Formelsammlung Stahlbau

1 Literaturverzeichnis

[1] R. Kindmann, Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie 2.Ordnung, Berlin: Ernst & Sohn, 2008.

[2] Stuttgart, Hochschule für Technik, Skript Stahlbau 2, Stuttgart, 2013.

[3] C. Petersen, Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, 2.Auflage, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 1982.

[4] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1993-1-5, Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010.

[5] Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau, Stahlbau-Verlags-GmbH, 1978.

[6] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1993-1-8, Berlin : Beuth Verlag, Dezember 2010.

[7] Deutsches Institut für Normung; DIN EN 1993-1-3, *Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche,* Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010.

[8] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1993-1-1, Berlin : Beuth Verlag, Dezember 2010.

[9] K.-J. Schneider und A. Goris, Bautabellen für Ingenieure - 20.Auflage, Werner Verlag, 2012.

[10] P.-I. G. Wagenknecht, Stahlbau Praxis nach Eurocode 3 Band 2, Beuth Verlag, 2011.

[11] C. Petersen, Stahlbau, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

[12] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1992-1-1, Berlin: Beuth Verlag, Januar 2011.

[13] KIT Stahl und Leichtbau Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Vorlesung Masterstudiengang, Karlsruhe, 2013.

2 Einwirkungskombinationen (vereinfacht)

2.1 Grundkombination:

$E_d = \gamma_G \bullet G_k + \gamma_Q \bullet Q_{k,1} + \sum[\gamma_Q \bullet \Psi_{0,i} \bullet Q_{k,i}]$	γ_G: [ ] = 1,35 γ_Q: [ ] = 1,5 $\Psi_{0,i}$: [ ] → siehe Tabelle

2.1.1 Tabelle mit Kombinationsbeiwerten – DIN EN 1990/NA

Einwirkung:	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Nutzlast Kategorie A,B: (Wohn-, Aufenthalts-,Büroräume) Kategorie C,D: (Versammlungsräume, Verkaufsräume) Kategorie E: (Lagerräume)	 0,7 0,7 1,0	 0,5 0,7 0,9	 0,3 0,6 0,8
Verkehrslast Kategorie F: (Fahrzeuggewicht F ≤ 30 KN) Kategorie G: (Fahrzeuggewicht 30 KN ≤ F ≤ 160 KN) Kategorie H: (Dächer)	 0,7 0,7 0	 0,7 0,5 0	 0,6 0,3 0
Windlasten	0,6	0,2	0
Schneelasten Orte bis zu NN +1000: Orte über NN +1000:	 0,5 0,7	 0,2 0,5	 0 0,2
Sonstige veränderliche Einwirkungen	0,8	0,7	0,5

3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis

3.1 Durchbiegungsnachweis

3.1.1 Vorhandene Durchbiegung

Durchbiegungsformeln siehe z.B. Schneider 4.25 ff.

Bei ≥ 2 Veränderlichen → Durchbiegung einzeln ausrechnen → Kombinationen bilden
→ $1{,}0 \cdot f_{g,k} + 1{,}0 \cdot f_{q,1k} + 1{,}0 \cdot \Psi_{0,i} \cdot f_{q,ik}$

3.1.2 Zulässige Durchbiegung

Deckenträger und Unterzüge mit l > 5,0m: zul f ≤ l/300
Deckenträger und Unterzüge mit l < 5,0m: kein Nachweis erforderlich.
Kragträger zul f ≤ l_k/200
Pfetten, Wandriegel und Giebelwandstützen: zul f = l/200 – l250

4 Ermittlung der Querschnittsklasse

4.1 Hinweise:

- Die Querschnitte von Stahlprofilen werden in 4 Querschnittsklassen eingeteilt.
- Rein auf Zug beanspruchte Querschnitte oder Querschnittsteile, werden zu keiner Querschnittsklasse zugeordnet.
- Mit der Querschnittsklasse für reine Druckbeanspruchung liegt man auf der sicheren Seite.
- Querschnittsklassen, die die Anforderungen der Klasse 3 nicht erfüllen, sollen in die Querschnittsklasse 4 eingestuft werden.
- Ein Querschnitt wird durch die höchste Klasse seiner druckbeanspruchten Querschnittsteile klassifiziert.

4.2 Walzprofile

Walzprofile, reine Biegung oder reiner Druck → siehe Kap. 8.161 ff. (Schneider Bautabellen)

4.3 Allgemein

Vorgehen:

1. Materialparameter: $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

2. Einstufung der Querschnittsteile (Z.B. Steg, Flansch) → siehe Anhang

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)

5 Zugkraftbeanspruchung

5.1 allgemeine Querschnitte s. DIN EN 1993-1-1; 6.2.3(2)

$$N_{t,Rd} = \min \begin{cases} N_{pl,Rd} = \dfrac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KN]} \\ N_{u,Rd} = \dfrac{0{,}9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \text{ [KN]} \end{cases}$$

A: [cm²] Bruttoquerschnittsfläche
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0
γ_{M2}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,25
A_{net}: [cm²] Nettoquerschnittsfläche

5.2 Winkel mit einschenkligem Anschluss:

1 Schraube:

$$N_{u,Rd} = \frac{2{,}0 \cdot (e_2 - 0{,}5 \cdot d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \text{ [KN]}$$

2 Schrauben:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \text{ [KN]}$$

≥ 3 Schrauben:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \text{ [KN]}$$

e_2: [cm] Randabstand = $a - w_1$
d_0: [cm] Lochdurchmesser = $d + \Delta d$
Δd: [cm] Nennlochspiel, siehe 0
t: [cm] Blechdicke
f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit
S235: f_u = 36 S355: f_u = 49 S460: f_u = 54
S275: f_u = 43 S420: f_u = 52 (Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M2}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,25
A_{net}: [cm²] Nettoquerschnittsfläche des Winkelprofils
$= A - d_0 \cdot t$
Bei ungleichschenkligem Winkel mit Anschluss des kleineren Schenkels, ist A_{net} die Nettofläche eines entsprechenden gleichschenkligen Winkelprofils mit einer Schenkellänge gleich der kleineren Schenkellänge.
β_2: [ ] $p_1 \le 2{,}5 \cdot d_0$: $\beta_2 = 0{,}4$
$2{,}5 \cdot d_0 < p_1 < 5{,}0 \cdot d_0$: $\beta_2 = 0{,}4 + \frac{0{,}3}{2{,}5 \cdot d_0} \cdot (p_1 - 2{,}5 \cdot d_0)$
$p_1 \ge 5{,}0 \cdot d_0$: $\beta_2 = 0{,}7$
β_3: [ ] $p_1 \le 2{,}5 \cdot d_0$: $\beta_3 = 0{,}5$
$2{,}5 \cdot d_0 < p_1 < 5{,}0 \cdot d_0$: $\beta_3 = 0{,}5 + \frac{0{,}2}{2{,}5 \cdot d_0} \cdot (p_1 - 2{,}5 \cdot d_0)$
$p_1 \ge 5{,}0 \cdot d_0$: $\beta_3 = 0{,}7$
p_1: [cm] Lochabstand in Kraftrichtung

6 Druck-, Querkraft- und Biegebeanspruchung (ohne Knickgefahr) – nach DIN EN 1993-1-1

6.1 Elastische Bemessung – (für Querschnitte der Klasse 3 bzw. 1 und 2)

6.1.1 Querschnittsnachweis mit Spannungen:

6.1.1.1 Grenzspannungen

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

6.1.1.2 Normalspannung:

$$\sigma_{x,Ed} = \left|\frac{N}{A}\right| + \left|\frac{M_{y,Ed} \cdot 100}{W_{el,y}}\right| \quad [KN/cm^2]$$

$W_{el,y}$ [cm³] elastisches Widerstandsmoment

6.1.1.3 Schubspannung:

allgemein:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} \quad [KN/cm^2]$$

S_y: [cm³] maximales statisches Flächenmoment
$= \sum A_i \cdot z_i$
z_i:[cm] Abstand zwischen S_{ges} und S_i
I_y: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des Gesamtquerschnitts
t: [cm] Blechdicke am Nachweispunkt

Vereinfachung für I-förmige Träger:

$$\tau_{m,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{A_w}$$

A_w: [cm²] Fläche des Stegbleches, siehe Anhang

Hinweis: nur falls $A_f/A_w \geq 0,6$

6.1.1.4 Vergleichsspannung:

Wenn $\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{R,d}} \leq 0,5$ oder

$\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{R,d}} \leq 0,5 \rightarrow$ keine Vergleichsspannung ($\sigma_{v,Ed}$)

$\sigma_{x,Ed}$: [KN/cm²] vorh. Normalspannung
$\sigma_{R,d}$: [KN/cm²] Grenznormalspannung, siehe oben
τ_{Ed}: [KN/cm²] vorh. Schubspannung
$\tau_{R,d}$: [KN/cm²] Grenzschubspannung, siehe oben
σ_v: [KN/cm²] Vergleichsspannung

sonst für einfache Biegung:

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \quad [KN/cm^2]$$

Hinweis: Normalerweise wird der Vergleichsspannungsnachweis an der Stelle 1 (Ende des Steges, Beginn der Ausrundung) geführt, da dort gleichzeitig große Normal- und Schubspannungen auftreten. Auf der sicheren Seite kann aber auch mit den maximalen Spannungen ($\sigma_{x,Ed}$, τ_{Ed}) gerechnet werden.

$S_{y1} = S_y - t_w \cdot d^2/8$
$\sigma_1 = (M_{y,Ed} / I_y) \cdot (d/2)$
$\tau_1 = V_{z,Ed} \cdot S_1 / (I_y \cdot t_w)$

6.1.1.5 Nachweise:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{R,d}} \leq 1$$

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_{R,d}} \leq 1$$

σ_d: vorh. Normalspannung
$\sigma_{R,d}$: siehe oben
τ_d: vorh. Schubspannung
$\tau_{R,d}$: siehe oben
σ_v: Vergleichsspannung

6.2 Plastische Bemessung - QK 1 oder 2 (EC3)

Hinweis: Querschnitte der Klasse 3 und 4 dürfen nicht nach der Plastizitätstheorie bemessen werden

6.2.1 Grenzschnittgrößen:

doppeltsymmetrische I-Profile:
→ plastische Schnittgrößen siehe Schneider 8.22 ff.

geschweißte Profile:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KN]}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \text{ [KN]}$$

Streckgrenze in allen Querschnittsteilen identisch:
→ Spannungsnulllinie läuft durch Flächenhalbierende (siehe Beispiel im Anhang)

$$M_{pl,y,Rd} = (S_{y,o} + S_{y,u}) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \cdot 0{,}01 \text{ [KNm]}$$

unterschiedliche Streckgrenze in den Querschnittsteilen:
→ Spannungsnulllinie läuft nicht durch Flächenhalbierende. (siehe Beispiel im Anhang)

$M_{pl,y,Rd}$ = siehe Beispiel im Anhang

Hinweise:
- Bei reiner Momentenbeanspruchung eines Querschnitts aus einem Material, läuft die Spannungsnulllinie nicht durch den Schwerpunkt, sondern durch die Flächenhalbierende.
- Generell gilt, dass das plastische Grenzmoment durch die Summenbildung aller Momente um die Spannungsnulllinie ermittelt werden kann. Mit der Bedingung, dass die Druckkräfte gleich den Zugkräften sein müssen kann die genaue Lage der Spannungsnulllinie ermittelt werden. (siehe Beispiel)

A: [cm²] Querschnittsfläche
A_{vz}: [cm²] wirksame Schubfläche, siehe Anhang
gewalzte I-Profile: siehe Anhang
geschweißte I-Profile: $A_{vz} = \eta \cdot h_w \cdot t_w$ ($\eta = 1{,}0$)
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: [ ] 1,0

$S_{y,0}$: [cm³] statisches Moment = $\Sigma (A_i \cdot z_i)$

6.2.2 Überprüfen ob Interaktion zwischen M und Q erfordelich

$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \leq 0{,}5$ → keine Interaktion zwischen Moment und Querkraft erforderlich. Weiter mit 6.2.4

$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} > 0{,}5$ → Interaktion zwischen Moment und Querkraft erforderlich. Weiter mit 6.2.3

6.2.3 Interaktion zwischen M und Q

Hinweis: gilt für I-Profile, Hohl- und Kastenquerschnitte und rechteckige Vollquerschnitte

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} - 1\right)^2 \qquad 0 \leq \rho \leq 1{,}0$$

$$N_{V,Rd} = N_{pl,Rd} \cdot (1 - \alpha_{V,z} \cdot \rho) \text{ [KN]}$$

Walzprofile:
$$M_{V,y,Rd} = (1 - \rho \cdot k_{My}) \cdot M_{pl,y,Rd} \text{ [KNm]}$$

Doppeltsymmetrische I-Profile:
$$M_{V,y,Rd} = \left(W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_{V,z}^2}{4 \cdot t_w}\right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KNm]}$$

ρ: Beiwert
k_{My}: siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
$\alpha_{V,z}$: = $A_{V,z}/A$
$A_{V,z}$: [cm²] wirksame Schubfläche in z-Richtung
gewalzte Profile: siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
geschweißte Profile: $A_{V,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f$, bzw. $A_{V,z} = \sum d \cdot t_w$
A: [cm²] gesamte Querschnittsfläche
t_w:[cm] Stegbreite
$W_{Pl,y}$: [cm³] plastisches Widerstandsmoment, = $S_{y,o} + S_{y,u}$
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: [ ] 1,0

6.2.4 Überprüfen ob Interaktion zwischen M und N erforderlich

6.2.4.1 Doppeltsymmetrische I-Profile:

$$N_{Ed} \le \min \begin{cases} 0{,}25 \bullet N_{pl,Rd} \; *^1 \; [KN] \\ \dfrac{h_w \bullet t_w \bullet f_y \bullet (1-\rho)}{2 \bullet \gamma_{M0}} \; *^2 \; [KN] \end{cases},$$

→ keine Interaktion erf.: $M_{N\,y,Rd} \; *^3 = M_{pl,y,Rd}$ [KNm]

$$N_{Ed} > \min \begin{cases} 0{,}25 \bullet N_{pl,Rd} \; *^1 \; [KN] \\ \dfrac{h_w \bullet t_w \bullet f_y \bullet (1-\rho)}{2 \bullet \gamma_{M0}} \; *^2 \; [KN] \end{cases}$$

→ Interaktion erforderlich, weiter mit 6.2.5

*1 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen Biegung und Querkraft ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $N_{pl,Rd} = N_{V,Rd}$
*2 wenn die Interaktion zwischen Biegung und Querkraft nicht berücksichtigt werden muss ($V_{z,Ed} \le 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $\rho = 0$
*3 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $M_{N,y,Rd} = M_{VN,y,Rd}$
*5 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $M_{pl,y,Rd} = M_{N,y,Rd}$

N_{Ed}: [KN] einwirkende Normalkraft
$N_{pl,Rd}$: [KN] Normalkraft im vollplastischen Zustand, siehe oben
$N_{V,Rd}$: [KN] abgeminderte Normalkraft im vollplastischen Zustand, siehe oben
$M_{pl,y,Rd}$ [KNm] Moment im vollplastischen Zustand, siehe oben
A: [cm²] gesamte Querschnittsfläche
A_{red}: [cm²] $A - A_{V,z} \bullet \rho$
$A_{V,z}$: [cm²] wirksame Schubfläche in z-Richtung
Walzprofile: siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
t_w:[cm] Stegbreite
h_w: [cm] Höhe des Stegblechs = d
b: [cm] Breite des Querschnitts
t_f: [cm] Flanschdicke
ρ: [ ] siehe oben
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: [ ] 1,0

6.2.4.2 Hohl- und Kastenquerschnitte:

→ Interaktion erforderlich, weiter mit 6.2.5

6.2.4.3 Rechteckige Vollquerschnitte:

→ Interaktion erforderlich

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \bullet \left[1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}\right)^2\right] \; [KNm]$$

6.2.5 Interaktion zwischen M und N

$$M_{N,y,Rd} \; *^1 = M_{pl,y,Rd} \; *^2 \bullet \frac{1-n}{1-0{,}5 \bullet a} \; [KNm]$$

$$\text{mit: } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd} \; *^3} \; [\,] \qquad a = \min \begin{cases} \dfrac{A \; *^4 - 2 \bullet b \bullet t_f}{A \; *^4} \; [\,] \\ 0{,}5 \; [\,] \end{cases}$$

*1 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $M_{N,y,Rd} = M_{VN,y,Rd}$
*2 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $M_{pl,y,Rd} = M_{N,y,Rd}$
*3 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen Biegung und Querkraft ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $N_{pl,Rd} = N_{V,Rd}$
*4 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V ($V_{z,Ed} > 0{,}5 \bullet V_{pl,z,Rd}$) gilt: $A = A_{red}$

a: [ ] bei Hohl- und Kastenquerschnitten ist $a = a_w$
$M_{pl,y,Rd}$ [KNm] Moment im vollplastischen Zustand
A: [cm²] gesamte Querschnittsfläche
t_f: [cm] Flanschdicke

6.2.6 Nachweise:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} \le 1{,}0 \qquad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \le 1{,}0 \qquad \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \le 1{,}0 \; *^4 \; *^5 \; *^6$$

*4 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und V gilt: $M_{y,Rd} = M_{V,y,Rd}$
*5 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M und N gilt: $M_{y,Rd} = M_{N,y,Rd}$
*6 bei Berücksichtigung der Interaktion zwischen M, V und N gilt: $M_{y,Rd} = M_{VN,y,Rd}$

7 Druckkraftbeanspruchung - Knicken:

7.1 Hinweise

- Wenn ein Moment rechtwinklig zu dem untersuchten Knickstab wirkt, ist das Biegedrillknicken i.d.R maßgebend!
- Der Nachweis erfolgt nach dem Ersatzstabverfahren.

7.2 Knicklängen:

Knicken in z-Richtung: $L_{cr,y} = \beta \cdot l_1$
Knicken in y-Richtung: $L_{cr,z} = \beta \cdot l_2$

β: [ ] Knicklängenbeiwert, siehe Anhang

7.3 Trägheitsradius:

gewalzte Stahlprofile:
siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

allgemein:

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ [cm] und $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ [cm]

7.4 bezogener Schlankheitsgrad:

QK1, QK2 und QK3: $\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1}$ [ ]

QK4: $\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}$ [ ]

QK1, QK2 und QK3: $\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y \cdot \lambda_1}$ [ ]

QK4: $\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y \cdot \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}$ [ ]

$L_{cr,y}$: [cm] siehe oben
$L_{cr,z}$: [cm] siehe oben
i_y: [cm] siehe oben
i_z: [cm] siehe oben
λ_1: Materialbeiwert
S235: $\lambda_1 = 93,9$ S275: $\lambda_1 = 86,8$ S355: $\lambda_1 = 76,4$
S420: $\lambda_1 = 70,2$ S460: $\lambda_1 = 67,1$

7.5 Abminderungsfaktor χ:

$\bar{\lambda} \le 0,2$: $\chi = 1,0$

$\bar{\lambda} > 0,2$: $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1,0$

Φ: [ ] Faktor
$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2\right]$

α: [ ] Beiwert
Knicklinie a_0: $\alpha = 0,13$ Knicklinie a: $\alpha = 0,21$
Knicklinie b: $\alpha = 0,34$ Knicklinie c: $\alpha = 0,49$
Knicklinie d: $\alpha = 0,76$
Hinweis: Zuordnung zur Knickspannungslinie siehe Tabelle 6.2 im Anhang

7.6 Nachweis:

$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \le 1,0$

Hinweis:
- für die Profile in den Schneider Bautabellen ist der Faktor γ_{M1} in $N_{pl,Rd}$ nicht berücksichtigt!

N_{Ed}: einwirkende Normalkraft
$N_{pl,Rd}$: [KN] plastische Grenznormalkraft
QK1 – QK3: $N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$
QK4: $N_{pl,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$
γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,10

8 Druckkraftbeanspruchung - Drillknicken

8.1 Hinweise:

- Nachweis muss nur für Querschnitte mit geringer Steifigkeit gegen verdrehen geführt werden. (z.B. Winkel- Kreuz- und T-Profil)
- Die Steifigkeit gegen verdrehen ist von der Torsionssteifigkeit GI_T und der Wölbsteifigkeit EI_ω abhängig.
- Bei der Auswahl der Knicklinie ist das Ausweichen senkrecht zur Achse z-z zu wählen

8.2 Drehradius des Querschnitts:

$$c = \sqrt{\frac{I_\omega + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot I_T}{I_Z}} \text{ [cm]}$$

I_ω: [cm^6] Wölbflächenmoment 2. Grades
→ Schneider Bautabelle 8.32
l: [cm] Abstand der Gabellager
I_T: [cm^4]Torsionsflächenmoment 2. Grades
→ Schneider Bautabelle 8.32
I_Z: [cm^4] Flächenträgheitsmoment 2. Grades
→ Schneider Bautabelle
!! Bei Winkelprofil durch I_η ersetzen!!

8.3 polarer Trägheitsradius, bezogen auf den Schwerpunkt:

$$i_p = \sqrt{i_y^2 + i_z^2} \text{ [cm]}$$

i_y : [cm^2] Trägheitsradius bezogen auf Hauptachse Y
!! bei Winkelprofil durch i_η zu ersetzen!!
i_z : [cm^2] Trägheitsradius bezogen auf Hauptachse Z
!! bei Winkelprofil durch i_ζ zu ersetzen!!

8.4 polarer Trägheitsradius, bezogen auf den Schubmittelpunkt:

$$i_M = \sqrt{i_p^2 + z_M^2} \text{ [cm]}$$

i_p : [cm^2] polarer Trägheitsradius (siehe oben)
z_M: [cm] Abstand zwischen Schwerpunkt und Schubmittelpunkt

8.5 Schlankheitsgrad:

QK1, QK2, QK3:

$$\bar{\lambda}_T = \frac{\beta \cdot l}{i_z} \cdot \sqrt{\frac{c^2 + i_M^2}{2 \cdot c^2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot c^2 \cdot i_p^2}{\left(c^2 + i_M^2\right)^2}}\right]} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$$

QK4:

$$\bar{\lambda}_T = \frac{\beta \cdot l}{i_z} \cdot \sqrt{\frac{c^2 + i_M^2}{2 \cdot c^2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot c^2 \cdot i_p^2}{\left(c^2 + i_M^2\right)^2}}\right]} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}$$

β: Knicklängenbeiwert (siehe Eulerfälle)
l: [cm] Knicklänge
i_z : [cm^2] Trägheitsradius bezogen auf Hauptachse Z
!! bei Winkelprofil durch i_ζ zu ersetzen!!
c: [cm] Drehradius des Querschnitts (siehe oben)
i_M : [cm] polarer Trägheitsradius (siehe oben)
i_p: [cm] polarer Trägheitsradius, siehe oben
λ_1: Materialbeiwert
S235: λ_1 = 93,9 S275: λ_1 = 86,8 S355: λ_1 = 76,4
S420: λ_1 = 70,2 S460: λ_1 = 67,1

8.6 Abminderungsfaktor χ:

$\bar{\lambda} \le 0{,}2$: $\chi = 1{,}0$

$\bar{\lambda} > 0{,}2$: $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1{,}0$

Φ: [ ] Faktor
$\Phi = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right]$
α: [ ] Beiwert
Knicklinie a_0: α = 0,13 Knicklinie a: α = 0,21
Knicklinie b: α = 0,34 Knicklinie c: α = 0,49
Knicklinie d: α = 0,76
Hinweis: Zuordnung zur Knickspannungslinie siehe Tabelle 6.2 im Anhang

8.7 Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \le 1{,}0$$

Hinweis:
- für die Profile in den Schneider Bautabellen ist der Faktor γ_{M1} in $N_{pl,Rd}$ nicht berücksichtigt!

N_{Ed}: einwirkende Normalkraft
$N_{pl,Rd}$: [KN] plastische Grenznormalkraft
QK1 – QK3: $N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$
QK4: $N_{pl,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$
γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,10

9 Biegedrillknicken (nur Biegemoment)

9.1 Hinweise:

- Eine gute Herleitung der Formeln ist in dem Buch „Stahlbau-Praxis“ nach EC3, Wagenknecht gegeben.
- Das folgende Verfahren gilt nur für I-Profile.

9.2 ideale Vezweigungslast:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2} \quad [KN]$$

E: [KN/cm²] Elastizitätsmodul = 21.000
l: [cm] Abstand der Gabellager
I_Z: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades
→ Schneider Bautabelle 8.161 ff.

9.3 Torsionsflächenmoment 2. Grades:

$$I_{T,ges} = I_T + c_{\vartheta,k} \cdot \frac{l^2}{\pi^2 \cdot G} \quad [cm^4]$$

Hinweis: I_T kann durch die Berücksichtigung einer elastischen Drehfeder (z.B. durch Anschluss eines Trapezprofilbleches) erhöht werden.

I_T: [cm⁴]Torsionsflächenmoment 2. Grades des Trägerprofils
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
$c_{\vartheta,k}$: [cm⁶] vorhandene Drehfeder
→ siehe NW ausreichender Drehbettung
l: [cm] Abstand der Gabellager
G: [KN/cm²] Schubmodul = 8100

9.4 Drehradius des Querschnitts:

$$c = \sqrt{\frac{I_\omega + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot I_{T,ges}}{I_Z}} \quad [cm]$$

I_ω: [cm⁶] Wölbflächenmoment 2. Grades
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
l: [cm] Abstand der Gabellager
$I_{T,ges}$: [cm⁴] Torsionsflächenmoment 2. Grades → siehe oben
I_Z: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.

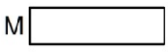
9.5 Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr}:

Hinweise:
- Die Berechnung von M_{cr} ist im EC3 nicht geregelt. (vgl. DIN EN 1993-1-1 6.3.2.2)
- M_{cr} kann der Literatur entnommen werden, oder mit Hilfe von Programmen ermittelt werden.
- Für doppeltsymmetrische I-Profile können die folgenden Formeln verwendet werden.
- Schneller und exakter rechnet in der Regel die EDV!

9.5.1 Einfeldträger (nur für doppeltsymmetrische I-Querschnitte)

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2} + 0{,}5 \cdot z_p \right) \cdot 0{,}01 \quad [KNm]$$

ζ: [ ] Momentenbeiwert, → siehe oben
$N_{cr,z}$: [KN] ideale Verzweigungslast, → siehe oben
c: [cm] Drehradius des Querschnitts, → siehe oben
z_p: [cm] Abstand vom Kraftangriffspunkt zum Schwerpunkt
$z_p < 0$ wenn Kraft oberhalb des Schwerpunkts angreift
$z_p = 0$ wenn Einfluss direkter Belastung vernachlässigbar
$z_p > 0$ wenn Kraft unterhalb des Schwerpunkts angreift

Momentenverlauf	Beiwert ζ
	1,0
	1,12
	1,35
	1,77 – 0,77 • Ψ
	1,35

9.5.2 Allgemeiner Fall (nur für doppeltsymmetrische I-Querschnitte)

$$M_{cr} = M_{cr,y0} \cdot \frac{|\max M_y|}{M_{y0}} \quad [KNm]$$

mit:

$$M_{cr,y0} = \zeta_0 \cdot N_{cr,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + (\zeta_0 \cdot 0{,}4 \cdot z_p)} + \zeta_0 \cdot 0{,}4 \cdot z_p \right) \cdot 0{,}01 \; [KNm]$$

Hinweise:

- Das gesamte Vorgehen für Träger mit Randmomenten wurde aus dem Buch „Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie 2.Ordnung“ von Rolf Kindmann übernommen.
- Es wird wie folgt vorgegangen:
  - Aufteilung des Durchlaufträgers in Einfeldträger mit Randmomenten. Vgl. Bild 6.10
  - Bei mehreren Feldern muss für jedes Feld ein eigener Momentenbeiwert ermittelt werden. Der kleinste Wert ist maßgebend, da dieser das kleinste Biegedrillknickmoment liefert.
- Für einen Einfeldträger gilt: $M_{yB} = M_{yA} = 1{,}12$
  Dieser Momentenbeiwert entspricht dem ζ-Wert von oben.

M_{y0}: [KNm] $= \frac{q_z \cdot l^2}{8}$
max M_y: [KNm] maximales Feld- bzw. Stützmoment
ζ_0: [ ] Momentenbeiwert, → siehe Tabelle 6.2
$N_{cr,z}$: [KN] ideale Verzweigungslast, → siehe oben
c: [cm] Drehradius des Querschnitts, → siehe oben
z_p: [cm] Abstand vom Kraftangriffspunkt zum Schwerpunkt
$z_p < 0$ wenn Kraft oberhalb des Schwerpunkts angreift
$z_p = 0$ wenn Einfluss direkter Belastung vernachlässigbar
$z_p > 0$ wenn Kraft unterhalb des Schwerpunkts angreift

ψ bzw. 1/ψ		$M_{yA} = 0$	$M_{yA} = M_{yB}/2$	$M_{yA} = M_{yB}$	Eigenformen
$\psi = \frac{M_{yB}}{M_{y0}}$	0	1,12	1,12	1,12	BDK durch **positive** Biegemomente: v(x) und ϑ(x) sind **einwellige** Funktionen und haben **gleiche** Vorzeichen.
	-0,1	1,19	1,22	1,26	
	-0,2	1,26	1,34	1,44	
	-0,3	1,34	1,49	1,67	
	-0,4	1,43	1,67	2,00	
	-0,5	1,53	1,90	2,46	
	-0,6	1,64	2,19	3,17	
	-0,7	1,76	2,57	4,30	
	-0,8	1,91	3,09	**5,61**	**Übergangsbereich:** Im Bereich von max ζ_0 wechselt v(x) oder ϑ(x) das Vorzeichen. Der Verlauf von v(x) ist teilweise mehrwellig
	-0,9	2,06	3,78	5,15	
	-1,0	2,24	**4,43**	4,10	
$\frac{1}{\psi} = \frac{M_{y0}}{M_{yB}}$	-0,9	2,42	4,19	3,12	
	-0,8	2,66	3,42	2,31	
	-0,7	**2,78**	2,63	1,68	
	-0,6	2,38	1,93	1,21	BDK durch **negative** Biegemomente: v(x) und ϑ(x) sind **einwellige** Funktionen und haben **ungleiche** Vorzeichen
	-0,5	1,80	1,35	0,87	
	-0,4	1,26	0,91	0,60	
	-0,3	0,82	0,58	0,40	
	-0,2	0,47	0,33	0,24	
	-0,1	0,20	0,14	0,11	
$M_{y0} \to 0$: ζ gemäß Tabelle 6.1, System 4					

Abbildung 1: Momentenbeiwerte ζ_0 [1]

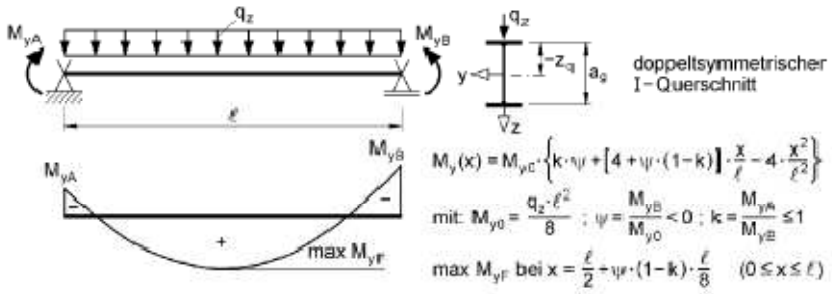


Abbildung 2: Beidseitig gabelgelagerter Träger mit Randmomenten und Gleichstreckenlast [1]

9.6 BDK-Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

W_y: [cm³] QK1 und QK2: $W_y = W_{pl,y}$
QK3: $W_y = W_{el,y}$
QK4: $W_y = W_{eff,y}$
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)

9.7 Abminderungsfaktor:

9.7.1 I-Querschnitte, gewalzt & gleichartig geschweißt:

$$\chi_{LT} = \min \begin{cases} \dfrac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - 0{,}75 \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \\ 1{,}0 \end{cases}$$

mit: $\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$

Hinweis: Nach DIN EN 1993-1-1/6.3.2.3 (2) kann χ_{LT} weiter abgemindert werden.

λ_{LT}: siehe oben
Φ_{LT}: siehe unten

α_{LT}: [ ] Beiwert
Knicklinie a_0: $\alpha = 0{,}13$ Knicklinie a: $\alpha = 0{,}21$
Knicklinie b: $\alpha = 0{,}34$ Knicklinie c: $\alpha = 0{,}49$
Knicklinie d: $\alpha = 0{,}76$
Zuordnung der Knicklinie:
gewalztes I-Profil: $h/b \le 2{,}0$ → KL b
$h/b > 2{,}0$ → KL c
geschweißtes I-Profil: $h/b \le 2{,}0$ → KL c
$h/b > 2{,}0$ → KL d

9.7.2 allgemein:

$\bar{\lambda}_{LT} \le 0{,}4$ → $\chi_{LT} = 1{,}0$ (Stab ist gedrungen und eine Biegedrillknickuntersuchung ist nicht erf.)

$\bar{\lambda}_{LT} > 0{,}4$ → $\chi_{LT} = \dfrac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$ $\chi_{LT} \le 1{,}0$

$\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$

9.8 Bemessungswert der Beansprucharkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot \frac{1}{100} \text{ [KNm]}$$

W_y: [cm³] QK1 und QK2: $W_y = W_{pl,y}$
QK3: $W_y = W_{el,y}$
QK4: $W_y = W_{eff,y}$
$W_{pl,y}$: [cm³] plastisches Widerstandsmoment
→ $W_{pl,y} = S_{y,o} + S_{y,u}$
(bestimmen der NL → siehe Beispiele)
$W_{el,y}$: [cm³] elastisches Widerstandsmoment
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,1

9.9 Nachweis:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \le 1{,}0$$

$M_{y,Ed}$: [KNm] Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
$M_{b,Rd}$: [KNm] Bemessungswert der Beanspruchbarkeit
→ siehe oben

10 Biegedrillknicken (einachsige Biegung + Normalkraft)

10.1 Knicklängen:

Knicken in y-Richtung: $L_{cr,z} = \beta \cdot l_1$
Knicken in z-Richtung: $L_{cr,y} = \beta \cdot l_2$

β: [ ] Knickbeiwert → siehe Schneider Bautabellen

10.2 Trägheitsradius:

gewalzte Stahlprofile:
siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

allgemein:

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ [cm] und $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ [cm]

10.3 bezogener Schlankheitsgrad:

10.3.1 Knicken in y-Richtung:

QK1, QK2 und QK3: $\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1}$ [ ]

QK4: $\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}$ [ ]

$L_{cr,z}$: [m] siehe oben
i_z: [cm] siehe oben
λ_1: Materialbeiwert
S235: $\lambda_1 = 93,9$ S275: $\lambda_1 = 86,8$ S355: $\lambda_1 = 76,4$
S420: $\lambda_1 = 70,2$ S460: $\lambda_1 = 67,1$

10.3.2 Knicken in z-Richtung:

QK1, QK2 und QK3: $\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y \cdot \lambda_1}$ [ ]

QK4: $\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y \cdot \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}$ [ ]

$L_{cr,y}$: [m] siehe oben
i_y: [cm] siehe oben
λ_1: Materialbeiwert
S235: $\lambda_1 = 93,9$ S275: $\lambda_1 = 86,8$ S355: $\lambda_1 = 76,4$
S420: $\lambda_1 = 70,2$ S460: $\lambda_1 = 67,1$

10.4 Abminderungsfaktor χ:

10.4.1 Knicken in y-Richtung:

$\bar{\lambda} \le 0,2$: $\chi_z = 1,0$

$\bar{\lambda} > 0,2$: $\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \le 1,0$

Φ: [ ] Faktor
$\Phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2\right]$
α: [ ] Beiwert
Knicklinie a_0: α = 0,13 Knicklinie a: α = 0,21
Knicklinie b: α = 0,34 Knicklinie c: α = 0,49
Knicklinie d: α = 0,76
Hinweis: Zuordnung zur Knickspannungslinie siehe Tabelle 6.2 im Anhang

10.4.2 Knicken in z-Richtung:

$\bar{\lambda} \le 0,2$: $\chi_y = 1,0$

$\bar{\lambda} > 0,2$: $\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \le 1,0$

Φ: [ ] Faktor
$\Phi_y = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2\right]$
α: [ ] Beiwert
Knicklinie a_0: α = 0,13 Knicklinie a: α = 0,21
Knicklinie b: α = 0,34 Knicklinie c: α = 0,49
Knicklinie d: α = 0,76
Hinweis: Zuordnung zur Knickspannungslinie siehe Tabelle 6.2 im Anhang

10.5 ideale Vezweigungslast:

$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2}$ [KN]

E: [KN/cm²] Elastizitätsmodul = 21.000
l: [cm] Abstand der Gabellager
I_z: [cm^4] Flächenträgheitsmoment 2. Grades
→ Schneider Bautabelle 8.161 ff.

10.6 Torsionsflächenmoment 2. Grades:

$I_{T,ges} = I_T + c_{\vartheta,k} \cdot \frac{l^2}{\pi^2 \cdot G}$ [cm^4]

Hinweis: I_T kann durch die Berücksichtigung einer elastischen Drehfeder
(z.B. durch Anschluss eines Trapezprofilbleches) erhöht werden.

I_T: [cm^4]Torsionsflächenmoment 2. Grades des Trägerprofils
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
$c_{\vartheta,k}$: [cm^6] vorhandene Drehfeder
→ siehe NW ausreichender Drehbettung
l: [cm] Abstand der Gabellager
G: [KN/cm^2] Schubmodul = 8100

10.7 Drehradius des Querschnitts:

$$c = \sqrt{\frac{I_\omega + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot I_{T,ges}}{I_Z}} \text{ [cm]}$$

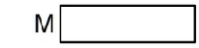
I_ω: [cm^6] Wölbflächenmoment 2. Grades
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
l: [cm] Abstand der Gabellager
$I_{T,ges}$: [cm^4] Torsionsflächenmoment 2. Grades → siehe oben
I_Z: [cm^4] Flächenträgheitsmoment 2. Grades
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.

10.8 Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr}:

Hinweise:
- Die Berechnung von M_{cr} ist im EC3 nicht geregelt. (vgl. DIN EN 1993-1-1 6.3.2.2)
- M_{cr} kann der Literatur entnommen werden, oder mit Hilfe von Programmen ermittelt werden.
- Für doppeltsymmetrische I-Profile kann die folgende Formel verwendet werden. Bei Träger unter Gleichstreckenlast und Randmomenten → EDV

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2} + 0{,}5 \cdot z_p\right) \cdot 0{,}01 \text{ [KNm]}$$

ζ: [ ] Momentenbeiwert, → siehe oben
$N_{cr,z}$: [KN] ideale Verzweigungslast, → siehe oben
c: [cm] Drehradius des Querschnitts, → siehe oben
z_p: [cm] Abstand vom Kraftangriffspunkt zum Schwerpunkt
$z_p < 0$ wenn Kraft oberhalb des Schwerpunkts angreift
$z_p = 0$ wenn Einfluss direkter Belastung vernachlässigbar
$z_p > 0$ wenn Kraft unterhalb des Schwerpunkts angreift

Momentenverlauf	Beiwert ζ
	1,0
	1,12
	1,35
	1,77 – 0,77 • Ψ
	1,35

10.9 BDK-Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr} \cdot 100}}$$

W_y: [cm^3] QK1 und QK2: $W_y = W_{pl,y}$
QK3: $W_y = W_{el,y}$
QK4: $W_y = W_{eff,y}$
f_y: [KN/cm^2] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
M_{cr}: [KNm] siehe oben

10.10 Abminderungsfaktor:

10.10.1 I-Querschnitte, gewalzt & gleichartig geschweißt:

$$\chi_{LT} = \min \begin{cases} \dfrac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - 0{,}75 \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \\ 1{,}0 \end{cases}$$

mit: $\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$

Hinweis: Nach DIN EN 1993-1-1/6.3.2.3 (2) kann χ_{LT} weiter abgemindert werden.

λ_{LT}: siehe oben
Φ_{LT}: siehe unten

α_{LT}: [ ] Beiwert
Knicklinie a: α = 0,21 Knicklinie b: α = 0,34
Knicklinie c: α = 0,49 Knicklinie d: α = 0,76

Zuordnung der Knicklinie:
gewalztes I-Profil: h/b ≤ 2,0 → KL b
h/b > 2,0 → KL c
geschweißtes I-Profil: h/b ≤ 2,0 → KL c
h/b > 2,0 → KL d

10.10.2 allgemein:

$\bar{\lambda}_{LT} \le 0{,}4$ → $\chi_{LT} = 1{,}0$ (Stab ist gedrungen und eine Biegedrillknickuntersuchung ist nicht erf.)

$\bar{\lambda}_{LT} > 0{,}4$ → $\chi_{LT} = \dfrac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$ $\chi_{LT} \le 1{,}0$

$\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right]$

10.11 Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit:

QK1 und QK2:

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \bullet A \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KN]$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \bullet A \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KN]$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \bullet W_{pl,y} \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KNm]$$

QK3:

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \bullet A \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KN]$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \bullet A \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KN]$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \bullet W_{el,y} \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [KNm]$$

$W_{pl,y}$: [cm³] plastisches Widerstandsmoment
→ $W_{pl,y} = S_{y,o} + S_{y,u}$
(bestimmen der NL → siehe Beispiele)
$W_{el,y}$: [cm³] elastisches Widerstandsmoment
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,1

10.12 Interaktionsbeiwerte:

10.12.1 Interaktionsbeiwert k_{yy}:

QK 1 und 2

$$k_{yy} = \min \begin{cases} C_{my} \bullet \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0{,}2) \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}}\right] & [\,] \\ C_{my} \bullet \left[1 + 0{,}8 \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}}\right] & [\,] \end{cases}$$

QK3:

$$k_{yy} = \min \begin{cases} C_{my} \bullet \left[1 + 0{,}6 \bullet \bar{\lambda}_y \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}}\right] & [\,] \\ C_{my} \bullet \left[1 + 0{,}6 \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}}\right] & [\,] \end{cases}$$

C_{my}: [ ] äquivalenter Momentenbeiwert
→ siehe Anhang Tabelle B3
$\bar{\lambda}_y$: [ ] Schlankheit → siehe oben
N_{Ed}: [KN] einwirkende Normalkraft
$N_{b,y,Rd}$: [KN] Bemessungswert der Normalkraft → siehe oben

10.12.2 Interaktionsbeiwert k_{zy}:

QK 1 und 2

für $\bar{\lambda}_z \geq 0{,}4$ gilt:

$$k_{zy} = \max \begin{cases} \left[1 - \frac{0{,}1 \bullet \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0{,}25)} \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}}\right] \\ \left[1 - \frac{0{,}1}{(C_{mLT} - 0{,}25)} \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}}\right] \end{cases}$$

Für $\bar{\lambda}_z < 0{,}4$ gilt:

$$k_{zy} = \min \begin{cases} 0{,}6 + \bar{\lambda}_z \\ 1 - \frac{0{,}1 \bullet \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0{,}25)} \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \end{cases}$$

QK3:

$$k_{zy} = \max \begin{cases} \left[1 - \frac{0{,}05 \bullet \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0{,}25)} \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}}\right] \\ \left[1 - \frac{0{,}05}{(C_{mLT} - 0{,}25)} \bullet \frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}}\right] \end{cases}$$

10.13 Nachweise:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} + k_{yy} \bullet \frac{(M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})}{M_{b,Rd}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} + k_{zy} \bullet \frac{(M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})}{M_{b,Rd}} \leq 1{,}0$$

11 St. Venantsche Torsion

11.1 Einwirkung

11.2 Torsionsstreckenmoment

Vertikalkraft außerhalb des Schubmittelpunktes:

$m_T = q_T \bullet e_m$ [KNm/m]

Hinweise:

- Bei symmetrischen Profilen liegt der Schubmittelpunkt auf der Symmetrieachse.
- Bei Doppelsymmetrischen Profilen liegt der Schubmittelpunkt im Schwerpunkt.

q_{Ed}: [KN/m] Vertikalbelastung
e_m: [m] Abstand zwischen Schubmittelpunkt und Kraftangriffspunkt der Vertikalkraft.
→ siehe Formelsammlung „Schubmittelpunktberechnung“

11.3 Torsionsmoment

Einfeldträger:

$M_T = m_t \bullet \frac{L}{2}$ [KNm]

Hinweise:

- Die Querkraftanalogie kann bei der Ermittlung des Torsionsmomentenverlaufs helfen.

L: [m] Trägerlänge

11.4 Torsionsflächenmomente

11.4.1 Dünnwandige Rechteckquerschnitte (h/t ≥ 10):

$I_T = \alpha \bullet h \bullet t^3$ [cm^4]

h/t	1,0	2,0	3,0	6,0	10	∞
α	0,14	0,229	0,236	0,299	0,313	1/3

11.4.2 Kreisquerschnitte:

$I_T = \frac{\pi}{2} \bullet (R^4 - r^4)$ [cm^4]

R: [cm] Außenradius
r: [cm] Innenradius (= 0 bei Vollquerschnitt)

11.4.3 Dickwandige Rechteckquerschnitte (h/t < 10):

Schubspannung kann direkt berechnet werden

11.4.4 Dünnwandige, offene Profile (L,C,T,I-Profile)

$I_T = \frac{1}{3} \bullet \eta \bullet \sum_{i=1}^{n} t_i^3 \bullet h_i$ [cm^4]

t_i: [cm] Blechdicke eines einzelnen Blechstreifens
h_i: [cm] Länge eines einzelnen Blechstreifens
η: [cm] Korrekturfaktor bei Walzprofilen zur Berücksichtigung der Ausrundungsradien.
Kein Walzprofil: η = 1,0

11.4.5 Dünnwandige, geschlossene einzellige Querschnitte (Hohlprofil)

Blechdicke konstant:

$I_T = \frac{4 \bullet A_m^2}{\sum_i \frac{s_i}{t_i}}$ [cm^4]

A_m: [cm^2] Fläche, die von der Mittellinie der Wandung eingeschlossen ist
Kreis: $A_m = \pi \bullet r_m^2$
t_i: [cm] Dicke des Querschnitts an der betrachteten Stelle
s_i: [cm] Länge eines Umfangabschnittes
Kreis: $s = 2 \bullet \pi \bullet r_m$

11.4.6 Dünnwandige, geschlossenen mehrzellige Querschnitte

$$I_T = \frac{M_T}{G \cdot \vartheta'} \; [cm^4]$$

ϑ' durch lösen des folgenden LGS: (Beispielhaft für ein Kasten mit 3 Zellen)

$$\begin{pmatrix} \oint_{Zelle1} \frac{ds}{t(s)} & -\int_a^b \frac{ds}{t(s)} & 0 & -2 \cdot G \cdot A_{m,1} \\ -\int_a^b \frac{ds}{t(s)} & \oint_{Zelle2} \frac{ds}{t(s)} & -\int_c^d \frac{ds}{t(s)} & -2 \cdot G \cdot A_{m,2} \\ 0 & -\int_c^d \frac{ds}{t(s)} & \oint_{Zelle3} \frac{ds}{t(s)} & -2 \cdot G \cdot A_{m,3} \\ 2 \cdot A_{m,1} & 2 \cdot A_{m,2} & 2 \cdot A_{m,3} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vartheta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ M_T \cdot 100 \end{pmatrix}$$

Alternativ:

Für jede Zelle die folgende Gleichung aufstellen und nach ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 auflösen:
(Hinweis: k = 1,2,3 bzw. die Nummer der betrachteten Zelle)

$$-\phi_{k-1} \cdot \oint_A^B \frac{ds}{t(s)} + \phi_k \cdot \oint_k \frac{ds}{t(s)} - \phi_{k+1} \cdot \oint_C^D \frac{ds}{t(s)} = 2 \cdot A_{m,k}$$

$$I_T = 2 \cdot \sum A_{m,k} \cdot \phi_k \; [cm^4]$$

$$T_k = \frac{M_T}{I_T} \cdot \phi_k \; [KN/cm]$$

n: [ ] Anzahl der Zellen

$\oint_{Zelle1} \frac{ds}{t(s)}$: [ ] Ringintegral der Zelle 1 = Summe der einzelnen Blechlängen die an die Zelle 1 grenzen, geteilt durch deren Breite.

$\oint_{Zelle2} \frac{ds}{t(s)}$: [ ] Ringintegral der Zelle 2 = Summe der einzelnen Blechlängen die an die Zelle 2 grenzen, geteilt durch deren Breite.

$\oint_{Zelle3} \frac{ds}{t(s)}$: [ ] Ringintegral der Zelle 3 = Summe der einzelnen Blechlängen die an die Zelle 3 grenzen, geteilt durch deren Breite.

$-\int_a^b \frac{ds}{t(s)}$: [ ] Blechlänge der Wandung die an die Zelle 1 und 2 grenzt geteilt durch deren Breite. $-\int_a^b \frac{ds}{t(s)} = -\frac{s_{1-2}}{t_{1-2}}$

$-\int_c^d \frac{ds}{t(s)}$: [ ] Blechlänge der Wandung die an die Zelle 2 und 3 grenzt geteilt durch deren Breite. $-\int_c^d \frac{ds}{t(s)} = -\frac{s_{2-3}}{t_{2-3}}$

G: [KN/cm²] Schubmodul. G = 8100

$A_{m,1}$: [cm²] Fläche, die von der Mittellinie der Zellenwandung 1 eingeschlossen ist.

$A_{m,2}$: [cm²] Fläche, die von der Mittellinie der Zellenwandung 2 eingeschlossen ist.

$A_{m,3}$: [cm²] Fläche, die von der Mittellinie der Zellenwandung 3 eingeschlossen ist.

11.5 Maximale Schubspannung infolge Torsion

11.5.1 Dünnwandiger Rechteckquerschnitt (h/t ≥ 10):

$\tau^T_{max} = \frac{M_T \cdot 100}{I_T} \cdot t$ [KN/cm²]	M_T: [KNm] Bemessungswert des Torsionsmomentes

11.5.2 Kreisquerschnitte

$\tau^T_{max} = \frac{M_T \cdot 100}{I_T} \cdot t$ [KN/cm²]	t: [cm] bei Vollkreisquerschnitten: t = r

11.5.3 Dickwandiger Rechteckquerschnitt (h/t < 10):

$\tau^T_{max} = \frac{M_T \cdot 100}{\beta \cdot h \cdot t^2}$ [KN/cm²]	M_T: [KNm] Bemessungswert des Torsionsmomentes

11.5.4 Dünnwandige, offene Profile (L,C,T,I-Profile)

$\tau^T_{max} = \frac{M_T \cdot 100}{I_T} \cdot t$ [KN/cm²]	t: [cm] Blechdicke Hinweis: Wenn maximale Schubspannung infolge M_T und V berechnet werden soll: t = Blechdicke an der Stelle mit der maximalen Schubspannung infolge V

11.5.5 Dünnwandige, geschlossene Querschnitte (Hohlprofil)

$\tau^T_{max} = \frac{M_T \cdot 100}{2 \cdot A_m \cdot t_{min}}$ [KN/cm²]	M_T: [KNm] Bemessungswert des Torsionsmomentes

11.5.6 Mehrzelliger Hohlkasten

$\tau^T = \frac{T}{t_i}$ [KN/cm²]	T: [KN] Schubfluss → siehe oben t_i: [cm] Blechdicke an der betrachteten Stelle

11.6 Maximale Schubspannung infolge Querkraft

$\tau^V_{max} = \frac{V_z \cdot S_{y,max}}{I_y \cdot t}$ [KN/cm²]	V_z: [KN] Einwirkende Querkraft $S_{y,max}$: [cm³] größtes statisches Moment (auf Höhe der Schwerachse) → siehe Formelsammlung „Schubmittelpunktberechnung“ t: [cm] Profildicke an der Stelle s

11.7 Maximale Schubspannung

$\tau_{max} = \tau^T_{max} + \tau^V_{max}$ [KN/cm²]	

11.8 Ermittlung der Verdrehung infolge der Torsionsmomentenbeanspruchung

$\vartheta = \int \frac{M_T \cdot \bar{M}}{G \cdot I_T} dx = \frac{1}{G \cdot I_T} \cdot \int M_T \cdot 100 \cdot \bar{M}\, dx$ [rad] umrechnen in Grad: $\vartheta° = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \vartheta$ [°] **Vorgehen:** 1. Aufbringen einer virtuellen Verdrehung der Größe „1“ 2. Vorhandenen Torsionsmomentenverlauf mit dem virtuellen Momentenverlauf koppeln.	G: [KN/cm²] Schubmodul. Für Stahl: G = 8100 I_T: [cm⁴] Torsionsflächenmoment, siehe oben M_T: [KNm] Bemessungswert des Torsionsmomentes $\bar{M}$: [ ] Momentenverlauf infolge der Einheitsverdrehung 1 L: [cm] Länge über die integriert wird.

12 Wölbkrafttorsion

12.1 Vorgehen:

1.) Integrationsweg s festlegen (vom frei gewählten Nullpunkt zu den Enden hin)
→ bei Achsensymmetrischen Querschnitten am besten auf Symmetrieachse legen → $\omega_{A0} = 0$
→ Wenn Schubmittelpunkt und Schwerpunkt zusammenfallen: $\omega_S = \omega_M$
2.) Ermittlung der r_t-Flächen
3.) Ermittlung der Einheitsverwölbung
4.) Ermittlung des Wölbwiderstandes $I_{\omega,M}$
5.) Ermittlung der Wölbnormalspannungen

12.2 Ermittlung der r_t-Flächen:

- r_t ist der Abstand zwischen der Tangenten an den Querschnitt und dem Drehpunkt A (z.B. S oder M)
- r_t ist positiv, wenn die Tangente an den Querschnitt (bzw. Richtung des Integrationsweges) im Uhrzeigersinn um die x-Achse dreht.

Beispiel:

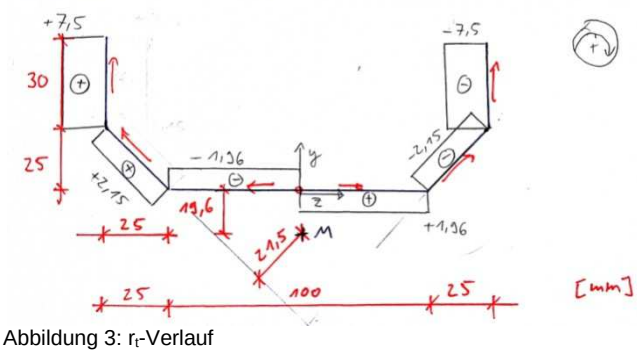


Abbildung 3: r_t-Verlauf

12.3 Einheitsverwölbung ω_A:

$\omega_A = \bar{\omega}_A + \omega_{A0}$ [cm²]

$\bar{\omega}_A = \int r_t \, ds$ = Flächeninhalt des r_t-Verlaufs

- Für den Verlauf der Einheitsverwölbung $\bar{\omega}_A$ müssen die r_t-Flächen beginnend am Nullpunkt mit einer virtuellen Größe 1 über die jeweilige Länge gekoppelt werden.

Integrationskonstante:

$\omega_{A0} = -\frac{1}{A} \cdot \int_A \bar{\omega}_A \, dA$

$= -\frac{t}{A} \cdot$ (Flächeninhalt des ω_A –Verlaufs)

Hinweise:

- $\omega_{A0} = 0$, wenn:
  - achsensymmetrischer Querschnitt
  - Drillachse auf Symmetrieachse
  - Nullpunkt der Integration im Schnittpunkt von Symmetrieachse und Profilmittellinie.
- ω_{A0} entspricht dem Flächeninhalt des $\bar{\omega}_A$ –Verlaufes
- bei konstanter Blechdicke kann das t aus dem Integral herausgezogen werden.

Beispiel:

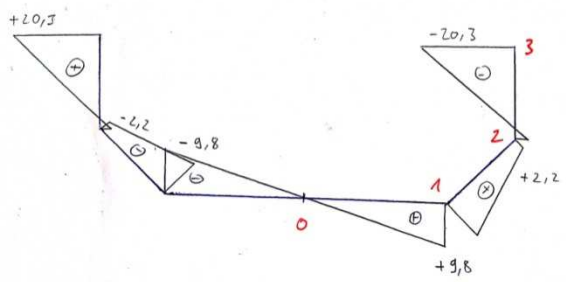


Abbildung 4: Einheitsverwölbung ω_M

$\omega_A(1) = 1{,}0 \cdot 1{,}96 \cdot 5{,}0 = +9{,}8$ cm²

$\omega_A(2) = 9{,}8 - 1{,}0 \cdot 2{,}15 \cdot \sqrt{2{,}5^2 + 2{,}5^2} = +2{,}2$

$\omega_A(3) = 2{,}2 - 1{,}0 \cdot 7{,}5 \cdot 3{,}0 = -20{,}3$

12.4 Einheitsverwölbung ω_B:

$\omega_B = \omega_A - (y_B - y_A) \cdot z + (z_B - z_A) \cdot y + \omega_0$ [cm²]

ω_A: [cm²] Verwölbung bezogen auf den Punkt A
ω_B: [cm²] Verwölbung bezogen auf den Punkt B
ω_M: [cm²] Verwölbung bezogen auf den Momentanpol
ω_0: [cm²] $= -\frac{1}{A} \cdot \int_A \omega_A \, dA$
$= -\frac{t}{A} \cdot$ (Flächeninhalt des ω_A –Verlaufs)
$y_B - y_A$: [cm] Abstand zwischen Punkt A und Punkt B in y-Richtung
$z_B - z_A$: [cm] Abstand zwischen Punkt A und Punkt B in z-Richtung
z: [cm] Stelle in z-Richtung an der die Einheitsverwölbung berechnet wird.
y: [cm] Stelle in y-Richtung an der die Einheitsverwölbung berechnet wird.

12.5 Wölbwiderstandsmoment:

$I_{\omega,M} = t \cdot \int_A \omega_M^2 \, ds$ [cm⁶]

Hinweis:

- Das Wölbwiderstandsmoment kann durch die Kopplung der Einheitsverwölbung mit sich selber ermittelt werden.

Beispiel: (Blechdicke t = 2mm)

$I_{\omega,M} = [\frac{1}{3} \cdot 9{,}8^2 \cdot 5{,}0$
$+ \frac{1}{3} \cdot (9{,}8 \cdot 9{,}8 + 2{,}2 \cdot 2{,}2) \cdot \sqrt{2{,}5^2 + 2{,}5^2}$
$+ \frac{1}{6} \cdot (9{,}8 \cdot 2{,}2 + 2{,}2 \cdot 9{,}8) \cdot \sqrt{2{,}5^2 + 2{,}5^2}$
$+ \frac{1}{3} \cdot (-20{,}3)^2 \cdot 3{,}0 + \frac{1}{3} \cdot 2{,}2^2 \cdot 3{,}0$
$+ \frac{1}{6} \cdot (-20{,}3) \cdot 2{,}2 \cdot 3{,}0 + \frac{1}{6} \cdot 2{,}2 \cdot (-20{,}3) \cdot 3{,}0] \cdot 0{,}2 \times 2$
$= 270{,}7$ cm⁶

12.6 Abklingfaktor:

$$\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_{\omega,M}}} \quad [1/cm]$$

G: [KN/cm²] Schubmodul = 8100
I_T: [cm^4] Torsionsflächenmoment, siehe oben
E: [KN/cm²] E-Modul von Stahl = 21000
$I_{\omega,M}$: [cm6] Wölbwiderstand, → siehe oben

12.7 Grenzfälle

$\lambda \cdot L \rightarrow \infty$ → reine St. Venantsche Torsion $I_{\omega,M} \approx 0$
$\lambda \cdot L \rightarrow 0$ → reine Wölbkrafttorsion $G \cdot I_T \approx 0$
$\lambda \cdot L < 0{,}5$ → reine Wölbkrafttorsion
$0{,}5 < \lambda \cdot L < 10$ → gemischte Torsion
$\lambda \cdot L > 10$ → reine St. Venantsche Torsion

L: [m] Trägerlänge

12.8 Primäres Torsionsmoment MTP – Einfeldträger mit Gabellagerung

$$M_{TP} = \frac{m_T}{\lambda} \cdot \left[\frac{\lambda}{2} \cdot (L - 2 \cdot x) + \frac{\cosh(\lambda \cdot x) - \cosh(\lambda \cdot (L - x))}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm]$$

Maximales M_{TP} (x = L):

$$M_{TP,max} = \frac{m_T}{\lambda} \cdot \left[\frac{-L \cdot \lambda}{2} + \frac{\cosh(\lambda \cdot L) - 1}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm]$$

m_T: [KNm/m] einwirkendes Torsionsmoment
x: [cm] Stelle an der das Moment gesucht ist.
λ: [1/cm] Abklinkfaktor
L: [cm] Trägerlänge

12.9 Sekundäres Torsionsmoment – Einfeldträger mit Gabellagerung

$$M_{TS} = -\frac{m_T}{\lambda} \cdot \left[\frac{\cosh(\lambda \cdot x) - \cosh(\lambda \cdot (L-x))}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm]$$

Maximales M_{TS} (x=L):

$$M_{TS} = -\frac{m_T}{\lambda} \cdot \left[\frac{\cosh(\lambda \cdot L) - 1}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm]$$

m_T: [KNm/m] einwirkendes Torsionsmoment
x: [cm] Stelle an der das Moment gesucht ist.
λ: [1/cm] Abklinkfaktor
L: [cm] Trägerlänge

12.10 Wölbmoment – Einfeldträger mit Gabellagerung

$$M_\omega = -\frac{m_T}{(\lambda)^2} \cdot \left[-1 + \frac{\sinh(\lambda \cdot x) + \sinh(\lambda \cdot (L - x))}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm^2]$$

Maximales M_ω: (x = L/2)

$$\text{max. } M_\omega = -\frac{m_T}{(\lambda)^2} \cdot \left[-1 + \frac{2 \cdot \sinh(\lambda \cdot 0{,}5 \cdot L)}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [KNcm^2]$$

m_T: [KNm/m] einwirkendes Torsionsmoment
x: [cm] Stelle an der das Moment gesucht ist.
λ: [1/cm] Abklinkfaktor
L: [cm] Trägerlänge

12.11 Trägerverdrehung

$$\vartheta = \frac{m_T}{G \cdot I_T \cdot (\lambda)^2} \cdot \left[\frac{\lambda^2}{2} \cdot (L \cdot x - x^2) - 1 + \frac{\sinh(\lambda \cdot x) + \sinh(\lambda \cdot (L - x))}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [rad]$$

maximale Verdrehung:

$$\vartheta_{max} = \frac{m_T}{G \cdot I_T \cdot (\lambda)^2} \cdot \left[\frac{\lambda^2}{8} \cdot L^2 - 1 + \frac{2 \cdot \sinh(\lambda \cdot 0{,}5 \cdot L)}{\sinh(\lambda \cdot L)}\right] \quad [rad]$$

$$\vartheta° = \frac{360 \cdot \vartheta}{2 \cdot \pi} \quad [°]$$

m_T: [KNm/m] einwirkendes Torsionsmoment
x: [cm] Stelle an der die Verdrehung gesucht ist.
λ: [1/cm] Abklinkfaktor
L: [cm] Trägerlänge

12.12 Wölbnormalspannungen:

$$\sigma_\omega = \frac{M_{\omega,M}}{I_{\omega,M}} \cdot \omega_M \quad [KN/cm^2]$$

$M_{\omega,M}$: [KNcm²] Wölbmoment
$I_{\omega,M}$: [cm^6] Wölbwiderstandsmoment, → siehe oben

13 Plattenbeulen – Nachweis Querschnitte der Klasse 4

13.1 Plattenbeulen bei Längsspannungen - Nachweis der wirksamen Fläche

13.1.1 Randspannung

$$\sigma_{xo} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed} \cdot 100}{I_y} \cdot z_{mo} \quad [KN/cm^2]$$

$$\sigma_{xu} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed} \cdot 100}{I_y} \cdot z_{mu} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau = \frac{V_z}{A_{Steg}} \quad [KN/cm^2]$$

z_{mu}: [cm] Nachweis Stegblech→ Abstand zwischen Schwerpunkt und Oberkante des unteren Gurtblechs
z_{mo}: [cm] Nachweis Stegblech→ Abstand zwischen Schwerpunkt und Unterkante des oberen Gurtblechs
A_{Steg}: [cm²] = $h_{ges} - 0{,}5 \cdot t_1 - 0{,}5 \cdot t_2$

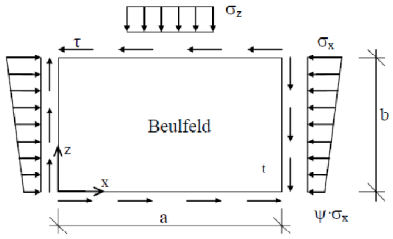


Abbildung 5: Beulfeld [2]

13.1.2 Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung

$$\psi = \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{xo}}$$

Hinweis:
- Druckspannungen sind positiv!
- die Spannungen sind vorzeichengerecht einzusetzen!

13.1.3 Seitenverhältnis

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad [\,]$$

a: [cm] Länge des untersuchten Feldes = Abstand der Schotte
b: [cm] Breite des untersuchten Feldes = h_{Steg}

13.1.4 Beulwert k_σ

13.1.4.1 Beidseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Stege)

ψ =	1,0	$0 < \psi < 1{,}0$	0	$-1{,}0 < \psi < 0$	-1,0	$-3{,}0 < \psi < -1{,}0$
k_σ =	4,0	$\frac{8{,}2}{1{,}05 + \psi}$	7,81	$7{,}81 - 6{,}29 \cdot \psi + 9{,}78 \cdot \psi^2$	23,9	$5{,}98 \cdot (1 + \lvert\psi\rvert)^2$

13.1.4.2 Einseitig gestützt, größte Druckspannung am freien Ende

ψ =	1,0	0	-1,0	$-3{,}0 \le \psi \le 1{,}0$
k_σ =	0,43	0,57	0,85	$0{,}57 - 0{,}21 \cdot \psi + 0{,}07 \cdot \psi^2$

13.1.4.3 Einseitig gestützt, größte Druckspannung am gestützten Ende

ψ =	1,0	$0 < \psi < 1{,}0$	0	$-1{,}0 < \psi < 0$	-1
k_σ =	0,43	$\frac{0{,}578}{\psi + 0{,}34}$	1,70	$1{,}70 - 5 \cdot \psi + 17{,}1 \cdot \psi^2$	23,8

Hinweis:
Alternativ kann der Beulwert aus Abbildung 68: Beulwerte im Anhang abgelesen werden.

13.1.5 Bezugsspannung

$$\sigma_e = 1{,}898 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad [KN/cm^2]$$

t: [cm] Blechdicke (Stegdicke bei I-Querschnitt der Klasse 4)
b: [cm] Breite des untersuchten Beulfeldes
→ Steghöhe d bei I-Querschnitt der Klasse 4
→ Flanschachsenabstand bei Kastenprofil
→ Gurtbreite bei Trapezprofil

13.1.6 Kritische Beulspannung

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_e \quad [KN/cm^2]$$

13.1.7 Kritische Knickspannung

13.1.7.1 Unausgesteiftes Beulfeld

$$\sigma_{cr,c} = 1{,}898 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad [KN/cm^2]$$

t: [cm] Blechdicke (Stegdicke bei I-Querschnitt der Klasse 4)
a: [cm] Länge des untersuchten Beulfeldes (z.B. Abstand der Querschotte)

13.1.7.2 Ausgesteiftes Beulfeld

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \quad [KN/cm^2]$$

$A_{sl,1}$: [cm²] Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes nach Bild A1 im Anhang
$I_{sl,1}$: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts des Ersatzdruckstabes nach Bild A1 im Anhang für Knicken quer zur Blechebene.
a: [cm] Länge des untersuchten Beulfeldes (z.B. Abstand der Querschotte)
E: [KN/cm²] E-Modul von Stahl = 21.000

13.1.8 Beulschlankheit

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad [\,]$$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
$\sigma_{cr,p}$: [KN/cm²] kritische Beulspannung, → siehe oben

13.1.9 Knickschlankheit

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad [\,]$$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
$\sigma_{cr,c}$: [KN/cm²] kritische Knickspannung, → siehe oben

13.1.10 Abminderungsfaktor für Beulen

13.1.10.1 Beidseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Stege)

$$\bar{\lambda}_p \le 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055 \cdot \psi} \quad \rightarrow \quad \rho = 1{,}0$$

$$\bar{\lambda}_p > 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055 \cdot \psi} \quad \rightarrow \quad \rho = \min \begin{cases} \dfrac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055 \cdot (3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_p)^2} \\ 1{,}0 \end{cases}$$

$\bar{\lambda}_p$: [ ] Beulschlankheit, → siehe oben
Ψ: [ ] Randspannungsverhältnis, → siehe oben

13.1.10.2 Einseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Flansch)

$$\bar{\lambda}_p \le 0{,}748 \quad \rightarrow \quad \rho = 1{,}0$$

$$\bar{\lambda}_p > 0{,}748 \quad \rightarrow \quad \rho = \min \begin{cases} \dfrac{\bar{\lambda}_p - 0{,}188}{(\bar{\lambda}_p)^2} \\ 1{,}0 \end{cases}$$

$\bar{\lambda}_p$: [ ] Beulschlankheit, → siehe oben

13.1.11 Abminderungsfaktor für Knicken

$$\bar{\lambda}_c \le 0{,}2: \chi_c = 1{,}0$$

$$\bar{\lambda}_c > 0{,}2: \chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda}_c)^2}} \le 1{,}0$$

Φ: [ ] Faktor
$\Phi = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}21 \cdot (\bar{\lambda}_c - 0{,}2) + (\bar{\lambda}_c)^2\right]$

13.1.12 Endgültiger Abminderungsfaktor

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad [\,]$$

Hinweis:
Interaktion zwischen ρ und χ_c

ξ: [ ] Beiwert = $(\sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c}) - 1$ jedoch $0 \le \xi \le 1$
$\sigma_{cr,p}$: [KN/cm²] elastische Plattenbeulspannung, → siehe oben
$\sigma_{cr,c}$: [KN/cm²] elastische Knickspannung, → siehe oben

13.1.13 Effektive Querschnittsgrößen – zweiseitig gestützt

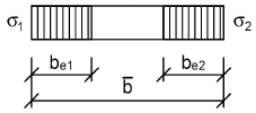
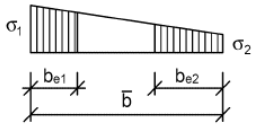
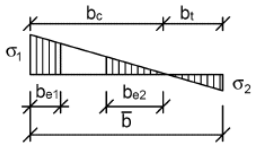
Spannungsverteilung (Druck positiv)	Wirksame Breite b_{eff}	
	$\psi = 1$:	$b_{eff} = \rho\ \bar{b}$ $b_{e1} = 0{,}5\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}5\ b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho\ \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho\ b_c = \rho\ \bar{b}/(1-\psi)$ $b_{e1} = 0{,}4\ b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}6\ b_{eff}$

Abbildung 6: Zweiseitg gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile [4]

Hinweise:

- Bevor die effektiven Querschnittswerte eines zweiseitig gestützten Querschnittsteils (z.B. Steg) berechnet werden, muss überprüft werden ob eventuell auch andere Querschnittsteile (z.B. Flansche) Ausfallflächen besitzen!
- Tipp: am besten den Querschnitt mit den dazugehörigen Ausfallflächen skizzieren und erst dann die effektiven Querschnittsgrößen ermitteln.

Fall 1: (ggf. sind noch andere Querschnittsteile zu berücksichtigen!)

$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c$ [cm²]

$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{z_{max}}$ [cm³]

Fall 2: (ggf. sind noch andere Querschnittsteile zu berücksichtigen!)

$A_{c,eff} = b_{e1} \cdot t + b_{e2} \cdot t$ [cm²]

$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{z_{max}}$ [cm³]

Fall 3: (ggf. sind noch andere Querschnittsteile zu berücksichtigen!)

$b_c = z_G (- t_f)$ [cm]

$b_t = b - b_c$ [cm]

$A_{c,eff} = b_{e1} \cdot t + b_{e2} \cdot t + b_t \cdot t$ [cm²]

$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{z_{max}}$ [cm³]

ρ_c: [ ] Endgültiger Abminderungsfaktor, → siehe oben

A_c: [cm²] wirklich vorhandene Fläche

$A_{c,eff}$: [cm²] Gesamtquerschnittsfläche abzüglich der Ausfallflächen.

$A_{c,eff} = Ac - \Delta A$

I_{eff}: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des wirskamen Querschnittes.

z_{max}: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des wirksamen Querschnittes und Blechrand.

z_G: [cm] Lage der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts.

$z_G = \sum \frac{A_i \cdot z_i}{A_{ges}}$

$z_{G'}$: [cm] Lage der Schwerelinie des wirksamen Querschnitts.

$z_{G'} = \sum \frac{A_{i,eff} \cdot z_{i,eff}}{A_{eff}}$

13.1.14 Effektive Querschnittsgrößen – einseitig gestützt

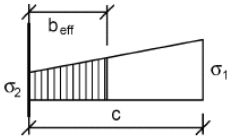
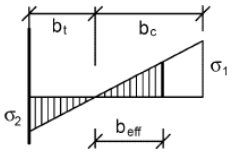
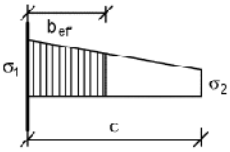
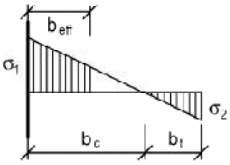
Spannungsverteilung (Druck positiv)	Wirksame Breite b_{eff}
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c/(1-\psi)$
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho\, c$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, c/(1-\psi)$

Abbildung 7: Einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile [4]

$A_{c,eff} = b_{eff} \cdot t$ [cm²]

$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{z_{max}}$ [cm³]

13.1.15 Nachweis

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} \cdot 100 + N_{Ed} \cdot e_N}{\frac{f_y \cdot W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1{,}0$$

N_{Ed}: [KN] Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
M_{Ed}: [KNm] Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
e_N: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Bruttoquerschnitts und Schwerelinie des wirksamen Querschnitts. $e_N = |z_{G'} - z_G|$

z_G: [cm] Lage der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts. $z_G = \sum \frac{A_i \cdot z_i}{A_{ges}}$

$z_{G'}$: [cm] Lage der Schwerelinie des wirksamen Querschnitts. $z_{G'} = \sum \frac{A_{i,eff} \cdot z_{i,eff}}{A_{eff}}$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)

A_{eff}: [cm²] wirksame Querschnittsfläche, → siehe oben
W_{eff}: [cm³] wirksames Widerstandsmoment, → siehe oben
γ_{M0}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,0

14 Schubbeulen

14.1 Prüfen ob Nachweis erforderlich ist

Nicht ausgesteiftes Stegblech:

$\frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \bullet \epsilon$ → Nachweis erforderlich

Ausgesteiftes Stegblech:

$\frac{h_w}{t} > \frac{31}{\eta} \bullet \epsilon \bullet \sqrt{k_\tau}$ → Nachweis erforderlich

h_w: [cm] Steghöhe. $h_w = h - 2 \bullet t_f$
η: [ ] 1,2 für S235 – S460
1,0 für > S460
ϵ: [ ] Faktor. $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

14.2 Schubbeulwerte

14.2.1 Blechfeld ohne oder > 2 Längssteifen, die durch starre Quersteifen begrenzt sind

$\frac{a}{h_w} \geq 1 \rightarrow k_\tau = 5{,}34 + 4{,}00 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}$ [ ]

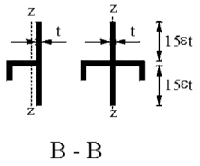
$\frac{a}{h_w} < 1 \rightarrow k_\tau = 4{,}00 + 5{,}34 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}$ [ ]

mit:
keine Längssteife:
$k_{\tau sl} = 0$

> 2 Längssteifen:

$$k_{\tau sl} = \max \begin{cases} 9 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \bullet \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 \bullet h_w}\right)^3} & [\,] \\ \frac{2{,}1}{t} \bullet \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} & [\,] \end{cases}$$

h_w: [cm] Steghöhe. $h_w = h - 2 \bullet t_f$
a: [cm] Abstand der starren Quersteifen.
I_{sl}: [cm^4] Flächenträgheitsmoment einer Längssteife um die z-z-Achse (siehe Bild). Bei Stegblechen mit Steifen ist I_{sl} die Summe der Steifigkeiten.
t: [cm] Dicke des Stegblechs



B - B

Abbildung 8: Stegblech mit Längssteifen [4]

14.2.2 Blechfeld mit einer oder zwei Längssteifen und α = a/h_w ≥ 3

$\frac{a}{h_w} \geq 1 \rightarrow k_\tau = 5{,}34 + 4{,}00 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}$ [ ]

$\frac{a}{h_w} < 1 \rightarrow k_\tau = 4{,}00 + 5{,}34 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}$ [ ]

mit:

$$k_{\tau sl} = \max \begin{cases} 9 \bullet \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \bullet \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 \bullet h_w}\right)^3} & [\,] \\ \frac{2{,}1}{t} \bullet \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} & [\,] \end{cases}$$

h_w: [cm] Steghöhe. $h_w = h - 2 \bullet t_f$
a: [cm] Abstand der starren Quersteifen.
I_{sl}: [cm^4] Flächenträgheitsmoment einer Längssteife um die z-z-Achse (siehe Bild). Bei Stegblechen mit Steifen ist I_{sl} die Summe der Steifigkeiten.
t: [cm] Dicke des Stegblechs

14.2.3 Blechfeld mit einer oder zwei Längssteifen und α = a/h_w < 3

$$k_\tau = 4{,}1 + \frac{6{,}3 + 0{,}18 \bullet \frac{I_{sl}}{t^3 \bullet h_w}}{\alpha^2} + 2{,}2 \bullet \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t^3 \bullet h_w}} \quad [\,]$$

h_w: [cm] Steghöhe. $h_w = h - 2 \bullet t_f$
a: [cm] Abstand der starren Quersteifen.
I_{sl}: [cm^4] Flächenträgheitsmoment einer Längssteife um die z-z-Achse (siehe Bild). Bei Stegblechen mit Steifen ist I_{sl} die Summe der Steifigkeiten.
t: [cm] Dicke des Stegblechs

14.3 Bezugsspannung

$\sigma_e = 1{,}898 \bullet 10^4 \bullet \left(\frac{t}{b}\right)^2$ [KN/cm²]

t: [cm] Blechdicke (Stegdicke bei I-Querschnitt der Klasse 4)
b: [cm] Breite des untersuchten Beulfeldes (Steghöhe bei I-Querschnitt der Klasse 4)

14.4 Kritische Schubbeulspannung

$\tau_{cr} = k_\tau \bullet \sigma_e$ [KN/cm²]

14.5 Schubbeulschlankheit

$$\bar{\lambda}_w = 0{,}76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \; [\,]$$

f_{yw}: [KN/cm²] Streckgrenze des Steges

14.6 Anteil Schubtragfähigkeit des Steges

	Starre Auflagersteife	Verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0{,}83/\eta$ →	η	η
$0{,}83/\eta \le \bar{\lambda}_w < 1{,}08$ →	$0{,}83/\bar{\lambda}_w$	$0{,}83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \ge 1{,}08$ →	$1{,}37/(0{,}7+\bar{\lambda}_w)$	$0{,}83/\bar{\lambda}_w$

Abbildung 9: Beitrag des Steges χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit [4]

η: [ ] 1,2 für S235 – S460
1,0 für > S460

14.7 Beanspruchbarkeit

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \; [KN]$$

$V_{bf,Rd}$ = 0 (sichere Seite)

$$V_{b,Rd} = \min \begin{cases} V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \; [KN] \\ \dfrac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \; [KN] \end{cases}$$

η: [ ] 1,2 für S235 – S460
1,0 für > S460

14.8 Nachweis

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \le 1{,}0$$

V_{Ed}: [KN] Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft aus Querkraft und Torsion.

14.9 Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

14.9.1 Überprüfen ob Interaktion erforderlich ist

$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 0{,}5 \rightarrow$ Interaktion nicht erforderlich

$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} > 0{,}5 \rightarrow$ Interaktion erforderlich, weiter mit 11.3.2

14.9.2 Bemessungswert $M_{f,Rd}$

Vorgehen:
1.) Lage der plastischen Nulllinie ermitteln.
2.) Momentenbeanspruchbarkeit über Kraft x Hebelarm ermitteln. (vgl. Beispiele)

$M_{f,Rd}$: [KNm] Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche berechnet wird.

14.9.3 Bemessungswert Mpl,Rd:

Vorgehen:
1.) Lage der plastischen Nulllinie ermitteln.
2.) Momentenbeanspruchbarkeit über Kraft x Hebelarm ermitteln. (vgl. Beispiele)

$M_{pl,Rd}$: [KNm] Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Steges berechnet wird.

14.9.4 Ausnutzungsgrad $\bar{\eta}_1$

$$\bar{\eta}_1 = \max \begin{cases} \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} & [\,] \\ \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} & [\,] \end{cases}$$

$M_{f,Rd}$: [KNm] Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche berechnet wird.
$M_{pl,Rd}$: [KNm] Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Steges berechnet wird.

14.9.5 Nachweis Interaktion

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot \left(2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1\right)^2 \leq 1{,}0$$

15 Schraubenverbindungen

15.1 Hinweise:

- Eine plastische Berechnung ist nur möglich wenn für alle Schrauben die Bedingung $F_{v,Rd} \geq F_{b,Rd}$ erfüllt ist.

15.2 Beanspruchbarkeit auf Abscheren: (EC3)

$F_{v,RD}$ → siehe Schneider 8.50 Tafel 8.50c

alternativ mit Fomel:

$$F_{v,RD} = A \bullet \alpha_v \bullet \frac{f_{u,b}}{\gamma_{M2}} \quad [KN]$$

$F_{v,Rd}$: [KN] Grenzabscherkraft
A: [cm²] Schaftquerschnittsfläche → siehe unten
Scherfuge im Gewinde → Spannungsquerschnittsfläche A_s
bei Passschrauben muss die Scherfuge im Schaft liegen
α_v: [ ] Scherfuge im Schaft: α_v = 0,6 für Schrauben 4.6, 5.6, 8.8, 10.9
Scherfuge im Gewinde: α_v = 0,6 für Schrauben 4.6, 5.6, 8.8
Scherfuge im Gewinde: α_v = 0,5 für Schrauben 10.9
$f_{u,b}$: [KN/cm²] Zugfestigkeit der Schraube (ultimate tensile strenght)
γ_{M2} : Teilsicherheitsbeiwert = 1,25

Schraubengröße	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
A (rohe Schraube)	1,13	2,01	3,14	3,80	4,52	5,73	7,07	10,18
A (Passschraube)	1,33	2,27	3,46	4,15	4,91	6,16	7,55	10,75
A_s	0,843	1,57	2,45	3,03	3,53	4,59	5,61	8,17

Hinweis: der Spannungsquerschnitt A_s für Regelgewinde ist in der DIN 13-28 angegeben

15.2.1 Lange Anschlüsse

Wenn $L_j > 15 \bullet d$ → Abschertragfähigkeit $F_{v,Rd}$ aller Verbindungsmittel muss mit β_{Lf} abgemindert werden!

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 \bullet d}{200 \bullet d} [\,] \quad \text{und } 0{,}75 \leq \beta_{Lf} \leq 1{,}0$$

L_j: [mm] Abstand zwischen den Achsen des ersten und letzten Verbindungsmittels
d: [mm] Durchmesser der Schraube

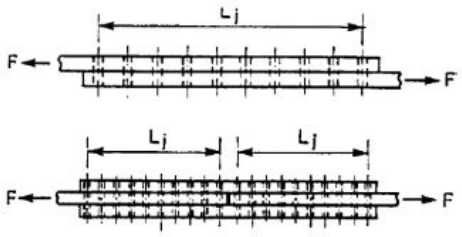


Abbildung 10: Lange Anschlüsse [5]

15.3 Beanspruchbarkeit auf Zug:

$F_{t,Rd}$ → siehe Schneider 8.51 Tafel 8.51a

15.4 Beanspruchbarkeit auf Zug + Abscheren:

Hinweis: Bei gleichzeitiger Beanspruchung müssen zunächst die jeweiligen Einzelnachweise geführt werden und dann der folgende Interaktionsnachweis:

$$F_{t,Ed} = \frac{N_x}{n} \quad [KN] \qquad F_{v,Ed} = \frac{V_{S,d}}{n} \quad [KN]$$

$$\text{Nachweis: } \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1{,}4 \bullet F_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

N_x: Zugkraft
$V_{S,d}$: Abscherkraft
n : Anzahl der Schrauben (nach DIN 18800max. 8 Schrauben anrechenbar !!)

15.5 Beanspruchbarkeit auf Lochleibung

15.5.1 Ermittlung der Beiwerte:

Lochabstand maßgebend (Innenschraube):

$$\alpha_b = \min \begin{cases} \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0{,}25 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1{,}0 \end{cases} \qquad k_1 = \min \begin{cases} \frac{1{,}4 \cdot p_2}{d_0} - 1{,}7 \\ 2{,}5 \end{cases}$$

Randabstand maßgebend (Randschraube):

$$\alpha_b = \min \begin{cases} \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1{,}0 \end{cases} \qquad k_1 = \min \begin{cases} \frac{2{,}8 \cdot e_2}{d_0} - 1{,}7 \\ \frac{1{,}4 \cdot p_2}{d_0} - 1{,}7 \\ 2{,}5 \end{cases}$$

Hinweise:

- Die Beiwerte müssen jeweils für die Innenschraube und die Randschraube ermittelt werden. Maßgebend ist am Ende die kleinere Grenzlochleibungskraft.
- Wenn quer zur Kraftrichtung nur eine Schraubenreihe vorhanden ist, dann können direkt die Beiwerte für die Randschraube ermittelt werden.
- Bei Anschlüssen in denen die Schrauben in x- und in z-Richtung beansprucht werden, kann der Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit getrennt für die Kraftkomponenten parallel und senkrecht zum Rand nachgewiesen werden. Die Kraftrichtung wird also einmal horizontal und einmal vertikal angenommen.
- Bei der Ermittlung der Beiwerte berücksichtigt der untere Wert die Abstände für die maximale Beanspruchbarkeit.
- Bei Beanspruchung in nur einer Richtung und mit ausreichend großen Abständen in Querrichtung beträgt $k_1 = 2{,}5$

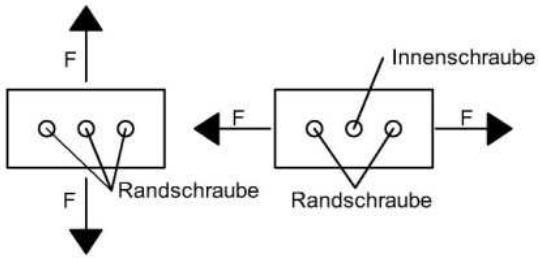


Abbildung 11: Definition Randschraube/Innenschraube

p_1: [mm] Lochabstand in Kraftrichtung, siehe oben
p_2: [mm] Lochabstand quer zur Kraftrichtung, siehe oben
e_1: [mm] Randabstand in Kraftrichtung
e_2: [mm] Randabstand quer zur Kraftrichtung
d_0: [mm] Lochdurchmesser = d + Δd
f_{ub}: [KN/cm²] charakteristische Zugfestigkeit von Schrauben,
4.6: f_{ub} = 40 8.8: f_{ub} = 80
5.6: f_{ub} = 50 10.9: f_{ub} = 100
f_u: [KN/cm²] charakteristische Zugfestigkeit,
S235: f_u = 36, S355: f_u = 49

15.5.2 Grenzlochleibungskraft einer Schraube:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot t \cdot d \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad [kN]$$

k_1: [ ] Beiwert zur Lochleibungskraft quer zur Kraftrichtung
α_b: [ ] Beiwert zur Lochleibungskraft in Kraftrichtung
t: [cm] minimale Dicke des Bleches
d: [cm] Schaftdurchmesser
f_u: [kN/cm²] charakteristische Zugfestigkeit
S235: f_u = 36 kN/cm²
S355: f_u = 49 kN/cm²
γ_{M2}: [ ] = 1,25

15.6 Konstruktive Gestaltung - Nach DIN EN 1993-1-1

15.6.1 Nennlochspiel s. DIN EN 1090-2; Tabelle 11

Schraubengröße	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
Δd [mm]	1	2	2	2	2	3	3	3

Das Nennlochspiel von Passschrauben beträgt: $\Delta d \leq 0{,}3mm$
Bei Türmen und Masten ist das Nennlochspiel um 0,5mm zu reduzieren

15.6.2 Rand- und Lochabstände:

	Minimum	Abstand für maximale Beanspruchbarkeit	Größtmöglicher Abstand
e_1 (Randabstand in Kraftrichtung)	$1{,}2 \cdot d_0$ $(2{,}1 \cdot d_0)$	$3{,}0 \cdot d_0$	$\leq 4 \cdot t + 40mm$
e_2 (Randabstand quer zur Kraftrichtung)	$1{,}2 \cdot d_0$ $(1{,}5 \cdot d_0)$	$1{,}5 \cdot d_0$	$\leq 4 \cdot t + 40mm$
p_1 (Lochabstand in Kraftrichtung)	$2{,}2 \cdot d_0$ $(2{,}85 \cdot d_0)$	$3{,}75 \cdot d_0$	$\leq \min \{14 \cdot t ; 200mm\}$
p_2 (Lochabstand quer zur Kraftrichtung)	$2{,}4 \cdot d_0$ $(3{,}0 \cdot d_0)$	$3{,}0 \cdot d_0$	$\leq \min \{14 \cdot t ; 200mm\}$

d_0: [mm] Lochdurchmesser = $d + \Delta d$
Δd: [mm] siehe oben
t: [mm] Dicke des dünnsten außen liegenden Bleches

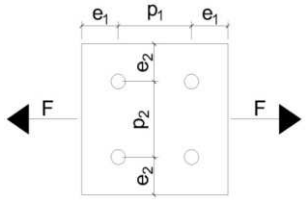


Abbildung 12: Defintition der Abstände

Hinweis: Die Verwendung der eingeklammerten Mindestwerte ergibt Beiwerte k1 = 2,5 und α b = 0,7

16 Schweißnahtverbindung (Kehlnaht) – nach DIN EN 1993-1-1

Hinweis: es stehen 2 Verfahren zu Verfügung (Richtungsbezogenes Verfahren und vereinfachtes Verfahren)

16.1 Schweißnahtdicke:

min a_w = 3 mm

$a_w \geq \sqrt{\max t} - 0{,}5$

max t: [mm] maximale Blechdicke

16.2 Schweißnahtlänge:

min $l_w \geq$ max {30mm ; 6 • a_w}

max $l_w \leq 150 \cdot a_w$

F_d: [kN] N_d oder V_d
l_s: [cm] Schweißnahtlänge
$\sigma_{w,R,d}$: [kN/cm²] Grenzschweißnahtspannung

16.3 wirksame Kehlnahtfläche:

$A_w = \sum (a_w \cdot l_{eff})$ [cm²]

16.4 Richtungsbezogenes Verfahren:

Fall 1: Übertragung von Kräften parallel zur Nahtrichtung

$$\tau_{\parallel}^{N} = \frac{F_{\parallel,Ed}}{A_w}$$

Fall 2: Übertragung von Kräften senkrecht zur Nahtrichtung

$$\tau_{\perp}^{N} = \frac{F_{\perp,Ed}}{A_w} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \qquad \sigma_{\perp}^{N} = \frac{F_{\perp,Ed}}{A_w} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Fall 3: Übertragung von Biegemomenten

$$\sigma_{\perp}^{M} = \frac{M_{Ed}}{W_w} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \qquad \tau_{\perp}^{M} = \frac{M_{Ed}}{W_w} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\sigma_{w,v} = \sqrt{\left(\sigma_{\perp}^{N} + \sigma_{\perp}^{M}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{\perp}^{N} + \tau_{\parallel}^{N}\right)^2} \quad [\text{kN/cm}^2]$$

$$f_{1,w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \qquad f_{2,w,Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Nachweise:

$\sigma_{w,v} \leq f_{1,w,Rd}$ und $\left(\sigma_{\perp}^{M} + \sigma_{\perp}^{N}\right) \leq f_{2,w,Rd}$

A_w: [cm²] wirksame Kehlnahtfläche
W_w: [cm³] $\frac{a \cdot l_w^2}{6}$ *(• 2)*
f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: f_u = 36 S355: f_u = 49 S460: f_u = 54
S275: f_u = 43 S420: f_u = 52
β_w: [ ] Korrelationsbeiwert
S235: β_w = 0,80 S355: β_w = 0,90 S460: β_w = 0,85
S275: β_w = 0,85 S420: β_w = 0,88
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25
$F_{\perp 1}$: [kN] Kraft senkrecht zur Schweißnahtfläche A_w
$F_{\perp 1} = \frac{1}{2} \cdot F_{\perp Ed} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$
$f_{1,w,Rd}$: [kN/cm²] Grenz-Vergleichsspannung
$f_{2,w,Rd}$: [kN/cm²] Grenz-Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtfläche A_w

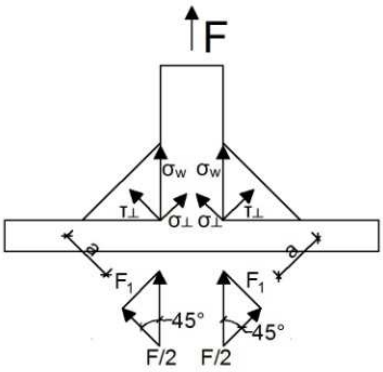


Abbildung 13: Querschnitt durch Doppelkehlnaht

16.5 Vereinfachtes Verfahren:

Hinweis: kann im Vergleich zum Richtungsbezogenen Verfahren größere Schweißnahtdicken liefern

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{w\parallel,Ed}^2 + F_{w\perp,Ed}^2} \quad [\text{kN}]$$

$$F_{w,Rd} = A_w \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad [\text{kN}]$$

Nachweis: $F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$

A_w: [cm²] wirksame Kehlnahtfläche
f_u: [kN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: f_u = 36 S355: f_u = 49 S460: f_u = 54
S275: f_u = 43 S420: f_u = 52
β_w: [ ] Korrelationsbeiwert
S235: β_w = 0,80 S355: β_w = 0,90 S460: β_w = 0,85
S275: β_w = 0,85 S420: β_w = 0,88
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

17 Gelenkige Anschlüsse:

17.1 Gelenkiger Schraubanschluss an Träger (EC3)

$M = A \bullet a$ [KNcm]

$$V_{1x}^{M} = \frac{M \bullet z_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2} \text{ [KN]}$$

$$V_{1z}^{M} = \frac{M \bullet x_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2} \text{ [KN]}$$

$$V_{1z}^{V} = \frac{A}{n_T} \text{ [KN]}$$

Maximale Schraubenkraft:

$$\max V_1 = \sqrt{\left(V_{1z}^{V} + V_{1z}^{M}\right)^2 + \left(V_{1x}^{M}\right)^2} \text{ [KN]}$$

$$\text{maß } F_{R,d} = \min \begin{cases} F_{b,Rd} \\ F_{v,Rd} \end{cases}$$

$\max V_1 \leq !$ maß $F_{R,d}$

A: [KN] Auflagerkraft
n_T: [ ] Schraubenanzahl
x_1: [cm] größter Schraubenabstand in x-Richtung (siehe Zeichnung)
z_1: [ ] größter Schraubenabstand in z-Richtung (siehe Zeichnung)

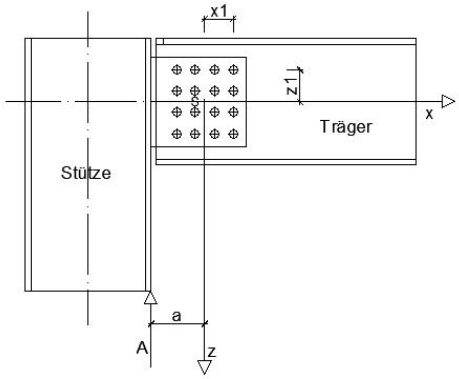


Abbildung 14: gelenkiger Schraubenanschluss

Grenzanschlusskraft:

$$A_{R,d} = \frac{V_{R,d}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_T} + \frac{a \bullet x_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2}\right)^2 + \left(\frac{a \bullet z_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2}\right)^2}} \text{ [KN]}$$

17.2 Gelenkiger Schraubanschluss an Stütze (EC3)

$$V_{1z} = \frac{A}{n_T} \text{ [KN]}$$

$$V_{1x}^{M} = \frac{A \bullet e \bullet z_1}{2 \bullet I_p} \text{ [KN]}$$

$$V_{1z}^{M} = \frac{A \bullet e \bullet x_1}{2 \bullet I_p} \text{ [KN]}$$

$$\max V_1 = \sqrt{\left(V_{1z} + V_{1z}^{M}\right)^2 + (V_{1x})^2} \text{ [KN]}$$

$$\text{maß } F_{R,d} = \min \begin{cases} F_{b,Rd} \\ F_{v,Rd} \end{cases}$$

$\max V_1 \leq !$ maß $F_{R,d}$

A: [KN] Auflagerkraft
n_T: [ ] Schraubenanzahl
$z_{w,1}$: [cm] (siehe Zeichnung)
I_p: [cm^4] polares Flächenmoment 2. Grades , = $I_y + I_z = \sum z_i^2 + \sum y_i^2$

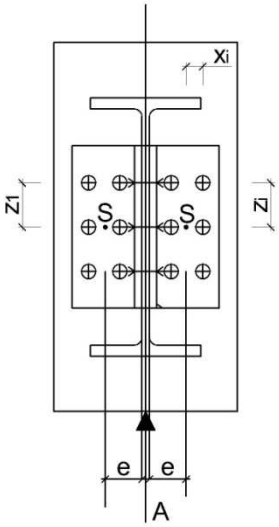


Abbildung 15: Doppelwinkelanschluss

17.3 Fahnenblechanschluss (EC3)

17.3.1 Hinweise

- Biegespannungen werden hier nicht berücksichtigt weil bei dem gewählten statisches Modell ein Gelenk an der Schweißnahtstelle vorhanden ist.
- Der Nebenträger muss am Obergurt gehalten werden (z.B. durch Trapezprofilblech), da das Fahnenblech keine Gabellagerung für den Nebenträger darstellt!

17.3.2 Schnittgrößen

$N_{Ed} = 0$ [KN]
V_{Ed} = siehe Skizze
$M_{Ed} = V_{Ed} \bullet a_1$ [KNm]
$M_{TEd} = V_{Ed} \bullet \frac{t_p + t_s}{2}$ [KNm]

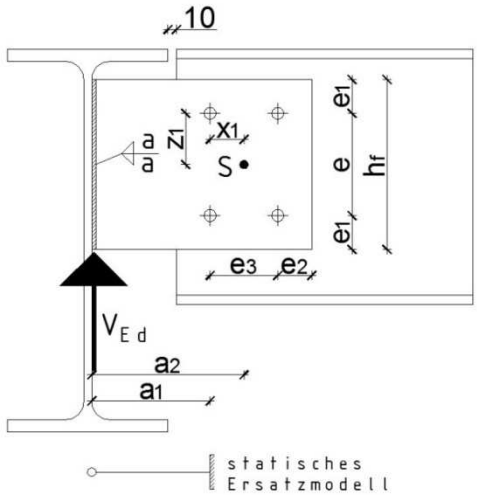


Abbildung 16: Fahnenblechanschluss

17.3.3 Querschnittswerte Fahnenblech

$A_n = (t_f \bullet h_f) - t_f \bullet d_L \bullet x$ [cm²]
$W_{yn} = 0{,}167 \bullet t_f \bullet h_f^2$ [cm³]
$W_T = 0{,}333 \bullet t_f^2 \bullet h_f$ [cm³]

t_f: [cm] Dicke des Fahnenblechs
h_f: [cm] Höhe des Fahnenblechs
d_L: [cm] Lochdurchmesser
x: Anzahl der horizontalen Schraubenreihen

17.3.4 Spannungen im Fahnenblech

$$\sigma_B = \frac{M_{Ed} \bullet 100}{W_{yn}} \text{ [KN/cm²]}$$

$$\tau_V = 1{,}5 \bullet \frac{V_{Ed}}{A_n} \text{ [KN/cm²]}$$

$$\tau_T = \frac{M_{TEd} \bullet 100}{W_T} \text{ [KN/cm²]}$$

$\Big\}$ max $\tau = \tau_V + \tau_T$

17.3.5 Nachweis Fahnenblech

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KN/cm²]}$$

$$\sigma_{v,d} = \sqrt{\sigma_B^2 + 3 \bullet \max \tau^2} \text{ [KN/cm²]}$$

Nachweis: $\sigma_{v,d} \leq! \sigma_{R,d}$

$\sigma_{v,d}$: vorh. Normalspannung
$\sigma_{R,d}$: [KN/cm²] Grenznormalspannung
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0
$\sigma_{v,d}$: Vergleichsspannung

17.3.6 maximale Schraubenkraft

$M_{s,d} = V_{Ed} \bullet a_2$ [KNm]

$$V_{1x}^M = \frac{M_{s,d} \bullet z_1}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2} \text{ [KN]}$$

$$V_{1z}^M = \frac{M_{s,d} \bullet x_1}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2} \text{ [KN]}$$

$$V_{1z}^V = \frac{V_{Ed}}{n_T} \text{ [KN]}$$

$$\max V = \sqrt{\left(V_{1z}^V + V_{1z}^M\right)^2 + \left(V_{1x}^M\right)^2} \text{ [KN]}$$

17.3.7 Belastbarkeit der Schrauben

17.3.7.1 Lochleibung

$F_{b,Rd}$ → siehe Schraubennachweis

Hinweis: Es sind alle Ränder beansprucht die Bezeichnung e_1, e_2 und p_1, p_2 können wechseln!

17.3.7.2 Abscheren

$F_{v,R,d}$ → siehe Schraubennachweis

17.3.8 Nachweis der Schrauben

maß $V_{R,d} = \min \begin{cases} F_{b,Rd} \\ F_{v,Rd} \end{cases}$

max V ≤! maß $F_{R,d}$

17.3.9 Nachweis der Schweißnaht

17.3.9.1 Schweißnahtdicke bekannt

$$\tau_V = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot h_f \cdot a} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau_T = \frac{M_{T,Ed} \cdot 100}{2 \cdot (h_f \cdot t_p) \cdot a} \quad [KN/cm^2]$$

max $\tau = \tau_V + \tau_T$ [KN/cm²]

$M_{T,Ed}$: [KNm] siehe oben
h_f: [cm] Höhe des Fahnenblechs
t_p: [cm] Dicke des Fahnenblechs
a: [cm] Schweißnahtdicke

Nachweis: ??

17.3.9.2 Schweißnahtdicke unbekannt

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{m2}} \quad [KN/cm^2]$$

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile

S235: $f_u = 36$	S355: $f_u = 49$	S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$	S420: $f_u = 52$	

β_w: Korrelationsbeiwert

S235: $\beta_w = 0{,}80$	S355: $\beta_w = 0{,}90$	S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$	S420: $\beta_w = 0{,}88$	

γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

$$\text{erf } a = \frac{1}{f_{vw,d}} \cdot \left[\frac{V_{Ed}}{2 \cdot h_f} \cdot \left(\frac{t_p + t_s}{2 \cdot t_p} + 1 \right) \right] \quad [cm]$$

min $a \geq \sqrt{\max t} - 0{,}5$

V_{Ed}: [KN] siehe oben
h_f: [cm] Höhe des Fahnenblechs
t_p: [cm] Dicke des Fahnenblechs
t_s: [cm] Dicke des Nebenträgerstegs
a: [cm] Schweißnahtdicke

max t: [mm] maximale Blechdicke von Fahnenblech und Hauptträgersteg

17.4 Stirnplattenanschluss

17.4.1 Nachweis der Schweißnaht:

siehe Schraubenverbindung

17.4.2 Nachweis der Schraubenverbindung:

siehe Schweißnahtverbindung

17.4.3 Nachweis der Stirnplatte:

Mindestplattenhöhe zur Querkraftaufnahme im Trägersteg:

$$h_p \geq \frac{V_{z,Ed} \cdot \sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}{f_y \cdot t_w} \quad [mm]$$

Hinweis: die notwendige Höhe hängt auch von den Schraubenabständen ab!

$$\text{erf } a = \frac{V_{z,Ed} \cdot \sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}}{2 \cdot f_u \cdot h_p} \quad [mm]$$

Schnittgrößen in der Stirnplatte:

$$V_z = \frac{F_{Ed}}{2} \quad [KN]$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{4} \cdot (p_2 - t_w) \qquad [KNcm]$$

Hinweis: Die Stirnplatte wird als Einfeldträger betrachtet

$$W_y = \frac{t_p \cdot h^2}{6} \quad [cm^3]$$

$$\sigma_p = \frac{M_y}{W_y} \; [KN/cm^2] \qquad \tau_p = \frac{V_z}{A_z} \; [KN/cm^2]$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_p^2 + 3 \cdot \tau_p^2} \quad [KN/cm^2]$$

Nachweis: $\sigma_v \leq \sigma_{Rd}$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$ S460: $f_y = 46$
S275: $f_y = 27,5$ S420: $f_y = 42$
t_w: Breite des Trägersteges
γ_{M0}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,0

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0,80$ S355: $\beta_w = 0,90$ S460: $\beta_w = 0,85$
S275: $\beta_w = 0,85$ S420: $\beta_w = 0,88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

t_p: [cm] Dicke der Stirnplatte
h: [cm] Höhe der Stirnplatte
A_z: [cm²] Querschnittsfläche der Stirnplatte = $t_p \cdot h$

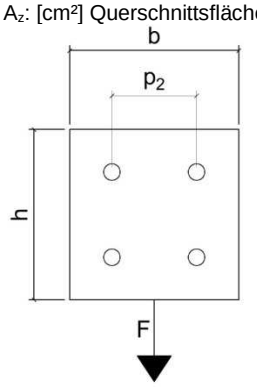


Abbildung 17: Definition der Querschnittsabmessungen

17.5 Knotenblechanschluss

$Z_{N,S}$: Senkrechte Komponente von Z in Stabachse
$Z_{V,S}$: Horizontale Komponente von Z in Stabachse
Anschlussschnittgrößen:
$Z_{N,B} = Z_{N,S}$ Senkrechte Kraftkomponente von Z in Blechschwerpunkt
$Z_{V,B} = Z_{V,S}$ Horizontale Kraftkomponente von Z in Blechschwerpunkt
M_B: $Z_{N,S}$ • e Moment in Blechschwerpunkt

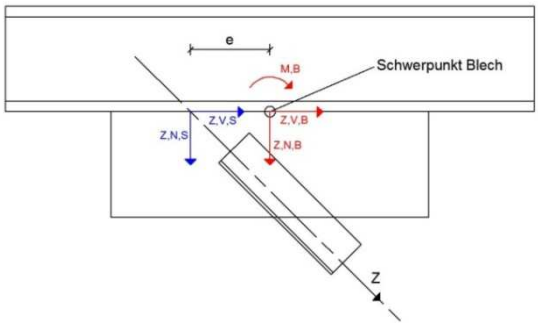


Abbildung 18: Ansicht Knotenblechanschluss

17.6 Winkelanschluss - beidseitig geschweißt

17.6.1 Anschluss Winkel an Hauptträger

17.6.1.1 Einwirkungen

F_d = Auflagerkraft des Nebenträgers

$M_{y,d} = 0{,}5 \cdot F_d \cdot e_1$ [KNcm]

$$F_2 = \frac{M_{y,d} \cdot 100}{l_{w1}} \quad [KN]$$

17.6.1.2 Schweißnähte – vereinfachtes Verfahren

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{m2}} \quad [KN/cm^2]$$

$$a_{1,erf} = \frac{F_d}{2 \cdot l_{w1} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

$\min a_1 = \sqrt{\max t} - 0{,}5$ [mm]

$$a_{2,erf} = \frac{F_1}{l_{w2} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

$\min a_2 = \sqrt{\max t} - 0{,}5$ [mm]

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der anschgeschlossenen Bauteile.
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0{,}80$ S355: $\beta_w = 0{,}90$ S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$ S420: $\beta_w = 0{,}88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

l_{w1}: [cm] Schweißnahtlänge (siehe Skizze)
max t: [mm] maximale Blechdicke
e_1: [cm] Winkelbreite + halbe Breite des Nebenträgerstegs

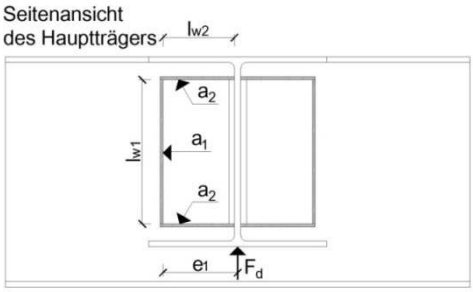


Abbildung 19: Anschluss an Hauptträger

17.6.2 Anschluss Winkel an Nebenträger

17.6.2.1 Einwirkungen

F_d = Auflagerkraft des Nebenträgers

$M_{x1,d} = F_d \cdot e_3$ [KNcm]

$$F_4 = \frac{M_{x1,d} \cdot 100}{l_{w3}} \quad [KN]$$

e_3: [cm] Winkelbreite + halbe Breite des Hauptträgerstegs

17.6.2.2 Schweißnähte – vereinfachtes Verfahren

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{m2}} \quad [KN/cm^2]$$

$$a_{3,erf} = \frac{F_d}{2 \cdot l_{w3} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

$\min a_3 = \sqrt{\max t} - 0{,}5$ [mm]

$$a_{4,erf} = \frac{F_4}{l_{w4} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

$\min a_4 = \sqrt{\max t} - 0{,}5$ [mm]

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der anschgeschlossenen Bauteile.
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0{,}80$ S355: $\beta_w = 0{,}90$ S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$ S420: $\beta_w = 0{,}88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

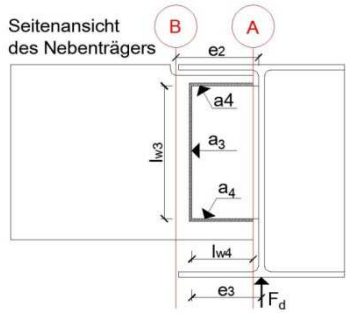


Abbildung 20: Anschluss an Nebenträger

17.6.3 Nachweis Doppelwinkel - Stelle A

$$\tau_{R,d} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

$$A = 2 \cdot s_w \cdot h_w \quad [cm^2]$$

$$\tau = 1{,}5 \cdot \frac{F_d}{A} \quad [KN/cm^2] \quad \sigma = 0$$

NW: $\tau \leq! \tau_{R,d}$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

s_w: [cm] Dicke des Winkelblechs
h_w: [cm] Höhe des Winkelblechs

17.6.4 Nachweis Ausklinkung – Stelle B (nur wenn diese vorhanden ist)

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

$$A = A_2 - (t_2 \cdot b_2) - (s_2 \cdot (e_0 - t_2)) \quad [cm^2]$$

$$I_y = \frac{b_2 \cdot t_2^3}{12} + \frac{s_2 \cdot h_1^3}{12} + b_2 \cdot t_2 \cdot e_4 + h_1 \cdot s_2 \cdot e_5 \quad [cm^4]$$

$$S_{yc} = b_2 \cdot t_2 \cdot (e_s - 0{,}5 \cdot t_2) \quad [cm^3]$$

$$M_{x2,d} = F_d \cdot e_2 \quad [KNcm]$$

$$\sigma_c = \frac{M_{x2,d} \cdot 100}{I_y} \cdot (e_s - t_2) \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau_c = \frac{F_d \cdot S_{yc}}{I_y \cdot s_2} \quad [KN/cm^2]$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_c^2 + 3 \cdot \tau_c^2} \quad [KN/cm^2]$$

NW: $\sigma_v \leq! \sigma_{R,d}$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

A_2: [cm²] Fläche des Nebenträgers
t_2:[cm] Flanschdicke des NT
b_2: [cm] Flanschbreite des NT
s_2: [cm] Stregdicke des NT
e_0: [cm] Ausklinkungshöhe

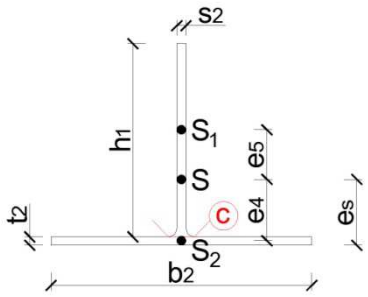


Abbildung 21: Querschnitt T-Profil

18 Biegesteife Anschlüsse

18.1 Biegesteifer Anschluss - I-Trägern mit Schweißnaht

18.1.1 Möglichkeit 1:

Tragsicherheitsnachweis darf entfallen, wenn Nahtdicken aus Tabelle eingehalten sind.
Kann jedoch unwirtschaftlich sein!

Werkstoff	Nahtdicken
S 235	$a_f \geq 0{,}5 \cdot t_f$ $a_s \geq 0{,}5 \cdot t_s$
S 275	$a_f = 0{,}6 \cdot t_f$ $a_s = 0{,}6 \cdot t_s$
S 355	$a_f = 0{,}7 \cdot t_f$ $a_s = 0{,}7 \cdot t_s$

18.1.2 Möglichkeit 2:

Bei doppeltsymmetrischen Trägern vereinfachte Berechnung
(Normalkraft & Moment werden Flansch zugeordnet, Querkraft dem Steg)

18.1.2.1 Beanspruchungen:

$$F_{Fl} = \frac{N}{2} \pm \frac{M_y \cdot 100}{h_f} \quad [KN]$$

$$F_{St} = V_z \quad [KN]$$

M_y: [KNm] = $Q_{d1} \cdot e_x + Q_{d2} \cdot e_z$
h_f: [cm] h – t

18.1.2.2 Kontrolle Beanspruchbarkeit Flansch:

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

$$\sigma_{Fl} = \frac{F_{Fl}}{A_{Fl}} \quad [KN/cm^2] \leq \sigma_{R,d}$$

F_{Fl}: [KN] siehe oben
A_{Fl}: [cm²] b • t
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

18.1.2.3 Kontrolle Schubspannung Steg:

$$\tau_{R,d} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau = \frac{V_Z}{A_{St}} \leq \tau_{R,d}$$

V_Z: [KN] Querkraft am Anschluss
A_{St}: [cm²] siehe Schneider 8.16
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

18.1.2.4 Berechnung Schweißnahtlängen:

$$l_{wF} = 2 \cdot b + 2 \cdot t - 2 \cdot r - s$$

$$l_{wS} = 2 \cdot (h - 2 \cdot t - 2 \cdot r)$$

l_{wF}: [cm] Schweißnahtlänge Flansch
l_{wS}: [cm] Schweißnahtlänge Steg

18.1.2.5 Bemessungswert der Schweißnahtspannung – vereinfachtes Verfahren

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{m2}} \quad [KN/cm^2]$$

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: f_u = 36 S355: f_u = 49 S460: f_u = 54
S275: f_u = 43 S420: f_u = 52
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: β_w = 0,80 S355: β_w = 0,90 S460: β_w = 0,85
S275: β_w = 0,85 S420: β_w = 0,88
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

18.1.2.6 Berechnung Schweißnahtdicken:

Dicke im Flansch: $$a_{erf} = \frac{F_{Fl}}{l_{wF} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

Dicke im Steg: $$a_{erf} = \frac{V_Z}{l_{wS} \cdot f_{vw,d}} \quad [cm]$$

l_{wF}: [cm] siehe oben
l_{wS}: [cm] siehe oben
$f_{vw,d}$: [KN/cm²] siehe oben

18.2 Biegesteifer Anschluss – Stirnplatte geschraubt

18.2.1 Kippkante auf Höhe der unteren Schraubenreihe

Hinweis:
es wird von einer linearen Schraubenkraftverteilung ausgegangen.
Herleitung siehe Anhang

$$F_A = \frac{M \cdot 100 \cdot L_A}{L_A^2 \cdot n_A + \sum L_i^2 \cdot n_i} \quad [kN]$$

$$F_B = \frac{M \cdot 100 \cdot L_B}{L_B^2 \cdot n_B + \sum L_i^2 \cdot n_i} \quad [kN]$$

F_A: [kN] Schraubenaxialkraft einer Schraube in der Schraubenreihe A
M: [kNm] einwirkendes Biegemoment
L_A: [cm] Abstand zwischen Kippkante und Schraubenreihe A
n_A: [ ] Anzahl der Schrauben in der Schraubenreihe A

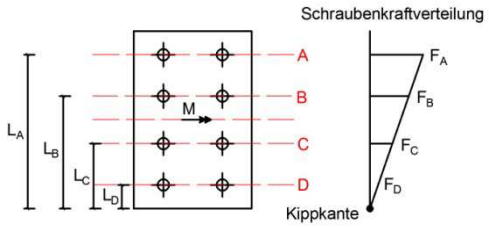


Abbildung 22: Biegesteifer Anschluss 1 – Ansicht

18.2.2 Kippkante in Symmetrieachse

Hinweis:
es wird von einer linearen Schraubenkraftverteilung ausgegangen.
Herleitung siehe Anhang

$$F_A = \frac{M \cdot 100 \cdot L_A}{2 \cdot n_A \cdot L_A^2 + 2 \cdot n_B \cdot L_B^2} \quad [kN]$$

$$F_B = \frac{M \cdot 100 \cdot L_B}{2 \cdot n_A \cdot L_A^2 + 2 \cdot n_B \cdot L_B^2} \quad [kN]$$

F_A: [kN] Schraubenaxialkraft einer Schraube in der Schraubenreihe A
M: [kNm] einwirkendes Biegemoment
L_A: [cm] Abstand zwischen Kippkante und Schraubenreihe A
n_A: [ ] Anzahl der Schrauben in der Schraubenreihe A

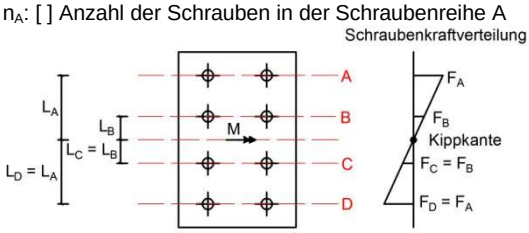


Abbildung 23: Biegesteifer Anschluss 2 - Ansicht

18.3 Berechnen eines Biegesteifen Voutenanschlusses mit hochfesten Schrauben

18.3.1 Voutenlänge

aufnehmbares Moment des Riegels = Moment am Voutenende:

$$M_{R,d} = \left(\sigma_{Rd} - \frac{|N|}{A}\right) \bullet W_y \bullet 0{,}01 \quad [KNm]$$

Über Gleichgewichtsbedingungen an der Stelle A
den Hebelarm x (= Voutenlänge) ausrechnen

Für Schnittgrößenverlauf nach Skizze (N = negativ; V = negativ; M = negativ):

$$|M_{Riegel}| - |V_{Riegel}| \bullet \frac{x}{\cos\alpha} + |q_d| \bullet 0{,}5 \bullet x^2 - |M_{R,d}| = 0$$

→ nach x auflösen und Gleichung lösen.

σ_{Rd}: [KN/cm²] für S235 = 23,5
für S355 = 35,5
N: [KN] Normalkraft im Riegel
W_y: [cm³] Widerstandsmoment des Riegels
A [cm²] Fläche des Riegels

V_{Riegel}: [KN] Querkraft links von Punkt B
N_{Riegel}: [KN] Normalkraft links von Punkt B

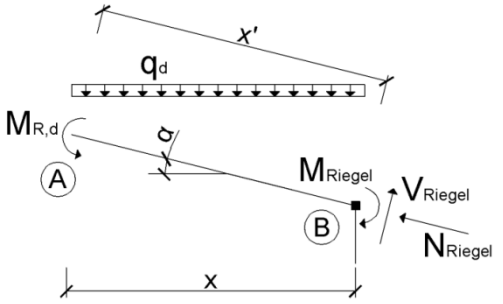


Abbildung 24: biegesteifer Voutenanschluss

18.3.2 Voutenhöhe:

Bedingung 1: erf. $h_{p1} \geq \frac{M_{Riegel}}{A_{st} \bullet \tau_{Rd}}$ [m]

Bedingung 2: erf. $h_{p2} \geq \frac{M_{Riegel}}{\sigma_{Rd} \bullet A_{Fl} - 0{,}5 \bullet |N|}$ [m]

maß. erf. $h_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \text{erf. } h_{p1} \\ \text{erf. } h_{p2} \end{array} \right\}$

Ergebnis aufrunden → h_p

M_{Riegel}: [KNm]
A_{st}: [cm²] Stegblechfläche des Stiels
A_{Fl}: [cm²] Fläche eines Flansches des Riegels
τ_{Rd}: [KN/cm²] S235: τ_{Rd} = 13,56
S355: τ_{Rd} = 20,50
N: [KN] Normalkraft im Riegel

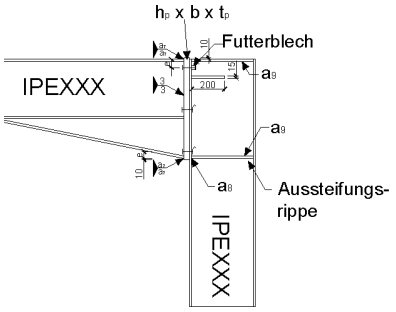


Abbildung 25: biegesteifer Voutenanschluss

18.3.3 Schrauben – auf Zug:

Hinweis: Der Nachweis der oberen horizontalen Schraubenreihen, die auf Zug beansprucht werden, ist in dem Nachweis der Stirnplatte auf Biegung, bzw. Flansch auf Biegung enthalten. Zur Vorbemessung der Schrauben kann jedoch das folgende Verfahren verwendet werden.

$$Z_d = \frac{M_{Riegel}}{h_s \bullet x} \quad [KN]$$

→ Schraubendurchmesser wählen

M_{Riegel}: [KNm]
h_s: [m] Abstand der Mittellinien von Voutenflansch und oberem Riegelflansch
h_p: [m] Höhe der Voute
e: [m] Abstand vom Rand zum Schraubenschwerpunkt. → muss gewählt werden (z.B.: 5cm)
x: Schraubenanzahl einer vertikalen Schraubenreihe (i.d.R.2)

18.3.4 Schrauben – auf Abscheren:

Hinweis: Es wird angenommen, dass die Schrauben im Druckbereich die Querkraft aufnehmen

18.3.5 Stützensteg auf Druck

→ siehe Lasteinleitungsrippe

18.3.6 Stützensteg auf Zug

→ siehe Lasteinleitungsrippe

18.3.7 Stützensteg auf Schub

→ siehe Schubfeldnachweis

18.3.8 Stirnplatte auf Biegung

→ siehe Stirnplatte auf Biegung

18.3.9 Stützenflansch auf Biegung

→ siehe Stützenflansch auf Biegung

19 Stirnplatte auf Biegung

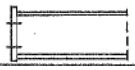
Form der Stirnplatte	Anzahl n_s der senkrechten Schraubenreihen	Stirnplattendicke d_p (d = Nenndurchmesser der Schraube)
Überstehend	2	1,00 d
	≤	1,25 d
Bündig 	2	1,50 d
	≤	1,70 d
Für die praktische Ausführung sind die Stirnplattendicken d_p jeweils auf volle 5 mm aufzurunden; min d_p = 15 mm. Bei überstehenden Stirnplatten mit K-Nähten ist die Stirnplattendicke d_p um jeweils 10 mm zu erhöhen.		

Abbildung 26: Stirnplattendicke d_p [3]

19.1 Hinweise:

- Die Beanspruchbarkeit einer Schraubenreihe ergibt sich aus dem Minimum der Tragfähigkeit der Schrauben, sowie der Biegetragfähikeit der Stirnplatte. Die Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe wird mithilfe eines äquivalenten T-Stummels nachgewiesen.

19.2 Vorgehen:

1. Zuerst müssen die einzelnen Schraubenreihen betrachtet werden und für jede Schraubenreihe eigene Zugkrafttragfähigkeiten ($F_{t,1,Rd}$, $F_{t,2,Rd}$ und $F_{t,3,Rd}$) berechnet werden.
2. Es wird eine Gruppe von Schraubenreihen betrachtet. Dazu müssen die Zugkrafttragfähigkeiten ($F_{t,1,Rd}$, $F_{t,2,Rd}$ und $F_{t,3,Rd}$), die alle Schraubenreihen gemeinsam berücksichtigt, berechnet werden. Zuerst muss für jede Schraubenreihe eine wirksame Länge des T-Stummels ermittelt werden. Die einzelnen Zugkrafttragfähigkeiten ermittelt man dann mit $\sum l_{eff,nc}$ bzw. $\sum l_{eff,nc}$.

19.3 Wirksame Länge des T-Stummels für Stirnbleche – nach DIN EN 1993-1-8/ Tabelle 6.6

19.3.1 Schraubenreihe einzeln betrachtet

Lage der Schraubenreihe	Kreisförmiges Muster	Nicht kreisförmiges Muster
Äußere Schraubenreihe, neben Trägerzugflansch (Typ 1)	$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot m_x \\ \pi \cdot m_x + w \\ \pi \cdot m_x + 2 \cdot e \end{cases}$	$l_{eff,nc} = \min \begin{cases} 4 \cdot m_x + 1{,}25 \cdot e_x \\ e + 2 \cdot m_x + 0{,}625 \cdot e_x \\ 0{,}5 \cdot b_p \\ 0{,}5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0{,}625 \cdot e_x \end{cases}$
Innere Schraubenreihe, neben Trägerzugflansch (Typ 2)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m$	$l_{eff,nc} = \alpha \cdot m$
Andere innere Schraubenreihe (Typ 3)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m$	$l_{eff,nc} = 4 \cdot m + 1{,}25 \cdot e$
Andere äußere Schraubenreihe (Typ 4)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m$	$l_{eff,nc} = 4 \cdot m + 1{,}25 \cdot e$

m: [mm] siehe Anhang Bild 6.8
$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$
m_x: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_x - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
m_2: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_2 - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
x_2: [mm] Abstand zwischenUnterkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
x_x: [mm] Abstand zwischenOberkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
w: [mm] Wurzelmaß bzw.Lochabstand der Schrauben, → siehe Skizze
t_w: [mm] Stegbreite, → siehe Schneider 8.161 ff.
a_{ws}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Steg angeschweißt wird.
a_{wf}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Flansch angeschweißt wird.
e: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
e_x: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
α: siehe Anhang, Bild 6.11
λ_1: [ ] Beiwert $= \frac{m}{m+e}$
λ_2: [ ] Beiwert $= \frac{m_2}{m+e}$
b_p: [mm] Breite der Stirnplatte $b_p = 2 \cdot e + w$

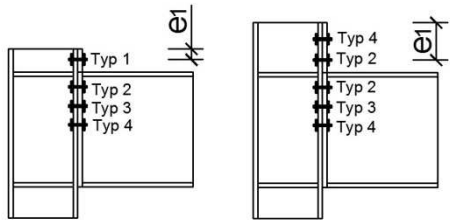


Abbildung 27: Definition der Schraubentypen

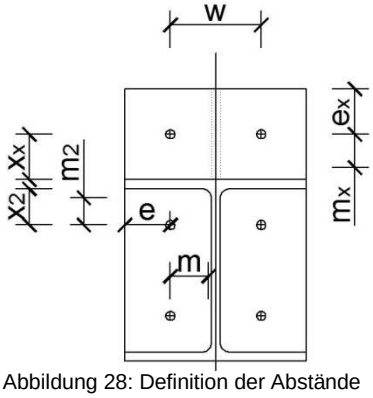


Abbildung 28: Definition der Abstände

Versagensmodus 1: $l_{eff,1} = \min \begin{cases} l_{eff,nc}\ [mm] \\ l_{eff,cp}\ [mm] \end{cases}$ (vollständiges Fließen des Steges)

Versagensmodus 2: $l_{eff,2} = l_{eff,nc}\ [mm]$ (Schraubenversagen mit Fließen des Flansches)

19.3.2 Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen

Lage der Schraubenreihe	Kreisförmiges Muster	Nicht kreisförmiges Muster
Äußere Schraubenreihe, neben Trägerzugflansch (Typ 1)	-	-
Innere Schraubenreihe, neben Trägerzugflansch (Typ 2)	$l_{eff,cp} = \pi \cdot m + p$	$l_{eff,nc} = 0{,}5 \cdot p + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e)$
Andere innere Schraubenreihe (Typ 3)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot p$	$l_{eff,nc} = p$
Andere äußere Schraubenreihe (Typ 4)	$l_{eff,cp} = \pi \cdot m + p$	$l_{eff,nc} = 2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e + 0{,}5 \cdot p$

m: [mm] siehe Anhang Bild 6.8
$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$
m_x: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_x - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
m_2: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_2 - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
p: [mm] Abstand der horizontalen Schraubenreihen
x_2: [mm] Abstand zwischenUnterkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
x_x: [mm] Abstand zwischenOberkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
w: [mm] Wurzelmaß bzw.Lochabstand der Schrauben, → siehe Skizze
t_w: [mm] Stegbreite, → siehe Schneider 8.161 ff.
a_{ws}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Steg angeschweißt wird.
a_{wf}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Flansch angeschweißt wird.
e: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
e_x: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
α: siehe Anhang, Bild 6.11
λ_1: [ ] Beiwert $= \frac{m}{m + e}$
λ_2: [ ] Beiwert $= \frac{m_2}{m + e}$

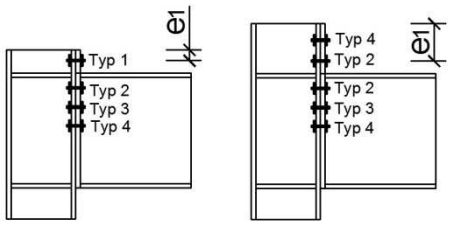


Abbildung 29: Defintion der Schraubentypen

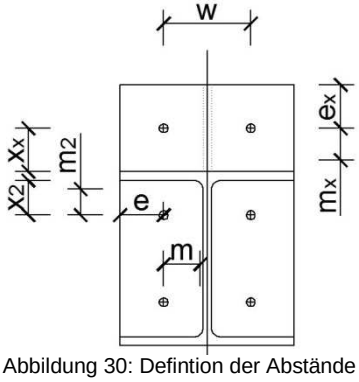


Abbildung 30: Defintion der Abstände

Versagensmodus 1: $l_{eff,1} = \min \begin{cases} \sum l_{eff,nc}\ [mm] \\ \sum l_{eff,cp}\ [mm] \end{cases}$ (vollständiges Fließen des Steges)

Versagensmodus 2: $l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}\ [mm]$ (Schraubenversagen mit Fließen des Flansches)

19.4 Überprüfen ob Abstützkraft vorhanden

Rahmeneck: $L_b = d_p + d_{p2} + 0{,}5 \cdot (k_s + m_s)$ [cm]
Trägerstoß: $L_b = 2 \cdot d_p + t_f + 0{,}5 \cdot (k_s + m_s)$ [cm]

$$L_b^* = \frac{8{,}8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot n_b}{\sum l_{eff,1} \cdot t_f^3} \text{ [cm]}$$

$L_b \le L_b^*$ → Abstützkräfte Q treten auf
→ Versagensmodus 1 und 2 kann auftreten

L_b: [cm] vorhandene Dehnlänge der Schraube
d_p: [cm] Dicke der Stirnplatte
d_{p2}: [cm] Dicke des Verstärkungsbleches am Stützenflansch
t_f: [cm] Dicke der Stirnplatte
k_s: [cm] Kopfhöhe einer Schraube, → siehe Schneider 8.57
m_s: [cm] Mutterhöhe einer Schraube → siehe Schneider 8.57
A_s: [cm²] Spannungsquerschnittsfläche der Schraube, → siehe Schneider 8.58
n_b: [ ] Anzahl der horizontalen Schraubenreihen (mit 2 Schrauben je Reihe)
Bei Betrachtung einer einzelnen Schraubenreihe $n_b = 1{,}0$
Bei Betrachtung einer Schraubengruppe $n_b > 1{,}0$

19.5 Plastische Momente

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0{,}25 \cdot l_{eff,1} \cdot d_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KNcm]}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0{,}25 \cdot l_{eff,2} \cdot d_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KNcm]}$$

Hinweis: Herleitung des plastischen Momentes siehe unter Beispiele

$l_{eff,1}$: [cm] → siehe oben
$l_{eff,2}$: [cm] → siehe oben
d_p: [cm] Dicke der Stirnplatte
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

19.6 Zugkrafttragfähigkeit – nach DIN EN 1993-1-8 Tabelle 6.2

19.6.1 Versagensmodus 1

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \quad [KN]$$

Hinweis: der Versagensmodus 1 entspricht dem vollständigen Fließen des Flansches. Es bilden sich 4 Fließgelenke.

$M_{pl,1,Rd}$: [KNm] plastisches Moment, → siehe oben
m: [mm] siehe oben, bzw. Anhang Bild 6.8

$$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$$

19.6.2 Versagensmodus 2

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m + n} \quad [KN]$$

$M_{pl,2,Rd}$: [KNm] plastisches Moment, → siehe oben
$\sum F_{t,Rd}$: [KN] Grezzugkraft der Schrauben.
Bei Betrachtung einer Schraubenreihe mit zwei Schrauben: $\sum F_{t,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$
m: [mm] siehe oben, bzw. Anhang Bild 6.8

$$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$$

n: [ ] = e_{min} jedoch $n \leq 1{,}25 \cdot m$
e_{min}: [mm] der kleinere Abstand zwischen Rand und Schraubenloch der zwei verbundenen Stahlplatten. (Vgl. Bild 6.2 in DIN EN 1993-1-8)

19.6.3 Versagensmodus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad [KN]$$

Hinweis: bei Betrachtung nur einer Schraubenreihe: $F_{T,3,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$

$F_{t,Rd}$: [KN] Grenzzugkraft einer Schraube, → siehe Schneider 8.51

19.6.4 Versagensmodus 1-2

$$F_{T,1\text{-}2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \quad [KN]$$

Hinweis:
Wenn keine Abstützkräfte vorhanden sind, kann der Versagensmodus 1 und 2 nicht auftreten.
In diesem Fall muss die Stirnplatte auf Biegung mit der oberen Formel nachgewiesen werden.

19.7 Momententragfähigkeit des Stirnplattenanschlusses

$$M_{C,Rd} = \sum_r \left(h_r \cdot F_{tr,Rd} \right) \quad [KNm]$$

h_r: [m] Hebelarm um den Druckpunkt, → siehe Skizze
$F_{tr,Rd}$: [KN] kleinste Zugkraft der einzelnen Schraubenreihen.
Dabei muss berücksichtigt werden: $F_{1,Rd} + F_{2,Rd} + F_{i,Rd} \leq F_{1+2+i,Rd}$
Das heißt also, dass wenn das Versagen der Schraubengruppe maßgebend wird, die kleinste Zugkraft einer Reihe nicht zu 100% angesetzt warden darf!
Zum Beispiel darf bei 2 vorhandenen Reihen die Zukraft der 2. Reihe mit maximal $F_{2,Rd} = F_{1+2,Rd} - F_{1,Rd}$ angesetzt werden.

19.8 Konstruktives

Dicke → siehe Stahlbau 2 Skript Seite IV B / 55
→ auf 5mm aufrunden
Höhe → $h_{p,vorh.} = h_p + 2cm$ (je Seite 1cm konstruktiv)
Breite → Breite des Gegenstückes
(z.B. Breite des Stützenflansches)

$a_7 \geq 0{,}5 \cdot t_t$

t_t: [cm] Flanschdicke des Riegels

20 Flansch auf Biegung

20.1 Hinweise:

Die Beanspruchbarkeit einer Schraubenreihe ergibt sich aus dem Minimum der Tragfähigkeit der Schrauben, sowie der Biegetragfähikeit der Stirnplatte. Die Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe wird mithilfe eines äquivalenten T-Stummels nachgewiesen.

20.2 Vorgehen:

1. Zuerst müssen die einzelnen Schraubenreihen betrachtet werden und für jede Schraubenreihe eigene Zugkrafttragfähigkeiten ($F_{t,1,Rd}$, $F_{t,2,Rd}$ und $F_{t,3,Rd}$) berechnet werden.
2. Es wird eine Gruppe von Schraubenreihen betrachtet. Dazu müssen die Zugkrafttragfähigkeiten ($F_{t,1,Rd}$, $F_{t,2,Rd}$ und $F_{t,3,Rd}$), die alle Schraubenreihen gemeinsam berücksichtigt, berechnet werden. Zuerst muss für jede Schraubenreihe eine wirksame Länge des T-Stummels ermittelt. Die einzelnen Zugkrafttragfähigkeiten ermittelt man dann mit $\sum l_{eff,nc}$ bzw. $\sum l_{eff,nc}$.

20.3 Wirksame Länge des T-Stummels für ausgesteifte Stützenflansche – nach DIN EN 1993-1-8/ Tabelle 6.6

20.3.1 Schraubenreihe einzeln betrachtet

Lage der Schraubenreihe	Kreisförmiges Muster	Nicht kreisförmiges Muster
Innere Schraubenreihe neben einer Steife (Typ 4)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m$	$l_{eff,nc} = \alpha \cdot m$
Andere innere Schraubenreihe (Typ 3)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m$	$l_{eff,nc} = 4 \cdot m + 1{,}25 \cdot e$
Äußere Schraubenreihe neben einer Steife (Typ 1)	$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot m \\ \pi \cdot m + 2 \cdot e_1 \end{cases}$	$l_{eff,nc} = e_1 + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e)$
Andere äußere Schraubenreihe (Typ 2)	$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot m \\ \pi \cdot m + 2 \cdot e_1 \end{cases}$	$l_{eff,nc} = \min \begin{cases} 4 \cdot m + 1{,}25 \cdot e \\ 2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e + e_1 \end{cases}$
	Hinweis: liegt die äußere Schraube nicht am Rand kann die zweite Zeile vernachlässigt werden. (e_1 ist sehr groß)	

m: [mm] siehe Anhang Bild 6.8

bei gewaltztem Profil: $m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot r$

bei geschweißtem Profil: $m = \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$

r: [mm] Walzradius, → siehe Schneider 8.161 ff.

m_x: [mm] siehe in nebenstehender Skizze

$= x_x - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$

m_2: [mm] siehe in nebenstehender Skizze

$= x_2 - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$

x_2: [mm] Abstand zwischenUnterkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze

x_x: [mm] Abstand zwischenOberkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze

w: [mm] Wurzelmaß bzw.Lochabstand der Schrauben, → siehe Skizze

t_w: [mm] Stegbreite, → siehe Schneider 8.161 ff.

a_{ws}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Steg angeschweißt wird.

a_{wf}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Flansch angeschweißt wird.

e: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, gemessen quer zur Stützenachse → siehe Skizze

e_x: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze

e_1: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, gemessen in Richtung der Stützenachse, → siehe Skizze

α: siehe Anhang, Bild 6.11

λ_1: [ ] Beiwert $= \frac{m}{m + e}$

λ_2: [ ] Beiwert $= \frac{m_2}{m + e}$

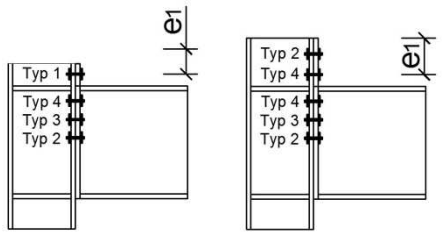


Abbildung 31: Definition der Schraubentypen

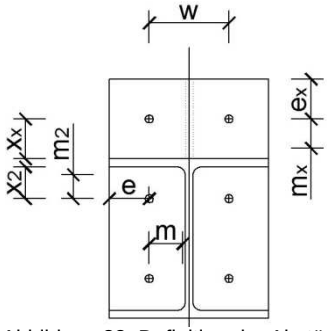


Abbildung 32: Definition der Abstände

Versagensmodus 1: $l_{eff,1} = \min \begin{cases} l_{eff,nc} \text{ [mm]} \\ l_{eff,cp} \text{ [mm]} \end{cases}$ (vollständiges Fließen des Steges)

Versagensmodus 2: $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ [mm] (Schraubenversagen mit Fließen des Flansches)

20.3.2 Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen

Lage der Schraubenreihe	Kreisförmiges Muster	Nicht kreisförmiges Muster
Innere Schraubenreihe neben einer Steife (Typ 4)	$l_{eff,cp} = \pi \cdot m + p$	$l_{eff,nc} = 0{,}5 \cdot p + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e)$
Andere innere Schraubenreihe (Typ 3)	$l_{eff,cp} = 2 \cdot p$	$l_{eff,nc} = p$
Äußere Schraubenreihe neben einer Steife (Typ 1)	Nicht relevant	Nicht relevant
Andere äußere Schraubenreihe (Typ 2)	$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} \pi \cdot m + p \\ 2 \cdot e_1 + p \end{cases}$	$l_{eff,nc} = \min \begin{cases} 2 \cdot m + 0{,}625 \cdot e + 0{,}5 \cdot p \\ e_1 + 0{,}5 \cdot p \end{cases}$
	Hinweis: liegt die äußere Schraube nicht am Rand kann die zweite Zeile vernachlässigt werden. (e_1 ist sehr groß)	

m: [mm] siehe Anhang Bild 6.8
$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$
m_x: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_x - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
m_2: [mm] siehe in nebenstehender Skizze
$= x_2 - 0{,}8 \cdot a_{wf} \cdot \sqrt{2}$
p: [mm] Abstand der horizontalen Schraubenreihen
x_2: [mm] Abstand zwischenUnterkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
x_x: [mm] Abstand zwischenOberkante Flansch und Schraubenloch, → siehe Skizze
w: [mm] Wurzelmaß bzw.Lochabstand der Schrauben, → siehe Skizze
t_w: [mm] Stegbreite, → siehe Schneider 8.161 ff.
a_{ws}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Steg angeschweißt wird.
a_{wf}: [mm] Schweißnahtdicke, mit der die Stirnplatte an den Flansch angeschweißt wird.
e: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
e_x: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, → siehe Skizze
e_1: [mm] Abstand zwischen Rand und Schraubenloch, gemessen in Richtung der Stützenachse, → siehe Skizze
α: siehe Anhang, Bild 6.11
λ_1: [ ] Beiwert $= \frac{m}{m+e}$
λ_2: [ ] Beiwert $= \frac{m_2}{m+e}$

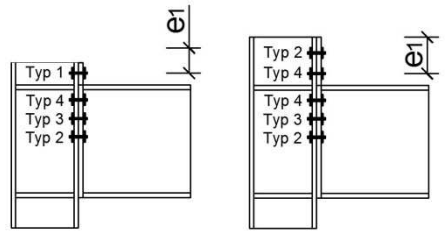


Abbildung 33: Definition der Schraubentypen

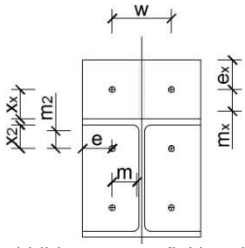


Abbildung 34: Definition der Abstände

Versagensmodus 1: $l_{eff,1} = \min \begin{cases} \sum l_{eff,nc}\ [mm] \\ \sum l_{eff,cp}\ [mm] \end{cases}$ (vollständiges Fließen des Steges)

Versagensmodus 2: $l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}\ [mm]$ (Schraubenversagen mit Fließen des Flansches)

20.4 Überprüfen ob Abstützkraft vorhanden

Rahmeneck: $L_b = d_p + d_{p2} + 0{,}5 \cdot (k_s + m_s)$ [mm]
Trägerstoß: $L_b = 2 \cdot d_p + t_f + 0{,}5 \cdot (k_s + m_s)$ [mm]

$L_b^* = \frac{8{,}8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot n_b}{\sum l_{eff,1} \cdot t_f^3}$ [mm]

$L_b \le L_b^*$ → Abstützkräfte Q treten auf
→ Versagensmodus 2 kann auftreten

L_b: [cm] vorhandene Dehnlänge der Schraube
d_p: [cm] Dicke der Stirnplatte
d_{p2}: [cm] Dicke des Verstärkungsbleches am Stützenflansch
t_f: [cm] Dicke des Flansches
k_s: [cm] Kopfhöhe einer Schraube, → siehe Schneider 8.57
m_s: [cm] Mutterhöhe einer Schraube → siehe Schneider 8.57
A_s: [cm²] Spannungsquerschnittsfläche der Schraube, → siehe Schneider 8.58
n_b: [ ] Anzahl der horizontalen Schraubenreihen (mit 2 Schrauben je Reihe)
Bei Betrachtung einer einzelnen Schraubenreihe $n_b = 1{,}0$
Bei Betrachtung einer Schraubengruppe $n_b > 1{,}0$

20.5 Plastische Momente

$M_{pl,1,Rd} = \frac{0{,}25 \cdot l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ [KNm]

$M_{pl,2,Rd} = \frac{0{,}25 \cdot l_{eff,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ [KNm]

$l_{eff,1}$: [mm] → siehe oben
$l_{eff,2}$: [mm] → siehe oben
t_f: [mm] Dicke des Flansches
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

20.6 Zugkrafttragfähigkeit – nach DIN EN 1993-1-8 Tabelle 6.2

20.6.1 Versagensmodus 1

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \quad [KN]$$

$M_{pl,1,Rd}$: [KNm] plastisches Moment, → siehe oben

20.6.2 Versagensmodus 2

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \Sigma F_{t,Rd}}{m + n} \quad [KN]$$

$M_{pl,2,Rd}$: [KNm] plastisches Moment, → siehe oben
$F_{t,RD}$: [KN]
m: [mm] siehe oben, bzw. Anhang Bild 6.8

$$= \frac{w}{2} - \frac{t_w}{2} - 0{,}8 \cdot a_{ws} \cdot \sqrt{2}$$

n: [ ] = e_{min} jedoch $n \leq 1{,}25 \cdot m$
e_{min}: [mm] der kleinere Abstand zwischen Rand und Schraubenloch der zwei verbundenen Stahlplatten.
(Vgl. Bild 6.2 in DIN EN 1993-1-8)

20.6.3 Versagensmodus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad [KN]$$

Hinweis: bei Betrachtung nur einer Schraubenreihe: $F_{T,3,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$

$F_{t,Rd}$: [KN] Grenzzugkraft einer Schraube, → siehe Schneider 8.51

20.6.4 Versagensmodus 1-2

$$F_{T,1\text{-}2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \quad [KN]$$

Hinweis:
Wenn keine Abstützkräfte vorhanden sind, kann der Versagensmodus 1 und 2 nicht auftreten.
In diesem Fall muss die Stirnplatte auf Biegung mit der oberen Formel nachgewiesen werden.

20.7 Momententragfähigkeit des Stirnplattenanschlusses

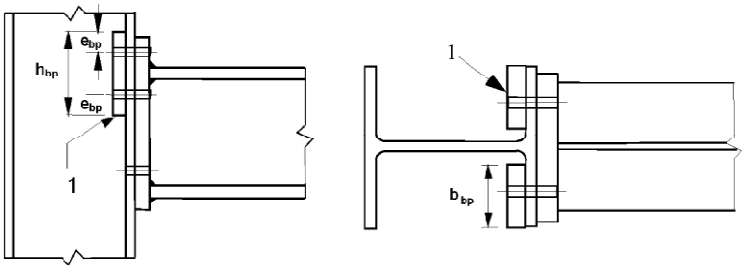
$$M_{C,Rd} = \sum_r (h_r \cdot F_{tr,Rd}) \quad [KNm]$$

h_r: [m] Hebelarm um den Druckpunkt, → siehe Skizze
$F_{tr,Rd}$: [KN] kleinste Zugkraft der einzelnen Schraubenreihen.
Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Summe der kleinsten Zugkraft der jeweiligen Reihe kleiner bzw. gleich sind mit der kleinsten Zugkraft infolge Versagen der Schraubengruppe: $F_{1,Rd} + F_{2,Rd} + F_{i,Rd} \leq F_{1+2+i,Rd}$
Das heißt also, dass wenn das Versagen der Schraubengruppe maßgebend wird, die kleinste Zugkraft einer Reihe nicht zu 100% angesetzt warden darf!
Zum Beispiel darf bei 2 vorhandenen Reihen die Zukraft der 2. Reihe mit maximal $F_{2,Rd} = F_{1+2,Rd} - F_{1,Rd}$ angesetzt werden.

20.8 Konstruktives

Verstärkungsblech sollten angeordnet werden, wenn man die Zugtragfähigkeit des T-Stummels mit dem oberen Verfahren ermittelt. (DIN EN 1993-1-8 / 6.2.4.3(4))

t_t: [cm] Flanschdicke des Riegels



$$h_{bp} \geq \Sigma \ell_{eff,1}$$
$$e_{bp} > 2d$$

Legende

1 Verstärkungsblech

Abbildung 35: Stützenflansch mit Verstärkungsblechen [6]

21 Biegesteife Stöße

21.1 Geschraubter Gurtplattenstoß

$$I_{Gurt} = 2 \cdot \left(\frac{b \cdot t^3}{12}\right) + 2 \cdot A_{Gurt} \cdot z^2$$

Moment in Gurt (oben und unten):

$$M_{Gurt} = M_{ges} \cdot \frac{I_{Gurt}}{I_{ges}}$$

Normalkraft in einem Gurt:

$$N_{Gurt} = N_{ges} \cdot \frac{A_{Gurt}}{A_{ges}} + \frac{M_{Gurt} \cdot 100}{h_f}$$ oder bei vereinfachter Rechnung: $N_{Gurt} = \frac{M_{ges}}{h - t}$ [KN]

Auf die Gurtschrauben entfallende Beanspruchung:

$$V_N = \frac{N_{Gurt}}{n_G}$$

b: Breite des Profils
t: Dicke des Gurtes
A_{Gurt}: b • t [cm²]
z: 0,5 • (h-t) [cm] nicht sicher!!
h_f = Schwerpunktabstand der beiden Gurte = h – t
n_G: Anzahl der Schrauben im Gurtstoß

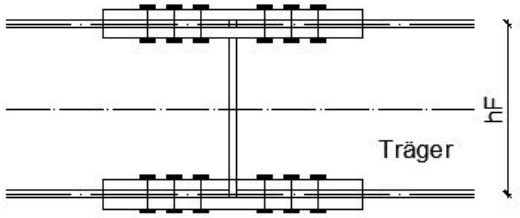


Abbildung 36: Ansicht eines geschraubten Gurtplattenstoßes

21.2 Geschraubter Stegstoß

Moment im Steg:

$$M_{Steg} = M_{ges} - M_{Gurt}$$ [KNm]

oder $M_{Steg} = M_{ges} \cdot \frac{I_{Steg}}{I_{ges}}$ [KNm]

$$M' = M_{Steg} + V \cdot a$$ [KNm]

Normalkraft im Steg:

$N_{Steg} = N_{ges} - N_{Gurt}$ oder $N_{Steg} = N_{ges} \cdot \frac{A_{Steg}}{A_{ges}}$

Querkraft im Steg:

$$V_{Steg} = V_{ges}$$

Auf die Schrauben entfallende Beanspruchung:

$$V_{1x}^M = \frac{M' \cdot z_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2}$$ [KN]

$$V_{1z}^M = \frac{M' \cdot x_1}{\Sigma x_i^2 + \Sigma z_i^2}$$ [KN]

$$V_{1x}^V = \frac{N_{Steg}}{n_S}$$ [KN]

$$V_{1z}^V = \frac{V}{n_S}$$ [KN]

$$\max V_1 = \sqrt{\left(V_{1z}^M + V_{1z}^V\right)^2 + \left(V_{1x}^M + V_{1x}^N\right)^2}$$ [KN]

Hinweis: zusätzlich muss der Nachweis in den Laschen geführt werden.

M': [KNcm]
n_S: Anzahl der Schrauben in einer Hälfte des Stegblechstoßes
b: Breite des Profils
t: Dicke des Gurtes
A_{Gurt}: b • t [cm²]
z: 0,5 • (h-t) [cm] nicht sicher!!
h_f = Schwerpunktabstand der beiden Gurte = h – t

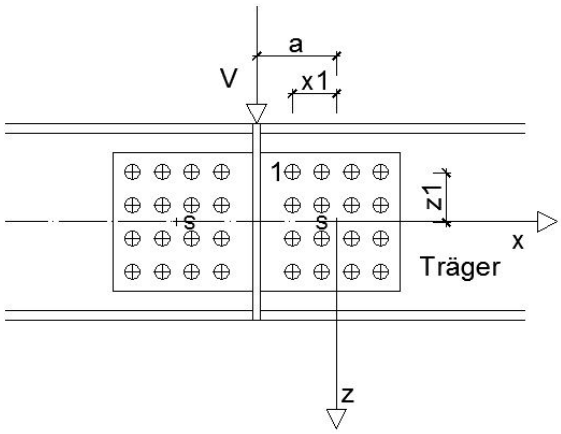


Abbildung 37: Ansicht eines geschraubten Stegstoßes

22 Dimensionierung Lasteinleitungsrippe:

22.1 Bestimmen der Steifenabmessungen:

$x_4 \leq! 0{,}5 \cdot (b - s) \rightarrow$ abrunden auf 5mm

$x_2 \geq! r \rightarrow$ auf 5mm aufrunden

$x_1 = x_4 - x_2$

Steifendicke t = Flanschdicke des angeschlossenen Profils
→ aufrunden auf 5mm

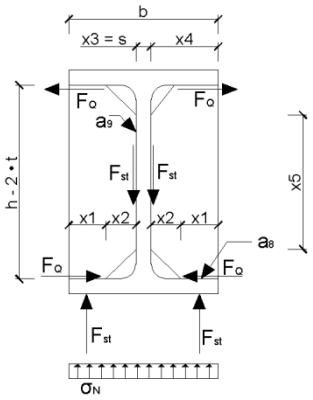


Abbildung 38: Draufsicht auf 2 Stegsteifen

22.2 Berechnung der Kräfte

Bei Anschluss eines Riegels an eine Stütze:

$$D_d = \frac{M}{h_R} + \frac{|N|}{2} \text{ [KN]}$$

Bei Einzellast allgemein:

D_d = äußere Kraft

$$F_{st} = 0{,}5 \cdot D_d \cdot \frac{x_1}{x_4 + 0{,}5 \cdot x_3} \text{ [KN]}$$

$$F_Q = F_{st} \cdot \frac{(0{,}5 \cdot x_1 + x_2)}{h - 2 \cdot t_f} \text{ [KN]}$$

D_d: [KN] Kraft die von außen in die Steife und den Steg übertragen werden muss
N: [KN] Normalkraft im Riegel
M: [KNm] Moment im Riegel
h_R: Hebelarm des Riegels
h: [cm] Höhe des Stahlprofils
t_f: [cm] Dicke des Stahlprofils

22.3 Beanspruchbarkeit der Schweißnaht

$$f_{1,w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \text{ [KN/cm²]}$$

$$f_{2,w,Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \text{ [KN/cm²]}$$

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0{,}80$ S355: $\beta_w = 0{,}90$ S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$ S420: $\beta_w = 0{,}88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

22.4 Berechnung der vorhandenen Spannungen: (Richtungsbezogenes Verfahren)

22.4.1 Schweißnaht a_8:

$$\sigma_{\perp}^{F_{st}} = \frac{F_{st}}{2 \cdot a_8 \cdot x_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ [KN/cm²]} \qquad \tau_{\perp}^{F_{st}} = \frac{F_{st}}{2 \cdot a_8 \cdot x_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ [KN/cm²]}$$

$$\tau_{\parallel}^{F_Q} = \frac{F_Q}{2 \cdot a_8 \cdot x_1} \text{ [KN/cm²]}$$

$$\sigma_{w,v} = \sqrt{\left(\sigma_{\perp}^{F_{st}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{\perp}^{F_{st}} + \tau_{\parallel}^{F_Q}\right)^2} \text{ [KN/cm²]}$$

Nachweise:

$\sigma_{w,v} \leq f_{1,w,Rd}$ und $\sigma_{\perp}^{F_{st}} \leq f_{2,w,Rd}$

a_8: [cm²] Schweißnahtdicke, → siehe Skizze
Bei der Dickenwahl beachten:
min $a_w = 3$ mm und $a_w \geq \sqrt{\max t} - 0{,}5$
a_9: [cm²] Schweißnahtdicke, → siehe Skizze
Bei der Dickenwahl beachten:
min $a_w = 3$ mm und $a_w \geq \sqrt{\max t} - 0{,}5$
x_1: [cm] siehe Skizze

22.4.2 Schweißnaht a_9:

$$\tau_{\parallel}^{F_{St}} = \frac{F_{St}}{2 \cdot a_9 \cdot x_5} \text{ [KN/cm²]}$$

Nachweise:

$$\sqrt{3} \cdot \left(\tau_{\parallel}^{F_{st}}\right) \leq f_{1,w,Rd}$$

a_9: [cm²] Schweißnahtdicke, → siehe Skizze
Bei der Dickenwahl beachten:
min $a_w = 3$ mm und $a_w \geq \sqrt{\max t} - 0{,}5$
x_5: [cm] $h - 2 \cdot t - 2 \cdot x_2$

Hinweis: Die Kraft F_{st} wird berechnet indem die vorhandene Spannung mit einem Verhältniswert abgemindert wird. Man kann sich F_{st} auch berechnen indem man sich den Gurt als Zweifeldträger mit zwei Kragarmen vorstellt der durch die Gleichstreckenlast σ_N belastet wird. Ein Großteil der Kraft geht direkt in den Steg. Der verbleibende Anteil teilt sich auf und geht zu gleichen Anteilen in die Steifen (Kräfte F_{st} links und F_{st} rechts)

23 Dimensionierung kurze Aussteifungsrippe

23.1 Steife überträgt eine Schraubenkraft in den Steg

23.1.1 Bestimmen der Steifenabmessungen:

$x_4 \leq! 0{,}5 \bullet (b - s)$ → abrunden auf 5mm

$x_2 \geq! r$ → auf 5mm aufrunden

$x_1 = x_4 - x_2$

Steifendicke t = Flanschdicke des angeschlossenen Profils
→ aufrunden auf 5mm

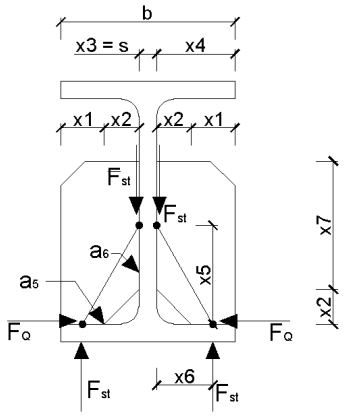


Abbildung 39: Draufsicht auf 2 halbe Stegsteifen

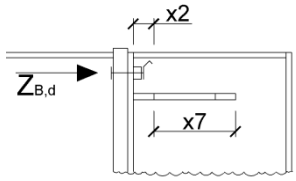


Abbildung 40: Ansicht einer halben Stegsteife

23.1.2 Berechnung der Kräfte

$F_{st} = 0{,}5 \bullet Z_{B,d}$ [KN]

$F_Q = F_{st} \bullet \frac{x_6}{x_5}$ [KN]

x_5: [cm] $0{,}5 \bullet x_7 + x_2$
x_6: [cm] $=0{,}5 \bullet x_1 + x_2$

23.1.3 Beanspruchbarkeit der Schweißnaht: (vereinfachtes Verfahren)

$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \bullet \beta_w \bullet \gamma_{M2}}$ [KN/cm²]

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile

S235: $f_u = 36$	S355: $f_u = 49$	S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$	S420: $f_u = 52$	

β_w: Korrelationsbeiwert

S235: $\beta_w = 0{,}80$	S355: $\beta_w = 0{,}90$	S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$	S420: $\beta_w = 0{,}88$	

γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

23.1.4 Berechnung der Schweißnahtdicken:

$$a_5 = \sqrt{\frac{F_{st}^2 + F_Q^2}{4 \bullet x_1^2 \bullet f_{vw,d}}}$$ [cm]

(Hinweis: hier steckt der Vergleichsspannungsnachweis drin)

$$a_6 = \frac{F_{st}}{2 \bullet f_{vw,d} \bullet x_7}$$ [cm]

23.2 Steife überträgt eine Gurtkraft in den Steg (EC3)

23.2.1 Bestimmen der Steifenabmessungen:

$x_4 \leq! 0{,}5 \bullet (b - s) \rightarrow$ abrunden auf 5mm

$x_2 \geq! r \rightarrow$ auf 5mm aufrunden

$x_1 = x_4 - x_2$

Steifendicke t = Flanschdicke des angeschlossenen Profils
→ aufrunden auf 5mm

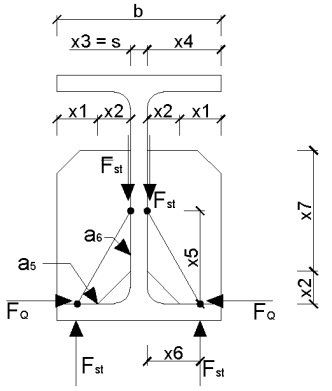


Abbildung 41: Draufsicht auf 2 halbe Stegsteifen

23.2.2 Berechnung der Kräfte

$$D_d = \frac{M}{h_{ges} - t} + \frac{|N|}{2} \quad [KN]$$

$$F_{st} = 0{,}5 \bullet D_d \bullet \frac{x_1}{x_4 + 0{,}5 \bullet x_3} \quad [KN]$$

$$F_Q = F_{st} \bullet \frac{x_6}{x_5} \quad [KN]$$

x_5: [cm] $0{,}5 \bullet x_7 + x_2$
x_6: [cm] $0{,}5 \bullet x_1 + x_2$

23.2.3 Beanspruchbarkeit der Schweißnaht: (vereinfachtes Verfahren)

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \bullet \beta_w \bullet \gamma_{M2}} \quad [KN/cm^2]$$

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0{,}80$ S355: $\beta_w = 0{,}90$ S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$ S420: $\beta_w = 0{,}88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

23.2.4 Berechnung der Schweißnahtdicken:

$$a_5 = \sqrt{\frac{F_{st}^2 + F_Q^2}{4 \bullet x_1^2 \bullet f_{vw,d}}} \quad [cm]$$

(Hinweis: hier steckt der Vergleichsspannungsnachweis drin)

$$a_6 = \frac{F_{st}}{2 \bullet f_{vw,d} \bullet x_7} \quad [cm]$$

24 Halsnahtbemessung eines I-Querschnitts (durchgehend geschweißt)

$S_{y1} = A_G \bullet z \ [cm^3]$ $\tau_{\parallel} = \frac{V_{z,Ed} \bullet S_{y1}}{I_y \bullet \sum a} \cong \frac{V_{z,Ed}}{h_w} \ [KN/cm^2]$ Hinweis: Die lotrecht wirkende Schubspannung an der Halsnaht ruft eine gleich große Schubspannung in der waagrechten Schnittflächen der Halsnaht hervor.	S_{y1}: [cm^3] Statisches Moment der durch die Längsnähte angeschlossenen Querschnittsflächen (i.d.R des Obergurtes) A_G: [cm^2] Querschnittsfläche des Obergurtes z: [cm] vertikaler Abstand von Schwerpunkt des Gesamtquerschnitts zum Schwerpunkt des Obergurtes $V_{z,Ed}$: [KN] maximale Querkraft im Träger I_y: [cm^4] Flächenträgheitsmoment des gesamten Trägers

25 Drehelastische Bettung:

25.1 Drehfeder aus Biegesteifigkeit des stützenden Bauteils – DIN EN 1993-1-3 / 10.1.5.2 (4)

$c_{\vartheta R,k} = k \bullet \frac{E \bullet I_{eff}}{s} \bullet \frac{1}{a}$ [KNm/m]

k: [ ] = 2 für Ein- und Zweifeldträger
= 4 für Durchlaufträger ≥ 3 Felder
E: [KN/cm²] E-Modul = 21.000
I_{eff} : [cm^4] Flächenträgheitsmoment des abstützenden Bauteils. Bei einem Trapezprofil ist dieser Wert in der Profiltafel des Herstellers angegeben.
s: [cm] Stützweite des abstützenden Bauteils
a: [cm] Abstand der seitlichen Halterungen
bei Trapezprofilen: a = 100

25.2 Drehfeder aus der Anschlusssteifigkeit

25.2.1 Geschraubter und geschweißter Anschluss:

$c_{\vartheta C,k} = \infty$ (Anteil kann vernachlässigt werden)

25.2.2 Anschluss eines Trapezprofilbleches – DIN EN 1993-1-3 / 10.1.5.2 (5)

25.2.2.1 Beiwert k_{ba}:

wenn $b_a < 125$mm: $k_{ba} = \left(\frac{b_a}{100}\right)^2$ [ ]

wenn 125mm ≤ b_a < 200mm: $k_{ba} = 1{,}25 \bullet \frac{b_a}{100}$ [ ]

b_a: [mm] Breite des Pfettengurtes

25.2.2.2 Beiwert k_t:

wenn $t_{nom} \geq 0{,}75$mm ; positive Lage:

$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0{,}75}\right)^{1{,}1}$ [ ]

wenn $t_{nom} \geq 0{,}75$mm ; negative Lage:

$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0{,}75}\right)^{1{,}5}$ [ ]

wenn $t_{nom} < 0{,}75$mm:

$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0{,}75}\right)^{1{,}5}$ [ ]

t_{nom}: [mm] Nennwert der Blechdicke

25.2.2.3 Beiwert k_{bR}:

wenn $b_R \leq 185$mm: $k_{bR} = 1{,}0$ [ ]

wenn $b_R > 185$mm: $k_{bR} = \frac{185}{b_R}$ [ ]

b_R: [mm] Rippenabstand des Profilbleches

25.2.2.4 Beiwert k_A:

wenn $t_{nom} = 0{,}75$mm; positive Lage; Auflast:

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \bullet 0{,}08$ [ ]

wenn $t_{nom} = 0{,}75$mm; negative Lage; Auflast:

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \bullet 0{,}16$

wenn $t_{nom} = 1{,}00$mm; positive Lage; Auflast:

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \bullet 0{,}095$

wenn $t_{nom} = 1{,}00$mm; negative Lage; Auflast:

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \bullet 0{,}095$

bei abhebender Last:

$k_A = 1{,}0$

t_{nom}: [mm] Nennwert der Blechdicke
A: [KN/m] Last die zwischen Blech und Pfette wirkt

Interpolation: $y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \bullet (x - x_1)$

Hinweise:

- Gleichungen gelten nicht für $t_{nom} < 0{,}75$mm
- bei $t_{nom} > 1{,}00$m: $t_{nom} = 1{,}00$mm
- Lineare Interpolation zwischen 0,75 und 1,00 ist zulässig

25.2.2.5 Beiwert k_{bT}:

wenn $b_T \le b_{T,max}$: $k_{bT} = 1{,}0$ [ ]

wenn $b_T > b_{T,max}$: $k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,max}}{b_T}}$ [ ]

b_T: [mm] Breite des Profilblechgurtes, der mit der Pfette verbunden wird.
$b_{T,max}$: [mm]
bei Schraubenverbindung: siehe Tabelle 10.3 im Anhang

25.2.2.6 Drehfeder aus der Anschlusssteifigkeit

$c_{\vartheta C,k} = c_{100} \bullet k_{ba} \bullet k_t \bullet k_{bR} \bullet k_A \bullet k_{bT}$ [kNm/m]

c_{100}: [kNm/m] Drehsteifigkeit für b_a = 100mm
→ bei Schraubenverbindung: siehe Tabelle 10.3 im Anhang
→ bei Setzbolzenverbindung: sichere Seite c_{100} = 2,0

25.2.3 Anschluss eines Sandwichprofiles

$c_{\vartheta C,k} = \frac{E_S \bullet b_t^3}{12 \bullet d_s} \bullet \frac{1}{1000}$ [kNm/m]

E_s: [N/mm²] E-Modul des Schaumstoffes: ca. 2,0
b_t: [mm] Breite des Stahlprofils
d_s: [mm] Dicke des Schaumstoffes

25.3 Verdrehsteifigkeit des gestützten Bauteils

Für I-Profile gilt:

$c_{\vartheta D,k} = 5770 \bullet \frac{1}{\frac{h_m}{t_w^3} + \frac{b_o}{2 \bullet t_f^3}}$ [kNm/m]

Hinweis: 5770 ergibt sich aus: $\frac{0{,}25 \bullet E}{1 - \mu^2}$

h_m: [cm] Abstand der Gurtschwerelinien des gestützten Trägers; $h_m = h - t_f$
h: [cm] Höhe des Stahlprofils
t_w: [cm] Stegdicke des gestützten Trägers
b_o: [cm] Breite des Obergurtes des gestützten Trägers
t_f: [cm] Dicke des Gurtes des gestützten Trägers

25.4 Gesamte Federsteifigkeit

$c_{\vartheta,k} = \frac{1}{\left(\frac{1}{c_{\vartheta R,k}} + \frac{1}{c_{\vartheta C,k}} + \frac{1}{c_{\vartheta D,k}}\right)}$

26 Nachweis Trapezprofilblech mit Typenentwurf:

26.1 Einwirkung

$F_{Ed,A} = x \cdot q_d \cdot l$ [KN/m]
$F_{Ed,B} = x \cdot q_d \cdot l$ [KN/m]
$M_{F,Ed} = x \cdot q_d \cdot l^2$ [KNm/m]
$M_{B,Ed} = x \cdot q_d \cdot l^2$ [KNm/m]

x = Tafelwert aus Schneider Bautabellen
l = Spannweite des Trapezprofilblechs [m]

26.2 Profil wählen

Auswahl zum Beispiel durch Berücksichtigung der Grenzstützweiten. (Siehe Typenentwurf)

26.3 Beanspruchbarkeiten

im Feld:

$$M_{c,Rd,F} = \frac{M_{c,Rk,F}}{\gamma_{M1}} \text{ [KNm/m]}$$

Am Endauflager:

$$R_{w,Rd,A} = \frac{R_{w,Rk,A}}{\gamma_{M1}} \text{ [KN/m]}$$

Am Zwischenauflager:

$$M_{c,Rd,B} = \frac{M_{c,Rk,B}}{\gamma_{M1}} \text{ [KNm/m]}$$

Zusätzlich bei andrückender Belastung:

$$R_{w,Rk,B} = R_{w,Rk,B,10} + \frac{R_{w,Rk,B,60} - R_{w,Rk,B,10}}{60 - 10} \cdot (L_{a,B} - 10) \text{ [KN/m]}$$

(Hinweis: aus den Auflagerbreiten $L_{a,B} = 10$ und $L_{a,B} = 60$ wird die vorhandene Tragfähigkeit durch Interpolation ermittelt)

$$R_{w,Rd,B} = \frac{R_{w,Rk,B}}{\gamma_{M1}} \text{ [KN/m]}$$

$$R_{0,Rk,B} = R_{0,Rk,B,10} + \frac{R_{0,Rk,B,60} - R_{0,Rk,B,10}}{60 - 10} \cdot (L_{a,B} - 10) \text{ [KN/m]}$$

(Hinweis: aus den Auflagerbreiten $L_{a,B} = 10$ und $L_{a,B} = 60$ wird die vorhandene Tragfähigkeit durch Interpolation ermittelt)

$$R_{0,Rd,B} = \frac{R_{0,Rk,B}}{\gamma_{M1}} \text{ [KN/m]}$$

$$M_{0,Rd,B} = \frac{M_{0,Rk,B}}{\gamma_{M1}} \text{ [KNm/m]}$$

Zusätzlich bei abhebender Belastung:

$$V_{w,Rd} = \frac{V_{w,Rk}}{\gamma_{M1}} \text{ [KNm/m]}$$

$M_{c,Rk,F}$: [KNm/m] Tragfähigkeit im Feld
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$M_{c,Rk,B}$: [KNm/m] Momententragfähigkeit am Zwischenauflager
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$M_{0,Rk,B}$: [KNm/m] Momententragfähigkeit am Zwischenauflager
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$R_{w,Rk,A}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Endauflager
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$R_{0,Rk,B}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$R_{w,Rk,B}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager
→ siehe Typenentwurf Anlage 2
$R_{0,Rk,B,10}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager, bei einer Auflagerbreite von $L_{a,B} = 10$mm
$R_{0,Rk,B,60}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager, bei einer Auflagerbreite von $L_{a,B} = 60$mm
$R_{w,Rk,B,10}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager, bei einer Auflagerbreite von $L_{a,B} = 10$mm
$R_{w,Rk,B,60}$: [KN/m] Tragfähigkeit am Zwischenauflager, bei einer Auflagerbreite von $L_{a,B} = 60$mm
$L_{a,B}$: [mm] vorhandene Zwischanauflagerbreite
γ_{M1}: [ ] Teilsicherheitsbeiwert. $\gamma_{M1} = 1,1$

26.4 Nachweise:

Im Feld:

$$\frac{M_{Ed,F}}{M_{c,Rd,F}} \leq 1,0$$

Am Endauflager:

$$\frac{F_{Ed,A}}{R_{w,Rd,A}} \leq 1,0$$

Am Zwischenauflager:

$$\frac{M_{Ed,B}}{M_{c,Rd,B}} \leq 1,0$$

Zusätzlich bei andrückender Flächenbelastung:

$$\frac{F_{Ed,B}}{R_{w,Rd,B}} \leq 1,0$$

M/R-Interaktion:

$$\frac{M_{Ed,B}}{M_{0,Rd,B}} + \left(\frac{F_{Ed,B}}{R_{0,Rd,B}}\right)^{\varepsilon} \leq 1,0$$

Zusätzlich bei abhebender Belastung:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 1,0$$

M/V-Interaktion:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 0,5 \rightarrow \text{keine M/V-Interaktion}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} > 0,5 \rightarrow \frac{M_{Ed,B}}{M_{c,Rd,B}} + \left(\frac{2 \bullet V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1,0$$

$F_{Ed,A}$: [KN/m] Auflagerkraft am Endauflager
$F_{Ed,B}$: [KN/m] Auflagerkraft am Zwischenauflager
$M_{Ed,B}$: [KNm/m] Biegemoment am Zwischenauflager
$R_{w,Rk,B,Rd}$: [KN/m] Beanspruchbarkeit des Trapezprofils am Zwischenauflager
→ siehe oben
$M_{0,Rk,B,Rd}$: [KNm/m] Beanspruchbarkeit des Trapezprofils am Zwischenauflager
→ siehe oben
ε: [ ] Faktor für Interaktion.
lineare Interaktionsbeziehung: ε = 1,0
quadratische Interaktionsbeziehung: ε = 2,0
welche Interaktionsbeziehung zu wählen ist steht auf dem Typenentwurf. (i.d.R ε = 1,0)

27 Rechnerische Bemessung von Leichtbauteilen – nach DIN EN 1993-1-3 (Trapezprofile und dünnwandige Stahlprofile)

27.1 Anwendungsgrenzen

$0{,}04 \cdot t \cdot \frac{E}{f_y} > r$ → rechnerische Bemessung möglich.

$0{,}04 \cdot t \cdot \frac{E}{f_y} < r$ → Tragfähigkeit muss experimentell ermittelt werden. (DIN EN 1993-1-3/5.1(6))

t: [mm] Blechdicke
E: [KN/cm²] E-Modul des Metallprofils.
Stahl: E = 21.000
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
r: [mm] Ausrundungsradius zwischen Steg und Gurt

27.2 Geometrische Größenverhältnisse

Die folgenden Formeln sollten nicht angewendet werden wenn die Verhältnisse b/t, h/t, c/t und d/t die Grenzwerte nach Tabelle 5.1 (siehe Anhang) überschreiten.

Bei Trapezprofilen gilt: $\frac{b}{t} \le 500$ und $\frac{h}{t} \le 500 \cdot \sin\phi$

b: [mm] Flanschbreite
t: [mm] Blechdicke
h: [mm] Höhe des Profils

27.3 Eindrehen der Flansche

Das Eindrehen des Flansches ist in der Regel (z.B. durch geringeren Hebelarm) zu berücksichtigen.
Außer folgende Grenzwerte sind eingehalten:

$\frac{u}{h_w} < 5\%$

mit $u = 2 \cdot \frac{(\sigma_a)^2 \cdot (b_s)^4}{E^2 \cdot t^2 \cdot z}$ [mm]

σ_a: [N/mm²] mittlere Flanschspannung im Bruttoquerschnitt
Hinweis: vereinfachend Streckgrenze des Profils ansetzen
b_s: [mm] halber Abstand zwischen den Stegen
E: [N/mm²] E-Modul des Metallprofils.
Stahl: E = 210000
t: [mm] Flanschdicke
z: [mm] Abstand zwischen den Flanschen und der neutralen Achse
h_w: [mm] Steghöhe zwischen den Mittelebenen der Gurte

27.4 Einfluss ausgerundeter Ecken

Der Einfluss ausgerundeter Ecken kann vernachlässigt werden, wenn:
$r \le 5 \cdot t$ und $r \le 0{,}1 \cdot b_p$

r: [mm] Innenradius
t: [mm] Blechdicke
b_p: [mm] Nennwert der geraden Breite, → siehe Bild 5.1 im Anhang

27.5 Querkrafttragfähigkeit

27.5.1 Hinweise

Es gibt zwei Versagensformen:
- Schubbeulen (i.d.R durch abhebende Belastung)
- Stegkrüppeln (i.d.R. durch andrückende, lokale Lasteinleitung)

27.5.2 Schubbeulen

27.5.2.1 Ermittlung der bezogenen Schlankheit

Stege ohne Längsaussteifungen:

$$\bar{\lambda}_w = 0{,}346 \bullet \frac{s_w}{t} \bullet \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad [\,]$$

Stege mit Längsaussteifungen:
→ siehe DIN EN 1993-1-3/6.10(b)

s_w: [mm] Steglänge, vgl. Abbildung 42:
t: [mm] Blechdicke
f_{yb}: [KN/cm²] Basisstreckgrenze
S 235: f_{yb} = 23,5
S 275: f_{yb} = 27,5
S 355: f_{yb} = 35,5
Andere Sorten: siehe DIN EN 1993-1-3 Tabelle 3.1a und 3.1b
E: [KN/cm²] E-Modul des Metallprofils.
Stahl: E = 21.000

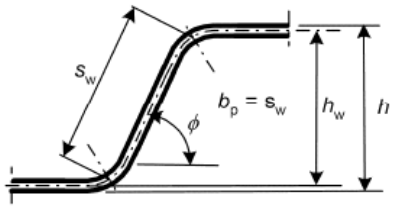


Abbildung 42: [7]

27.5.2.2 Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin\phi} \bullet t \bullet f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad [KN]$$

h_w: [cm] Steghöhe zwischen den Mittelebenen der Gurte
ϕ: [°] Neigung des Steges in Bezug auf die Flansche
t: [mm] Blechdicke
f_{bv}: [KN/cm²] Grenzschubspannung, → siehe Tabelle 6.1
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

Stegschlankheitsgrad	Am Auflager nicht ausgesteifter Steg	Am Auflager ausgesteifter Steg[a]
$\bar{\lambda}_w \le 0{,}83$	$0{,}58\, f_{yb}$	$0{,}58\, f_{yb}$
$0{,}83 < \bar{\lambda}_w < 1{,}40$	$0{,}48\, f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0{,}48\, f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \ge 1{,}40$	$0{,}67\, f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0{,}48\, f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

[a] Aussteifung am Lager, z. B. durch Lagerknaggen oder Lagerleisten zur Vermeidung von Stegverformungen und zur Aufnahme von Lagerreaktionen

Abbildung 43: Schubbeulfestigkeit f_{bv} [7]

27.6 Stegkrüppeln für ≥ 2 nicht ausgesteifte Stege: (z.B. Trapezprofile)

27.6.1.1 Anwendungsgrenzen

Die Beanspruchbarkeit eines nicht ausgesteiften Steges kann wie folgt ermittelt werden wenn gilt:

- $\frac{h_w}{t} \le 200 \cdot \sin \Phi$
- $\frac{r}{t} \le 10$
- $45° \le \phi \le 90°$

27.6.1.2 Festlegen der Kategorie

→ siehe Bild 6.9 im Anhang
Ein Endauflager wird üblicherweise in die Kategorie 1 eingestuft. Außer $c > 1{,}5 \cdot h_w$ (vgl. Bild 6.9)

Ein Zwischenauflager wird üblicherweise in die Kategorie 2 eingestuft.

c: [mm] hier: Überstand des Profils über das Endauflager
h_w: [cm] Steghöhe zwischen den Mittelebenen der Gurte

27.6.1.3 Wirksame Auflagerlänge

Kategorie 1:
$L_a = 10mm$

Kategorie 2:

$L_a = s_s \le 200mm$	wenn $\beta_v \le 0{,}2$
$L_a = 10mm$	wenn $\beta_v \ge 0{,}3$
L_a = linear interpolieren	wenn $0{,}2 < \beta_v < 0{,}3$

$\beta_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|}$ [ ] $|V_{Ed,1}| \ge |V_{Ed,2}|$

s_s: [mm] Länge der steifen Lasteinleitung. Z.B. Auflagerbreite
$V_{Ed,1}$: [KN] Querkraft auf der einen Seite der örtlichen Lasteinleitung.
$V_{Ed,2}$: [KN] Querkraft auf der anderen Seite der örtlichen Lasteinleitung.

27.6.1.4 Beiwert α

Kategorie 1:
Profilbleche: α = 0,075
Kassettenprofile und Hutprofile: α = 0,057
Kategorie 2:
Profilbleche: α = 0,15
Kassettenprofile und Hutprofile: α = 0,115

27.6.1.5 Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit je Steg

$$R_{w,Rk} = \alpha \cdot t^2 \cdot \sqrt{f_y \cdot E} \cdot \left[1 - 0{,}1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}\right] \cdot \left[0{,}5 + \sqrt{0{,}02 \cdot \frac{L_a}{t}}\right] \cdot \left[2{,}4 + \left(\frac{\phi}{90°}\right)^2\right] \text{ [N/Steg]}$$

$$R_{w,Rd} = \frac{R_{w,Rk}}{\gamma_{M1}} \text{ [N/Steg]} \qquad R_{w,Rd,ges} = 2 \cdot R_{w,Rd} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{1000} \text{ [KN/m]}$$

α: [ ] Beiwert, → siehe oben
ϕ: [°] Neigung des Steges in Bezug auf die Flansche
t: [mm] Blechdicke
r: [mm] innerer Biegeradius der Ecken
L_a: [mm] wirksame Lasteinleitungslänge, → siehe oben
f_y: [N/mm²] Streckgrenze
S235: f_y = 235 S355: f_y = 355
S275: f_y = 275 S450: f_y = 440
(Werte für t ≤ 40mm)
E: [KN/cm²] E-Modul des Metallprofils.
Stahl: E = 210.000
x: [m] Abstand zwischen zwei Mittellinien der Trapezprofilflansche
γ_{M1}: [ ]Sicherheitsbeiwert. γ_{M1} = 1,1

27.6.2 Stegkrüppeln für 1 nicht ausgesteiften Steg: (z.B. Z-Profil)

27.6.2.1 Anwendungsgrenzen

Die Beanspruchbarkeit eines nicht ausgesteiften Steges kann wie folgt ermittelt werden wenn gilt:

- $\frac{h_w}{t} \le 200$
- $\frac{r}{t} \le 6$

$45° \le \phi \le 90°$

h_w: [cm] Steghöhe zwischen den Mittelebenen der Gurte

27.6.2.2 Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit

→ siehe DIN EN 1993-1-3/6.1.7.2

27.7 Momententragfähigkeit

27.7.1 Hinweise

Allgemeines Vorgehen:

- Wirksamen Breiten im Druckgurt bestimmen (wenn Bedingung für OK 4 erfüllt)
- Lage der neuen Schwerelinie berechnen
- Wirksame Breiten der Stege bestimmen
- Lage der neuen Schwerelinie berechnen
- Flächenträgheitsmoment I_{eff} ermitteln. Dabei $s_{eff,n}$ und s_{eff1} nicht in die neue Schwerlinie verschieben!
- Momententragfähigkeit ermitteln

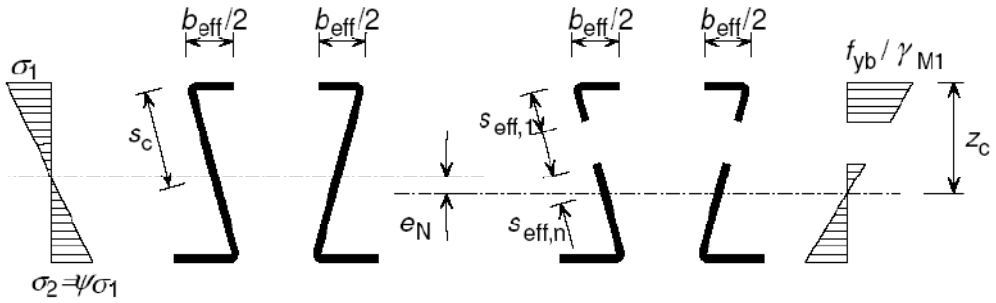


Abbildung 44: Wirksamer Querschnitt bei Biegung [7]

27.7.2 Wirksame Breite des Gurtes

Die wirksame Breite des Gurtes wird nach DIN EN 1993-1-5 ermittelt.
→siehe Nachweis Plattenbeulen

27.7.3 Wirksame Breite des Steges

Die wirksame Breite des Steges wird nach DIN EN 1993-1-3 ermittelt.

$s_{eff,1} = 0{,}76 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ [mm]

$s_{eff,n} = 1{,}5 \cdot s_{eff,1}$ [mm]

$s_n = \frac{e_c}{\sin\phi}$ [mm]

$s_{eff,1} + s_{eff,n} < s_n$ → Steg trägt nicht voll mit.
$s_{eff,1} + s_{eff,n} \geq s_n$ → Steg trägt voll mit.

t: [mm] Blechdicke des Steges
e_c: [mm] Höhe des Druckbereichs
E: [N/mm²] E-Modul des Stahlprofils
E = 210000
f_y: [N/mm²] Streckgrenze des Stahlprofils

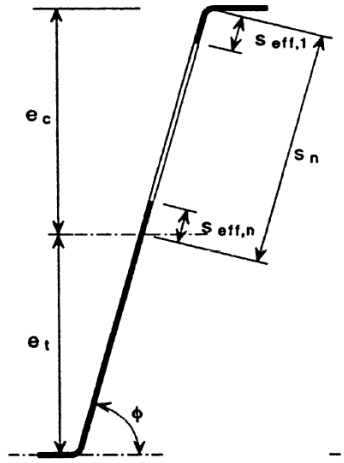


Abbildung 45: Wirsame Querschnittsfläche des Steges [7]

27.7.4 Berechnung der endgültigen Querschnittsgrößen

Lage des neuen Schwerpunktes:

$$z_{s,neu} = \frac{\Sigma A_i \cdot z_i}{A_{ges}} \quad [mm]$$

Flächenträgheitsmoment je Steg:

$$I_{y,eff,Steg} = \Sigma \frac{b_i \cdot (h_i)^2}{12} + \Sigma A_i \cdot z_i^2 \quad [mm^4]$$

Hinweis zum geneigten Querschnittsteil:

$$I_{y,eff,Steg} = \Sigma \frac{b_\perp \cdot (s_{eff,\perp})^2}{12} + \Sigma A_i \cdot z_i^2 \quad [mm^4]$$

mit $b_\perp = \frac{b}{\sin \phi}$ $\quad s_{eff,\perp} = s_{eff} \cdot \sin \phi$

Hinweise:

- $s_{eff,n}$ und $s_{eff,1}$ werden nicht auf die neue Nulllinienlage verschoben. (vgl. Bild)
- Das Flächenträgheitsmoment wird bezogen auf die neue Lage des Schwerpunktes ($z_{s,neu}$) ermittelt.

Gesamtträgheitsmoment:

$$I_{y,eff} = \frac{I_{y,eff,Steg} \cdot 2}{x} \quad [mm^4/m]$$

Wiederstandsmoment:

$$W_{y,eff} = \frac{I_{y,eff}}{z_{max}} \quad [mm^3]$$

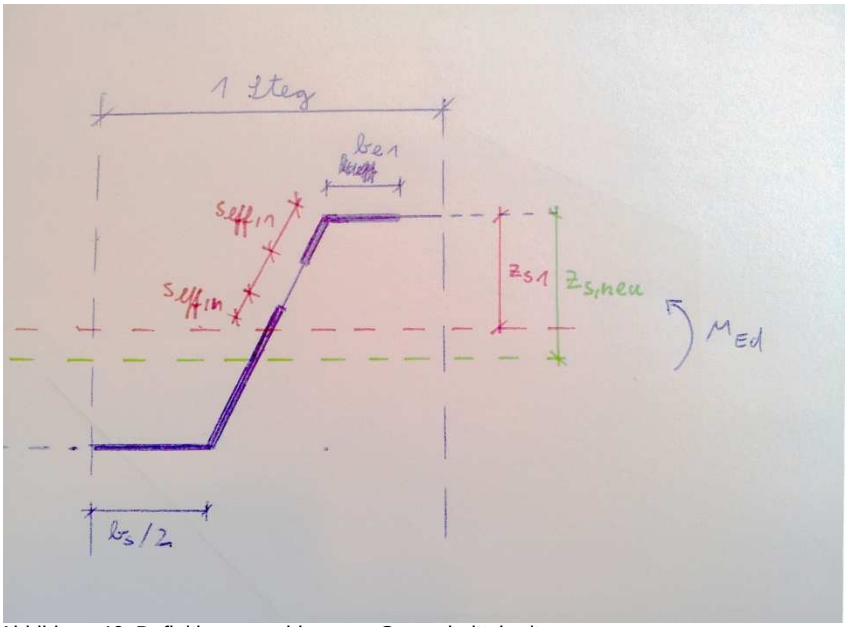


Abbildung 46: Definition von wirksamen Querschnittsbreiten

A_{ges}: [cm²] Querschnittsfläche abzüglich der Ausfallfläche im Steg und Flansch

z_i: [cm] Lage der einzelnen Flächenschwerpunkte, bezogen auf den oberen Querschnittsrand.

x: [m] Abstand zwischen 2 benachbarten Tiefsicken

27.7.5 Momententragfähigkeit

$$M_{c,Rk} = W_{eff} \cdot 10^{-5} \cdot f_y \quad [KNm/m]$$

$$M_{c,Rd} = \frac{M_{c,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad [KNm/m]$$

W_{eff}: [mm³] Wiederstandsmoment, → siehe oben

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze

S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5

S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0

(Werte für t ≤ 40mm)

γ_{M1}: [ ]Sicherheitsbeiwert. γ_{M1} = 1,1

27.8 Nachweise:

Im Feld:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1{,}0$$

Am Endauflager:

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1{,}0$$

Am Zwischenauflager:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1{,}0$$ (andrückende Beanspruchung)

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1{,}0$$ (andrückende Beanspruchung)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 0{,}5$$ (abhebende Beanspruchung)

$$0{,}5 < \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1{,}0 \rightarrow \text{Interaktion erf.:}\ \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \left(2 \bullet \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1{,}0$$

Interaktion zwischen Moment und Auflagerkraft:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1{,}25$$

$M_{y,Ed}$: [KNm] Biegemoment um die y-Achse.
$M_{c,Rd}$: [KNm] Momententragfähigkeit um die y-Achse,
→ siehe oben
F_{Ed}: [KN] einwirkende Auflagerkraft

Schubsteifigkeit von Trapezprofilscheiben

Trapezprofilbleche können eine seitlich Unverschiebliche Halterung von Trägern (Pfetten/ Riegel) darstellen, wenn vorh. S > erf. S ist. Bei Einhaltung dieser Bedingung kann auch von einer gebundenen Drehachse ausgegangen werden.

$$vorh.S = \frac{10^4}{K_1 + \frac{K_2}{L_s}} \bullet \frac{L_s}{n} \ (\bullet\ 0{,}2)^* \ [KN]$$

K_1: [m/KN] Wert aus Prüfbescheid
K_2: [m²/KN] Wert aus Prüfbescheid
n: Anzahl der vom Schubfeld auszusteifenden Träger (Bsp. Siehe unten)
L_s: Schubfeldlänge in Richtung der Profilierung

*80% Prozent Abminderung wenn Schubfeld an nur 2 Rändern gehalten ist, oder Profil nur in jeder 2. Tiefsicke befestigt ist.

$$erf.\ S = (E \bullet I_\omega \bullet \frac{\pi^2}{l^2} + G \bullet I_T + E \bullet I_Z \bullet \frac{\pi^2}{l^2} \bullet 0{,}25 \bullet h^2) \bullet \frac{70}{h^2} \ [KN]$$

I_ω: [cm^6] Schneider 8.46 vom gestützten Träger
I_T: [cm^4] Schneider 8.47 vom gestützten Träger
l: [cm] vom gestützten Träger
h: [cm] Höhe des Profils
G: [KN/cm²] Schubmodul = 8100

---

nach neueren Untersuchungen:

$$erf.\ S = 10{,}18 \bullet \frac{M_{pl,y,d} \bullet 1{,}1}{h} \ [KN]$$

$M_{pl,y,d}$: [KNm] Schneider 8.23
h: [m] Höhe des Profils

Beispiel zur Bestimmung von n:

$$n = \frac{5 + \overbrace{2 \bullet 0{,}5}^{\text{Randträger}}}{\underbrace{2}_{\text{zwei Schubfelder}}} \ [\ ]$$

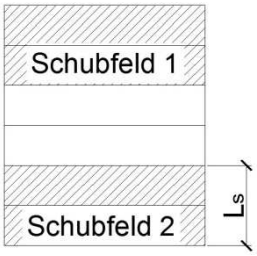


Abbildung 47: Definition des Schubfeldes

28 Bemessung eines Dachverbandes:

28.1 Windlastermittlung

28.1.1 Flächenlast auf Gebäude:

1 Dachverband:

→ $w_k = (c_{pe,10(D)} + c_{pe,10(E)}) \bullet q$ [KN/m²]

Hinweis: Dachverband muss Sog und Druck aufnehmen.

2 Dachverbände:

→ $w_k = c_{pe,10(D)} \bullet q$ [KN/m²]

Hinweis: Es wird angenommen, dass der eine Dachverband Windsog und der andere Dachverband Winddruck aufnimmt. Auf der sicheren Seite werden beide Verbände mit dem größeren Außendruckbeiwert $c_{pe,10(D)}$ bemessen.

28.1.2 Horizontalkraft auf Dachverband:

Ohne Dachüberstand: $w_{v,k} = w_k \bullet 0{,}5 \bullet h_{ges}$

Mit Dachüberstand: $w_{v,k} = w_k \bullet \frac{h_{ges}^2}{2 \bullet h_1}$ [KN/m]

h_{ges}: Gebäudehöhe
h_1: h_{ges} - Dachüberstand

28.2 Imperfektion:

28.2.1 Normalkraft im Druckgurt des Dachverbandes

28.2.1.1 Schnittgrößen bekannt:

$$N_{Ed} = \frac{M_{Ed} \bullet 100}{h - t_F} + \frac{N}{2} \text{ [KN]}$$

M_{Ed}: [KNm] Bemessungsmoment im Dachbinder (inf. Auflast)
N_{Ed}: [KN] Gurtkraft aus dem Moment im Dachbinder
h: [cm] Höhe des Profils
t_F: [cm] Flanschdicke

28.2.1.2 Schnittgrößen unbekannt:

QK1 und QK2:

$$N_{Ed} = \frac{f_y \bullet W_{pl,y}}{(h - t_F) \bullet \gamma_{M0}} \text{ [KN]}$$

QK3:

$$N_{Ed} = \frac{f_y \bullet W_{el,y}}{(h - t_F) \bullet \gamma_{M0}} \text{ [KN]}$$

Hinweis: die beiden Formeln sind auf der sicheren Seite.

M_k: [KNm] Moment im Dachbinder (inf. Auflast)
N_{Ed}: [KN] Gurtkraft aus dem Moment im Dachbinder
h: [cm] Höhe des Profils
t_F: [cm] Flanschdicke
$W_{pl,y}$: [cm³] plastisches Widerstandsmoment
→ $W_{pl,y} = S_{y,o} + S_{y,u}$
(bestimmen der NL → siehe Beispiele)
$W_{el,y}$: [cm³] elastisches Widerstandsmoment
→ siehe Schneider Bautabelle 8.161 ff.
f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: f_y = 23,5 S355: f_y = 35,5
S275: f_y = 27,5 S450: f_y = 44,0
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,0

28.2.2 Abminderungsfaktor für die Anzahl der auszusteifenden Riegel:

$$\alpha_m = \sqrt{0{,}5 \bullet \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \text{ [ ]}$$

Hinweis: auf der sicheren Seite α_m = 1,0

m: [ ] Anzahl der auszusteifenden Riegel

28.2.3 Verbandsvorkrümmung:

$$e_0 = \alpha_m \bullet \frac{l}{500} \text{ [m]}$$

l: [m] Spannweite des Dachverbandes

28.2.4 Ersatzstreckenlast:

$$q_{s,Ed} = \frac{n_R}{z} \bullet \frac{8 \bullet N_{Ed} \bullet e_0}{l^2} \text{ [KN/m]}$$

e_0: [m] Verbandsvorkrümmung
l: [m] Spannweite des Dachverbandes
n_R: [ ] Anzahl der Riegel mit Vorkrümmung
z: [ ] Anzahl der Dachverbände (i.d.R = 1 oder 2)

28.2.5 Schnittgrößenermittlung in einem Dachverband

$P_1 = e_{Ed} \bullet \frac{l}{2}$ [KN]

$P_2 = e_{Ed} \bullet \frac{l - a}{2}$ [KN]

$A = w_{D,Ed} \bullet \frac{l}{2}$ [KN]

$D_1 = P_2 \bullet \frac{d}{h}$ [KN]

d: [m] Länge des Diagonalstabes
h: [m] Höhe des Dachverbandes
l: [m] Spannweite des Dachverbandes
a: [m] Abstand der Pfosten
w_d: [KN/m] Bemessungswert der Windlast

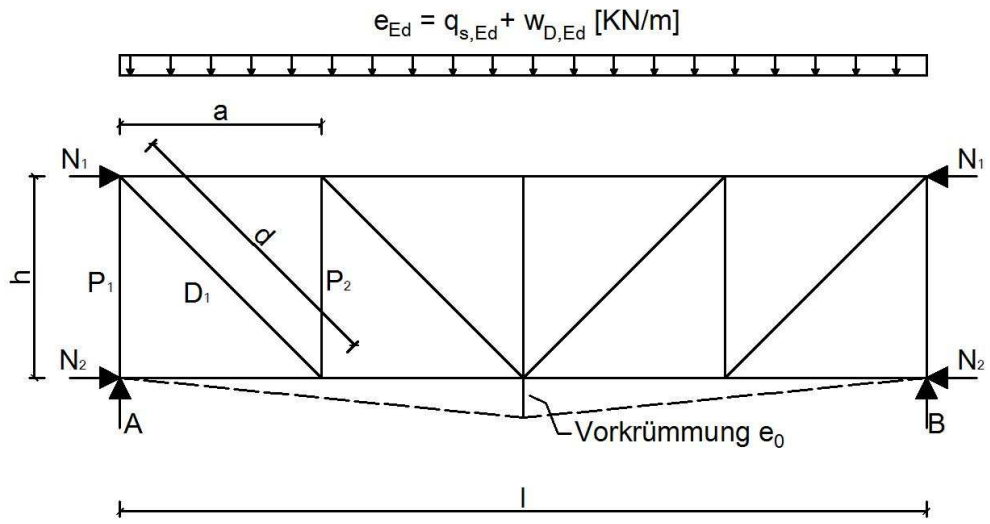


Abbildung 48: Dachverband

29 Bemessung Wandlängsverband, Wandquerverband & eingespannte Stütze

29.1 Hinweise:

- Ein System ist verschieblich wenn die Systempunkte sich verschieben können. Hallenrahmen und rahmenartige Tragwerke sind in der Regel verschiebliche Systeme.

29.2 Windlastermittlung

29.2.1 Flächenlast auf Gebäude:

1 Verband in Wandebene:

→ $w_k = (c_{pe,10(D)} + c_{pe,10(E)}) \bullet q$ [KN/m²]

Hinweis: Wandverband muss Sog und Druck aufnehmen.

2 Verbände in Wandebene:

→ $w_k = c_{pe,10(D)} \bullet q$ [KN/m²]

Hinweis: Es wird angenommen, dass der eine Wandverband Windsog und der andere Wandverband Winddruck aufnimmt. Auf der sicheren Seite werden beide Verbände mit dem größeren Außendruckbeiwert $c_{pe,10(D)}$ bemessen.

29.2.2 Horizontalkraft auf aussteifendes Element:

$w_v = w_k \bullet 0{,}5 \bullet h_{ges}$ [KN/m]

Hinweis: Es wird angenommen, dass die Hälfte der Last direkt in das Fundament geleitet wird.

$W_{v,k} = w_v \bullet \frac{b}{x}$ [KN]

Hinweis: Wenn die Aussteifung in Gebäudelängsrichtung untersucht wird und auf jeder Gebäudelängsseite ein Wandverband angeordnet ist: x = 2,0

h_{ges}: [m] Gebäudehöhe
b: [m] Belastete Gesamtbreite des Gebäudes
x: [ ] Anzahl der WV in Windrichtung

29.3 Imperfektionen

29.3.1 Abminderungsfaktor für die Tragwerkshöhe:

$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$ [ ] $2/3 \le \alpha_h \le 1{,}0$

h: [m] Systemlänge des verdrehten Stabes

29.3.2 Abminderungsfaktor für die Anzahl der Stützen:

$\alpha_m = \sqrt{0{,}5 \bullet \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$ [ ]

m: [ ] Anzahl der Stützen in einer Reihe. Dabei dürfen nur die Stützen mitgezählt werden, die mehr als 50% der durchschnittlichen Last übernehmen.

Hinweise:

- Gebäude gedanklich so zerlegen, dass einem aussteifenden Element die größte Einzugsfläche A_E, in der sich kein anderes aussteifendes Element befindet, zugeordnet wird.
- Bei einer eingespannten Stütze die nach dem Ersatzstabverfahren berechnet wird, wird deren Auflast bei der Ersatzlast nicht berücksichtigt, da diese bereits im χ-Wert berücksichtigt ist.

29.3.3 Anfangsschiefstellung

$\Phi = \frac{1}{200} \bullet \alpha_h \bullet \alpha_m$ [ ]

29.3.4 Ersatzlast pro aussteifendes Element

$H = \Phi \bullet \sum N_{Ed}$ [KN]

$\sum N_{Ed}$: [KN] Summe der vertikalen Stützenkräfte in der Einzugsfläche des aussteifenden Elementes.

29.4 Schnittgrößenermittlung in einem Wandverband

$D_1 = H_d \bullet \frac{l_D}{l_2}$ [KN]

l_D: [m] Länge des Diagonalstabes
l_2: [m] Abstand der Stützen

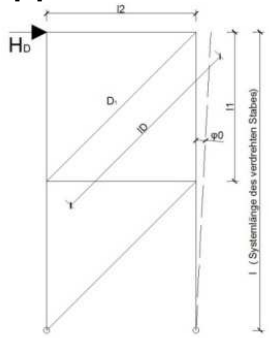


Abbildung 49: Wandverband

30 Bemessung eines Schubfeldes aus Trapezprofilen

30.1 Ermittlung des Schubflusses

Allgemein:

$T_{Ed} = \frac{V}{b}$ [KN/m]

Direkte Einleitung:

$T_{Ed} = \frac{q \cdot L}{2 \cdot b}$ [KN/m]

Über Lasteinleitungsträger: (vgl. Bild unten)

$T_{Ed} = \frac{q \cdot L}{3 \cdot b}$ [KN/m]

q: [KN/m] Einwirkung auf das Schubfeld
(i.d.R. hauptsächlich Windlast: $q = 0{,}5 \cdot (W_{D,k} + W_{S,k})$
GZT: $1{,}5 \cdot w_k$
GZG: $1{,}0 \cdot w_k$
L: [m] Längsrand des Schubfeldes
b: [m] Querrand des Schubfeldes

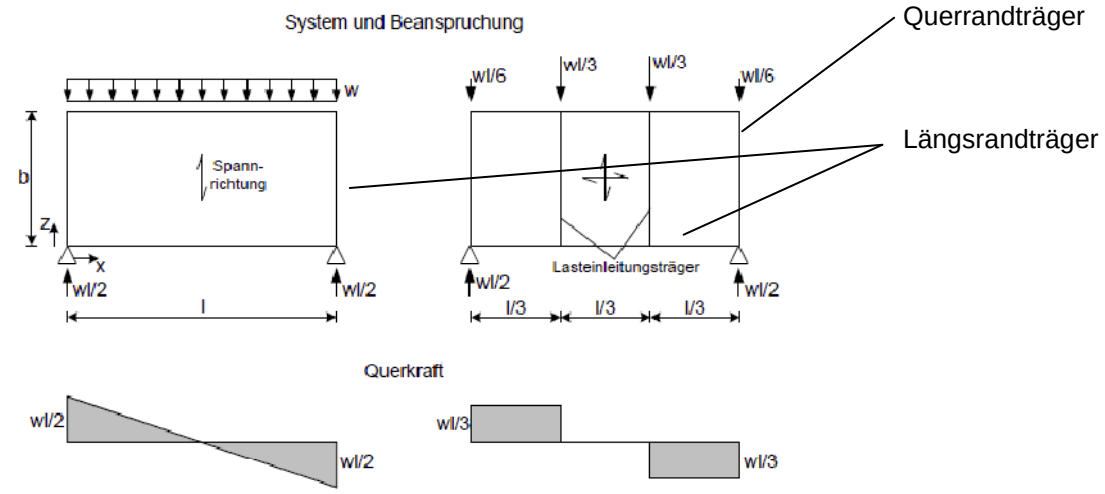


Abbildung 50: Schubfeldsysteme [13]

30.2 Reduzierung des Schubflusses

$L_s < \min L_s \rightarrow T_{i,Rk} = T_{i,Rk} \cdot \frac{L_s}{\min L_s}$ [KN/m]

$L_s \geq \min L_s \rightarrow$ keine Reduzierung

L_s: [m] Schubfeldlänge in Spannrichtung der Trapezprofile
$\min L_s$: [m] Mindestwert der Schubfeldlänge. → siehe Typenentwurf.

30.3 Nachweis Querbiegung

$T_{Ed} \leq \frac{T_{1,Rk}}{\gamma_{M1}}$ [KN/m]

T_{Ed}: [KN/m] **Schubfluss im GZT**, → siehe oben
$T_{1,Rk}$: [KN/m] charakteristischer Widerstandswert aus dem Spannungsnachweis.
→ siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiert. $\gamma_{M1} = 1{,}1$

30.4 Nachweis – Begrenzung der Relativverschiebung des Obergurtes

$T_{Ed} \leq \frac{T_{2,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$ [KN/m]

Hinweis:
- Nachweis notwendig um ein Reißen der Bitumenschicht zu verhindern.
- Bei nicht bituminös verklebtem Dachaufbau muss kein Nachweis geführt werden.

T_{Ed}: [KN/m] **Schubfluss im GZG**, → siehe oben
$T_{2,Rk}$: [KN/m] Grenzschubfluss für die Relativverformung h/20
→ siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
$\gamma_{M,ser}$: [ ] Sicherheitsbeiert. $\gamma_{M,ser} = 1{,}0$

30.5 Nachweis – Begrenzung der Winkeländerung des Gesamtschubfeldes

$L_s > L_g \rightarrow$ Nachweis kann entfallen

$L_s \leq L_g \rightarrow T_{Ed} \leq \frac{T_{3,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$ [KN/m]

L_s: [m] Schubfeldlänge in Spannrichtung der Trapezprofile
L_g: [m] → siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
T_{Ed}: [KN/m] **Schubfluss im GZG**, → siehe oben
$T_{3,Rk}$: [KN/m] Grenzschubfluss zur Einhaltung des Gleitwinkels 1/750
→ siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
$\gamma_{M,ser}$: [ ] Sicherheitsbeiert. $\gamma_{M,ser} = 1{,}0$

30.6 Nachweis – Stegkrüppeln am Endauflager durch zusätzliche Kräfte

30.6.1 Einwirkung

$R_{q,d} = x \bullet q_{\perp,Ed} \bullet L$ [KN/m] $R_{Ed,s} = K_3 \bullet T_{Ed}$ [KN/m] $R_{A,d} = R_{Ed,s} + R_{q,d}$ [KN/m]	x: [ ] Tafelwert, bzw. Anteil von q der in das Endauflager eingeleitet wird. Zweifeldträger: x = 0,375 $q_{\perp,Ed}$: [KN/m²] Flächenlast quer zum Trapezprofil. $q_{\perp,Ed} = 1{,}35 \bullet (g_T + g_A) + 1{,}5 \bullet q_k$ g_T: [KN/m²] Eigengewicht des Trapezprofilblechs → siehe Prüfbescheid des Trapezprofils g_A: [KN/m²] Eigengewicht des Dachaufbaus q_k: [KN/m²] veränderliche Dachauflast L: [m] Spannweite des Trapezprofils K_3: [ ] Faktor für die Quer- und Auflagerkraft → siehe Prüfbescheid des Trapezprofils T_{Ed}: [KN/m] Schubfluss im GZT, → siehe oben $R_{Ed,s}$: [KN/m] zusätzliche Querkraft infolge Schubfeldbeanspruchung $R_{q,d}$: [KN/m] Querkraft infolge Flächenlast

30.6.2 Nachweis:

$R_{A,d} \leq \frac{R_{w,Rk,A}}{\gamma_{M1}}$ [KN/m]	$R_{w,Rk,A}$: [KN/m] charakteristischer Tragfähigkeitswert für andrückende Flächenlast. → siehe Prüfbescheid des Trapezprofils γ_{M1}: [ ] Sicherheitsbeiert. $\gamma_{M1} = 1{,}1$

30.7 Nachweis der Verbindungselemente

30.7.1 Hinweise

- Es wird angenommen, dass abhebende Kräfte (z.B. Windkräfte) nur über die Querlagerung abgetragen werden.

30.7.2 Längsrandträger

Abstand der Verbindungsmittel vorgegeben:

$V_{1,Ed} = T_{Ed} \bullet e$ [KN/VE]

Abstand der Verbindungsmittel unbekannt:

$$e = \min \begin{cases} 0{,}666 \text{ [m]} \\ \dfrac{V_{R,k}}{\gamma_M \bullet T_{Ed}} \text{ [m]} \end{cases}$$

T_{Ed}: [KN/m] Schubfluss im GZT, → siehe oben
e: [m] Abstand der Verbindungselemente entlang des Längsträgers
$V_{R,k}$: [KN] Aufnehmbare Querkraft der Befestigung
→ siehe Zulassungsbescheid des Verbindungsmittel
t_{II}: [mm] Blechdicke der Unterkonstruktion.
Hier: Flanschdicke des Längsträgers.
t_I: [mm] Blechdicke des Bauteils am Kopf des Verbindungselementes.
Hier: Blechdicke des Trapezprofils
γ_M: [ ] Sicherheitsbeiwert. $\gamma_M = 1{,}33$
VE: [ ]Verbindungselement

30.7.3 Profiltafeln untereinander

Abstand der Verbindungsmittel vorgegeben:

$V_{1,Ed} = T_{Ed} \bullet e$ [KN]

Hinweis:
Die Beanspruchung der Verbindungselemente zwischen zwei Trapezprofilen, kann vereinfacht mit der Formel für die Beanspruchung der Verbindungsmittel am Längsrandträger ermittelt werden.

Abstand der Verbindungsmittel unbekannt:

$$e = \min \begin{cases} 0{,}666 \text{ [m]} \\ \dfrac{V_{R,k}}{\gamma_M \bullet T_{Ed}} \text{ [m]} \end{cases}$$

T_{Ed}: [KN/m] Schubfluss im GZT, → siehe oben
e: [m] Abstand der Verbindungselemente in Längsrichtung des Trapezprofils.
$V_{R,k}$: [KN] Aufnehmbare Querkraft der Befestigung
→ siehe Zulassungsbescheid des Verbindungsmittel
t_{II}: [mm] Blechdicke der Unterkonstruktion.
Hier: Blechdicke des Trapezprofils
t_I: [mm] Blechdicke des Bauteils am Kopf des Verbindungselementes.
Hier: Blechdicke des Trapezprofils
γ_M: [ ] Sicherheitsbeiwert. $\gamma_M = 1{,}33$

30.7.4 Querrandträger

30.7.4.1 Einwirkende Zugkraft

$R_{w,d} = x \bullet q_{\perp,Ed} \bullet L$ [KN/m]

$R_{s,d} = K_3 \bullet T_{Ed}$ [KN/m]

$R_{z,d} = (R_{w,d} + R_{s,d}) \bullet e$ [KN/VE]

Aufnehmbare Durchknöpfkraft:

$$Z_{Rd} = \frac{Z_{R,k} \bullet \alpha_I \bullet \alpha_M \bullet \alpha_E}{\gamma_M} \text{ [KN/VE]}$$

Nachweise:

$$\frac{R_{z,d} \bullet \gamma_M}{N_{R,k}} \le 1{,}0$$

$$\frac{R_{z,d}}{Z_{Rd}} \le 1{,}0$$

x: [ ] Tafelwert, bzw. Anteil von q der in das Endauflager eingeleitet wird.
Zweifeldträger: x = 0,375
$q_{\perp,Ed}$: [KN/m²] abhebende Flächenlast quer zur Dachebene.
$q_{\perp,Ed} = 1{,}0 \bullet (g_T + g_A) - 1{,}5 \bullet w_k$
g_T: [KN/m²] Eigengewicht des Trapezprofilblechs
→ siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
g_A: [KN/m²] Eigengewicht des Dachaufbaus
w_k: [KN/m²] Windsog orthogonal zur Dachebene (vereinfacht 1,0)
L: [m] Spannweite des Trapezprofils
K_3: [ ] Faktor für die Quer- und Auflagerkraft
→ siehe Prüfbescheid des Trapezprofils
T_{Ed}: [KN/m] Schubfluss im GZT, → siehe oben
e: [m] Abstand der Verbindungselemente in Querrichtung des Trapezprofils. (entspricht i.d.R dem Abstand zwischen zwei Tiefsicken)
VE: [ ]Verbindungselement
$Z_{R,k}$: [KN/VE] siehe Typenentwurf Trapezprofil
γ_M: [ ] Sicherheitsbeiwert. $\gamma_M = 1{,}33$

30.7.4.2 Einwirkende Querkraft aus Schub

$V_{s,d} = T_{Ed} \bullet e$ [KN/VE]

T_{Ed}: [KN/m] Schubfluss im GZT, → siehe oben
e: [m] Abstand der Verbindungselemente in Querrichtung des Trapezprofils. (entspricht i.d.R dem Abstand zwischen zwei Tiefsicken)

30.7.4.3 Einwirkende Querkraft aus äußerer Lasteinleitung

Direkte Lasteinleitung:
$V_{L,d} = q_{Ed} \bullet e$ [KN/VE]

Lasteileitung über Lasteinleitungsträger:
→ keine Querkraft aus äußerer Belastung

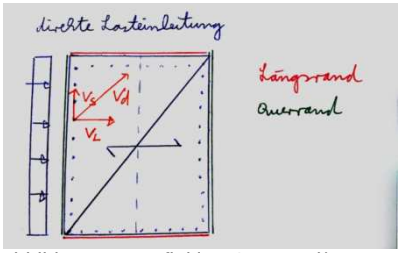


Abbildung 51: Definition Querrand/Längsrand

q_{Ed}: [KN/m] in das Schubfeld eingeleitete Linienlast
(i.d.R. $q_{Ed} = 1,5 \bullet w_{D,k}$)
$w_{D,k}$: [KN/m] Winddruckkraft in Dachebene
e: [m] Abstand der Verbindungselemente in Querrichtung des Trapezprofils. (entspricht i.d.R dem Abstand zwischen zwei Tiefsicken)
VE: [ ]Verbindungselement

30.7.4.4 Interaktion zwischen Querkraft und Zug

Resultierende Querkraft: (vgl. Bild)

$$V_d = \sqrt{V_{s,d}^2 + V_{L,d}^2} \quad [KN/VE]$$

Interaktion:

$$\frac{R_{z,d} \bullet \gamma_M}{N_{R,k}} + \frac{V_d \bullet \gamma_M}{V_{R,k}} \leq 1,0$$

V_d: [KN] Querkraftbeanspruchung der Verbindungsmittel am Querrand
$V_{s,d}$: [KN] Querkraftbeanspruchung infolge Schubfeldbeanspruchung. → siehe oben
$V_{L,d}$: [KN] Querkraftbeanspruchung infolge äußerer Belastung. → siehe oben

$R_{z,d}$: [KN] Zugkraft im Verbindungsmittel infolge äußerer abhebender Belastung und Schubfeldwirkung. → siehe oben
N_{Rk}: [KN] aufnehmbare Zugkraft des Verbindungsmittels. → siehe Zulassung
V_{Rk}: [KN] aufnehmbare Querkraft des Verbindungsmittels. → siehe Zulassung
γ_M: [ ] Sicherheitsbeiwert. $\gamma_M = 1,33$

30.7.5 Zwischenauflager quer

$R_{z,d} = x \bullet q_{\perp,Ed} \bullet L \bullet e$ [KN/VE]

Bei Lasteinleitung über Lasteinleitungsträger
$V_{s,d} = T_{Ed} \bullet e$ [KN/VE]

Nachweis:

$$\frac{R_{z,d} \bullet \gamma_M}{N_{R,k}} \leq 1,0$$

$$\frac{R_{z,d} \bullet \gamma_M}{N_{R,k}} + \frac{V_{s,d} \bullet \gamma_M}{V_{R,k}} \leq 1,0$$

$R_{z,d}$: [KN] Zugbelastung des Verbindungsmittel
x: [ ]Tafelwert, bzw. Anteil der Last die in das Zwischenauflager geht.
Zweifeldträger: x = 1,25
$q_{\perp,Ed}$: [KN/m²] abhebende Flächenlast quer zur Dachebene.
$q_{\perp,Ed} = 1,0 \bullet (g_T + g_A) - 1,5 \bullet w_k$
L: [m] Länge eines Feldes
e: [m] Abstand der Verbindungsmittel parallel zum Querrand
γ_M: [ ] Sicherheitsbeiwert. $\gamma_M = 1,33$

31 Schubfeld Rahmenknoten

31.1 Hinweise

- Das Schubfeld ist auf allen Seiten durch Randsteifen begrenzt.
- Es wird angenommen, dass die Randsteifen nur Normalkräfte aufnehmen können und das Schubfeld nur Schubspannungen aufnehmen kann.
- Das Vorgehen wurde aus dem Buch Stahlbau Praxis nach EC3, Wagenknecht übernommen.

31.2 Zusammenstellen der Schnittgrößen an der Stelle 3 und 4

$N_3 = N_1$ [KN]
$N_4 = N_2$ [KN]
$V_3 = V_1$ [KN]
$V_4 = V_2$ [KN]
$M_3 = |M_1| - |V_1| \bullet e_3$ [KNm]
$M_4 = |M_2| - |V_2| \bullet e_4$ [KNm]

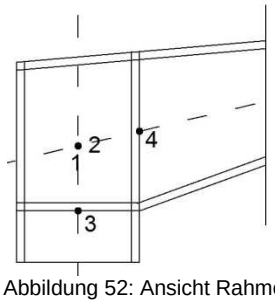


Abbildung 52: Ansicht Rahmeneck

31.3 Umrechnen der Schnittgrößen in horizontale und vertikale Komponente

$N_x = N \bullet \cos \alpha$

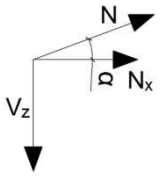


Abbildung 53: Kräfte im Mittelpunkt des Schubfeldes

31.4 Berechnen der Knotenkräfte

$F_{b,4} = \frac{M_4}{h_4} + \frac{N_4}{2}$ [KN]
$F_{t,4} = \frac{M_4}{h_4} + \frac{N_4}{2}$ [KN]
$F_{l,3} = \frac{M_3}{h_3} + \frac{N_3}{2} + \frac{V_3}{2} \bullet \tan \alpha_b$ [KN]
$F_{r,3} = \frac{M_3}{h_3} + \frac{N_3}{2} + \frac{V_3}{2} \bullet \tan \alpha_b$ [KN]
$V_{b,3} = \frac{V_3}{\cos \alpha_b}$ [KN]

Hinweis: Vorzeichen sind von den äußeren Schnittgrößen abhängig!

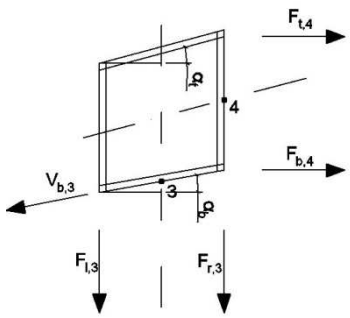


Abbildung 54: Ansicht Schubfeld

31.5 Schnittgrößen der Randstreifen

$N_b = \frac{F_{b,4}}{\cos \alpha_b}$ [KN]
$N_t = \frac{F_{t,4}}{\cos \alpha_t}$ [KN]
$N_l = F_{l,3}$ [KN]
$N_{r,1} = F_{r,3} + F_{b,4} \bullet \tan \alpha_b$ [KN]
$N_{r,2} = F_{t,4} \bullet \tan \alpha_t$ [KN]

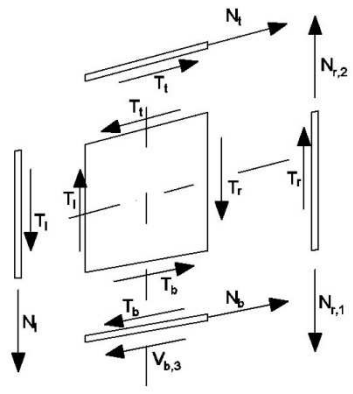


Abbildung 55: Ansicht Schubfeld mit Randsteifen

31.6 Kräfte im Schubfeld

$T_b = - V_{b,3} + N_b$ [KN]
$T_t = - N_t$ [KN]
$T_l = - N_1$ [KN]
$T_r = V_4 + N_{r,1} - N_{r,2}$ [KN]

31.7 Nachweis der Schubspannungen

$\tau = \frac{T_i}{h_i \bullet t}$ [KN/cm²] $\leq!$ $\tau_{R,d}$

t: [cm]
h_i: [cm]

32 Ermittlung der Umlenkkraft

32.1 Vorgehen

1.) Ermittlung von Horizontallasten
(Wind + Schiefstellung)
2.) Berechnen des Momentes im Dachverband:
Draufsicht:

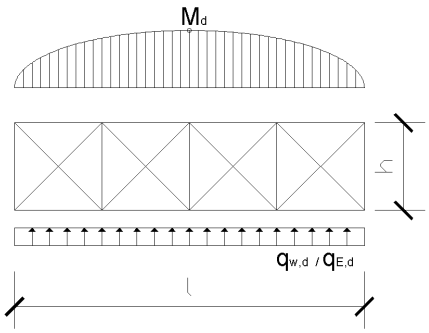


Abbildung 56: Dachverband

$M_{w,d} = \frac{w_d \cdot l^2}{8}$ bzw. $M_{E,d} = \frac{q_{Ed} \cdot l^2}{8}$

3.) Berechnen der Normalkraft im Riegel infolge der Horizontallasten

$N_{d,w} = \frac{M_{wd}}{h}$ $N_{E,d} = \frac{M_{E,d}}{h}$

h: [m] Breite der Verbandfeldes

4.) Ansicht:

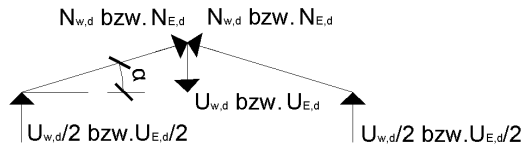


Abbildung 57: Kräfte im Riegel des Dachverbandes

$U_{wd} = 2 \cdot N_{wd} \cdot \sin \alpha$
$U_{Ed} = 2 \cdot N_{ed} \cdot \sin \alpha$

N_{Gd}: [KN] Druckkraft

33 Ersatzlasten für geometrische Imperfektionen

33.1 Hinweise:

Wenn die Geschosslast H_{E1} berechnet werden soll, muss die Vertikalkraft von diesem Geschoss mit dem Schiefstellungswinkel multipliziert werden.

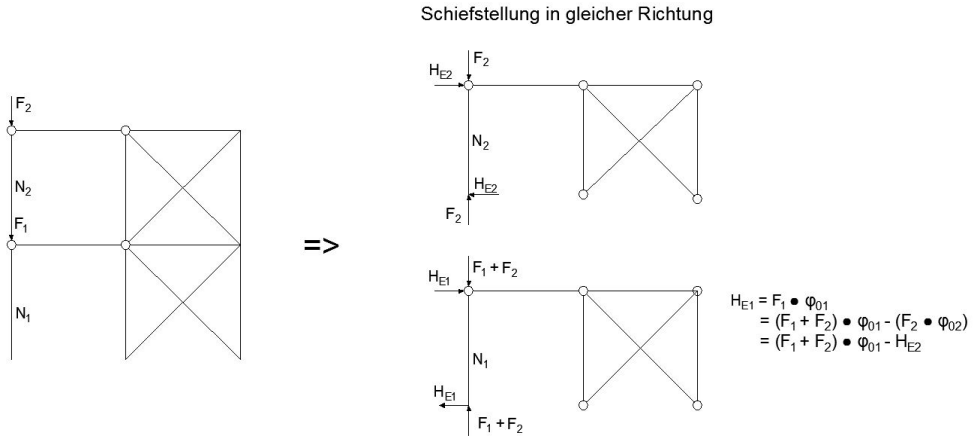


Abbildung 58: Beispiel zur Bestimmung von Ersatzlasten

34 Nachweis Stützenfuß

34.1 Nachweis der Betonpressung:

$$\sigma_p = \frac{V_d}{h_z \bullet b} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

$$f_{cd} = 0.85 \bullet \frac{f_{ck}}{1{,}5} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

Nachweis: $f_{cd} \geq! \sigma_p$

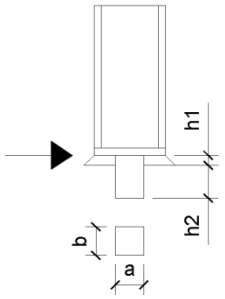


Abbildung 59: Ansicht Stützenfuß

V_d: [KN] Auflagerkraft
b: [cm] Breite der Schubknagge senkrecht zur Auflagerkraft

34.2 Nachweis Schubkangge

34.2.1 Einwirkungen

$$M_d = V_d \bullet (h_1 + 0{,}5 \bullet h_2) \quad [\text{KNm}]$$

$$V_d = V_d \quad [\text{KN}]$$

$$\sigma = \frac{M_d}{W_y} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

doppel T-Profil: $\tau = \frac{V_d}{A_{steg}}$

Rechteckprofil: $\tau = 1{,}5 \bullet \frac{V_d}{A_{ges}}$

W_y: [cm³] Widerstandsmoment
für Stahlprofile siehe Schneider 8.161 ff
für Vollquerschnitt $W_y = \frac{b \bullet h^2}{6}$

34.2.2 Grenzspannungen

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \bullet \gamma_{M0}} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

f_y: [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23{,}5$ S355: $f_y = 35{,}5$
S275: $f_y = 27{,}5$ S450: $f_y = 44{,}0$
(Werte für t ≤ 40mm)
γ_{M0}: Teilsicherheitsbeiwert = 1,0

34.2.3 Nachweise

$$\frac{\sigma}{\sigma_{Rd}} \leq 1{,}0 \text{ und } \frac{\tau}{\tau_{Rd}} \leq 1{,}0$$

wenn $\frac{\sigma}{\sigma_{Rd}} \leq 0{,}5$ oder $\frac{\tau}{\tau_{Rd}} \leq 0{,}5$

→ Keine Vergleichsspannung σ_v

sonst: $\sigma_v = \sqrt{\sigma_d^2 + 3 \bullet \tau_d^2}$ [KN/cm²]

34.3 Nachweis Schweißnähte

34.3.1 Einwirkungen

für ein Doppel T-Profil:

$$\sigma_{\perp}^{M} = \frac{M_d}{2 \cdot a_w \cdot b \cdot (h - t_f)} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau_{\parallel}^{N} = \frac{V_d}{2 \cdot a_w \cdot d} \quad [KN/cm^2]$$

b: [cm] Breite des Flansches
a_w: [cm] Schweißnahtdicke
h: [cm] Höhe des Profils
t_f: [cm] Flanschdicke
d: [cm] Höhe des Steges, siehe Schneider 8.161 ff

für ein Rechteckprofil:

$$I_w = 2 \cdot a_w \cdot \frac{a^3}{12} + 2 \cdot a_w \cdot z^2 \quad [cm^4]$$

$$W_w = \frac{I_w}{z} \quad [cm^3]$$

$$A_w = 2 \cdot a_w \cdot a \quad [cm^2]$$

$$\sigma_{\perp}^{M} = \frac{M_d}{W_w} \quad [KN/cm^2]$$

$$\tau_{\parallel}^{N} = \frac{V_d}{A_w} \quad [KN/cm^2]$$

z: [cm] = b/2
a: [cm] Breite der Knagge in Belastungsrichtung,
→siehe Skizze

34.3.2 Grenzspannungen:

$$f_{1,w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$f_{2,w,Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

f_u: [KN/cm²] Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
S235: $f_u = 36$ S355: $f_u = 49$ S460: $f_u = 54$
S275: $f_u = 43$ S420: $f_u = 52$
β_w: Korrelationsbeiwert
S235: $\beta_w = 0{,}80$ S355: $\beta_w = 0{,}90$ S460: $\beta_w = 0{,}85$
S275: $\beta_w = 0{,}85$ S420: $\beta_w = 0{,}88$
γ_{M2}: [ ] Sicherheitsbeiwert = 1,25

34.3.3 Nachweise:

$$\sigma_{w,v} = \sqrt{\left(\sigma_{\perp}^{M}\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_{\parallel}^{N}\right)^2} \quad [KN/cm^2]$$

Nachweise:

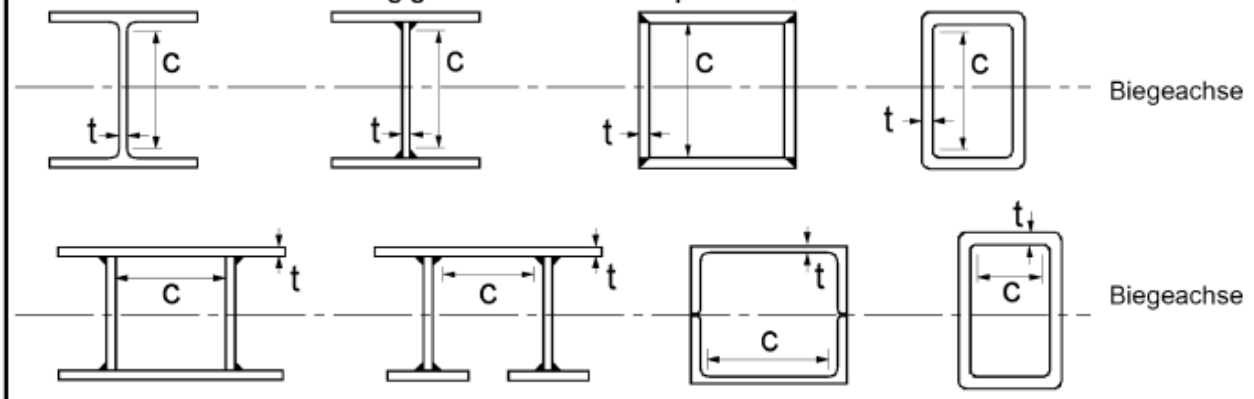
$\sigma_{w,v} \le f_{1,w,Rd}$ und $\sigma_{\perp}^{M} \le f_{2,w,Rd}$

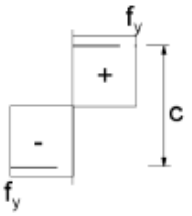
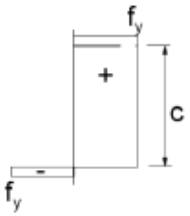
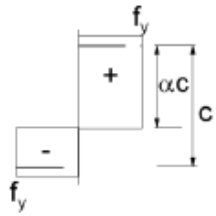
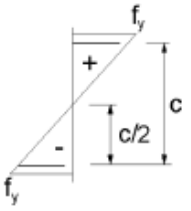
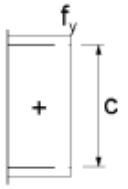
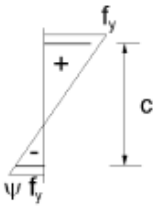
35 Anhang

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

Abbildung 60: Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben [6]

Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile



Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$c/t \le 72\varepsilon$	$c/t \le 33\varepsilon$	für $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 83\varepsilon$	$c/t \le 38\varepsilon$	für $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{41{,}5\varepsilon}{\alpha}$
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
3	$c/t \le 124\varepsilon$	$c/t \le 42\varepsilon$	für $\psi > -1$: $c/t \le \frac{42\varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33\psi}$ für $\psi \le -1$[a]: $c/t \le 62\varepsilon\,(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$

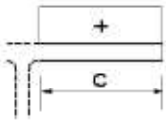
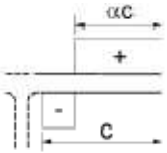
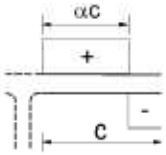
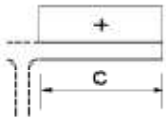
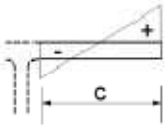
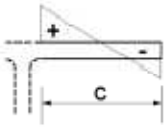
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

[a] Es gilt $\psi \le -1$ falls entweder die Druckspannungen $\sigma \le f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > \frac{f_y}{E}$ sind.

Abbildung 61: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile [8]

Einseitig gestützte Flansche

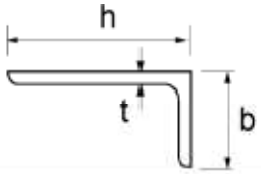
Gewalzte Querschnitte | Geschweißte Querschnitte

Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
		freier Rand im Druckbereich	freier Rand im Zugbereich
Spannungs-verteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$c/t \le 9\varepsilon$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \le 10\varepsilon$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \le \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Spannungs-verteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
3	$c/t \le 14\varepsilon$	$c/t \le 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Für k_σ siehe EN 1993-1-5	

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

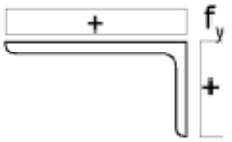
Abbildung 62: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile [8]

Winkel

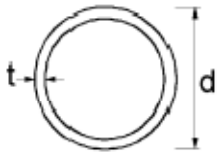


Siehe auch „einseitig gestützte Flansche“ in Tabelle 5.2, oben

gilt nicht für Winkel mit durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen

Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile
Spannungs-verteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)	
3	$h/t \le 15\varepsilon$ AC und AC $\frac{b+h}{2t} \le 11{,}5\varepsilon$

Runde Hohlquerschnitte



Klasse	auf Biegung und/oder Druck beanspruchte Querschnittsteile
1	$d/t \le 50\varepsilon^2$
2	$d/t \le 70\varepsilon^2$
3	$d/t \le 90\varepsilon^2$ ANMERKUNG Für $d/t > 90\varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6.

$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Abbildung 63: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile [8]

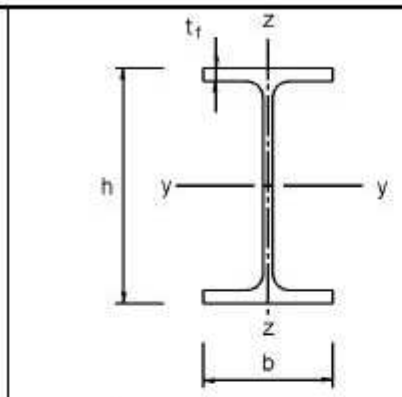
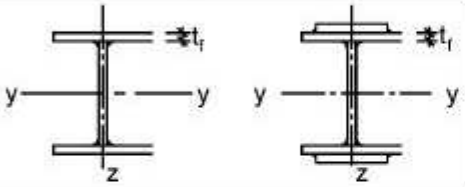
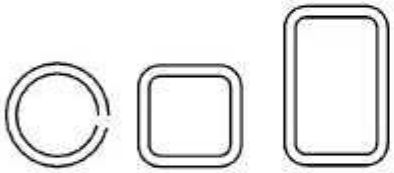
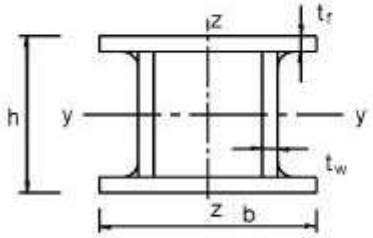
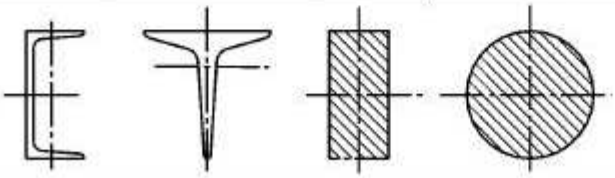
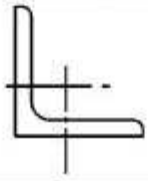
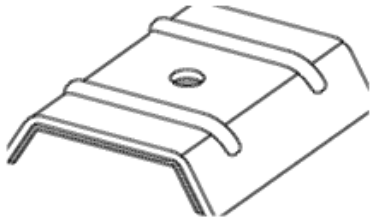
Querschnitt		Begrenzungen		Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte		$h/b > 1{,}2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a_0 a_0
			40 mm < $t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1{,}2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c
Geschweißte I-Querschnitte		$t_f \leq 40$ mm		y-y z-z	b c	b c
		$t_f > 40$ mm		y-y z-z	c d	c d
Hohlquerschnitte		warmgefertigte		jede	a	a_0
		kaltgefertigte		jede	c	c
Geschweißte Kastenquerschnitte		allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)		jede	b	b
		dicke Schweißnähte: $a > 0{,}5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		jede	c	c
U-, T- und Vollquerschnitte				jede	c	c
L-Querschnitte				jede	b	b

Abbildung 64: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts [8]

Lage der Profilbleche		Befestigung am		Abstand der Befestigungen		Scheiben-durch-messer	C_{100}	$b_{T,max}$
Positiv[a]	Negativ[a]	Untergurt	Obergurt	$e = b_R$	$e = 2b_R$	mm	kNm/m	mm
Bei Auflast:								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_a	10,0	40
	×		×		×	K_a	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
Bei abhebender Last:								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40

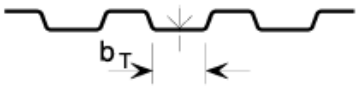
Dabei ist b_R der Rippenabstand;
b_T die Breite des an der Pfette angeschlossenen Untergurtes des Trapezblechprofils.

K_a steht für eine Stahlabdeckplatte mit $t \geq 0{,}75$ mm (siehe Darstellung)

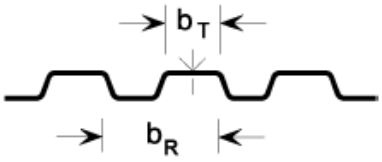


Die angegebenen Werte gelten bei:
- Schraubendurchmesser: ∅ = 6,3 mm;
- Unterlegscheibendicke: $t_w \geq$ 1,0 mm.

Profilbefestigung
- am Untergurt:

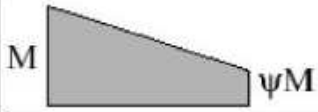
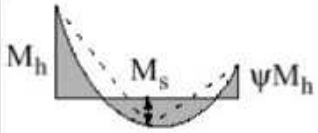
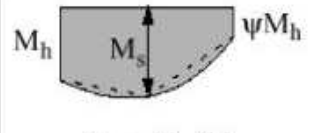


- am Obergurt:



[a] Die Lage des Profilblechs ist positiv, wenn der schmalere Gurt auf der Pfette liegt, und negativ, wenn der breitere Gurt auf der Pfette liegt.

Abbildung 65: Drehfedersteifigkeit C_{100} für Trapezblechprofile [7]

Momentenverlauf	Bereich		C_{my} und C_{mz} und C_{mLT}	
			Gleichlast	Einzellast
	$-1 \le \psi \le 1$		$0,6 + 0,4\psi \ge 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \le \alpha_s \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \ge 0,4$
	$-1 \le \alpha_s < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$-0,8\alpha_s \ge 0,4$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \ge 0,4$
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \le \alpha_h \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \le \alpha_h < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$	AC $0,90+0,10\alpha_h(1+2\psi)$ AC
Für Bauteile mit Knicken in Form seitlichen Ausweichens sollte der äquivalente Momentenbeiwert als $C_{my} = 0,9$ bzw. $C_{mz} = 0,9$ angenommen werden.				
C_{my}, C_{mz} und C_{mLT} sind in der Regel unter Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den maßgebenden seitlich gehaltenen Punkten wie folgt zu ermitteln:				

Momenten-beiwert	Biegeachse	In der Ebene gehalten
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

Abbildung 66: Äquivalente Momentenbeiwerte C_m [8]

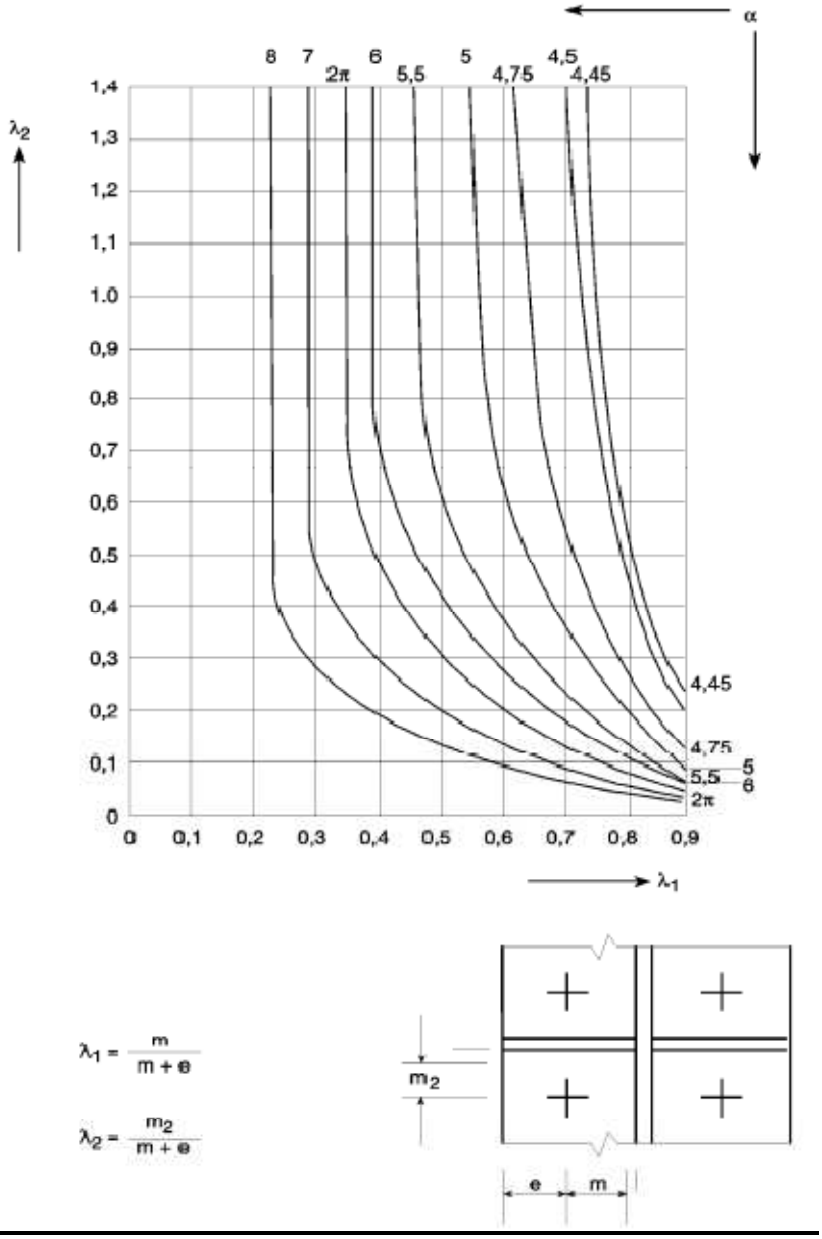
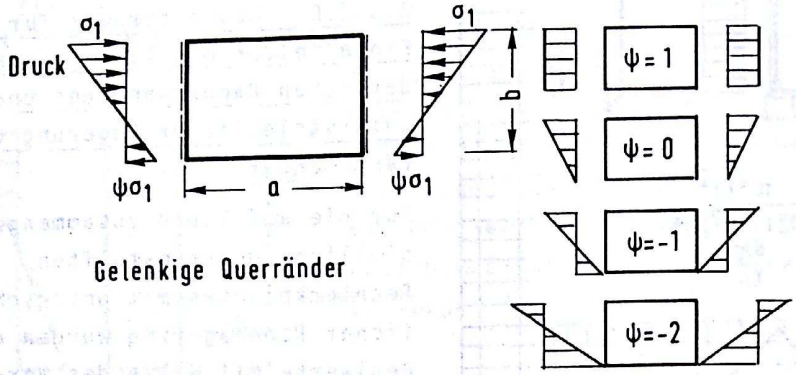


Abbildung 67: Werte für ausgesteifte Stützenflansche und Stirnbleche [6]

Beulwerte unterschiedlich gelagerter Rechteckplatten



Gelenkige Querränder

Parameter:

Seitenverhältnis $\alpha = \frac{a}{b}$

Spannungsverhältnis ψ

Aus den Diagrammen wird k_σ abgegriffen. Ideale Beulspannung:

$\sigma_{1Ki} = k_\sigma \cdot \sigma_e$

$\sigma_e = \frac{E\pi^2}{12(1-\mu^2)} \cdot (\frac{t}{b})^2 = \frac{\pi^2 K}{b^2 t}$

Lagerung der Längsränder:

gelenkiger Rand

eingespannter Rand

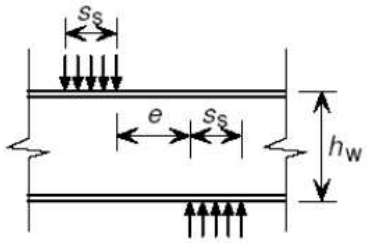
freier Rand

Die jeweils kleinsten Beulwerte min k_σ sind für 8 Lagerfälle in nachstehender Tabelle aufgelistet.

ψ	I	II	III		IV		V	
	I	II	IIIa	IIIb	IVa	IVb	Va	Vb
1	4	6.97	5.41	5.41	0.425	0.425	1.28	1.28
0.8	4.44	7.74	5.94	6.08			1.33	1.52
0.6	4.99	8.70	6.57	6.94			1.39	1.87
0.4	5.68	9.90	7.35	8.07			1.46	2.43
0.3	6.08	10.63	7.80	8.77			1.49	2.86
0.2	6.59	11.46	8.31	9.59			1.53	3.45
0.1	7.10	12.42	8.89	10.56			1.57	4.36
0	7.81	13.55	9.54	11.73	0.567	1.71	1.61	5.86
-0.1	8.55	14.85	10.28	13.14			1.65	8.50
-0.2	9.49	16.38	11.13	14.86			1.70	12.45
-0.3	10.57	18.22	12.11	16.91		8.34	1.74	16.01
-0.4	11.86	20.29	13.23	19.36		10.93	1.79	19.06
-0.5	13.40	22.73	14.52	22.15		13.03	1.85	22.11
-0.6	15.13	25.57	15.99	25.23		15.05	1.90	25.23
-0.7	17.10	28.66	17.67	28.54		17.10	1.96	28.54
-0.8	19.23	32.07	19.58	32.03		19.24	2.02	32.02
-0.9	21.51	35.71	21.67	35.70		21.49	2.09	35.69
-1	23.88	39.56	23.94	39.56	0.850	23.85	2.15	39.56
-1.1	26.35	44.06	26.38	44.06		26.33	2.23	43.61
-1.2	28.93	48.10	28.94	48.10		28.91	2.30	47.96
-1.3	31.62	52.36	31.65	52.36		31.63	2.38	52.36
-1.4	34.43	56.98	34.44	56.98		34.48	2.47	56.98
-1.5	37.35	61.99	37.36	61.99		37.35	2.56	61.99
-1.6	40.41	66.95	40.43	66.95		40.43	2.66	67.33
-1.7	43.57	72.10	43.57	72.10		43.57	2.77	72.10
-1.8	46.87	77.55	46.87	77.63		46.94	2.88	77.55
-1.9	50.26	83.01	50.27	83.21		50.53	2.99	83.21
-2	53.78	89.22	53.79	89.22		54.28	3.11	89.22

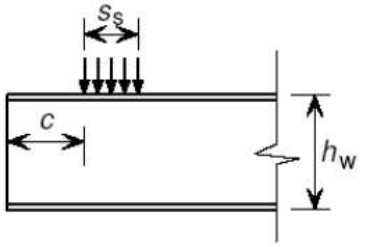
Die Tafelwerte und die Diagramme gelten für $\mu = 0.3$

Abbildung 68: Beulwerte [3]



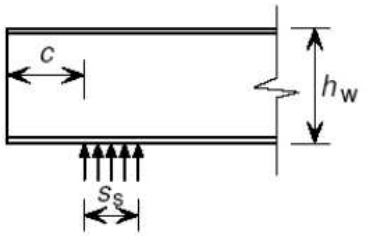
Kategorie 1

– lokale Lasteinleitung im Abstand $e \leq 1{,}5\ h_w$ vom nächsten Auflager;



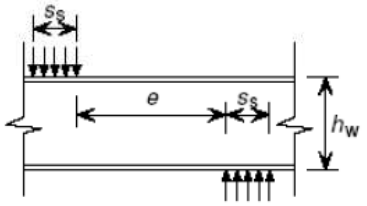
Kategorie 1

– lokale Lasteinleitung im Abstand $c \leq 1{,}5\ h_w$ vom freien Ende;



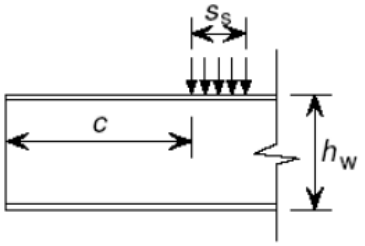
Kategorie 1

– Lagerreaktion im Abstand $c \leq 1{,}5\ h_w$ vom freien Ende;



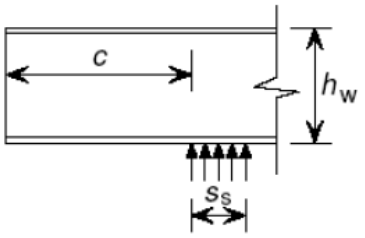
Kategorie 2

– lokale Lasteinleitung im Abstand $e > 1{,}5\ h_w$ zum nächsten Auflager;



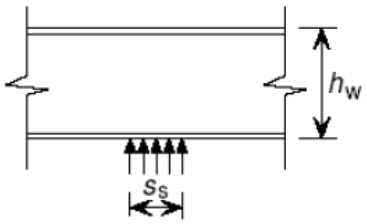
Kategorie 2

– lokale Lasteinleitung im Abstand $c > 1{,}5\ h_w$ vom freien Ende;



Kategorie 2

– Lagerreaktion im Abstand $c > 1{,}5\ h_w$ vom freien Ende;



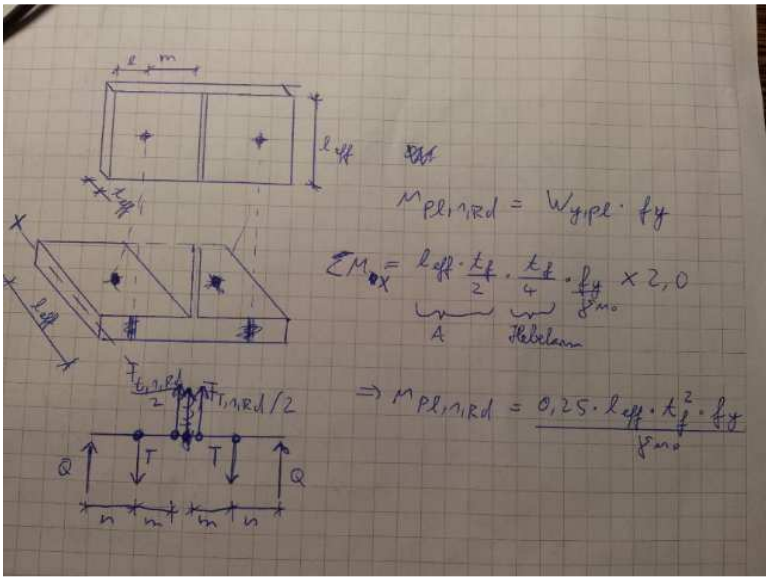
Kategorie 2

– Lagerreaktion am Zwischenauflager.

Abbildung 69: Lokale Lasteinleitungen und Lagerreaktionen - Kategorien für Querschnitte mit zwei oder mehreren Stegen [7]

36 Herleitungen:

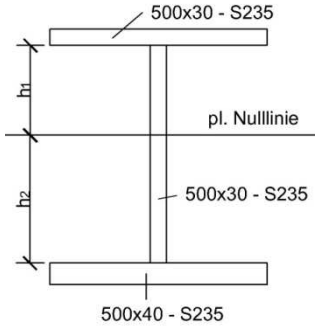
36.1 Herleitung des plastischen Momentes beim Nachweis der Stirnplatte auf Biegung:



$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot l_{eff,1} \cdot d_p^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ [KNcm]}$$

37 Beispiele:

37.1 Beispiel 1: Ermittlung des plastischen Momentes – gleiche Streckgrenze der Querschnittsteile



1. Lage der plastischen Nulllinie ermitteln

$F_{d,1} + F_{d,i} = F_{z,1} + F_{z,i}$

$A_1 \bullet f_{y,d} + A_2 \bullet f_{y,d} = A_3 \bullet f_{y,d} + A_4 \bullet f_{y,d}$

$50 \bullet 3 \bullet 23,5 + h1 \bullet 3 \bullet 23,5 = 50 \bullet 4 \bullet 23,5 + (50 - h1) \bullet 3 \bullet 23,5 \quad | : 23,5$

Lage der plastischen Nulllinie: $h_1 = 33,33cm$, $h_2 = 50 - 33,33 = 16,67cm$

2. $M_{pl,y,Rd} = (S_{y,o} + S_{y,u}) \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

$S_{y,o} = 50 \bullet 3 \bullet (33,33 + 0,5 \bullet 3) + 33,33 \bullet 3 \bullet \frac{33,33}{2} = 6890,83\ cm^3$

$S_{y,u} = 50 \bullet 4 \bullet (16,67 + 0,5 \bullet 4) + 16,67 \bullet 3 \bullet \frac{16,67}{2} = 4150,8\ cm^3$

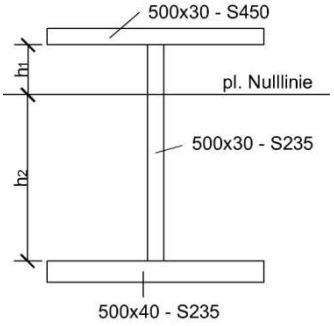
$M_{pl,y,Rd} = (S_{y,o} + S_{y,u}) \bullet \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = (6890,83 + 4150,8) \bullet \frac{23,5}{1,0} = 2595\ KNm$

Alternativ über Summenbildung der Momente:

2. Summe der Momente

$M_{pl,d} = 50 \bullet 3 \bullet 23,5 \bullet (33,33 + 0,5 \bullet 3) + 33,33 \bullet 3 \bullet 23,5 \bullet 0,5 \bullet 33,33 + 16,67 \bullet 3 \bullet 23,5 \bullet 0,5 \bullet 16,67$
$+ 50 \bullet 4 \bullet 23,5 \bullet (16,67 + 0,5 \bullet 4) = 259479,2\ KNcm = 2595\ KNm$

37.2 Beispiel 2: Ermittlung des plastischen Momentes – unterschiedliche Streckgrenze in Querschnittsteilen



1. Lage der Nulllinie ermitteln

$F_{d,1} + F_{d,i} = F_{z,1} + F_{z,i}$

$A_1 \bullet f_{y,d} + A_2 \bullet f_{y,d} = A_3 \bullet f_{y,d} + A_4 \bullet f_{y,d}$

$50 \bullet 3 \bullet 44 + h_1 \bullet 3 \bullet 23,5 = 50 \bullet 4 \bullet 23,5 + (50 - h_1) \bullet 3 \bullet 23,5$

Lage der plastischen Nulllinie: $h_1 = 11,52cm$, $h_2 = 50 - 11,52 = 38,48cm$

2. Summe der Momente um die plastische Nulllinie bilden:

$M_{pl,d} = 50 \bullet 3 \bullet 44 \bullet (11,52 + 0,5 \bullet 3) + 11,52 \bullet 3 \bullet 23,5 \bullet 0,5 \bullet 11,52 + 38,48 \bullet 3 \bullet 23,5 \bullet 0,5 \bullet 38,48$
$+ 50 \bullet 4 \bullet 23,5 \bullet (38,48 + 0,5 \bullet 4) = 333061\ KNcm = 3330,6\ KNm$