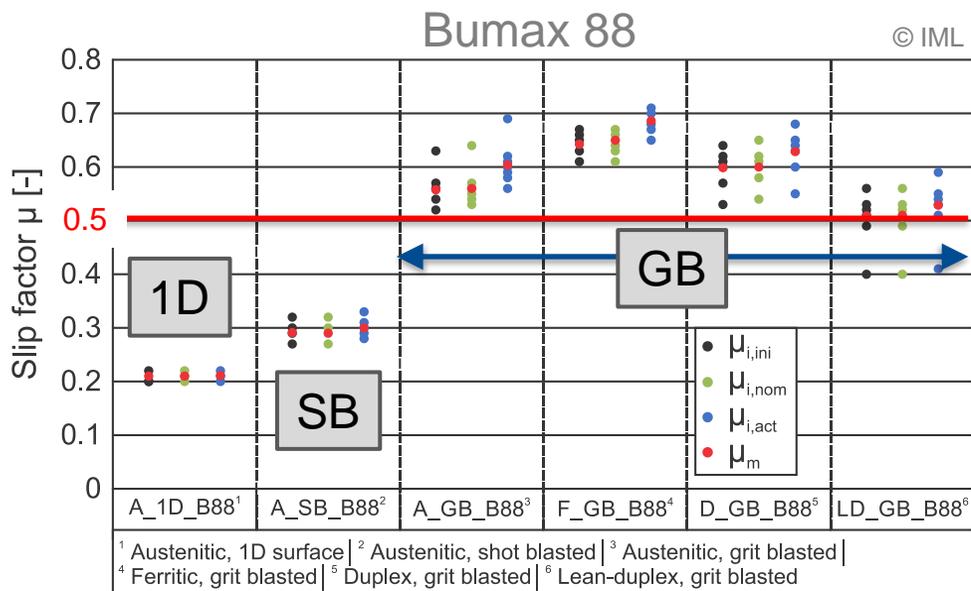
Bleche aus nichtrostendem Stahl

- Austenit (1.4404) - A
- Duplex (1.4462) - D
- Lean-Duplex (1.4162) - LD
- Ferrit (1.4003) - F

Austenitische Schrauben
M16, FK 8.8/10.9 (Bumax 88/109)

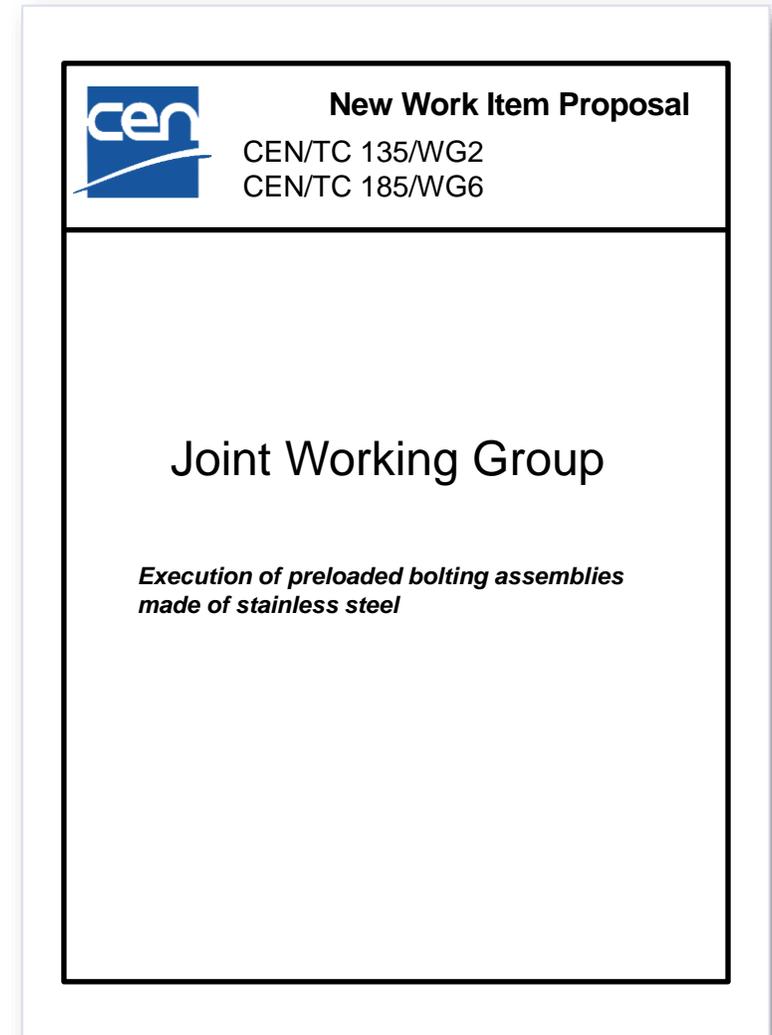
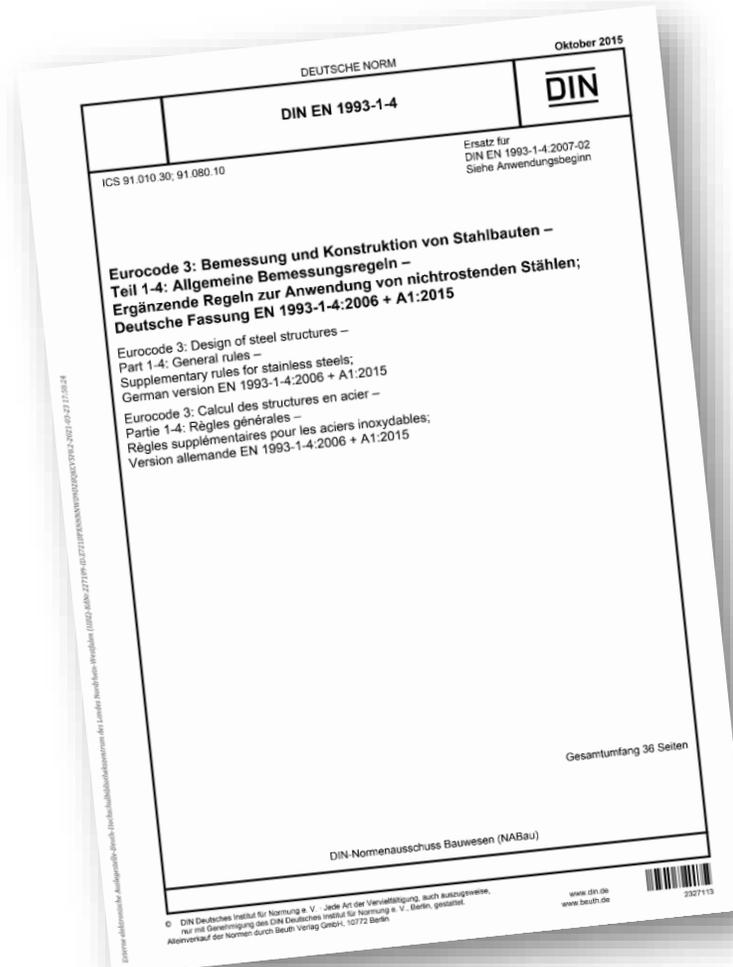
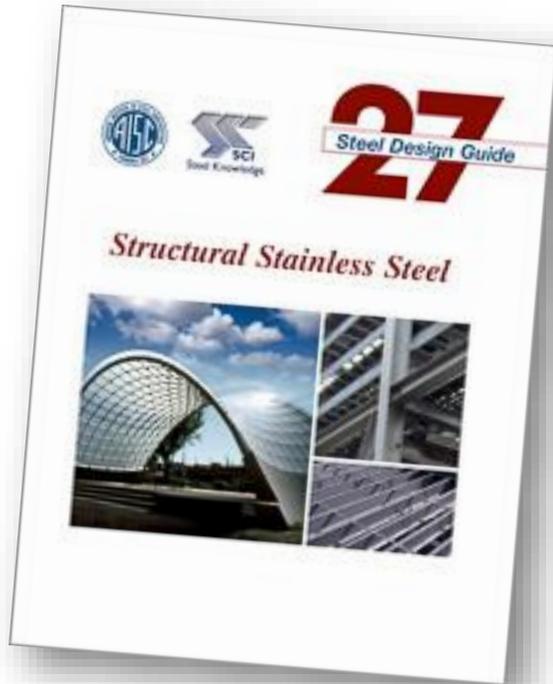
Typische Oberflächenbeschaffenheiten

- 1D
 - Shot Blasted (SB)
 - Grit Blasted (GB)
- Statische Versuche
 - Kriechversuch
 - Erweiterte Kriechversuche



(Vorläufige) Haftreibungszahlen für nichtrostenden Stahl

| Gleitflächen- klasse | Stahlsorte | Oberflächenbehandlung | | Haftreibungs- zahl μ [-] |
|-------------------------|--|--|---------------------------------|------------------------------------|
| | | Oberfläche | R_z [μm] | |
| A++ | Duplex 1.4462/ Lean Duplex 1.4162 | Aluminium Spray Metalized Gemessene Trockenschichtdicke (DFT) 100 mm \pm 20 mm | ≥ 40 (vor Beschichtung) | 0,7 |
| A+ | Austenitic 1.4404/ Ferritic 1.4003 | Aluminium Spray Metalized Gemessene Trockenschichtdicke (DFT) 100 mm \pm 20 mm | ≥ 40 (vor Beschichtung) | 0,6 |
| A | Duplex 1.4462 | Strahlen (kantiges Strahlgut) | ≥ 50 | 0,5 |
| | Ferritic 1.4003 | | ≥ 45 | |
| B | Austenitic 1.4404 | Strahlen (kantiges Strahlgut) | ≥ 45 | 0,4 |
| | Lean Duplex 1.4162 | | ≥ 40 | |
| C | - | - | - | 0,3 |
| D | Austenitic 1.4404 | Strahlen (rundes Strahlgut) | ≥ 35 | 0,2 |
| E | Austenitic 1.4404 | Wie hergestellt | ≥ 25 | 0,15 |





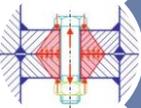
Definition der Ausgangsparameter



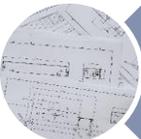
Zugversuche an der Ganzschraube
nach DIN EN ISO 3506-1



Gebrauchseignungsprüfung
nach DIN EN 14399-2



Bestimmung von Vorspannparametern



Festlegung von Kontrollanforderungen



Verfahrensanweisung



Produktnorm

- DIN EN ISO 4014
- DIN EN ISO 4014
- DIN EN ISO 4762
- ...



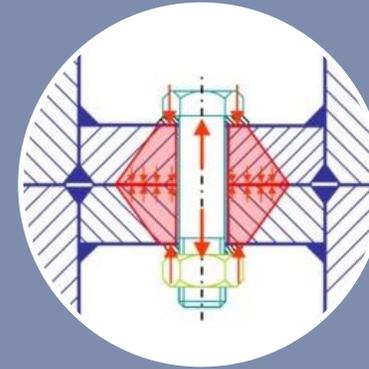
Schmierung

Geeignetes Schmiermittel für den Anwendungsfall und für nichtrostenden Stahl



Anziehverfahren

- Drehmomentverfahren
- Kombiniertes Verfahren
- Streckgrenzgesteuertes Anziehen
- Hydraulisches Vorspannen
- ...



Vorspannkraft $F_{p,s}$

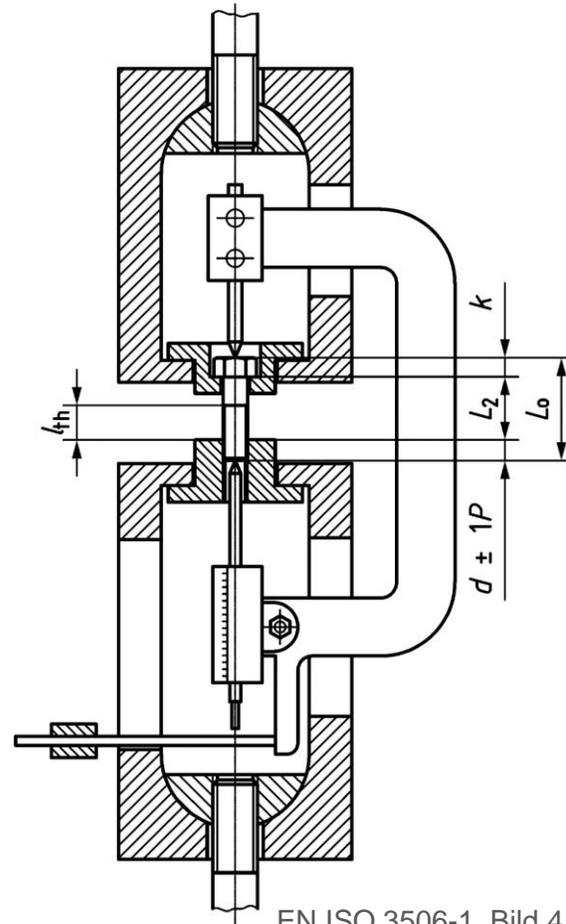
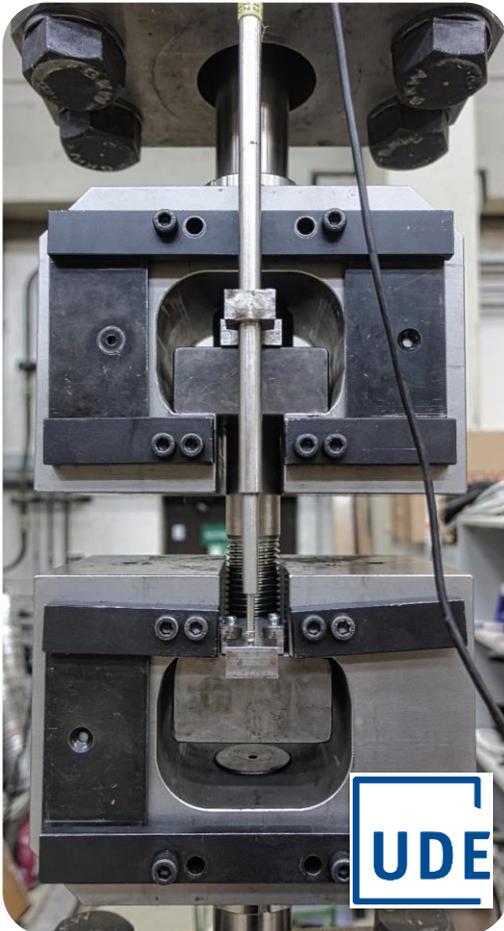
- Zielebene I oder II
- Benötigte Vorspannung basierend auf der Bemessung
- Vorspannung kleiner oder gleich
 $F_{p,s} = 0,7 f_{yb} A_s$



Eigenschaften

- Korrosionswiderstand
- Festigkeitsklasse (80, 100)
- Stahlsorte des nichtrostenden Stahls

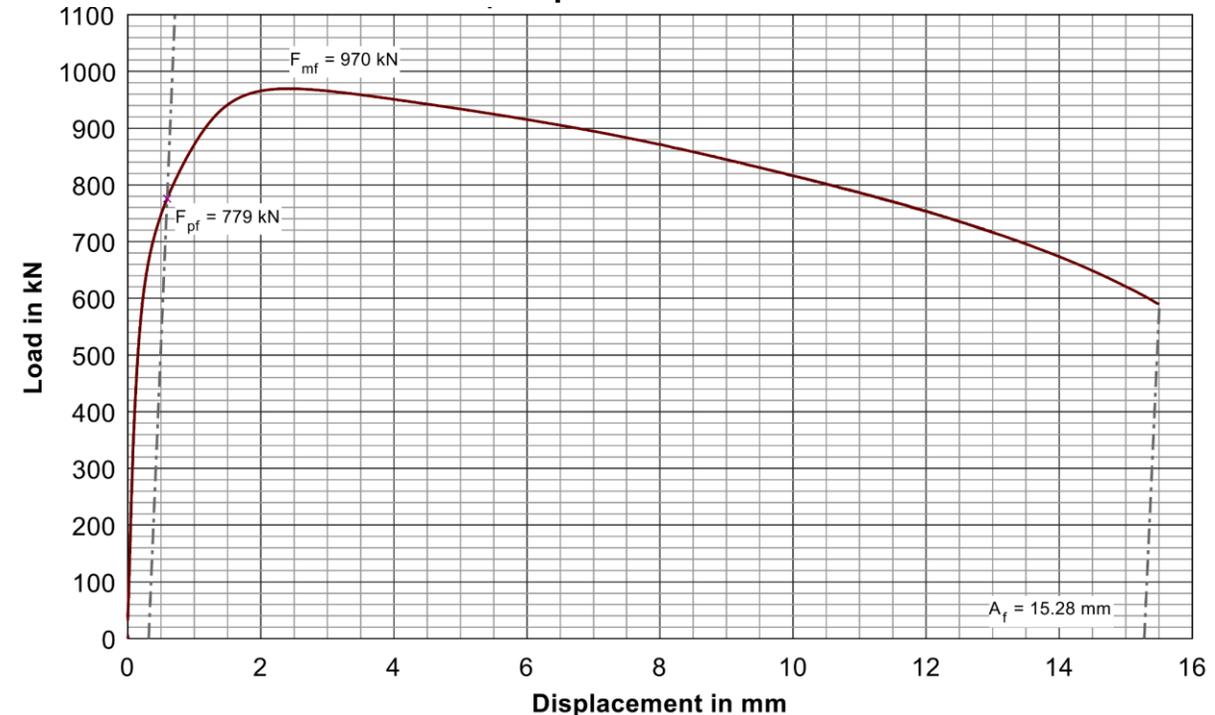
Mindestens 3 Prüfungen



Bestimmung

- der Zugfestigkeit F_{mf} ,
- der 0,2 % Dehngrenze F_{pf} und
- der Bruchverlängerung A_f .

Wichtig: Korrekte Messung der Längenänderung
Load-Displacement Curve



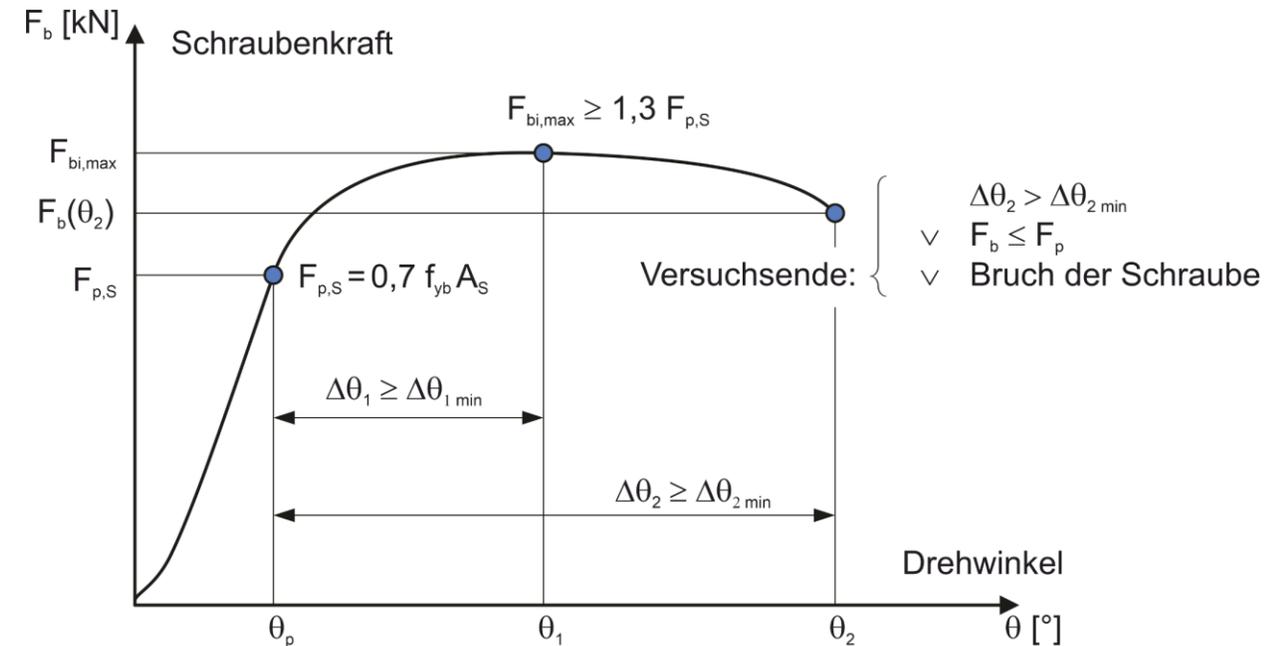
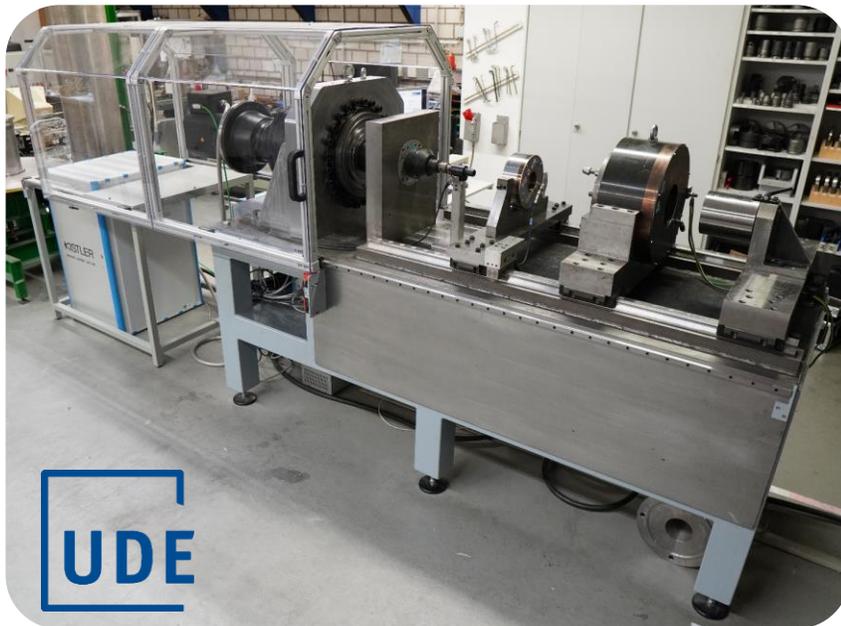
Bei einer Erstprüfung mindestens 20 Versuche je Konfiguration

$$F_{bi,max} \geq 1,3 F_{p,S}$$

$F_{bi,max}$ Individueller Wert der maximal ermittelten Vorspannkraft im Versuch

$$\Delta\theta_{2i} \geq \Delta\theta_{2,min} = 210^\circ / 240^\circ / 270^\circ$$

$\Delta\theta_{2i}$ Winkel, um den die Mutter, ausgehend von der Vorspannkraft $F_{p,S}$ weitergedreht werden muss, bevor F_{bi} nach Erreichen von $F_{bi,max}$ den Wert $F_{p,S}$ wieder unterschreitet.



Statistische Auswertung der Anziehversuche nach DIN EN 1990 mit 5 % und 95 % Fraktile $F_{Rk,5\%}$ and $F_{Rk,95\%}$ für die bestimmten Anziehparameter

Drehmomentgesteuertes
Vorspannen

Alternative Verfahren

Kombiniertes
Vorspannen

Grenzkriterien

$$\begin{aligned} F_{b,\min} &\geq 1,03 F_{p,S} \\ F_{Rk,5\%} &\geq 1,03 F_{p,S} \\ F_{bm} &\geq 1,10 F_{p,S} \\ F_{Rk,95\%} &\leq 0,95 S_b \cdot F_{p,S} \\ F_{b,\max} &\leq 0,95 S_b \cdot F_{p,S} \end{aligned}$$

Definition
äquivalenter
Grenzkriterien

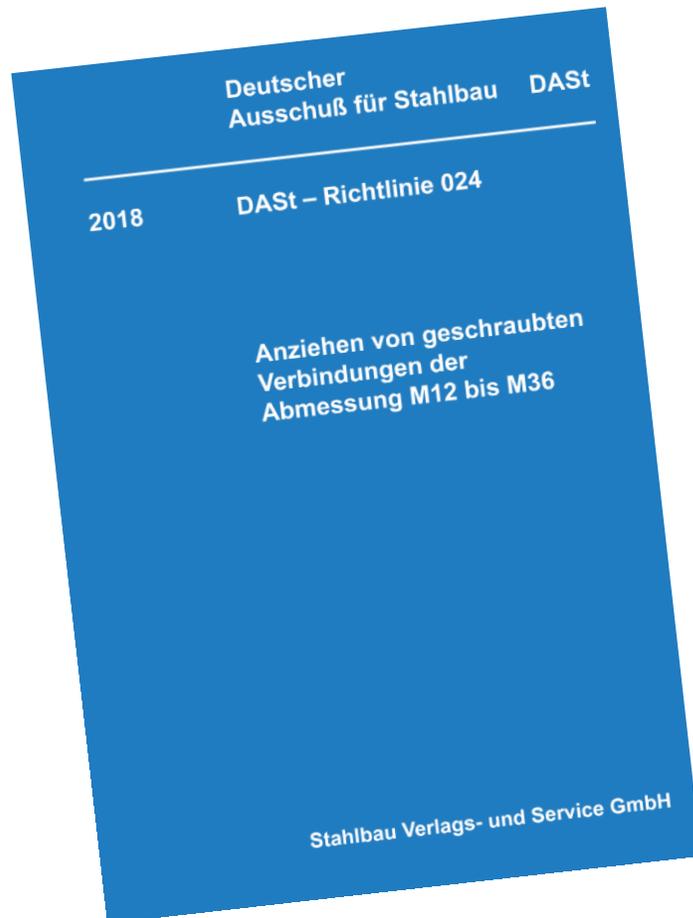
Grenzkriterien

$$\begin{aligned} F_{b,\min} &\geq 1,03 F_{p,S} \\ F_{Rk,5\%} &\geq 1,03 F_{p,S} \\ F_{bm} &\geq 1,10 F_{p,S} \\ F_{Rk,95\%} &< S_b \cdot F_{p,S} \\ F_{b,\max} &< S_b \cdot F_{p,S} \\ \Delta\theta_c &< 0,5 \Delta\theta_{2,i,\min} \end{aligned}$$

$F_{b,\min}$ kleinster Messwert
 $F_{b,\max}$ größter Messwert
 $F_{b,m}$ Mittelwert der Messwerte

$F_{Rk,5\%}$ 5% Fraktile aller Messwerte
 $F_{Rk,95\%}$ 95% Fraktile aller Messwerte
 $F_{p,S}$ Definiertes Vorspannkraftniveau

Definition der Kontrollanforderungen, zum Beispiel nach DASt-Richtlinie 024...



Zielebene I des Vorspannens

| Gesamtanzahl der in einem Tragwerk zu kontrollierenden geschraubten Verbindungen | | |
|--|---------------------------------|------------------|
| Ausführungs-klasse | 1. Anziehschritt ⁽¹⁾ | 2. Anziehschritt |
| EXC2 | - | 5 % |
| EXC3/4 | 5 % | 10 % |

⁽¹⁾ Der erste Anziehschritt muss durch Sichtprüfung der Verbindungen überprüft werden, um sicherzustellen, dass das Klemmpaket vollständig zusammengezogen ist.

| Kontrolle nach dem ersten Anziehschritt | | |
|---|-----------------------------------|------------|
| Parameter | Kriterium | Bewertung |
| Voranziehdrehmoment M_{Vor} | Weiterdrehwinkel $\leq 15^\circ$ | Ok |
| | Weiterdrehwinkel $> 15^\circ$ | fehlerhaft |
| Zustand der Fuge | vollständig zusammengezogen | Ok |
| | nicht vollständig zusammengezogen | fehlerhaft |

Kontrolle vor dem zweiten Anziehschritt

Sichtprüfung der Markierungen aller Muttern relativ zu den Schraubengewinden

| Kontrolle nach dem zweiten Anziehschritt | | |
|--|--|---|
| Parameter | Kriterium | Bewertung |
| Ausgeführter Weiterdrehwinkel $\Delta\theta_{ausgef.}$ | $\Delta\theta - 15^\circ \leq \Delta\theta_{ausgef.} \leq \Delta\theta + 30^\circ$ | Ok |
| | $\Delta\theta_{ausgef.} < \Delta\theta - 15^\circ$ | fehlerhaft ⇒ Korrektur des Drehwinkels |
| | $\Delta\theta_{ausgef.} > \Delta\theta + 30^\circ$ (oder Schrauben- oder Mutternversagen) | fehlerhaft ⇒ Ersatz der Garnitur |

Anwendung vorgespannter Schrauben aus nichtrostendem Stahl

- Eignung zum Vorspannen durchaus gegeben
- Hohe Vorspannkräfte sind möglich
- Fressen ist vermeidbar
- Oberflächenpressungen sind beherrschbar
- Vorspannkraftverluste vergleichbar mit HV-Schrauben
- Gleitfeste Verbindungen aus nichtrostendem Stahl sind möglich

Neue Entwicklungen in der Normung

- Neue Regelungen im AISC Design Guide 27
- Joint Working für eine CEN TS in Planung
- BTQP als erste Regelung zur Qualifizierung von vorspannbaren nichtrostenden Schraubengarnituren

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



Fort York Bridge, Toronto, Kanada
Fußgängerbrücke
© Juan A. Sobrino, pedelta

Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner
Dr.-Ing. Dominik Jungbluth

Universität Duisburg-Essen
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Abteilung Bauwissenschaften
Institut für Metall- und Leichtbau
Prüf- und Zertifizierungsstelle NRW71

Universitätsstr. 15
45141 Essen

Fon: 0201 183-2757
Fax: 0201 183-2710

E-Mail: natalie.stranghoener@uni-due.de
dominik.jungbluth@uni-due.de

Internet: www.uni-due.de/iml