

Projekt 1: Halle ohne Kranbetrieb

Vorbemerkungen

Der Gegenstand von Projekt 1 ist die Bemessung diverser Bauteile und Anschlüsse der Stahlkonstruktion einer eingeschossigen Halle, in der kein Kranbetrieb vorgesehen ist.

Die Abmessungen betragen (siehe Skizzen unten):

Längsrichtung

| | |
|-----------------------------|---------|
| Rahmenabstand: | 9,00 m |
| Systemlänge (Achse 1 – 10): | 81,00 m |
| Gesamtlänge: | 81,50 m |

Querrichtung

| | |
|-----------------------------|---------|
| Pfettenabstand: | 4,50 m |
| Systembreite (Achse A – I): | 36,00 m |
| Gesamtbreite: | 36,56 m |

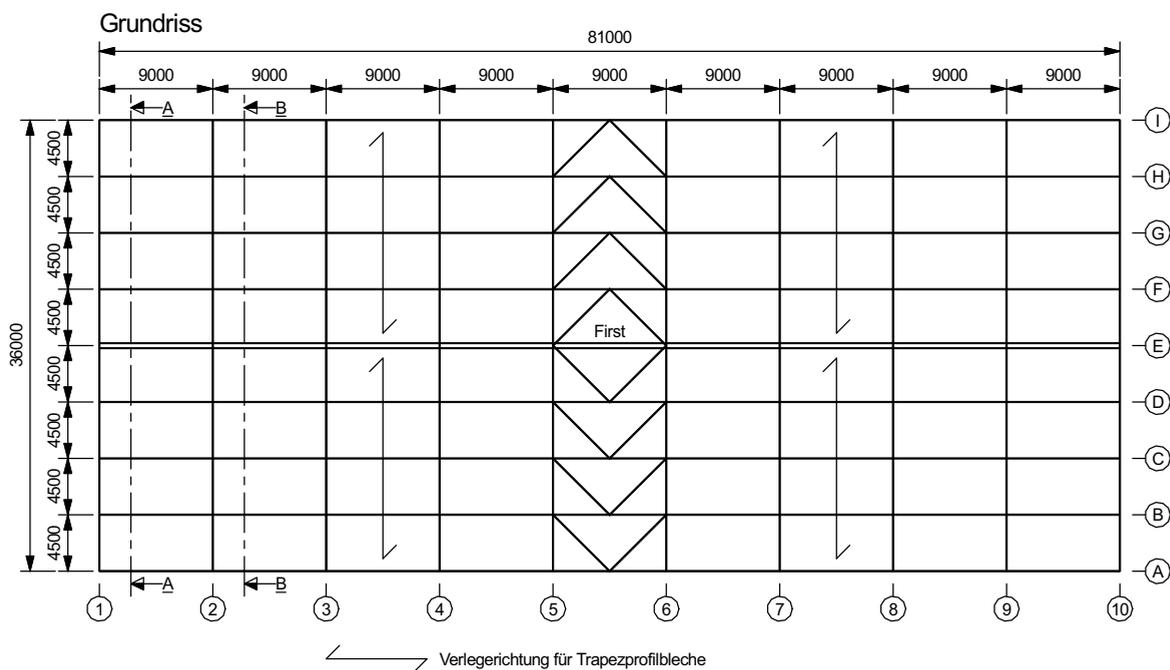
Traufhöhe (gemessen ab OK Fundamente)

| | |
|------------|--------|
| Systemmaß: | 7,35 m |
| OK Dach: | 8,00 m |

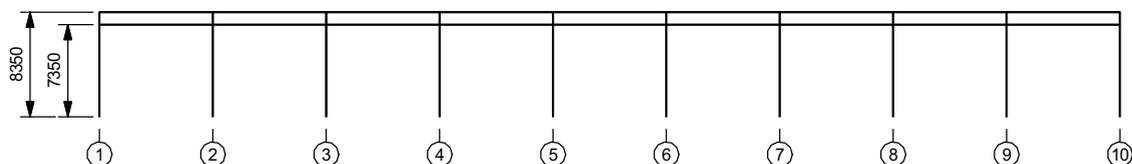
Firsthöhe (gemessen ab OK Fundamente)

| | |
|--------------|--------|
| Systemmaß: | 8,35 m |
| OK Dach: | 9,00 m |
| Dachneigung: | 3,18 ° |

(siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 1.1)



Längswand in Achse A, von außen gesehen

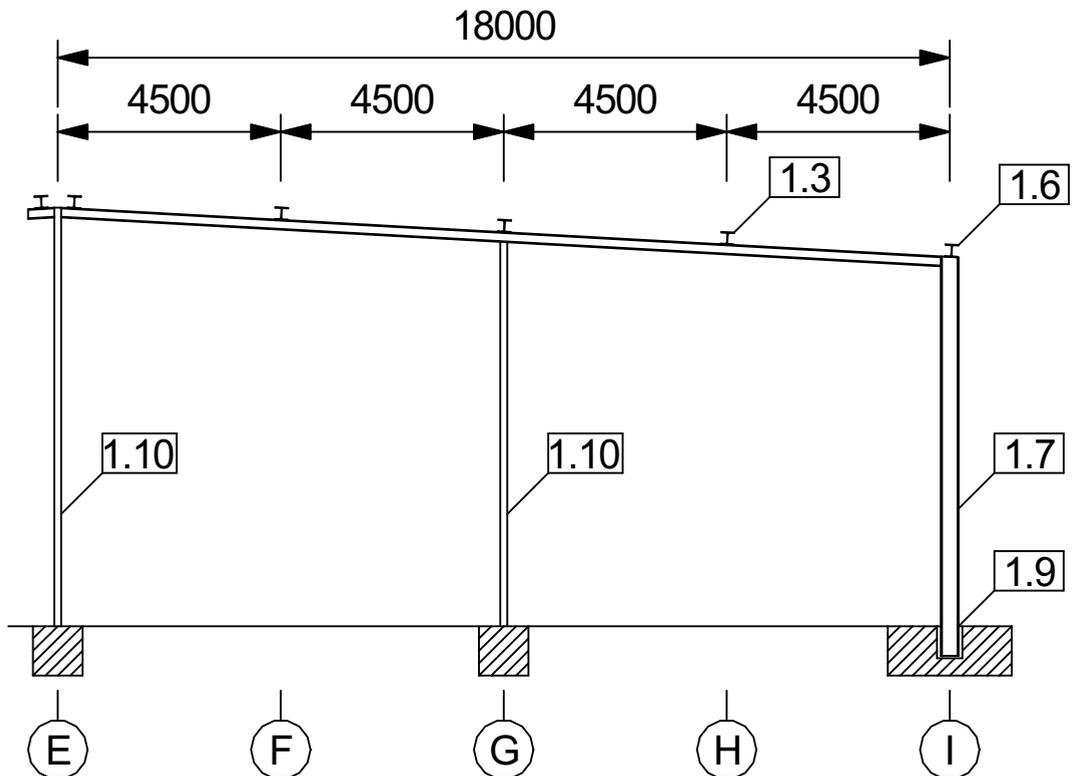
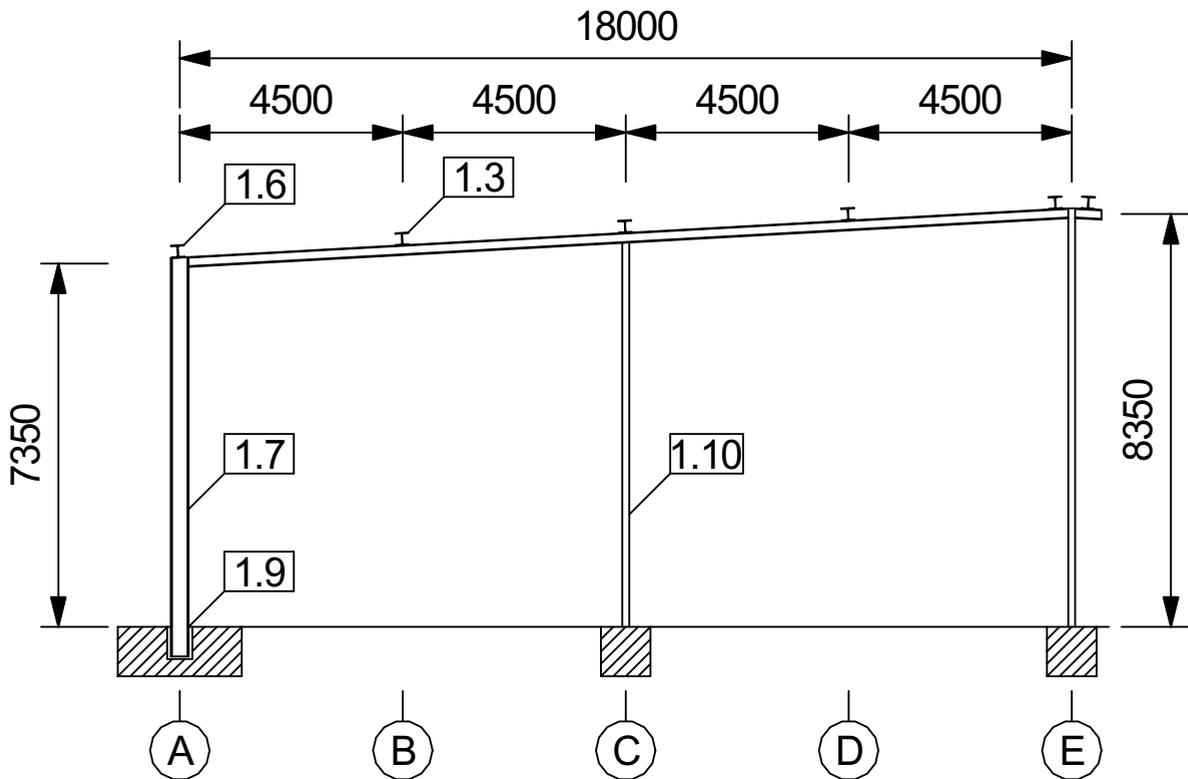


Beispiele zur Bemessung von Stahltragwerken nach DIN EN 1993 Eurocode 3.

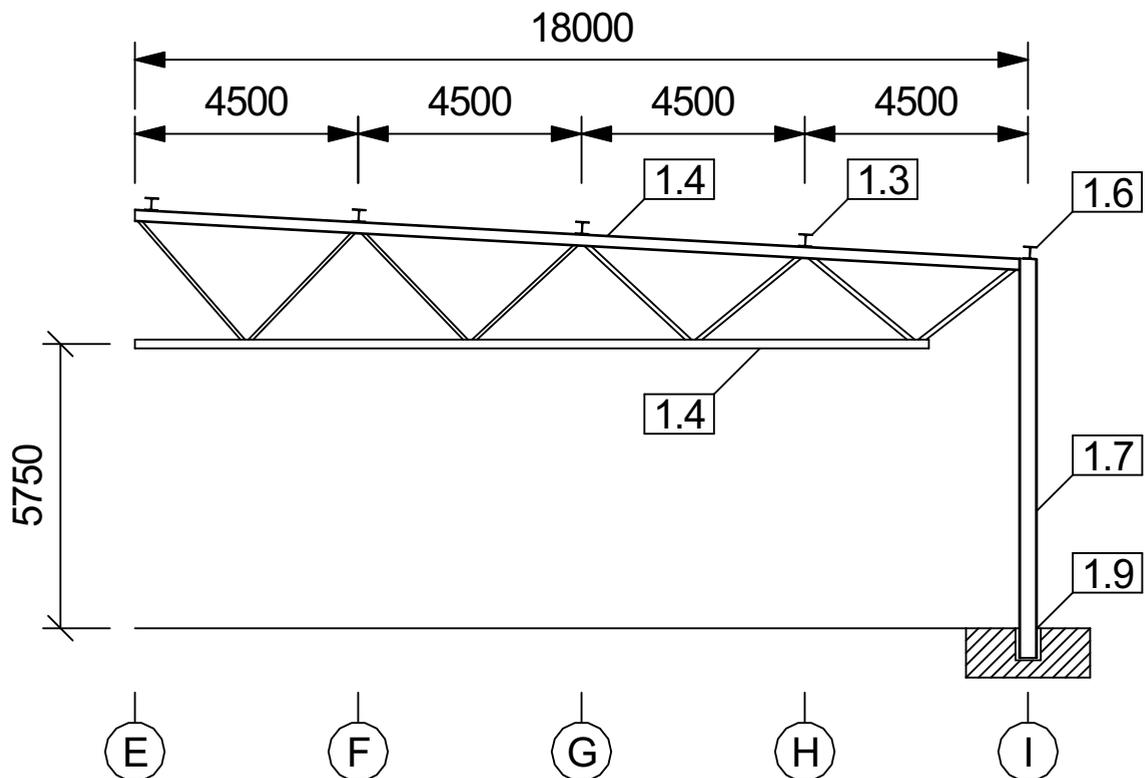
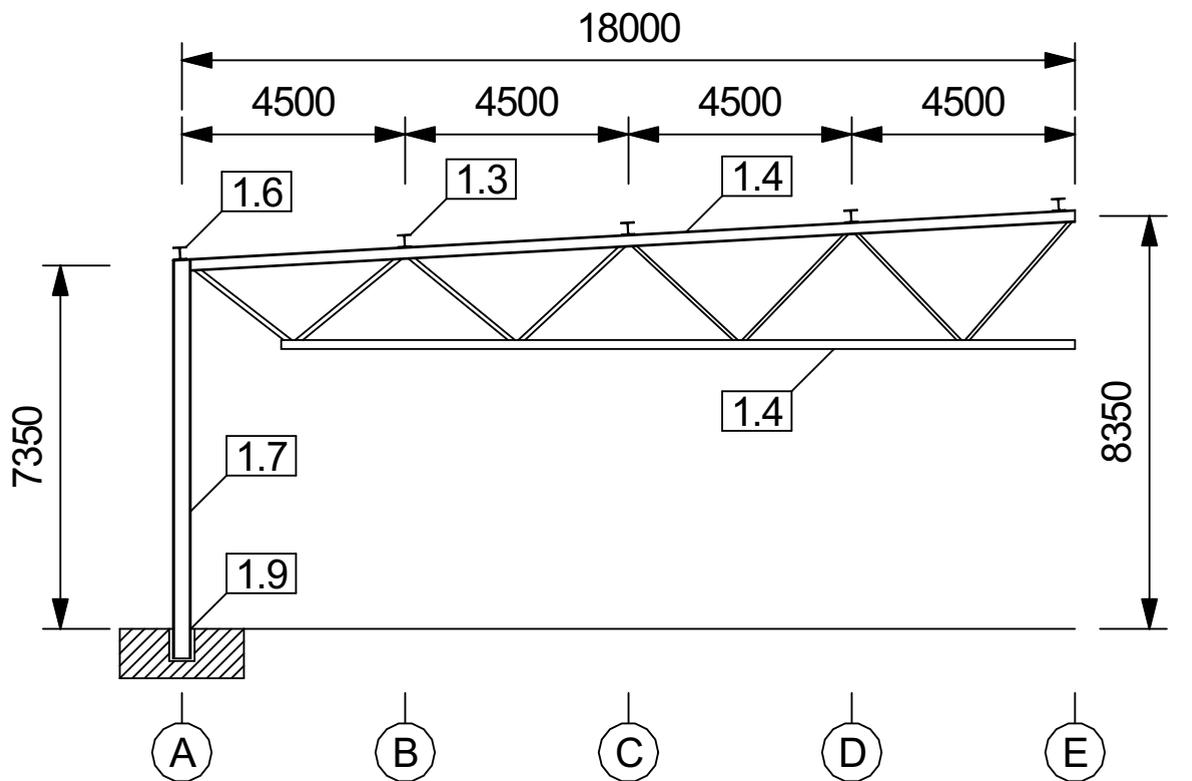
1. Auflage. Herausgegeben von bauforumstahl e.V.

© 2012 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2012 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

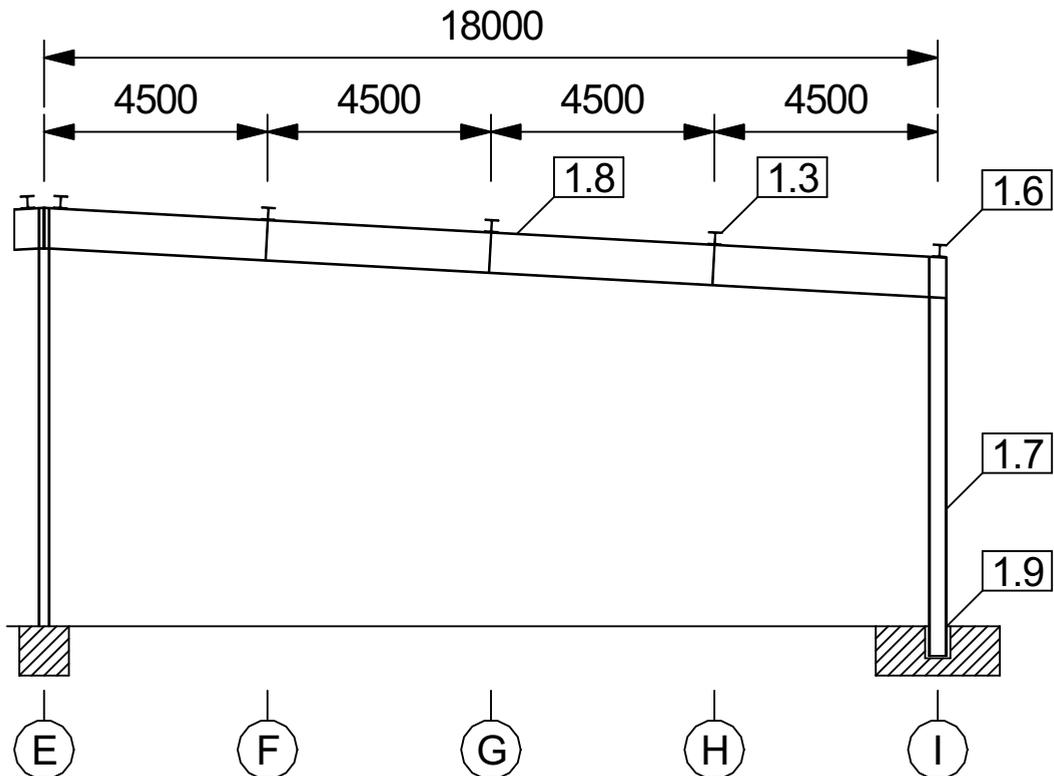
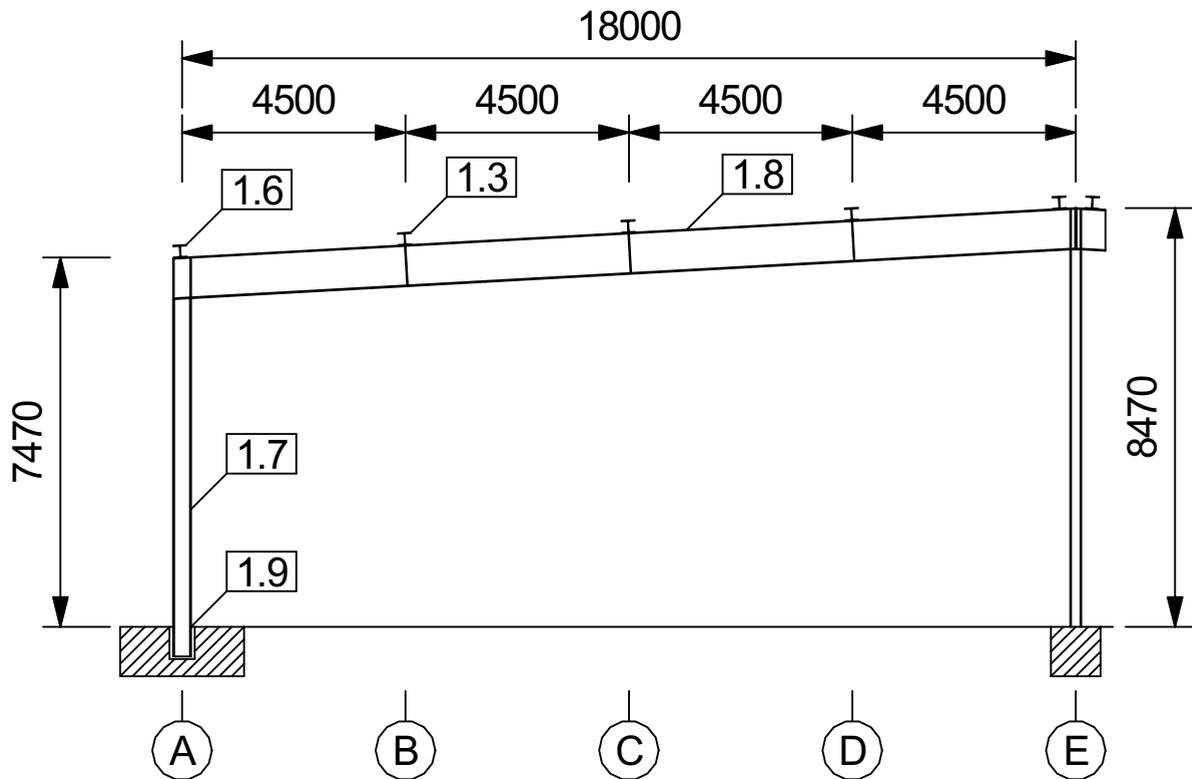
Schnitt A-A, Hallenquerschnitt Achsen 1 und 10

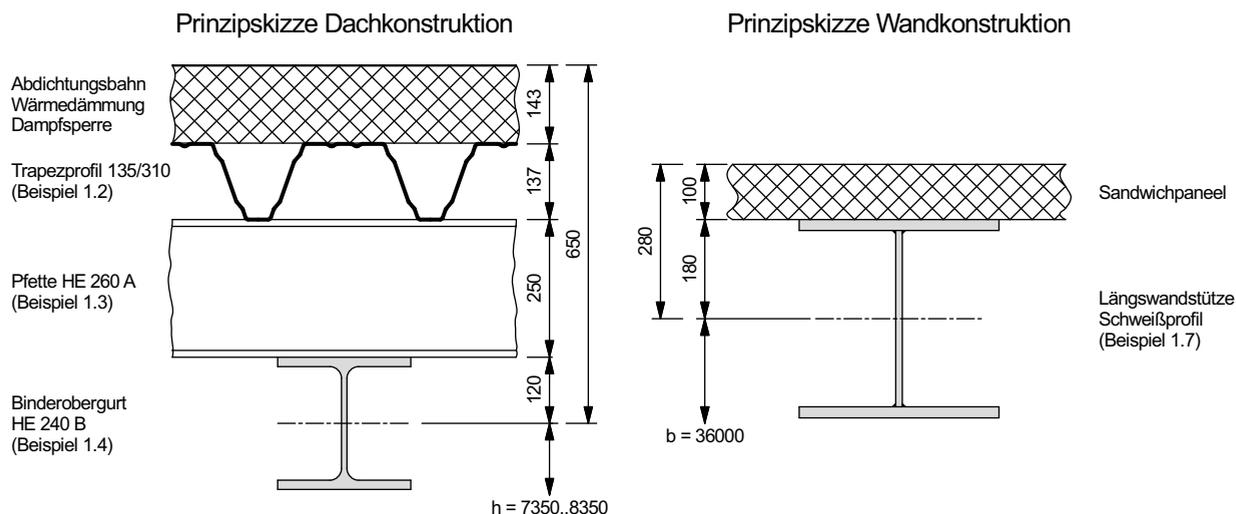


Schnitt B-B, Hallenquerschnitt Achse 2 - 9



Schnitt B'-B', Alternativquerschnitt Achse 2 - 9





Als Dacheindeckung kommen Trapezprofilbleche (Beispiel 1.2) zur Anwendung, die vom First bis zu den Traufen über die Pfetten (Beispiel 1.3) durchlaufen. Da wegen des relativ großen Rahmenabstandes eine „liegende“ Anordnung der Sandwichelemente der Hallenwände nicht sehr praktikabel ist, wird eine „stehende“ Anordnung gewählt. Die Windlasten auf die Hallenlängswände werden damit in den Achsen Ⓐ und ① über die Traufpfetten, die zugleich als Wandriegel (Beispiel 1.6) ausgelegt sind, in das Tragwerk eingeleitet.

Die „Rahmen“ in Hallenquerrichtung in den Achsen ② – ③ bilden geschweißte Fachwerkbinder (Beispiel 1.4), die gelenkig an die eingespannten Längswandstützen in den Achsen A und I (Beispiel 1.7) angeschlossen sind.

Als Alternative zu den Fachwerkbindern kommen geschweißte Dachträger (Beispiel 1.8) in Betracht, die aber zusätzliche Stützen in der Achse ④ erfordern (siehe Schnitt B' – B').

Zur Stabilisierung der Binderobergurte sowie zur Durchleitung der Windlasten auf die Giebelwände in die Längswandstützen dient der Dachverband (Beispiel 1.5) zwischen den Achsen ⑤ und ⑥.

Die Stabilisierung der Halle in Längsrichtung wird über die Einspannung der Längswandstützen in Köcherfundamente (Beispiel 1.9) realisiert.

In den Achsen ① und ⑩ (Giebelwände) werden, wie typisch im Hallenbau, anstelle der Fachwerkbinder Riegel vorgesehen, die über Pendelstützen (Beispiel 1.10) durchlaufen.

Die Ermittlung der Einwirkungen erfolgt einmalig für das ganze Projekt im Beispiel 1.1.

Die Auswahl der Stahlsorten hat in Übereinstimmung mit DIN EN 1993-1-10 zu erfolgen. Für die Stahlkonstruktion der in diesem Projekt betrachteten Halle ergeben sich diesbezüglich aber keine besonderen Anforderungen.

Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz sind nicht Gegenstand dieses Projektes und wurden daher nicht speziell berücksichtigt.

Ergänzend zur Beispielsammlung sind für dieses Projekt die für den baulichen Brandschutz erforderlichen Nachweise unter <http://www.bauforumstahl.de/brandschutz-download> kostenlos herunterladbar.

Beispiel 1.1: Zusammenstellung der Einwirkungen für Projekt 1

Inhalt

| | Seite |
|---|-------|
| Aufgabenstellung | 8 |
| 1 Eigenlasten | 8 |
| 1.1 Eigengewicht der Stahlbauteile | 8 |
| 1.2 Eigenlast der Dachkonstruktion..... | 8 |
| 1.3 Eigenlast der Wandkonstruktion..... | 8 |
| 1.4 Eigenlast Installation/Haustechnik..... | 9 |
| 2 Nutzlasten | 9 |
| 3 Schneelasten | 9 |
| 4 Windlasten | 9 |
| 4.1 Böengeschwindigkeitsdruck..... | 9 |
| 4.2 Windlasten für Windanströmung auf die Längswände | 10 |
| 4.2.1 Winddruck auf die Hallenwände..... | 10 |
| 4.2.2 Winddruck auf das Hallendach..... | 11 |
| 4.3 Windlasten für Windanströmung auf die Giebelwände | 12 |
| 4.3.1 Winddruck auf die Hallenwände..... | 12 |
| 4.3.2 Winddruck auf das Hallendach..... | 13 |
| 4.3.3 Reibungskräfte | 14 |
| 5 Temperatureinwirkungen | 15 |

Beispiel 1.1: Zusammenstellung der Einwirkungen für Projekt 1

Aufgabenstellung

Es sind die charakteristischen Werte der ständigen und veränderlichen Einwirkungen auf das Tragwerk der Halle zu bestimmen, die in den Beispielen 1.2 bis 1.10 für die Nachweise von Bauteilen und Verbindungen erforderlich sind.

Die Einwirkungen rufen keine Beanspruchungen hervor, die Ermüdungsnachweise erforderlich machen würden.

DIN EN 1993-1-1, Absatz 4 (4)B

1 Eigenlasten

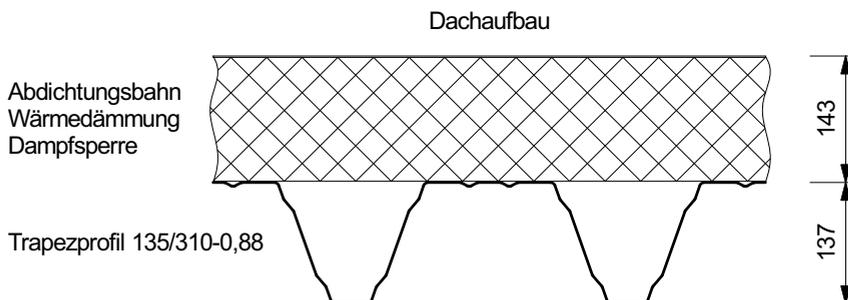
1.1 Eigengewicht der Stahlbauteile

Das Eigengewicht der Stahlbauteile wird als Produkt aus Querschnittsfläche und Wichte für Stahl bestimmt.

Wichte für Baustahl: $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$

DIN EN 1991-1-1, Tabelle A.4

1.2 Eigenlast der Dachkonstruktion



| | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Abdichtungsbahn | | = 0,07 kN/m ² |
| 140 mm Wärmedämmung | $14 \cdot 0,01 \text{ kN/m}^2$ | = 0,14 kN/m ² |
| Dampfsperre | | = 0,07 kN/m ² |
| Trapezprofil 135/310-0,88 | | = 0,11 kN/m ² |
| Zuschlag für Befestigungsmittel | | = 0,02 kN/m ² |
| Σ Dachkonstruktion | $g_{1,k}$ | = 0,41 kN/m ² |

DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle NA.A.27

DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle NA.A.19

DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle NA.A.27

[56] Anlage 5.5.1

geschätzt

1.3 Eigenlast der Wandkonstruktion

Für die Sandwichpaneele der Wände wird eine „stehende“ Ausführung gewählt, d.h. ihre Eigenlasten werden nicht in die Stahlkonstruktion eingetragen und bleiben unberücksichtigt.

siehe Vorbemerkungen, S. 5

1.4 Eigenlast Installation/Haustechnik

Diese Eigenlast wird pauschal auf jeden Binderobergurt angesetzt.

siehe Beispiel 1.4

$$g_{2,k} = 0,25 \text{ kN/m}$$

2 Nutzlasten

Das Hallendach ist nicht begehbar, außer für übliche Erhaltungsmaßnahmen oder Reparaturen. Es kann der Kategorie H zugeordnet werden.

DIN EN 1991-1-1, Tabelle 6.9

$$Q_k = 1,0 \text{ kN}$$

DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle 6.10DE

Eine Überlagerung der Nutzlast mit der Schneelast ist nicht erforderlich, unabhängig, ob die Schneelast oder die Nutzlast die Leiteinwirkung ist.

DIN EN 1991-1-1/NA, 6.3.4.2 NDP zu 6.3.4.2, Tabelle 6.10

3 Schneelasten

Bei der Halle handelt es sich um ein freistehendes Bauwerk, das keinen Schneeanhäufungen ausgesetzt ist.

DIN EN 1991-1-3, Abschnitt 3.2
Übliche Verhältnisse

Der Standort der Halle ist der Schneelastzone 3 zugeordnet.

DIN EN 1991-1-3/NA, Bild NA.1

Geländehöhe über NN: $A = 300 \text{ m}$

Annahme

Umgebungskoeffizient: $C_e = 1,0$

DIN EN 1991-1-3/NA, NDP zu 5.2(7)

Temperaturkoeffizient: $C_t = 1,0$

DIN EN 1991-1-3/NA, NDP zu 5.2(8)

Dachneigung: $\alpha = 3,18^\circ$

siehe Vorbemerkungen, S. 1

Formbeiwert: $\mu_1 = 0,8$

DIN EN 1991-1-3, Tabelle 5.2 und Abschnitt 5.3.3 Satteldächer

Schneelast auf dem Boden:

$$s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{300 + 140}{760} \right)^2$$

$$= 1,285 \text{ kN/m}^2 > 1,10 \text{ kN/m}^2$$

DIN EN 1991-1-3/NA, Glg. (NA.3)

DIN EN 1991-1-3/NA, Bild NA.2

Schneelast auf dem Dach:

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,285 = 1,028 \text{ kN/m}^2$$

DIN EN 1991-1-3, Glg. (5.1)

4 Windlasten

4.1 Böengeschwindigkeitsdruck

Höhe der Halle über Grund: $h = z_e = 9,0 \text{ m} < 25 \text{ m}$

siehe Vorbemerkungen, S. 1

Damit darf die Halle ohne besonderen Nachweis im Sinne von DIN EN 1993-1-4/NA als nicht schwingungsanfällig angenommen werden.

DIN EN 1991-1-4/NA, Absatz NA.C.2 (4)

Die Windlasten dürfen auf der Grundlage des Böengeschwindigkeitsdruckes bestimmt werden.

Vereinfachend wird der Geschwindigkeitsdruck als konstant über die gesamte Hallenhöhe angenommen.

Der Standort der Halle ist der Windzone 2, Binnenland zugeordnet.

vereinfachter Geschwindigkeitsdruck: $q_p(z_e) = 0,65 \text{ kN/m}^2$

DIN EN 1991-1-4/NA, Absatz NA.C.2 (1)

DIN EN 1991-1-4/NA, Absatz NA.B.3.2 (1)

DIN EN 1991-1-4/NA, Bild NA.A.1

DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle NA.B.3

4.2 Windlasten für Windanströmung auf die Längswände

Die Gebäudehülle wird entsprechend [43] Abs. 12.1.8 als undurchlässig angenommen, d.h. die Grundundichtigkeit beträgt weniger als 1% und die Öffnungsanteile über die Außenwände sind gleichmäßig verteilt. Damit braucht der Windinnendruck nicht berücksichtigt zu werden.

DIN EN 1991-1-4/NA, Abschnitt 7.2.9 NDP zu 7.2.9 (2)

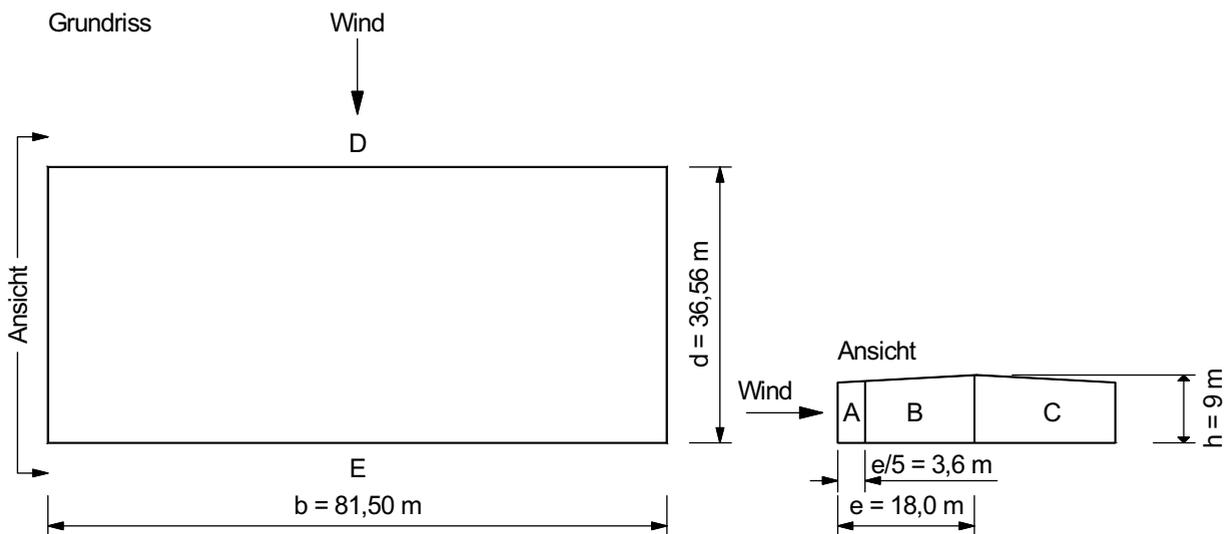
4.2.1 Winddruck auf die Hallenwände

a) Einteilung der Wandflächen

- Hallenlänge $b = 81,50 \text{ m}$
- Hallenbreite $d = 36,56 \text{ m}$
- Hallenhöhe $h = z_e = 9,00 \text{ m}$
- $e = \min(b/2 \cdot h) = \min(81,50/2 \cdot 9,00) = 18,00 \text{ m}$
- $e/d = 18,00/36,56 = 0,49 < 1$
- $h/d = 9,00/36,56 = 0,25$

siehe Vorbemerkungen, S. 1

DIN EN 1991-1-4, Bild 7.5



b) Winddruck

Winddruck: $w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$

Druckbeiwert: $c_{pe} = \begin{cases} c_{pe,1} & A \leq 1m^2 \\ c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A & 1m^2 < A < 10m^2 \\ c_{pe,10} & A \geq 10m^2 \end{cases}$

DIN EN 1991-1-4, Glg. (5.1)

DIN EN 1991-1-4, Bild 7.2

A ist die Größe der Lasteinflussfläche in m².

DIN EN 1991-1-4/NA, Tabelle NA.1 – Außendruckbeiwerte für vertikale Wände rechteckiger Gebäude

Lasteinflussflächen vereinfachend mit Grundrissystemmaßen ermittelt

Geschwindigkeitsdruck:
 $q_p(z_e) = 0,65 \text{ kN/m}^2$ (s. Abschnitt 4.1)

| Bereich | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | A [m ²] | c_{pe} | w_e [kN/m ²] |
|---------|-------------|------------|------------------------|----------|-------------------------------|
| A | -1,2 | -1,4 | 29,2 | -1,2 | -0,780 |
| B | -0,8 | -1,1 | 123,8 | -0,8 | -0,520 |
| C | -0,5 | -0,5 | 153,0 | -0,5 | -0,325 |
| D | +0,7 | +1,0 | 652,0 | +0,7 | +0,455 |
| E | -0,3 | -0,5 | 652,0 | -0,3 | -0,195 |

4.2.2 Winddruck auf das Hallendach

a) Einteilung der Dachfläche

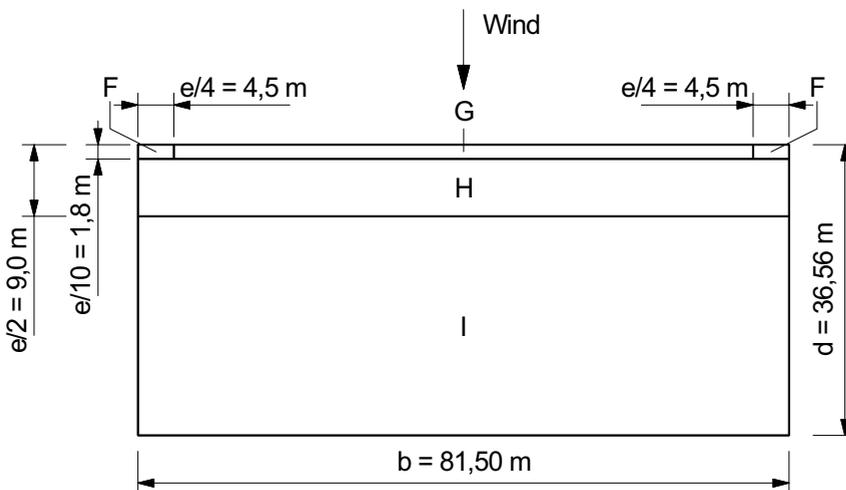
Dachneigung: $\alpha = 3,18^\circ$
< 5° → Flachdach

siehe Vorbemerkungen, S. 1

DIN EN 1991-1-4, Absatz 7.2.3 (1)

DIN EN 1991-1-4, Bild 7.6

Abmessungen b, d, e und h wie in Abschnitt 4.2.1 a) angegeben



b) Winddruck

| Bereich | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | A [m ²] | c_{pe} | w_e [kN/m ²] |
|---------|----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------|-------------------------------|
| F | -1,8 | -2,5 | 8,1 | -1,86 | -1,209 |
| G | -1,2 | -2,0 | 130,5 | -1,20 | -0,780 |
| H | -0,7 | -1,2 | 586,8 | -0,70 | -0,455 |
| I | +0,2 -0,6 ¹⁾ | +0,2 -0,6 ¹⁾ | 2246,1 | +0,20 -0,60 | +0,130 -0,390 |

DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.2 – Empfohlene Werte für Außendruckbeiwerte für Flachdächer

¹⁾ DIN EN 1991-1-4/NA, Abschnitt 7.2.3 NCI zu 7.2.3

für die Berechnung von w_e und c_{pe} vgl. Abschnitt 4.2.1 b)

Anmerkung:

In Anlehnung an [43] Abs. 12.1.2 – 12.1.7 werden die Dachbereiche E und G sowie der Wandbereich A nach DIN EN 1991-1-4 im Sinne von DIN 18807-3, Abschnitt 3.1.4 als Schnittkanten betrachtet. Der Ansatz der erhöhten Soglasten in diesen Bereichen ist nur für den Nachweis der Verbindungselemente erforderlich.

Repräsentativ für die Bemessung der Dachbauteile in den Bereichen E, G und H ist der Bereich H.

4.3 Windlasten für Windanströmung auf die Giebelwände

4.3.1 Winddruck auf die Hallenwände

a) Einteilung der Wandflächen

Hallenbreite $b = 36,56 \text{ m}$

Hallenlänge $d = 81,50 \text{ m}$

Hallenhöhe $h = z_e = 9,00 \text{ m}$

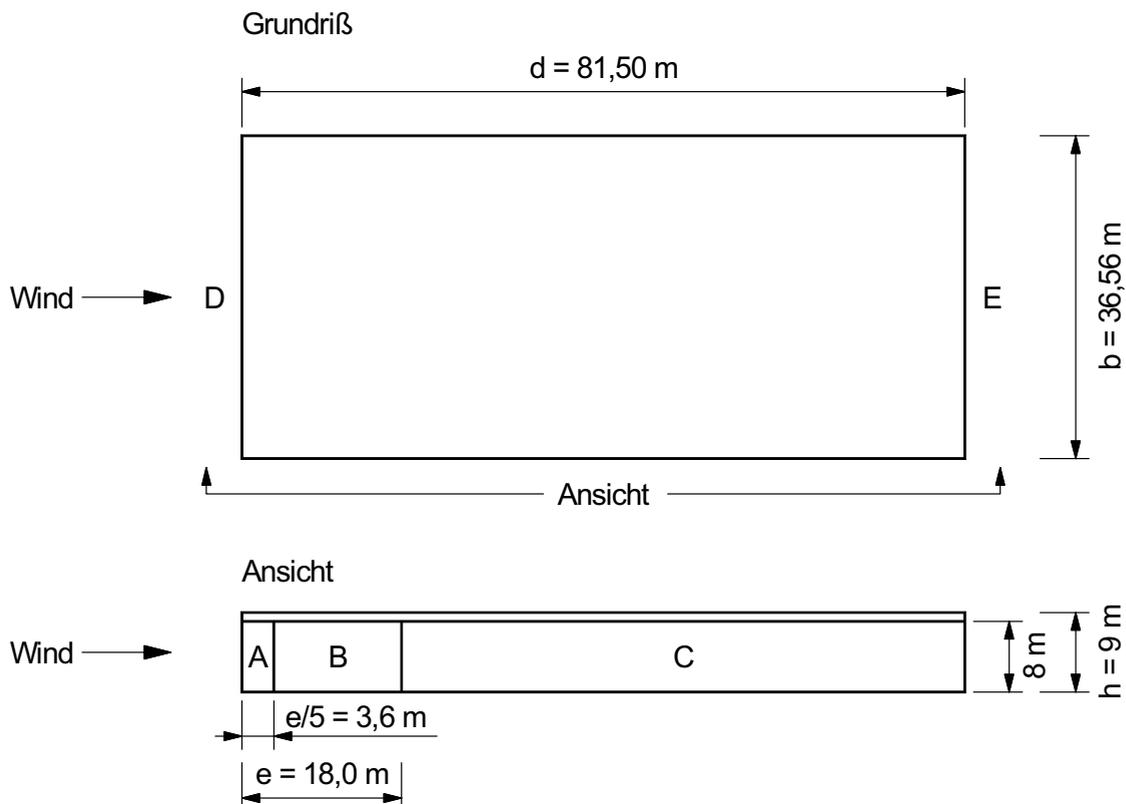
$e = \min(b|2 \cdot h) = \min(36,56|2 \cdot 9,00) = 18,00 \text{ m}$

$e/d = 18,00/81,50 = 0,22 < 1$

$h/d = 9,00/81,50 = 0,11$

siehe Vorbemerkungen, S. 1

DIN EN 1991-1-4, Bild 7.5



b) Winddruck

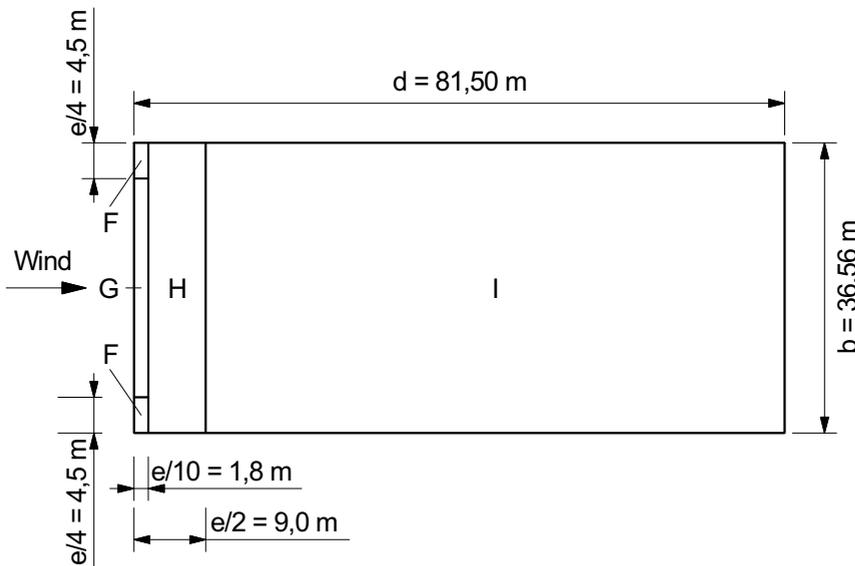
| Bereich | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | A [m ²] | c_{pe} | w_e [kN/m ²] |
|---------|-------------|------------|--------------------------|----------|-------------------------------|
| A | -1,2 | -1,4 | 28,8 | -1,2 | -0,780 |
| B | -0,8 | -1,1 | 115,2 | -0,8 | -0,520 |
| C | -0,5 | -0,5 | 508,0 | -0,5 | -0,325 |
| D | +0,7 | +1,0 | 310,8 | +0,7 | +0,455 |
| E | -0,3 | -0,5 | 310,8 | -0,3 | -0,195 |

DIN EN 1991-1-4/NA, Tabelle NA.1 – Außendruckbeiwerte für vertikale Wände rechteckiger Gebäude

für die Berechnung von w_e und c_{pe} vgl. Abschnitt 4.2.1 b)

4.3.2 Winddruck auf das Hallendach

a) Einteilung der Dachfläche



DIN EN 1991-1-4, Bild 7.6

Abmessungen b , d , e und h wie in Abschnitt 4.3.1 a) angegeben

b) Winddruck

| Bereich | $c_{pe,10}$ | $c_{pe,1}$ | A [m ²] | c_{pe} | w_e [kN/m ²] |
|---------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|
| F | -1,8 | -2,5 | 8,1 | -1,86 | -1,209 |
| G | -1,2 | -2,0 | 49,6 | -1,20 | -0,780 |
| H | -0,7 | -1,2 | 263,2 | -0,70 | -0,455 |
| I | +0,2 -0,6 ¹⁾ | +0,2 -0,6 ¹⁾ | 2650,6 | +0,20 -0,60 | +0,130 -0,390 |

DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.2 – Empfohlene Werte für Außendruckbeiwerte für Flachdächer

¹⁾ DIN EN 1991-1-4/NA, Abschnitt 7.2.3 NCI zu 7.2.3

für die Berechnung von w_e und c_{pe} vgl. Abschnitt 4.2.1 b)

4.3.3 Reibungskräfte

a) Kontrolle der Vernachlässigbarkeit von Reibungseffekten

Traufhöhe: $h_t = 8,0 \text{ m}$

Flächen \perp zum Wind: $A_{\perp} = 2 \cdot 0,5 \cdot (h + h_t) \cdot b = (9 + 8) \cdot 36,56 = 621,5 \text{ m}^2$

Flächen \parallel zum Wind: $A_{\parallel} = (2 \cdot h_t + b) \cdot d = (2 \cdot 8 + 36,56) \cdot 81,5 = 4283,6 \text{ m}^2$

$4 \cdot A_{\perp} / A_{\parallel} = 4 \cdot 621,5 / 4283,6 = 0,58 < 1$

→ Die Reibungseffekte sind nicht vernachlässigbar!

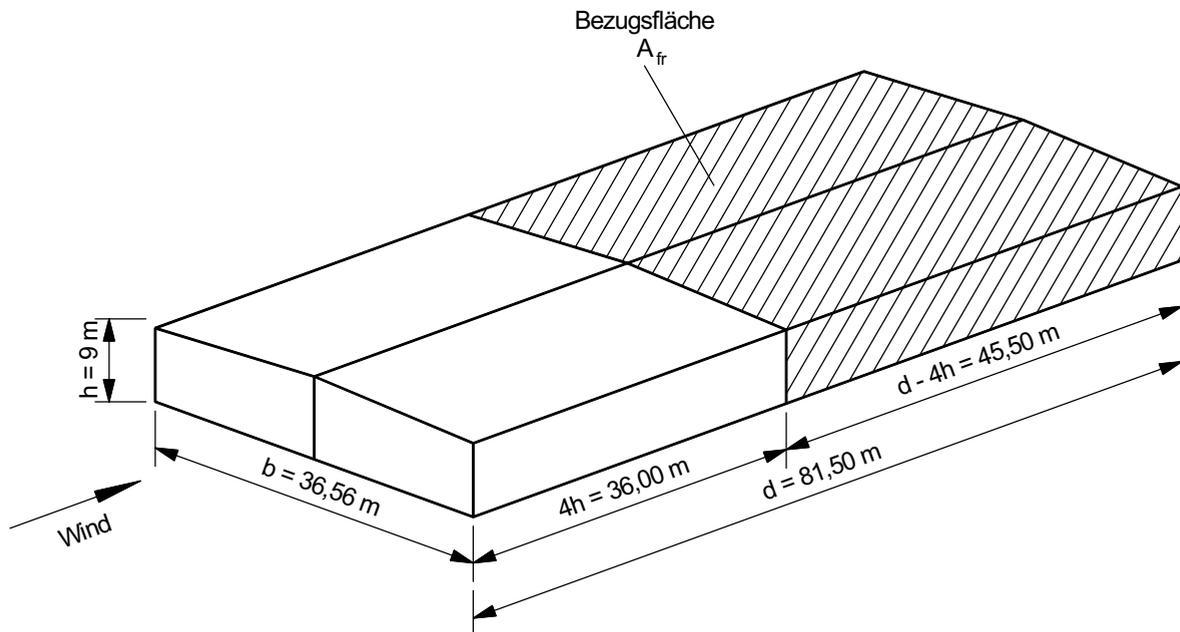
siehe Vorbemerkungen, S. 1

Abmessungen b , d und h wie in Abschnitt 4.3.1 a) angegeben

DIN EN 1991-1-4, Absatz 5.3 (4)

b) Bezugsflächen für den Ansatz der Reibungskräfte

DIN EN 1991-1-4, Bild 7.22



Dach: $A_{fr,1} = b \cdot (d - 4 \cdot h) = 36,56 \cdot (81,5 - 4 \cdot 9) = 1663,5 \text{ m}^2$

Längswände: $A_{fr,2} = 2 \cdot h_t \cdot (d - 4 \cdot h) = 2 \cdot 8 \cdot (81,5 - 4 \cdot 9) = 728 \text{ m}^2$

DIN EN 1991-1-4, Absatz 7.5 (3)

c) Reibungskräfte

Reibungskraft: $F_{fr,j} = c_{fr,j} \cdot q_p(z_e)_j \cdot A_{fr,j}$

DIN EN 1991-1-4, Glg. (5.7)

Die Reibungsbeiwerte $c_{fr,j}$ sind entsprechend DIN EN 1994-1-4, Tabelle 7.10 anzusetzen.

| Bauteil | Oberfläche | $c_{fr,j}$ | $A_{fr,j}$ [m ²] | $F_{fr,j}$ [kN] |
|------------|---|------------|---------------------------------|--------------------|
| Dach | rau (Abdichtungsbahn) | 0,02 | 1663,5 | 21,63 |
| Längswände | sehr rau (gewellte Sandwichpaneele) | 0,04 | 728,0 | 18,93 |
| Σ | | | | 40,56 |

Geschwindigkeitsdruck:
 $q_p(z_e) = 0,65 \text{ kN/m}^2$ (s. Abschnitt 4.1)

5 Temperatureinwirkungen

Bei der Halle handelt es sich um ein wärmegeämmtes und im Winter beheiztes Gebäude. Die Betriebstemperatur beträgt jahreszeitabhängig zwischen 18 °C und 25 °C.

Die Stahlbauteile des Tragwerks sowie das Trapezprofilblech der Dachschale sind nicht dem Einfluss von äußeren Temperaturänderungen ausgesetzt, d.h. der Ansatz von Temperatureinwirkungen kann für diese Elemente unberücksichtigt bleiben.

Für die Sandwichpaneele der Hallenwände, die aber in diesem Projekt nicht weiter betrachtet werden, wären Temperaturdifferenzen aber in jedem Fall als Einwirkungen anzusetzen. Wegen der statisch bestimmten Lagerung der Wandelemente entstehen jedoch für die Stützen und die Wandriegel keine zusätzlichen Beanspruchungen.

Beispiel 1.2: Dachtragschale aus Trapezprofilblechen

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| Aufgabenstellung | 18 |
| 1 System und Einwirkungen..... | 18 |
| 1.1 System | 18 |
| 1.2 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 18 |
| 1.3 Lastkombinationen | 18 |
| 1.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 1 (andrückende Last)..... | 18 |
| 1.3.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 2 (abhebende Last)..... | 19 |
| 1.3.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – Lastkombination 3 | 20 |
| 2 Beanspruchungen | 20 |
| 2.1 Lastkombination 1 | 20 |
| 2.2 Lastkombination 2 | 20 |
| 2.3 Lastkombination 3 | 20 |
| 3 Querschnitt..... | 20 |
| 3.1 Materialkennwerte | 20 |
| 3.2 Abmessungen | 21 |
| 3.3 Überprüfung der Anwendungsgrenzen | 21 |
| 3.4 Berücksichtigung von Schubverzerrungen..... | 22 |
| 3.5 Bruttoquerschnittswerte | 22 |
| 3.5.1 Eckausrundungen zwischen Gurten und Stegen | 22 |
| 3.5.2 Gurtsicken | 23 |
| 3.5.3 Trapezprofil | 24 |
| 3.6 Eindrehen der Flansche | 25 |
| 3.7 Effektive Querschnittswerte | 25 |
| 3.7.1 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, andrückende Last..... | 25 |
| 3.7.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit, positive Biegemomente..... | 27 |
| 3.7.3 Grenzzustand der Tragfähigkeit, negative Biegemomente | 33 |
| 4 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 37 |
| 4.1 Querschnittstragfähigkeit | 37 |
| 4.1.1 Biegemomente | 37 |
| 4.1.2 Querkräfte | 37 |
| 4.1.3 Örtliche Lasteinleitung (Auflagerkräfte)..... | 38 |
| 4.2 Tragfähigkeitsnachweise..... | 40 |
| 4.2.1 Lastkombination 1 | 40 |
| 4.2.2 Lastkombination 2 | 41 |
| 5 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 41 |
| 5.1 Lastkombination 3 | 41 |

Beispiel 1.2: Dachtragschale aus Trapezprofilblechen

Aufgabenstellung

Für die bandverzinkten Trapezprofilbleche 135/310-0,88 als kaltgeformte Bauteile sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

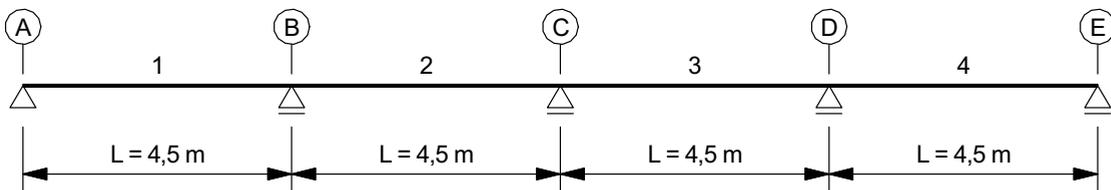
Für die Grenzzustände der Tragfähigkeit bzw. der Gebrauchstauglichkeit werden nachfolgend z.T. die Kürzel GZT bzw. GZG verwendet.

Blechennndicke: $t_{\text{nom}} = 0,88 \text{ mm}$

Die Trapezprofilbleche sind nicht als Schubfelder ausgebildet!

1 System und Einwirkungen

1.1 System



statisches System: Durchlaufträger über vier Felder

Pfettenabstand: $L = 4,5 \text{ m}$

Dachneigung: $\alpha = 3,18^\circ$

siehe Skizze

siehe Vorbemerkungen, S. 1 ff.

siehe Vorbemerkungen, S. 1

Der Pfettenabstand parallel zur Dachneigung beträgt:

$$L' = L / \cos \alpha = 4,5 / \cos 3,18^\circ = 4,507 \text{ m} \approx 4,5 \text{ m}$$

1.2 Charakteristische Werte der Einwirkungen

Eigengewicht: $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$

Schnee: $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$

Winddruck, Bereich I: $w_{e,I} = +0,13 \text{ kN/m}^2$

Windsog, Bereich F: $w_{e,F} = -1,21 \text{ kN/m}^2$

Windsog, Bereich G: $w_{e,G} = -0,78 \text{ kN/m}^2$

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

1.3 Lastkombinationen

1.3.1 GZT – Lastkombination 1 (andrückende Last)

a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_{G,\text{sup}} = 1,35$

veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_Q = 1,5$

ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

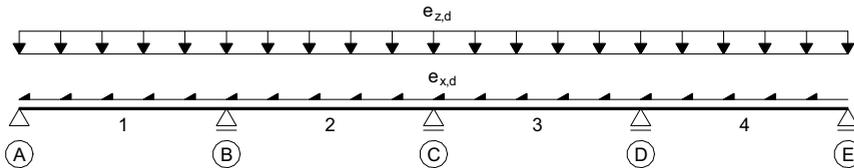
DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

Schnee: $\psi_{0,S} = 0,5$

Wind: $\psi_{0,W} = 0,6$

c) Bemessungswerte der Einwirkungen



$$e_{z,d} = \gamma_{G,sup} \cdot g_{1,k} \cdot \cos \alpha + \gamma_Q \cdot (s \cdot \cos^2 \alpha + \psi_{0,W} \cdot w_{e,l})$$

$$= 1,35 \cdot 0,41 \cdot \cos 3,18^\circ + 1,5 \cdot (1,03 \cdot \cos^2 3,18^\circ + 0,6 \cdot 0,13)$$

$$= 2,21 \text{ kN/m}^2$$

$$e_{x,d} = \gamma_{G,sup} \cdot g_{1,k} \cdot \sin \alpha + \gamma_Q \cdot s \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$= 1,35 \cdot 0,41 \cdot \sin 3,18^\circ + 1,5 \cdot 1,03 \cdot \sin 3,18^\circ \cdot \cos 3,18^\circ$$

$$= 0,12 \text{ kN/m}^2$$

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

gemäß DIN EN 1990, Glg. (6.10)

Die Einwirkung parallel zur Dachfläche ist relativ gering und wird daher nachfolgend vernachlässigt.

1.3.2 GZT – Lastkombination 2 (abhebende Last)

a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: $\gamma_{G,inf} = 1,0$

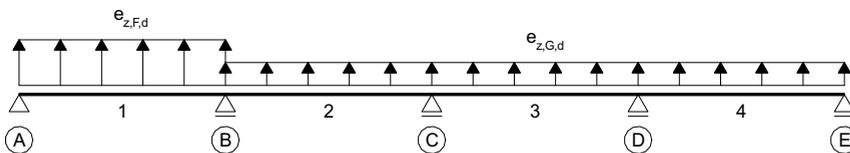
veränderliche Einwirkungen, Auswirkung günstig: $\gamma_Q = 1,5$

ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

b) Bemessungswerte der Einwirkungen



$$e_{z,F,d} = \gamma_{G,inf} \cdot g_{1,k} \cdot \cos \alpha + \gamma_Q \cdot w_{e,F} = 1,0 \cdot 0,41 \cdot \cos 3,18^\circ - 1,5 \cdot 1,21$$

$$= -1,41 \text{ kN/m}^2$$

$$e_{z,G,d} = \gamma_{G,inf} \cdot g_{1,k} \cdot \cos \alpha + \gamma_Q \cdot w_{e,G} = 1,0 \cdot 0,41 \cdot \cos 3,18^\circ - 1,5 \cdot 0,78$$

$$= -0,76 \text{ kN/m}^2$$

gemäß DIN EN 1990, Glg. (6.10)

1.3.3 GZG – Lastkombination 3

Maßgebend für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist die an-drückende Last. Der Bemessungswert in der charakteristischen Kombi-nation beträgt:

$$\begin{aligned} e_{z,char} &= g_{1,k} \cdot \cos \alpha + s \cdot \cos^2 \alpha + \psi_{0,w} \cdot w_{e,I} \\ &= 0,41 \cdot \cos 3,18^\circ + 1,03 \cdot \cos^2 3,18^\circ + 0,6 \cdot 0,13 = 1,51 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

gemäß DIN EN 1990, Glg. (6.14b)

2 Beanspruchungen

2.1 Lastkombination 1

$$M_{B,Ed} = -\frac{3}{28} \cdot e_{z,d} \cdot L'^2 = -\frac{3}{28} \cdot 2,21 \cdot 4,507^2 = -4,81 \text{ kNm/m}$$

$$M_{1,Ed} = \frac{121}{1568} \cdot e_{z,d} \cdot L'^2 = \frac{121}{1568} \cdot 2,21 \cdot 4,507^2 = 3,46 \text{ kNm/m}$$

$$R_{A,Ed} = \frac{11}{28} \cdot e_{z,d} \cdot L' = \frac{11}{28} \cdot 2,21 \cdot 4,507 = 3,91 \text{ kN/m}$$

$$R_{B,Ed} = \frac{8}{7} \cdot e_{z,d} \cdot L' = \frac{8}{7} \cdot 2,21 \cdot 4,507 = 11,38 \text{ kN/m}$$

Koeffizienten für die Beanspruchungen bestimmt mit Dreimomentengleichung

Biegemoment am Auflager B

Biegemoment im Feld 1

Auflagerkraft am Auflager A

Auflagerkraft am Auflager B

2.2 Lastkombination 2

$$\begin{aligned} M_{B,Ed} &= -\frac{3}{224} (5 \cdot e_{z,F,d} + 3 \cdot e_{z,G,d}) \cdot L'^2 = \frac{3}{224} \cdot (5 \cdot 1,41 + 3 \cdot 0,76) \cdot 4,507^2 \\ &= 2,54 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Bl,Ed} &= -0,5 \cdot e_{z,F,d} \cdot L' + M_{B,Ed}/L' \\ &= 0,5 \cdot 1,41 \cdot 4,507 + 2,54/4,507 = 3,74 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$V_{A,Ed} = V_{Bl,Ed} + e_{z,F,d} \cdot L' = 3,74 - 1,41 \cdot 4,507 = -2,61 \text{ kN/m}$$

$$M_{1,Ed} = 0,5 \cdot V_{A,Ed}^2 / e_{z,F,d} = -0,5 \cdot 2,61^2 / 1,41 = -2,42 \text{ kNm/m}$$

Biegemoment am Auflager B

Querkraft links neben Auflager B

Querkraft am Auflager A

Biegemoment im Feld 1

2.3 Lastkombination 3

$$EI \cdot \delta_z = 0,0065 \cdot e_{z,char} \cdot L'^4 = 0,0065 \cdot 1,51 \cdot 4,507^4 = 4,05 \text{ kNm}^2$$

EI-fache Durchbiegung im Endfeld, [54] S. 4.28

3 Querschnitt

Trapezprofilblech 135/310-0,88 S320GD+Z

3.1 Materialkennwerte

$$\text{Basisstreckgrenze: } f_{yb} = 320 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Elastizitätsmodul: } E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

DIN EN 1993-1-3, Tabelle 3.1b

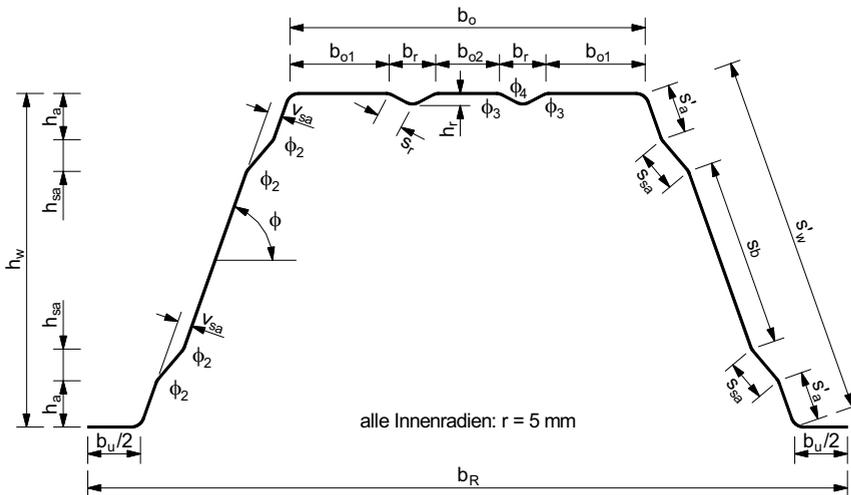
DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

3.2 Abmessungen

$$\begin{aligned}
 t_{\text{nom}} &= 0,88 \text{ mm} \\
 t_{\text{zinc}} &= 0,04 \text{ mm} && \text{(übliche Verzinkung)} \\
 t_{\text{cor}} &= t_{\text{nom}} - t_{\text{zinc}} = 0,88 - 0,04 = 0,84 \text{ mm} \\
 t &= t_{\text{cor}} = 0,84 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Blechnenddicke nach Kaltumformung
 DIN EN 1993-1-3, Absatz 3.2.4 (3)

Bemessungswert der Stahlkerndicke,
 DIN EN 1993-1-3, Gg. (3.3c) und Gg. (3.3a)



Als Abmessungen für das Trapezprofilblech 135/310-0,88 werden die Werte aus [56], Anlage 5.1 zugrundegelegt. Trapezprofilbleche anderer Hersteller können abweichende Abmessungen aufweisen.

Die Abmessungen beziehen sich auf die Mittellinie des Querschnitts mit scharfkantigen Ecken.

| | | | | | | | |
|--------|----------------------|----------|---------------------|----------|-------------------|----------|---------------------|
| b_R | $= 310 \text{ mm}$ | b_u | $= 43 \text{ mm}$ | v_{sa} | $= 6 \text{ mm}$ | ϕ | $= 70,6^\circ$ |
| b_o | $= 145 \text{ mm}$ | b_{o1} | $= 40,5 \text{ mm}$ | b_{o2} | $= 26 \text{ mm}$ | b_r | $= 19 \text{ mm}$ |
| h_w | $= 137 \text{ mm}$ | h_a | $= 19 \text{ mm}$ | h_{sa} | $= 13 \text{ mm}$ | h_r | $= 5 \text{ mm}$ |
| s'_w | $= 145,2 \text{ mm}$ | s'_a | $= 20,1 \text{ mm}$ | s_{sa} | $= 17 \text{ mm}$ | s_r | $= 10,7 \text{ mm}$ |
| s_b | $= 77,4 \text{ mm}$ | ϕ_2 | $= 20,7^\circ$ | ϕ_3 | $= 27,8^\circ$ | ϕ_4 | $= 55,5^\circ$ |

Die grau unterlegten Abmessungen sind nicht in [56], Anlage 5.1 enthalten und wurden in einer Nebenrechnung bestimmt, die hier aus Platzgründen nicht wiedergegeben ist.

3.3 Überprüfung der Anwendungsgrenzen

Die experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit ist nicht erforderlich, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$0,04 \cdot t \cdot E / f_y = 0,04 \cdot 0,84 \cdot 210000 / 320 = 22 \text{ mm} > r = 5 \text{ mm}$$

→ Die Bedingung ist erfüllt.

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.1 (6)

Es sind folgende Grenzwerte für die Größenverhältnisse einzuhalten:

$$\begin{aligned}
 b_o / t &= 145 / 0,84 = 172,6 < 500 \\
 45^\circ &< \phi = 70,6^\circ < 90^\circ \\
 h_w / t &= 137 / 0,84 = 163,1 < 500 \cdot \sin \phi = 500 \cdot \sin 70,6^\circ = 471,6 \\
 &\rightarrow \text{Die Grenzwerte für die Größenverhältnisse sind eingehalten.}
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Tabelle 5.1

Der Einfluss ausgerundeter Ecken ist nicht vernachlässigbar, weil:

$$5 \cdot t = 5 \cdot 0,84 = 4,2 \text{ mm} < r = 5 \text{ mm}$$

3.4 Berücksichtigung von Schubverzerrungen

a) effektive Längen

Endfelder: $L_{e,1} = 0,85 \cdot L_1 = 0,85 \cdot L = 0,85 \cdot 4,5 = 3,825 \text{ m}$
 Innenaufleger: $L_{e,b} = 0,25 \cdot (L_1 + L_2) = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 4,5 = 2,25 \text{ m}$
 Innenfelder: $L_{e,2} = 0,7 \cdot L_2 = 0,7 \cdot 4,5 = 3,15 \text{ m}$

b) Schubverzerrungen im Obergurt

$$b_{0,o} = 0,5 \cdot b_o = 0,5 \cdot 145 = 72,5 \text{ mm}$$

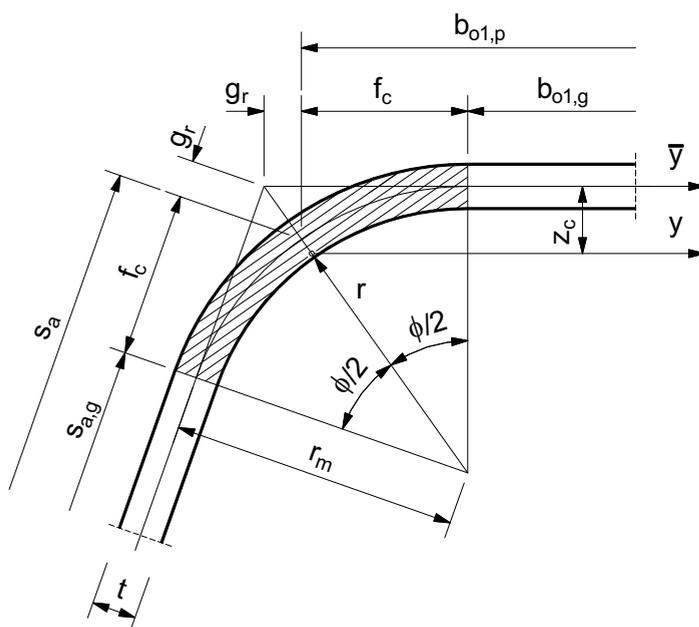
$$L_{e,2}/50 = 3150/50 = 63 \text{ mm} < b_{0,o} < L_{e,1}/50 = 3825/50 = 76,5 \text{ mm}$$

c) Schubverzerrungen im Untergurt

$$b_{0,u} = 0,5 \cdot b_u = 0,5 \cdot 43 = 21,5 \text{ mm} < L_{e,b}/50 = 2250/50 = 45 \text{ mm}$$

3.5 Bruttoquerschnittswerte

3.5.1 Eckausrundungen zwischen Gurten und Stegen



DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.1 (3)

DIN EN 1993-1-5, Bild 3.1

DIN EN 1993-1-5, Absatz 3.1 (1)

Die Schubverzerrungen sind nur in den Endfeldern vernachlässigbar!

DIN EN 1993-1-5, Absatz 3.1 (1)

Die Schubverzerrungen sind generell vernachlässigbar.

Die Eckausrundung zwischen den Gurten und Stegen gilt für Ober- und Untergurt gleichermaßen. In der Skizze dargestellt ist der Übergang vom Steg zum Obergurt. Die Querschnittswerte sind der in der Skizze schraffierten Fläche zugeordnet.

$$\phi = 70,6^\circ \approx 1,232 \text{ rad}$$

$$r_m = r + t/2 = 5 + 0,84/2 = 5,42 \text{ mm}$$

$$f_c = r_m \cdot \sin(\phi/2) = 5,42 \cdot \sin(70,6^\circ/2) = 3,13 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m \cdot \tan(\phi/2) - f_c = 5,42 \cdot \tan(70,6^\circ/2) - 3,13 = 0,71 \text{ mm}$$

$$z_c = r_m \cdot (1 - \sin \phi / \phi) = 5,42 \cdot (1 - \sin(70,6^\circ)/1,232) = 1,271 \text{ mm}$$

$$A_c = r_m \cdot t \cdot \phi = 5,42 \cdot 0,84 \cdot 1,232 = 5,61 \text{ mm}^2$$

$$I_{\bar{y},c} = 0,5 \cdot t \cdot r_m^3 \cdot (\phi + \sin \phi \cdot \cos \phi)$$

$$= 0,5 \cdot 0,84 \cdot 5,42^3 \cdot (1,232 + \sin(70,6^\circ) \cdot \cos(70,6^\circ)) = 103,35 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,c} = I_{\bar{y},c} - A_c \cdot (r_m - z_c)^2 = 103,35 - 5,61 \cdot (5,42 - 1,271)^2 = 6,79 \text{ mm}^4$$

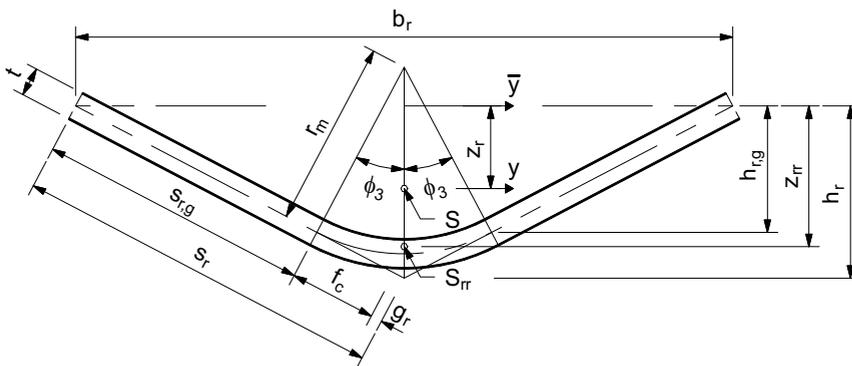
$$b_{o1,p} = b_{o1} - g_r = 40,5 - 0,71 = 39,8 \text{ mm}$$

$$s_a = s'_a - g_r = 20,1 - 0,71 = 19,4 \text{ mm}$$

$$s_w = s'_w - 2 \cdot g_r = 145,2 - 2 \cdot 0,71 = 143,8 \text{ mm}$$

$$b_{u,p} = b_u - 2 \cdot g_r = 43 - 2 \cdot 0,71 = 41,6 \text{ mm}$$

3.5.2 Gurtsicken



$$\phi_3 = \text{atan}(2 \cdot h_r/b_r) = \text{atan}(2 \cdot 5/19) = 27,76^\circ \approx 0,484 \text{ rad}$$

$$\phi_4 = 2 \cdot \phi_3 = 55,52^\circ \approx 0,969 \text{ rad}$$

$$s_{r,g} = s_r - r_m \cdot \tan \phi_3 = 10,73 - 5,42 \cdot \tan 27,76^\circ = 7,88 \text{ mm}$$

$$h_{r,g} = s_{r,g} \cdot \sin \phi_3 = 7,88 \cdot \sin 27,76^\circ = 3,67 \text{ mm}$$

$$b_s = 2 \cdot s_{r,g} + r_m \cdot \phi_4 = 2 \cdot 7,88 + 5,42 \cdot 0,969 = 21,01 \text{ mm}$$

$$A_r = b_s \cdot t = 21,01 \cdot 0,84 = 17,65 \text{ mm}^2$$

$$z_{rr} = h_{r,g} - r_m \cdot (\cos \phi_3 - \sin \phi_3 / \phi_3)$$

$$= 3,67 - 5,42 \cdot (\cos 27,76^\circ - \sin 27,76^\circ / 0,484) = 4,09 \text{ mm}$$

$$z_r = t \cdot (r_m \cdot \phi_4 \cdot z_{rr} + s_{r,g} \cdot h_{r,g}) / A_r$$

$$= 0,84 \cdot (5,42 \cdot 0,969 \cdot 4,09 + 7,88 \cdot 3,67) / 17,65 = 2,40 \text{ mm}$$

$$\Sigma I_i = t \cdot r_m^3 \cdot \left(\frac{\phi_4 + \sin \phi_4}{2} - \frac{2 \cdot \sin^2 \phi_3}{\phi_3} \right) + 2 \cdot t \cdot \frac{s_{r,g} \cdot h_{r,g}^2}{12} = 15,03 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,r} = t \cdot (r_m \cdot \phi_4 \cdot z_{rr}^2 + s_{r,g} \cdot h_{r,g}^2 / 2) + \Sigma I_i - A_r \cdot z_r^2 = 31,78 \text{ mm}^4$$

DIN EN 1993-1-3, Bild 5.1 a)
 DIN 18807-1, Bild 6 b)
 DIN EN 1993-1-3, Bild 5.1 a)
 DIN 18807-1, Bild 6 b)
 Trägheitsmoment um die \bar{y} -Achse [52],
 Tafel 26.4
 Trägheitsmoment um die y-Achse

Nennbreiten ebener Querschnittsteile für die Berechnung effektiver Querschnittswerte (siehe dazu Abschnitt 3.7) entsprechend DIN EN 1993-1-3, Bild 5.1

Die \bar{y} -Achse entspricht der Mittellinie des Trapezprofilobergurtes.
 S kennzeichnet die Lage des Schwerpunkts der Gurtsicke, S_{rr} die Lage des Schwerpunkts der Ausrundung.

Hinweis:
 Die Winkel und Abmessungen werden hier mit höherer Genauigkeit, als in Abschnitt 3.2 angegeben, berechnet.
 Die Trägheitsmomente wurden intern mit noch höherer Genauigkeit ermittelt!

siehe Skizze

siehe Skizze

siehe Skizze

abgewinkelte Breite der Gurtsicke

Fläche der Gurtsicke

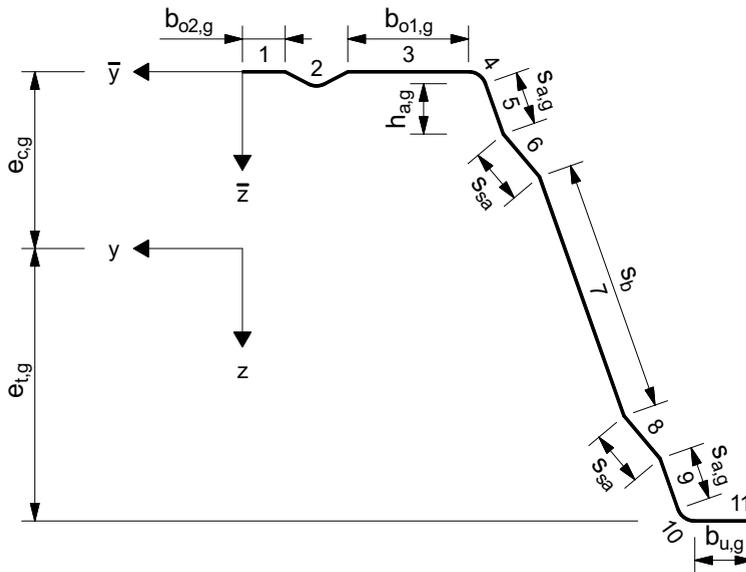
[52] Tafel 26.7, Fall 31

siehe Skizze

Summe der Eigentragheitsmomente, [52] Tafel 26.7, Fall 31 und Tafel 26.3

Trägheitsmoment um die y-Achse

3.5.3 Trapezprofil



$$\begin{aligned}
 b_{o1,g} &= b_{o1} - g_r - f_c = 40,5 - 0,71 - 3,13 = 36,7 \text{ mm} \\
 b_{o2,g} &= b_{o2}/2 = 26/2 = 13 \text{ mm} \\
 b_{u,g} &= b_u/2 - g_r - f_c = 43/2 - 0,71 - 3,13 = 17,7 \text{ mm} \\
 s_{a,g} &= s'_a - g_r - f_c = 20,1 - 0,71 - 3,13 = 16,3 \text{ mm} \\
 h_{a,g} &= h_a - (g_r + f_c) \cdot \sin \phi = 19 - (0,71 + 3,13) \cdot \sin 70,6^\circ = 15,4 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

a) Querschnittswerte einer Profilhalbwelle

| i | l_i [mm] | A_i [mm ²] | \bar{z}_i [mm] | $A_i \cdot \bar{z}_i$ [mm ³] | $A_i \cdot \bar{z}_i^2$ [mm ⁴] | $I_{y,i}$ [mm ⁴] |
|----------|---------------|-----------------------------|---------------------|---|---|---------------------------------|
| 1 | 13,00 | 10,92 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| 2 | 21,02 | 17,65 | 2,40 | 42,3 | 101,5 | 31,78 |
| 3 | 36,66 | 30,80 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| 4 | 6,68 | 5,61 | 1,27 | 7,1 | 9,1 | 6,78 |
| 5 | 16,31 | 13,70 | 11,31 | 154,9 | 1752,0 | 270,01 |
| 6 | 16,99 | 14,27 | 25,50 | 363,9 | 9280,2 | 200,99 |
| 7 | 77,39 | 65,01 | 68,50 | 4453,3 | 305048,6 | 28870,37 |
| 8 | 16,99 | 14,27 | 111,50 | 1591,3 | 177429,9 | 200,99 |
| 9 | 16,31 | 13,70 | 125,69 | 1721,6 | 216387,8 | 270,01 |
| 10 | 6,68 | 5,61 | 135,73 | 761,4 | 103348,7 | 6,78 |
| 11 | 17,66 | 14,84 | 137,00 | 2032,6 | 278465,1 | 0,00 |
| Σ | | 206,38 | | 11128,5 | 1091823,0 | 29857,73 |

$$\begin{aligned}
 e_{c,g} &= \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i) / \Sigma(A_i) = 11,129 / 2,064 = 5,39 \text{ cm} \\
 I_{y,1/2} &= \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i^2) + \Sigma(I_{y,i}) - \Sigma(A_i) \cdot e_{c,g}^2 \\
 &= 109,18 + 2,99 - 2,06 \cdot 5,39^2 = 52,32 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

Für die Berechnung der benötigten Querschnittswerte Fläche, Abstand der y-Achse von der Mittellinie des Obergurts und Trägheitsmoment um die y-Achse genügt wegen der Symmetrie jeder Profilwelle um die z-Achse bzw. z-Achse die Betrachtung einer Profilhalbwelle.

Für die Teilfläche 2 werden die in Abschnitt 3.5.2 ermittelten Werte und für die Teilflächen 4 und 10 die Werte, die in Abschnitt 3.5.1 ermittelt wurden, angesetzt.

Die Eigenträgheitsmomente der Teilflächen 1, 3 und 11 sind vernachlässigbar gering.

Hinweis:

Die unten in der Tabelle angegebenen Flächenmomente wurden mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet und auf zwei bzw. eine Dezimale nach dem Komma gerundet.

g_r und f_c entsprechend Abschnitt 3.5.1

Abstand der y-Achse zum Obergurt

Trägheitsmoment um die y-Achse

b) Querschnittswerte des Trapezprofils

$$A_g = 2 \cdot \Sigma(A_i) / b_R = 2 \cdot 2,06 / 0,31 = 13,3 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$I_g = 2 \cdot I_{y,1/2} / b_R = 2 \cdot 52,32 / 0,31 = 337,5 \text{ cm}^4 / \text{m}$$

$$W_{el} = I_g / (h_w - e_{c,g}) = 337,5 / (13,7 - 5,39) = 40,6 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

Querschnittsfläche
Trägheitsmoment
minimales Widerstandsmoment

3.6 Eindreihen der Flansche

$$\sigma_a = f_{yb} = 320 \text{ N/mm}^2$$

$$b_s = b_o / 2 = 145 / 2 = 72,5 \text{ mm}$$

$$z = e_{c,g} = 53,9 \text{ mm}$$

$$u = 2 \cdot \frac{\sigma_a^2}{E^2} \cdot \frac{b_s^4}{t^2 \cdot z} = 2 \cdot \frac{320^2}{210000^2} \cdot \frac{72,5^4}{0,84^2 \cdot 53,9} = 3,37 \text{ mm}$$

ungünstigster Fall
DIN EN 1993-1-3, Bild 5.3
DIN EN 1993-1-3, Bild 5.3
DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.3a)

Das Eindreihen der Flansche ist vernachlässigbar, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$u / h_w = 3,37 / 137 = 0,025 \approx 2,5\% < 5\% \rightarrow \text{Die Bedingung ist erfüllt.}$$

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.4 (1)

3.7 Effektive Querschnittswerte

3.7.1 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, andrückende Last

a) wirksame Breiten für den druckbeanspruchten Obergurt

$$\gamma_{M,ser} = 1,0$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{e_{c,g}}{h_w - e_{c,g}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M,ser}} = \frac{53,9}{137 - 53,9} \cdot \frac{320}{1,0} = 207,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\psi = 1,0$$

$$k_\sigma = 4,0$$

$$\varepsilon = (235 / f_{yb})^{0,5} = \sqrt{235 / 320} = 0,857$$

Teilsicherheitsbeiwert, DIN EN 1993-1-3, Absatz 2 (5)
Spannung im Obergurt bei Erreichen der Streckgrenze im Untergurt, berechnet am Bruttoquerschnitt
Randspannungsverhältnis, Beulwert für zweiseitig gestütztes Querschnittsteil, DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1
DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

Der Grenzwert für den Beulschlankheitsgrad, bei dessen Unterschreitung die wirksame Breite gleich der vorhandenen Breite ist, beträgt:

$$\bar{\lambda}_{p,lim} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 1} = 0,673$$

DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.2)

wirksame Breite $b_{o1,eff}$ der Teilfläche zwischen Steg und Gurtsicke:

$$\bar{b} = b_{o1,p} = 39,8 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{39,8 / 0,84}{28,4 \cdot 0,857 \cdot \sqrt{4}} = 0,973$$

maßgebende Breite, Abschnitt 3.5.1

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_y / \gamma_{M,ser}}} = 0,973 \cdot \sqrt{\frac{207,6}{320/1,0}} = 0,784 > 0,673 = \bar{\lambda}_{p,lim}$$

$$\rho = \frac{1 - 0,055 \cdot (3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0,6}$$

$$= \frac{1 - 0,055 \cdot (3 + 1) / 0,784}{0,784} + 0,18 \cdot \frac{0,973 - 0,784}{0,973 - 0,6} = 1,0$$

$$b_{o1,eff} = \rho \cdot b_{o1,p} = 1,0 \cdot 39,8 = 39,8 \text{ mm}$$

wirksame Breite $b_{o2,eff}$ der Teilfläche zwischen den Gurtsicken:

$$b_{o2,p} = b_{o2} = 26 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_{o2,p}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{26/0,84}{28,4 \cdot 0,857 \cdot \sqrt{4}} = 0,636 < 0,673 = \bar{\lambda}_{p,lim}$$

$$\rho = 1,0$$

$$b_{o2,eff} = \rho \cdot b_{o2,p} = 1,0 \cdot 26 = 26 \text{ mm}$$

b) vorläufige Lage der neutralen Achse des wirksamen Querschnitts

$$e_c = e_{c,g} = 53,9 \text{ mm}$$

c) wirksame Breiten $s_{eff,i}$ für die Biegedruckzone der Stege

$$s_n = \frac{e_c - h_a - h_{sa}}{\sin \phi} = \frac{53,9 - 19 - 13}{\sin 70,6^\circ} = 23,2 \text{ mm}$$

$$s_{eff,0} = 0,76 \cdot t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M,ser} \cdot \sigma_{com,Ed,ser}}} = 0,76 \cdot 0,84 \cdot \sqrt{\frac{210000}{1,0 \cdot 207,6}} = 20,3 \text{ mm}$$

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 20,3 \text{ mm}$$

$$s_{eff,2} = \left(1 + \frac{h_a}{2e_c}\right) s_{eff,0} = \left(1 + \frac{19}{2 \cdot 53,9}\right) \cdot 20,3 = 23,9 \text{ mm}$$

$$s_{eff,3} = \left(1 + \frac{h_a + h_{sa}}{2e_c}\right) s_{eff,0} = \left(1 + \frac{19 + 13}{2 \cdot 53,9}\right) \cdot 20,3 = 26,3 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5 \cdot s_{eff,0} = 1,5 \cdot 20,3 = 30,5 \text{ mm}$$

$$s_{eff,1} + s_{eff,2} = 20,3 + 23,9 = 44,2 \text{ mm} > 19,4 \text{ mm} = s_a$$

$$s_{eff,3} + s_{eff,n} = 26,3 + 30,5 = 56,8 \text{ mm} > 23,2 \text{ mm} = s_n$$

d) effektives Trägheitsmoment

$$I_{eff,ser}^+ = I_g = 337,5 \text{ cm}^4/\text{m}$$

reduzierter Beulslankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.4)

Abminderungsbeiwert zur Berechnung der wirksamen Breite, DIN EN 1993-1-5, Glg. (E.1)

Die äußere Teilfläche ist voll wirksam!

DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.1)

ohne Abzug für Eckausrundungen

Slankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.2)

Die innere Teilfläche ist voll wirksam.

Lage wie für den Bruttoquerschnitt, weil der Obergurt voll wirksam ist

Abstand zwischen neutraler Achse und Unterkante der oberen Stegsicke, DIN EN 1993-1-3, Bild 5.12

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.32)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33c)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33f)

→ Die Stege sind voll wirksam.

Alle gedrückten Querschnittsteile sind voll wirksam, d.h. der Bruttoquerschnitt und der effektive Querschnitt sind identisch.

3.7.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit, positive Biegemomente

a) wirksame Breiten für den druckbeanspruchten Obergurt

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{e_{c,g}}{h_w - e_{c,g}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{53,9}{137 - 53,9} \cdot \frac{320}{1,1} = 188,7 \text{ N/mm}^2$$

wirksame Breite der äußeren Teilfläche (zwischen Steg und Gurtsicke):

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}} = 0,973 \cdot \sqrt{\frac{188,7}{320/1,1}} = 0,784 > 0,673 = \bar{\lambda}_{p,lim}$$

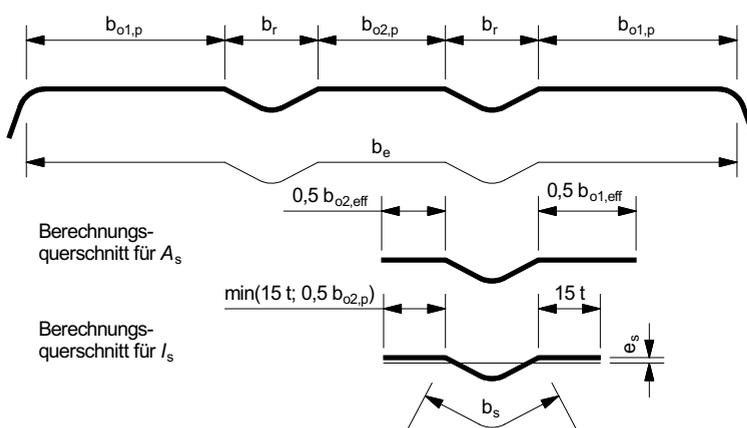
$$\rho = 1,0$$

$$b_{o1,eff} = \rho \cdot b_{o1,p} = 1,0 \cdot 39,8 = 39,8 \text{ mm}$$

innere Teilfläche (zwischen den Gurtsicken):

$$b_{o2,eff} = 26 \text{ mm}$$

b) elastische kritische Spannung der Gurtsteifen



$$A_s = 0,5 \cdot t \cdot (b_{o1,eff} + b_{o2,eff}) + A_r = 0,5 \cdot 0,84 \cdot (39,8 + 26) + 17,65 = 45,3 \text{ mm}^2$$

$$e_s = A_r \cdot z_r / (30 \cdot t^2 + A_r) = 17,65 \cdot 2,4 / (30 \cdot 0,84^2 + 17,65) = 1,09 \text{ mm}$$

$$I_s \approx 30 \cdot t^2 \cdot e_s^2 + A_r \cdot (z_r - e_s)^2 + I_{y,r} \approx 30 \cdot 0,84^2 \cdot 1,09^2 + 17,65 \cdot (2,4 - 1,09)^2 + 31,78 = 87,2 \text{ mm}^4$$

$$b_e = 2 \cdot b_{o1,p} + b_{o2,p} + 2 \cdot b_s = 2 \cdot 39,8 + 26 + 2 \cdot 21,01 = 147,6 \text{ mm}$$

Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten, DIN EN 1993-1-3/NA, NDP zu 2(3)P

Spannung im Obergurt bei Erreichen der Streckgrenze im Untergurt, berechnet am Bruttoquerschnitt

vgl. Abschnitt 3.7.1 a)

reduzierter Beulschlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.4)

$\bar{\lambda}_p, \bar{\lambda}_{p,lim}$ entsprechend Abschnitt 3.7.1

Die äußere Teilfläche ist voll wirksam!

DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.1)

siehe Abschnitt 3.7.1 a)

Die innere Teilfläche ist voll wirksam.

$$\min(15t; 0,5b_{o2,p}) = 15t = 12,6 \text{ mm}$$

b_s, A_r, z_r und $I_{y,r}$, die in folgenden Gleichungen auftreten, sind die Querschnittswerte einer Gurtsicke, die in Abschnitt 3.5.2 berechnet wurden.

e_s ist der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Aussteifung (Berechnungsquerschnitt für I_s) und der Mittellinie des Obergurttes.

Hinweis: Die Berechnungsquerschnitte für A_s und I_s stimmen in der Regel **nicht** überein.

Querschnittsfläche der Aussteifung, im Sinne von DIN EN 1993-1-3, Bild 5.11

siehe Skizze

Trägheitsmoment der Aussteifung, im Sinne von DIN EN 1993-1-3, Bild 5.11

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.2 (3)

$$b_1 = b_{o1,p} + 0,5 \cdot b_r = 39,8 + 0,5 \cdot 19 = 49,3 \text{ mm}$$

$$k_{wo} = \sqrt{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1) / [b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)]}$$

$$= \sqrt{\frac{(2 \cdot 147,6 + 143,8) \cdot (3 \cdot 147,6 - 4 \cdot 49,3)}{49,3 \cdot (4 \cdot 147,6 - 6 \cdot 49,3) + 143,8 \cdot (3 \cdot 147,6 - 4 \cdot 49,3)}} = 1,47$$

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{I_s \cdot b_1^2 \cdot (3b_e - 4b_1) / t^3}$$

$$= 3,65 \sqrt[4]{87,2 \cdot 49,3^2 \cdot (3 \cdot 147,6 - 4 \cdot 49,3) / 0,84^3} = 353,3 \text{ mm}$$

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{353,3}{143,8} = 2,46 > 2 \rightarrow k_w = k_{wo} = 1,47$$

$$\sigma_{cr,s} = (4,2k_w \cdot E/A_s) \sqrt{(I_s \cdot t^3) / [8b_1^2(3b_e - 4b_1)]}$$

$$= \frac{4,2 \cdot 1,47 \cdot 210000}{45,3} \cdot \sqrt{\frac{87,2 \cdot 0,84^3}{8 \cdot 49,3^2 \cdot (3 \cdot 147,6 - 4 \cdot 49,3)}} = 94,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.2 (3)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.28)

 s_w entsprechend Abschnitt 3.5.1

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.27)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.24a)

elastische kritische Spannung, DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.23a)

c) modifizierte elastische kritische Spannung für Gurt- und Stegsteifen

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.4 (1)

Dieser Schritt ist nur bei einer iterativen Berechnung erforderlich, wobei für die Stegsteifen die kritische Spannung des vorhergehenden Iterationsschrittes zu verwenden ist.

Die Berechnung der modifizierten elastischen kritischen Spannung wird in Schritt i) für die Stegsteifen gezeigt.

d) reduzierte wirksame Fläche der Gurtsteifen

$$\bar{\lambda}_d = (f_{yb} / \sigma_{cr,s})^{0,5} = \sqrt{320 / 94,2} = 1,84 > 1,38$$

$$\chi_d = 0,66 / \bar{\lambda}_d = 0,66 / 1,84 = 0,36$$

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 0,36 \cdot 45,3 \cdot \frac{320 / 1,1}{188,7} = 25,1 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = t \cdot A_{s,red} / A_s = 0,84 \cdot 25,1 / 45,3 = 0,46 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12d)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12c)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.29) bzw. Glg. (5.17)

reduzierte Dicke für die Berechnung wirksamer Querschnittswerte, DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.2 (11)

e) vorläufige Lage der neutralen Achse des wirksamen Querschnitts

In einer iterativen Berechnung sind für die Stegsteifen die Werte (ΔA_{sa} und ΔS_{sa}) des vorangegangenen Iterationsschrittes zu verwenden.

Die Berechnung dieser Werte ist in Schritt j) dargestellt.

$$\Delta t_s = t - t_{red} = 0,84 - 0,46 = 0,38 \text{ mm}$$

$$\Delta A_s = -A_s \cdot \Delta t_s / t = -45,3 \cdot 0,38 / 0,84 = -20,5 \text{ mm}^2$$

$$\Delta S_s = -A_r \cdot z_r \cdot \Delta t_s / t = -17,66 \cdot 2,4 \cdot 0,38 / 0,84 = -19,2 \text{ mm}^3$$

$$e_c = \frac{\Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i) + \Delta S_s + \Delta S_{sa}}{\Sigma(A_i) + \Delta A_s + \Delta A_{sa}} = \frac{11128,5 - 19,2 - 0}{206,4 - 20,5 - 0} = 59,7 \text{ mm}$$

vorläufige Lage der neutralen Achse, $\Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i)$ und $\Sigma(A_i)$ entsprechend Abschnitt 3.5.3 a)

f) wirksame Breiten für die Biegedruckzone der Stege

$$s_n = \frac{e_c - h_a - h_{sa}}{\sin \phi} = \frac{59,7 - 19 - 13}{\sin 70,6^\circ} = 29,4 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},0} = 0,76t \cdot [E/(\gamma_{M0} \cdot \sigma_{\text{com,Ed}})]^{0,5} = 0,76 \cdot 0,84 \cdot [210000/(1,1 \cdot 188,7)]^{0,5} = 20,3 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},0} = 20,3 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = (1 + 0,5 h_a/e_c) \cdot s_{\text{eff},0} = (1 + 0,5 \cdot 19/59,7) \cdot 20,3 = 23,5 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},3} = \left(1 + \frac{h_a + h_{sa}}{2e_c}\right) \cdot s_{\text{eff},0} = \left(1 + \frac{19 + 13}{2 \cdot 59,7}\right) \cdot 20,3 = 25,7 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 1,5 \cdot s_{\text{eff},0} = 1,5 \cdot 20,3 = 30,5 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},2} = 20,3 + 23,5 = 43,8 \text{ mm} > 19,4 \text{ mm} = s_a$$

$$s_{\text{eff},3} + s_{\text{eff},n} = 25,7 + 30,5 = 56,2 \text{ mm} > 29,4 \text{ mm} = s_n$$

g) modifizierte wirksame Breiten für die Biegedruckzone der Stege

$$s_{\text{eff},1} = s_a / (2 + 0,5 h_a/e_c) = 19,4 / (2 + 0,5 \cdot 19/59,7) = 9,0 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},2} = s_a \frac{1 + 0,5 h_a/e_c}{2 + 0,5 h_a/e_c} = 19,4 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 19/59,7}{2 + 0,5 \cdot 19/59,7} = 10,4 \text{ mm}$$

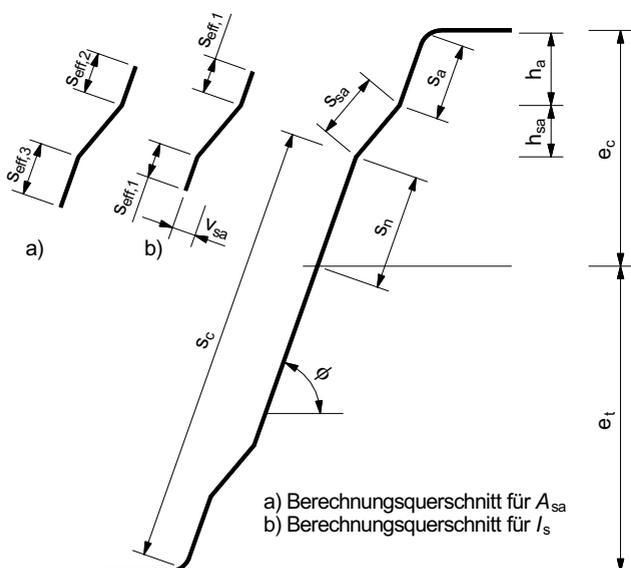
$$s_{\text{eff},3} = s_n [1 + 0,5 \cdot (h_a + h_{sa})/e_c] / [2,5 + 0,5 \cdot (h_a + h_{sa})/e_c]$$

$$= 29,4 \cdot [1 + 0,5 \cdot (19 + 13)/59,7] / [2,5 + 0,5 \cdot (19 + 13)/59,7]$$

$$= 13,5 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = \frac{1,5s_n}{2,5 + 0,5 (h_a + h_{sa})/e_c} = \frac{1,5 \cdot 29,4}{2,5 + 0,5 \cdot (19 + 13)/59,7} = 15,9 \text{ mm}$$

h) elastische kritische Spannung der Stegsteifen



siehe auch die Skizze unter Schritt h)

Abstand zwischen neutraler Achse und Unterkante der oberen Stegsicke, DIN EN 1993-1-3, Bild 5.12

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.32)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33c)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33f)

→ Die Stege sind voll wirksam und die wirksamen Breiten sind zu ändern, DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (6)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.35a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.35b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.36a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.36b)

Die Stegsicken im Zugbereich bleiben wie bei der Bestimmung der wirksamen Breiten unberücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 A_{sa} &= t \cdot (s_{\text{eff},2} + s_{sa} + s_{\text{eff},3}) = 0,84 \cdot (10,4 + 17 + 13,5) = 34,3 \text{ mm}^2 \\
 I_s &\approx t \cdot v_{sa}^2 \cdot \left(\frac{s_{\text{eff},1}}{2} + \frac{s_{sa}}{12} \right) = 0,84 \cdot 6^2 \cdot \left(\frac{9}{2} + \frac{17}{12} \right) = 178,9 \text{ mm}^4 \\
 s_c &\approx \frac{h_w - h_a - h_{sa}}{\sin \phi} - g_r = \frac{137 - 19 - 13}{\sin 70,6^\circ} - 0,71 = 110,6 \text{ mm} \\
 s_1 &= 0,9 \cdot (s_a + s_{sa} + s_c) = 0,9 \cdot (19,4 + 17 + 110,6) = 132,3 \text{ mm} \\
 s_2 &= s_1 - s_a - 0,5 \cdot s_{sa} = 132,3 - 19,4 - 0,5 \cdot 17 = 104,4 \text{ mm} \\
 \sigma_{cr,sa} &= \frac{1,05 \cdot k_f \cdot E \cdot \sqrt{I_s \cdot t^3 \cdot s_1}}{A_{sa} \cdot s_2 \cdot (s_1 - s_2)} \\
 &= \frac{1,05 \cdot 1 \cdot 210000 \cdot \sqrt{178,9 \cdot 0,84^3 \cdot 132,3}}{34,3 \cdot 104,4 \cdot (132,3 - 104,4)} = 261,4 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.30)

DIN EN 1993-1-3, Bild 5.13

siehe Skizze, g_r wie in Abschnitt 3.5.1

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.39b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.39d)

elastische kritische Spannung, DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.39a)

Der Beiwert k_f wird entsprechend DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (8) mit 1,0 angesetzt.

i) modifizierte elastische kritische Spannung für Gurt- und Stegsteifen

$$\begin{aligned}
 \beta_s &= 1 - \frac{h_a + 0,5 \cdot h_{sa}}{e_c} = 1 - \frac{19 + 0,5 \cdot 13}{59,7} = 0,573 \\
 \sigma_{cr,mod} &= \frac{\sigma_{cr,s}}{\sqrt[4]{1 + \left[\beta_s \frac{\sigma_{cr,s}}{\sigma_{cr,sa}} \right]^4}} = \frac{94,2}{\sqrt[4]{1 + \left[0,573 \cdot \frac{94,2}{261,4} \right]^4}} = 94,2 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.4 (1)

modifizierte elastische kritische Spannung zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen dem Biegeknicken der Gurt- und der Stegsteifen, DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.42)

j) reduzierte Dicke der Stegsteifen

$$\begin{aligned}
 \bar{\lambda}_d &= \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,mod}}} = \sqrt{\frac{320}{94,2}} = 1,84 > 1,38 \\
 \chi_d &= 0,66 / \bar{\lambda}_d = 0,66 / 1,84 = 0,36 \\
 t_{red} &= \chi_d \cdot t = 0,36 \cdot 0,84 = 0,3 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12d)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12c)

reduzierte Dicke für die Berechnung wirksamer Querschnittswerte, DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (14)

Die für die Bestimmung der Lage der neutralen Achse erforderlichen Abzüge für die Fläche und das statische Moment des Querschnitts (zur Berücksichtigung der reduzierten Dicke der Stegsteifen) sind wie folgt zu berechnen:

Die Verwendung dieser Abzüge ist im Schritt e) dargestellt.

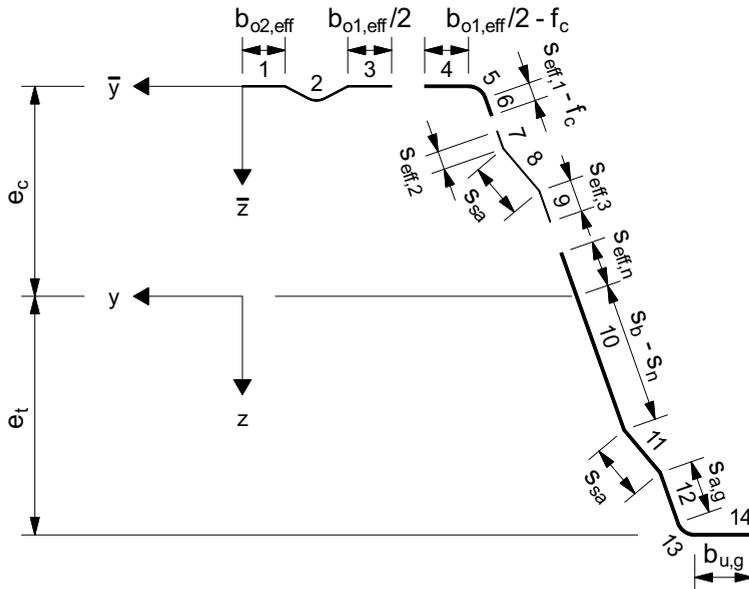
$$\begin{aligned}
 \Delta A_{sa} &= -A_{sa} (1 - t_{red}/t) = -34,3 \cdot (1 - 0,3/0,84) = -22,05 \text{ mm}^2 \\
 \Delta e_{sa} &= \frac{\sin \phi \cdot (s_{\text{eff},3}^2 - s_{\text{eff},2}^2) + h_{sa} \cdot (s_{\text{eff},3} - s_{\text{eff},2})}{2 \cdot (s_{\text{eff},3} + s_{sa} + s_{\text{eff},2})} + \frac{h_{sa}}{2} + h_a \\
 &= \frac{\sin 70,6^\circ \cdot (13,5^2 - 10,4^2) + 13 \cdot (13,5 - 10,4)}{2 \cdot (13,5 + 17 + 10,4)} + \frac{13}{2} + 19 \\
 &= 26,85 \text{ mm} \\
 \Delta S_{sa} &= \Delta e_{sa} \cdot \Delta A_{sa} = -26,85 \cdot 22,05 = -592,0 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Abzug für die Querschnittsfläche

Abstand des Schwerpunktes der Abzugsfläche zur Mittellinie des Obergurtes

Abzug für das statische Moment

k) wirksame Querschnittswerte



Für die Berechnung der benötigten Querschnittswerte Fläche, Abstand der y-Achse von der Mittellinie des Obergurts und Trägheitsmoment um die y-Achse genügt wegen der Symmetrie jeder Profilwelle um die z-Achse bzw. \bar{z} -Achse die Betrachtung einer Profilhälfte.

Für die Teilfläche 2 werden die in Abschnitt 3.5.2 ermittelten Werte, aber mit der reduzierten Dicke nach Schritt d), und für die Teilflächen 5 und 13 die in Abschnitt 3.5.1 ermittelten Werte angesetzt.

Die Eigenträgheitsmomente der Teilflächen 1, 3, 4 und 14 sind vernachlässigbar gering.

Hinweis:

Die unten in der Tabelle angegebenen Flächenmomente wurden mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet und auf eine bzw. keine Dezimale nach dem Komma gerundet.

Querschnittswerte für eine Profilhälfte:

| i | l_i [mm] | t_i [mm] | A_i [mm ²] | \bar{z}_i [mm] | $A_i \cdot \bar{z}_i$ [mm ³] | $A_i \cdot \bar{z}_i^2$ [mm ⁴] | $I_{y,i}$ [mm ⁴] |
|----------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|---|---|---------------------------------|
| 1 | 13,00 | 0,46 | 6,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 2 | 21,02 | 0,46 | 9,7 | 2,4 | 23 | 56 | 17,5 |
| 3 | 19,90 | 0,46 | 9,2 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 4 | 16,77 | 0,84 | 14,1 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 5 | 6,68 | 0,84 | 5,6 | 1,3 | 7 | 9 | 6,8 |
| 6 | 5,87 | 0,84 | 4,9 | 6,4 | 32 | 201 | 12,6 |
| 7 | 10,44 | 0,30 | 3,1 | 14,1 | 44 | 622 | 25,3 |
| 8 | 16,99 | 0,30 | 5,1 | 25,5 | 130 | 3322 | 72,0 |
| 9 | 13,46 | 0,30 | 4,0 | 38,3 | 155 | 5950 | 54,3 |
| 10 | 63,94 | 0,84 | 53,7 | 74,8 | 4020 | 300869 | 16278,6 |
| 11 | 16,99 | 0,84 | 14,3 | 111,5 | 1591 | 177430 | 201,0 |
| 12 | 16,31 | 0,84 | 13,7 | 125,7 | 1722 | 216388 | 270,0 |
| 13 | 6,68 | 0,84 | 5,6 | 135,7 | 761 | 103349 | 6,8 |
| 14 | 17,66 | 0,84 | 14,8 | 137,0 | 2033 | 278465 | 0,0 |
| Σ | | | 163,8 | | 10518 | 1086661 | 16499,9 |

$$e_c = \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i) / \Sigma(A_i) = 10518 / 163,8 = 64,2 \text{ mm}$$

$$I_{y,1/2} = \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i^2) + \Sigma(I_{y,i}) - \Sigma(A_i) \cdot e_c^2 = 1086661 + 16499,9 - 163,8 \cdot 64,2^2 = 428036,3 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,1/2,c} = I_{y,1/2} / e_c = 428036,3 / 64,2 = 6667,2 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,1/2,t} = I_{y,1/2} / (h_w - e_c) = 428036,3 / (137 - 64,2) = 5879,6 \text{ mm}^3$$

Abstand der y-Achse zum Obergurt

effektives Trägheitsmoment für Biegung um die y-Achse

effektive Widerstandsmomente für den Druck- bzw. Zugrand

Querschnittswerte für das Trapezprofil:

$$I_{\text{eff}}^+ = 2 \cdot I_{y,1/2} / b_R = 2 \cdot 42,8 / 0,31 = 276,1 \text{ cm}^4 / \text{m}$$

$$W_{\text{eff},c}^+ = 2 \cdot W_{y,1/2,c} / b_R = 2 \cdot 6,67 / 0,31 = 43,0 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

$$W_{\text{eff},t}^+ = 2 \cdot W_{y,1/2,t} / b_R = 2 \cdot 5,88 / 0,31 = 37,9 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

m) verbesserte wirksame Querschnittswerte

Die wirksamen Querschnittswerte dürfen wahlweise durch Iteration verbessert werden.

| Schritt | Parameter | | Ausgangswert | 1. Iteration | 2. Iteration |
|---------|---------------------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Symbol | Einheit | | | |
| a) | $\sigma_{\text{com,Ed}}$ | N/mm ² | 188,7 | 256,0 | 274,4 |
| | $\bar{\lambda}_{p,\text{red}}$ | — | 0,784 | 0,913 | 0,945 |
| | ρ | — | 1,0 | 0,86 | 0,825 |
| | $b_{o1,\text{eff}}$ | mm | 39,8 | 34,2 | 32,8 |
| b) | A_s | mm ² | 45,3 | 43,0 | 42,4 |
| | $\sigma_{\text{cr},s}$ | N/mm ² | 94,2 | 99,3 | 100,7 |
| c) | β_s | — | | 0,602 | 0,617 |
| | $\sigma_{\text{cr},\text{mod}}$ | N/mm ² | | 99,2 | 100,6 |
| d) | $\bar{\lambda}_d$ | — | 1,84 | 1,80 | 1,78 |
| | χ_d | — | 0,36 | 0,37 | 0,37 |
| | t_{red} | — | 0,46 | 0,43 | 0,40 |
| e) | e_c | mm | 59,7 | 66,4 | 67,4 |
| f) | s_n | mm | 29,4 | 36,5 | 37,6 |
| | $s_{\text{eff},0}$ | mm | 20,3 | 21,8 | 21,0 |
| g) | $s_{\text{eff},1}$ | mm | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| | $s_{\text{eff},2}$ | mm | 10,4 | 10,4 | 10,4 |
| | $s_{\text{eff},3}$ | mm | 13,5 | 16,5 | 17,0 |
| | $s_{\text{eff},n}$ | mm | 15,9 | 20,0 | 20,6 |
| h) | A_{sa} | mm ² | 34,3 | 36,8 | 37,2 |
| | I_s | mm ⁴ | 178,9 | 180,0 | 180,1 |
| | $\sigma_{\text{cr},\text{sa}}$ | N/mm ² | 261,4 | 244,0 | 241,3 |
| i) | β_s | — | 0,573 | 0,616 | 0,622 |
| | $\sigma_{\text{cr},\text{mod}}$ | N/mm ² | 94,2 | 99,2 | 100,6 |
| j) | $\bar{\lambda}_d$ | — | 1,84 | 1,80 | 1,78 |
| | χ_d | — | 0,36 | 0,37 | 0,37 |
| | t_{red} | — | 0,30 | 0,31 | 0,31 |
| k) | e_c | mm | 64,2 | 66,5 | 67,4 |
| | I_{eff}^+ | cm ⁴ /m | 276,1 | 261,6 | 255,4 |
| | $W_{\text{eff},c}^+$ | cm ³ /m | 43,0 | 39,3 | 37,9 |
| | $W_{\text{eff},t}^+$ | cm ³ /m | 37,9 | 37,1 | 36,7 |

effektives Trägheitsmoment

DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (16)

Die Ergebnisse für zwei Iterationen sind links tabellarisch aufgeführt. Eine ausführliche Darstellung aller Zwischenschritte ist entbehrlich.

Hinweis:

Die Werte für die 1. und 2. Iteration sind mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet worden und hier gerundet angegeben.

Ab der 1. Iteration wird mit einem erhöhten Eingangswert für die effektive Breite der Stege entsprechend DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.41) gerechnet:

$$s_{\text{eff},0} = 0,95t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \cdot \sigma_{\text{com,Ed}}}}$$

Die Ergebnisse der 2. Iteration werden für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten verwendet.

3.7.3 Grenzzustand der Tragfähigkeit, negative Biegemomente

Negative Biegemomente ergeben sich für Lastkombination 1 an den Zwischenauflagern, wo der Einfluss der Schubverzerrungen für den zugbeanspruchten Obergurt zu berücksichtigen ist.

Das wird mit dem Ansatz einer **mittragenden** Breite des Obergurtes bei der Berechnung der wirksamen Querschnittswerte sichergestellt.

Zur Vereinfachung, aber auf der sicheren Seite liegend, bleiben die Sicken im Obergurt bei der Berechnung der wirksamen Querschnittswerte unberücksichtigt.

Die Berechnung erfolgt wie in Abschnitt 3.7.2 für eine halbe Profilwelle.

siehe Abschnitt 3.4

a) mittragende Breite des Obergurtes

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 \cdot t_f}} = 1$$

$$L_e = 0,25 \cdot (L + L) = 0,5 \cdot 4,5 = 2,25 \text{ m}$$

$$b_0 = 0,5 \cdot b_0 = 0,5 \cdot 145 = 72,5 \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = 1$$

$$\kappa = \alpha_0 \cdot b_0 / L_e = 1,0 \cdot 72,5 / 2250 = 0,03 \begin{matrix} > 0,02 \\ < 0,7 \end{matrix}$$

$$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left(\kappa - \frac{1}{2500 \cdot \kappa} \right) + 1,6 \cdot \kappa^2}$$

$$= \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left(0,03 - \frac{1}{2500 \cdot 0,03} \right) + 1,6 \cdot 0,03^2} = 0,892$$

$$b_{0,eff} = \beta \cdot b_0 = 0,892 \cdot 72,5 = 64,7 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-5, Glg. (3.4)

Bei Zugbeanspruchung ist für $A_{c,eff}$ die Bruttoquerschnittsfläche anzusetzen.

DIN EN 1993-1-5, Bild 3.1

DIN EN 1993-1-5, Absatz 3.1 (1)

DIN EN 1993-1-5, Tabelle 3.1

mittragende Breite des Obergurtes, DIN EN 1993-1-5, Glg. (3.1)

b) wirksame Breite des Untergurtes

$$\psi = 1,0$$

$$k_\sigma = 4,0$$

$$b_{u,p} = 41,6 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_{p,lim} = 0,673$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_{u,p}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{41,6/0,84}{28,4 \cdot 0,857 \cdot \sqrt{4}} = 1,017 > 0,673 = \bar{\lambda}_{p,lim}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,017 - 0,055(3 + 1)}{1,017^2} = 0,77$$

$$b_{u,eff} = \rho \cdot b_{u,p} = 0,77 \cdot 41,6 = 32,0 \text{ mm}$$

Randspannungsverhältnis, Beulwert für zweiseitig gestütztes Querschnittsteil, DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1

siehe Abschnitt 3.5.1

siehe Abschnitt 3.7.1

Beulschlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

Abminderungsfaktor zur Berechnung der wirksamen Breite, DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.2)

wirksame Breite des Untergurtes, DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.1)

c) vorläufige Lage der neutralen Achse des wirksamen Querschnitts

$$\begin{aligned}
 b_{o1} &= b_{o,eff} - g_r - f_c = 64,7 - 0,71 - 3,13 = 60,9 \text{ mm} \\
 b_{u1} &= b_{u,eff}/2 - f_c = 32,0/2 - 3,13 = 12,9 \text{ mm} \\
 e_t &= \frac{t \cdot h_w \cdot (b_{u1} + s_{a,g} + s_{sa} + s_b/2) + A_c \cdot h_w}{t \cdot (b_{o1} + b_{u1} + 2 \cdot (s_{a,g} + s_{sa}) + s_b) + 2 \cdot A_c} \\
 &= \frac{0,84 \cdot 137 \cdot (12,9 + 16,3 + 17 + 77,4/2) + 5,61 \cdot 137}{0,84 \cdot (60,9 + 12,9 + 2 \cdot (16,3 + 17) + 77,4) + 2 \cdot 5,61} = 54,3 \text{ mm} \\
 e_c &= h_w - e_t = 137 - 54,3 = 82,7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

effektive Gurtbreiten abzüglich der Ausrundungen je Profilhälfte, g_r und f_c wie in Abschnitt 3.5.1

Abstand der neutralen Achse zur Mittellinie des Obergurtes

Abstand der neutralen Achse zur Mittellinie des Untergurtes

d) wirksame Breiten für die Biegedruckzone der Stege

$$\begin{aligned}
 s_n &= \frac{e_c - h_a - h_{sa}}{\sin \phi} = \frac{82,7 - 19 - 13}{\sin 70,6^\circ} = 53,8 \text{ mm} \\
 s_{eff,0} &= 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \cdot \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \cdot 0,84 \cdot \sqrt{\frac{210000}{320}} = 16,4 \text{ mm} \\
 s_{eff,1} &= s_{eff,0} = 16,4 \text{ mm} \\
 s_{eff,2} &= \left(1 + \frac{h_a}{2e_c}\right) \cdot s_{eff,0} = \left(1 + \frac{19}{2 \cdot 82,7}\right) \cdot 16,4 = 18,3 \text{ mm} \\
 s_{eff,3} &= \left(1 + \frac{h_a + h_{sa}}{2e_c}\right) \cdot s_{eff,0} = \left(1 + \frac{19 + 13}{2 \cdot 82,7}\right) \cdot 16,4 = 19,6 \text{ mm} \\
 s_{eff,n} &= 1,5 \cdot s_{eff,0} = 1,5 \cdot 16,4 = 24,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Abstand zwischen neutraler Achse und Oberkante der unteren Stegsicke, DIN EN 1993-1-3, Bild 5.12

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.32)

$$\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0} \rightarrow \gamma_{M0} \cdot \sigma_{com,Ed} = f_y$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33c)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.33f)

$$s_{eff,1} + s_{eff,2} = 16,4 + 18,3 = 34,7 \text{ mm} > 19,4 \text{ mm} = s_a$$

$$s_{eff,3} + s_{eff,n} = 19,6 + 24,6 = 44,2 \text{ mm} < 53,8 \text{ mm} = s_n$$

→ Die Stege sind zwischen den Sicken und dem Untergurt voll wirksam und die wirksamen Breiten sind zu ändern, DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (6)

e) modifizierte wirksame Breiten für die Biegedruckzone der Stege

$$\begin{aligned}
 s_{eff,1} &= s_a / (2 + 0,5 h_a / e_c) = 19,4 / (2 + 0,5 \cdot 19 / 82,7) = 9,2 \text{ mm} \\
 s_{eff,2} &= s_a \frac{1 + 0,5 h_a / e_c}{2 + 0,5 h_a / e_c} = 19,4 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 19 / 82,7}{2 + 0,5 \cdot 19 / 82,7} = 10,2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.35a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.35b)

f) elastische kritische Spannung der Stegsteifen

$$\begin{aligned}
 A_{sa} &= t \cdot (s_{eff,2} + s_{sa} + s_{eff,3}) = 0,84 \cdot (10,2 + 17 + 19,6) = 39,3 \text{ mm}^2 \\
 I_s &\approx t \cdot v_{sa}^2 \cdot \left(\frac{s_{eff,1}}{2} + \frac{s_{sa}}{12}\right) = 0,84 \cdot 6^2 \cdot \left(\frac{9,2}{2} + \frac{17}{12}\right) = 181,9 \text{ mm}^4 \\
 \sigma_{cr,sa} &= \frac{1,05 \cdot k_f \cdot E \cdot \sqrt{I_s \cdot t^3 \cdot s_1}}{A_{sa} \cdot s_2 \cdot (s_1 - s_2)} \\
 &= \frac{1,05 \cdot 1 \cdot 210000 \cdot \sqrt{181,9 \cdot 0,84^3 \cdot 132,3}}{39,3 \cdot 104,4 \cdot (132,3 - 104,4)} = 230,1 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

siehe Skizze Abschnitt 3.7.2, Schritt h)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.30)

DIN EN 1993-1-3, Bild 5.13

elastische kritische Spannung, DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.39a)

k_f, s_1, s_2 wie in Abschnitt 3.7.2, Schritt h)

g) reduzierte Dicke der Stegsteifen

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,sa}} = \sqrt{320/230,1} = 1,18 \begin{matrix} > 0,65 \\ < 1,38 \end{matrix}$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,18 = 0,62$$

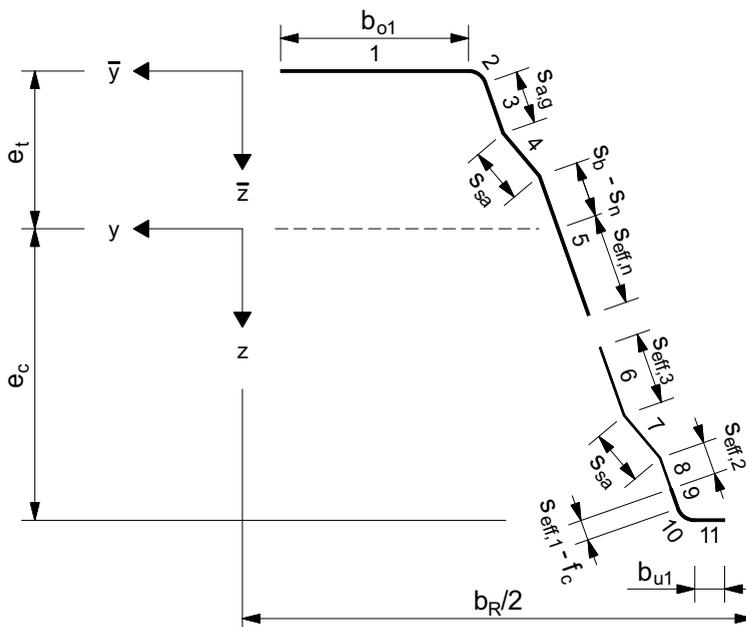
$$t_{red} = \chi_d \cdot t = 0,62 \cdot 0,84 = 0,52 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12d)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.12b)

reduzierte Dicke für die Berechnung wirksamer Querschnittswerte, DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (14)

h) wirksame Querschnittswerte



Für die Berechnung der benötigten Querschnittswerte Fläche, Abstand der y-Achse von der Mittellinie des Untergurts und Trägheitsmoment um die y-Achse genügt wegen der Symmetrie jeder Profilwelle um die z-Achse die Betrachtung einer Profilhalbwellen.

Für die Teilflächen 2 und 10 werden die in Abschnitt 3.5.1 ermittelten Werte angesetzt.

Die Eigenträgheitsmomente der Teilflächen 1 und 11 sind vernachlässigbar gering.

Hinweis:

Die unten in der Tabelle angegebenen Flächenmomente wurden mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet und auf eine bzw. keine Dezimale nach dem Komma gerundet.

Querschnittswerte für eine Profilhalbwelle:

| i | l_i [mm] | t_i [mm] | A_i [mm ²] | \bar{z}_i [mm] | $A_i \cdot \bar{z}_i$ [mm ³] | $A_i \cdot \bar{z}_i^2$ [mm ⁴] | $I_{y,i}$ [mm ⁴] |
|----------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|---|---|---------------------------------|
| 1 | 60,87 | 0,84 | 51,1 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 2 | 6,68 | 0,84 | 5,6 | 1,3 | 7,1 | 9 | 6,8 |
| 3 | 16,31 | 0,84 | 13,7 | 11,3 | 154,9 | 1752 | 270,0 |
| 4 | 16,99 | 0,84 | 14,3 | 25,5 | 363,9 | 9280 | 201,0 |
| 5 | 48,15 | 0,84 | 40,4 | 54,7 | 2212,9 | 121063 | 6953,0 |
| 6 | 19,52 | 0,52 | 10,1 | 95,8 | 969,0 | 92824 | 285,7 |
| 7 | 16,99 | 0,52 | 8,8 | 111,5 | 981,8 | 109470 | 124,0 |
| 8 | 10,25 | 0,52 | 5,3 | 122,8 | 652,3 | 80125 | 41,3 |
| 9 | 6,06 | 0,84 | 5,1 | 130,5 | 664,3 | 86711 | 13,9 |
| 10 | 6,68 | 0,84 | 5,6 | 135,7 | 761,4 | 103349 | 6,8 |
| 11 | 12,89 | 0,84 | 10,8 | 137,0 | 1483,4 | 203221 | 0,0 |
| Σ | | | 170,8 | | 8251,0 | 807804 | 7902,5 |

$$e_t = \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i) / \Sigma(A_i) = 8251 / 170,8 = 48,3 \text{ mm}$$

$$e_c = h_w - e_t = 137 - 48,3 = 88,7 \text{ mm}$$

$$I_{y,1/2} = \Sigma(A_i \cdot \bar{z}_i^2) + \Sigma(I_{y,i}) - \Sigma(A_i) \cdot e_t^2$$

$$= 807804 + 7902,5 - 170,8 \cdot 48,3^2 = 417248,9 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,1/2,c} = I_{y,1/2} / e_c = 417248,9 / 88,7 = 4704,0 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,1/2,t} = I_{y,1/2} / e_t = 417248,9 / 48,3 = 8638,7 \text{ mm}^3$$

Querschnittswerte für das Trapezprofil:

$$I_{\text{eff}}^- = 2 \cdot I_{y,1/2} / b_R = 2 \cdot 41,7 / 0,31 = 269,0 \text{ cm}^4 / \text{m}$$

$$W_{\text{eff},c}^- = 2 \cdot W_{y,1/2,c} / b_R = 2 \cdot 4,70 / 0,31 = 30,3 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

$$W_{\text{eff},t}^- = 2 \cdot W_{y,1/2,t} / b_R = 2 \cdot 8,64 / 0,31 = 55,7 \text{ cm}^3 / \text{m}$$

i) verbesserte wirksame Querschnittswerte

Nach DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (16) dürfen die wirksamen Querschnittswerte wahlweise durch Iteration verbessert werden. Dabei werden die zuvor durchgeführten Berechnungsschritte d) bis h) in jeder Iteration wiederholt.

| Schritt | Parameter | | Ausgangs- wert | 1. Iteration | 2. Iteration |
|---------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|
| | Symbol | Einheit | | | |
| d) | s_n | mm | 53,8 | 60,1 | 60,2 |
| | $s_{\text{eff},0}$ | mm | 16,4 | 20,4 | 20,4 |
| | $s_{\text{eff},3}$ | mm | 19,6 | 24,1 | 24,1 |
| | $s_{\text{eff},n}$ | mm | 24,6 | 30,7 | 30,7 |
| e) | $s_{\text{eff},1}$ | mm | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| | $s_{\text{eff},2}$ | mm | 10,2 | 10,2 | 10,2 |
| f) | A_{sa} | mm ² | 39,3 | 43,1 | 43,1 |
| | I_s | mm ⁴ | 181,9 | 182,3 | 182,3 |
| | $\sigma_{cr,sa}$ | N/mm ² | 230,1 | 209,7 | 209,7 |
| g) | $\bar{\lambda}_d$ | — | 1,18 | 1,24 | 1,24 |
| | χ_d | — | 0,62 | 0,58 | 0,58 |
| | t_{red} | — | 0,52 | 0,49 | 0,49 |
| h) | e_c | mm | 88,7 | 88,8 | 88,8 |
| | I_{eff}^- | cm ⁴ /m | 269,0 | 267,4 | 267,4 |
| | $W_{\text{eff},c}^-$ | cm ³ /m | 30,3 | 30,1 | 30,1 |

Abstand der y-Achse zum Obergurt

Abstand der y-Achse zum Untergurt

effektives Trägheitsmoment um die y-Achse

effektive Widerstandsmomente für den Druck- bzw. Zugrand

Die Ergebnisse für zwei Iterationen sind nachfolgend tabellarisch aufgeführt. Eine ausführliche Darstellung aller Zwischenschritte ist entbehrlich.

Hinweis:

Die Werte für die 1. und 2. Iteration sind mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet worden und hier gerundet angegeben.

Ab der 1. Iteration wird mit einem erhöhten Eingangswert für die effektive Breite der Stege entsprechend DIN EN 1993-1-3, Glg. (5.41) gerechnet:

$$s_{\text{eff},0} = 0,95t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \cdot \sigma_{\text{com},Ed}}}$$

Die Ergebnisse der 2. Iteration werden für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten verwendet.

4 Grenzzustände der Tragfähigkeit

4.1 Querschnittstragfähigkeit

4.1.1 Biegemomente

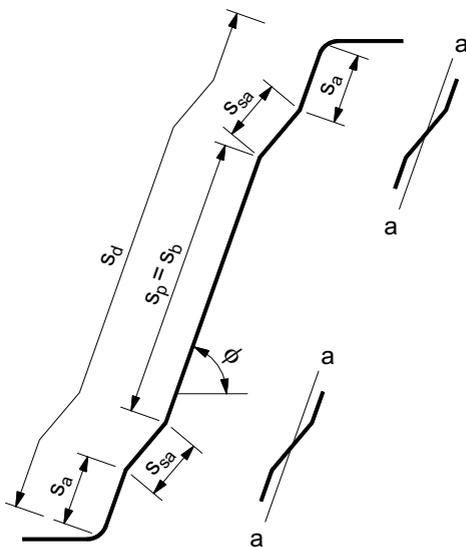
a) positive Biegemomente (Zug im Untergurt)

$$\begin{aligned}
 W_{el} &= 40,6 \text{ cm}^3/\text{m} \\
 W_{\text{eff,t}}^+ &= 36,7 \text{ cm}^3/\text{m} < 40,6 \text{ cm}^3/\text{m} \\
 M_{\text{c,Rd}}^+ &= W_{\text{eff,t}}^+ \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} \\
 &= 36,7 \cdot 32,0 / 1,1 = 1067,6 \text{ kNcm/m} \approx 10,7 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

b) negative Biegemomente (Zug im Obergurt)

$$\begin{aligned}
 W_{\text{eff,c}}^- &= 30,1 \text{ cm}^3/\text{m} < 40,6 \text{ cm}^3/\text{m} = W_{el} \\
 M_{\text{c,Rd}}^- &= W_{\text{eff,c}}^- \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} \\
 &= 30,1 \cdot 32,0 / 1,1 = 875,6 \text{ kNcm/m} \approx 8,8 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

4.1.2 Querkräfte



$$\begin{aligned}
 s_a &= 19,4 \text{ mm} \\
 s_b &= 77,4 \text{ mm} \\
 s_{sa} &= 17,0 \text{ mm} \\
 s_p &= 77,4 \text{ mm} = s_b \\
 s_d &= 2 \cdot (s_a + s_{sa}) + s_b = 2 \cdot (19,4 + 17,0) + 77,4 = 150,2 \text{ mm} \\
 \Sigma I_s &= I_s = 182,3 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

siehe Abschnitt 3.5.3

siehe Abschnitt 3.7.2

Querschnittstragfähigkeit für positive Biegemomente, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.4)

siehe Abschnitt 3.7.3

Querschnittstragfähigkeit für negative Biegemomente, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.4)

Für die Berechnung des Beulwertes k_t ist das Trägheitsmoment I_s der Längsaussteifung um die Achse a – a, entsprechend DIN EN 1993-1-3, Absatz 5.5.3.4.3 (7) zu verwenden.

Dieses Trägheitsmoment entspricht dem Wert aus Abschnitt 3.7.2 h) bzw. aus Abschnitt 3.7.3 f).

Da der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit für andrückende Last nicht maßgebend ist, wird mit dem Wert aus Abschnitt 3.7.3 i) weitergerechnet.

Die Stege sind an den Auflagern nicht ausgesteift.

siehe Abschnitt 3.5.1

siehe Abschnitt 3.5.1

siehe Abschnitt 3.5.1

DIN EN 1993-1-3, Bild 6.5

DIN EN 1993-1-3, Bild 6.5

siehe Abschnitt 3.7.3 i)

$$k_{\tau} = 5,34 + \frac{2,1}{t} \left(\frac{\Sigma I_s}{s_d} \right)^{1/3} = 5,34 + \frac{2,1}{0,84} \left(\frac{2 \cdot 182,3}{150,2} \right)^{1/3} = 8,7$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \cdot \frac{s_d}{t} \cdot \sqrt{\frac{5,34 f_{yb}}{k_{\tau} E}} = 0,346 \cdot \frac{150,2}{0,84} \cdot \sqrt{\frac{5,34 \cdot 320}{8,7 \cdot 210000}} = 1,89$$

$$\bar{\lambda}_w = 1,89 > 1,24 = 0,346 \cdot \frac{77,4}{0,84} \cdot \sqrt{\frac{320}{210000}} = 0,346 \cdot \frac{s_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}}$$

$$f_{bv} = \begin{cases} \bar{\lambda}_w \leq 0,83: & 0,58 \cdot f_{yb} & (1) \\ 0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,4: & 0,48 \cdot f_{yb} / \bar{\lambda}_w & (2) \\ \bar{\lambda}_w \geq 1,4: & 0,67 \cdot f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2 & (3) \end{cases}$$

$$f_{bv} = 0,67 \cdot f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2 = 0,67 \cdot 320 / 1,89^2 = 60,0 \text{ N/mm}^2$$

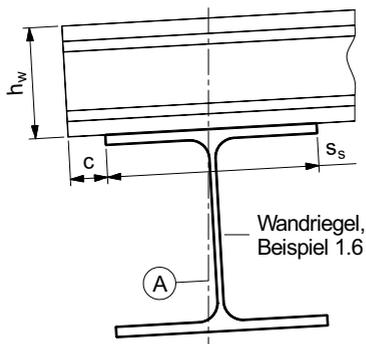
$$V_{b,Rd} = \frac{h_w}{\sin \phi} \frac{t \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}} = \frac{137}{\sin 70,6^\circ} \frac{0,84 \cdot 60,0}{1,1} = 6654,9 \text{ N} \approx 6,65 \text{ kN}$$

Die Querkrafttragfähigkeit $V_{b,Rd}$ ist bezogen auf die Stegebene. Für den Nachweise der Querkrafttragfähigkeit des Trapezprofils ist es zweckmäßiger, die Vertikalkomponente $V_{w,Rd}$ zu betrachten:

$$V_{w,Rd} = 2 \cdot V_{b,Rd} \cdot \sin \phi / b_R = 2 \cdot 6,65 \cdot \sin 70,6^\circ / 0,31 = 40,5 \text{ kN/m}$$

4.1.3 Örtliche Lasteinleitung

a) Überprüfung der Anwendungsgrenzen



$$c \approx 45 \text{ mm} > 40 \text{ mm}$$

$$r/t = 5/0,84 = 5,95 < 10$$

$$h_w/t = 137/0,84 = 163,1 < 188,6 = 200 \cdot \sin \phi = 200 \cdot \sin 70,6^\circ$$

$$\phi = 70,6^\circ > 45^\circ < 90^\circ$$

→ Die Anwendungsgrenzen sind eingehalten.

Schubbeulwert entsprechend DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.5 (2)

bezogener Stegslankheitsgrad, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.10b)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.10b)

Schubbeulfestigkeit eines am Auflager nicht ausgesteiften Steges, DIN EN 1993-1-3, Tabelle 6.1

Fall (3) ist hier anzuwenden!

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit eines Steges, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.8)

Situation am Endauflager des Trapezprofilblechs in Achse Ⓐ bzw. Achse ①

Die Länge der starren Lasteinleitung s_s für End- und Zwischenauflager entspricht der Flanschbreite der Pfettenprofile HE 260 A (vgl. Beispiele 1.3 und 1.6), d.h. 260 mm.

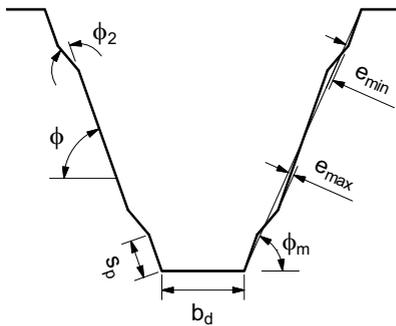
DIN 1993-1-3, Absatz 6.1.7.3 (1)

DIN 1993-1-3, Glg. (6.17a)

DIN 1993-1-3, Glg. (6.17b)

DIN 1993-1-3, Glg. (6.17c)

b) Vergrößerungsfaktor für ausgesteifte Stege von Profilblechen



$$\begin{aligned}
 b_d &= b_u = 43 \text{ mm} \\
 s_p &= s'_a = 20,1 \text{ mm} \\
 \phi_m &= \text{atan} \left(\frac{2 \cdot h_w}{b_R - b_o - b_u} \right) = \text{atan} \left(\frac{2 \cdot 137}{310 - 145 - 43} \right) = 66,0^\circ \\
 e_{\min} &\approx s'_a \cdot \sin(\phi - \phi_m) = 20,1 \cdot \sin(70,6^\circ - 66,0^\circ) = 1,61 \text{ mm} \\
 e_{\max} &\approx s_{sa} \cdot \sin(\phi_m - \phi + \phi_2) - e_{\min} \\
 &\approx 17 \cdot \sin(66,0^\circ - 70,6^\circ + 20,7^\circ) - 1,61 = 3,1 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Die Beanspruchbarkeit von ausgesteiften Stegen für örtliche Lasteinleitung darf bei Stegquerschnitten mit Längsaussteifungen mit dem Faktor $\kappa_{a,s}$ vergrößert werden, wenn die folgende Bedingung eingehalten ist:

$$\frac{e_{\max}}{t} = \frac{3,1}{0,84} = 3,69 > 2 \quad \text{und} \quad < 12 \quad \rightarrow \text{Die Bedingung ist eingehalten.}$$

$$\begin{aligned}
 \kappa_{a,s} &= \min \left[\frac{1,45 - 0,05 \cdot e_{\max}/t}{0,95 + 35000 t^2 \cdot e_{\min}/(b_d^2 \cdot s_p)} \right] \\
 &= \min \left[\frac{1,45 - 0,05 \cdot 3,1/0,84}{0,95 + 35000 \cdot 0,84^2 \cdot 1,61/(43^2 \cdot 20,1)} \right] = 1,265
 \end{aligned}$$

c) Beanspruchbarkeit $R_{A,Rd}$ der Endauflager

$$c \approx 45 \text{ mm} < 205,5 \text{ mm} = 1,5 \cdot 137 = 1,5 \cdot h_w \rightarrow \text{Kategorie 1}$$

$$l_a = 10 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,075$$

$$\alpha_1 = 1 - 0,1 \cdot \sqrt{r/t} = 1 - 0,1 \cdot \sqrt{5/0,84} = 0,756$$

$$\alpha_2 = 0,5 + \sqrt{0,02 \cdot l_a/t} = 0,5 + \sqrt{0,02 \cdot 10/0,84} = 0,988$$

$$\alpha_3 = 2,4 + (\phi/90^\circ)^2 = 2,4 + (70,6^\circ/90^\circ)^2 = 3,015$$

$$\begin{aligned}
 R_{w,Rd} &= \alpha \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot t^2 \cdot (f_{yb} \cdot E)^{0,5} / \gamma_{M1} \\
 &= 0,075 \cdot 0,756 \cdot 0,988 \cdot 3,015 \cdot 0,84^2 \cdot \sqrt{320 \cdot 210000} / 1,1 = 888 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$R_{A,Rd} = 2 \cdot \kappa_{a,s} \cdot R_{w,Rd} / b_R = 2 \cdot 1,265 \cdot 888 / 310 = 7,25 \text{ kN/m}$$

e_{\min} und e_{\max} sind die minimale bzw. maximale Exzentrizität der Steifeneckpunkte gegenüber der Verbindungslinie der Gurteckpunkte.

ϕ_m ist der von dieser Verbindungslinie und der Horizontalen eingeschlossene Winkel.

Die Verbindungslinie schneidet die Längssteifen, wie in DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.7.4 (1) gefordert.

siehe Abschnitt 3.5.1

siehe Abschnitt 3.5.1

siehe Skizze

siehe Skizze

siehe Skizze

DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.7.4 (1)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.21)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.22)

DIN EN 1993-1-3, Bild 6.9

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.19a)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.20a)

Beanspruchbarkeit eines Steges für lokale Querlasten, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.18)

d) Beanspruchbarkeit $R_{B,Rd}$ der Zwischenaufleger

Die Tragfähigkeit für örtliche Lasteinleitung an den Zwischenauflägern ist abhängig von Länge der starren Lasteinleitung s_s , d.h. der Flanschbreite des Profils, auf dem das Trapezprofil aufliegt, und dem Verhältnis der Querkräfte $V_{Ed,1}$ und $V_{Ed,2}$, das über den Parameter β_v erfasst wird.

Die Querkräfte $V_{Ed,1}$ und $V_{Ed,2}$ ergeben sich unter Vollast über alle Felder links und rechts neben dem Auflager \textcircled{B} .

$$\beta_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|} = \frac{|-0,607 \cdot e_d \cdot L| - |0,536 \cdot e_d \cdot L|}{|-0,607 \cdot e_d \cdot L| + |0,536 \cdot e_d \cdot L|} = 0,06 < 0,2$$

$$l_{a,max} = 200 \text{ mm}$$

$$l_a = \begin{cases} \beta_v \leq 0,2: & \min(s_s | l_{a,max}) & (1) \\ 0,2 < \beta_v < 0,3: & \text{lineare Interpolation zwischen (1) und (3)} & (2) \\ \beta_v \geq 0,3: & 10 \text{ mm} & (3) \end{cases}$$

$$l_a = \min(s_s | l_{a,max}) = \min(260 | 200) = 200 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,15$$

$$\alpha_2 = 0,5 + \sqrt{0,02 \cdot l_a / t} = 0,5 + \sqrt{0,02 \cdot 200 / 0,84} = 2,682$$

$$R_{w,Rd} = \alpha \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot t^2 \cdot (f_{yb} \cdot E)^{0,5} / \gamma_{M1}$$

$$= 0,15 \cdot 0,756 \cdot 2,682 \cdot 3,015 \cdot 0,84^2 \cdot \sqrt{320 \cdot 210000} / 1,1 = 4822 \text{ N}$$

$$R_{B,Rd} = 2 \cdot \kappa_{a,s} \cdot R_{w,Rd} / b_R = 2 \cdot 1,265 \cdot 4822 / 310 = 39,4 \text{ kN/m}$$

DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.7.3 (4)

Querkräfte nach [54], S. 4.16

DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.7.3 (3)

DIN EN 1993-1-3, Glgn. (6.19b) und (6.19c)

Fall (1) ist hier anzuwenden!

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.20c)

 α_1 und α_3 wie für die Endauflager

Beanspruchbarkeit eines Steges für lokale Querlasten, DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.18)

4.2 Tragfähigkeitsnachweise**4.2.1 Lastkombination 1**

a) Biegemomente

Feld: $M_{1,Ed} / M_{c,Rd}^+ = 3,46 / 10,7 = 0,32 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28a)

Zwischenaufleger: $M_{B,Ed} / M_{c,Rd}^- = |-4,81| / 8,8 = 0,55 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28a)

b) örtliche Lasteinleitung (Auflagerkräfte)

Endauflager: $R_{A,Ed} / R_{A,Rd} = 3,91 / 7,25 = 0,54 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28b)

Zwischenaufleger: $R_{B,Ed} / R_{B,Rd} = 11,38 / 39,4 = 0,29 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28b)

c) Interaktion von Auflagerkraft und Biegemoment am Zwischenaufleger

$$R_{B,Ed} / R_{B,Rd} + M_{B,Ed} / M_{c,Rd}^- = 0,29 + 0,55 = 0,84 < 1,25$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28c)

→ Die Tragfähigkeit für andrückende Belastung ist ausreichend.

4.2.2 Lastkombination 2

a) Biegemomente

Feld: $M_{1,Ed}/M_{c,Rd}^- = |-2,42|/8,8 = 0,28 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28a)

Zwischenaufleger: $M_{B,Ed}/M_{c,Rd}^+ = 2,54/10,7 = 0,24 < 1$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (6.28a)

b) Querkräfte

$$\frac{V_{Bl,Ed}}{V_{A,Ed}} = \frac{3,74}{|-2,61|} = 1,43 > 1 \rightarrow \frac{V_{Bl,Ed}}{V_{w,Rd}} = \frac{3,74}{40,5} = 0,09 < 1$$

In DIN EN 1993-1-3 ist für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit keine Festlegung getroffen!

→ Der Nachweis der Interaktion von Biegemomenten und Querkräften ist wegen $V_{Bl,Ed}/V_{w,Rd} = 0,09 < 0,5$ nicht erforderlich.

DIN EN 1993-1-3, Absatz 6.1.10 (1)

→ Die Tragfähigkeit für abhebende Belastung ist ausreichend.

5 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

5.1 Lastkombination 3

$$I_{eff,ser}^+ = 337,5 \text{ cm}^4/\text{m}$$

$$EI_{eff,ser}^+ = 21000 \cdot 337,5 = 7087500 \text{ kNcm}^2/\text{m} \approx 708,8 \text{ kN/m}$$

$$EI \cdot \delta_z = 4,05 \text{ kN/m}^2$$

$$\delta_z = EI \cdot \delta_z / EI_{eff,ser}^+ = 4,05/708,8 = 0,006 \text{ m} = 6 \text{ mm}$$

siehe Abschnitt 3.7.1 d)

effektive Biegesteifigkeit

siehe Abschnitt 2.3

Durchbiegung im Endfeld

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für vertikale Verformungen. Es wird daher zur Orientierung der Grenzwert nach DIN 18807-3, Abschnitt 3.3.4.2 herangezogen:

$$L/\delta_z = 4500/6 = 750 > 300 \rightarrow \text{Der Nachweis ist erfüllt.}$$

Beispiel 1.3: Dachpfette

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| Aufgabenstellung | 44 |
| 1 System, Querschnitt und Einwirkungen | 44 |
| 1.1 System | 44 |
| 1.2 Querschnitt..... | 44 |
| 1.2.1 Abmessungen und Querschnittswerte | 44 |
| 1.2.2 Materialkennwerte | 44 |
| 1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 45 |
| 1.4 Lastkombinationen | 45 |
| 1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 1 (andrückende Last)..... | 45 |
| 1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 2 (abhebende Last)..... | 46 |
| 1.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – Lastkombination 3 | 46 |
| 2 Beanspruchungen | 46 |
| 2.1 Lastkombination 1 | 46 |
| 2.2 Lastkombination 3 | 46 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 46 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 46 |
| 3.2 Querschnittsklassifikation..... | 47 |
| 3.3 Einflüsse der Konstruktion auf die Tragfähigkeit..... | 47 |
| 3.4 Ideales Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken | 47 |
| 3.4.1 Berücksichtigung der Drehbettung durch das Dachblech | 47 |
| 3.4.2 Pfetten im Verbandsfeld, Gabellagerung | 49 |
| 3.4.3 Pfetten außerhalb des Verbandsfeldes, Untergurtlagerung | 49 |
| 3.5 Bauteilnachweise | 51 |
| 3.5.1 Pfetten im Verbandsfeld | 51 |
| 3.5.2 Pfetten außerhalb des Verbandsfeldes | 53 |
| 3.6 Querschnittsnachweise | 54 |
| 3.7 Lasteinleitung an den Auflagern..... | 55 |
| 4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 57 |
| 4.1 Lastkombination 3 | 57 |

Beispiel 1.3: Dachpfette

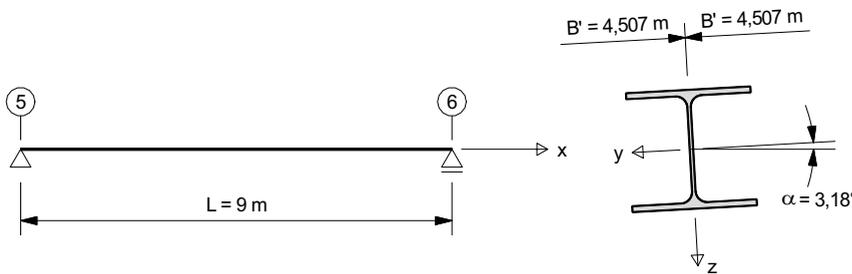
Aufgabenstellung

Für die Pfetten in den Achsen ⑤ bis ⑥, die als Einfeldträger auf den Obergurten der Dachbinder bzw. den Giebelriegeln aufliegen, sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

Die Pfetten in den Achsen ① und ② wirken zugleich als Wandriegel und werden deshalb separat nachgewiesen.

1 System, Querschnitt und Einwirkungen

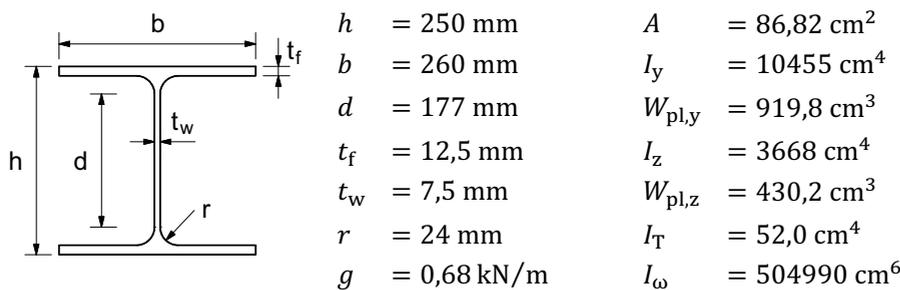
1.1 System



1.2 Querschnitt

HE 260 A, S235 J2

1.2.1 Abmessungen und Querschnittswerte



1.2.2 Materialkennwerte

Streckgrenze: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
 Zugfestigkeit: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 Schubmodul: $G = 81000 \text{ N/mm}^2$
 Querdehnzahl: $\nu = 0,3$

für die Bezeichnung der Achsen siehe Vorbemerkungen S. 1, für die Dachbinder siehe Beispiel 1.4

siehe Beispiel 1.6

Querschnittsachsen entsprechend DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

Maßgebend für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit sind die Pfetten in den Achsen B bzw. H.

L - Spannweite = Binderabstand
 B - Pfettenabstand || zur Grundfläche
 B' - Pfettenabstand || zur Dachfläche
 α - Dachneigung

L, B und α entsprechend Vorbemerkungen, S. 9

Baustahl nach DIN EN 10025-2

Bezeichnung der Querschnittsabmessungen gemäß DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

Querschnittswerte nach [47] S. 34/35

Anmerkung:
 $W_{pl,y}$ bzw. $W_{pl,z}$ wurden aus den in [47] S. 35 angegebenen plastischen Momenten zurückgerechnet.

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Eigengewicht, Pfette: | $g_{0,k} = +0,68 \text{ kN/m} = g$ |
| Eigengewicht, Dachkonstruktion: | $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$ |
| Schnee: | $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$ |
| Winddruck, Bereich I: | $w_{e,I} = +0,13 \text{ kN/m}^2$ |
| Windsog, Bereich H: | $w_{e,H} = -0,46 \text{ kN/m}^2$ |

1.4 Lastkombinationen

1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 1 (andrückende Last)

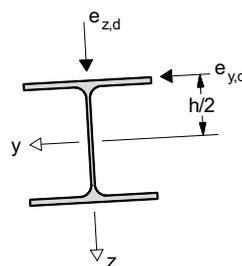
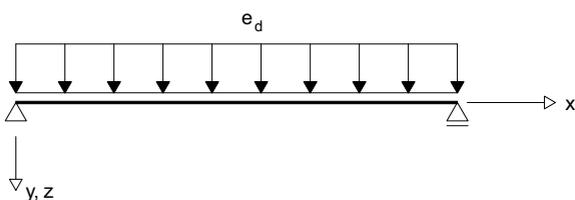
a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

| | |
|---|-------------------------|
| ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ |
| ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ |
| veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_Q = 1,5$ |

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

| | |
|---------|--------------------|
| Schnee: | $\psi_{0,S} = 0,5$ |
| Wind: | $\psi_{0,W} = 0,6$ |

c) Bemessungswerte der Einwirkungen



$$\begin{aligned}
 e_{z,d} &= \gamma_{G,sup} \cdot \cos \alpha \cdot (g_{0,k} + \eta \cdot g_{1,k} \cdot B') + \dots \\
 &\dots + \gamma_Q \cdot \eta \cdot B' \cdot (s \cdot \cos^2 \alpha + \psi_{0,W} \cdot w_{e,I}) \\
 &= 1,35 \cdot \cos 3,18^\circ \cdot (0,68 + 1,143 \cdot 0,41 \cdot 4,507) + \dots \\
 &\dots + 1,5 \cdot 1,143 \cdot 4,507 \cdot (1,03 \cdot \cos^2 3,18^\circ + 0,6 \cdot 0,13) = 12,3 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e_{y,d} &= \gamma_{G,sup} \cdot \sin \alpha \cdot (g_{0,k} + g_{1,k} \cdot B') + \gamma_Q \cdot s \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot B' \\
 &= 1,35 \cdot \sin 3,18^\circ \cdot (0,68 + 0,41 \cdot 4,507) + \dots \\
 &\dots + 1,5 \cdot 1,03 \cdot \sin 3,18^\circ \cdot \cos 3,18^\circ \cdot 4,507 = 0,57 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

→ Die Horizontalkomponente der Einwirkungen ist gering und wird in diesem Beispiel nachfolgend vernachlässigt.

g entsprechend Abschnitt 1.2.1
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

Für die Lastkombinationen wird nachfolgend die Abkürzung „LK“ benutzt.

ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

Mit dem Faktor η wird die Erhöhung der vertikalen Komponente $e_{z,d}$ der Einwirkungen infolge der Durchlaufwirkung der Trapezprofile der Dachkonstruktion (Vierfeldträger, vgl. Beispiel 1.2) berücksichtigt.

$$\eta = 1,143$$

Vertikalkomponente, im Sinn von DIN EN 1990, Glg. (6.10)

Horizontalkomponente

1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 2 (abhebende Last)

$$\begin{aligned} e_{z,d} &= \gamma_{G,inf} \cdot \cos \alpha \cdot (g_{0,k} + \eta \cdot g_{1,k} \cdot B') + \gamma_Q \cdot \eta \cdot w_{e,H} \cdot B' \\ &= 1,0 \cdot \cos 3,18^\circ \cdot (0,68 + 1,143 \cdot 0,41 \cdot 4,507) - \\ &\quad \dots - 1,5 \cdot 1,143 \cdot 0,46 \cdot 4,507 = -0,77 \text{ kN/m} \ll 12,3 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{y,d} &= \gamma_{G,inf} \cdot \sin \alpha \cdot (g_{0,k} + g_{1,k} \cdot B') \\ &= 1,0 \cdot \sin 3,18^\circ \cdot (0,68 + 0,41 \cdot 4,507) = 0,14 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Vertikalkomponente, im Sinn von DIN EN 1990, Glg. (6.10)

Horizontalkomponente

→ Die Bemessungswerte der Einwirkungen für die Lastkombination 2 sind im Vergleich zu Lastkombination 1 sehr gering. Die Lastkombination 2 wird deshalb nicht weiter betrachtet.

1.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – LK 3

Maßgebend für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist die an-drückende Last. Der Bemessungswert in der charakteristischen Kombi-nation beträgt:

$$\begin{aligned} e_{z,char} &= \cos \alpha \cdot (g_{0,k} + \eta \cdot g_{1,k} \cdot B') + \eta \cdot B' \cdot (s \cdot \cos^2 \alpha + \psi_{0,W} \cdot w_{e,I}) \\ &= \cos 3,18^\circ \cdot (0,68 + 1,143 \cdot 0,41 \cdot 4,507) + \dots \\ &\quad \dots + 1,143 \cdot 4,507 \cdot (1,03 \cdot \cos^2 3,18^\circ + 0,6 \cdot 0,13) = 8,48 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die Einwirkungen parallel zur Dach-fläche sind auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit vernachlässig-bar.

im Sinn von DIN EN 1990, Glg. (6.14b)

2 Beanspruchungen

2.1 Lastkombination 1

$$M_{y,Ed} = e_{z,d} \cdot L^2 / 8 = 12,3 \cdot 9^2 / 8 = 124,5 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = e_{z,d} \cdot L / 2 = 12,3 \cdot 9 / 2 = 55,4 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,1} = -43,1 \text{ kN (Pfetten in Achse } \textcircled{B} \text{ bzw. } \textcircled{H} \text{ im Verbandsfeld)}$$

$$N_{Ed,2} = -16,2 \text{ kN (Pfetten in Achse } \textcircled{B} \text{ bis } \textcircled{H} \text{ neben dem Verbandsfeld)}$$

Biegemoment in Feldmitte

Querkraft den Auflagern

Bemessungswerte der Druckkräfte aus Lastkombination 1 des Dachverbands, siehe Beispiel 1.5, Abschnitt 2.2

2.2 Lastkombination 3

$$\delta_{z,char} = \frac{5}{384} \frac{e_{z,char} \cdot L^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \frac{8,48 \cdot 10^{-2} \cdot 900^4}{21000 \cdot 10455} = 3,3 \text{ cm}$$

Durchbiegung in Feldmitte

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

$$\text{elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: } \gamma_{M0} = 1,0$$

$$\text{Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): } \gamma_{M1} = 1,1$$

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

3.2 Querschnittsklassifikation

Flansche: einseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

$$c = (b - t_w)/2 - r = (260 - 7,5)/2 - 24 = 102,3 \text{ mm}$$

$$c/t = 102,3/12,5 = 8,2 < 9 = 9 \cdot 1 = 9\varepsilon \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Steg: zweiseitig gestützt, unter Druck- und Biegebeanspruchung

$$c = h - 2 \cdot (t_f + r) = 250 - 2 \cdot (12,5 + 24) = 177 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\gamma_{M0} \cdot N_{Ed}}{c \cdot t_w \cdot f_y} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1,0 \cdot 43100}{177 \cdot 7,5 \cdot 235} \right) = 0,57 > 0,5$$

$$c/t = 177/7,5 = 23,6 < 61,8 = \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,57 - 1} = \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Querschnitt: höchste Klasse von Flanschen oder Steg \rightarrow Klasse 1

3.3 Einflüsse der Konstruktion auf die Tragfähigkeit

Um den Fertigungsaufwand zu minimieren werden an den Auflagern der Pfetten außerhalb des Verbandsfeldes keine Aussteifungen, wie im Hallenbau üblich, vorgesehen, d.h. die lediglich die Pfettenuntergurte werden an die stützenden Bauteile durch Schraubenverbindung angeschlossen. Damit liegt **keine Gabellagerung** vor.

Diese Auflagerausbildung wirkt sich negativ auf die Tragfähigkeit der Pfetten aus und ist für die Bauteilnachweise zu berücksichtigen ([49], Abschnitt 6.4.3).

Tragfähigkeitssteigernd zu bewerten ist die Drehbettung der Pfetten durch die Trapezprofilbleche der Dachkonstruktion, die bei den Bauteilnachweisen entsprechend berücksichtigt wird ([49], Abschnitt 7.3).

Die Halbierung der Knicklänge der Pfetten für Knicken um die schwache Achse im Verbandsfeld bleibt wegen des untergeordneten Einflusses der Normalkräfte auf die Tragfähigkeit unberücksichtigt.

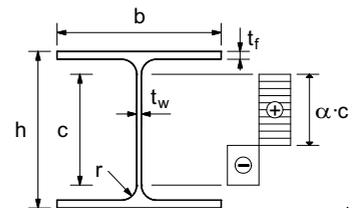
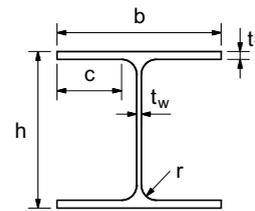
3.4 Ideales Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken

3.4.1 Berücksichtigung der Drehbettung durch das Dachblech

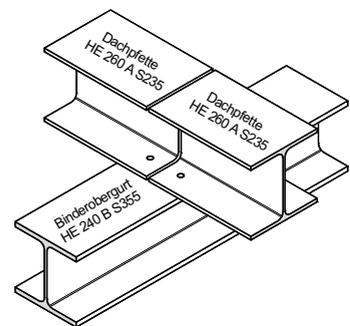
Die Drehbettung der Pfetten durch die Trapezprofilbleche der Dachkonstruktion wird über einen fiktiven St. Venant'schen Torsionswiderstand I_t^* erfasst.

Die wirksame Drehbettung C_D setzt sich aus den Drehbettungsanteilen Anschlussverformung des Trapezblechs $C_{D,A}$, Profilverformung der Pfette $C_{D,B}$ und Biegesteifigkeit des Trapezblechs $C_{D,C}$ zusammen.

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



Druckspannungen positiv!



Der Dachverband wird in Beispiel 1.5 betrachtet.

erforderlich für die Bauteilnachweise

a) Drehbettung $C_{D,A}$ aus der Anschlussverformung des Trapezblechs

$$\begin{aligned}
 C_{D,A} &= C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \\
 C_{100} &= 3,1 \text{ kNm/m} \\
 b_{T,max} &= 40 \text{ mm} \\
 k_{bT} &= \min\left(\sqrt{b_{T,max}/b_T}; 1,0\right) = \min\left(\sqrt{40/43}; 1,0\right) = 0,964 \\
 k_{bR} &= \min(185/b_R; 1,0) = \min(185/310; 1,0) = 0,597 \\
 k_t &= (t_{nom}/0,75)^{1,1} = (0,88/0,75)^{1,1} = 1,192 \\
 k_{ba} &= \min(1,25 \cdot (b_a/100); 2,5) = \min(1,25 \cdot (260/100); 2,5) = 2,5 \\
 A &= e_{z,d} - \gamma_{G,sup} \cdot g_{0,k} \cdot \cos \alpha \\
 &= 12,3 - 1,35 \cdot 0,68 \cdot \cos 3,18^\circ = 11,38 \text{ kN/m} \\
 k_{A,min} &= 1,0 + (A - 1) \cdot 0,08 = 1,0 + (11,38 - 1) \cdot 0,08 = 1,83 \\
 k_{A,max} &= 1,0 + (A - 1) \cdot 0,095 = 1,0 + (11,38 - 1) \cdot 0,095 = 1,99 \\
 k_A &= \frac{1,99 - 1,83}{1,0 - 0,75} (0,88 - 0,75) + 1,83 = 1,91 \\
 C_{D,A} &= 3,1 \cdot 2,5 \cdot 1,192 \cdot 0,597 \cdot 1,91 \cdot 0,964 = 10,15 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Absatz 10.1.5.2 (5)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (10.17)

DIN EN 1993-1-3, Tabelle 10.3 für Positivlage und Befestigung in jeder 2. Rippe am Trapezprofiluntergurt

Die Abmessungen des Trapezprofils sind in Beispiel 1.2, Abschnitt 3.2 angegeben. b_T ist die Breite des Trapezprofiluntergurt. b_a ist die Flanschbreite der Pfette.

Auflast zwischen Blech und Pfette

Positivlage und $t_{nom} = 0,75 \text{ mm}$ Positivlage und $t_{nom} = 1,0 \text{ mm}$ lineare Interpolation zwischen $k_{A,min}$ u. $k_{A,max}$ für $t = t_{nom} = 0,88 \text{ mm}$

Drehbettung aus Anschlussverformung

b) Drehbettung $C_{D,B}$ aus der Profilverformung der Pfette

$$\begin{aligned}
 C_{D,B} &= \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\frac{\bar{h}}{t_w^3} + c_1 \cdot \frac{b}{t_f^3}} = \frac{21000}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{\frac{23,75}{0,75^3} + 0,5 \cdot \frac{26}{1,25^3}} \\
 &= 91,64 \text{ kNcm/cm} = 91,64 \text{ kNm/m} \\
 \bar{h} &= h - t_f = 250 - 12,5 = 237,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Berechnung nach [50], S. 169

Abstand der Schwerachsen der Gurte

c) Drehbettung $C_{D,C}$ aus der Biegesteifigkeit des Trapezblechs

$$\begin{aligned}
 C_{D,C} &= k \cdot \frac{E \cdot I_{eff}}{B} = 4 \cdot \frac{21000}{450} \cdot \frac{255,4}{100} = 476,75 \text{ kNm/m} \\
 I_{eff} &= 255,4 \text{ cm}^4/\text{m}
 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-3, Glg. (10.16)

k nach DIN EN 1993-1-3, Bild 10.7 für Innenfelder mit gegensinniger Verdrehung der Pfetten

effektives Trägheitsmoment des Trapezprofilblechs entsprechend Beispiel 1.2, Abschnitt 3.7.2 (m)

d) fiktiver St. Venant'schen Torsionswiderstand I_t^*

$$\begin{aligned}
 C_D &= \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,B}} + \frac{1}{C_{D,C}}} = \frac{1}{\frac{1}{10,15} + \frac{1}{91,64} + \frac{1}{476,75}} = 8,97 \text{ kNm/m} \\
 I_t^* &= I_T + \frac{C_D \cdot L^2}{G \cdot \pi^2} = 52,0 + \frac{8,97 \cdot 900^2}{8100 \cdot \pi^2} = 142,9 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

wirksame Drehbettung, DIN EN 1993-1-3, Glg. (E.11)

DIN EN 1993-1-3, Glg. (E.10)

3.4.2 Pfetten im Verbandsfeld, Gabel Lagerung

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k_z \cdot L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z \cdot L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$= C_1 \cdot N_{cr,z} \cdot \left[\sqrt{c^2 + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$C_1 = 1,12$
 $C_2 = 0,45$
 $k_z = 1,0$
 $k_\omega = 1,0$
 $z_g = h/2 = 250/2 = 125 \text{ mm}$
 $C_2 z_g = 0,45 \cdot 125 = 56,25 \text{ mm}$
 $N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k_z \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3668}{(1,0 \cdot 900)^2} = 938,6 \text{ kN}$
 $c^2 = \left(\frac{k_z}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{GI_t^*}{N_{cr,z}} = \frac{504990}{3668} + \frac{8100 \cdot 142,9}{938,6} = 1370,9 \text{ cm}^2$
 $M_{cr} = 1,12 \cdot 938,6 \cdot \left(\sqrt{1370,9 + 5,625^2} - 5,625\right) \cdot 10^{-2} = 334,6 \text{ kNm}$

3.4.3 Pfetten außerhalb des Verbandsfeldes, Untergurtlagerung

a) Berechnungsverfahren

Nach *Geldmacher/Lange* [45] kann die kritische Last $q_{z,ki}$ eines gurtgelagerten Einfeldträgers als Lösung der unten angegebenen Determinantengleichung berechnet werden. Die Auflösung der Determinantengleichung nach q_z führt auf eine kubische Gleichung, deren kleinste positive, reelle Lösung die kritische Last darstellt.

$$\begin{vmatrix} EI_z \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 & -\frac{\pi^2 + 3}{12} q_z & -\frac{4}{\pi} q_z \\ -\frac{\pi^2 + 3}{12} q_z & EC_M \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 + GI_T \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + q_z \cdot z_q & \frac{4}{\pi} q_z \cdot z_q \\ -\frac{4}{\pi} q_z & \frac{4}{\pi} q_z \cdot z_q & K_D \frac{4}{L} + 2q_z \cdot (z_q - z_L) \end{vmatrix} = 0$$

$z_q = -h/2 = -250/2 = -125 \text{ mm}$
 $z_L = \frac{2}{3} \cdot \bar{h} = \frac{2}{3} \cdot 237,5 = 158,3 \text{ mm}$

Berechnung nach [40], Annex B

ideales Biegedrillknickmoment eines gabelgelagerten Einfeldträgers nach [40], Glg. (307) mit $I_t = I_t^*$

Beiwerte für konstante Linienlast nach [40], Tabelle 65

gelenkige Lagerung um die z-Achse

freie Verwölbung der Stabenden

z-Koordinate des Lastangriffspunktes, positiv **oberhalb** des Schubmittelpunktes

ideale Verzweigungslast für Knicken um die z-Achse

c ist der Drehradius des Querschnitts.

ideales Biegedrillknickmoment für die Pfetten im Verbandsfeld

[45] Abschnitt 3.3

[45] Glg. (29) mit $C_M = I_\omega$

Nach [45] Abschnitt 6.1 haben mäßige Drehbetungen bis 10 kNm/m keinen signifikanten Einfluss auf die Drehfeder K_D und können ohne weitere Maßnahmen im Modell angesetzt werden.

z-Koordinate des Lastangriffspunktes

Auflagerabstand in z-Richtung nach [45] Glg. (28)

b) St. Venant'scher Torsionswiderstand eines Gurtes

$$\begin{aligned}
 I_{TG,r} &= t_f^3 \cdot (b - a)/3 + \alpha \cdot d^3 \cdot a/2 \\
 d &= \frac{(t_f + r)^2 + t_w(r + t_w/4)}{2r + t_f} = \frac{(12,5 + 24)^2 + 7,5 \cdot (24 + 7,5/4)}{2 \cdot 24 + 12,5} \\
 &= 25,2 \text{ mm} \\
 a &= t_w + \frac{r^2}{d - t_f} \cdot \frac{4 - \pi}{2} = 7,5 + \frac{24^2}{25,2 - 12,5} \cdot \frac{4 - \pi}{2} = 26,9 \text{ mm} \\
 \alpha &= 0,46 - 0,5 \cdot \left(\frac{d}{a} - 1,15\right)^2 = 0,46 - 0,5 \cdot \left(\frac{25,2}{26,9} - 1,15\right)^2 = 0,42 \\
 I_{TG,r} &= 1,25^3 \cdot (26 - 2,69)/3 + 0,42 \cdot 2,52^3 \cdot 2,69/2 = 24,2 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

St. Venant'scher Torsionswiderstand eines Gurtes unter Berücksichtigung der Walzradien entsprechend [45] Glg. (33)

c) Auflagerdrehfeder

$$\begin{aligned}
 K_D &= 2 / \left[\frac{\lambda_{PI}}{\tilde{k}_{\Theta I,r}} + \frac{\tanh(\lambda_w \cdot L/2)}{\lambda_w \cdot L/2} \cdot \frac{\lambda_{PII} + \lambda_w}{\tilde{k}_{\Theta II,r}} \right] \\
 K &= \frac{E \cdot t_w^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{21000 \cdot 0,75^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} = 811,3 \text{ kNcm} \\
 \tilde{k}_{\Theta I,r} &= 2 \frac{K}{h} \cdot \frac{1}{1 - \frac{t_f + \beta \cdot r}{h}} = 2 \frac{811,3}{23,75} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1,25 + 1,2 \cdot 2,4}{23,75}} = 82,7 \text{ kN} \\
 \tilde{k}_{\Theta II,r} &= 6 \frac{K}{h} \frac{1}{\left(1 - \frac{t_f + \beta \cdot r}{h}\right)^3} = 6 \frac{811,3}{23,75} \frac{1}{\left(1 - \frac{1,25 + 1,2 \cdot 2,4}{23,75}\right)^3} = 363,5 \text{ kN} \\
 \lambda_w &= \sqrt{\frac{GI_T}{EC_M}} = \sqrt{\frac{GI_t^*}{EI_\omega}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{8100 \cdot 142,9}{21000 \cdot 504990}} = 1,045 \text{ m}^{-1} \\
 \lambda_{PI} &= \sqrt{\tilde{k}_{\Theta I,r}/GI_{TG,r}} = 100 \cdot \sqrt{82,7/(8100 \cdot 24,2)} = 2,054 \text{ m}^{-1} \\
 \lambda_{PII} &= \sqrt{\tilde{k}_{\Theta II,r}/GI_{TG,r}} = 100 \cdot \sqrt{363,5/(8100 \cdot 24,2)} = 4,306 \text{ m}^{-1} \\
 K_D &= \frac{2}{\frac{2,054}{82,7} + \frac{\tanh(1,045 \cdot 9/2)}{1,045 \cdot 9/2} \frac{4,306 + 1,045}{363,5}} = 73,1 \text{ kNm/rad}
 \end{aligned}$$

Auflagerdrehfeder zur Erfassung der Profilverformung an den Auflagern, [45] Glg. (27)

Plattenbiegesteifigkeit des Steges, [45] Glg. (31)

Drehbettingsanteile für die Gurte infolge der Profilverformungen, [45] Glg. (32)

β ist ein Anpassungsfaktor für die Walzprofilreihen:

$$\beta = \begin{cases} 1,2 & \text{für IPE, HEA, HEB Profile} \\ 0,9 & \text{für HEM Profile} \end{cases}$$

Abklingfaktor der Wölbkrafttorsion, [45] Glg. (18)

Abklingfaktor der ersten Profilverformung, [45] Glg. (11)

Abklingfaktor der zweiten Profilverformung, [45] Glg. (19)

Auflagerdrehfeder

d) ideales Biegedrillknickmoment M_{cr}

Die kritische Last $q_{z,ki}$ ergibt sich aus:

$$\begin{vmatrix} 114,36 & -1,702q_z & -1,273q_z \\ -1,702q_z & 15,68 - 0,125q_z & -0,159q_z \\ -1,273q_z & -0,159q_z & 32,49 - 0,567q_z \end{vmatrix} = 0$$

↓

$$A \cdot q_z^3 + B \cdot q_z^2 + C \cdot q_z + D = 0,42q_z^3 - 57,53q_z^2 - 1480,9q_z + 58243,8 = 0$$

Die Ermittlung der kritischen Last durch Nullstellenbestimmung für die charakteristische Gleichung nach [54] S. 2.6 wurde in einer hier nicht dargestellten Nebenrechnung durchgeführt.

charakteristische Gleichung

$$q_{z,ki} = 22,7 \text{ kN/m}$$

$$M_{cr} = q_{z,ki} \cdot L^2/8 = 22,7 \cdot 9^2/8 = 229,8 \text{ kNm}$$

3.5 Bauteilnachweise

3.5.1 Pfetten im Verbandsfeld

Der Stabilitätsnachweis wird mit Ersatzstabnachweisen für ein auf Druck und Biegung beanspruchtes Bauteil geführt:

$$N_{Ed}/(\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yy} \cdot (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/(\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) \leq 1$$

$$N_{Ed}/(\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{zy} \cdot (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/(\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) \leq 1$$

a) charakteristische Werte der Querschnittstragfähigkeiten

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 86,82 \cdot 23,5 = 2040 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 919,8 \cdot 23,5/100 = 216 \text{ kNm}$$

b) Abminderungsbeiwert χ_y für Biegeknicken um die y-Achse

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_y/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 10455/900^2 = 2675 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{2040/2675} = 0,87$$

$$\left. \begin{aligned} h/b &= 250/260 = 0,96 < 1,2 \\ t_f &= 12,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie b} \rightarrow \alpha = 0,34$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,87 - 0,2) + 0,87^2] = 0,99$$

$$\chi_y = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2} \right) = 1 / (0,99 + \sqrt{0,99^2 - 0,87^2}) = 0,68 < 1$$

c) Abminderungsbeiwert χ_z für Biegeknicken um die z-Achse

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_z/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 3668/900^2 = 938,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{2040/938,6} = 1,47$$

$$\left. \begin{aligned} h/b &= 250/260 = 0,96 < 1,2 \\ t_f &= 12,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie c} \rightarrow \alpha = 0,49$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,47 - 0,2) + 1,47^2] = 1,89$$

$$\chi_z = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2} \right) = 1 / (1,89 + \sqrt{1,89^2 - 1,47^2}) = 0,32 < 1$$

kritische Last

ideales Biegedrillknickmoment

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (4) und Glg. (6.61) und (6.62) ohne die Anteile für Biegung um die z-Achse!

Das Moment $\Delta M_{y,Ed}$ aus der Verschiebung der y-Querschnittsachse ist nur für Klasse-4-Querschnitte relevant. Alle anderen Parameter werden weiter unten erläutert und berechnet.

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.7

Normalkraftbeanspruchbarkeit

Momentenbeanspruchbarkeit

ideale Verzweigungslast für Knicken um die y-Achse

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie b, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

ideale Verzweigungslast für Knicken um die z-Achse

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie c, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

d) Abminderungsbeiwert χ_{LT} für Biegedrillknicken

Neben dem allgemeinen Verfahren (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.2) gibt es für die Berechnung des Abminderungsbeiwertes χ_{LT} das Verfahren für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.3), das hier angewendet wird.

$$M_{cr} = 334,6 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{M_{y,Rk}/M_{cr}} = \sqrt{216/334,6} = 0,8 > 0,4 = \bar{\lambda}_{LT,0}$$

$$h/b = 250/260 = 0,96 < 2 \rightarrow \text{Biegedrillknicklinie b}$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\beta = 0,75$$

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \\ &= 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (0,8 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,8^2 \right] = 0,81 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,81 + \sqrt{0,81^2 - 0,75 \cdot 0,8^2}} = 0,81$$

$$\chi_{LT} = 0,81 < \begin{cases} 1,0 \\ 1,56 = 1/0,8^2 = 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{cases}$$

siehe Abschnitt 3.4.2

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.2 (1)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.5

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.3

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken gewalzter Querschnitte, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.57)

Der Abminderungsbeiwert χ_{LT} darf zur Berücksichtigung der Momentenverteilung wie unten angegeben modifiziert werden, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (2).

e) modifizierter Abminderungsbeiwert $\chi_{LT,mod}$ für Biegedrillknicken

$$k_c = 1/\sqrt{C_1} = 1/\sqrt{1,12} = 0,945$$

$$\begin{aligned} f &= 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \leq 1 \\ &= 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,945) \cdot \left[1 - 2,0 \cdot (0,8 - 0,8)^2 \right] = 0,973 < 1 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,81}{0,973} = 0,83 < \begin{cases} 1,0 \\ 1,56 = 1/0,8^2 = 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{cases}$$

Korrekturbeiwert für die Momentenverteilung mit C_1 nach Abschnitt 3.4.2, DIN EN 1993-1-1/NA, Glg. (NA/4)

Modifikationsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (2)

modifizierter Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken gewalzter Querschnitte, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.58)

f) Interaktionsfaktoren k_{yy} , k_{zy}

DIN EN 1993-1-1 enthält für die Berechnung der Interaktionsfaktoren das Alternativverfahren 1 (Anhang A) und das Alternativverfahren 2 (Anhang B). Letzteres wird an dieser Stelle verwendet.

$$C_{my} = 0,95$$

$$C_{mLT} = 0,95$$

$$n_y = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed,1} / (\chi_y \cdot N_{RK}) = 1,1 \cdot 43,1 / (0,68 \cdot 2040) = 0,03$$

$$n_z = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed,1} / (\chi_z \cdot N_{RK}) = 1,1 \cdot 43,1 / (0,32 \cdot 2040) = 0,07$$

DIN EN 1993-1-1, Anhang B

Nach DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.3.3(5) Anmerkung 2 dürfen beide Alternativverfahren angewendet werden.

äquivalente Momentenbeiwerte für Biegeknicken um die y-Achse Biegedrillknicken, DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.3

Ausnutzungsgrade für Biegeknicken um die y-Achse bzw. um die z-Achse

$$a_y = \min(\bar{\lambda}_y - 0,2 | 0,8) = \min(0,87 - 0,2 | 0,8) = 0,67$$

$$a_{LT} = \min(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z | 0,1) = \min(0,1 \cdot 1,47 | 0,1) = 0,1$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + a_y \cdot n_y) = 0,95 \cdot (1 + 0,67 \cdot 0,03) = 0,97$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{a_{LT} \cdot n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 \cdot 0,07}{0,95 - 0,25} = 0,99$$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.2

g) Ersatzstabnachweise

$$m_y = \gamma_{M1} \cdot M_{y,Ed} / (\chi_{LT,mod} \cdot M_{y,Rk}) = 1,1 \cdot 124,5 / (0,83 \cdot 216) = 0,76$$

Ausnutzungsgrad für Biegedrillknicken

$$n_y + k_{yy} \cdot m_y = 0,03 + 0,97 \cdot 0,76 = 0,77 < 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.61)

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y = 0,07 + 0,99 \cdot 0,76 = 0,82 < 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.62)

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

3.5.2 Pfetten außerhalb des Verbandsfeldes

Der Bauteilnachweis wird wie in Abschnitt 3.5.1 geführt. Lediglich die Interaktionsfaktoren und der Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken sind zu aktualisieren.

Eine ausführliche Darstellung der Berechnung der Interaktionsfaktoren ist hier entbehrlich, d.h. es werden nur die Ergebnisse angegeben.

$$n_y = 0,01 \qquad k_{yy} = 0,96$$

$$n_z = 0,03 \qquad k_{zy} = 1,00$$

Der Abminderungsbeiwert für das Biegedrillknicken eines gurtgelagerten Trägers χ_{PV} wird mit dem Verfahren nach *Geldmacher/Lange* [45] berechnet.

Der Index PV dient zur Unterscheidung vom Verfahren für gewalzte Querschnitte nach DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1).

$$M_{cr} = 229,8 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{PV} = (M_{y,Rk} / M_{cr})^{0,5} = \sqrt{216 / 229,8} = 0,97 > 0,46 = \bar{\lambda}_{PV,0}$$

$$\alpha_{PV} = 10 \cdot h / L = 10 \cdot 25 / 900 = 0,28$$

$$\beta_{PV} = 0,93$$

$$\begin{aligned} \phi_{PV} &= 0,5 \cdot [1 + \alpha_{PV}(\bar{\lambda}_{PV} - \bar{\lambda}_{PV,0}) + \beta_{PV} \cdot \bar{\lambda}_{PV}^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,28 \cdot (0,97 - 0,46) + 0,93 \cdot 0,97^2] = 1,0 \end{aligned}$$

$$\chi_{PV} = \frac{1}{\phi_{PV} + \sqrt{\phi_{PV}^2 - \beta_{PV} \cdot \bar{\lambda}_{PV}^2}} = \frac{1}{1,0 + \sqrt{1,0^2 - 0,93 \cdot 0,97^2}} = 0,74$$

$$\chi_{PV} = 0,74 < \begin{cases} 1 \\ 1,06 = 1 / 0,97^2 = 1 / \bar{\lambda}_{PV}^2 \end{cases}$$

siehe Abschnitt 3.4.3

[45], Glg. (36) und Tabelle 2

[45], Tabelle 2

[45], Tabelle 2

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken gurtgelagerter Träger, [45] Glg. (36)

Ersatzstabnachweise:

$$m_y = \gamma_{M1} \cdot M_{y,Ed} / (\chi_{PV} \cdot M_{y,Rk}) = 1,1 \cdot 124,5 / (0,74 \cdot 216) = 0,86$$

$$n_y + k_{yy} \cdot m_y = 0,01 + 0,96 \cdot 0,86 = 0,84 < 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y = 0,03 + 1,00 \cdot 0,86 = 0,89 < 1,0 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

3.6 Querschnittsnachweise

Zusätzlich zu den Ersatzstabnachweisen sind an den Bauteilenden Querschnittsnachweise zu führen.

a) Nachweis der Normalkrafttragfähigkeit

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 86,82 \cdot 23,5 / 1,0 = 2040 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,1} / N_{c,Rd} = 43,1 / 2040 = 0,02 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

b) Kontrolle der Schubslankheit des Steges

$$\eta = 1,2$$

$$h_w = h - t_f = 250 - 12,5 = 237,5 \text{ mm}$$

$$h_w / t_w = 237,5 / 7,5 = 31,7 < 60 = 72 \cdot 1 / 1,2 = 72 \cdot \varepsilon / \eta$$

→ Nachweis gegen Schubbeulen des Steges nicht erforderlich!

c) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Steges

$$A_V = A + [t_w + 2 \cdot (r - b)] \cdot t_f$$

$$= 86,82 + [0,75 + 2 \cdot (2,4 - 26)] \cdot 1,25$$

$$A_V = 28,76 \text{ cm}^2 > 20,25 \text{ cm}^2 = 1,2 \cdot 22,5 \cdot 0,75 = \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{28,76 \cdot (23,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 390 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} / V_{pl,Rd} = 55,4 / 390 = 0,14 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Ausnutzungsgrad für Biegedrillknicken

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.61)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.62)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (2)

Normalkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.10)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.9)

DIN EN 1993-1-5, Absatz 5.1 (2)

rechnerische Stegblechhöhe

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.22)

wirksame Schubfläche, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.6 (3) a)

plastische Querkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.18)

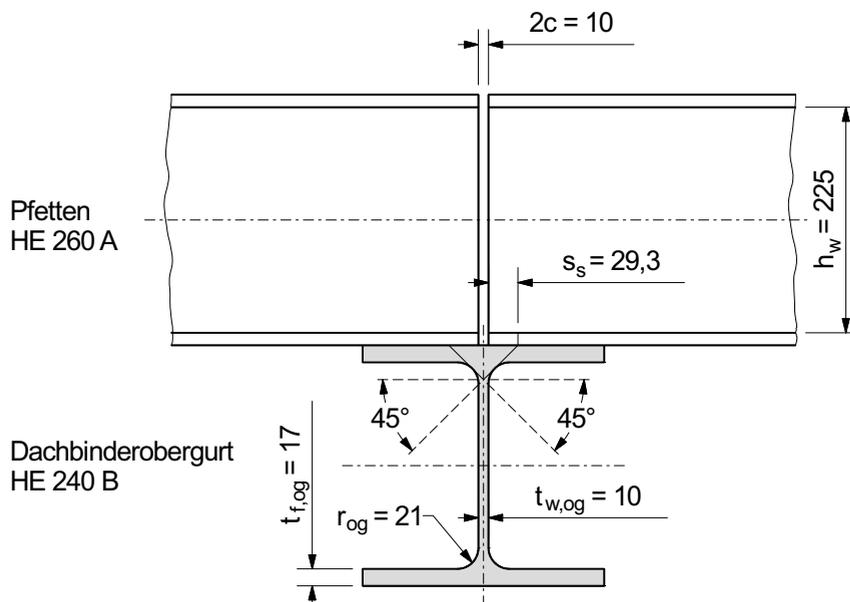
DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.25)

3.7 Lasteinleitung an den Auflagern

Die Einleitung von Querlasten (hier die Auflagerkräfte), die über die Flansche an den Längsrändern einwirken, ist für gewalzte und geschweißte Träger nachzuweisen.

DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.1 (1)

Alle Maße in der Skizze in mm.



Die Auflagerkräfte werden an den Enden der Pfetten außerhalb des Verbandfeldes ohne Quersteifen eingeleitet.

Diese Art der Lasteinleitung entspricht DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.1 (2) c)

Für die Lastausbreitung kann bei Lasteinleitung über Futter oder Bleche (hier der obere Flansch des Dachbinderobergurtes) ein Lastausbreitungswinkel von 1:1, d.h. 45° angenommen werden.

DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.3 (1)

a) wirksame Lastausbreitungslänge l_y ohne Einfluss des Stegbeulens

$$s_s = t_{w,og}/2 + r_{og} \cdot (2 - \sqrt{2}) + t_{f,og} - c$$

$$= 10/2 + 21 \cdot 0,5858 + 17 - 5 = 29,3 \text{ mm}$$

$$f_{yf} = f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yw} = f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$m_1 = \frac{f_{yf}}{f_{yw}} \cdot \frac{b_f}{t_w} = \frac{b_f}{t_w} = 260/7,5 = 34,67$$

$$\bar{\lambda}_F < 0,5$$

→ Der Schlankheitsgrad wird weiter unten berechnet.

$$m_2 = \begin{cases} \bar{\lambda}_F \geq 0,5: & 0,02(h_w/t_f)^2 \\ \bar{\lambda}_F < 0,5: & 0 \end{cases} \rightarrow m_2 = 0$$

Länge der starren Lasteinleitung, DIN EN 1993-1-5, Bild 6.2

Streckgrenze der Flansche

Streckgrenze des Steges

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.8)

Abschätzung für den Schlankheitsgrad

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.9)

$$k_F = 2 + 6 \cdot \frac{s_s + c}{h_w} = 2 + 6 \cdot \frac{29,4 + 5}{225} = 2,92 < 6$$

$$l_e = \min \left(\frac{k_F \cdot E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_{yw} \cdot h_w} \right) = \min \left(\frac{2,92 \cdot 210000 \cdot 7,5^2}{2 \cdot 235 \cdot 237,5} \right) = 34,3 \text{ mm}$$

$$l_{y1} = l_e + t_f \cdot \sqrt{\frac{m_1}{2} + \frac{l_e^2}{t_f^2} + m_2}$$

$$= 34,3 + 12,5 \sqrt{\frac{34,67}{2} + \frac{34,3^2}{12,5^2} + 0} = 97 \text{ mm}$$

$$l_{y2} = l_e + t_f \cdot \sqrt{m_1 + m_2} = 34,3 + 12,5 \cdot \sqrt{34,67 + 0} = 108 \text{ mm}$$

$$l_y = \min \left(\begin{matrix} l_{y1} \\ l_{y2} \end{matrix} \right) = \min \left(\begin{matrix} 97 \\ 108 \end{matrix} \right) = 97 \text{ mm}$$

Beulwert für Lasteinleitung ohne Quersteife am Trägerende, DIN EN 1993-1-5, Bild 6.1 (c)

Grundwert der wirksamen Lastausbreitungslänge, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.13)

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.11)

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.12)

wirksame Lastausbreitungslänge ohne Einfluss des Stegbeulens, DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.5 (3)

b) Beanspruchbarkeit des Steges bei Plattenbeulen unter Querbelastung

$$F_{cr} = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$= \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot 2,92 \cdot 21000 \cdot \frac{0,75^3}{22,5} = 1039 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{9,7 \cdot 0,75 \cdot 23,5}{1039}} = 0,41 < 0,5$$

ideale Verzweigungslast für Stegbeulen infolge Querlasteinleitung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.5)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.4)

siehe oben

→ Die Abschätzung für den Schlankheitsgrad, die bei der Ermittlung der wirksamen Lastausbreitungslänge ohne Einfluss des Stegbeulens angenommen wurde, ist zutreffend!

Abminderungsbeiwert für die wirksame Lastausbreitungslänge, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.3)

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,41} = 1,22 > 1,0 \rightarrow \chi_F = 1,0$$

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 1,0 \cdot 97 = 97 \text{ mm}$$

wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.2)

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{23,5 \cdot 9,7 \cdot 0,75}{1,1} = 155,4 \text{ kN}$$

Beanspruchbarkeit des Steges bei Plattenbeulen unter Querbelastung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.1)

c) Nachweis der Lasteinleitung an den Auflagern

$$\eta_2 = V_{z,Ed} / F_{Rd} = 55,3 / 155,4 = 0,36 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.14)

4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

4.1 Lastkombination 3

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für vertikale Verformungen. Es wird daher zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3 herangezogen:

$$\delta_{z,\text{char}} = 3,3 \text{ cm} < 4,5 \text{ cm} = 900/200 = L/200 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN V ENV 1993-1-3, Tabelle 4.1

Beispiel 1.4: Geschweißter Fachwerkbinder

Inhalt

| | Seite |
|---|-------|
| Aufgabenstellung | 60 |
| 1 System und Einwirkungen..... | 60 |
| 1.1 Systemabmessungen..... | 60 |
| 1.2 Bauteilparameter | 60 |
| 1.2.1 Obergurt | 60 |
| 1.2.2 Untergurt und Diagonalen | 61 |
| 1.3 Materialkennwerte | 61 |
| 1.4 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 61 |
| 1.5 Lastkombinationen | 62 |
| 2 Beanspruchungen | 62 |
| 2.1 Auflagerkräfte | 62 |
| 2.2 Schnittkräfte, Verformungen | 63 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 64 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 64 |
| 3.2 Querschnittsklassifikation..... | 64 |
| 3.2.1 Obergurt | 64 |
| 3.2.2 Untergurt und Füllstäbe..... | 64 |
| 3.3 Bauteilnachweise | 65 |
| 3.3.1 Obergurt | 65 |
| 3.3.2 Füllstäbe..... | 68 |
| 3.4 Querschnittsnachweise | 68 |
| 3.4.1 Obergurt | 68 |
| 3.4.2 Untergurt und Füllstäbe..... | 69 |
| 3.5 Verbindungen..... | 69 |
| 3.5.1 Gurtknotengeometrie | 69 |
| 3.5.2 Obergurtknoten | 70 |
| 3.5.3 Untergurtknoten | 73 |
| 3.5.4 Montagestoß im Untergurt | 76 |
| 3.5.5 Anschluss des Dachbinders an die Längswandstützen | 79 |
| 4 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit | 83 |
| 4.1 Nachweis der Verformungsbegrenzung | 83 |

Beispiel 1.4: Geschweißter Fachwerkbinder

Aufgabenstellung

Für die Fachwerkbinder in den Achsen ② bis ⑨, die gelenkig an die Längswandstützen in den Achsen ① und ⑩ anschließen, sind folgende Nachweise zu führen:

- Bauteil- und/oder Querschnittsnachweise für die Gurte und Diagonalen im Grenzzustand der Tragfähigkeit
- Nachweise geschweißter (Fachwerkknoten) und geschraubter (Montagestoß im Untergurt, Anschluss an die Längswandstützen) Verbindungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit
- Nachweis von Verformungsbegrenzungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

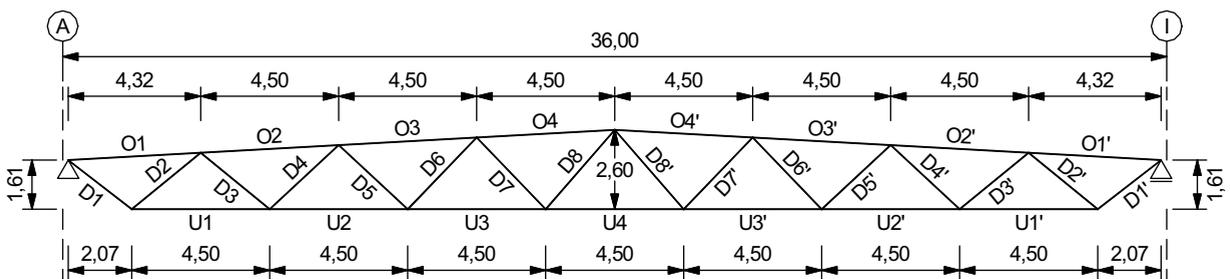
Für die Bezeichnung der Achsen siehe die Vorbemerkungen S. 1.

Die Längswandstützen sind Gegenstand von Beispiel 1.7.

Alternativ zu den Fachwerkbindern werden in Beispiel 1.8 geschweißte Vollwandträger betrachtet.

1 System und Einwirkungen

1.1 Systemabmessungen



Abmessungen in der Skizze in m

Die Binderobergurte werden in den Knotenpunkten durch die Pfetten, die an den Dachverband gekoppelt sind, senkrecht zur Binderebene gestützt.

$$L = 2 \cdot 4,32 + 6 \cdot 4,5 = 35,64 \text{ m}$$

$$\alpha = \arctan[(2,6 - 1,61)/(3 \cdot 4,5 + 4,32)] = 3,18^\circ$$

$$B = 9,0 \text{ m}$$

Pfetten siehe Beispiele 1.3 und 1.6, Dachverband siehe Beispiel 1.5

Spannweite des Dachbinders

Dachneigung

Binderabstand in Hallenlängsrichtung, siehe Vorbemerkungen, S. 1

1.2 Bauteilparameter

1.2.1 Obergurt

| Stäbe | Länge [m] | Profil Stahlsorte | Fläche [cm ²] | G _i [kN] | i | ΣG _i [kN] |
|------------------|-----------|----------------------|---------------------------|---------------------|---|----------------------|
| O1, O1' | 4,327 | HE 240 B S355J2 | 106,00 | 3,60 | 2 | 7,20 |
| O2 – O4 | 4,507 | | | 3,75 | 3 | 11,25 |
| O2' – O4' | 4,507 | | | 3,75 | 3 | 11,25 |
| ΣG _{og} | | | | | | 29,70 |

G_i = Eigengewicht eines Stabes

i = Anzahl der Stäbe im Binder

ΣG_i = Eigengewicht für eine Zeile

Profil HE 240 B aus unlegiertem Bau-
stahl nach DIN EN 10025-2

Eigengewicht des Obergurtes

1.2.2 Untergurt und Diagonalen

| Stäbe | Länge [m] | Profil Stahlsorte | Fläche [cm ²] | G _i [kN] | i | ΣG _i [kN] |
|-----------------------|-----------|------------------------|---------------------------|---------------------|---|----------------------|
| U1 – U4, U1' – U3' | 4,500 | QHP 180x8 S355J2H | 54,35 | 1,92 | 7 | 13,44 |
| D1, D1' | 2,622 | QHP 100x6,3 S355J2H | 23,19 | 0,48 | 2 | 0,96 |
| D2, D2' | 2,913 | | | 0,53 | 2 | 1,06 |
| D3, D3' | 2,913 | QHP 90x4 S355J2H | 13,59 | 0,31 | 2 | 0,62 |
| D4, D4' | 3,078 | | | 0,33 | 2 | 0,66 |
| D5, D5' | 3,078 | QHP 70x4 S355J2H | 10,39 | 0,25 | 2 | 0,50 |
| D6, D6' | 3,253 | | | 0,27 | 2 | 0,54 |
| D7, D7' | 3,253 | | | 0,27 | 2 | 0,54 |
| D8, D8' | 3,438 | | | 0,28 | 2 | 0,56 |
| ΣG _{og} | | | | | | |
| Σ | | | | | | 48,58 |

G_i = Eigengewicht eines Stabes
 i = Anzahl der Stäbe im Binder
 ΣG_i = Eigengewicht für eine Zeile
 warmgewalzte quadratische Hohlprofile (QHP) nach DIN EN 10210-2 aus unlegiertem Baustahl nach DIN EN 10210-1

siehe Abschnitt 1.2.1

Eigengewicht eines Dachbinders

1.3 Materialkennwerte

Streckgrenzen:

Baustahl S355J2, DIN EN 10025-2: $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Baustahl S355J2H, DIN EN 10210-1: $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Zugfestigkeiten:

Baustahl S355J2, DIN EN 10025-2: $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$

Baustahl S355J2H, DIN EN 10210-1: $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$

Schrauben, Festigkeitsklasse 8.8: $f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

Schrauben, Festigkeitsklasse 10.9: $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$

Elastizitätsmodul:

$E = 210000 \text{ N/mm}^2$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.4 Charakteristische Werte der Einwirkungen

Eigengewicht, Dachbinder: $G_{0,k} = +48,50 \text{ kN} = \Sigma G_i$

Eigengewicht, Pfette: $g_{0,k} = +0,68 \text{ kN/m}$

Eigengewicht, Dachkonstruktion: $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$

Eigengewicht, Installation: $g_{2,k} = +0,25 \text{ kN/m}$

Schnee: $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$

Winddruck, Bereich I: $w_{e,I}^+ = +0,13 \text{ kN/m}^2$

Windsog, Bereich H: $w_{e,H} = -0,46 \text{ kN/m}^2$

Windsog, Bereich I: $w_{e,I}^- = -0,39 \text{ kN/m}^2$

Mittelwert der Bereiche H und I: $w_{e,HI}^- = -(0,455 + 0,39)/2 = -0,422 \text{ kN/m}^2$

siehe Abschnitt 1.2.2

siehe Beispiel 1.3, Abschnitt 1.2.1

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2

pauschal angesetzt am Obergurt

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

Der Windsog im Bereich H ist nur für die Binder in Achse ☉ bzw. in Achse ☉ relevant, die in etwa an der Grenze der Bereiche H und I bei Wind auf die benachbarte Giebelwand liegen.

1.5 Lastkombinationen

a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen in Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT), ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_{G,sup} = 1,35$
 ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: $\gamma_{G,inf} = 1,0$
 veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_Q = 1,5$

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

Schnee: $\psi_{0,S} = 0,5$
 Wind: $\psi_{0,W} = 0,6$

c) Faktoren für die Einwirkungen in den Lastkombinationen

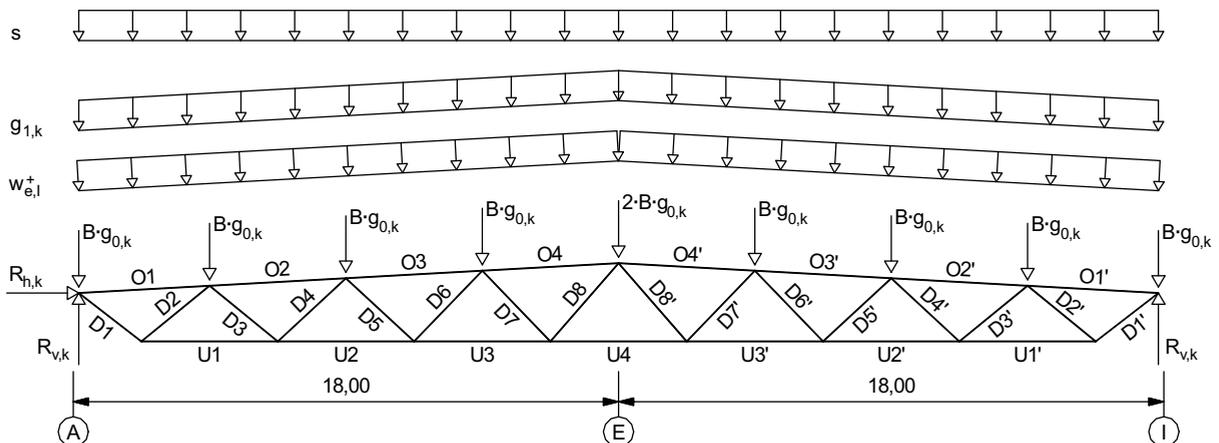
GZT: DIN EN 1990, Glg. (6.10)
 GZG: DIN EN 1990, Glg. (6.14b)

| Lastkombination Grenzzustand Einwirkung | | 1 GZT Faktor | 2 GZT Faktor | 3 GZG ¹⁾ Faktor |
|---|--------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Eigengewicht | $G_{0,k}$ | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ | 1,0 |
| Eigengewicht | $g_{0,k}$ | | | |
| Eigengewicht | $g_{1,k}$ | | | |
| Eigengewicht | $g_{2,k}$ | | | |
| Schnee | s | $\gamma_Q = 1,5$ | 0,0 | 1,0 |
| Winddruck | $w_{e,I}^+$ | $\gamma_Q \cdot \psi_{0,W} = 0,9$ | 0,0 | $\psi_{0,W} = 0,6$ |
| Windsog | $w_{e,HI}^-$ | 0,0 | $\gamma_Q = 1,5$ | 0,0 |

¹⁾ GZG = Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, charakteristische Kombination

2 Beanspruchungen

2.1 Auflagerkräfte



Die Auflagerkräfte, die nur für die Nachweise der Längswandstützen erforderlich sind, werden für die charakteristischen Werte der Einwirkungen bestimmt:

$$R_{v,g0,k} = G_{0,k}/2 + 5 \cdot B \cdot g_{0,k} = 48,58/2 + 5 \cdot 9 \cdot 0,68 = 54,9 \text{ kN}$$

$$R_{v,g1,k} = 0,5 \cdot L \cdot B \cdot g_{1,k}/\cos \alpha = 0,5 \cdot 36 \cdot 9 \cdot 0,41/\cos 3,18^\circ = 66,5 \text{ kN}$$

$$R_{v,g2,k} = 0,5 \cdot L \cdot g_{2,k}/\cos \alpha = 0,5 \cdot 36 \cdot 0,25/\cos 3,18^\circ = 4,5 \text{ kN}$$

$$R_{v,g,k} = R_{v,g0,k} + R_{v,g1,k} + R_{v,g2,k} = 54,9 + 66,5 + 4,5 = 125,9 \text{ kN}$$

$$R_{v,s,k} = 0,5 \cdot L \cdot B \cdot s = 0,5 \cdot 36 \cdot 9 \cdot 1,03 = 166,9 \text{ kN}$$

$$R_{v,w,k}^+ = 0,5 \cdot L \cdot B \cdot w_{e,I}^+ = 0,5 \cdot 36 \cdot 9 \cdot 0,13 = 21,1 \text{ kN}$$

$$R_{v,w,k}^- = 0,5 \cdot L \cdot B \cdot w_{e,HI}^- = -0,5 \cdot 36 \cdot 9 \cdot 0,422 = -68,4 \text{ kN}$$

2.2 Schnittkräfte, Verformungen

Als statisches System für die Schnittkraftermittlung wird ein Fachwerk mit gelenkigen Anschlüssen der Bauteile gewählt, was wegen der punktuellen Lasteinleitung am Obergurt über die Pfetten vertretbar ist. Es ergeben sich als Beanspruchungen ausschließlich Normalkräfte.

| Stäbe | LK1 | LK2 | LK3 | | | |
|----------|----------|----------|----------|-----------|---|--------|
| | N_{Ed} | N_{Ed} | N_{Ed} | \bar{N} | i | |
| | [kN] | [kN] | [kN] | [-] | | |
| O1, O1' | -457,3 | -22,50 | -317,9 | -0,601 | 2 | 0,74 |
| O2, O2' | -1145,5 | -56,10 | -796,4 | -1,666 | 2 | 5,37 |
| O3, O3' | -1462,3 | -72,63 | -1016,7 | -2,491 | 2 | 10,26 |
| O4, O4' | -1518,7 | -77,61 | -1056,1 | -3,150 | 2 | 13,47 |
| U1, U1' | 885,8 | 43,26 | 615,7 | 1,168 | 2 | 5,67 |
| U2, U2' | 1367,0 | 68,76 | 950,3 | 2,100 | 2 | 15,74 |
| U3, U3' | 1539,1 | 80,43 | 1070,1 | 2,834 | 2 | 23,91 |
| U4 | 1491,5 | 82,33 | 1037,3 | 3,427 | 1 | 14,01 |
| D1, D1' | 578,3 | 29,32 | 402,0 | 0,760 | 2 | 3,29 |
| D2, D2' | -555,9 | -26,04 | -386,3 | -0,735 | 2 | 3,40 |
| D3, D3' | 333,4 | 19,20 | 231,9 | 0,642 | 2 | 3,04 |
| D4, D4' | -305,9 | -14,59 | -212,6 | -0,597 | 2 | 2,74 |
| D5, D5' | 126,4 | 9,93 | 88,1 | 0,530 | 2 | 1,32 |
| D6, D6' | -115,3 | -6,37 | -80,2 | -0,501 | 2 | 1,20 |
| D7, D7' | -34,2 | 2,88 | -23,5 | 0,450 | 2 | -0,32 |
| D8, D8' | 36,6 | 0,15 | 25,3 | -0,430 | 2 | -0,34 |
| Σ | | | | | | 103,50 |

Auch bei Windsog (LK 2) ergeben sich im Binderuntergurt Zugkräfte. Für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit ist es ausreichend, nur die Normalkräfte aus LK 1 zu betrachten, die wesentlich größer sind.

Als Stützweite L für den Dachbinder wird hier der Abstand zwischen den Achsen Ⓐ und ① (= 36,0 m) angesetzt!

Die horizontale Auflagerkraft $R_{h,k}$ ist wegen der Symmetrie von System und Belastung für alle Einwirkungen null.

vertikale Auflagerkraft aus Eigenlasten

vertikale Auflagerkraft aus Schneelast

vertikale Auflagerkraft aus Winddruck

vertikale Auflagerkraft aus Windsog

Bemessungswerte der Beanspruchung

Die Schnittkräfte wurden in einer Nebenrechnung, die elementar ist, ermittelt. Nachfolgend werden nur die Ergebnisse für alle Lastkombinationen tabellarisch angegeben.

LK = Lastkombination

Die Normalkräfte \bar{N} ergeben sich für den Angriff einer virtuellen Vertikalkraft von „1“ am Firstpunkt.

In der rechten Spalte stehen die nach dem Prinzip der virtuellen Kräfte ermittelten Anteile jedes Stabes an der Vertikalverformung des Firstpunktes, wobei i die Anzahl der Stäbe im Binder mit gleichem Anteil angibt.

Vertikalverformung des Firstpunktes

charakteristische Werte der Normalkraft der Stäbe O4 bzw. O4':

- infolge Eigenlasten: $N_{g,k} = -436,4 \text{ kN}$
- infolge Schneelast: $N_{s,k} = -575,5 \text{ kN}$
- infolge Windlasten: $N_{w,k}^+ = -73,6 \text{ kN}$ $N_{w,k}^- = 220,8 \text{ kN}$

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

- elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: $\gamma_{M0} = 1,0$
- Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): $\gamma_{M1} = 1,1$
- Bruchversagen von zugbeanspruchten Querschnitten: $\gamma_{M2} = 1,25$
- Beanspruchbarkeit von geschraubten Verbindungen: $\gamma_{M2} = 1,25$
- Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: $\gamma_{M2} = 1,25$
- Beanspruchbarkeit von Verbindungen mit Hohlprofilen: $\gamma_{M5} = 1,0$

3.2 Querschnittsklassifikation

3.2.1 Obergurt

Flansche: einseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (235/f_y)^{0,5} = \sqrt{235/355} = 0,814 \\ c &= (b - t_w)/2 - r = (240 - 10)/2 - 21 = 94 \text{ mm} \\ c/t &= c/t_f = 94/17 = 5,53 < 7,32 = 9 \cdot 0,814 = 9\varepsilon \rightarrow \text{Klasse 1} \end{aligned}$$

Steg: zweiseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\begin{aligned} c &= h - 2 \cdot (t_f + r) = 240 - 2 \cdot (17 + 21) = 164 \text{ mm} \\ c/t &= c/t_w = 164/10 = 16,4 < 26,86 = 33 \cdot 0,814 = 33\varepsilon \rightarrow \text{Klasse 1} \end{aligned}$$

Querschnitt: höchste Klasse von Flanschen oder Steg \rightarrow Klasse 1

3.2.2 Untergurt und Füllstäbe

| Profil | d | t = r | c | c/t | Klassifikation |
|---------|------|-------|------|------|--|
| QHP | [mm] | [mm] | [mm] | [-] | |
| 180x8 | 180 | 8 | 148 | 18,5 | $< 26,86 = 33 \cdot 0,814 = 33\varepsilon$ \rightarrow Klasse 1 |
| 100x6,3 | 100 | 6,3 | 75 | 11,9 | |
| 90x4 | 90 | 4 | 74 | 18,5 | |
| 70x4 | 70 | 4 | 54 | 13,5 | |

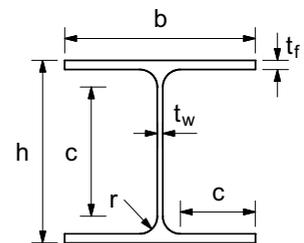
$c = d - 2t - 2r$

Diese Werte sind für die Ermittlung der Beanspruchungen des Dachverbandes (Beispiel 1.5, Abschnitt 2.1) erforderlich.

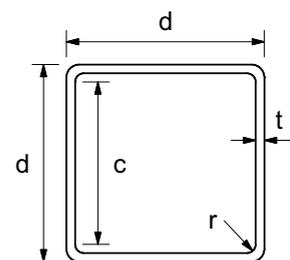
DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anmerkung

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2
HE 240 B, S355



QHP, S 355



3.3 Bauteilnachweise

3.3.1 Obergurt

Maßgebend für den Bauteilnachweis sind die Stäbe O4 bzw. O4'.

Die Obergurte der Dachbinder in den Achsen ⑤ und ⑥ wirken auch als Gurte des Dachverbandes und erhalten zusätzliche Beanspruchungen. Wegen der Exzentrizität der Binderobergurte zur Verbandsebene, die mit der Lage der Schwerachsen der Pfetten zusammenfällt, verursachen die Normalkräfte aus der Mitwirkung im Dachverband zusätzlich Biegemomente um die starke Achse der Binderobergurte, die für den Bauteilnachweis nicht vernachlässigbar sind!

Beanspruchungen:

$$\begin{aligned}
 N_{Ed} &= -1518,7 \text{ kN} \\
 \Delta N_{Ed} &= -148,2 \text{ kN} \\
 \Sigma N_{Ed} &= -1518,7 - 148,2 = -1666,9 \text{ kN} \\
 e &= 120 + 125 = 245 \text{ mm} \\
 M_{y,Ed} &= \Delta N_{Ed} \cdot e = -148,2 \cdot 0,245 = -36,3 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Querschnittswerte:

$$\begin{aligned}
 A &= 106 \text{ cm}^2 & I_y &= 11259 \text{ cm}^4 & W_{pl,y} &= 1053 \text{ cm}^3 \\
 I_z &= 3923 \text{ cm}^4 & I_T &= 103,6 \text{ cm}^4 & I_\omega &= 476280 \text{ cm}^6
 \end{aligned}$$

Der Stabilitätsnachweis wird mit Ersatzstabnachweisen für ein auf Druck und Biegung um die starke Achse beanspruchtes Bauteil geführt:

$$\begin{aligned}
 N_{Ed}/(\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yy} \cdot (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/(\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) &\leq 1 \\
 N_{Ed}/(\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{zy} \cdot (M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed})/(\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}) &\leq 1
 \end{aligned}$$

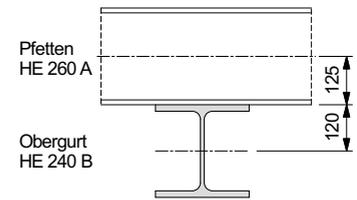
a) charakteristische Werte der Querschnittstragfähigkeiten

$$\begin{aligned}
 N_{Rk} &= A \cdot f_y = 106 \cdot 35,5 = 3763 \text{ kN} \\
 M_{y,Rk} &= W_{pl,y} \cdot f_y = 1053 \cdot 35,5/100 = 373,8 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

b) Abminderungsbeiwert χ_y für Biegeknicken um die y-Achse

$$\begin{aligned}
 L_{cr} &= \beta_y \cdot L = 1,0 \cdot 4,507 = 4,507 \text{ m} \\
 N_{cr} &= \pi^2 \cdot EI_y/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 11259/450,7^2 = 11488 \text{ kN} \\
 \bar{\lambda}_y &= \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{3763/11488} = 0,57
 \end{aligned}$$

siehe Tabelle in Abschnitt 2.2



Stäbe O4 bzw. O4', Lastkombination 1
Druckkraft im Verbandsfeld (LK 1), vgl. Beispiel 1.5, Abschnitt 2.2

Exzentrizität zur Dachverbandsebene (siehe Skizze) und daraus folgendes Biegemoment um die y-Achse

[47] S. 36/37

Anmerkung:
 $W_{pl,y}$ wurde zurückgerechnet aus dem plastischen Moment nach [47] S. 37.

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (4) und Glg. (6.61) und (6.62) ohne die Anteile für Biegung um die z-Achse!

Das Moment $\Delta M_{y,Ed}$ aus der Verschiebung der y-Querschnittsachse ist nur für Klasse-4-Querschnitte relevant. Alle anderen Parameter werden weiter unten erläutert und berechnet.

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.7

Normalkraftbeanspruchbarkeit

Momentenbeanspruchbarkeit

Knicklängenbeiwert β_y entsprechend DIN EN 1993-1-1, Absatz BB.1.1 (2) B

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

$$\left. \begin{aligned} h/b &= 240/240 = 1,0 < 1,2 \\ t_f &= 17 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie b} \rightarrow \alpha = 0,34$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right]$$

$$= 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (0,57 - 0,2) + 0,57^2 \right] = 0,73$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,57^2}} = 0,85 < 1$$

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie b, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

c) Abminderungsbeiwert χ_z für Biegeknicken um die z-Achse

$$L_{cr} = \beta_z \cdot L = 1,0 \cdot 4,507 = 4,507 \text{ m}$$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_z / L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 3923 / 450,7^2 = 4003 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{N_{Rk} / N_{cr}} = \sqrt{3763 / 4003} = 0,97$$

$$\left. \begin{aligned} h/b &= 240/240 = 1,0 < 1,2 \\ t_f &= 17 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie c} \rightarrow \alpha = 0,49$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right]$$

$$= 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,97 - 0,2) + 0,97^2 \right] = 1,16$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,16 + \sqrt{1,16^2 - 0,97^2}} = 0,56 < 1$$

Knicklängenbeiwert β_z entsprechend DIN EN 1993-1-1, Absatz BB.1.1 (2) B

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie c, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

d) ideales Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 GI_T}{\pi^2 EI_z}} = C_1 \cdot N_{cr} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{GI_T}{N_{cr}}}$$

$$G = 81000 \text{ N/mm}^2 \text{ (Schubmodul)}$$

$$C_1 = 1,0$$

$$K_\omega = \pi \sqrt{EI_\omega / GI_T} / L = \pi \sqrt{21 \cdot 476280 / (8,1 \cdot 103,6)} / 450,7 = 0,8 < 1$$

$$\rightarrow C_1 = C_1 / 1,05 = 0,95 < 1,0 \rightarrow C_1 = 1,0$$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_z / L^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 3923 / 450,7^2 = 4003 \text{ kN}$$

$$M_{cr} = 1,0 \cdot 4003 \sqrt{\frac{476280}{3923} + \frac{8100 \cdot 103,6}{4003}} \cdot 10^{-2} = 728 \text{ kNm}$$

Anmerkung:

Das Biegemoment aus Eigengewicht des Obergurtes ist vernachlässigbar.

ideales Biegedrillknickmoment eines gabelgelagerten Einfeldträgers unter Beanspruchung durch Endmomente nach [40], Glg. (309)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

Beiwert für gegengleiche Endmomente nach [40], Tabelle 64

ideale Verzweigungslast für Knicken um die z-Achse

ideales Biegedrillknickmoment

e) Abminderungsbeiwert χ_{LT} für Biegedrillknicken

Neben dem Verfahren für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.3) gibt es für die Berechnung des Abminderungsbeiwertes χ_{LT} das allgemeine Verfahren (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.2), das an dieser Stelle verwendet wird.

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \\ \bar{\lambda}_{LT} &= \sqrt{M_{y,Rk}/M_{cr}} = \sqrt{373,8/728} = 0,72 > 0,4 = \bar{\lambda}_{LT,0} \\ h/b &= 240/240 = 1,0 < 2 \rightarrow \text{Biegedrillknicklinie a} \\ \alpha_{LT} &= 0,21 \\ \phi_{LT} &= 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,72 - 0,2) + 0,72^2] = 0,81 \\ \chi_{LT} &= \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,81 + \sqrt{0,81^2 - 0,72^2}} = 0,85 < 1 \end{aligned}$$

f) Interaktionsfaktoren k_{yy}, k_{zy}

DIN EN 1993-1-1 enthält für die Berechnung der Interaktionsfaktoren das Alternativverfahren 1 (Anhang A) und das Alternativverfahren 2 (Anhang B). Letzteres wird an dieser Stelle verwendet.

$$\begin{aligned} \psi &= 1 \\ C_{my} &= 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot 1 = 1,0 > 0,4 \\ C_{mLT} &= 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot 1 = 1,0 > 0,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_y &= \gamma_{M1} \cdot \Sigma N_{Ed} / (\chi_y \cdot N_{Rk}) = 1,1 \cdot 1666,9 / (0,85 \cdot 3763) = 0,57 \\ n_z &= \gamma_{M1} \cdot \Sigma N_{Ed} / (\chi_z \cdot N_{Rk}) = 1,1 \cdot 1666,9 / (0,56 \cdot 3763) = 0,87 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_y &= \min(\bar{\lambda}_y - 0,2 | 0,8) = \min(0,57 - 0,2 | 0,8) = 0,37 \\ a_{LT} &= \min(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z | 0,1) = \min(0,1 \cdot 0,97 | 0,1) = 0,097 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{yy} &= C_{my} \cdot (1 + a_y \cdot n_y) = 1,0 \cdot (1 + 0,37 \cdot 0,57) = 1,21 \\ k_{zy} &= 1 - \frac{a_{LT} \cdot n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 \cdot 0,87}{1,0 - 0,25} = 0,88 \end{aligned}$$

g) Ersatzstabnachweise

$$m_y = \gamma_{M1} \cdot M_{y,Ed} / (\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}) = 1,1 \cdot 36,3 / (0,85 \cdot 373,8) = 0,13$$

$$n_y + k_{yy} \cdot m_y = 0,57 + 1,21 \cdot 0,13 = 0,73 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y = 0,87 + 0,88 \cdot 0,13 = 0,98 < 1,0 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.2 (1)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.4

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.3

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken, allgemeines Verfahren, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.56)

DIN EN 1993-1-1, Anhang B

Nach DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.3.3(5) Anmerkung 2 dürfen beide Alternativverfahren angewendet werden.

Randmomentenverhältnis, äquivalente Momentenbeiwerte für Biegeknicken um die y-Achse und Biegedrillknicken, DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.3

Ausnutzungsgrade für Biegeknicken um die y-Achse bzw. um die z-Achse

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.2

Ausnutzungsgrad für Biegedrillknicken

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.61)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.62)

3.3.2 Füllstäbe

Die Stabilitätsnachweise werden als Ersatzstabnachweise für druckbeanspruchte Bauteile geführt:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

Der Abminderungsbeiwert für Biegeknicken χ ist wie für den Obergurt (Abschnitt 3.3.1) zu bestimmen, wobei eine Unterscheidung zwischen y- und z-Querschnittsachse wegen der Punktsymmetrie der QHP-Profile und gleicher Knicklängen in und senkrecht zur Binderebene entfällt.

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.46)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.47)

Eine ausführliche Darstellung der Ermittlung der Abminderungsbeiwerte ist hier entbehrlich, d.h. es werden nur die Zwischen- und Endergebnisse in tabellarischer Form angegeben.

| Parameter | | druckbeanspruchte Füllstäbe | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|
| | | D2, D2' | D4, D4' | D6, D6' | D7, D7' |
| N_{Ed} | [kN] | 555,9 | 305,9 | 115,3 | 34,2 |
| A | [cm ²] | 23,19 | 13,59 | 10,39 | 10,39 |
| f_y | [N/mm ²] | 355 | | | |
| L | [m] | 2,913 | 3,078 | 3,253 | 3,253 |
| $\beta_y = \beta_z$ | | 0,75 | | | |
| N_{cr} | [kN] | 1457,3 | 646,9 | 260,0 | 260,0 |
| $\bar{\lambda}$ | | 0,75 | 0,86 | 1,19 | 1,19 |
| Knicklinie | | a | | | |
| α | | 0,21 | | | |
| ϕ | | 0,84 | 0,94 | 1,31 | 1,31 |
| χ | | 0,82 | 0,76 | 0,54 | 0,54 |
| $N_{b,Rd}$ | [kN] | 589,3 | 332,2 | 179,6 | 179,6 |
| $N_{Ed}/N_{b,Rd}$ | | 0,94 < 1 | 0,92 < 1 | 0,64 < 1 | 0,19 < 1 |

Druckkraft für LK 1, Abschnitt 2.2

Querschnittsfläche, Abschnitt 1.2

Streckgrenze, Abschnitt 1.3

Stablänge, Abschnitt 1.2

Knicklängenbeiwert, DIN EN 1993-1-1, Absatz BB.1.3(3) B

Verzweigungslast für Biegeknicken

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.1

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.47)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.46)

→ Die Ersatzstabnachweise für die Füllstäbe sind erfüllt.

3.4 Querschnittsnachweise

3.4.1 Obergurt

Zusätzlich zu den Ersatzstabnachweisen sind an den Bauteilenden Querschnittsnachweise zu führen.

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (2)

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 106 \cdot 35,5 / 1,0 = 3763 \text{ kN}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1053 \cdot 35,5 \cdot 10^{-2} / 1,0 = 373,8 \text{ kNm}$$

$$h_w = h - t_f = 240 - 17 = 223 \text{ mm}$$

Normalkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.10)

Momentenbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.13)

Steghöhe (Mittellinienmodell)

Die Momentenbeanspruchbarkeit ist abzumindern, wenn eine der folgenden Bedingungen nicht erfüllt ist:

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.9.1 (4)

$$n = \frac{\Sigma N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{1656,5}{3763} = 0,44 > 0,25 \quad \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt!}$$

$$\frac{2 \cdot \Sigma N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{2 \cdot 1656,5 \cdot 1,0}{22,3 \cdot 1,0 \cdot 35,5} = 4,18 > 1 \quad \rightarrow \text{Bedingung nicht erfüllt!}$$

→ Die plastische Momentenbeanspruchbarkeit ist abzumindern!

$$a = 1 - 2b \cdot t_f / A = 1 - 2 \cdot 24 \cdot 1,7 / 106 = 0,23 < 0,5$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} = 373,8 \cdot \frac{1-0,44}{1-0,5 \cdot 0,23} = 236,5 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} / N_{c,Rd} = 1656,5 / 3763 = 0,44 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$M_{y,Ed} / M_{N,y,Rd} = 33,8 / 236,5 = 0,14 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.4.2 Untergurt und Füllstäbe

Die Füllstäbe sind an den Ober- und Untergurt angeschweißt, d.h. es sind keine Lochabzüge für zugbeanspruchte Bauteile erforderlich.

$$N_{Ed} / N_{t,Rd} \leq 1,0$$

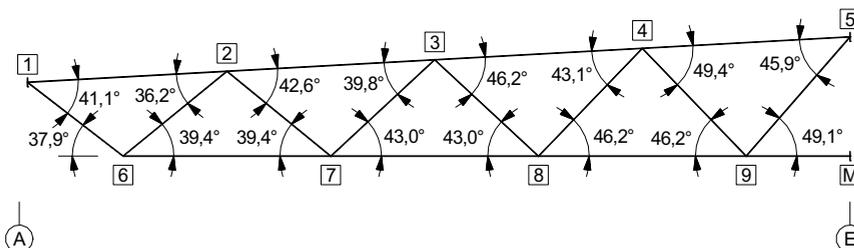
$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

| Parameter | | Untergurt | zugbeanspruchte Füllstäbe | | |
|---------------------|----------------------|-----------|---------------------------|----------|----------|
| | | U3, U3' | D1, D1' | D3, D3' | D5, D5' |
| N_{Ed} | [kN] | 1539,1 | 578,3 | 333,4 | 126,4 |
| A | [cm ²] | 54,35 | 23,19 | 13,59 | 10,39 |
| f_y | [N/mm ²] | 355 | | | |
| $N_{t,Rd}$ | [kN] | 1929,4 | 823,2 | 482,4 | 368,8 |
| $N_{Ed} / N_{t,Rd}$ | | 0,80 < 1 | 0,70 < 1 | 0,69 < 1 | 0,34 < 1 |

→ Die Querschnittsnachweise für Untergurt und Füllstäbe sind erfüllt.

3.5 Verbindungen

3.5.1 Gurtknotengeometrie



DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.33)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.34)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.9.1 (5)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.36)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.9)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.31)

Für die druckbeanspruchten Füllstäbe sind die Querschnittsnachweise nicht maßgebend.

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.5)

Normalkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.6)

Der Nachweis nur für die höchstbeanspruchten Stäbe gleichen Querschnitts ist hier ausreichend.

Zugkraft für LK 1, Abschnitt 2.2

Querschnittsfläche, Abschnitt 1.2

Streckgrenze, Abschnitt 1.3

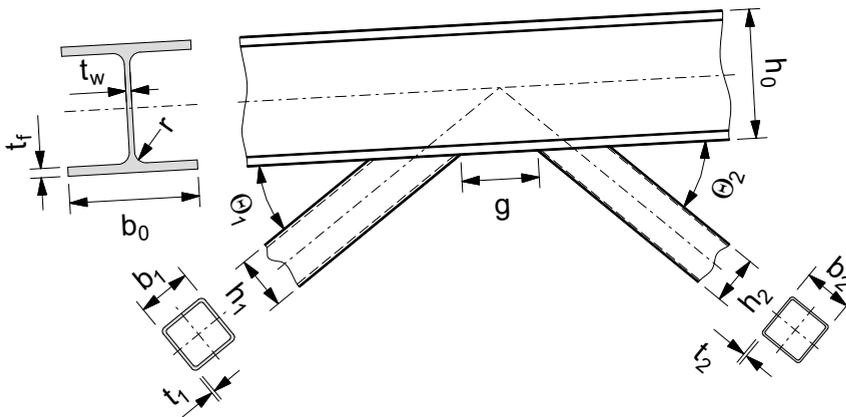
DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.6)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.5)

Wegen der Symmetrie des Binders um die Achse © ist die Betrachtung der „linken“ Binderhälfte in Abschnitt 3.5 für alle Nachweise ausreichend.

Nach [42] S. 57 sind die Knoten 1 und 5 als K-Knoten nachzuweisen, weil die Stirnplatten (am Stützenanschluss (Abschnitt 3.5.5) bzw. im Montagestoß des Obergurtes) diese Verbindungen wie benachbarte druckbeanspruchte Füllstäbe versteifen.

3.5.2 Obergurtnoten



Für die zu führenden Nachweise werden der Gurt mit dem Index $i = 0$ und die Diagonalen mit dem Index $i = 1$ oder 2 identifiziert.

Die Schwerachsen der Diagonalen und des Obergurtes schneiden sich in jedem Knoten in genau einem Punkt, d.h. es sind keine Knotenexzentrizitäten vorhanden.

Knotennummern siehe Abschnitt 3.5.1

a) Berechnung des Spaltmaßes g für einen Knoten k

| | | | | | |
|-----|---|---|-----|---|---|
| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| g | $\frac{h_0 \cdot \cos \theta_2 - h_2}{\sin \theta_2}$ | $\frac{h_0 \cdot \cos \theta_1 - h_1}{2 \cdot \sin \theta_1}$ | $+$ | $\frac{h_0 \cdot \cos \theta_2 - h_2}{2 \cdot \sin \theta_2}$ | $\frac{h_0 \cdot \cos \theta_1 - h_1}{\sin \theta_1}$ |

b) Überprüfung des Gültigkeitsbereiches für die Füllstäbe

| Knoten | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Limit |
|------------|--|-------|-------|-------|-------|--------------|
| h_1/t_1 | | 16,7 | 22,5 | 17,5 | 17,5 | ≤ 35 |
| h_1/b_1 | | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | $= 1$ |
| θ_1 | | 36,2° | 39,8° | 43,1° | 45,9° | $> 30^\circ$ |
| h_2/t_2 | 16,7 | 22,5 | 17,5 | 17,5 | | ≤ 35 |
| h_2/b_2 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | | $= 1$ |
| θ_2 | 41,1° | 42,6° | 46,2° | 49,4° | | $> 30^\circ$ |
| Klasse | Klasse aller Füllstabprofile = 1 (Abschnitt 3.2.2) | | | | | < 3 |

Anschlussstyp „K-Spalt“ entsprechend DIN EN 1993-1-8, Bild 7.1

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.1.2 (3)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.1.2 (3)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.20

Der Gültigkeitsbereich für das Gurtprofil ist mit Einstufung in die Klasse 1 (Abschnitt 3.2.1) eingehalten und die Profilhöhe ist kleiner als 400 mm.

Um bei der Bestimmung der Knoten Tragfähigkeiten die Übersichtlichkeit zu wahren, werden zuerst für jeden Versagensmechanismus die zugrunde liegenden Gleichungen und im Anschluss daran die entsprechenden Zahlenwerte in tabellarischer Form angegeben.

c) Knoten Tragfähigkeit bei Fließen des Steges des Gurtstabes

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_{w,i}}{\sin \theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$b_{w,i} = h_i / \sin \theta_i + 5 \cdot (t_f + r) \leq 2 \cdot t_i + 10 \cdot (t_f + r)$$

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.21

Tragfähigkeit für Diagonale i , f_{y0} ist die Streckgrenze des Obergurtes

mittragende Breite des Steges

| Parameter | | Knoten | | | | |
|------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| h_1 | [mm] | | 100,0 | 90,0 | 70,0 | 70,0 |
| θ_1 | [°] | | 36,2 | 39,8 | 43,1 | 45,9 |
| $b_{w,1}$ | [mm] | | 359,1 | 330,5 | 292,5 | 287,4 |
| $N_{1,Rd}$ | [kN] | | 2156,2 | 1831,0 | 1520,8 | 1419,6 |
| h_2 | [mm] | 100,0 | 90,0 | 70,0 | 70,0 | |
| θ_2 | [°] | 41,1 | 42,6 | 46,2 | 49,4 | |
| $b_{w,2}$ | [mm] | 342,3 | 322,9 | 287,0 | 282,2 | |
| $N_{2,Rd}$ | [kN] | 1850,0 | 1693,5 | 1411,4 | 1318,7 | |

Profilhöhe von Strebe 1
 Winkel zwischen Strebe 1 und Gurt
 mittragende Stegbreite für Strebe 1

Profilhöhe von Strebe 2
 Winkel zwischen Strebe 2 und Gurt
 mittragende Stegbreite für Strebe 2

d) Überprüfung der Knoten auf Strebenversagen

$$\gamma = b_0 / (2 \cdot t_f) = 240 / (2 \cdot 17) = 7,06$$

$$\beta = (b_1 + b_2 + h_1 + h_2) / (4 \cdot b_0)$$

DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.5 (6)
 DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.5 (6)

Der Nachweis gegen Strebenversagen kann entfallen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$g/t_f \leq 20 - 28 \cdot \beta \quad (1)$$

$$\beta \leq 0,79 = 1 - 0,03 \cdot 7,06 = 1 - 0,03 \cdot \gamma \quad (2)$$

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.21

| Parameter | Knoten | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| g [mm] | 123,3 | 143,1 | 140,1 | 133,8 | 134,8 |
| β | 0,42 | 0,40 | 0,33 | 0,29 | 0,29 |
| g/t_f | 7,25 | 8,42 | 8,24 | 7,87 | 7,93 |
| $20 - 28 \cdot \beta$ | 8,33 | 8,92 | 10,67 | 11,83 | 11,83 |
| $\frac{g/t_f}{20 - 28 \cdot \beta}$ | 0,87 | 0,94 | 0,77 | 0,67 | 0,67 |

Die Überprüfung ergibt, dass der Nachweis gegen Strebenversagen für keinen Knoten geführt werden muss.

Spaltmaß
 $< 0,79 \rightarrow$ Bedingung (1) ist erfüllt.

$< 1,0 \rightarrow$ Bedingung (2) ist erfüllt.

\rightarrow Der Nachweis gegen Strebenversagen kann entfallen.

e) Knotentragfähigkeit bei Schubversagen des Gurtstabes

$$N_{i,Rd} = V_{pl,Rd} / \sin \theta_i$$

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})} \right] / \gamma_{M5}$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot f_{y0} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5})$$

$$V_{Ed} = \max(|N_{i,Ed}| \cdot \sin \theta_i)$$

$$A_v = A_0 - (2 - \alpha) \cdot b_0 \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$$

$$\alpha = \sqrt{1 / [1 + 4 \cdot g^2 / (3 \cdot t_f^2)]}$$

(a) DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.21 und
 (b) DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.24

Tragfähigkeit der Diagonale i nach (a)
 Längskrafttragfähigkeit des Gurtstabes nach (a)

Schubtragfähigkeit des Gurtstabes (b)
 einwirkende Querkraft nach (b)

Schubfläche des Gurtstabes nach (a)
 Parameter zur Vergrößerung der Schubfläche A_v in Abhängigkeit vom Spaltmaß g nach (a)

| Parameter | | Knoten | | | | |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| α | | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,11 |
| A_v | [cm ²] | 38,1 | 37,4 | 37,5 | 37,7 | 37,7 |
| $V_{pl,Rd}$ | [kN] | 780,4 | 766,9 | 768,7 | 772,7 | 772,1 |
| θ_1 | [°] | | 36,2 | 39,8 | 43,1 | 45,9 |
| $N_{1,Rd}$ | [kN] | | 1297,0 | 1199,7 | 1131,7 | 1074,3 |
| θ_2 | [°] | 41,1 | 42,6 | 46,2 | 49,4 | |
| $N_{2,Rd}$ | [kN] | 1188,3 | 1132,8 | 1064,9 | 1017,4 | |
| V_{Ed} | [kN] | 379,8 | 328,7 | 196,0 | 78,7 | 26,3 |
| $N_{0,Rd}$ | [kN] | 3592,2 | 3634,8 | 3719,0 | 3756,0 | 3762,2 |

f) Tragfähigkeitsnachweise für die Stäbe

$$N_{i,Ed}/N_{i,Rd} \leq 1$$

DIN EN 1993-1-8, Glg. (7.5)

| Knoten | Stab | | LK 1 $ N_{i,Ed} $ [kN] | TFS $N_{i,Rd}$ [kN] | TSV $N_{i,Rd}$ [kN] | $\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} \leq 1$ |
|--------|-------|------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| | Index | Name | | | | |
| 1 | 0 | O1 | 457,3 | | 3592,2 | 0,13 < 1 |
| | 2 | D1 | 578,3 | 1850,0 | 1188,3 | 0,49 < 1 |
| 2 | 0 | O2 | 1145,5 | | 3634,8 | 0,32 < 1 |
| | 1 | D2 | 555,9 | 2156,2 | 1297,0 | 0,43 < 1 |
| 2 | 2 | D3 | 333,4 | 1693,5 | 1132,8 | 0,29 < 1 |
| | 0 | O3 | 1462,2 | | 3719,0 | 0,39 < 1 |
| 3 | 1 | D4 | 305,9 | 1831,0 | 1199,7 | 0,25 < 1 |
| | 2 | D5 | 126,4 | 1411,4 | 1064,9 | 0,12 < 1 |
| 4 | 0 | O4 | 1518,7 | | 3756,0 | 0,40 < 1 |
| | 1 | D6 | 115,3 | 1520,8 | 1131,7 | 0,10 < 1 |
| 4 | 2 | D7 | 34,2 | 1318,7 | 1017,4 | 0,03 < 1 |
| | 0 | O4 | 1518,7 | | 3762,1 | 0,40 < 1 |
| 5 | 1 | D8 | 36,6 | 1419,6 | 1017,4 | 0,04 < 1 |

LK 1 = Lastkombination 1
 TFS = Tragfähigkeiten bei Fließen des Steges des Gurtstabes
 TSV = Tragfähigkeiten bei Schubversagen des Gurtstabes

→ Die Tragfähigkeitsnachweise für die Stäbe sind erfüllt.

g) Tragfähigkeitsnachweis der Schweißnähte zwischen Gurt und Streben

Die Füllstäbe (Streben) werden durch umlaufende Kehlnähte, die wegen der vorhandenen Spaltbreiten g problemlos ausführbar sind, an den Obergurt angeschlossen.

Der Tragfähigkeitsnachweis wird mit dem vereinfachten Verfahren nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3 geführt.

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \rightarrow F_{w,Ed}/F_{w,Rd} \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

$$F_{w,Ed} = N_{Ed}/l_{eff}$$

einwirkende Kraft je Längeneinheit

$$l_{\text{eff}} = \begin{cases} \theta_i \leq 50^\circ: & 2 \cdot h_i / \sin \theta_i + 2 \cdot b_i & (1) \\ 50^\circ \leq \theta_i \leq 60^\circ: & \text{lineare Interpolation zwischen (1) und (3)} & (2) \\ \theta_i \geq 60^\circ: & 2 \cdot h_i / \sin \theta_i + b_i & (3) \end{cases}$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 251,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_w = 0,9$$

$$a \geq a_{\text{min}} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,6 \text{ mm} = \sqrt{17} - 0,5 = \sqrt{t_{\text{max}}} - 0,5 = \sqrt{t_f} - 0,5 \\ 5 \text{ mm} \wedge t \geq 30 \text{ mm} \end{cases}$$

wirksame Nahtlänge der Kehlnaht gemäß [42] Glg. (2.6) und (2.7)

Tragfähigkeit der Kehlnaht je Längeneinheit, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

Scherfestigkeit der Kehlnaht, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

f_u ist die minimale Zugfestigkeit der verbindenden Bauteile (hier: Obergurt).
DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Grenzwerte für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2, alle Abmessungen in mm einsetzen!

| K | SI | SN | a [mm] | l_{eff} [mm] | $F_{w,Ed}$ [N/mm] | $F_{w,Rd}$ [N/mm] | $\frac{F_{w,Ed}}{F_{w,Rd}}$ |
|---|----|----|-----------|--------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | 2 | D1 | 5 | 504,5 | 1146,1 | 1257,3 | 0,91 < 1 |
| 2 | 1 | D2 | 5 | 538,2 | 1032,7 | 1257,3 | 0,82 < 1 |
| | 2 | D3 | 4 | 445,9 | 747,7 | 1005,9 | 0,74 < 1 |
| 3 | 1 | D4 | 4 | 460,9 | 663,6 | 1005,9 | 0,66 < 1 |
| | 2 | D5 | 4 | 334,0 | 378,5 | 1005,9 | 0,38 < 1 |
| 4 | 1 | D6 | 4 | 345,0 | 334,2 | 1005,9 | 0,33 < 1 |
| | 2 | D7 | 4 | 324,3 | 105,4 | 1005,9 | 0,10 < 1 |
| 5 | 1 | D8 | 4 | 334,8 | 109,2 | 1005,9 | 0,11 < 1 |

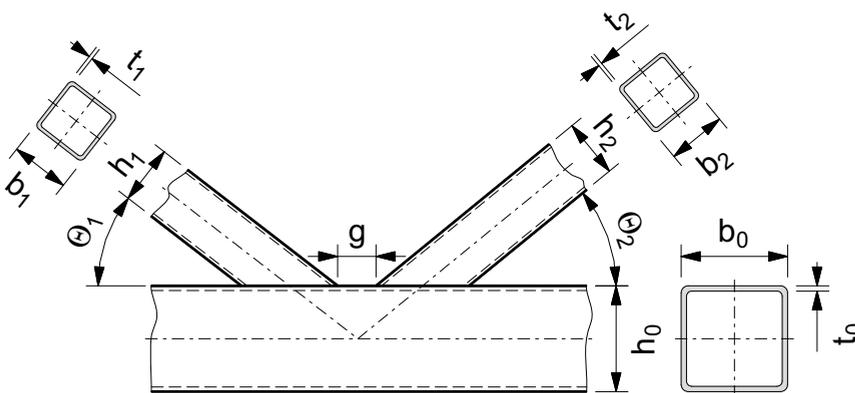
K = Nummer des Knotens

SI = Index des Füllstabs (Strebe)

SN = Name des Füllstabs (Strebe)

→ Die Tragfähigkeitsnachweise für die Schweißnähte sind erfüllt.

3.5.3 Untergurtnoten



Das Spaltmaß g ist für alle Untergurtnoten wie folgt zu berechnen:

$$g = \frac{h_0 \cdot \cos \theta_1 - h_1}{2 \cdot \sin \theta_1} + \frac{h_0 \cdot \cos \theta_2 - h_2}{2 \cdot \sin \theta_2}$$

Für die zu führenden Nachweise werden der Gurt mit dem Index $i = 0$ und die Diagonalen mit dem Index $i = 1$ oder 2 identifiziert.

Die Schwerachsen der Diagonalen und des Untergurtes schneiden sich in jedem Knoten in genau einem Punkt, d.h. es sind keine Knotenexzentrizitäten vorhanden.

a) Überprüfung des Gültigkeitsbereiches für die Füllstäbe

| Knoten | 6 | 7 | 8 | 9 | Limit |
|---------------------------------|--|-------|-------|-------|--------------------------|
| $\beta^a)$ | 0,56 | 0,50 | 0,39 | 0,39 | $\leq 1,0$ |
| g [mm] | 65,01 | 69,08 | 82,85 | 69,31 | |
| $g/(t_1 + t_2)$ | 5,42 | 8,64 | 10,36 | 8,66 | $\geq 1,0$ |
| $\frac{g/b_0}{0,5(1-\beta)}$ | 1,63 | 1,54 | 1,51 | 1,26 | $\geq 1,0$ |
| $\frac{g/b_0}{1,5(1-\beta)}$ | 0,54 | 0,51 | 0,50 | 0,42 | $\leq 1,0$ |
| $b_1/b_0^b)$ | 0,56 | 0,50 | 0,39 | 0,39 | $\geq 0,35$ |
| h_1/t_1 | 16,67 | 22,50 | 17,50 | 17,50 | ≤ 35 |
| $\frac{h_1}{b_1}$ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | $\geq 0,5$ $\leq 2,0$ |
| θ_1 | 37,87 | 39,43 | 43,03 | 46,25 | $\geq 30^\circ$ |
| $b_2/b_0^b)$ | 0,56 | 0,50 | 0,39 | 0,39 | $\geq 0,35$ |
| h_2/t_2 | 16,67 | 22,50 | 17,50 | 17,50 | ≤ 35 |
| $\frac{h_2}{b_2}$ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | $\geq 0,5$ $\leq 2,0$ |
| θ_2 | 39,43 | 43,03 | 46,25 | 49,13 | $\geq 30^\circ$ |
| $\frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_1}$ | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | $\geq 0,6$ $\leq 1,3$ |
| Klasse | Klasse aller Füllstabprofile = 1 (Abschnitt 3.2.2) | | | | < 3 |

$$^a) \beta = 0,5 \cdot (b_1 + b_2)/b_0$$

$$^b) 0,35 > 0,1 + 0,01 \cdot b_0/t_0 = 0,1 + 0,01 \cdot 180/8 = 0,325$$

→ Alle Parameter der Füllstäbe liegen im Gültigkeitsbereich.

b) Überprüfung des Gültigkeitsbereiches für den Untergurt

$$0,5 \leq h_0/b_0 = 180/180 = 1,0 \leq 2,0$$

$$b_0/t_0 = 180/8 = 22,5 \geq 15$$

Die Abmessungen aller Untergurtnoten liegen im Gültigkeitsbereich von Tabelle 7.8 und die zusätzlichen Bedingungen nach Tabelle 7.9 sind erfüllt. Damit braucht nur das Flanschversagen des Gurtstabes betrachtet zu werden. Strebenversagen ist für K-Knoten mit Spalt nicht relevant.

c) Nachweis der Knoten Tragfähigkeit für Flanschversagen des Gurtstabs

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} \wedge i = \{1|2\} \rightarrow N_{i,Ed}/N_{i,Rd} \leq 1,0$$

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 \cdot \gamma^{0,5} \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_i} \cdot \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_0} / \gamma_{M5}$$

Anschlussstyp „K-Spalt“ entsprechend
DIN EN 1993-1-8, Bild 7.1

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.10

Spaltmaß

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.1.2 (3)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.1.2 (3)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.9

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.5 (6)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.8

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.9

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.5.2.1 (2)

DIN EN 1993-1-8, Absatz 7.5.2.1 (1)

Tragfähigkeit der Diagonale i, DIN EN
1993-1-8, Tabelle 7.10

$$\gamma = b_0 / (2 \cdot t_0) = 180 / (2 \cdot 8) = 11,25$$

$$n = \gamma_{M5} \cdot \sigma_{0,Ed} / f_{y0}$$

$$k_n = \begin{cases} n > 0: & 1,3 - 0,4 \cdot n / \beta \leq 1,0 & \text{(Druck)} \\ n \leq 0: & 1,0 & \text{(Zug)} \end{cases}$$

DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.5 (6)

Ausnutzungsgrad des Gurtstabes, DIN EN 1993-1-8, Absatz 1.5 (5)

Faktor zur Erfassung des Einflusses der Normalspannung im Gurt, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 7.10

| Knoten | Diagonale | | N _{i,Ed} [kN] | N _{i,Rd} [kN] | N _{i,Ed} / N _{i,Rd} ≤ 1 |
|--------|-----------|------|-----------------------------|---------------------------|---|
| | Index | Name | | | |
| 6 | 1 | D1 | 578,2 | 613,7 | 0,94 < 1 |
| | 2 | D2 | 555,9 | 593,3 | 0,94 < 1 |
| 7 | 1 | D3 | 333,4 | 533,9 | 0,62 < 1 |
| | 2 | D4 | 305,9 | 497,0 | 0,62 < 1 |
| 8 | 1 | D5 | 126,4 | 386,6 | 0,33 < 1 |
| | 2 | D6 | 115,3 | 365,2 | 0,32 < 1 |
| 9 | 1 | D7 | 34,2 | 365,2 | 0,09 < 1 |
| | 2 | D8 | 36,6 | 348,8 | 0,10 < 1 |

→ Die Tragfähigkeitsnachweise für die Stäbe sind erfüllt.

d) Tragfähigkeitsnachweis der Schweißnähte zwischen Gurt und Streben

Die Füllstäbe (Streben) werden durch umlaufende Kehlnähte, die wegen der vorhandenen Spaltbreiten *g* problemlos ausführbar sind, an den Untergurt angeschlossen.

Der Tragfähigkeitsnachweis wird wie für die Obergurtnoten geführt (vgl. Abschnitt 3.5.2 g)). Nachfolgend sind nur die Ergebnisse (Tabelle) angegeben.

$$a \geq a_{\min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 2,3 \text{ mm} = \sqrt{8} - 0,5 = \sqrt{t_0} - 0,5 \end{cases}$$

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2$$

Grenzwert für die Kehlnahtdicke *a*

*t*₀ ist die Wandstärke des Untergurtes.

Zugfestigkeit, siehe Abschnitt 1.3

| K | SI | SN | <i>a</i> [mm] | <i>l</i> _{eff} [mm] | <i>F</i> _{w,Ed} [N/mm] | <i>F</i> _{w,Rd} [N/mm] | F _{w,Ed} / F _{w,Rd} |
|---|----|----|------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 6 | 1 | D1 | 5 | 525,8 | 1099,9 | 1308,7 | 0,84 < 1 |
| | 2 | D2 | 5 | 514,9 | 1079,6 | 1308,7 | 0,82 < 1 |
| 7 | 1 | D3 | 3 | 463,4 | 719,4 | 785,2 | 0,92 < 1 |
| | 2 | D4 | 3 | 443,8 | 689,2 | 785,2 | 0,88 < 1 |
| 8 | 1 | D5 | 3 | 345,2 | 366,1 | 785,2 | 0,47 < 1 |
| | 2 | D6 | 3 | 333,8 | 345,4 | 785,2 | 0,44 < 1 |
| 9 | 1 | D7 | 3 | 333,8 | 102,4 | 785,2 | 0,13 < 1 |
| | 2 | D8 | 3 | 325,1 | 112,5 | 785,2 | 0,14 < 1 |

K = Nummer des Knotens

SI = Index des Füllstabs (Strebe)

SN = Name des Füllstabs (Strebe)

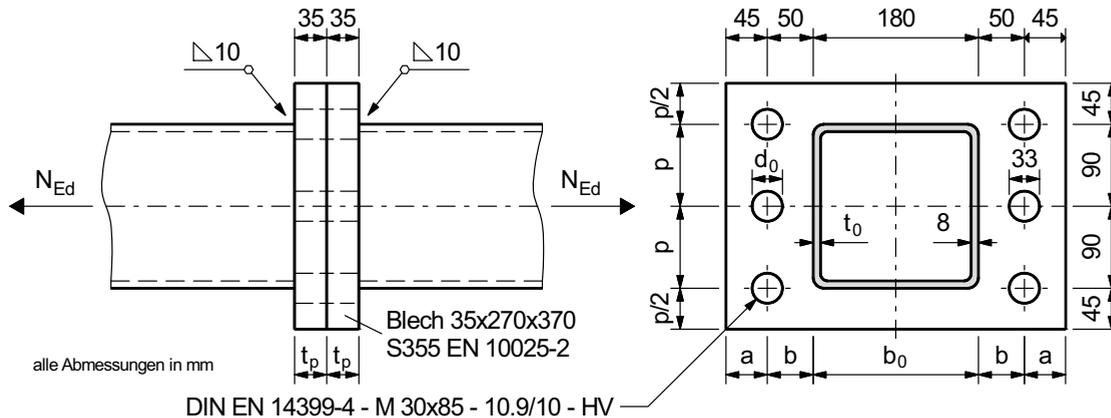
→ Die Tragfähigkeitsnachweise für die Schweißnähte sind erfüllt.

3.5.4 Montagestoß im Untergurt

Aus Transportgründen werden die Dachbinder in zwei Teilen gefertigt, die auf der Baustelle durch geschraubte Montagestöße in der Achse \ominus zusammengefügt werden.

Der Obergurtstoß wird mit Ausnahme des Verbandsfeldes nur auf Druck beansprucht und in diesem Beispiel nicht betrachtet.

Für den Nachweis des Obergurtstoßes im Verbandsfeld siehe Beispiel 1.5.



Für den Tragfähigkeitsnachweis der geschraubten Stirnplattenverbindung im Montagestoß des Untergurtes wird das in [42] CIDECT, Abschnitt 5.1.1 angegebene Berechnungsverfahren angewendet.

a) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

$$\begin{aligned}
 d &= 30 \text{ mm} \\
 d_0 &= d + 3 \text{ mm} = 30 + 3 = 33 \text{ mm} \\
 e_2 &\geq 1,2 \cdot d_0 = 39,6 \text{ mm} < \begin{cases} 45 \text{ mm} = a \\ 45 \text{ mm} = p/2 \end{cases} \\
 p_2 &\geq 2,4 \cdot d_0 = 79,2 \text{ mm} < 90 \text{ mm} = p
 \end{aligned}$$

b) Kontrolle der Stirnplattendicke

$$\begin{aligned}
 N_{0,Ed} &= 1491,5 \text{ kN} \\
 n &= 6 \\
 P_f &= N_{0,Ed}/n = 1491,5/6 = 248,6 \text{ kN} \\
 b' &= b - d/2 + t_0 = 50 - 30/2 + 8 = 43 \text{ mm} \\
 \delta &= 1 - \frac{d_0}{p} = 1 - \frac{33}{90} = 0,633 \\
 f_{yp} &= 355 \text{ N/mm}^2 \\
 f_{up} &= 490 \text{ N/mm}^2 \\
 K &= 4 \cdot b' / (0,9 \cdot f_{yp} \cdot p) \\
 &= 4 \cdot 43 \cdot 10^{-3} / (0,9 \cdot 0,355 \cdot 90) = 5,98 \text{ mm}^2/\text{kN}
 \end{aligned}$$

Das Verfahren aus DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 6.2 gilt für biegebeanspruchte Verbindungen von I- und H-Profilen und ist hier nicht anwendbar!

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

Schaftdurchmesser der Schrauben

gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

Der minimale Randabstand $e_2 \perp$ zur Krafrichtung ist eingehalten.

Der minimale Lochabstand $p_2 \perp$ zur Krafrichtung ist eingehalten.

Abmessungen entsprechend Skizze

Zugkraft im Untergurt (Stab U4, LK 1) entsprechend Abschnitt 2.2

Anzahl der Schrauben im Anschluss

Zugkraft, die auf eine Schraube entfällt

Abstand der Fließlinien zu den Schraubenreihe, [42] Glg. (5.1)

Verhältnis der Netto- zur Bruttoquerschnittsfläche der Stirnplatte in den Schraubenreihen, [42] Tabelle 11

Streckgrenze und Zugfestigkeit der Stirnplatte, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

inverser Steifigkeitskoeffizient, [42] Tabelle 11

$$t_{\max} = \sqrt{K \cdot P_f} = \sqrt{5,98 \cdot 248,6} = 38,6 \text{ mm} > t_p = 35 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = t_{\max} / \sqrt{1 + \delta} = 38,6 / \sqrt{1 + 0,633} = 30,2 \text{ mm} < t_p = 35 \text{ mm}$$

→ Die gewählte Stirnplattendicke liegt im zulässigen Bereich.

c) Tragfähigkeit $F_{t,Rd}$ einer Schraube für Zugbeanspruchung

$$A_s = 5,61 \text{ cm}^2$$

$$F_{t,Rd} = k_2 \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma_{M2} = 0,9 \cdot 5,61 \cdot 100 / 1,25 = 403,6 \text{ kN}$$

$$s = 50 \text{ mm}$$

$$e = 55,37 \text{ mm}$$

$$d_m = (s + e) / 2 = (50 + 55,37) / 2 = 52,7 \text{ mm}$$

$$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot t_p \cdot d_m \cdot f_{up} / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot 52,7 \cdot 49 / 1,25 = 1363 \text{ kN}$$

$> 403,6 \text{ kN} \rightarrow$ Die Durchstanztragfähigkeit ist nicht maßgebend!

d) Nachweis der Tragfähigkeit für die Stirnplatte

$$a_{\text{eff}} = \min \left(\frac{a}{1,25 \cdot b} \right) = \min \left(\frac{45}{1,25 \cdot 50} \right) = \min \left(\frac{45}{62,5} \right) = 45 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{K \cdot F_{t,Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{a_{\text{eff}} + d/2}{\delta \cdot (a_{\text{eff}} + b + t_0)} \geq 0$$

$$= \left(\frac{5,98 \cdot 403,6}{35^2} - 1 \right) \cdot \frac{45 + 30/2}{0,633 \cdot (45 + 50 + 8)} = 0,89 > 0$$

$$N_{0,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot (1 + \delta \cdot \alpha_1) \cdot n}{K \cdot \gamma_{M2}} = \frac{35^2 \cdot (1 + 0,633 \cdot 0,89) \cdot 6}{5,98 \cdot 1,25} = 1537,2 \text{ kN}$$

$N_{0,Ed} / N_{0,Rd} = 1491,5 / 1537,2 = 0,97 < 1 \rightarrow$ Nachweis erfüllt

e) Nachweis der Tragfähigkeit für die Schrauben

$$a' = a_{\text{eff}} + d/2 = 45 + 30/2 = 60 \text{ mm}$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{K \cdot F_{t,Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\delta} = \left(\frac{5,98 \cdot 403,6}{35^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0,633} = 1,53$$

$$F_{t,Ed} = P_f \cdot \left(1 + \frac{b'}{a'} \cdot \frac{\delta \cdot \alpha_2}{1 + \delta \cdot \alpha_2} \right)$$

$$= 248,6 \cdot \left(1 + \frac{43}{60} \cdot \frac{0,633 \cdot 1,53}{1 + 0,633 \cdot 1,53} \right) = 336 \text{ kN}$$

$F_{t,Ed} / F_{t,Rd} = 336,3 / 403,6 = 0,83 < 1 \rightarrow$ Nachweis erfüllt

oberer und unterer Grenzwert für die Stirnplattendicke, [42] Glg. (5.3)

Schrauben M 30 10.9 HV nach DIN EN 14399-4

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Schlüsselweite und Eckenmaß gemäß DIN EN 14399-4, Tabelle 2

DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 1.5 (1)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

wirksamer Kantenabstand, [42] Tabelle 11

[42] Glg. (5.5)

Beanspruchbarkeit der Stirnplatte unter Biegebeanspruchung, [42] Glg. (5.6)

[42] Tabelle 11

[42] Glg. (5.8)

Beanspruchung einer Schraube inklusive der Abstützkraft, [42] Glg. (5.7)

f) Kontrolle der Schweißnahtdicke

Die Gurtstäbe werden durch umlaufende Kehlnähte ($a = 10 \text{ mm}$) an die Stirnplatten angeschlossen. Um die volle Tragfähigkeit der Verbindung ausnutzen zu können, sind die Schweißnähte für die plastische Tragfähigkeit des Gurtquerschnitts auszulegen.

Die Kontrolle der Schweißnahtdicke erfolgt auf der Grundlage des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.2.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \tag{1}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \tag{2}$$

Die Beanspruchung der Kehlnaht durch die Grenzkraft $F_{Rd} \perp$ zur Längsachse und parallel zur Nahtflanke erzeugt folgende Spannungen:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \sin 45^\circ = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{3}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \cos 45^\circ = \frac{F_{Rd}}{a} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{4}$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

Die Grenzkraft ergibt sich durch Einsetzen von Glg. (3) und (4) in Glg. (1) bzw. (2):

$$F_{Rd}^{(1)} = f_u \cdot a / (\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}) \tag{5}$$

$$F_{Rd}^{(2)} = 1,8 \cdot f_u \cdot a / (\sqrt{2} \cdot \gamma_{M2}) \tag{6}$$

Die Grenzkraft $F_{Rd}^{(2)}$ würde nur maßgebend werden für einen Korrelationsbeiwert $\beta_w \leq 0,56$, der aber für die üblichen Stahlsorten nicht relevant ist!

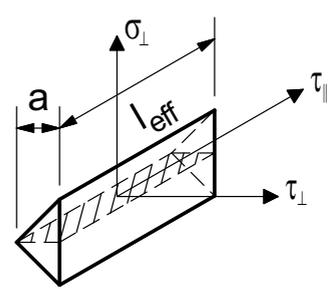
Die erforderliche Nahtdicke folgt aus der Gleichsetzung von Grenzkraft und längenbezogener plastischer Querschnittstragfähigkeit des Gurtes:

$$F_{Rd} = F_{Rd}^{(1)} = \frac{f_y \cdot t_0}{\gamma_{M0}} \rightarrow a_{req} = t_0 \cdot \frac{f_{yp}}{f_{up}} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}}{\gamma_{M0}}$$

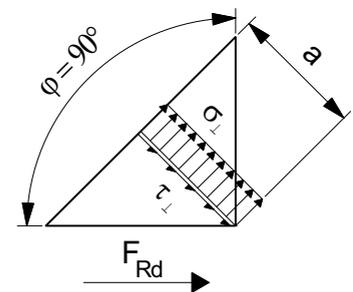
Die Kontrolle ergibt, dass die Nahtdicke $a = 10 \text{ mm}$ ausreichend ist:

$$a = 10 \text{ mm} > 9,2 \text{ mm} = 8 \cdot \frac{355}{490} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 0,9 \cdot 1,25}{1,0} = a_{req}$$

$$a = 10 \text{ mm} > a_{min} = \begin{cases} 5 \text{ mm} \\ 5,4 \text{ mm} = \sqrt{35} - 0,5 = \sqrt{t_p} - 0,5 \end{cases}$$



einzuhaltende Bedingungen für den Nachweis der Tragfähigkeit einer Kehlnaht bei Anwendung des richtungsbezogenen Verfahrens, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.1)



Grenzkraft aus Einsetzen in Glg. (1)

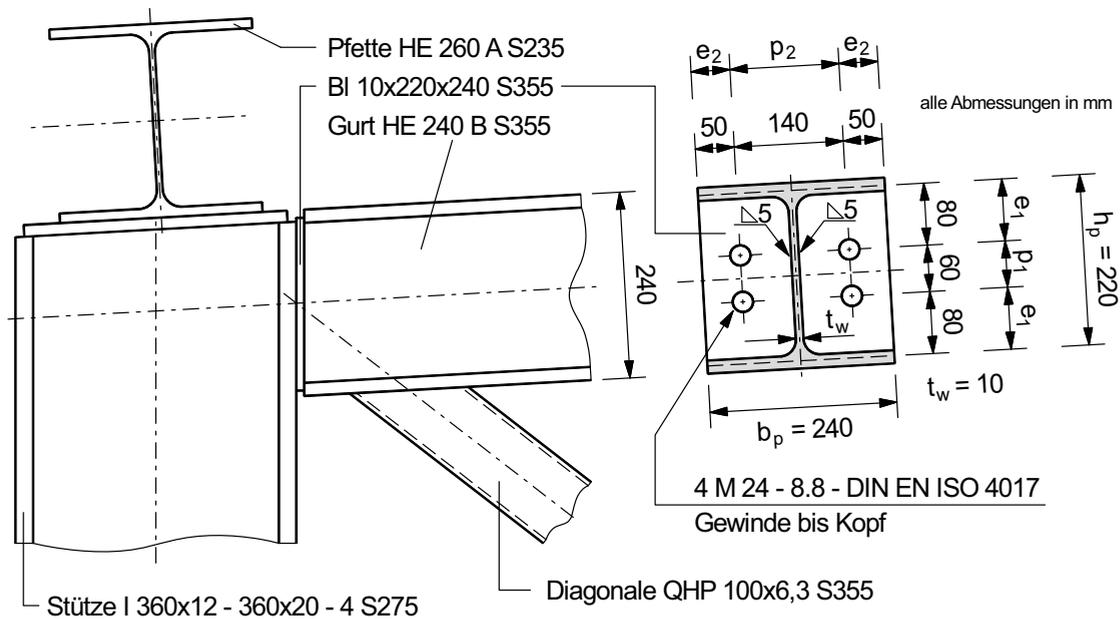
Grenzkraft aus Einsetzen in Glg. (2)

Die Korrelationsbeiwerte sind in DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1 angegeben.

f_{yp} und f_{up} sind die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der Stirnplatte. β_w ist hier der Korrelationsbeiwert wie in Abschnitt 3.5.2 angegeben.

Die Anforderung an die Mindestnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2 ist eingehalten.

3.5.5 Anschluss des Dachbinders an die Längswandstützen



Für den Tragfähigkeitsnachweis des gelenkigen, querkraftbeanspruchten Stirnplattenanschlusses des Dachbinderobergurtes an die Längswandstützen in Achse Ⓐ bzw. ① wird das in [51] *Núñez* angegebene Berechnungsverfahren angewendet, das auf den in DIN EN 1993-1-8 dargestellten Regeln zur Bestimmung der Tragfähigkeiten einzelner Komponenten einer Verbindung basiert.

Das Verfahren aus DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 6.2 gilt nicht für gelenkige Stirnplattenverbindungen von I- und H-Profilen und ist hier nicht anwendbar!

a) Ermittlung der Beanspruchung V_{Ed} für die Verbindung

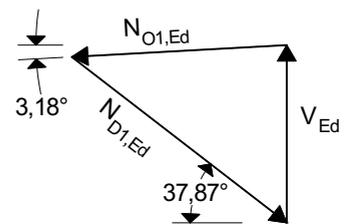
Die Verwendung der in Abschnitt 2.1 ermittelten Auflagerkräfte des Binders würde eine zu hohe Beanspruchung ergeben, weil die Traufpfetten direkt auf den Längswandstützen aufliegen und ihre Auflagerkräfte nicht durch die Stirnplattenverbindung übertragen werden.

Die Beanspruchung V_{Ed} wird deshalb aus den Stabkräften des Obergurtes und der ersten Diagonale neben dem Auflager bestimmt.

$$N_{O1,Ed} = -457,3 \text{ kN}$$

$$N_{D1,Ed} = +578,3 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 457,3 \cdot \sin 3,18^\circ + 578,3 \cdot \sin 37,87^\circ = 385,9 \text{ kN}$$



Normalkräfte der Stäbe O1 und D1 für Lastkombination 1, siehe Abschnitt 2.2
 Winkel für Stab O1: Abschnitt 1.1
 Winkel für Stab D1: Abschnitt 3.5.1

b) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

Maßgebend für die Kontrolle der Abstände ist die Stirnplatte.

$$d = 24 \text{ mm}$$

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = 24 + 2 = 26 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

vgl. Skizze oben

Nenndurchmesser der Schrauben (d) und Lochdurchmesser (d_0) gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

$$t_p = 10 \text{ mm}$$

$$e_1 = 80 \text{ mm} > 31,2 \text{ mm} = 1,2 \cdot 26 = 1,2 \cdot d_0$$

$$e_2 = 50 \text{ mm} > 31,2 \text{ mm} = 1,2 \cdot 26 = 1,2 \cdot d_0$$

$$p_1 = 60 \text{ mm} \begin{cases} > 57,2 \text{ mm} = 2,2 \cdot 26 = 2,2 \cdot d_0 \\ < 140 \text{ mm} = \min(14 \cdot 10 | 200) = \min(14 \cdot t_p | 200 \text{ mm}) \end{cases}$$

$$p_2 = 140 \text{ mm} \begin{cases} > 62,4 \text{ mm} = 2,4 \cdot 26 = 2,4 \cdot d_0 \\ = 140 \text{ mm} = \min(14 \cdot 10 | 200) = \min(14 \cdot t_p | 200 \text{ mm}) \end{cases}$$

→ Die Rand- und Lochabstände für die Schrauben sind eingehalten.

c) Grenzabscherkraft der Schraubengruppe, $V_{Rd,1}$

$$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$$

$$\alpha_v = 0,6$$

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 3,53 \cdot 80}{1,25} = 135,6 \text{ kN}$$

$$n_1 = 2$$

$$n_2 = 2$$

$$V_{Rd,1} = 0,8 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot F_{v,Rd} = 0,8 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 135,6 = 433,9 \text{ kN}$$

d) Lochleibungstragfähigkeit der Stirnplatte, $V_{Rd,2}$

$$f_{yp} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{up} = 490 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_d = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}, \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \right) = \min \left(\frac{80}{3 \cdot 26}, \frac{60}{3 \cdot 26} - 0,25 \right) = \min \left(1,03, 0,52 \right) = 0,52$$

$$k_1 = \min \left(\frac{2,8 \cdot e_2/d_0 - 1,7}{2,5}, \frac{2,8 \cdot 50/26 - 1,7}{2,5} \right) = \min \left(2,5, 2,5 \right) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min(f_{ub}/f_u | \alpha_d | 1,0) = \min(800/490 | 0,52 | 1,0) = 0,52$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{up} \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,52 \cdot 49 \cdot 2,4 \cdot 1,0}{1,25} = 122,3 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,2} = n_1 \cdot n_2 \cdot F_{b,Rd} = 2 \cdot 2 \cdot 122,3 = 489,2 \text{ kN}$$

e) Lochleibungstragfähigkeit des Stützenflansches, $V_{Rd,3}$

Die Lochleibungstragfähigkeit des Flansches der aus Baustahl S275 bestehenden geschweißten Längswandstützen ist für die Tragfähigkeit des Anschlusses nicht maßgebend, wird hier aber der Vollständigkeit halber ermittelt.

Dicke der Stirnplatte, siehe Skizze

Randabstand \parallel zur Krafrichtung

Randabstand \perp zur Krafrichtung

Lochabstand \parallel zur Krafrichtung

Lochabstand \perp zur Krafrichtung

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Zugfestigkeit, siehe Abschnitt 1.3

Grenzabscherkraft einer Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Das Gewinde liegt in der Scherfuge!

Anzahl horizontaler Schraubenreihen

Anzahl vertikaler Schraubenreihen

[51], Abschnitt 3

Streckgrenze und Zugfestigkeit der Stirnplatte (S355 DIN EN 10025-2), DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände in Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

maßgebend ist der Lochabstand p_1 !

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände senkrecht zur Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Grenzlochleibungskraft für eine Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Absatz 3.7.1 (1) und [51] Abschnitt 4

Die Längswandstützen sind Gegenstand von Beispiel 1.7.

$$\begin{aligned}
 b_p &= 240 \text{ mm} \\
 t_{fc} &= 20 \text{ mm} \\
 b_c &= 360 \text{ mm} > 240 \text{ mm} = b_p \\
 f_{uc} &= 430 \text{ N/mm}^2 \\
 V_{Rd,3} &= V_{Rd,2} \cdot \frac{t_{fc} \cdot f_{uc}}{t_p \cdot f_{up}} = 489,2 \cdot \frac{20 \cdot 430}{10 \cdot 490} = 858,6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

f) Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Bruttoquerschnitt), $V_{Rd,4}$

$$\begin{aligned}
 h_p &= 220 \text{ mm} \\
 V_{Rd,4} &= 2 \cdot \frac{h_p \cdot t_p \cdot f_{yp}}{1,27 \cdot \sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 2 \cdot \frac{22,0 \cdot 1,0 \cdot 35,5}{1,27 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,0} = 710,1 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

g) Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Nettoquerschnitt), $V_{Rd,5}$

$$\begin{aligned}
 A_{v,net} &= t_p \cdot (h_p - n_1 \cdot d_0) = 1,0 \cdot (22,0 - 2 \cdot 2,6) = 16,8 \text{ cm}^2 \\
 V_{Rd,5} &= 2 \cdot \frac{A_{v,net} \cdot f_{up}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2}} = 2 \cdot \frac{16,8 \cdot 49}{\sqrt{3} \cdot 1,25} = 760,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

h) Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Blockversagen), $V_{Rd,6}$

Das Blockversagen einer Schraubengruppe besteht aus einer Kombination von Schubversagen eines Blechs (in diesem Fall der Stirnplatte) entlang der schubbeanspruchten Schraubenreihen und dem Zugversagen des Blechs entlang der zugbeanspruchten Schraubenreihe am Kopf der Schraubengruppe.

$$V_{Rd,6} = \begin{cases} V_{eff,2,Rd} & \text{wenn } \frac{h_p}{p_2} < 1,36 \text{ und } n_1 > 1 \\ V_{eff,1,Rd} & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\frac{h_p}{p_2} = \frac{220}{140} = 1,57 > 1,36 \rightarrow V_{Rd,6} = V_{eff,1,Rd} = 704,1 \text{ kN}$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_{up} \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_{yp}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}} = \frac{49 \cdot 7,4}{1,25} + \frac{35,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{20,2}{1,0} = 704,1 \text{ kN}$$

$$A_{nt} = l_{nt} \cdot t_p = 7,4 \cdot 1,0 = 7,4 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = l_{nv} \cdot t_p = 20,2 \cdot 1,0 = 20,2 \text{ cm}^2$$

$$l_{nt} = \min \left(\frac{2 \cdot e_2 - d_0}{p_2 - d_0} \right) = \min \left(\frac{2 \cdot 50 - 26}{140 - 26} \right) = \min \left(\frac{74}{114} \right) = 74 \text{ mm}$$

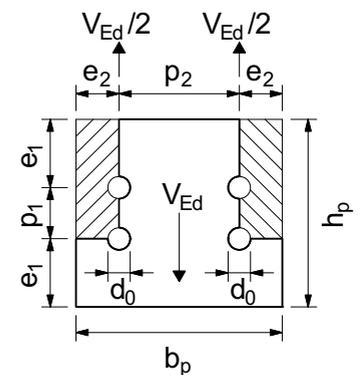
$$\begin{aligned}
 l_{nv} &= 2 \cdot [h_p - e_1 - d_0 \cdot (n_1 - 1/2)] \\
 &= 2 \cdot [220 - 80 - 26 \cdot (2 - 1/2)] = 202 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Breite der Stirnplatte, siehe Skizze
 Flanschdicke der Längswandstütze
 Flanschbreite der Längswandstütze
 Zugfestigkeit für Baustahl S275, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

Höhe der Stirnplatte, siehe Skizze
 [51] Abschnitt 6

Nettofläche der Stirnplatte entlang der vertikalen Schraubenreihen
 [51] Abschnitt 7

[51] Abschnitt 8



Widerstand gegen Blockversagen einer symmetrischen Schraubengruppe unter zentrischer Belastung, DIN EN 1993-1-8, Glg. (3.9)

zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche der Stirnplatte

schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche der Stirnplatte

Länge der zugbeanspruchten Nettoquerschnittsfläche der Stirnplatte

Länge der schubbeanspruchten Nettoquerschnittsfläche der Stirnplatte

i) Momentenbeanspruchbarkeit (Biegung in der Stirnplattenebene), $V_{Rd,7}$

Die Momentenbeanspruchbarkeit für Biegung in der Stirnplattenebene kann erst maßgebend werden, wenn $h_p < 1,36 \cdot p_2$ ist. Die Berechnung wird hier nur zur Information dargestellt.

$$\begin{aligned} t_w &= 10 \text{ mm} \\ W_{el} &= h_p^2 \cdot t_p / 6 = 22,0^2 \cdot 1,0 / 6 = 80,67 \text{ cm}^3 \\ V_{Rd,7} &= 2 \cdot \frac{W_{el}}{\frac{p_2 - t_w}{2}} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 2 \cdot \frac{80,67}{\frac{14,0 - 1,0}{2}} \cdot \frac{35,5}{1,0} = 881,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

[51] Abschnitt 9

Stegdicke des Obergurtprofils

Widerstandsmoment der Stirnplatte

[51] Abschnitt 9

j) Querkrafttragfähigkeit des Obergurtprofils, $V_{Rd,8}$

Die Querkrafttragfähigkeit des Obergurtprofils wird hier nach DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.2.6 berechnet.

$$\begin{aligned} A_0 &= 106 \text{ cm}^2 \\ b_0 &= 240 \text{ mm} \\ t_f &= 17 \text{ mm} \\ r &= 21 \text{ mm} \\ A_v &= A_0 - 2 \cdot b_0 \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \\ &= 106 - 2 \cdot 24 \cdot 1,7 + (1,0 + 2 \cdot 2,1) \cdot 1,7 = 33,2 \text{ cm}^2 \\ V_{Rd,8} &= A_v \cdot f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}) = 33,2 \cdot 35,5 / (\sqrt{3} \cdot 1,0) = 680,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dem Tragfähigkeit nach [51] Abschnitt 10 liegt noch die nichtkonsolidierte Fassung von EN 1993-1-1 zu Grunde!

Fläche des Obergurtprofils

Flanschbreite des Obergurtprofils

Flanschdicke des Obergurtprofils

Ausrundungsradius

Schubfläche des Obergurtprofils, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.6 (3) a)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.18)

k) Tragfähigkeit der Kehlnähte zwischen Gurtsteg und Stirnplatte, $V_{Rd,9}$

$$\begin{aligned} \beta_w &= 0,9 \\ f_{vw,d} &= \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 251,5 \text{ N/mm}^2 \\ h_0 &= 240 \text{ mm} \\ l_w &= h_0 - 2 \cdot (t_f + r) = 240 - 2 \cdot (17 + 21) = 164 \text{ mm} \\ t_{\max} &= \max(t_p | t_w) = \max(10 | 10) = 10 \text{ mm} \\ a &= 5 \text{ mm} \\ a &= 5 \text{ mm} \geq \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 2,7 \text{ mm} = \sqrt{10} - 0,5 = \sqrt{t_{\max}} - 0,5 \\ 5 \text{ mm} \wedge t \geq 30 \text{ mm} \end{cases} \\ V_{Rd,9} &= 2 \cdot a \cdot l_w \cdot f_{vw,d} = 2 \cdot 0,5 \cdot 16,4 \cdot 25,15 = 412,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Stegnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

Höhe des Obergurtprofils

effektive Schweißnahtlänge

größte Blechdicke in der Verbindung

Dicke der Kehlnähte

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2, alle Abmessungen in mm einsetzen!

l) Beanspruchbarkeit V_{Rd} des Anschlusses

| Tragfähigkeit der Komponente i | $V_{Rd,i}$ | [kN] |
|--|------------|-------|
| Grenzabscherkraft der Schraubengruppe | $V_{Rd,1}$ | 433,9 |
| Lochleibungstragfähigkeit der Stirnplatte | $V_{Rd,2}$ | 489,2 |
| Lochleibungstragfähigkeit des Stützenflansches | $V_{Rd,3}$ | 858,6 |
| Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Bruttoquerschnitt) | $V_{Rd,4}$ | 710,1 |
| Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Nettoquerschnitt) | $V_{Rd,5}$ | 760,4 |
| Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte (Blockversagen) | $V_{Rd,6}$ | 704,1 |
| Momentenbeanspruchbarkeit der Stirnplatte | $V_{Rd,7}$ | 881,2 |
| Querkrafttragfähigkeit des Obergurtprofils | $V_{Rd,8}$ | 680,5 |
| Tragfähigkeit der Obergurtstegnaht | $V_{Rd,9}$ | 412,5 |
| Bemessungswert der Beanspruchbarkeit | V_{Rd} | 412,5 |

← minimale Beanspruchbarkeit

m) Tragfähigkeitsnachweis für die Verbindung

$$V_{Ed}/V_{Rd} = 385,9/412,5 = 0,94 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

n) Anforderungen an die Duktilität

[51] Abschnitt 12

$$\frac{d}{2,8} \cdot \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_{yp}}} = \frac{24}{2,8} \cdot \sqrt{\frac{800}{355}} = 12,9 \text{ mm} > 10 \text{ mm} = t_p$$

→ Die Anforderung an die Duktilität des Anschlusses ist erfüllt.

4 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

4.1 Nachweis der Verformungsbegrenzung

δ_z entsprechend Abschnitt 2.2

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für vertikale Verformungen. Es wird daher zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3 herangezogen:

$$\delta_z = 103,8 \text{ mm} < 178 \text{ mm} = 35640/200 = L/200 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN V ENV 1993-1-3, Tabelle 4.1

Beispiel 1.5: Dachverband

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| Aufgabenstellung | 86 |
| 1 System und Einwirkungen..... | 86 |
| 1.1 Systemabmessungen..... | 86 |
| 1.2 Bauteilparameter | 86 |
| 1.3 Materialkennwerte | 87 |
| 1.4 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 87 |
| 1.5 Lastkombinationen | 87 |
| 2 Beanspruchungen | 88 |
| 2.1 Imperfektionen | 88 |
| 2.2 Schnittkräfte | 89 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 92 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 92 |
| 3.2 Verbindungen | 92 |
| 3.2.1 Füllstabknoten | 92 |
| 3.2.2 Gurtknoten | 100 |
| 3.2.3 Montagestoß im Obergurt der Dachbinder..... | 100 |
| 3.3 Diagonalen des Dachverbandes | 102 |
| 3.3.1 Querschnittsklassifikation..... | 102 |
| 3.3.2 Bauteilnachweis | 102 |

Beispiel 1.5: Dachverband

Aufgabenstellung

Für den Dachverband zwischen den Achsen ⑤ und ⑥, der zur Stabilisierung der Dachbinderobergurte und zur Durchleitung der Windlasten auf die Giebelwände in die Wandriegel dient, sind folgende Nachweise zu führen:

- Bauteil- und Querschnittsnachweise für die Diagonalen im Grenzzustand der Tragfähigkeit
- Nachweise von Verbindungen (siehe Abschnitt 3.2) im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für die Bezeichnung der Achsen siehe die Vorbemerkungen S. 1.

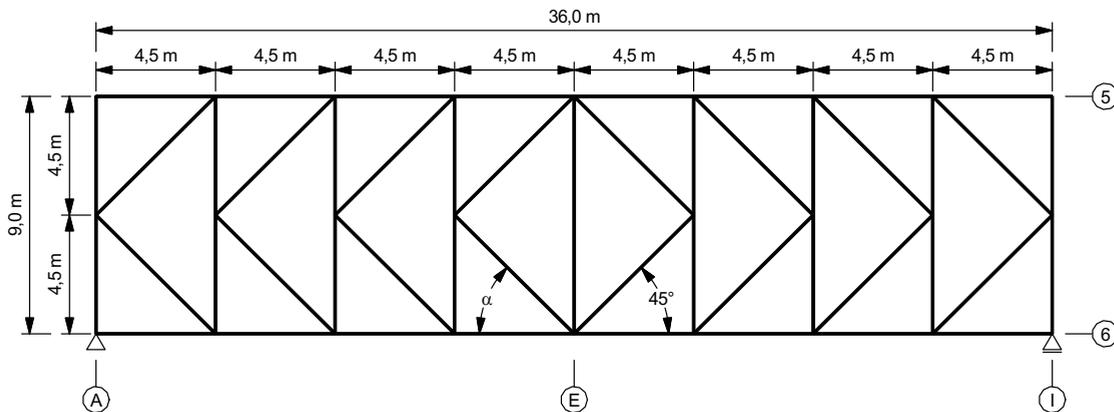
Die Gurte des Dachverbandes bilden die Obergurte der Dachbinder in den Achsen ⑤ und ⑥, siehe Beispiel 1.4.

Die Pfosten des Dachverbandes bilden die Pfetten bzw. Wandriegel, siehe Beispiele 1.3 bzw. 1.6.

Die Schnittgrößen aus der Mitwirkung im Dachverband sind in den Bauteilnachweisen der o.g. Beispiele berücksichtigt.

1 System und Einwirkungen

1.1 Systemabmessungen



Der Dachverband ist als K-Verband ausgebildet, um den Einfluss der Verformungen auf die Beanspruchungen (Theorie II. Ordnung) zu minimieren.

$$L = 36,0 \text{ m}$$

$$H = 9,0 \text{ m}$$

$$B = 4,5 \text{ m}$$

$$\alpha \approx 45^\circ$$

$$z_e = 9,0 \text{ m}$$

Die Anschlüsse der Dachbinder an die Längswandstützen (siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.5) werden durch den Dachverband **nicht** beansprucht!

„Stützweite“ des Dachverbandes

„Höhe“ des Dachverbandes

Pfettenabstand

siehe Skizze

Bezugshöhe der Halle für Windlasten, siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.1

1.2 Bauteilparameter

| Bauteil | Profil | Stahlsorte | Fläche [cm ²] |
|------------|-------------|----------------------|---------------------------|
| Gurte | HE 240 B | S355J2 ^a | 106,00 |
| Pfosten | HE 260 A | S235J2 ^a | 86,82 |
| Diagonalen | QHP 120 x 5 | S235JRH ^b | 22,73 |

a: Baustahl nach DIN EN 10025-2
b: Baustahl nach DIN EN 10210-1

warmgewalztes quadratisches Hohlprofil (QHP), DIN EN 10210-2

1.3 Materialkennwerte

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Diagonalen: | $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ | $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ |
| Knotenbleche, Bleche: | $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ | $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ |
| Kopfplatten, Montagestoß: | $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ | $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$ |
| Schrauben (FK 8.8): | $f_{yb} = 640 \text{ N/mm}^2$ | $f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$ |
| $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ | $G = 81000 \text{ N/mm}^2$ | $\nu = 0,3$ |

Streckgrenze und Zugfestigkeit nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1
alle Bleche aus S235, außer den Kopfplatten des Montagestoßes der Binderobergurte (S355)

Streckgrenze und Zugfestigkeit für Festigkeitsklasse (FK) 8.8 nach DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.1

Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querdehnzahl nach DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.4 Charakteristische Werte der Einwirkungen

a) Lasten infolge Wind auf die Giebelwände

| | |
|--|----------------------------------|
| Winddruck auf Giebelwand, Bereich D: | $w_{e,D} = 0,455 \text{ kN/m}^2$ |
| Winddruck auf Giebelwand, Bereich E: | $w_{e,E} = 0,195 \text{ kN/m}^2$ |
| Reibungskraft parallel zur Dachfläche: | $F_{fr,j} = 21,63 \text{ kN}$ |

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.1 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.1 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.3 b)

Für die Schnittgrößenermittlung ist es zweckmäßig, alle Windlasten zu einer einzigen Einwirkung zusammenzufassen:

Schnittgrößenermittlung vgl. Abschnitt 2.1

$$w_e \approx \frac{z_e}{2} \cdot (w_{e,D} + w_{e,E}) + \frac{F_{fr,j}}{L} = \frac{9}{2} \cdot (0,455 + 0,195) + \frac{21,63}{36} = 3,53 \text{ kN/m}$$

resultierende Windeinwirkung auf den Dachverband

b) Normalkräfte der Dachbinderobergurte (Maximalwerte)

siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 2.2

| | |
|----------------------|---------------------------------|
| infolge Eigenlasten: | $N_{g,k} = -436,4 \text{ kN}$ |
| infolge Schneelast: | $N_{s,k} = -575,5 \text{ kN}$ |
| infolge Winddruck: | $N_{w,k}^+ = -73,6 \text{ kN}$ |
| infolge Windsog: | $N_{w,k}^- = +220,8 \text{ kN}$ |

Die nebenstehenden Normalkräfte sind die Maximalwerte in den Obergurten der Dachbinder, getrennt nach den verursachenden Einwirkungen, wobei diese Einwirkungen in vertikaler Richtung wirken.

1.5 Grenzzustände der Tragfähigkeit, Lastkombinationen

ständige Bemessungssituation!

a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

| | |
|---|-------------------------|
| ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ |
| ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ |
| veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_Q = 1,5$ |

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

| | |
|---------|--------------------|
| Schnee: | $\psi_{0,S} = 0,5$ |
| Wind: | $\psi_{0,W} = 0,6$ |

c) Faktoren für die Einwirkungen in den Lastkombinationen

| Lastkombination | | 1 | 2 | 3 |
|-----------------|-------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Einwirkung | | Faktor | Faktor | Faktor |
| Eigenlasten | $N_{g,k}$ | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ |
| Schnee | $N_{s,k}$ | $\gamma_Q = 1,5$ | 0,0 | $\gamma_Q \cdot \psi_{0,S} = 0,75$ |
| Winddruck | $N_{w,k}^+$ | $\gamma_Q \cdot \psi_{0,W} = 0,9$ | 0,0 | $\gamma_Q = 1,5$ |
| Windsog | $N_{w,k}^-$ | 0,0 | $\gamma_Q = 1,5$ | 0,0 |
| Wind, Giebel | w_e | $\gamma_Q \cdot \psi_{0,W} = 0,9$ | $\gamma_Q = 1,5$ | $\gamma_Q = 1,5$ |

Lastkombination 1 ergibt die Schnittkräfte, die in die Bauteilnachweise für die Dachbinderobergurte und Pfetten eingehen.

Lastkombination 2 ergibt die ggf. vorhandene Zugkraft im Montagestoß des Dachbinderobergurtes.

Lastkombination 3 ergibt die Schnittkräfte sowohl für die Bauteilnachweise der Wandriegel und Diagonalen als auch für die Nachweise der Verbindungen des Dachverbandes.

d) Bemessungswerte der Einwirkungen

| Lastkombination | | 1 | 2 | 3 |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|
| N_{Ed} | [kN] | 1518,7 | 105,2 | 1131,2 |
| $w_{e,Ed}$ | [kN/m] | 3,17 | 5,29 | 5,29 |

Druckkraft der Dachbinderobergurte

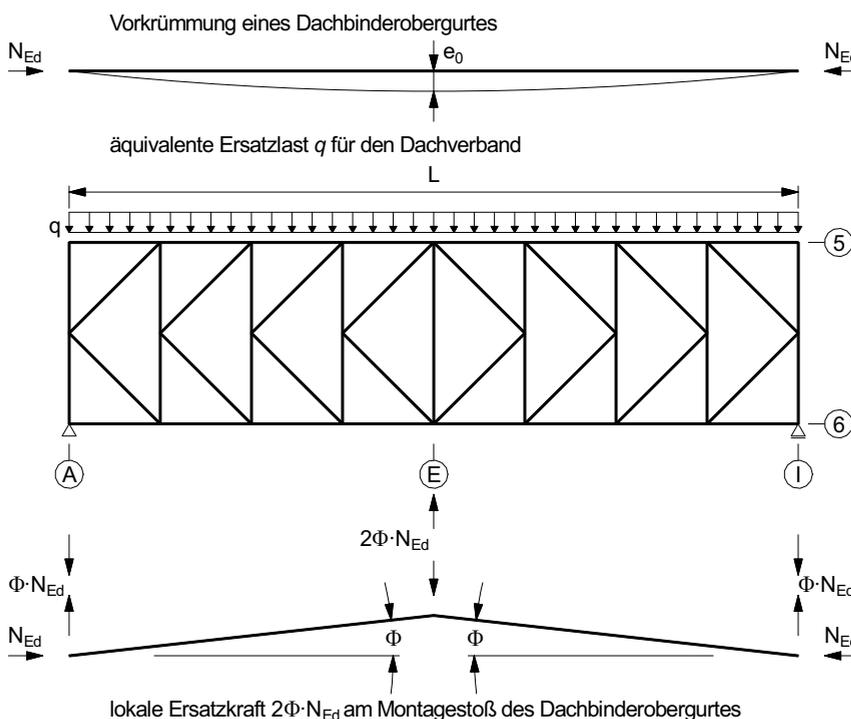
Windlast auf den Dachverband

2 Beanspruchungen

2.1 Imperfektionen

Für die Ermittlung der Beanspruchungen des Dachverbandes ist der Einfluss der Imperfektionen der Dachbinderobergurte durch äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen in Form von Vorkrümmungen zu berücksichtigen.

siehe DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.3 (1)



Die Normalkräfte in den Giebelriegeln in den Achsen 1 und 10 sind vernachlässigbar, d.h. die Anzahl der durch den Dachverband zu stabilisierenden Bauteile (Dachbinderobergurte) beträgt $m = 8$.

Vereinfachend werden die Ersatzimperfektionen über eine äquivalente Ersatzlast q entsprechend DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.3 (2) berücksichtigt.

Die Durchbiegung δ_q des Dachverbandes in seiner Ebene darf für die Ermittlung der Ersatzlast q bei Berechnung nach Theorie II. Ordnung entsprechend DIN 1993-1-1, Absatz 5.5.3 (2) zu 0 gesetzt werden.

Entsprechend DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.3 (4) ist der Dachverband auch für lokale Ersatzlasten, die an den Montagestoßen der Dachbinderobergurte angreifen nachzuweisen. Dabei sind nach DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.3 (4) auch alle anderen äußeren Einwirkungen auf den Dachverband zu berücksichtigen, aber ohne den Einfluss von Imperfektionen.

Stich der Vorkrümmung e_0 :

$$e_0 = \alpha_m \cdot L/500 = 0,75 \cdot 36000/500 = 54 \text{ mm}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot (1 + 1/m)} = \sqrt{0,5 \cdot (1 + 1/8)} = 0,75$$

äquivalente Ersatzlast q :

$$q = \Sigma N_{Ed} \cdot 8 \cdot (e_0 + \delta_q)/L^2 \xrightarrow{\delta_q=0} q = \Sigma N_{Ed} \cdot 8 \cdot e_0/L^2$$

lokale Ersatzkraft $2\Phi N_{Ed}$ für einen Dachbinder:

$$2\Phi N_{Ed} = 2\alpha_m \cdot \Phi_0 \cdot N_{Ed} = \alpha_m \cdot N_{Ed}/100 = 0,0075 \cdot N_{Ed}$$

$$\Phi_0 = 1/200$$

2.2 Schnittgrößen

Die Stabkräfte der Verbandstäbe werden aus den Schnittgrößen eines „schubweichen“ Ersatzträgers auf zwei Stützen ermittelt.

a) Biegesteifigkeit EJ^* des Ersatzträgers

$$GF_Q = \frac{2 \cdot E}{\frac{1}{A_D \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha} + \frac{1}{A_H \cot \alpha}} = \frac{2 \cdot 21000}{\frac{1}{22,73 \sqrt{2}} + \frac{1}{86,82 \cdot 1}} = 308928 \text{ kN}$$

$$J = \frac{A_G \cdot H^2}{2} = \frac{106 \cdot 10^{-4} \cdot 9^2}{2} = 0,4293 \text{ m}^4$$

$$EJ^* = \frac{1}{\frac{1}{EJ} + \frac{\pi^2}{L^2 GF_Q}} = \frac{1}{\frac{1}{210000 \cdot 0,4293} + \frac{\pi^2}{36^2 \cdot 308,928}} = 27977 \text{ MNm}^2$$

b) Berücksichtigung der Exzentrizität des Dachverbandes

Der Dachverband liegt in der Obergurtebene der Dachbinder. Daraus ergibt sich eine zusätzliche Beanspruchung des Dachverbandes, die aus der Verdrehung der Dachbinder resultiert, d.h. aus den auf die Dachbinder einwirkenden Vertikallasten ergeben sich horizontale Abtriebskräfte.

Der Einfluss der Verdrehung der Dachbinder kann unberücksichtigt bleiben, wenn die Steifigkeit des Dachverbandes so groß ist, dass sich in Höhe der Dachbinderobergurte eine gebundene Drehachse einstellt.

Der Nachweis für das Vorliegen einer gebundenen Drehachse wird wegen der veränderlichen Höhe der Dachbinder sowohl für die minimale als auch für die maximale Dachbinderhöhe geführt.

DIN EN 1993-1-1, Glg. (5.12)

Abminderungsfaktor nach DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.3 (1) mit m als Anzahl der zu stabilisierenden Bauteile

DIN EN 1993-1-1, Glg. (5.13), $\delta_q = 0$ bei Berechnung nach Theorie II. Ordnung (siehe Abschnitt 2.2)

DIN EN 1993-1-1, Bild 5.7

Berechnung nach [53], Abschnitt 6.5.2

Schubsteifigkeit des Ersatzträgers, [53] Bild 6.34, wobei A_D und A_H die Querschnittsflächen der Diagonalen bzw. der Pfosten des Verbandes sind.

Trägheitsmoment der Gurte des Dachverbandes, wobei A_G die Fläche der Gurtquerschnitte ist.

Biegesteifigkeit des Ersatzträgers, [53] Glg. (6.174)

Diese Abtriebskräfte sind mit dem Ansatz der Imperfektionen nach Abschnitt 2.1 noch nicht erfasst!

siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 1.1

Die Steifigkeiten der Dachbinder werden näherungsweise mit den Querschnittswerten der Dachbinderobergurte (HE 240 B) ermittelt:

$$\begin{aligned}
 I_{z,og} &= 3923 \text{ cm}^4 \\
 I_{t,og} &= 103,6 \text{ cm}^4 \\
 EI_z &\approx 2 \cdot E \cdot I_{z,og} = 2 \cdot 21000 \cdot 3923 \cdot 10^{-4} = 16477 \text{ kNm}^2 \\
 GI_T &\approx 2 \cdot G \cdot I_{t,og} = 2 \cdot 8100 \cdot 103,6 \cdot 10^{-4} = 168 \text{ kNm}^2 \\
 h_{\max} &= 2,6 \text{ m} \\
 h_{\min} &= 1,6 \text{ m} \\
 EI_w^{\max} &\approx E \cdot I_{z,og} \cdot h_{\max}^2 = 21000 \cdot 3923 \cdot 2,6^2 \cdot 10^{-4} = 55691 \text{ kNm}^4 \\
 EI_w^{\min} &\approx E \cdot I_{z,og} \cdot h_{\min}^2 = 21000 \cdot 3923 \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-4} = 21090 \text{ kNm}^4
 \end{aligned}$$

Eine gebundene Drehachse liegt vor, wenn die auf einen Dachbinder entfallende Schubfeldsteifigkeit S des Dachverbandes folgenden Bedingungen genügt:

$$\begin{aligned}
 S &= 38616 \text{ kN} > 8327 \text{ kN} = S_{\text{req}}^{\max} \quad \rightarrow \text{Die Bedingung ist erfüllt.} \\
 S &= 38616 \text{ kN} > 11181 \text{ kN} = S_{\text{req}}^{\min} \quad \rightarrow \text{Die Bedingung ist erfüllt.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= GF_Q/m = 308928/8 = 38616 \text{ kN} \\
 S_{\text{req}}^{\max} &= 70 \cdot (EI_w^{\max} \cdot \pi^2/L^2 + GI_T + 0,25 \cdot EI_z \cdot h_{\max}^2 \cdot \pi^2/L^2)/h_{\max}^2 \\
 &= 70 \cdot (55690 \cdot \pi^2/36^2 + 168 + 0,25 \cdot 16477 \cdot 2,6^2 \cdot \pi^2/36^2)/2,6^2 \\
 &= 8327 \text{ kN} \\
 S_{\text{req}}^{\min} &= 70 \cdot (EI_w^{\min} \cdot \pi^2/L^2 + GI_T + 0,25 \cdot EI_z \cdot h_{\min}^2 \cdot \pi^2/L^2)/h_{\min}^2 \\
 &= 70 \cdot (21090 \cdot \pi^2/36^2 + 168 + 0,25 \cdot 16477 \cdot 1,6^2 \cdot \pi^2/36^2)/1,6^2 \\
 &= 11181 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

c) Schnittgrößen infolge Windlasten und äquivalenter Ersatzlasten

Um bei der Bestimmung der Schnittgrößen die Übersichtlichkeit zu wahren, werden zuerst die erforderlichen Gleichungen und im Anschluss daran die entsprechenden Zahlenwerte für alle Lastkombinationen in tabellarischer Form angegeben.

$$\begin{aligned}
 \Sigma N_{\text{Ed}} &= m \cdot N_{\text{Ed}} = 8 \cdot N_{\text{Ed}} \\
 e_d &= 8 \cdot \Sigma N_{\text{Ed}} \cdot e_0/L^2 + w_{e,\text{Ed}} \\
 N_{\text{Cr}} &= \pi^2 \cdot EJ^*/L^2 = \pi^2 \cdot 27977/36^2 = 231,06 \text{ MN} = 231060 \text{ kN} \\
 \alpha_{\text{II}} &= \frac{1}{1 - \Sigma N_{\text{Ed}}/N_{\text{Cr}}} \\
 M_{\text{Ed}}^{\text{II}} &= \alpha_{\text{II}} \cdot (w_{e,\text{Ed}} \cdot L^2/8 + \Sigma N_{\text{Ed}} \cdot e_0) = \alpha_{\text{II}} \cdot e_d \cdot L^2/8 \\
 V_{\text{Ed}}^{\text{II}} &= \alpha_{\text{II}} \cdot (w_{e,\text{Ed}} \cdot L/2 + \pi \cdot \Sigma N_{\text{Ed}} \cdot e_0/L) \approx \alpha_{\text{II}} \cdot e_d \cdot L/2
 \end{aligned}$$

Die Steifigkeiten werden hier wie für einen Biegeträger ermittelt.

Trägheitsmoment um die z-Achse und Torsionsträgheitsmoment der Dachbinderobergurte, [47] S. 37

Biegesteifigkeit um die z-Achse und Torsionssteifigkeit eines Dachbinders

größte Höhe der Dachbinder

kleinste Höhe der Dachbinder

Wölbsteifigkeiten eines Dachbinders in Bindermitte (max) und an den Auflagern (min)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (BB.2)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (BB.2)

Schubfeldsteifigkeit je Dachbinder

für das Vorliegen einer gebundenen Drehachse erforderliche Schubfeldsteifigkeit in Dachbindermitte, DIN EN 1993-1-1, Glg. (BB.2)

für das Vorliegen einer gebundenen Drehachse erforderliche Schubfeldsteifigkeit an den Dachbinderauflagern, DIN EN 1993-1-1, Glg. (BB.2)

Summe der Druckkräfte aller Dachbinderobergurte

Bemessungswert der Einwirkung für die Schnittgrößenermittlung

ideale Knicklast des Ersatzträgers

Verformungsfaktor zur Erfassung des Einflusses aus Theorie II. Ordnung, [53] Glg. (6.179)

Feldmoment und Querkraft des Ersatzträgers nach Theorie II. Ordnung, [53] Glg. (6.180)

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 |
|-----------------|--------|---------|-------|--------|
| ΣN_{Ed} | [kN] | 12149,0 | 841,6 | 9049,6 |
| e_d | [kN/m] | 7,22 | 5,57 | 8,31 |
| α_{II} | [-] | 1,055 | 1,004 | 1,044 |
| M_{Ed}^{II} | [kNm] | 1240,9 | 905,8 | 1405,1 |
| V_{Ed}^{II} | [kN] | 137,9 | 100,6 | 156,1 |

LK = Lastkombination

Die Zunahme der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung ist mit maximal 5,5% wegen der großen Steifigkeit des Dachverbandes relativ gering.

d) Schnittgrößen infolge Windlasten und lokaler Ersatzkräfte

$$F_{Ed} = m \cdot 2\Phi N_{Ed} = 8 \cdot 0,0075 \cdot N_{Ed} = 0,06 \cdot N_{Ed}$$

$$M_{Ed}^I = w_{e,Ed} \cdot L^2/8 + F_{Ed} \cdot L/4$$

$$V_{Ed}^I = w_{e,Ed} \cdot L/2 + F_{Ed}/2$$

Summe der lokalen Ersatzkräfte für alle Dachbinder

Feldmoment und Querkraft des Ersatzträgers nach Theorie I. Ordnung

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 |
|------------|-------|--------|-------|--------|
| F_{Ed} | [kN] | 91,1 | 6,3 | 67,9 |
| M_{Ed}^I | [kNm] | 1334,1 | 913,6 | 1467,6 |
| V_{Ed}^I | [kN] | 102,7 | 98,4 | 129,1 |

e) Stabkräfte S_{Ed} in den Verbandsstäben:

Die Biegemomente infolge Windlasten und lokaler Ersatzkräfte liefern die maximalen Normalkräfte in den Gurten des Verbandes, während die Querkraft infolge Windlasten und äquivalenter Ersatzlasten maßgebend für die Normalkräfte der Pfetten (Pfetten) und Diagonalen sind.

Nachfolgend sind nur die maßgebenden Stabkräfte angegeben.

Bindergurte: $S_{Ed} = \pm \frac{M_{Ed}^I}{H} = \pm \frac{1334,1}{9} = \pm 148,2 \text{ kN}$

Wandriegel: $S_{Ed} = \pm 0,5 \cdot (V_{Ed}^{II} - 0,5 \cdot \alpha_{II} \cdot e_d \cdot B)$
 $= \pm 0,5 \cdot (156,1 - 0,5 \cdot 1,044 \cdot 8,31 \cdot 4,5) = \pm 68,3 \text{ kN}$

Pfetten: $S_{Ed} = \pm 0,5 \cdot (V_{Ed}^{II} - 1,5 \cdot \alpha_{II} \cdot e_d \cdot B)$
 $= \pm 0,5 \cdot (137,9 - 1,5 \cdot 1,06 \cdot 7,22 \cdot 4,5) = \pm 43,1 \text{ kN}$

Diagonalen: $S_{Ed} = \pm (V_{Ed}^{II} - 0,5 \cdot \alpha_{II} \cdot e_d \cdot B) / \sqrt{2}$
 $= \pm (156,1 - 0,5 \cdot 1,044 \cdot 8,31 \cdot 4,5) / \sqrt{2} = \pm 96,6 \text{ kN}$

Stabkraft in Lastkombination 1 für den Bauteilnachweis der Binderobergurte, siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 3.3.1

Stabkraft in Lastkombination 3 für die Nachweise der Wandriegel in Achse Ⓐ bzw. Ⓚ, siehe Beispiel 1.6

Stabkraft in Lastkombination 1 für die Nachweise der Pfetten in Achse Ⓒ bzw. Ⓚ, siehe Beispiel 1.3

Stabkraft der Diagonalen zwischen den Achsen Ⓐ und Ⓒ bzw. Ⓚ und Ⓚ in LK 3, Nachweise siehe Abschnitt 3.3.2

f) Stabkräfte S_{Ed} in den Pfetten außerhalb des Verbandesfeldes

$$S_{Ed} \approx 0,5 \cdot e_d \cdot B = 0,5 \cdot 7,22 \cdot 4,5 = 16,2 \text{ kN}$$

Diese Stabkräfte ergeben sich näherungsweise aus der Lastdurchleitung zum Dachverband für LK 1.

g) Zugkraft am Montagestoß der Dachbinderobergurte

$$Z_{Ed} = \frac{M_{Ed}^I}{H} - N_{Ed} = \frac{913,6}{9} - 105,2 = -3,7 \text{ kN} \rightarrow \text{Druckbeanspruchung!}$$

Auch die Überlagerung der minimalen Druckkraft im Binderobergurt infolge Vertikallasten mit der Zugkraft aus dem Dachverband für LK 2 ergibt **keine** resultierende Zugbeanspruchung!

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

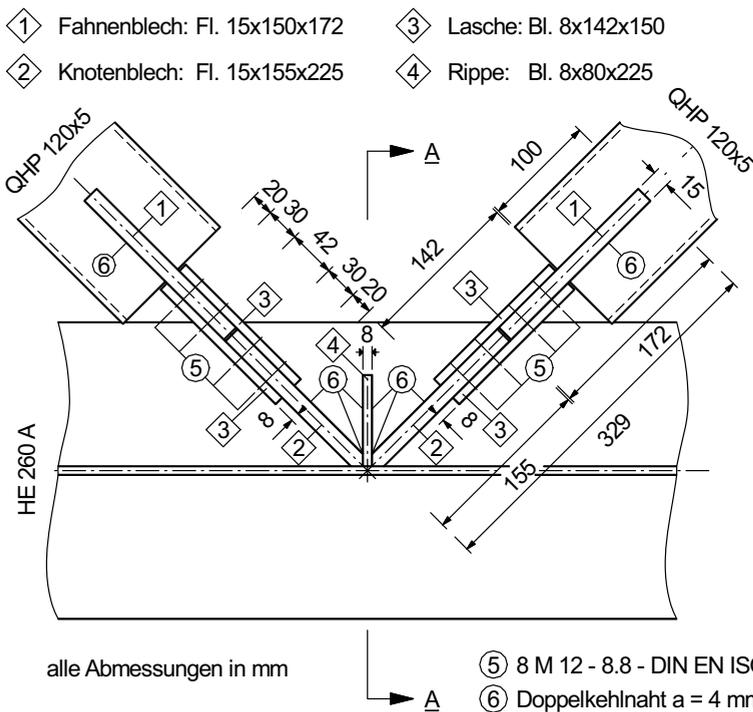
| | |
|---|----------------------|
| elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: | $\gamma_{M0} = 1,0$ |
| Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): | $\gamma_{M1} = 1,1$ |
| Bruchversagen von zugbeanspruchten Querschnitten: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschraubten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

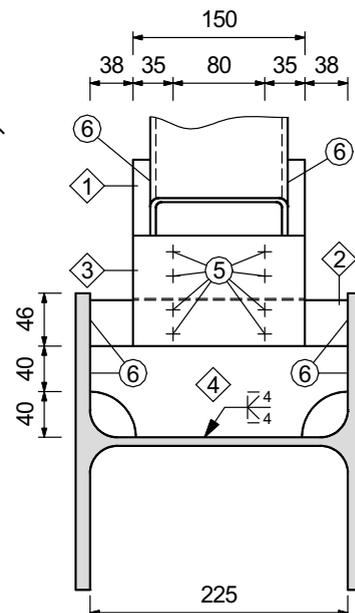
DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anmerkung

3.2 Verbindungen

3.2.1 Füllstabknoten



Schnitt A-A



Die Diagonalen sind mit geschraubten, zweiseitigen Laschenverbindungen an die Pfetten angeschlossen.

Dazu sind die Diagonalen mit Schlitz versehen, in die jeweils ein Fahnenblech eingeführt und verschweißt ist. In die Kammern der Pfettenprofile sind Knotenbleche eingeschweißt, an die die Fahnenbleche über die Doppellaschen angeschraubt sind.

Alle Schweißnähte mit Ausnahme der Naht zwischen Rippe und Pfettensteg sind Doppelkehlnähte mit a = 4 mm. Das Rippenblech ist lediglich für die einwandfreie Anbindung der Knotenbleche an den Pfettensteg erforderlich.

Die Abmessungen der Fahnenbleche sind so gewählt, dass ihre Querschnittsfläche A_{FB} ungefähr mit der der Diagonalen A_{QHP} übereinstimmt, was Voraussetzung in der Bestimmung der Steifigkeit des Ersatzbalkens für die Schnittkraftermittlung ist.

Die Füllstabknoten sind relativ kompakt ausgebildet, um ihren Einfluss auf die Bauteiltragfähigkeit der Diagonalen zu minimieren.

Nachfolgend werden, soweit erforderlich, die Abmessungen und Querschnittswerte mit „FB“ für das Fahnenblech, „KB“ für das Knotenblech, „L“ für die Laschen und „QHP“ für die Diagonale indiziert.

a) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

Maßgebend für die Kontrolle der Abstände ist das Fahnenblech.

$$\begin{aligned}
 d &= 12 \text{ mm} \\
 d_0 &= d + 1 \text{ mm} = 12 + 1 = 13 \text{ mm} \\
 e_1 &= 20 \text{ mm} > 15,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 13 = 1,2 \cdot d_0 \\
 e_2 &= 35 \text{ mm} > 15,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 13 = 1,2 \cdot d_0 \\
 p_1 &= 30 \text{ mm} > 28,6 \text{ mm} = 2,2 \cdot 13 = 2,2 \cdot d_0 \\
 p_2 &= 80 \text{ mm} > 31,2 \text{ mm} = 2,4 \cdot 13 = 2,4 \cdot d_0
 \end{aligned}$$

→ Die Rand- und Lochabstände für die Schrauben sind eingehalten.

b) Grenzabscherkraft der Schraubengruppe, $N_{Rd,1}$

$$\begin{aligned}
 A_s &= 0,843 \text{ cm}^2 \\
 \alpha_v &= 0,6 \\
 n_v &= 2 \\
 n &= 4 \\
 F_{v,Rd} &= \alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 0,843 \cdot 80 / 1,25 = 32,37 \text{ kN} \\
 N_{Rd,1} &= n \cdot n_v \cdot F_{v,Rd} = 4 \cdot 2 \cdot 32,37 \approx 259 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

c) Lochleibungstragfähigkeit des Fahnen- bzw. Knotenblechs, $N_{Rd,2}$

$$\begin{aligned}
 \alpha_d &= \min(e_1 / (3d_0) \mid p_1 / (3d_0) - 0,25) \\
 &= \min(20 / (3 \cdot 13) \mid 30 / (3 \cdot 13) - 0,25) = 0,51 \\
 k_1 &= \min(2,8 \cdot e_2 / d_0 - 1,7 \mid 1,4 \cdot p_2 / d_0 - 1,7 \mid 2,5) \\
 &= \min(2,8 \cdot 35 / 13 - 1,7 \mid 1,4 \cdot 80 / 13 - 1,7 \mid 2,5) = 2,5 \\
 \alpha_b &= \min(f_{ub} / f_u \mid \alpha_d \mid 1,0) = \min(800 / 360 \mid 0,51 \mid 1,0) = 0,51 \\
 t_p &= 15 \text{ mm} \\
 F_{b,Rd} &= \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,51 \cdot 36 \cdot 1,2 \cdot 1,5}{1,25} = 66,1 \text{ kN} \\
 N_{Rd,2} &= n \cdot F_{b,Rd} = 4 \cdot 66,1 = 264,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

siehe Absatz e) unten

Der Bauteilnachweis für die Diagonale wird in Abschnitt 3.3.2 geführt.

Für die übereinstimmende Dicke von Fahnen- und Knotenblech wird die Bezeichnung t_p verwendet.

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

vgl. Skizze oben

Nenn Durchmesser der Schrauben (d) und Loch Durchmesser (d_0) gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

Randabstand \parallel zur Krafrichtung

Randabstand \perp zur Krafrichtung

Lochabstand \parallel zur Krafrichtung

Lochabstand \perp zur Krafrichtung

Das Gewinde liegt in den Scherfugen!

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Anzahl der Scherfugen

Anzahl der Schrauben einer Gruppe

Grenzabscherkraft einer Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände in Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände senkrecht zur Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Dicke des Fahnen- bzw. Knotenblechs

Grenzlochleibungskraft der Schrauben, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Absatz 3.7 (1)

d) Lochleibungstragfähigkeit der Laschen, $N_{Rd,3}$

$$t_L = 8 \text{ mm}$$

$$N_{Rd,3} = N_{Rd,2} \cdot \frac{2 \cdot t_L}{t_p} = 264,4 \cdot \frac{2 \cdot 8}{15} = 282 \text{ kN}$$

Dicke einer Lasche

Die Rand- und Lochabstände sind gleich bzw. größer als für das Fahnenblech!

e) Normalkrafttragfähigkeit des Fahnenblechs (Bruttoquerschnitt), $N_{Rd,4}$

$$h_{FB} = 150 \text{ mm}$$

$$A_{FB} = h_{FB} \cdot t_p = 15 \cdot 1,5 = 22,5 \text{ cm}^2 \approx 22,73 \text{ cm}^2 = A_{QHP}$$

$$N_{Rd,4} = A_{FB} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 22,5 \cdot 23,5 / 1,0 = 528,8 \text{ kN}$$

Höhe des Fahnenblechs

Querschnittsfläche des Fahnenblechs

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.6)

f) Normalkrafttragfähigkeit des Fahnenblechs (Nettoquerschnitt), $N_{Rd,5}$

$$A_{FB,net} = A_{FB} - 2 \cdot d_0 \cdot t_p = 22,5 - 2 \cdot 1,3 \cdot 1,5 = 18,6 \text{ cm}^2$$

$$N_{Rd,5} = 0,9 \cdot A_{FB,net} \cdot f_u / \gamma_{M2} = 0,9 \cdot 18,6 \cdot 36 / 1,25 = 482,1 \text{ kN}$$

Nettoquerschnittsfläche

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.7)

g) Normalkrafttragfähigkeit des Fahnenblechs (Blockversagen), $N_{Rd,6}$

$$A_{FB,nt} = t_p \cdot (2 \cdot e_2 - d_0) = 1,5 \cdot (2 \cdot 3,5 - 1,3) = 8,55 \text{ cm}^2$$

$$A_{FB,nv} = 2 \cdot t_p \cdot \left(e_1 + p_1 - \frac{3}{2} \cdot d_0 \right) = 2 \cdot 1,5 \cdot \left(2 + 3 - \frac{3}{2} \cdot 1,3 \right) = 9,15 \text{ cm}^2$$

$$N_{Rd,6} = \frac{f_u \cdot A_{FB,nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{FB,nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{36 \cdot 8,55}{1,25} + \frac{23,5 \cdot 9,15}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 370,4 \text{ kN}$$

vgl. Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.5 h)

zugbeanspruchte Nettofläche

schubbeanspruchte Nettofläche

Widerstand gegen Blockversagen einer symmetrischen Schraubengruppe unter zentrischer Belastung, DIN EN 1993-1-8, Glg. (3.9)

h) Tragfähigkeit der Schweißnähte zwischen dem Fahnenblech und der Diagonale bzw. dem Knotenblech und den Flanschen der Pfette, $N_{Rd,7}$

$$t_{fb} = 12,5 \text{ mm}$$

$$t_{QHP} = 5 \text{ mm}$$

$$t_{max} = \max(t_p | t_{fb} | t) = \max(15 | 12,5 | 5) = 15 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm} > a_{min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,4 \text{ mm} = \sqrt{15} - 0,5 = \sqrt{t_{max}} - 0,5 \end{cases}$$

$$l_{min} = \max\left(\frac{30 \text{ mm}}{6 \cdot a}\right) = \max\left(\frac{30}{6 \cdot 4}\right) = \max\left(\frac{30}{24}\right) = 30 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = \min\left(\frac{l_{eff,FB}}{l_{eff,KB}}\right) = \min\left(\frac{100}{155 - 40}\right) = 100 \text{ mm} > 30 \text{ mm} = l_{min}$$

$$\beta_w = 0,8$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0,8 \cdot 1,25} = 207,8 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{Rd,7} = 4 \cdot a \cdot l_{eff} \cdot f_{vw,d} = 4 \cdot 0,4 \cdot 10 \cdot 20,78 = 332,5 \text{ kN}$$

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

Flanschdicke der Pfetten

Wanddicke der Diagonalen

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

minimale Länge tragender Kehlnähte, DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.1 (2)

effektive Schweißnahtlänge, Längen am Fahnenblech (FB) bzw. Knotenblech (KB) entsprechend Skizze

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Kehlnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

jeweils 4 Schweißnähte je Anschluss!

i) Tragfähigkeit der Diagonale am Fahnenblechanschluss, $N_{Rd,8}$

$$b_{eff} = l_{eff,FB} \cdot \tan 30^\circ = 100 \cdot 0,577 = 57,7 \text{ mm}$$

$$N_{Rd,8} = 4 \cdot b_{eff} \cdot t_{QHP} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 4 \cdot 5,77 \cdot 0,5 \cdot 23,5 / 1,0 = 271,2 \text{ kN}$$

Für die Druckkrafteinleitung aus dem Fahnenblech in die Diagonale QHP 120x5 (Abmessungen siehe Abschnitt 3.3.1) wird ein Lastausbreitungswinkel von 30° angenommen.

j) Bauteiltragfähigkeit des „Ersatzblechs“, $N_{Rd,9}$

In Anlehnung an die in *Unterweger/Ofner* [57] entwickelten Nachweise für die Tragfähigkeit von Verbandsstäben aus Hohlprofilen mit quasizentrischem Knotenblechanschluss wird für ein aus dem Fahnenblech und dem Knotenblech bestehendes „Ersatzblech“ die Bauteiltragfähigkeit bestimmt.

Abmaße nach Skizze (siehe oben)

Die Stützung des Knotenblechs durch die Flansche der Pfette bleibt unberücksichtigt (sichere Seite). Es wird die Randbedingung RB1 (geleukiger Ersatzblechanschluss am Pfettensteg) zugrunde gelegt.

$$L_1 \approx 329 - 100 = 229 \text{ mm}$$

$$I_1 = h_{FB} \cdot t_p^3 / 12 = 15 \cdot 1,5^3 / 12 = 4,22 \text{ cm}^4$$

$$N_{cr,RB1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{4 \cdot L_1^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot h_{FB} \cdot t_p^3}{48 \cdot L_1^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1,5^3 \cdot 15}{48 \cdot 22,9^2} = 416,8 \text{ kN}$$

Länge des Ersatzblechs, [57] Bild 16

Trägheitsmoment des Ersatzblechs

Verzweigungslast für Knicken um die schwache Achse des Ersatzblechs (Eulerfall 1), [57] Glg. (6)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A_{FB} \cdot f_y / N_{cr,RB1}} = \sqrt{22,5 \cdot 23,5 / 416,8} = 1,13$$

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Vollquerschnitt aus S235 → Knicklinie c

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

$$\alpha = 0,49$$

Imperfektionsbeiwert, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.1

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,13 - 0,2) + 1,13^2] = 1,37$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,37 + \sqrt{1,37^2 - 1,13^2}} = 0,466 < 1$$

Abminderungsfaktor für Biegeknicken, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

$$N_{Rd,9} = \chi \cdot A_{FB} \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,466 \cdot 22,5 \cdot 23,5 / 1,1 = 224 \text{ kN}$$

k) Tragfähigkeitsnachweis für den Anschluss

$$S_{Ed} = 96,6 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = \min(N_{Rd,1} | N_{Rd,2} | N_{Rd,3} | N_{Rd,4} | N_{Rd,5} | N_{Rd,6} | N_{Rd,7} | N_{Rd,8} | N_{Rd,9})$$

$$= \min(259 | 264,4 | 282 | 528,8 | 482,1 | 370,4 | 332,5 | 271,2 | 224)$$

$$= 224 \text{ kN}$$

Normalkraft der Diagonale für LK3

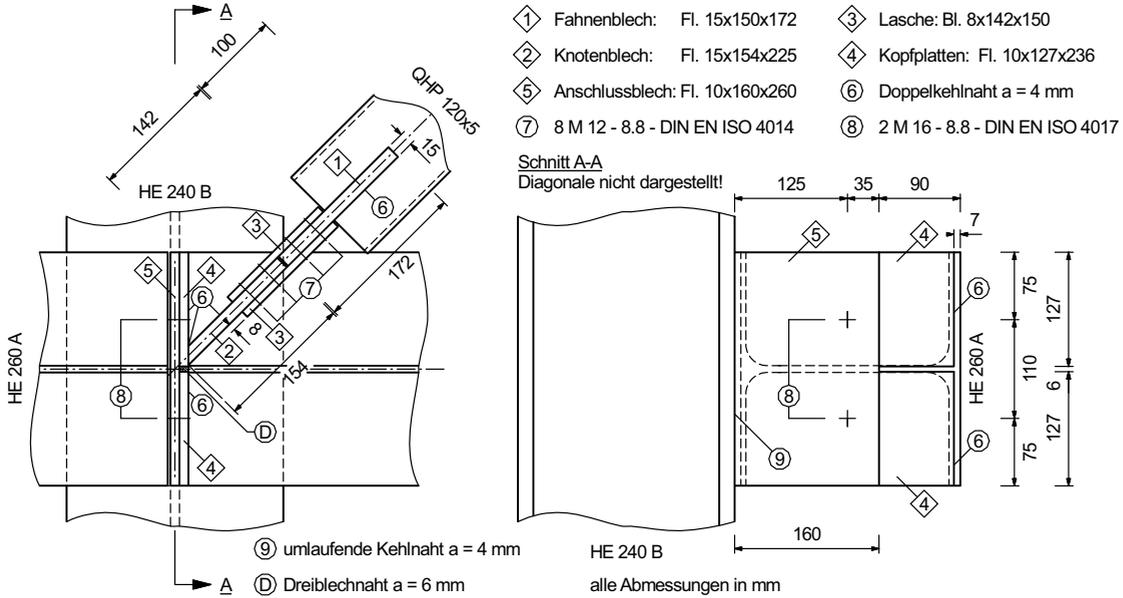
Beanspruchbarkeit des Anschlusses

$$S_{Ed} / N_{Rd} = 96,6 / 224,0 = 0,43 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.2.2 Gurtknoten

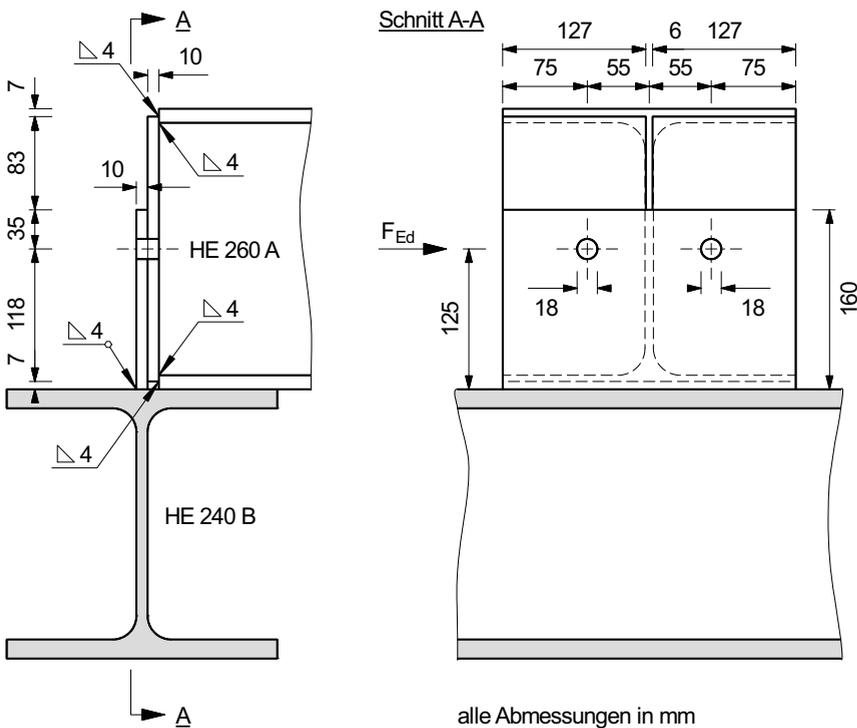
Der Anschluss der Diagonalen an die Pfetten erfolgt wie für die Füllstabknoten, d.h. für diesen Anschluss sind keine zusätzlichen Nachweise erforderlich.

siehe Skizze unten



Die Kopfplatten der Pfetten sind mit den an die Obergurte der Dachbinder angeschweißten Anschlussblechen verschraubt.

Die Querschnittsabmessungen der Pfette sind nachfolgend mit „b“ in-diziert.



Kopfplatten und Anschlussblech haben die gleiche Dicke. D.h. die Beanspruchbarkeit des Anschlussblechs ist hier maßgebend.

Um einen einwandfreien Anschluss der Knotenbleche an die Stege bzw. Kopfplatten der Pfetten zu gewährleisten, sind die Kopfplatten geteilt und mit Dreiblechnähten an die Stege der Pfetten angeschweißt.

Das Anschlussblech ist durch die exzentrische Einleitung der Kraft F_{Ed} über die Schrauben neben Schub auch auf Biegung um die starke Achse und Torsion beansprucht!

Diese Beanspruchungen wirken auch auf die umlaufende Kehlnaht, mit der das Anschlussblech an den Obergurt des Dachbinders (Profil HE 240 B) angeschweißt ist.

Nachfolgend ist mit Verbindung der Anschluss der Pfetten an die Obergurte der Dachbinder gemeint.

a) Beanspruchung F_{Ed} des Anschlusses in der Verbandsebene

$$\begin{aligned} \alpha &= 45^\circ \\ S_{Ed} &= 96,6 \text{ kN} \\ F_{Ed} &= S_{Ed} \cdot \sin \alpha = 96,6 \cdot \sin 45^\circ = 68,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

b) Tragfähigkeit der Schweißnähte zwischen Kopfplatten und Flanschen der Pfetten, $F_{Rd,1}$

$$\begin{aligned} t_{KP} &= 10 \text{ mm} \\ t_{\max} &= \max(t_{KP} | t_{fb}) = \max(10 | 12,5) = 12,5 \text{ mm} \\ a &= 4 \text{ mm} \geq a_{\min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} = \sqrt{12,5} - 0,5 = \sqrt{t_{\max}} - 0,5 \end{cases} \\ b_{KP} &= 127 \text{ mm} \\ l_{\text{eff}} &\approx 8 \cdot b_{KP} - 4 \cdot r_b = 8 \cdot 12,7 - 4 \cdot 2,4 = 92 \text{ cm} \\ f_{vw,d} &= 207,8 \text{ N/mm}^2 \\ F_{1,Rd} &= f_{vw,d} \cdot a \cdot l_{\text{eff}} = 20,78 \cdot 0,4 \cdot 92 = 764,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

c) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

$$\begin{aligned} t_{AB} &= 10 \text{ mm} \\ d &= 16 \text{ mm} \\ d_0 &= d + 2 \text{ mm} = 16 + 2 = 18 \text{ mm} \\ e_1 &= 75 \text{ mm} > 21,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 18 = 1,2 \cdot d_0 \\ e_2 &= 35 \text{ mm} > 21,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 18 = 1,2 \cdot d_0 \\ p_1 &= 110 \text{ mm} \begin{cases} > 39,6 \text{ mm} = 2,2 \cdot 18 = 2,2 \cdot d_0 \\ < 140 \text{ mm} = \min(14 \cdot 10 | 200) = \min(14 \cdot t_{AB} | 200 \text{ mm}) \end{cases} \end{aligned}$$

→ Die Rand- und Lochabstände für die Schrauben sind eingehalten.

Die Abmessungen der Kopfplatten sind mit „KP“ und die des Anschlussblechs mit „AB“ indiziert.

siehe Skizze in Abschnitt 1.1

Normalkraft der Diagonale für LK 3

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

Dicke der Kopfplatten

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

Breite einer Kopfplatte

effektive Länge der 8 Kehlnähte

Scherfestigkeit der Schweißnähte, vgl. Abschnitt 3.2.1 h)

Tragfähigkeit der Kehlnähte im Sinne von DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

Dicke des Anschlussblechs

Nenn Durchmesser der Schrauben (d) und Loch Durchmesser (d_0) gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

Randabstand \parallel zur Krafrichtung

Randabstand \perp zur Krafrichtung

Lochabstand \parallel zur Krafrichtung

d) Grenzabscherkraft der Schraubengruppe, $F_{Rd,2}$

$$\begin{aligned} n &= 2 \\ A_s &= 1,57 \text{ cm}^2 \\ \alpha_v &= 0,6 \\ F_{v,Rd} &= \alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 1,57 \cdot 80 / 1,25 = 60,29 \text{ kN} \\ F_{Rd,2} &= n \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot 60,29 = 120,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

Schrauben mit Gewinde bis zum Kopf!

Anzahl der Schrauben in der Gruppe

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Grenzabscherkraft einer Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

e) Lochleibungstragfähigkeit des Anschlussblechs, $F_{Rd,3}$

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \min(e_1 / (3d_0) \mid p_1 / (3d_0) - 0,25) \\ &= \min(75 / (3 \cdot 18) \mid 110 / (3 \cdot 18) - 0,25) = 1,39 \\ k_1 &= \min(2,8 \cdot e_2 / d_0 - 1,7 \mid 2,5) = \min(2,8 \cdot 35 / 18 - 1,7 \mid 2,5) = 2,5 \\ \alpha_b &= \min(f_{ub} / f_u \mid \alpha_d \mid 1,0) = \min(800 / 360 \mid 1,39 \mid 1,0) = 1,0 \\ F_{b,Rd} &= \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_{AB}}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 1,0}{1,25} = 115,2 \text{ kN} \\ F_{Rd,3} &= n \cdot F_{b,Rd} = 2 \cdot 115,2 = 230,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände in Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Grenzlochleibungskraft der Schrauben, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Absatz 3.7.1 (1)

f) Blockversagen des Anschlussblechs, $F_{Rd,4}$

$$\begin{aligned} A_{AB,nt} &= t_{AB} \cdot \left(e_2 - \frac{d_0}{2} \right) = 1,0 \cdot \left(3,5 - \frac{1,8}{2} \right) = 2,6 \text{ cm}^2 \\ A_{AB,nv} &= t_{AB} \cdot \left(e_1 + p_1 - \frac{3}{2} \cdot d_0 \right) = 1,0 \cdot \left(7,5 + 11 - \frac{3}{2} \cdot 1,8 \right) = 15,8 \text{ cm}^2 \\ F_{Rd,4} &= \frac{f_u \cdot A_{AB,nt}}{2 \cdot \gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{AB,nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{36 \cdot 2,6}{2 \cdot 1,25} + \frac{23,5 \cdot 15,8}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 251,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

vgl. Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.5 h)

zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche entlang der Schraubenreihe

schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche entlang der Schraubenreihe

Widerstand gegen Blockversagen einer Schraubengruppe unter exzentrischer Belastung, DIN EN 1993-1-8, Glg. (3.10)

g) Tragfähigkeit des Anschlussblechs für Querkraft und Torsion, $F_{Rd,5}$

$$\begin{aligned} e_t &= 0,5 \cdot (t_{AB} + t_{KP}) = 0,5 \cdot (10 + 10) = 10 \text{ mm} \\ A_{AB} &= h_{AB} \cdot t_{AB} = 26 \cdot 1 = 26 \text{ cm}^2 \\ W_{y,AB} &= h_{AB}^2 \cdot t_{AB} / 6 = 26^2 \cdot 1 / 6 = 112,67 \text{ cm}^3 \\ W_{t,AB} &= h_{AB} \cdot t_{AB}^2 / 3 = 26 \cdot 1^2 / 3 = 8,67 \text{ cm}^3 \\ \tau_{Ed} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{Ed}}{A_{AB}} + \frac{F_{Ed} \cdot e_t}{W_{t,AB}} = \frac{3}{2} \cdot F_{Ed} \cdot \frac{t_{AB} + 2 \cdot e_t}{h_{AB} \cdot t_{AB}^2} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \rightarrow F_{Rd,5} \\ F_{Rd,5} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{h_{AB} \cdot t_{AB}^2}{t_{AB} + 2 \cdot e_t} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{26 \cdot 1^2}{2 \cdot 1 + 1} \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 78,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Exzentrizität der Kraft F_{Ed} in Dickenrichtung des Anschlussblechs

Fläche, Widerstandsmoment für Biegung und Widerstandsmoment für Torsion des Anschlussblechs

Die Tragfähigkeit ergibt sich aus der Begrenzung der Schubspannung im Schwerpunkt des Anschlussblechs, berechnet nach Elastizitätstheorie, auf den Bemessungswert der Schubfestigkeit.

h) Tragfähigkeit des Anschlussblechs für Biegung und Torsion, $F_{Rd,6}$

$$e_x = 125 \text{ mm}$$

$$\alpha_3 = 0,815 \cdot \tanh \frac{\pi \cdot h_{AB}}{2 \cdot t_{AB}} - 0,072 = 0,815 \cdot \tanh \frac{\pi \cdot 26}{2 \cdot 1} - 0,072 = 0,743$$

$$\sigma_{v,Ed} = F_{Ed} \cdot \sqrt{(e_x/W_{y,AB})^2 + 3 \cdot (\alpha_3 \cdot e_t/W_{t,AB})^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \rightarrow F_{Rd,6}$$

$$F_{Rd,6} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} / \sqrt{(e_x/W_{y,AB})^2 + 3 \cdot (\alpha_3 \cdot e_t/W_{t,AB})^2}$$

$$= \frac{23,5}{1,0} / \sqrt{\left(\frac{12,5}{112,67}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{0,743 \cdot 1}{8,67}\right)^2} = 126,8 \text{ kN}$$

i) Tragfähigkeit der Schweißnaht zwischen Anschlussblech und Ober-
gurt des Dachbinders, $F_{Rd,7}$

$$t_{fr} = 17 \text{ mm}$$

$$t_{max} = \max(t_{AB}|t_{fr}) = \max(10|17) = 17 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm} \geq a_{min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,6 \text{ mm} = \sqrt{17} - 0,5 = \sqrt{t_{max}} - 0,5 \end{cases}$$

$$A_w = 2 \cdot h_{AB} \cdot a = 2 \cdot 26 \cdot 0,4 = 20,8 \text{ cm}^2$$

$$W_{y,w} = h_{AB} \cdot a \cdot (h_{AB}/3 + t_{AB}) = 26 \cdot 0,4 \cdot (26/3 + 1) = 100,5 \text{ cm}^3$$

$$W_{t,w} = 2 \cdot h_{AB} \cdot t_{AB} \cdot a = 2 \cdot 26 \cdot 1 \cdot 0,4 = 20,8 \text{ cm}^3$$

$$f_{vw,d} = 207,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{vw,d} = F_{Ed} \cdot \sqrt{(e_x/W_{y,w})^2 + (e_t/W_{t,w} + 1/A_w)^2} \leq f_{vw,d} \rightarrow F_{Rd,7}$$

$$F_{Rd,7} = \frac{f_{vw,d}}{\sqrt{\frac{e_x^2}{W_{y,w}^2} + \left(\frac{e_t}{W_{t,w}} + \frac{1}{A_w}\right)^2}} = \frac{20,78}{\sqrt{\frac{12,5^2}{100,5^2} + \left(\frac{1,0}{20,8} + \frac{1}{20,8}\right)^2}} = 132,2 \text{ kN}$$

j) Tragfähigkeitsnachweis für die Verbindung

$$F_{Rd} = \min(F_{Rd,1}|F_{Rd,2}|F_{Rd,3}|F_{Rd,4}|F_{Rd,5}|F_{Rd,6}|F_{Rd,7})$$

$$= \min(764,7|120,6|230,4|251,8|78,4|126,8|132,2) = 78,4 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}/F_{Rd} = 68,3/78,4 = 0,87 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Exzentrizität der Kraft F_{Ed} zur Oberkante des Binderobergurtes

Korrekturfaktor für die Schubspannungen aus Torsion am Blechende, [46] Bild 7.15

Die Tragfähigkeit ergibt sich aus der Begrenzung der Vergleichsspannung am Blechrand auf den Bemessungswert der Streckgrenze.

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

Flanschdicke des Binderobergurtes

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

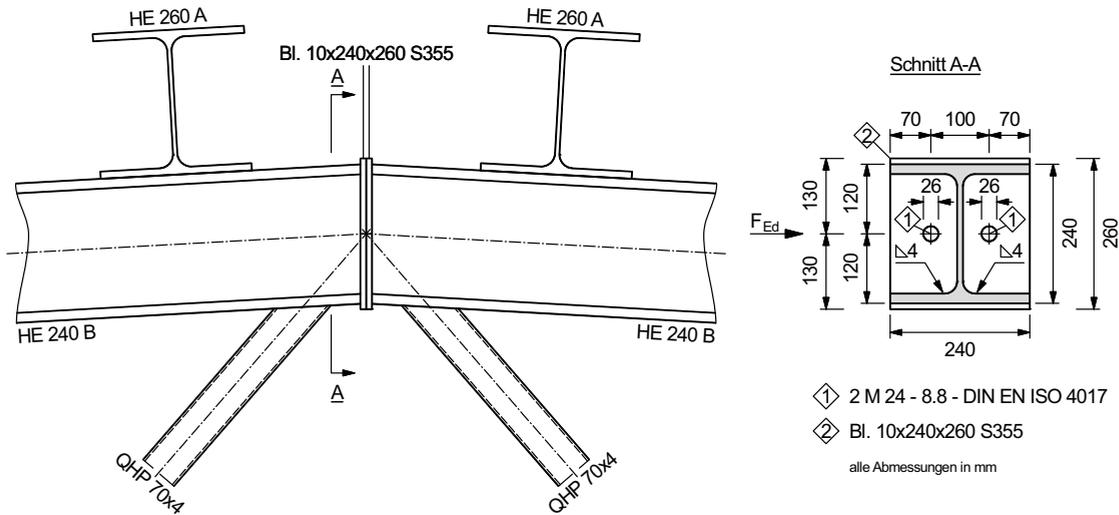
Fläche, Widerstandsmoment für Biegung und Widerstandsmoment für Torsion der Schweißnaht

Bemessungswert der Scherfestigkeit der Kehlnähte, vgl. Abschnitt 3.2.1 h)

Die Tragfähigkeit ergibt sich aus der Begrenzung der Resultierenden $\sigma_{vw,d}$ der Kehlnahtspannungen auf den Bemessungswert der Scherfestigkeit der Kehlnähte.

Beanspruchbarkeit der Verbindung

3.2.3 Montagestoß im Obergurt der Dachbinder



Die Druckkräfte im Obergurt des Dachbinders werden über den Kontakt der Kopfplatten übertragen.

Die Schrauben sind lediglich zur Lagesicherung der Stoßflächen und zur Übertragung der lokalen Ersatzkräfte infolge Imperfektion senkrecht zur Dachbinderebene erforderlich.

Zugkräfte treten in keiner Lastkombination im Montagestoß auf!

Die Querschnittstragfähigkeit der Kopfplatten ist nicht maßgebend für die Beanspruchbarkeit der Verbindung und wird daher nicht weiter betrachtet.

a) Beanspruchung des Anschlusses

$$F_{Ed} = 91,1 \text{ kN}$$

b) Tragfähigkeit der Schweißnähte zwischen den Kopfplatten und den Flanschen der Dachbinderobergurte, $F_{Rd,1}$

$$t_{KP} = 10 \text{ mm}$$

$$t_{fr} = 17 \text{ mm}$$

$$t_{max} = \max(t_{AB} | t_{fr}) = \max(10 | 17) = 17 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm} \geq a_{min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,6 \text{ mm} = \sqrt{17} - 0,5 = \sqrt{t_{max}} - 0,5 \end{cases}$$

$$l_{eff} = 4 \cdot b_r - 4 \cdot r_r - 2 \cdot t_{wr} = 4 \cdot 240 - 4 \cdot 21 - 2 \cdot 10 = 856 \text{ mm}$$

$$\beta_w = 0,9$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 251,5 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{Rd,1} = a \cdot l_{eff} \cdot f_{v,wd} = 0,4 \cdot 85,6 \cdot 25,15 = 861,1 \text{ kN}$$

DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 6.2.7.1 (13) und (14)

Für die Ermittlung der lokalen Ersatzkräfte siehe Abschnitt 2.2.

siehe Abschnitt 2.2

Die Querschnittstragfähigkeit der Kopfplatten wurde in einer Nebenrechnung als ausreichend festgestellt. Die Abmessungen der Kopfplatten sind nachfolgend mit „KP“ und die der Obergurte mit „r“ indiziert.

lokale Ersatzkraft, Lastkombination 1, siehe Abschnitt 2.2

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

Dicke der Kopfplatten

Flanschdicke des Binderobergurtes

größte Blechdicke im Anschluss

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

effektive Schweißnahtlänge

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Kehlnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

c) Grenzabscherkraft der Schraubengruppe, $F_{Rd,2}$

$$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 3,53 \cdot 80 / 1,25 = 135,6 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,2} = 2 \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot 135,6 = 271,2 \text{ kN}$$

d) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

$$d = 24 \text{ mm}$$

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = 24 + 2 = 26 \text{ mm}$$

$$e_1 = 70 \text{ mm} > 31,2 \text{ mm} = 1,2 \cdot 26 = 1,2 \cdot d_0$$

$$e_2 = 130 \text{ mm} > 31,2 \text{ mm} = 1,2 \cdot 26 = 1,2 \cdot d_0$$

$$p_1 = 100 \text{ mm} \begin{cases} > 57,2 \text{ mm} = 2,2 \cdot 26 = 2,2 \cdot d_0 \\ < 140 \text{ mm} = \min(14 \cdot 10 | 200) = \min(14 \cdot t_{KP} | 200 \text{ mm}) \end{cases}$$

→ Die Rand- und Lochabstände für die Schrauben sind eingehalten.

e) Lochleibungstragfähigkeit des Kopfplatten, $F_{Rd,3}$

$$\alpha_d = \min(e_1 / (3d_0) | p_1 / (3d_0) - 0,25)$$

$$= \min(70 / (3 \cdot 26) | 100 / (3 \cdot 26) - 0,25) = 0,89$$

$$k_1 = \min(2,8 \cdot e_2 / d_0 - 1,7 | 2,5) = \min(2,8 \cdot 130 / 26 - 1,7 | 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min(f_{ub} / f_u | \alpha_d | 1,0) = \min(800 / 490 | 0,89 | 1,0) = 0,89$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_{KP}}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,89 \cdot 49 \cdot 2,4 \cdot 1,0}{1,25} = 209,3 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,3} = 2 \cdot F_{b,Rd} = 2 \cdot 209,3 = 418,6 \text{ kN}$$

f) Tragfähigkeitsnachweis für den Anschluss

$$F_{Rd} = \min(F_{Rd,1} | F_{Rd,2} | F_{Rd,3}) = \min(861,1 | 271,2 | 418,6) = 271,2 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} / F_{Rd} = 91,1 / 271,2 = 0,34 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Schrauben mit Gewinde bis zum Kopf!

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

Grenzabscherkraft einer Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

Nenn Durchmesser der Schrauben (d) und Lochdurchmesser (d_0) gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

Randabstand \parallel zur Krafrichtung

Randabstand \perp zur Krafrichtung

Lochabstand \parallel zur Krafrichtung

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände in Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Grenzlochleibungskraft der Schrauben, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Absatz 3.7 (1)

Beanspruchbarkeit des Anschlusses

3.3 Diagonalen des Dachverbandes

3.3.1 Querschnittsklassifikation

alle Wandungen: zweiseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

$$c = d - 2 \cdot t - 2 \cdot r = 120 - 2 \cdot 5 - 2 \cdot 5 = 100 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{100}{5} = 20 < 33 = 33 \cdot 1,0 = 33 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Klasse 1}$$

3.3.2 Bauteilnachweis

Der Stabilitätsnachweis wird als Ersatzstabnachweis für ein druckbeanspruchtes Bauteil geführt:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

Maßgebend ist hier wegen der nachgiebigen Anschlüsse der Diagonalen an die Pfetten der Nachweis gegen Biegeknicken in der Verbandsebene.

Abminderungsfaktor χ für Biegeknicken in der Verbandsebene:

$$L = B \cdot \sqrt{2} = 4,5 \cdot \sqrt{2} = 6,36 \text{ m}$$

$$I = 497,7 \text{ cm}^4$$

$$L_1 = 229 \text{ mm}$$

$$I_1 = 4,22 \text{ cm}^4$$

$$c_2 = \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{L_1}{L} - \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot L_1/L)}{2 \cdot \pi} \right) \left(\frac{I}{I_1} - 1 \right) \right]^{-1}$$

$$= \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{0,229}{6,36} - \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot 0,229/6,36)}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left(\frac{497,7}{4,22} - 1 \right) \right]^{-1} = 0,93$$

$$N_{cr} = c_2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} = 0,93 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 497,7}{636^2} = 237,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A \cdot f_y / N_{cr}} = \sqrt{22,73 \cdot 23,5 / 237,2} = 1,5$$

warmgewalztes Hohlprofil aus S235 \rightarrow Knicklinie a

$$\alpha = 0,21$$

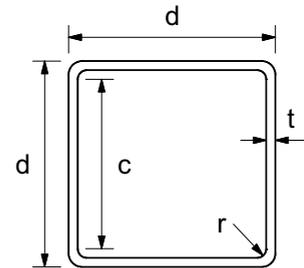
$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$= 0,5 \cdot \left[1 + 0,21 \cdot (1,5 - 0,2) + 1,5^2 \right] = 1,76$$

$$\chi = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right) = \frac{1}{1,76 + \sqrt{1,76^2 - 1,5^2}} = 0,373 < 1$$

QHP 120x5, S 235

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



Ein Stabilitätsnachweis für die Knoten wird in Abschnitt 3.2.1 geführt.

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.46)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.47)

siehe Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2

Netzlänge einer Diagonalen

Trägheitsmoment, [47] S. 61

Länge und Trägheitsmoment des „Ersatzblechs“, siehe Abschnitt 3.2.1 j)

Korrekturfaktor für die Knicklänge zur Erfassung der Anschlussnachgiebigkeit, [53] Bild 1.21

ideale Verzweigungslast für Biegeknicken, [53] Glg. (1.135)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.1

Abminderungsfaktor für Biegeknicken, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

Bauteilnachweis:

$$N_{b,Rd} = 0,373 \cdot 22,73 \cdot 23,5 / 1,1 = 181,1 \text{ kN}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.47)

$$S_{Ed} / N_{b,Rd} = 96,6 / 181,8 = 0,53 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.46)

Der Querschnittsnachweis für Zugbeanspruchung ist nicht maßgebend und wird hier nicht geführt.

Beispiel 1.6: Wandriegel

Inhalt

| | Seite |
|---|-------|
| Aufgabenstellung | 106 |
| 1 System, Querschnitt und Einwirkungen | 106 |
| 1.1 System | 106 |
| 1.2 Querschnitt..... | 106 |
| 1.2.1 Abmessungen und Querschnittswerte | 106 |
| 1.2.2 Materialkennwerte | 106 |
| 1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 107 |
| 1.4 Lastkombinationen, Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 107 |
| 1.4.1 Lastkombination 1 (führende veränderliche Einwirkung: Schnee) | 107 |
| 1.4.2 Lastkombination 2 (führende veränderliche Einwirkung: Wind auf Giebel)..... | 108 |
| 1.5 Lastkombinationen, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit..... | 108 |
| 1.5.1 Lastkombination 3 (führende veränderliche Einwirkung: Schnee) | 108 |
| 1.5.2 Lastkombination 4 (führende veränderliche Einwirkung: Wind auf Giebel)..... | 108 |
| 2 Beanspruchungen | 108 |
| 2.1 Lastkombination 1 | 108 |
| 2.2 Lastkombination 2 | 109 |
| 2.3 Lastkombination 3 | 109 |
| 2.4 Lastkombination 4 | 109 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 109 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 109 |
| 3.2 Querschnittsklassifikation..... | 110 |
| 3.3 Ideales Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken | 110 |
| 3.4 Bauteilnachweise | 111 |
| 3.4.1 Lastkombination 1 | 111 |
| 3.4.2 Lastkombination 2 | 113 |
| 3.5 Querschnittsnachweise | 114 |
| 3.6 Anschluss der Wandriegel an die Längswandstützen..... | 115 |
| 3.6.1 Anschluss der Wandriegel an das Fahnenblech | 116 |
| 3.6.2 Anschluss der Wandriegel an die Stützenkopfplatte | 119 |
| 4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 119 |
| 4.1 Lastkombination 3 | 119 |
| 4.2 Lastkombination 4 | 119 |

Beispiel 1.6: Wandriegel

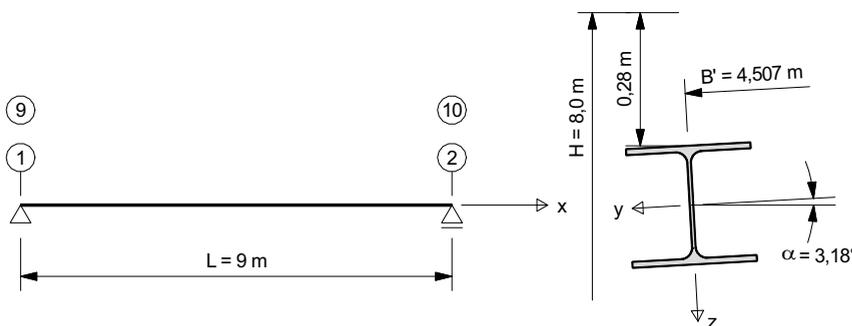
Aufgabenstellung

Für die Wandriegel in den Achsen ⑨ und ⑩, die als Einfeldträger auf den Dachbinderobergurten bzw. den Giebelriegeln aufliegen, sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

Die Nachweise der Tragfähigkeit umfassen auch den Anschluss der Wandriegel an die Längswandstützen.

1 System, Querschnitt und Einwirkungen

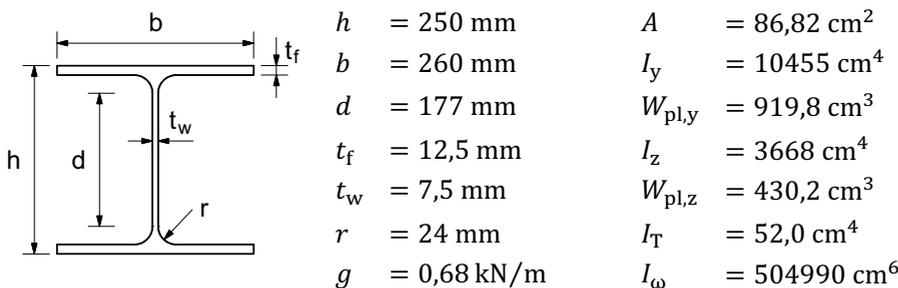
1.1 System



1.2 Querschnitt

HE 260 A, S235 J2

1.2.1 Abmessungen und Querschnittswerte



1.2.2 Materialkennwerte

Streckgrenze: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
 Zugfestigkeit: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 Schubmodul: $G = 81000 \text{ N/mm}^2$
 Querdehnzahl: $\nu = 0,3$

Für die Bezeichnung der Achsen siehe die Vorbemerkungen S. 1.
 Für die Dachbinder siehe Beispiel 1.4.

Die Längswandstützen sind Gegenstand von Beispiel 1.7.

Querschnittsachsen entsprechend DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

Maßgebend für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit sind die Wandriegel neben den Giebelwänden.

L - Spannweite = Binderabstand
 B - Pfettenabstand || zur Grundfläche
 B' - Pfettenabstand || zur Dachfläche
 H - Traufhöhe der Halle, OK Dach
 α - Dachneigung

L, B, H und α entsprechend Vorbemerkungen, S. 1

Profil: DIN 1025-3:1994-03,
 Baustahl: DIN EN 10025-2:2005-02

Bezeichnung der Querschnittsabmessungen nach DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

Querschnittswerte nach [47] S. 34/35

Anmerkung:
 $W_{pl,y}$ bzw. $W_{pl,z}$ wurden aus den in [47] S. 35 angegebenen plastischen Momenten zurückgerechnet.

$$g = \gamma \cdot A = 78,5 \cdot 0,0087 = 0,68 \text{ kN/m}$$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Eigengewicht, Wandriegel: | $g_{0,k} = +0,68 \text{ kN/m} = g$ |
| Eigengewicht, Dachkonstruktion: | $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$ |
| Schnee: | $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$ |
| Windsog, Bereich B: | $w_{e,B} = -0,52 \text{ kN/m}^2$ |
| Windsog, Bereich H: | $w_{e,H} = -0,46 \text{ kN/m}^2$ |

1.4 Lastkombinationen, Grenzzustände der Tragfähigkeit

1.4.1 LK 1 (führende veränderliche Einwirkung: Schnee)

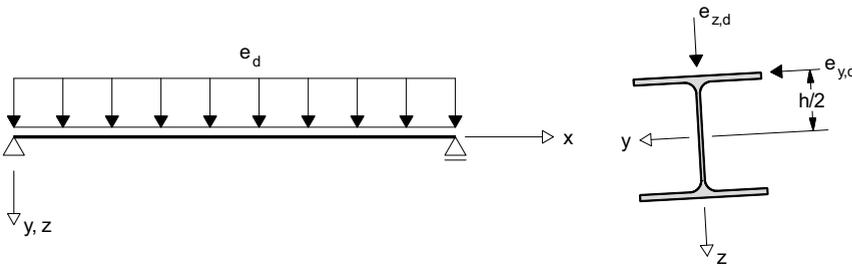
a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

| | |
|---|-------------------------|
| ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ |
| ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ |
| veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: | $\gamma_Q = 1,5$ |

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

| | |
|---------|--------------------|
| Schnee: | $\psi_{0,S} = 0,5$ |
| Wind: | $\psi_{0,W} = 0,6$ |

c) Bemessungswerte der Einwirkungen



$$\begin{aligned}
 h_c &= 360 \text{ mm} \\
 b_z &= 0,5 \cdot (B + h_c) / \cos \alpha = 0,5 \cdot (4,5 + 0,36) / \cos 3,18^\circ = 2,434 \text{ m} \\
 b_y &\approx H/2 = 8,0/2 = 4,0 \text{ m} \\
 g_k &= g_{0,k} + g_{1,k} \cdot b_z = 0,68 + 0,41 \cdot 2,434 = 1,68 \text{ kN/m} \\
 e_{z,d} &= \gamma_{G,sup} \cdot \cos \alpha \cdot g_k + \gamma_Q \cdot b_z \cdot s \cdot \cos^2 \alpha \\
 &= 1,35 \cdot 0,998 \cdot 1,68 + 1,5 \cdot 2,434 \cdot 1,03 \cdot 0,997 = 6,01 \text{ kN/m} \\
 e_{y,d} &= \gamma_{G,sup} \cdot \sin \alpha \cdot g_k + \gamma_Q \cdot (s \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot b_z - \psi_{0,W} \cdot w_{e,B} \cdot b_y) \\
 &= 1,35 \cdot 0,055 \cdot 1,68 + \dots \\
 &\dots + 1,5 \cdot (1,03 \cdot 0,055 \cdot 0,998 \cdot 2,434 + 0,6 \cdot 0,52 \cdot 4,0) = 2,21 \text{ kN/m} \\
 m_{x,d} &= (e_{y,d} - \gamma_{G,sup} \cdot \sin \alpha \cdot g_{0,k}) \cdot h/2 \\
 &= (2,21 - 1,35 \cdot 0,055 \cdot 0,68) \cdot 0,25/2 = 0,27 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

g entsprechend Abschnitt 1.2.1
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.1 b)
 siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

Für die Lastkombinationen wird nachfolgend die Abkürzung „LK“ benutzt.

ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)
 DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)
 DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

DIN EN 1990, Glg. (6.10)

Profilhöhe der Stützen (Beispiel 1.7)

Lasteinzugsbreite für Vertikallasten

Lasteinzugsbreite für Horizontallasten

gesamtes Eigengewicht

Vertikalkomponente ohne Windsog im Bereich H als günstig wirkende veränderliche Einwirkung

Horizontalkomponente

Torsionsmoment aus exzentrischem Lastangriff der Horizontalkomponente

1.4.2 LK 2 (führende veränderliche Einwirkung: Wind auf Giebel)

Bemessungswerte der Einwirkungen:

$$e_{z,d} = \gamma_{G,sup} \cdot \cos \alpha \cdot g_k + \gamma_Q \cdot \psi_{0,S} \cdot b_z \cdot s \cdot \cos^2 \alpha$$

$$= 1,35 \cdot 0,998 \cdot 1,68 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 2,434 \cdot 1,03 \cdot 0,997 = 4,14 \text{ kN/m}$$

$$e_{y,d} = \gamma_{G,sup} \cdot \sin \alpha \cdot g_k + \gamma_Q \cdot (\psi_{0,S} \cdot s \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot b_z - w_{e,B} \cdot b_y)$$

$$= 1,35 \cdot 0,055 \cdot 1,68 + \dots$$

$$\dots + 1,5 \cdot (0,5 \cdot 1,03 \cdot 0,055 \cdot 0,998 \cdot 2,434 + 0,52 \cdot 4,0) = 3,35 \text{ kN/m}$$

$$m_{x,d} = (e_{y,d} - \gamma_{G,sup} \cdot \sin \alpha \cdot g_{0,k}) \cdot h/2$$

$$= (3,35 - 1,35 \cdot 0,68 \cdot 0,055) \cdot 0,25/2 = 0,41 \text{ kNm/m}$$

DIN EN 1990, Glg. (6.10)

Vertikalkomponente ohne Windsog im Bereich H als günstig wirkende veränderliche Einwirkung

Horizontalkomponente

Torsionsmoment aus exzentrischem Lastangriff der Horizontalkomponente

1.5 Lastkombinationen, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

1.5.1 LK 3 (führende veränderliche Einwirkung: Schnee)

Bemessungswert der Einwirkungen (charakteristische Kombination):

$$e_{z,char} = \cos \alpha \cdot g_k + \cos^2 \alpha \cdot s \cdot b_z$$

$$= 0,998 \cdot 1,68 + 0,997 \cdot 1,03 \cdot 2,434 = 4,18 \text{ kN/m}$$

DIN EN 1990, Glg. (6.14b)

Vertikalkomponente ohne Windsog im Bereich H als günstig wirkende veränderliche Einwirkung

→ Die Horizontalkomponente in der Lastkombination 4 ist größer und wird hier nicht ermittelt.

1.5.2 LK 4 (führende veränderliche Einwirkung: Wind auf Giebel)

Bemessungswert der Einwirkung (charakteristische Kombination):

$$e_{y,char} \approx w_{e,B} \cdot b_y = 0,52 \cdot 4 = 2,08 \text{ kN/m}$$

DIN EN 1990, Glg. (6.14b)

Horizontalkomponente

2 Beanspruchungen

2.1 Lastkombination 1

$$M_{y,Ed} = e_{z,d} \cdot L^2/8 = 6,01 \cdot 9^2/8 = 60,9 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = e_{y,d} \cdot L^2/8 = 2,21 \cdot 9^2/8 = 22,4 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = e_{z,d} \cdot L/2 = 6,01 \cdot 9/2 = 27,0 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = e_{y,d} \cdot L/2 = 2,21 \cdot 9/2 = 9,9 \text{ kN}$$

$$\lambda_w = \sqrt{(G \cdot I_T)/(E \cdot I_\omega)}$$

$$= 10^2 \cdot \sqrt{(8100 \cdot 52)/(21000 \cdot 504990)} = 0,63 \text{ m}^{-1}$$

$$B_{Ed} = \frac{m_{x,d}}{\lambda_w^2} \left[1 - \frac{2 \cdot \sinh(\lambda_w \cdot L/2)}{\sinh(\lambda_w \cdot L)} \right] = \frac{0,27}{0,63^2} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \sinh(0,63 \cdot 9/2)}{\sinh(0,63 \cdot 9)} \right]$$

$$= 0,6 \text{ kNm}^2$$

Bemessungswerte der Biegemomente um die y-Achse bzw. um die z-Achse in Trägermitte

Bemessungswerte der Querkräfte parallel zum Steg bzw. zu den Gurten an den Auflagern

Abklingfaktor, [54] S. 8.16

Bemessungswert des Wölbmoments in Trägermitte, [54] S. 8.18

$$T_{t,Ed} = m_{x,d} \left[\frac{L}{2} + \frac{1 - \cosh(\lambda_w \cdot L)}{\lambda_w \cdot \sinh(\lambda_w \cdot L)} \right] = 0,27 \cdot \left[\frac{9}{2} + \frac{1 - \cosh(0,63 \cdot 9)}{0,63 \cdot \sinh(0,63 \cdot 9)} \right]$$

$$= 0,79 \text{ kNm}$$

$$T_{w,Ed} = -m_{x,d} \frac{1 - \cosh(\lambda_w \cdot L)}{\lambda_w \cdot \sinh(\lambda_w \cdot L)} = -0,27 \frac{1 - \cosh(0,63 \cdot 9)}{0,63 \cdot \sinh(0,63 \cdot 9)} = 0,43 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -68,3 \text{ kN}$$

Bemessungswert des St. Venant'schen Torsionsmomentes an den Auflagern, [54] S. 8.18

Bemessungswert des Wölbtorsionsmomentes an den Auflagern, [54] S. 8.18

Bemessungswerte der Druckkraft aus Lastkombination 3 des Dachverbands, siehe Beispiel 1.5, Abschnitt 2.2

2.2 Lastkombination 2

Die Schnittgrößen sind, wie für die Lastkombination 1 dargestellt, zu ermitteln. Es werden hier nur die Ergebnisse angegeben:

$$M_{y,Ed} = 41,9 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 33,9 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = 18,6 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = 15,1 \text{ kN}$$

$$B_{Ed} = 0,92 \text{ kNm}^2$$

$$T_{t,Ed} = 1,21 \text{ kNm}$$

$$T_{w,Ed} = 0,65 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -68,3 \text{ kN}$$

Für die Normalkraft wird wie für die Lastkombination 1 der Wert, der sich im Dachverband ergibt, auf der sicheren Seite liegend angesetzt, um den Aufwand für die Bauteilnachweise zu reduzieren, siehe Abschnitt 3.4.

2.3 Lastkombination 3

$$\delta_{z,char} = \frac{5}{384} \frac{e_{z,char} \cdot L^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \frac{4,17 \cdot 10^{-2} \cdot 900^4}{21000 \cdot 10455} = 1,6 \text{ cm}$$

vertikale Durchbiegung in Feldmitte

2.4 Lastkombination 4

$$\delta_{y,char} = \frac{5}{384} \frac{e_{y,char} \cdot L^4}{E \cdot I_z} = \frac{5}{384} \frac{2,08 \cdot 10^{-2} \cdot 900^4}{21000 \cdot 3668} = 2,3 \text{ cm}$$

horizontale Ausbiegung in Feldmitte

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

| | |
|---|----------------------|
| elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: | $\gamma_{M0} = 1,0$ |
| Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): | $\gamma_{M1} = 1,1$ |
| Bruchversagen von zugbeanspruchten Querschnitten: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschraubten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anmerkung

3.2 Querschnittsklassifikation

Flansche: einseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

$$c = (b - t_w)/2 - r = (260 - 7,5)/2 - 24 = 102,3 \text{ mm}$$

$$c/t = 102,3/12,5 = 8,2 < 9 = 9 \cdot 1 = 9\varepsilon \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Steg: zweiseitig gestützt, unter Druck- und Biegebeanspruchung

$$c = h - 2 \cdot (t_f + r) = 250 - 2 \cdot (12,5 + 24) = 177 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\gamma_{M0} \cdot N_{Ed}}{c \cdot t_w \cdot f_y} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1,0 \cdot 68300}{177 \cdot 7,5 \cdot 235} \right) = 0,61 > 0,5$$

$$c/t = 177/7,5 = 23,6 < 57,1 = \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,61 - 1} = \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Querschnitt: höchste Klasse von Flanschen oder Steg \rightarrow Klasse 1

3.3 Ideales Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken

Die Drehbettung der Wandriegel durch die Trapezprofilbleche der Dachkonstruktion bleibt bei der Bestimmung des idealen Biegedrillknickmomentes unberücksichtigt.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k_z \cdot L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z \cdot L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$= C_1 \cdot N_{cr,z} \cdot \left[\sqrt{c^2 + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$C_1 = 1,12$$

$$C_2 = 0,45$$

$$k_z = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$z_g = h/2 = 250/2 = 125 \text{ mm}$$

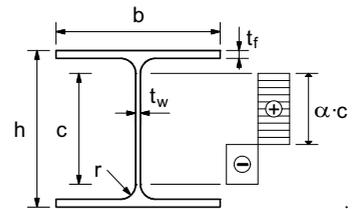
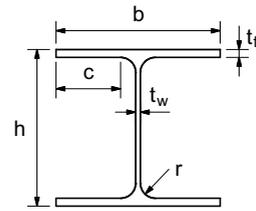
$$C_2 z_g = 0,45 \cdot 125 = 56,25 \text{ mm}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k_z \cdot L)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3668}{(1,0 \cdot 900)^2} = 938,6 \text{ kN}$$

$$c^2 = \left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{GI_t}{N_{cr,z}} = \frac{504990}{3668} + \frac{8100 \cdot 52}{938,6} = 586,4 \text{ cm}^2$$

$$M_{cr} = 1,12 \cdot 938,6 \cdot \left(\sqrt{586,4 + 5,625^2} - 5,625 \right) \cdot 10^{-2} = 202,2 \text{ kNm}$$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



Druckspannungen positiv!

erforderlich für die Bauteilnachweise

In Beispiel 1.3, Abschnitt 3.4.1 ist dargestellt, wie die Drehbettung über ein modifiziertes Torsionsträgheitsmoment erfasst werden kann.

ideales Biegedrillknickmoment eines gabelgelagerten Einfeldträgers nach [40], Glg. (307)

Beiwerte für konstante Linienlast nach [40], Tabelle 65

gelenkige Lagerung um die z-Achse

freie Verwölbung der Stabendenden

z-Koordinate des Lastangriffspunktes, positiv **oberhalb** des Schubmittelpunktes

ideale Verzweigungslast für Knicken um die z-Achse

c ist der Drehradius des Querschnitts.

ideales Biegedrillknickmoment

3.4 Bauteilnachweise

3.4.1 Lastkombination 1

Der Stabilitätsnachweis wird mit Ersatzstabnachweisen für ein auf Druck und Biegung beanspruchtes Bauteil geführt:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$$

a) charakteristische Werte der Querschnittstragfähigkeiten

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 86,82 \cdot 23,5 = 2040 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 919,8 \cdot 23,5/100 = 216 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 430,2 \cdot 23,5/100 = 101 \text{ kNm}$$

b) Abminderungsbeiwert χ_y für Biegeknicken um die y-Achse

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_y/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 10455/900^2 = 2675 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{2040/2675} = 0,87$$

$$\left. \begin{array}{l} h/b = 250/260 = 0,96 < 1,2 \\ t_f = 12,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie b} \rightarrow \alpha = 0,34$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,87 - 0,2) + 0,87^2] = 0,99$$

$$\chi_y = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2} \right) = 1 / \left(0,99 + \sqrt{0,99^2 - 0,87^2} \right) = 0,68 < 1$$

c) Abminderungsbeiwert χ_z für Biegeknicken um die z-Achse

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot EI_z/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 3668/900^2 = 938,6 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{N_{Rk}/N_{cr}} = \sqrt{2040/938,6} = 1,47$$

$$\left. \begin{array}{l} h/b = 250/260 = 0,96 < 1,2 \\ t_f = 12,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Knicklinie c} \rightarrow \alpha = 0,49$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,47 - 0,2) + 1,47^2] = 1,89$$

$$\chi_z = 1 / \left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2} \right) = 1 / \left(1,89 + \sqrt{1,89^2 - 1,47^2} \right) = 0,32 < 1$$

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (4) und Glg. (6.61) und (6.62)

Die Momente $\Delta M_{y,Ed}$ und $\Delta M_{z,Ed}$ aus der Verschiebung der Querschnittsachsen sind nur für Klasse-4-Querschnitte relevant.
Alle anderen Parameter werden weiter unten erläutert und berechnet.

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.7

Normalkraftbeanspruchbarkeit

Momentenbeanspruchbarkeiten für Biegung um die y- bzw. z-Achse

ideale Verzweigungslast für Knicken um die y-Achse

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie b, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

ideale Verzweigungslast für Knicken um die z-Achse

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

Imperfektionsbeiwert für Knicklinie c, DIN EN 1993-1-1, Tabellen 6.1 und 6.2

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

d) Abminderungsbeiwert χ_{LT} für Biegedrillknicken

Neben dem allgemeinen Verfahren (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.2) gibt es für die Berechnung des Abminderungsbeiwertes χ_{LT} das Verfahren für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.3), das hier angewendet wird.

$$M_{cr} = 202,2 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{M_{y,Rk}/M_{cr}} = \sqrt{216/202,2} = 1,03 > 0,4 = \bar{\lambda}_{LT,0}$$

$$h/b = 250/260 = 0,96 < 2 \rightarrow \text{Biegedrillknicklinie b}$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\beta = 0,75$$

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \\ &= 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (1,03 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,03^2 \right] = 1,0 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,0 + \sqrt{1,0^2 - 0,75 \cdot 1,03^2}} = 0,69$$

$$\chi_{LT} = 0,69 < \begin{cases} 1,0 \\ 0,94 = 1/1,03^2 = 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{cases}$$

siehe Abschnitt 3.3

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

Schlankeitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.2 (1)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.5

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.3

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken gewalzter Querschnitte, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.57)

Der Abminderungsbeiwert χ_{LT} darf zur Berücksichtigung der Momentenverteilung wie unten angegeben modifiziert werden, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (2).

e) modifizierter Abminderungsbeiwert $\chi_{LT,mod}$ für Biegedrillknicken

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} = \frac{1}{\sqrt{1,12}} = 0,945$$

$$\begin{aligned} f &= 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \leq 1 \\ &= 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,945) \cdot \left[1 - 2,0 \cdot (1,03 - 0,8)^2 \right] = 0,975 < 1 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,69}{0,975} = 0,71 < \begin{cases} 1,0 \\ 0,94 = 1/1,03^2 = 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{cases}$$

Korrekturbeiwert für die Momentenverteilung mit C_1 nach Abschnitt 3.3.2, DIN EN 1993-1-1/NA, Glg. (NA/4)

Modifikationsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (2)

modifizierter Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken gewalzter Querschnitte, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.58)

f) Interaktionsfaktoren k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz}

DIN EN 1993-1-1 enthält für die Berechnung der Interaktionsfaktoren das Alternativverfahren 1 (Anhang A) und das Alternativverfahren 2 (Anhang B). Letzteres wird an dieser Stelle verwendet.

DIN EN 1993-1-1, Anhang B

Nach DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.3.3(5) Anmerkung 2 dürfen beide Alternativverfahren angewendet werden.

$$C_{my} = 0,95$$

$$C_{mz} = 0,95$$

$$C_{mLT} = 0,95$$

äquivalente Momentenbeiwerte für Biegeknicke um die y-Achse bzw. um die z-Achse und Biegedrillknicken, DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.3

$$n_y = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed,1} / (\chi_y \cdot N_{RK}) = 1,1 \cdot 68,3 / (0,68 \cdot 2040) = 0,05$$

$$n_z = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed,1} / (\chi_z \cdot N_{RK}) = 1,1 \cdot 68,3 / (0,32 \cdot 2040) = 0,12$$

$$a_y = \min(\bar{\lambda}_y - 0,2 | 0,8) = \min(0,87 - 0,2 | 0,8) = 0,67$$

$$a_z = \min(2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6 | 1,4) = \min(2 \cdot 1,47 - 0,6 | 1,4) = 1,4$$

$$a_{LT} = \min(0,1 \cdot \bar{\lambda}_z | 0,1) = \min(0,1 \cdot 1,47 | 0,1) = 0,1$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + a_y \cdot n_y) = 0,95 \cdot (1 + 0,67 \cdot 0,05) = 0,98$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + a_z \cdot n_z) = 0,95 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,12) = 1,11$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,11 = 0,67$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{a_{LT} \cdot n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 \cdot 0,12}{0,95 - 0,25} = 0,98$$

g) Ersatzstabnachweise

Das Wölbmoment B_{Ed} wird vereinfachend durch einen zusätzlichen Anteil für das Biegemoment um die z-Achse erfasst.

$$m_y = \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT,mod} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{60,9}{0,71 \cdot 216 / 1,1} = 0,44$$

$$m_z = \frac{M_{z,Ed} + 2 \cdot B_{Ed} / (h - t_f)}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{22,4 + 2 \cdot 0,6 / (0,25 - 0,0125)}{101 / 1,1} = 0,30$$

$$n_y + k_{yy} \cdot m_y + k_{yz} \cdot m_z = 0,05 + 0,98 \cdot 0,44 + 0,67 \cdot 0,30 = 0,68 < 1,0$$

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z = 0,12 + 0,98 \cdot 0,44 + 1,11 \cdot 0,30 = 0,88 < 1,0$$

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

3.4.2 Lastkombination 2

Der Bauteilnachweis wird wie in Abschnitt 3.4.1 geführt.

$$m_y = \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT,mod} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{41,9}{0,71 \cdot 216 / 1,1} = 0,30$$

$$m_z = \frac{M_{z,Ed} + 2B_{Ed} / (h - t_f)}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{33,9 + 2 \cdot 0,92 / (0,25 - 0,0125)}{101 / 1,1} = 0,45$$

$$n_y + k_{yy} \cdot m_y + k_{yz} \cdot m_z = 0,05 + 0,98 \cdot 0,3 + 0,67 \cdot 0,45 = 0,65 < 1,0$$

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z = 0,12 + 0,98 \cdot 0,3 + 1,11 \cdot 0,45 = 0,91 < 1,0$$

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

Ausnutzungsgrade für Biegeknicke um die y-Achse bzw. um die z-Achse

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.2

[50] Abschnitt 8.12.4 c)

Ausnutzungsgrad für Biegedrillknicken

Ausnutzungsgrad für Biegung um die z-Achse

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.61)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.62)

Ausnutzungsgrad für Biegedrillknicken

Ausnutzungsgrad für Biegung um die z-Achse

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.61)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.62)

3.5 Querschnittsnachweise

Zusätzlich zu den Ersatzstabnachweisen sind an den Bauteilenden Querschnittsnachweise zu führen.

Das Wölbtorsionsmoment $T_{w,Ed}$ ist an den Auflagern sehr gering, wird aber der Vollständigkeit halber berücksichtigt.

Vereinfachend werden die Querschnittsnachweise nach der Elastizitätstheorie mit den maximalen Schnittgrößen aus Lastkombination 1 und 2 geführt.

a) Beanspruchungen infolge St. Venant'schem Torsionsmoment

$$\tau_{t,f,Ed} = T_{t,Ed} \cdot t_f / I_t = 10 \cdot 121 \cdot 1,25 / 52 = 29,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{t,w,Ed} = T_{t,Ed} \cdot t_w / I_t = 10 \cdot 121 \cdot 0,75 / 52 = 17,5 \text{ N/mm}^2$$

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (2)

siehe Abschnitt 2.1 und 2.2

Nachweise nach Elastizitätstheorie für alle Querschnittsklassen zulässig, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2 (4)

Schubspannung in den Flanschen

Schubspannung im Steg

b) Beanspruchung infolge Wölbtorsionsmoment

$$\omega_M = 0,25 \cdot (h - t_f) \cdot b = 0,25 \cdot (25 - 1,25) \cdot 26 = 154,4 \text{ cm}^2$$

$$\tau_{w,f,Ed} = \frac{T_{w,Ed} \cdot \omega_M \cdot b}{I_\omega \cdot 4} = 10 \cdot \frac{65 \cdot 154,4}{504990} \cdot \frac{26}{4} = 1,29 \text{ N/mm}^2$$

Hauptverwölbung, [54] S. 8.19

Schubspannung in den Flanschen, [54] S. 8.19

c) Druck- und Biegebeanspruchung

$$\sigma_{N,Ed} = |N_{Ed}| / A = 10 \cdot 68,3 / 86,82 = 7,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{M,Ed} = 0,25 \cdot h^2 \cdot |N_{Ed}| / I_y = 10 \cdot 0,25 \cdot 25^2 \cdot 68,3 / 10455 = 10,2 \text{ N/mm}^2$$

Druckspannung im Querschnitt

Biegespannung am Querschnittsrand infolge der Anschlusszentrität, siehe Skizze in Abschnitt 3.6

d) Kontrolle der Schubslankheit des Steges

$$\eta = 1,2$$

$$h_w = h - t_f = 250 - 12,5 = 237,5 \text{ mm}$$

$$h_w / t_w = 237,5 / 7,5 = 31,7 < 60 = 7 \cdot 2 \cdot 1 / 1,2 = 72 \cdot \varepsilon / \eta$$

→ Nachweis gegen Schubbeulen des Steges nicht erforderlich!

DIN EN 1993-1-5, Absatz 5.1 (2)

Stegblechhöhe (Mittellinienmodell)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.22)

e) Querkraftbeanspruchung des Steges

$$A_w = h_w \cdot t_w = 23,75 \cdot 0,75 = 17,8 \text{ cm}^2$$

$$A_f = b \cdot t_f = 26 \cdot 1,25 = 32,5 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A_f}{A_w} = \frac{32,5}{17,8} = 1,83 > 0,6 \rightarrow \tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{A_w} = 10 \cdot \frac{27,0}{17,8} = 15,2 \text{ N/mm}^2$$

Stegblech- und Flanschfläche, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.6 (5)

Schubspannung im Steg, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.21)

f) Querkraftbeanspruchung der Flansche

$$\tau_{y,Ed} \approx 1,5 \cdot \frac{V_{y,Ed}}{2 \cdot A_f} = 1,5 \cdot 10 \cdot \frac{15,1}{2 \cdot 32,5} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

Schubspannung in den Flanschen

g) Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für den Steg

$$\tau_{Ed} = \tau_{z,Ed} + \tau_{t,w,Ed} = 15,2 + 17,5 = 32,7 \text{ N/mm}^2$$

resultierende Schubspannung im Steg

$$\sigma_{v,Ed} = (\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2)^{0,5} = \sqrt{7,9^2 + 3 \cdot 32,7^2} = 57,2 \text{ N/mm}^2$$

Vergleichsspannung im Steg

$$\gamma_{M0} \cdot \sigma_{v,Ed} / f_y = 1,0 \cdot 57,2 / 235 = 0,24 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

h) Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für die Flansche

$$\sigma_{Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{M,Ed} = 7,9 + 10,2 = 18,1 \text{ N/mm}^2$$

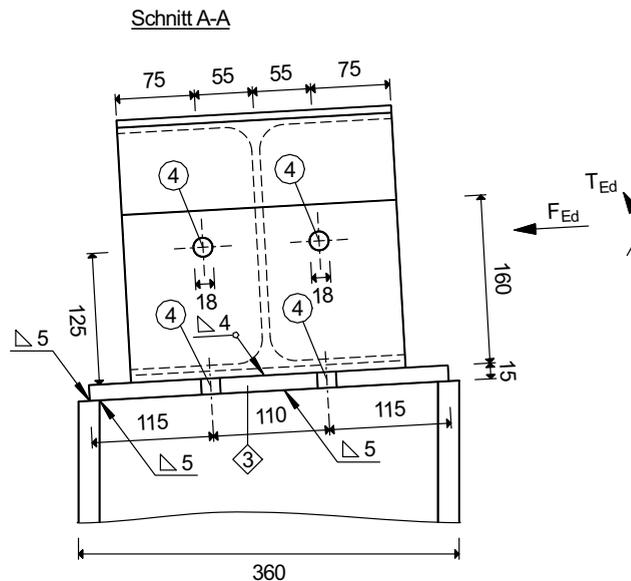
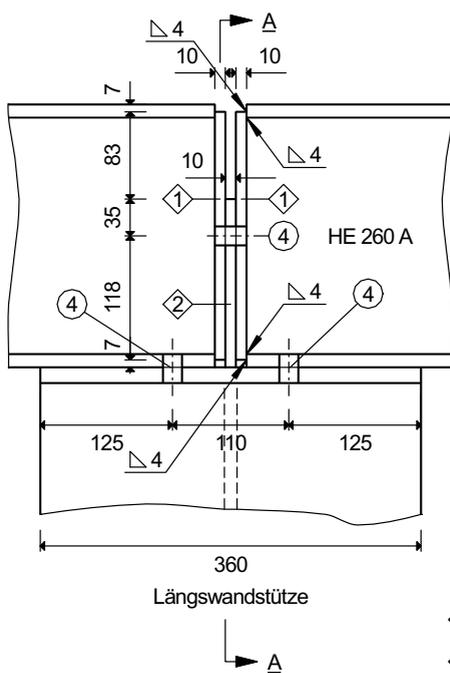
$$\tau_{Ed} = \tau_{y,Ed} + \tau_{t,f,Ed} + \tau_{w,f,Ed} = 3,5 + 29,1 + 1,29 = 33,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{v,Ed} = (\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2)^{0,5} = \sqrt{18,1^2 + 3 \cdot 33,9^2} = 61,4 \text{ N/mm}^2$$

Vergleichsspannung in den Flanschen

$$\gamma_{M0} \cdot \sigma_{v,Ed} / f_y = 1,0 \cdot 61,4 / 235 = 0,26 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.6 Anschluss der Wandriegel an die Längswandstützen



- ① FI. 10x236x260 S235 ② FI. 10x160x260 S235
- ③ FI. 15x340x360 S275 ④ M16 - 8.8 - DIN EN ISO 4017

Die Kopfplatten der Wandriegel sind mit dem an die Kopfplatte der Längswandstütze angeschweißten Fahnenblech verschraubt.

Die Durchleitung der Normalkräfte der Wandriegel erfolgt über die geschraubte Verbindung zwischen den unteren Wandriegelflanschen und der Kopfplatte der Stütze.

Das Fahnenblech ist durch die Anordnung der Schrauben in der Schwerachse der Wandriegel und die an den Stabenden der Wandriegel planmäßig vorhandenen Torsionsmomente neben Schub auch auf Biegung um die starke Querschnittsachse beansprucht.

3.6.1 Anschluss der Wandriegel an das Fahnenblech

a) Beanspruchungen

$$F_{Ed} = 2 \cdot V_{y,Ed} = 2 \cdot 15,1 = 30,2 \text{ kN}$$

$$T_{Ed} = 2 \cdot (T_{t,Ed} + T_{w,Ed}) = 2 \cdot (121 + 65) = 372 \text{ kNcm}$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot h/2 + T_{Ed} = 30,2 \cdot 25/2 + 372 = 750 \text{ kNcm}$$

b) Nachweis der Tragfähigkeit für die Schweißnähte zwischen den Kopfplatten und den Wandriegelflanschen

$$t_{KB} = 10 \text{ mm}$$

$$t_{\max} = \max(t_{KB} | t_f) = \max(10 | 12,5) = 12,5 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm} > a_{\min} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,03 \text{ mm} = \sqrt{12,5} - 0,5 = \sqrt{t_{\max}} - 0,5 \end{cases}$$

$$l_{\text{eff}} = 2 \cdot b - 2 \cdot r - t_f = 2 \cdot 260 - 2 \cdot 24 - 7,5 = 464,5 \text{ mm}$$

$$\beta_w = 0,8$$

$$f_{Vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0,8 \cdot 1,25} = 207,8 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = f_{Vw,d} \cdot a = 207,8 \cdot 0,4 = 8,31 \text{ kN/cm}$$

$$F_{w,Ed} \approx \frac{1}{l_{\text{eff}}} \cdot \left(\frac{F_{Ed}}{2} + \frac{T_{Ed}}{h - t_f} \right) = \frac{1}{464,5} \cdot \left(\frac{30,2}{2} + \frac{370}{25 - 1,25} \right) = 0,66 \text{ kN/cm}$$

$$F_{w,Ed} / F_{w,Rd} = 0,66 / 8,31 = 0,08 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

c) Kontrolle der Rand- und Lochabstände der Schrauben

$$t_{FB} = 10 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 75 \text{ mm} > 21,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 18 = 1,2 \cdot d_0$$

$$e_2 = 35 \text{ mm} > 21,6 \text{ mm} = 1,2 \cdot 18 = 1,2 \cdot d_0$$

$$p_1 = 110 \text{ mm} \begin{cases} > 39,6 \text{ mm} = 2,2 \cdot 18 = 2,2 \cdot d_0 \\ < 140 \text{ mm} = \min(14 \cdot 10 | 200) = \min(14 \cdot t_{FB} | 200 \text{ mm}) \end{cases}$$

→ Die Rand- und Lochabstände für die Schrauben sind eingehalten.

Die Abmessungen der Wandriegelkopfplatten sind nachfolgend mit „KB“ indiziert.

Die Exzentrizität der Normalkraft ist in den Querschnittsnachweisen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.5 c)) und für die Bauteilnachweise unbedeutend.

Die Abmessungen des Fahnenblechs sind nachfolgend mit „FB“ und die der Stützenkopfplatte mit „p“ indiziert.

Maßgebend ist die Lastkombination 2!

einwirkende Horizontalkraft

einwirkendes Torsionsmoment

resultierendes Biegemoment

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

Dicke der Wandriegelkopfplatten

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

effektive Schweißnahtlänge

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Bemessungswerte der Scherfestigkeit und der Tragfähigkeit je Längeneinheit der Kehlnähte DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4) und Glg. (4.3)

Bemessungswert der einwirkenden Kraft je Längeneinheit

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.3

Dicke des Fahnenblechs

Nenn Durchmesser der Schrauben (d) und Lochdurchmesser (d_0) gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 11

Randabstand \parallel zur Krafrichtung

Randabstand \perp zur Krafrichtung

Lochabstand \parallel zur Krafrichtung

d) Nachweis der Abschertragfähigkeit der Schrauben

$$\begin{aligned}
 f_{ub} &= 800 \text{ N/mm}^2 \\
 A_s &= 1,57 \text{ cm}^2 \\
 \alpha_v &= 0,6 \\
 n_v &= 2 \\
 F_{v,Rd} &= \frac{\alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 1,57 \cdot 80}{1,25} = 60,29 \text{ kN} \\
 F_{v,Ed} &= \sqrt{F_{Ed}^2/4 + T_{Ed}^2/p_1^2} = \sqrt{30,2^2/4 + 372^2/11^2} = 37,0 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_{v,Ed}/(n_v \cdot F_{v,Rd}) = 37,0/(2 \cdot 60,29) = 0,31 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

e) Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit des Fahnenblechs

$$\begin{aligned}
 \alpha_d &= \min\left(\frac{0,33 \cdot e_1/d_0}{0,33 \cdot p_1/d_0 - 0,25}\right) = \min\left(\frac{0,33 \cdot 75/18}{0,33 \cdot 110/18 - 0,25}\right) = 1,39 \\
 k_1 &= \min\left(\frac{2,8 \cdot e_2/d_0 - 1,7}{2,5}\right) = \min\left(\frac{2,8 \cdot 35/18 - 1,7}{2,5}\right) = 2,5 \\
 \alpha_b &= \min(f_{ub}/f_u | \alpha_d | 1,0) = \min(800/360 | 1,39 | 1,0) = 1,0 \\
 F_{b,Rd} &= \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_{FB}}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 1,0}{1,25} = 115,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_{v,Ed}/F_{b,Rd} = 37,0/115,2 = 0,32 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

f) Nachweis gegen Blockversagen des Fahnenblechs

Der Nachweis wird für das Zusammenwirken der Horizontalkraft und des Torsionsmomentes mit einer linearen Interaktion geführt:

$$\begin{aligned}
 A_{nt}^F &= t_{FB} \cdot (e_2 - d_0/2) = 1,0 \cdot (3,5 - 1,8/2) = 2,6 \text{ cm}^2 \\
 A_{nt}^T &= t_{FB} \cdot (e_1 - d_0/2) = 1,0 \cdot (7,5 - 1,8/2) = 6,6 \text{ cm}^2 \\
 A_{nv}^F &= t_{FB} \cdot \left(e_1 + p_1 - \frac{3}{2} \cdot d_0\right) = 1,0 \cdot \left(7,5 + 11 - \frac{3}{2} \cdot 1,8\right) = 15,8 \text{ cm}^2 \\
 A_{nv}^T &= t_{FB} \cdot (e_2 - d_0/2) = 1,0 \cdot (3,5 - 1,8/2) = 2,6 \text{ cm}^2 \\
 V_{eff,2,Rd}^F &= \frac{f_u \cdot A_{nt}^F}{2 \cdot \gamma_{M2}} + \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv}^F}{\gamma_{M0}} = \frac{36 \cdot 2,6}{2 \cdot 1,25} + \frac{23,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{15,8}{1,0} = 251,8 \text{ kN} \\
 V_{eff,2,Rd}^T &= \frac{f_u \cdot A_{nt}^T}{2 \cdot \gamma_{M2}} + \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv}^T}{\gamma_{M0}} = \frac{36 \cdot 6,6}{2 \cdot 1,25} + \frac{23,5 \cdot 2,6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 130,3 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\frac{F_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}^F} + \frac{T_{Ed}/p_1}{V_{eff,2,Rd}^T} = \frac{30,2}{251,8} + \frac{372/11}{130,3} = 0,38 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Schrauben mit Gewinde bis zum Kopf!

Zugfestigkeit des Schraubenmaterials, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.1

Spannungsquerschnitt, [47] S. 13

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Anzahl der Scherfugen

Grenzabscherkraft der Schraube, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Das Gewinde liegt in den Scherfugen!

Bemessungswert der auf eine Schraube einwirkenden Kraft

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.2

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände in Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Beiwert zur Erfassung der Rand- und Lochabstände \perp zur Krafrichtung, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

Grenzlochleibungskraft der Schrauben, DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.4

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.2

vgl. Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.5 h)

In DIN EN 1993-1-8 sind nur Regeln für Blockversagen bei Einwirkung einer Einzelkraft angegeben!

zugbeanspruchte Nettoflächen für Beanspruchung infolge Horizontalkraft (F) bzw. infolge Torsionsmoment (T)

schubbeanspruchte Nettoflächen für Beanspruchung infolge Horizontalkraft (F) bzw. infolge Torsionsmoment (T)

Widerstände gegen Blockversagen der Schraubengruppe unter exzentrischer Belastung infolge Horizontalkraft (F) bzw. infolge Torsionsmoment (T) im Sinne von DIN EN 1993-1-8, Glg. (3.10)

Dieser Nachweis ist empirisch, d.h. im konkreten Anwendungsfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen!

g) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Fahnenblechs

$$A_{\text{FB}} = h_{\text{FB}} \cdot t_{\text{FB}} = 26 \cdot 1 = 26 \text{ cm}^2$$

$$\tau_{\text{Ed}} = \frac{F_{\text{Ed}} \cdot S}{I \cdot t} = 1,5 \cdot \frac{F_{\text{Ed}}}{A} = 10 \cdot 1,5 \cdot \frac{30,2}{26} = 17,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\tau_{\text{Ed}}}{f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{\text{M0}})} = \frac{17,4}{235 / (\sqrt{3} \cdot 1,0)} = 0,13 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Fläche des Fahnenblechquerschnitts

einwirkende Schubspannung, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.20)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.19)

h) Momententragfähigkeit des Fahnenblechs

$$M_{\text{el,Rd}} = \frac{W_{\text{el}} \cdot f_y}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{h_{\text{FB}}^2 \cdot t_{\text{FB}} \cdot f_y}{6 \cdot \gamma_{\text{M0}}} = \frac{26^2 \cdot 1 \cdot 23,5}{6 \cdot 1,0} = 2647,7 \text{ kNcm}$$

$$M_{\text{Ed}} / M_{\text{el,Rd}} = 750 / 2647,7 = 0,28 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

elastische Momentenbeanspruchbarkeit des Fahnenblechs, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.14)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.12)

i) Tragfähigkeit der Schweißnaht zwischen Fahnenblech und Kopfplatte der Längswandstütze

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$t_{\text{max}} = \max(t_{\text{KB}} | t_p) = \max(10 | 15) = 15 \text{ mm}$$

$$a = 4 \text{ mm} > a_{\text{min}} = \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,37 \text{ mm} = \sqrt{15} - 0,5 = \sqrt{t_{\text{max}}} - 0,5 \end{cases}$$

$$A_w = 2 \cdot h_{\text{FB}} \cdot a = 2 \cdot 26 \cdot 0,4 = 20,8 \text{ cm}^2$$

$$W_w = h_{\text{FB}}^2 \cdot a / 3 = 26^2 \cdot 0,4 / 3 = 90,1 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{M_{\text{Ed}}}{W_w} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 10 \cdot \frac{750}{90,1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 58,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = F_{\text{Ed}} / A_w = 10 \cdot 30,2 / 20,8 = 14,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{w,\text{Ed}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{58,9^2 + 3 \cdot (58,9^2 + 14,5^2)} = 120 \text{ N/mm}^2$$

Anwendung des richtungsbezogenen Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.2

Dicke der Stützenkopfplatte

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwert für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

Fläche und Widerstandsmoment der Schweißnaht

Spannungen in der Bezugsfläche der Kehlnaht. Für die Ableitung der Formel siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.4 f).

Schubspannung parallel zur Naht

Vergleichsspannung in der Bezugsfläche der Schweißnaht

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.1)

$$f_{w,\text{Ed}} = 120 \text{ N/mm}^2 < 360 \text{ N/mm}^2 = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{\text{M2}}}$$

$$\sigma_{\perp} = 58,7 \text{ N/mm}^2 < 259,2 \text{ N/mm}^2 = 0,9 \cdot 360 / 1,25 = 0,9 \cdot f_u / \gamma_{\text{M2}}$$

→ Die Tragfähigkeit der Schweißnaht ist ausreichend.

3.6.2 Anschluss der Wandriegel an die Stützenkopfplatte

Die Tragfähigkeit der Kopfplatte und der Schweißnähte zwischen der Kopfplatte und dem Fahnenblech bzw. der Stütze ist ausreichend. Es ist noch die Abschertragfähigkeit der Schrauben zu kontrollieren:

$$F_{v,Rd} = 60,29 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 68,3 \text{ kN}$$

$$n = 2$$

$$N_{Ed} / (n \cdot F_{v,Rd}) = 68,3 / (2 \cdot 60,29) = 0,57 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

4.1 Lastkombination 3

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für vertikale Verformungen. Es wird daher zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3 herangezogen:

$$\delta_{z,char} = 1,6 \text{ cm} < 4,5 \text{ cm} = 900/200 = L/200 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4.2 Lastkombination 4

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für horizontale Verformungen. Es wird daher zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3 herangezogen:

$$\delta_{y,char} = 2,3 \text{ cm} < 2,7 \text{ cm} = 800/300 = H/300 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Die Tragfähigkeit der Kopfplatte und der Schweißnähte wurde in einer Nebenrechnung als ausreichend festgestellt.

siehe Abschnitt 3.6.1 d)

siehe Abschnitt 2.1

Anzahl der Schrauben im Anschluss

DIN EN 1993-1-8, Tabelle 3.2

DIN V ENV 1993-1-3, Tabelle 4.1

DIN V ENV 1993-1-3, Absatz 4.2.2 (4)

Beispiel 1.7: Längswandstütze

Inhalt

| | Seite |
|---|-------|
| Aufgabenstellung | 122 |
| 1 System, Querschnitt und Einwirkungen | 122 |
| 1.1 System | 122 |
| 1.2 Querschnitt..... | 122 |
| 1.2.1 Abmessungen | 122 |
| 1.2.2 Querschnittswerte | 123 |
| 1.2.3 Materialkennwerte | 123 |
| 1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 123 |
| 1.4 Lastkombinationen, Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 124 |
| 1.5 Lastkombinationen, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit..... | 125 |
| 2 Beanspruchungen | 126 |
| 2.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit, Gruppe B..... | 126 |
| 2.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit, Gruppe A..... | 126 |
| 2.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 126 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 127 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 127 |
| 3.2 Querschnittsklassifikation..... | 127 |
| 3.3 Bauteilnachweise | 127 |
| 3.3.1 Stabendmomente nach Theorie II. Ordnung | 128 |
| 3.3.2 Beanspruchbarkeiten und Ersatzstabnachweise | 129 |
| 3.4 Querschnittsnachweise | 132 |
| 3.5 Nachweis der Halsnähte | 134 |
| 3.6 Nachweis der Lagesicherheit | 135 |
| 4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 135 |
| 4.1 Nachweise der Verformungsbegrenzung | 135 |

Beispiel 1.7: Längswandstütze

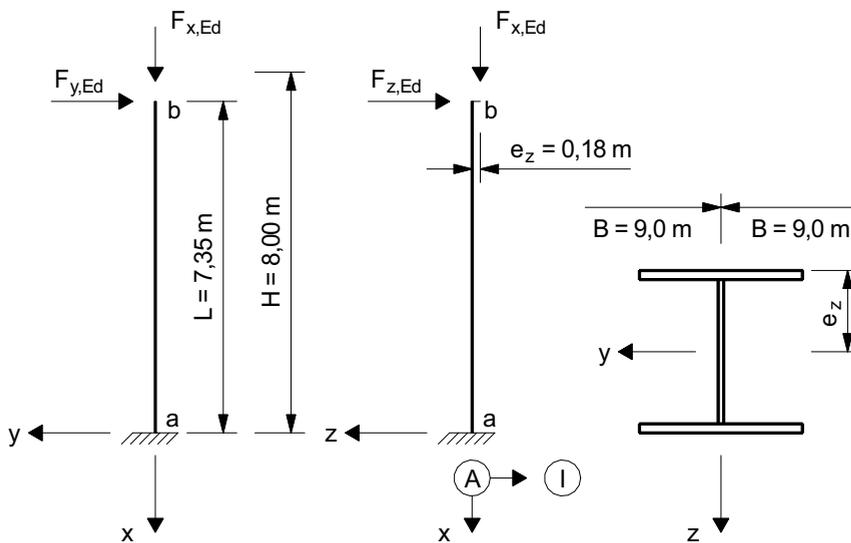
Aufgabenstellung

Über die Längswandstützen in den Achsen A und I werden neben den Vertikallasten aus den Dachbindern auch anteilig die Windlasten sowohl auf die Hallenlängswände (über die Längswandriegel) als auch auf die Hallengiebelwände (über die Pfetten im Zusammenwirken mit dem Dachverband) in die Fundamente weitergeleitet.

Für die Längswandstützen sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

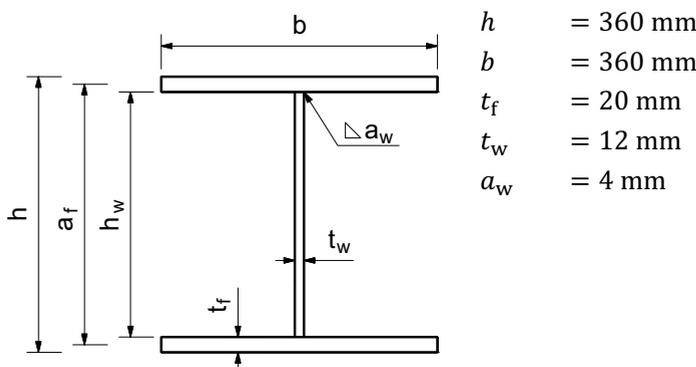
1 System, Querschnitt und Einwirkungen

1.1 System



1.2 Querschnitt

1.2.1 Querschnittsabmessungen



für die Bezeichnung der Achsen siehe Vorbemerkungen S. 1, Pfetten siehe Beispiel 1.3, Dachbinder siehe Beispiel 1.4, Dachverband siehe Beispiel 1.5, Längswandriegel siehe Beispiel 1.6

Querschnittsachsen entsprechend DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

L - Systemlänge der Stütze
B - Stützenabstand in Längsrichtung
H - Traufhöhe der Halle, OK Dach

H, L und B siehe Vorbemerkungen, S. 1

Die Vertikallasten (Auflagerkräfte der Dachbinder) werden exzentrisch an den Stützenköpfen eingeleitet (siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 3.5.5).

Die Stütze ist am Fuß um **beide** Querschnittsachsen in das Fundament eingespannt und am Kopf nicht gestützt, d.h. es liegt als statisches System eine Kragstütze vor.

Die Stützen sind als geschweißte Profile mit doppelsymmetrischem I-Querschnitt aus Baustahl S275 J2 gemäß DIN EN 10025-2:2005-02 ausgebildet.

geschweißtes I-Profil

Bezeichnung der Querschnittsabmessungen entsprechend DIN EN 1993-1-1, Bild 1.1

Dicke der Halsnähte, die als Doppelkehlnähte ausgeführt sind.

Der Nachweis der Tragfähigkeit wird für die Halsnähte in Abschnitt 3.5 geführt.

1.2.2 Querschnittswerte

$$\begin{aligned}
 h_w &= h - 2 \cdot t_f = 360 - 2 \cdot 20 = 320 \text{ mm} \\
 a_f &= h - t_f = 360 - 20 = 340 \text{ mm} \\
 A &= 2 \cdot b \cdot t_f + h_w \cdot t_w = 2 \cdot 36 \cdot 2 + 32 \cdot 1,2 = 182,4 \text{ cm}^2 \\
 I_y &= \frac{h^3 \cdot b - h_w^3 \cdot (b - t_w)}{12} = \frac{36^3 \cdot 36 - 32^3 \cdot (36 - 1,2)}{12} = 44940,8 \text{ cm}^4 \\
 I_z &= \frac{2 \cdot b^3 \cdot t_f + h_w \cdot t_w^3}{12} = \frac{2 \cdot 36^3 \cdot 2 + 32 \cdot 1,2^3}{12} = 15556,6 \text{ cm}^4 \\
 W_{pl,y} &= b \cdot t_f \cdot a_f + \frac{1}{4} \cdot h_w^2 \cdot t_w = 36 \cdot 2 \cdot 34 + \frac{1}{4} \cdot 32^2 \cdot 1,2 = 2755,2 \text{ cm}^3 \\
 W_{pl,z} &= \frac{2 \cdot b^2 \cdot t_f + h_w \cdot t_w^2}{4} = \frac{2 \cdot 36^2 \cdot 2 + 32 \cdot 1,2^2}{4} = 1307,5 \text{ cm}^3 \\
 \alpha_f &= 1 - 0,63 \frac{t_f}{b} \tanh \frac{\pi \cdot b}{2 \cdot t_f} = 1 - 0,63 \cdot \frac{2}{36} \cdot \tanh \frac{\pi \cdot 36}{2 \cdot 2} = 0,965 \\
 \alpha_w &= 1 - 0,63 \cdot \frac{t_w}{h_w} \cdot \tanh \frac{\pi \cdot h_w}{2 \cdot t_w} = 1 - 0,63 \cdot \frac{1,2}{32} \cdot \tanh \frac{\pi \cdot 32}{2 \cdot 1,2} = 0,976 \\
 I_t &= (2 \cdot \alpha_f \cdot b \cdot t_f^3 + \alpha_w \cdot h_w \cdot t_w^3) / 3 \\
 &= (2 \cdot 0,965 \cdot 36 \cdot 2^3 + 0,976 \cdot 32 \cdot 1,2^3) / 3 = 203,3 \text{ cm}^4 \\
 I_\omega &= \frac{1}{24} \cdot a_f^2 \cdot b^3 \cdot t_f = \frac{1}{24} \cdot 34^2 \cdot 36^3 \cdot 2 = 4494528 \text{ cm}^6
 \end{aligned}$$

1.2.3 Materialkennwerte

Streckgrenze: $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$
 Zugfestigkeit: $f_u = 430 \text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 Schubmodul: $G = 81000 \text{ N/mm}^2$

1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen

Die Windlasten auf die Längswände werden näherungsweise hälftig über die Längswandriegel in die Stützenköpfe und über die Fußträger der Wandelemente in die Fundamente eingeleitet.

Diese Aufteilung gilt auch für die Windlasten auf die Giebelwände. Wegen der Kopplung der Längswandstützen durch die Längswandriegel kann eine gleichmäßige Verteilung dieser Lasten auf die Stützen unterstellt werden.

Für die weitere Berechnung werden alle Windlasten in äquivalente Kräfte, die am Stützenkopf angesetzt werden, umgerechnet.

a) Eigengewicht der Stütze

$$G_k = L \cdot A \cdot \gamma = 7,35 \cdot 182,4 \cdot 10^{-4} \cdot 78,5 = 10,5 \text{ kN}$$

Steghöhe
 Abstand der Flanschschwerachsen
 Querschnittsfläche
 Trägheitsmoment um die y-Achse
 Trägheitsmoment um die z-Achse
 plastisches Widerstandsmoment für Biegung um die y-Achse
 plastisches Widerstandsmoment für Biegung um die z-Achse
 Korrekturfaktor für den Anteil der Flansche am Torsionsträgheitsmoment, [46] Bild 7.15
 Korrekturfaktor für den Anteil des Steges am Torsionsträgheitsmoment, [46] Bild 7.15
 Torsionsträgheitsmoment
 Wölbwiderstand bezogen auf den Schubmittelpunkt

Baustahl S275 J2

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1
 DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1
 DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)
 DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

Kraftrichtungen siehe Abschnitt 1.1

Das Eigengewicht wird vereinfachend als Einwirkung am Stützenkopf angesetzt.

b) Vertikalkräfte

$$F_{x,g,k} = 125,9 \text{ kN}$$

$$F_{x,s,k} = 166,9 \text{ kN}$$

$$F_{x,w,k}^+ = 21,1 \text{ kN}$$

$$F_{x,w,k}^- = -68,4 \text{ kN}$$

c) Horizontallasten infolge Wind auf die Längswände

$$w_{e,D} = 0,455 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{z,w,k}^D \approx w_{e,D} \cdot B \cdot H/2 = 0,455 \cdot 9 \cdot 8/2 = 16,4 \text{ kN}$$

d) Horizontallasten infolge Wind auf die Giebelwände

$$w_{e,D} = 0,455 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{e,E} = -0,195 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{e,B} = -0,52 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{fr,1} = 21,63 \text{ kN}$$

$$F_{fr,2} = 18,93 \text{ kN}$$

$$\bar{H} = 9,0 \text{ m}$$

$$\bar{B} = 36,56 \text{ m}$$

$$w_{e,DE} = w_{e,D} + w_{e,E} = 0,455 + 0,195 = 0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{fr} = F_{fr,1}/2 + F_{fr,2}/4 = 21,63/2 + 18,93/4 = 15,55 \text{ kN}$$

$$n = 10$$

$$F_{y,w,k}^{DEF} \approx \frac{1}{n} \cdot \left[\frac{\bar{H} \cdot \bar{B} \cdot w_{e,DE}}{4} + F_{fr} \right] = \frac{1}{10} \cdot \left[\frac{36,56 \cdot 9 \cdot 0,65}{4} + 15,55 \right] = 6,9 \text{ kN}$$

$$F_{z,w,k}^B \approx w_{e,B} \cdot B \cdot H/2 = -0,52 \cdot 9 \cdot 8/2 = -18,7 \text{ kN}$$

1.4 Lastkombinationen, Grenzzustände der Tragfähigkeit

a) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen (EQU)(Gruppe A)

$$\text{ständige Einwirkung, Auswirkung destabilisierend: } \gamma_{G,dst}^* = 1,35$$

$$\text{ständige Einwirkung, Auswirkung stabilisierend: } \gamma_{G,stb}^* = 1,15$$

$$\text{veränderliche Einwirkung, Auswirkung destabilisierend: } \gamma_Q = 1,5$$

b) Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen (STR/GEO)(Gruppe B)

$$\text{ständige Einwirkung, Auswirkung ungünstig: } \gamma_{G,sup} = 1,35$$

$$\text{ständige Einwirkung, Auswirkung günstig: } \gamma_{G,inf} = 1,0$$

$$\text{veränderliche Einwirkung, Auswirkung ungünstig: } \gamma_Q = 1,5$$

$$\text{veränderliche Einwirkung, Auswirkung günstig: } (\gamma_Q) = 0,0$$

Auflagerkräfte der Dachbinder, siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 2.1

Eigenlasten der Dachkonstruktion

Schneelast

Winddruck (Bereich I, Wind auf Giebel)

Windsog (Bereich HI, Wind auf Giebel)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.2.1 b)

Winddruck, Bereich D

äquivalente Horizontalkraft

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.1 b) und Abschnitt 4.3.3 c)

Winddruck, Bereich D

Windsog, Bereich E

Windsog, Bereich B

Reibungskraft, Dach

Reibungskraft, Längswände

Firsthöhe (OK Dach) und Gesamtbreite der Halle, siehe Vorbemerkungen, S. 1

resultierender Winddruck

resultierende Reibungskraft an den Stützenköpfen einer Längswand

Anzahl der Stützen je Längswand

äquivalente Horizontalkraft für Winddruck und Reibung

äquivalente Horizontalkraft

ständige Bemessungssituation!

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(A)

Nach DIN EN 1990, Absatz 6.4.1 (1) steht EQU für die Nachweise gegen Verlust der Lagesicherheit des Tragwerks oder seiner Teile.

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

Nach DIN EN 1990, Absatz 6.4.1 (1) steht STR für die Nachweise gegen Versagen oder übermäßige Verformung des Tragwerks oder seiner Teile.

GEO betrifft den Baugrund, der hier nicht betrachtet wird.

c) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

Schnee: $\psi_{0,s} = 0,5$

Wind: $\psi_{0,w} = 0,6$

d) Faktoren für die Einwirkungen in den Lastkombinationen

Wegen dem Zusammenwirken der verschiedenen Einwirkungen ist für die Grenzzustände der Tragfähigkeit mehr als eine Lastkombination zu berücksichtigen. In der Tabelle sind die Faktoren mit denen die Einwirkungen in die Lastkombinationen eingehen zusammengefasst:

| E_{k} | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 | LK 7 | LK 8 |
|-------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|---------------------|
| G_k | $\gamma_{G,sup}$ | | | | | | $\gamma_{G,inf}$ | $\gamma_{G,stab}^*$ |
| $F_{x,g,k}$ | $\gamma_{G,sup}$ | | | | | | $\gamma_{G,inf}$ | $\gamma_{G,stab}^*$ |
| $F_{x,s,k}$ | γ_Q | $f_s^{1)}$ | γ_Q | f_s | γ_Q | f_s | 0,0 | |
| $F_{x,w,k}^+$ | 0,0 | | $f_w^{2)}$ | γ_Q | 0,0 | | 0,0 | |
| $F_{x,w,k}^-$ | 0,0 | | | | | | γ_Q | |
| $F_{y,w,k}^{DEF}$ | 0,0 | | f_w | γ_Q | f_w | γ_Q | 0,0 | |
| $F_{z,w,k}^B$ | 0,0 | | 0,0 | | f_w | γ_Q | 0,0 | |
| $F_{z,w,k}^D$ | f_w | γ_Q | 0,0 | | | | 0,0 | |
| GZ | STR ³⁾ | | | | | | EQU ⁴⁾ | |

1) $f_s = \psi_{0,s} \cdot \gamma_Q = 0,5 \cdot 1,5 = 0,75$

2) $f_w = \psi_{0,w} \cdot \gamma_Q = 0,6 \cdot 1,5 = 0,9$

3) Lastkombinationen 1 - 6 gemäß DIN EN 1990, Glg. (6.10)

4) Lastkombination 7 gemäß DIN EN 1990/NA, Glg. (A.3)
Lastkombination 8 gemäß DIN EN 1990/NA, Glg. (A.2)

1.5 Lastkombinationen, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (charakteristische Kombination) ist es ausreichend, folgende Lastkombinationen zu untersuchen:

| Einwirkung | LK 9 | LK 10 | LK 11 |
|-------------------|--------------|--------------|-------|
| $F_{x,g,k}$ | 1,0 | 1,0 | 0,0 |
| $F_{x,s,k}$ | 1,0 | $\psi_{0,s}$ | 0,0 |
| $F_{z,w,k}^D$ | $\psi_{0,w}$ | 1,0 | 0,0 |
| $F_{y,w,k}^{DEF}$ | 0,0 | 0,0 | 1,0 |

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

In der Tabelle werden folgende Abkürzungen verwendet:

E_k = charakteristische Einwirkung

LK = Lastkombination

GZ = Grenzzustand

Kombination der Einwirkungen gemäß DIN EN 1990, Glg. (6.15b)

LK = Lastkombination

2 Beanspruchungen

2.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit, Gruppe B

Bemessungswerte (Parameter) der Einwirkungen und Schnittgrößen für Bauteil- und Querschnittsnachweise:

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| G_{Ed} | [kN] | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 14,2 |
| $F_{xb,Ed}$ | [kN] | 420,3 | 295,1 | 439,3 | 326,8 | 420,3 | 295,1 |
| $F_{yb,Ed}$ | [kN] | 0,0 | 0,0 | 6,2 | 10,4 | 6,2 | 10,4 |
| $F_{zb,Ed}$ | [kN] | 14,8 | 24,6 | 0,0 | 0,0 | -16,8 | -28,1 |
| N_{Ed} | [kN] | 434,5 | 309,3 | 453,5 | 341,0 | 434,5 | 309,3 |
| $V_{z,Ed}$ | [kN] | 14,8 | 24,6 | 0,0 | 0,0 | -16,8 | -28,1 |
| $M_{yb,Ed}$ | [kNm] | 75,7 | 53,1 | 79,1 | 58,8 | 75,7 | 53,1 |
| $M_{ya,Ed}$ | [kNm] | 184,1 | 233,9 | 79,1 | 58,8 | -48,0 | -153,0 |
| $V_{y,Ed}$ | [kN] | 0,0 | 0,0 | 6,2 | 10,4 | 6,2 | 10,4 |
| $M_{za,Ed}$ | [kNm] | 0,0 | 0,0 | 45,6 | 76,1 | 45,6 | 76,1 |

2.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit, Gruppe A

| Lastkombination | 7 | 8 |
|---|-------|-------|
| vertikale Verankerungskraft $E_{d,anch}$ [kN] | -33,8 | -54,3 |

2.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Bemessungswerte der horizontalen Auslenkungen des Stützenkopfes in der charakteristische Kombination:

$$\text{in Richtung der y-Achse: } \delta_y = \frac{1}{3} \frac{F_{y,k}}{EI_z} \cdot L^3$$

$$\text{in Richtung der z-Achse: } \delta_z = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_{z,k}}{EI_y} \cdot L^3 + \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{x,k}}{EI_y} \cdot L^2 \cdot e_z$$

| Bemessungswerte | | LK 9 | LK 10 | LK 11 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|
| $F_{x,k}$ | [kN] | 292,8 | 209,4 | 0,0 |
| $F_{y,k}$ | [kN] | 0,0 | 0,0 | 6,9 |
| $F_{z,k}$ | [kN] | 9,8 | 16,4 | 0,0 |
| δ_y | [mm] | | | 27,96 |
| δ_z | [mm] | 28,88 | 33,79 | |

Bemessungssituation STR

Bezeichnung der Achsen und Orte entsprechend Skizze in Abschnitt 1.1

LK = Lastkombination

Eigenlast, angesetzt am Stützenkopf

äußere Vertikalkraft

äußere Horizontalkraft in y-Richtung

äußere Horizontalkraft in z-Richtung

Druckkraft: $N_{Ed} = G_{Ed} + F_{xb,Ed}$

Querkraft in z-Richtung: $V_{z,Ed} = F_{zb,Ed}$

Biegemomente um die y-Achse,

Stützenkopf: $M_{yb,Ed} = F_{xb,Ed} \cdot e_z$

Stützenfuß: $M_{ya,Ed} = M_{yb,Ed} + F_{zb,Ed} \cdot L$

Querkraft in y-Richtung: $V_{y,Ed} = F_{yb,Ed}$

Biegemoment um die z-Achse:

$M_{za,Ed} = F_{yb,Ed} \cdot L$

Bemessungssituation EQU

Die vertikale Verankerungskraft ist für den Nachweis der Lagesicherheit erforderlich (siehe Abschnitt 3.5).

äußere Vertikalkraft

äußere Horizontalkraft in y-Richtung

äußere Horizontalkraft in z-Richtung

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

| | |
|---|----------------------|
| elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: | $\gamma_{M0} = 1,0$ |
| Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): | $\gamma_{M1} = 1,1$ |
| Bruchversagen von zugbeanspruchten Querschnitten: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschraubten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |

3.2 Querschnittsklassifikation

Flansche: einseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,924$$

$$c = \frac{b - t_w}{2} - a_w \cdot \sqrt{2} = \frac{360 - 12}{2} - 4 \cdot \sqrt{2} = 168,3 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_f} = \frac{168,3}{20,0} = 8,42 > 8,32 = 9 \cdot 0,924 = 9 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Klasse 2}$$

$$< 9,24 = 10 \cdot 0,924 = 10 \cdot \varepsilon$$

Steg: zweiseitig gestützt, unter Druck- und Biegebeanspruchung

$$c = h_w - 2 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 320 - 2 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} = 308,7 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{M0} \cdot N_{Ed}}{c \cdot t_w \cdot f_y} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1,0 \cdot 453500}{308,7 \cdot 12 \cdot 275} \right) = 0,72 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_w} = \frac{308,7}{12,0} = 25,7 < 43,8 = \frac{396 \cdot 0,924}{13 \cdot 0,72 - 1} = \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Querschnitt: höchste Klasse von Flanschen oder Steg \rightarrow Klasse 2

3.3 Bauteilnachweise

Der Stabilitätsnachweis wird mit Ersatzstabnachweisen für ein auf Druck und Biegung beanspruchtes Bauteil geführt:

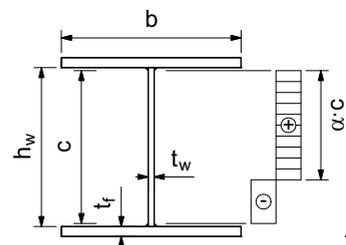
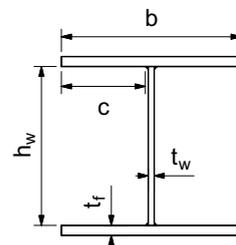
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anmerkung

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (4) und Glg. (6.61) und (6.62)

Die Momente $\Delta M_{y,Ed}$ und $\Delta M_{z,Ed}$ aus der Verschiebung der Querschnittsachsen sind nur für Klasse-4-Querschnitte relevant. Alle anderen Parameter werden weiter unten erläutert und berechnet.

3.3.1 Stabmomente nach Theorie II. Ordnung

In *Lindner/Heyde* [49], Abschnitt 5.1 wird darauf hingewiesen, dass die Knicklänge des Bauteils nicht in den Nachweis des Biegedrillknickens eingeht und deshalb, falls erforderlich, die Stabmomente nach Theorie II. Ordnung bestimmt werden müssen.

Dieses Erfordernis ist wie folgt zu überprüfen:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \rightarrow \text{Berechnung nach Theorie I. Ordnung zulässig!}$$

a) Überprüfung des Abgrenzungskriteriums

Das Abgrenzungskriterium ist für Biegeknicken um die y-Achse zu überprüfen, da für den Biegedrillknicknachweis die Biegemomente um die y-Achse relevant sind:

$$L_{cr,y} = \beta_y \cdot L = 2 \cdot 7,35 = 14,7 \text{ m}$$

$$F_{cr} = N_{cr,y} = \pi^2 \cdot EI_y / L_{cr,y}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 44940,8 / 1470^2 = 4310,5 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = \max_{1 \leq LK \leq 6} N_{Ed,LK} = N_{Ed,LK=3} = 453,5 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed} = 4310,5 / 453,5 = 9,5 < 15$$

→ Berechnung nach Theorie II. Ordnung erforderlich!

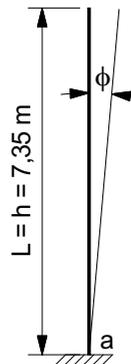
b) globale Imperfektionen (Stützenschiefstellung)

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,738 \cdot 0,866 / 200 = 3,195 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\phi_0 = 1/200$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{7,35}} = 0,738 \begin{matrix} \geq 2/3 \\ \leq 1,0 \end{matrix}$$

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,866$$



Ansatz globaler Imperfektionen gemäß DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.2.2 (7) b)

globale Anfangsschiefstellung, DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.3.2 (3) a)

Ausgangswert der Schiefstellung

Abminderungsfaktor für die Höhe h (in m) der Stützen, h bedeutet hier die Systemlänge L (siehe Abschnitt 1.1)!

Abminderungsfaktor für die Anzahl m der Stützen in einer Reihe

Die Reihen liegen in diesem Projekt parallel zu den Zahlenachsen (siehe Vorbemerkungen, S. 1), d.h. $m = 2$.

c) Biegemoment um die y-Achse nach Theorie II. Ordnung am Stützenfuß

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit bei der Bestimmung der für die Nachweise erforderlichen, beanspruchungsabhängigen Parameter wird nachfolgend so verfahren, dass zuerst die zugrunde liegenden Gleichungen und im Anschluss daran die entsprechenden Zahlenwerte in tabellarischer Form angegeben werden.

Nachfolgend wird das Abgrenzungskriterium vereinfachend mit der maximalen Druckkraft der Lastkombinationen 1 bis 6 ausgewertet.

Abgrenzungskriterium für die plastische Berechnung, DIN EN 1993-1-1, Glg. (5.1)

Knicklänge für Knicken um die y-Achse

ideale Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-Achse

maximale Druckkraft in LK 1 bis LK 6, siehe Abschnitt 2.1

Für das vorliegende statische System einer Kragstütze ist die Berechnung des Einspannmomentes ausreichend.

$$\varepsilon = L \cdot \sqrt{N_{Ed}/EI_y}$$

$$M_{ya,Ed}^{II} = \frac{F_{xb,Ed} \cdot e_z}{\cos \varepsilon} + (F_{zb,Ed} \pm N_{Ed} \cdot \phi) \cdot L \cdot \frac{\tan \varepsilon}{\varepsilon}$$

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| ε | [-] | 0,499 | 0,421 | 0,509 | 0,442 | 0,499 | 0,421 |
| $M_{ya,Ed}^{II}$ | [kNm] | 215,8 | 258,2 | 102,3 | 73,6 | -60,1 | -168,8 |

3.3.2 Beanspruchbarkeiten und Ersatzstabnachweise

a) charakteristische Werte der Querschnittstragfähigkeiten

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 182,4 \cdot 27,5 = 5016 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 2755,2 \cdot 27,5/100 = 757,7 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 1307,5 \cdot 27,5/100 = 359,6 \text{ kNm}$$

b) ideales Verzweigungsmoment M_{cr} bei Biegedrillknicken

$$M_{cr} = \frac{k}{L} \cdot \sqrt{EI_z \cdot GI_t}$$

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|-----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| k | [-] | 2,808 | 3,486 | 1,653 | 1,653 | 2,548 | 5,872 |
| M_{cr} | [kNm] | 886,1 | 1100,0 | 521,6 | 521,6 | 804,0 | 1852,9 |

c) Abminderungsbeiwert χ_{LT} für Biegedrillknicken

Neben dem Verfahren für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.3) für die Berechnung des Abminderungsbeiwertes χ_{LT} gibt es das allgemeine Verfahren (DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.2), das an dieser Stelle verwendet wird:

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

$$h/b = 360/360 = 1,0 < 2 \rightarrow \text{Biegedrillknicklinie c}$$

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

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

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

Stabkennzahl

Biegemoment um die y-Achse nach Theorie II. Ordnung, [53] Tafel 3.13

Das Vorzeichen der äquivalenten Ersatzlast $N_{Ed} \cdot \phi$ muss mit dem Vorzeichen des Biegemomentes $M_{ya,Ed}^{II}$ übereinstimmen!

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.7

Normalkraftbeanspruchbarkeit

Momentenbeanspruchbarkeiten für Biegung um die y- bzw. z-Achse

Darstellung von M_{cr} mit k-Werten entsprechend [49], Glg. (106)

Die k-Werte wurden aus Ergebnissen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelt, die mit dem Programm KSTAB 2000 [60] berechnet wurden.

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.2 (1)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.4

Imperfektionsbeiwert, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.3

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken, allgemeines Verfahren, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.56)

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|----------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{\lambda}_{LT}$ | [-] | 0,925 | 0,830 | 1,205 | 1,205 | 0,971 | 0,639 |
| ϕ_{LT} | [-] | 1,105 | 0,999 | 1,473 | 1,473 | 1,160 | 0,812 |
| χ_{LT} | [-] | 0,585 | 0,643 | 0,431 | 0,431 | 0,557 | 0,762 |

d) modifizierter Abminderungsbeiwert $\chi_{LT,mod}$ für Biegedrillknicken

Der Faktor f darf auch zur Modifizierung von χ_{LT} bei Ermittlung mit dem allgemeinen Verfahren angewendet werden:

$$\psi_y = \begin{cases} M_{yb,Ed} \leq |M_{ya,Ed}^{II}| \rightarrow M_{yb,Ed}/M_{ya,Ed}^{II} \\ M_{yb,Ed} > |M_{ya,Ed}^{II}| \rightarrow M_{ya,Ed}^{II}/M_{yb,Ed} \end{cases}$$

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot \psi}$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot \left[1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \leq 1$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} < \begin{cases} 1,0 \\ 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{cases}$$

| Parameter | | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|--------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ψ_y | [-] | 0,351 | 0,206 | 0,773 | 0,799 | -0,794 | -0,315 |
| k_c | [-] | 0,824 | 0,792 | 0,930 | 0,938 | 0,628 | 0,697 |
| f | [-] | 0,915 | 0,896 | 0,977 | 0,979 | 0,825 | 0,857 |
| $1/\bar{\lambda}_{LT}^2$ | [-] | 1,169 | 1,452 | 0,688 | 0,688 | 1,061 | 2,445 |
| $\chi_{LT,mod}$ | [-] | 0,639 | 0,718 | 0,442 | 0,440 | 0,675 | 0,889 |

e) Abminderungsbeiwert χ_y für Biegeknicken um die y-Achse

$$N_{cr,y} = F_{cr} = 4310,5 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{182,4 \cdot 27,5}{4310,5}} = 1,08$$

$$t_f = 20 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \rightarrow \text{Knicklinie b}$$

$$\alpha = 0,34$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right]$$

$$= 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (1,08 - 0,2) + 1,08^2 \right] = 1,23$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,23 + \sqrt{1,23^2 - 1,08^2}} = 0,55 < 1$$

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.3.2.2 (2) Anmerkung 1

Verhältnis der Biegemomente um die y-Achse an den Stabenden (a) und (b)

Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Momentenverteilung, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.6

Modifikationsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (2)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.58)

Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-Achse, siehe Abschnitt 3.3.1 a)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.1

Abminderungsbeiwert für Biegeknicken um die y-Achse, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

f) Abminderungsbeiwert χ_z für Biegeknicken um die z-Achse

$$L_{cr,z} = \beta_z \cdot L = 2 \cdot 7,35 = 14,7 \text{ m}$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 \cdot EI_z / L_{cr,z}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 15556,6 / 1470^2 = 1492,1 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{182,4 \cdot 27,5}{1492,1}} = 1,83$$

$$t_f = 20 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm} \rightarrow \text{Knicklinie c}$$

$$\alpha = 0,49$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,83 - 0,2) + 1,83^2] = 2,57$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{2,57 + \sqrt{2,57^2 - 1,83^2}} = 0,23 < 1$$

Knicklänge und ideale Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-Achse

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.50)

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

Imperfektionsfaktor, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.1

Abminderungsbeiwert für Biegeknicken um die z-Achse, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.49)

g) Interaktionsfaktoren $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$

DIN EN 1993-1-1 enthält für die Berechnung der Interaktionsfaktoren das Alternativverfahren 1 (Anhang A) und das Alternativverfahren 2 (Anhang B). Letzteres wird an dieser Stelle verwendet.

Nach DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.3.3(5) Anmerkung 2 dürfen beide Alternativverfahren angewendet werden.

$$n_y = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed} / (\chi_y \cdot N_{Rk})$$

$$n_z = \gamma_{M1} \cdot N_{Ed} / (\chi_z \cdot N_{Rk})$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot n_y] \leq C_{my} \cdot [1 + 0,8 \cdot n_y]$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot [1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_y - 0,6) \cdot n_z] \leq C_{mz} \cdot [1 + 1,4 \cdot n_z]$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz}$$

$$k_{zy} = 1 - 0,1 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot n_z / (C_{mLT} - 0,25) \geq 1 - 0,1 \cdot n_z / (C_{mLT} - 0,25)$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_y \geq 0,9$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_z \geq 0,9$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi_y \geq 0,9$$

Ausnutzungsgrade für Biegeknicken um die y-Achse und um die z-Achse

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.2

äquivalente Momentenbeiwerte, DIN EN 1993-1-1, Tabelle B.3

Die Stütze ist nicht an beiden Enden starr gelagert!

| Parameter | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ψ_y | 0,351 | 0,206 | 0,773 | 0,799 | -0,794 | -0,315 |
| ψ_z | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| $C_{my} = C_{mLT}$ | 0,9 | 0,9 | 0,909 | 0,920 | 0,9 | 0,9 |
| C_{mz} | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| n_y | 0,173 | 0,123 | 0,181 | 0,136 | 0,173 | 0,123 |
| n_z | 0,414 | 0,295 | 0,432 | 0,325 | 0,414 | 0,295 |
| k_{yy} | 1,025 | 0,989 | 1,041 | 1,020 | 1,025 | 0,989 |
| k_{yz} | 0,853 | 0,763 | 0,867 | 0,786 | 0,853 | 0,763 |
| k_{zy} | 0,936 | 0,955 | 0,934 | 0,951 | 0,936 | 0,955 |
| k_{zz} | 1,422 | 1,272 | 1,445 | 1,310 | 1,422 | 1,272 |

für ψ_y siehe Berechnung von $\chi_{LT,mod}$

ψ_z ist das Verhältnis der Biegemomente um die z-Achse an den Stabenden, Berechnung wie für ψ_y dargestellt

h) Ersatzstabnachweise

$$m_y = \frac{M_{y,a,Ed}^{II}}{\chi_{LT,mod} \cdot M_{y,Rk} / \gamma_{M1}}$$

$$m_z = \frac{M_{z,a,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}}$$

$$\eta_y = n_y + k_{yy} \cdot m_y + k_{yz} \cdot m_z \leq 1,0$$

$$\eta_z = n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z \leq 1,0$$

Ausnutzungsgrad für Biegung um die y-Achse (Biegedrillknicken)

Ausnutzungsgrad für Biegung um die z-Achse

Ersatzstabnachweise entsprechend DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (4), Glg. (6.61) und (6.62)

| Parameter | LK 1 | LK 2 | LK 3 | LK 4 | LK 5 | LK 6 | Limit |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m_y | 0,490 | 0,522 | 0,336 | 0,243 | 0,129 | 0,276 | |
| m_z | 0,0 | 0,0 | 0,140 | 0,233 | 0,140 | 0,233 | |
| η_y | 0,675 | 0,640 | 0,652 | 0,566 | 0,425 | 0,573 | < 1,0 |
| η_z | 0,873 | 0,794 | 0,948 | 0,861 | 0,734 | 0,854 | < 1,0 |

→ Die Ersatzstabnachweise sind erfüllt.

3.4 Querschnittsnachweise

Zusätzlich zu den Ersatzstabnachweisen sind an den Bauteilenden Querschnittsnachweise zu führen.

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.3 (2)

Maßgebend ist der Querschnitt am Stützenfuß, für den die Nachweise mit den maximalen Schnittgrößen der Lastkombinationen 1 bis 6 geführt werden.

Schnittgrößen siehe Abschnitt 2.1

a) Kontrolle der Schubslankheit des Steges

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{320}{12} = 26,7 < 55,5 = 72 \cdot \frac{0,924}{1,2} = 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

DIN EN 1993-1-5, Absatz 5.1 (2)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.22)

→ Nachweis gegen Schubbeulen des Steges nicht erforderlich!

b) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Steges

$$A_V = \eta \cdot h_w \cdot t_w = 1,2 \cdot 32 \cdot 1,2 = 46,08 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{46,08 \cdot (27,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 731,6 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 28,1 \text{ kN}$$

wirksame Schubfläche, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.6 (3) d)

plastische Querkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.18)

Querkraft für Lastkombination 6

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{28,1}{731,6} = 0,04 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.25)

b) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit der Flansche

$$A_V = A - h_w \cdot t_w = 182,4 - 32 \cdot 1,2 = 144 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{144 \cdot (27,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 2286 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = 10,4 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{10,4}{2286} = 0,005 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

wirksame Schubfläche, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.6 (3) e)

plastische Querkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.18)

Querkraft für Lastkombination 4 bzw. 6

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.25)

c) Nachweis der Normalkrafttragfähigkeit des Querschnitts

Dieser Nachweis ist in den Nachweisen der Momententragfähigkeit enthalten (siehe unten) und wird hier nur zur Information dargestellt:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{182,4 \cdot 27,5}{1,0} = 5016 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 453,5 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{453,5}{5016} = 0,09 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Normalkraftbeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.10)

Druckkraft für Lastkombination 3

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.9)

d) Nachweis der Momententragfähigkeit des Querschnitts

Die Bemessungswerte der Momentenbeanspruchbarkeiten für Klasse-2-Querschnitte dürfen wie folgt bestimmt werden:

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2755,2 \cdot 10^{-2} \cdot 27,5 / 1,0 = 757,7 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1307,2 \cdot 10^{-2} \cdot 27,5 / 1,0 = 359,6 \text{ kNm}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.13)

Momentenbeanspruchbarkeit für Biegung um die y-Achse

Momentenbeanspruchbarkeit für Biegung um die z-Achse

Die Momentenbeanspruchbarkeit für Biegung um die y-Achse ist abzumindern, wenn eine der folgenden Bedingungen nicht erfüllt ist:

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.9.1 (4)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{453,5}{5016} = 0,09 < 0,25 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.33)

$$\frac{2 \cdot N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{2 \cdot 453,5 \cdot 1,0}{32 \cdot 1,2 \cdot 27,5} = 0,86 < 1 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.34)

→ Eine Abminderung der Momententragfähigkeit für Biegung um die y-Achse ist nicht erforderlich.

Die Momentenbeanspruchbarkeit für Biegung um die z-Achse ist abzumindern, wenn folgende Bedingung nicht erfüllt ist:

$$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{h_w \cdot t_w \cdot f_y} = \frac{453,5 \cdot 1,0}{32 \cdot 1,2 \cdot 27,5} = 0,43 < 1 \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.35)

→ Eine Abminderung der Momententragfähigkeit für Biegung um die z-Achse ist nicht erforderlich.

Der Nachweis der Momententragfähigkeit des Querschnitts wird konservativ mit einer linearen Interaktion für die damit maßgebende Lastkombination 6 geführt:

$$\alpha = 1$$

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.9.1 (6)

$$\beta = 1$$

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.2.9.1 (6)

$$\left[\frac{M_{ya,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{za,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \right]^\beta = \left[\frac{|-153,0|}{757,7} \right]^1 + \left[\frac{76,1}{359,6} \right]^1 = 0,41 < 1$$

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.41)

→ Die Momententragfähigkeit des Querschnitts ist ausreichend.

3.5 Nachweis der Halsnähte

$$S_{y,f} = b \cdot t_f \cdot a_g / 2 = 36 \cdot 2 \cdot 34 / 2 = 1224 \text{ cm}^3$$

$$F_{w,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_{y,f}}{2 \cdot I_y} = 100 \cdot \frac{28,1 \cdot 1224}{2 \cdot 44940,8} = 38,3 \text{ N/mm}$$

$$\beta_w = 0,85$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{430 / \sqrt{3}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,7 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a_w = 233,7 \cdot 4 = 934,8 \text{ N/mm}$$

$$a_w = 4 \text{ mm} > \max \left(\frac{3 \text{ mm}}{\sqrt{t_{\max}}} - 0,5 \right) = \sqrt{t_f} - 0,5 = \sqrt{20} - 0,5 = 3,97 \text{ mm}$$

$$\frac{F_{w,Ed}}{F_{w,Rd}} = \frac{38,3}{934,8} = 0,04 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

statisches Moment des Flansches

Bemessungswert der auf die Halsnaht einwirkenden Kraft je Längeneinheit für die maßgebende Lastkombination 6

materialabhängiger Korrelationsbeiwert DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Halsnaht, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

Tragfähigkeit der Halsnaht je Längeneinheit, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

Grenzwerte für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2, alle Abmessungen in mm einsetzen!

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

3.6 Nachweis der Lagesicherheit

Als Nachweis der Lagesicherheit wird hier der Nachweis gegen "Abheben" der Stütze betrachtet. An den Stützenfüßen ist keine Verankerung für die Aufnahme von Zugkräften vorgesehen!

$$E_{d,anch} = -33,8 \text{ kN}$$

$$R_{d,anch} = 0 \text{ kN}$$

$$-33,8 \text{ kN} = E_{d,anch} < R_{d,anch} = 0 \text{ kN} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

4.1 Nachweise der Verformungsbegrenzung

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für die horizontalen Auslenkungen an den oberen Enden der Stützen von Hochbauten.

Es wird hier zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3, Absatz 4.2.2 (4) von $L/150$ herangezogen.

$$\delta_z = 33,79 \text{ mm} < 49 \text{ mm} = 7350/150 = L/150 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

$$\delta_y = 27,96 \text{ mm} < 49 \text{ mm} = 7350/150 = L/150 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Die Nachweise für die Einspannung der Stütze in das Fundament werden in Beispiel 1.9 geführt.

einwirkende Zugkraft, siehe Abschnitt 2.2

Tragfähigkeit der Verankerung am Stützenfuß

DIN EN 1990/NA, Glg. (A.4)

Für die horizontalen Auslenkungen des Stützenkopfes siehe Abschnitt 2.3.

δ_z aus Lastkombination 10

δ_y aus Lastkombination 11

Beispiel 1.8: Geschweißter Vollwandträger

Inhalt

| | Seite |
|---|-------|
| Aufgabenstellung | 138 |
| 1 System, Querschnitt und Einwirkungen | 138 |
| 1.1 Systemabmessungen | 138 |
| 1.2 Querschnitt | 138 |
| 1.2.1 Abmessungen | 138 |
| 1.2.2 Querschnittswerte | 139 |
| 1.2.3 Materialkennwerte | 139 |
| 1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 139 |
| 1.4 Lastkombinationen | 139 |
| 1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 1 (andrückende Last) | 139 |
| 1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 2 (abhebende Last) | 140 |
| 1.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – Lastkombination 3 | 140 |
| 2 Beanspruchungen | 141 |
| 2.1 Lastkombination 1 | 141 |
| 2.2 Lastkombination 2 | 141 |
| 2.3 Lastkombination 3 | 141 |
| 3 Grenzzustände der Tragfähigkeit | 141 |
| 3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten | 141 |
| 3.2 Klassifikation des Trägerquerschnitts | 142 |
| 3.3 Nachweis der Momententragfähigkeit | 142 |
| 3.4 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit | 143 |
| 3.5 Nachweis der Momenten-Querkraft-Interaktion | 145 |
| 3.6 Nachweis gegen flanschinduziertes Stegblechbeulen | 145 |
| 3.7 Nachweis der Lasteinleitung für die Firstpfetten | 145 |
| 3.8 Biegedrillknicknachweis für den Träger | 147 |
| 3.9 Nachweise für die Quersteifen | 147 |
| 3.9.1 Auflagersteifen | 147 |
| 3.9.2 Zwischenliegende Quersteifen | 149 |
| 4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 152 |
| 4.1 Effektives Trägheitsmoment | 152 |
| 4.2 Nachweis der Verformungsbegrenzung | 153 |

Beispiel 1.8: Geschweißter Vollwandträger

Aufgabenstellung

Eine Alternative zu den Fachwerkbindern in den Achsen ② bis ④ sind geschweißte Vollwandträger (Dachträger), die aber zur der Begrenzung der Trägerhöhe eine zusätzliche Stützenreihe in der Achse ⑤ erfordern. Für die Dachträger sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

Die Dachneigung α ist gering und bleibt in diesem Beispiel unberücksichtigt.

Die Tragfähigkeit der Stützen mit einem Querschnitt HE 220 B, S235 in der Achse ⑤ ist ausreichend.

Für die Bezeichnung der Achsen siehe die Vorbemerkungen S. 1.

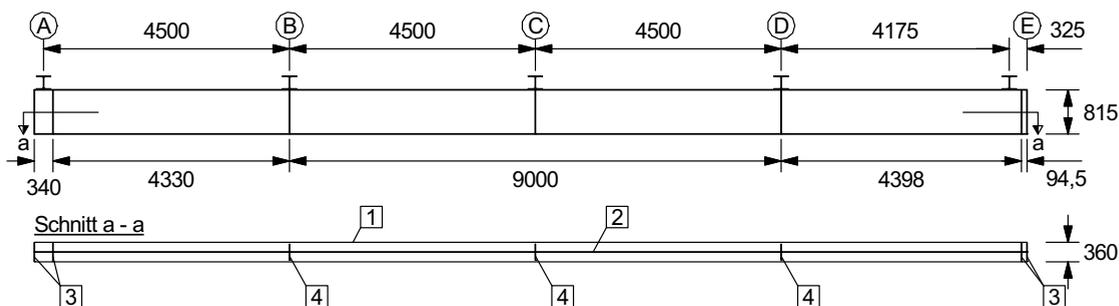
Die Fachwerkbinde werden in Beispiel 1.4 betrachtet.

$\alpha = 3,18^\circ$, siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 1.1

Die Tragfähigkeit der Stützen wurde in einer hier nicht dargestellten Nebenrechnung überprüft.

1 System, Querschnitt und Einwirkungen

1.1 Systemabmessungen



1 Flansche: BI 360x15 S235 3 Auflagersteifen: 2 BI 175x15 S235

2 Steg: BI 800x5 S235 4 Quersteifen: 2 BI 150x12 S235

Die Abmessungen in der Skizze (in mm) sind auf die Mittellinien der Bleche bezogen.
Baustahl S235 nach DIN EN 10025-2.

Die oberen Flansche der Dachträger werden in den Viertelpunkten durch die Pfetten, die an den Dachverband gekoppelt sind, senkrecht zur Stegebene gestützt.

Pfetten siehe Beispiele 1.3 und 1.6,
Dachverband siehe Beispiel 1.5

$$L = 4,33 + 2 \cdot 4,5 + 4,398 = 17,728 \text{ m}$$

$$B = 9,0 \text{ m}$$

Spannweite des Dachträgers

Trägerabstand in Hallenlängsrichtung,
siehe Vorbemerkungen, S. 1

1.2 Querschnitt

1.2.1 Abmessungen

$$b = 815 \text{ mm}$$

$$b_f = 360 \text{ mm}$$

$$t_f = 15 \text{ mm}$$

$$t_w = 5 \text{ mm}$$

$$h = b + t_f = 815 + 15 = 830 \text{ mm}$$

Abstand der Flanschmittellinien

Flanschbreite

Flanschdicke

Stegdicke

Trägerhöhe

1.2.2 Querschnittswerte

$$A = 2 \cdot b_f \cdot t_f + h_w \cdot t_w = 2 \cdot 36 \cdot 1,5 + 80 \cdot 0,5 = 148,0 \text{ cm}^2$$

$$I_{gr} = \frac{h^3 \cdot b_f - h_w^3 \cdot (b_f - t_w)}{12} = \frac{83^3 \cdot 36 - 80^3 \cdot (36 - 0,5)}{12} = 200694,3 \text{ cm}^4$$

$$g_k = A \cdot \gamma = 148 \cdot 10^{-4} \cdot 78,5 = 1,16 \text{ kN/m}$$

1.2.3 Materialkennwerte

Streckgrenze: $f_y = f_{yf} = f_{yw} = 235 \text{ N/mm}^2$
 Zugfestigkeit: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 Schubmodul: $G = 81000 \text{ N/mm}^2$
 Querdehnzahl: $\nu = 0,3$

1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen

Eigengewicht, Dachträger: $g_k = +1,16 \text{ kN/m}$
 Eigengewicht, Pfette: $g_{0,k} = +0,68 \text{ kN/m}$
 Eigengewicht, Dachkonstruktion: $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$
 Eigengewicht, Installation: $g_{2,k} = +0,25 \text{ kN/m}$
 Schnee: $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$
 Winddruck, Bereich I: $w_{e,I}^+ = +0,13 \text{ kN/m}^2$
 Windsog, Bereich H: $w_{e,H} = -0,46 \text{ kN/m}^2$
 Windsog, Bereich I: $w_{e,I}^- = -0,39 \text{ kN/m}^2$
 Mittelwert der Bereiche H und I: $w_{e,HI}^- = -(0,455 + 0,39)/2 = -0,423 \text{ kN/m}^2$

1.4 Lastkombinationen

1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 1 (andrückende Last)

a) Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen

ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_{G,sup} = 1,35$
 ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: $\gamma_{G,inf} = 1,0$
 veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: $\gamma_Q = 1,5$

b) Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen

Schnee: $\psi_{0,S} = 0,5$
 Wind: $\psi_{0,W} = 0,6$

Querschnittsfläche
 Trägheitsmoment um die y-Achse

Trägereigengewicht

Baustahl S235 nach DIN EN 10025-2

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

g_k entsprechend Abschnitt 1.2.1

siehe Beispiel 1.3, Abschnitt 1.2.1

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2

pauschal angesetzt

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b)

Der Windsog im Bereich H ist nur für die Träger in Achse ② bzw. in Achse ③ relevant, die in etwa an der Grenze der Bereiche H und I bei Wind auf die benachbarte Giebelwand liegen.

Die Lastkombinationen werden nachfolgend mit „LK“ abgekürzt.

ständige Bemessungssituation

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

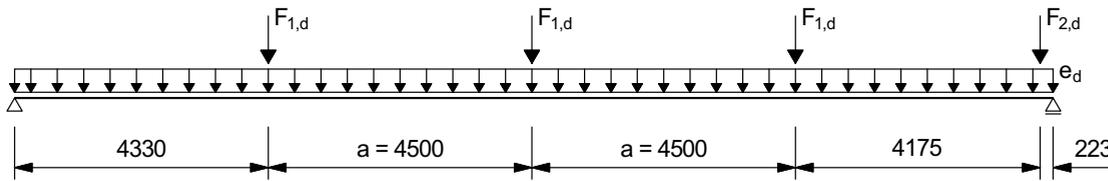
DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1

c) Bemessungswerte $F_{i,d}$ der Einwirkungen

DIN EN 1990, Glg. (6.10)



$$e_d = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot g_k = 1,35 \cdot 1,16 = 1,57 \text{ kN/m}$$

$$F_{g1,k} = B \cdot (g_{0,k} + a \cdot g_{1,k}) + a \cdot g_{2,k} \\ = 9 \cdot (0,68 + 4,5 \cdot 0,41) + 4,5 \cdot 0,25 = 23,85 \text{ kN}$$

$$F_{g2,k} = B \cdot (g_{0,k} + 0,5 \cdot a \cdot g_{1,k}) + 0,5 \cdot a \cdot g_{2,k} \\ = 9 \cdot (0,68 + 0,5 \cdot 4,5 \cdot 0,41) + 0,5 \cdot 4,5 \cdot 0,25 = 14,99 \text{ kN}$$

$$F_{1,d} = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot F_{g1,k} + \gamma_Q \cdot B \cdot a \cdot (s + \psi_{0,W} \cdot w_{e,I}^+) \\ = 1,35 \cdot 23,85 + 1,5 \cdot 9 \cdot 4,5 \cdot (1,03 + 0,6 \cdot 0,13) = 99,5 \text{ kN}$$

$$F_{2,d} = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot F_{g2,k} + \gamma_Q \cdot B \cdot 0,5 \cdot a \cdot (s + \psi_{0,W} \cdot w_{e,I}^+) \\ = 1,35 \cdot 14,99 + 1,5 \cdot 9 \cdot 0,5 \cdot 4,5 \cdot (1,03 + 0,6 \cdot 0,13) = 53,89 \text{ kN}$$

1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 2 (abhebende Last)

Bemessungswerte der Einwirkungen:

DIN EN 1990, Glg. (6.10)

$$e_d = \gamma_{G,\text{inf}} \cdot g_k = 1,0 \cdot 1,16 = 1,16 \text{ kN/m}$$

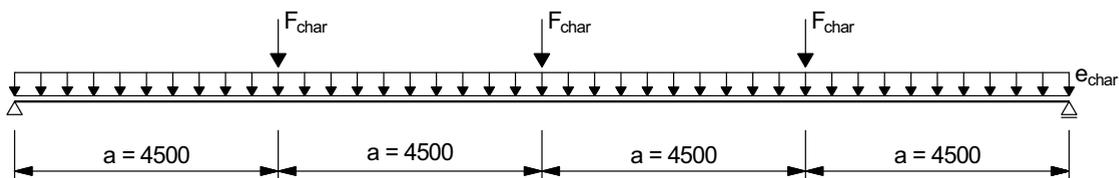
$$F_{1,d} = \gamma_{G,\text{inf}} \cdot F_{g1,k} + \gamma_Q \cdot B \cdot a \cdot w_{e,HI}^- \\ = 1,0 \cdot 23,85 - 1,5 \cdot 9 \cdot 4,5 \cdot 0,422 = -1,79 \text{ kN}$$

$$F_{2,d} = \gamma_{G,\text{inf}} \cdot F_{g2,k} + \gamma_Q \cdot B \cdot 0,5 \cdot a \cdot w_{e,HI}^- \\ = 1,0 \cdot 14,99 - 1,5 \cdot 9 \cdot 0,5 \cdot 4,5 \cdot 0,422 = 2,17 \text{ kN}$$

1.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – LK 3

Bemessungswerte der Einwirkungen (charakteristische Kombination):

DIN EN 1990, Glg. (6.14b)



$$e_{\text{char}} = g_k = 1,16 \text{ kN/m}$$

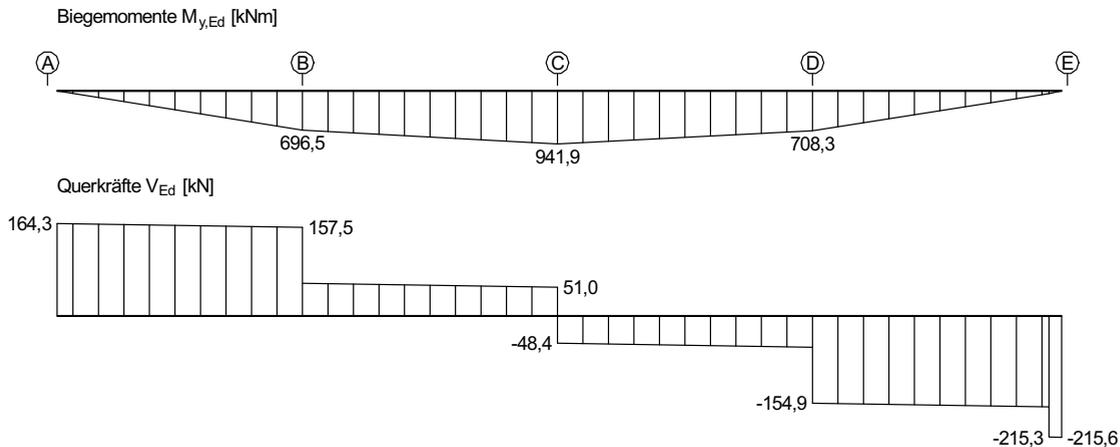
$$F_{\text{char}} = F_{g1,k} + B \cdot a \cdot (s + \psi_{0,W} \cdot w_{e,I}^+) \\ = 23,85 + 9 \cdot 4,5 \cdot (1,03 + 0,6 \cdot 0,13) = 68,7 \text{ kN}$$

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird vereinfachend ein symmetrisches statisches System für den Dachträger angenommen.

2 Beanspruchungen

2.1 Lastkombination 1

Bemessungswerte der Schnittgrößen:



2.2 Lastkombination 2

Das maximale Biegemoment (Achse ©, Bemessungswert) beträgt:

$$0 \text{ kNm} < M_{y,Ed} = 30,3 \text{ kNm} \ll 941,9 \text{ kNm}$$

D.h. die Beanspruchungen sind affin zu denen der Lastkombination 1, die damit maßgebend für die Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit ist.

2.3 Lastkombination 3

$$n = 4$$

$$L_{\text{sym}} = 4 \cdot 4,5 = 18 \text{ m}$$

$$EI_y \cdot \delta_z = \frac{5}{384} \cdot \left[e_{\text{char}} \cdot L_{\text{sym}}^4 + n \cdot F_{\text{char}} \cdot L_{\text{sym}}^3 \cdot \left(1 - \frac{0,8}{n^2} \right) \right]$$

$$= \frac{5}{384} \cdot \left[1,16 \cdot 18^4 + 4 \cdot 68,7 \cdot 18^3 \cdot \left(1 - \frac{0,8}{4^2} \right) \right] = 21410 \text{ kNm}^3$$

$$M_{y,\text{char}} = 0,125 \cdot e_{\text{char}} \cdot L_{\text{sym}}^2 + 0,5 \cdot F_{\text{char}} \cdot L_{\text{sym}}$$

$$= 0,125 \cdot 1,16 \cdot 18^2 + 0,5 \cdot 68,7 \cdot 18 = 665,3 \text{ kNm}$$

Anzahl der regelmäßigen Teilungen

Trägerlänge, siehe Abschnitt 1.4.3

EI-fache Durchbiegung in Trägermitte, [54] S. 4.2

Biegemoment in Trägermitte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

3 Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: $\gamma_{M0} = 1,0$

Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): $\gamma_{M1} = 1,1$

Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: $\gamma_{M2} = 1,25$

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anmerkung

3.2 Klassifikation des Trägerquerschnitts

Flansche: einseitig gestützt, unter Druckbeanspruchung

$$\varepsilon = (235/f_{yf})^{0,5} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$a_w = 4 \text{ mm (Nahtdicke der Halsnähte zwischen Flanschen und Steg)}$$

$$c_f = (b_f - t_w)/2 - a_w \cdot \sqrt{2} = (360 - 5)/2 - 4 \cdot \sqrt{2} = 171,8 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_f}{t_f} = \frac{173,3}{15} = 11,6 > 10 = 10 \cdot 1,0 = 10\varepsilon \rightarrow \text{Klasse 3}$$

Steg: zweiseitig gestützt, unter Biegebeanspruchung

$$\varepsilon = (235/f_{yw})^{0,5} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$c_w = h_w - 2 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 800 - 2 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} = 788,7 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_w}{t_w} = \frac{788,7}{5} = 157,7 > 124 = 124 \cdot 1,0 = 124 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Klasse 4}$$

3.3 Nachweis der Momententragfähigkeit

a) mittragende Breite der Flansche

Die Berücksichtigung von Schubverzerrungen für die Flansche, ist nicht erforderlich, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$L/b_0 = 2 \cdot L/b_f = 2 \cdot 1773/36 = 98,5 > 50 \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

b) wirksame Breite der Biegedruckzone des Steges

Die Abminderung der Beanspruchbarkeit des Steges (Klasse 4) infolge lokalen Beulens wird durch Verwendung einer wirksamen Breite berücksichtigt.

$$\psi = \sigma_1/\sigma_2 = -1$$

$$k_\sigma = 23,9$$

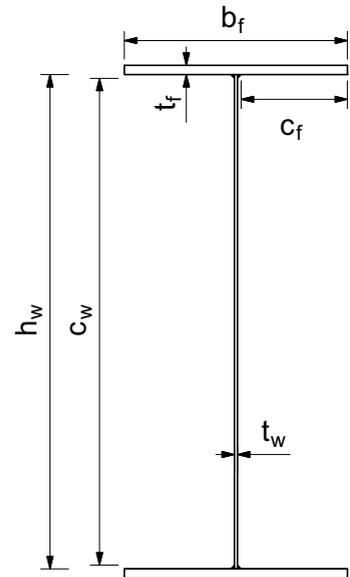
$$\bar{\lambda}_{p,inf} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,673$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_w/t_w}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{800/5}{28,4 \cdot 1 \cdot \sqrt{23,9}} = 1,152 > 0,673 = \bar{\lambda}_{p,inf}$$

$$\rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,152 - 0,055 \cdot (3 - 1)}{1,152^2} = 0,785 < 1$$

$$b_{eff} = \rho \cdot h_w / (1 - \psi) = 0,785 \cdot 800 / (1 + 1) = 314 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



DIN EN 1993-1-5, Absatz 3.1 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.5.2 (4)

Randspannungsverhältnis des Steges, ermittelt am Bruttoquerschnitt

Beulwert, DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1

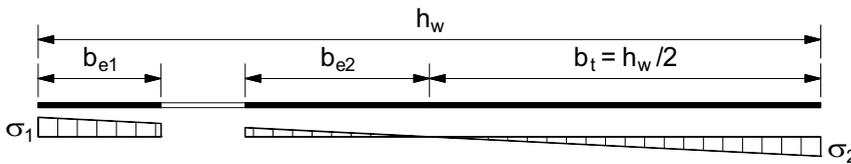
DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

Beulslankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.4 (2)

Abminderungsfaktor für die maßgebende Breite zweiseitig gestützter Querschnittsteile (hier die Steghöhe), DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.2)

wirksame Breite der Biegedruckzone des Steges, DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1

c) wirksame Querschnittswerte



Aufteilung der wirksamen Breite der Biegedruckzone entsprechend DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1

$$\begin{aligned}
 b_{e1} &= 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 314 = 125,6 \text{ mm} \\
 b_{e2} &= 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 314 = 188,4 \text{ mm} \\
 \Delta h_w &= 0,5 \cdot h_w - b_{e1} - b_{e2} = 0,5 \cdot 800 - 125,6 - 188,4 = 86 \text{ mm} \\
 \Delta A_w &= \Delta h_w \cdot t_w = 8,6 \cdot 0,5 = 4,3 \text{ cm}^2 \\
 A_{eff} &= A - \Delta A_w = 148 - 4,3 = 143,7 \text{ cm}^2 \\
 z_{s,\Delta h_w} &= b_{e2} + 0,5 \cdot \Delta h_w = 188,4 + 0,5 \cdot 86 = 231,4 \text{ mm} \\
 e_{z,eff} &= \frac{\Delta A_w \cdot z_{s,\Delta h_w}}{A_{eff}} = 10 \cdot \frac{4,3 \cdot 231,4}{143,7} = 6,92 \text{ mm} \\
 I_{y,eff} &= I_{gr} - \frac{\Delta h_w^3 \cdot t_w}{12} - \Delta A_w \cdot z_{s,\Delta h_w}^2 - A_{eff} \cdot e_{z,eff}^2 \\
 &= 200694,3 - \frac{8,6^3 \cdot 0,5}{12} - 4,3 \cdot 231,4^2 - 143,7 \cdot 0,692^2 \\
 I_{y,eff} &= 198296,5 \text{ cm}^4 \\
 W_{y,eff} &= \frac{I_{y,eff}}{0,5h_w + e_{z,eff} + 0,5t_f} = \frac{198296,5}{0,5 \cdot 80 + 0,692 + 0,5 \cdot 1,5} = 4785 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

nichtwirksame Breite des Stegblechs

nichtwirksame Fläche des Stegblechs

effektive Querschnittsfläche

Schwerpunktabstände der nichtwirksamen Fläche des Steges und des effektiven Querschnitts zur neutralen Achse des Bruttoquerschnitts

effektives Trägheitsmoment des Querschnitts um die y-Achse

effektives Widerstandsmoment in der Mittellinie des unteren Flansches, DIN EN 1993-1-5, Absatz 4.3 (5)

d) Nachweis der Momententragfähigkeit

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,eff} \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{94190}{4785 \cdot 23,5 / 1,0} = 0,84 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.14)

3.4 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Maßgebend für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ist der Bereich neben dem Auflager in der Achse ⑤.

Die Auflagersteifen in den Achsen ④ (bzw. ①) und ⑤ erfüllen die Anforderungen an starre Auflagersteifen.

siehe Abschnitt 3.9.1 c)

a) Beitrag des Steges zur Querkraftbeanspruchbarkeit

$$\begin{aligned}
 a &= 4398 \text{ mm} \\
 a/h_w &= 4398/800 = 5,498 \\
 k_\tau &= \begin{cases} \frac{a}{h_w} < 1: & 4 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \\ \frac{a}{h_w} \geq 1: & 5,34 + 4 \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \end{cases} \rightarrow k_\tau = 5,34 + \frac{4}{5,498^2} = 5,472
 \end{aligned}$$

Steifenabstand, siehe Abschnitt 1.1

Seitenverhältnis des Beulfeldes

Schubbeulwert für das Stegblech, DIN EN 1993-1-5, Glg. (A.5)

3.5 Nachweis der Momenten-Querkraft-Interaktion

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_{y,Ed}^C}{M_{f,Rd}} &= \frac{941,9}{1034,2} = 0,91 < 1 \\ \frac{V_{Ed}^E}{V_{bw,Rd}} &= \frac{215,6}{267,4} = 0,81 < 1 \end{aligned} \right\} \text{Der Interaktionsnachweis kann entfallen, da das Biegemoment allein von den Flanschen und die Querkraft allein vom Stegblech abgetragen werden!}$$

$M_{y,Ed}$ ist hier der Bemessungswert des Biegemomentes in der Achse ©, siehe Abschnitt 2.1.

3.6 Nachweis gegen flanschinduziertes Stegblechbeulen

$$A_w = h_w \cdot t_w = 80 \cdot 0,5 = 40 \text{ cm}^2$$

$$A_{fc} = b_f \cdot t_f = 36 \cdot 1,5 = 54 \text{ cm}^2$$

$$k = \begin{cases} \text{Ausnutzung plastischer Rotationen:} & 0,3 \\ \text{Ausnutzung plastischer Momententragfähigkeit:} & 0,4 \\ \text{Ausnutzung elastischer Momententragfähigkeit:} & 0,55 \end{cases} \rightarrow k = 0,4$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{80}{5} = 160 < 308 = 0,4 \cdot \frac{21000}{235} \cdot \sqrt{\frac{40}{54}} = k \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

→ Flanschinduziertes Stegblechbeulen kann ausgeschlossen werden!

Bruttofläche des Steges

effektive Fläche des Druckflansches

DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 8 (1)

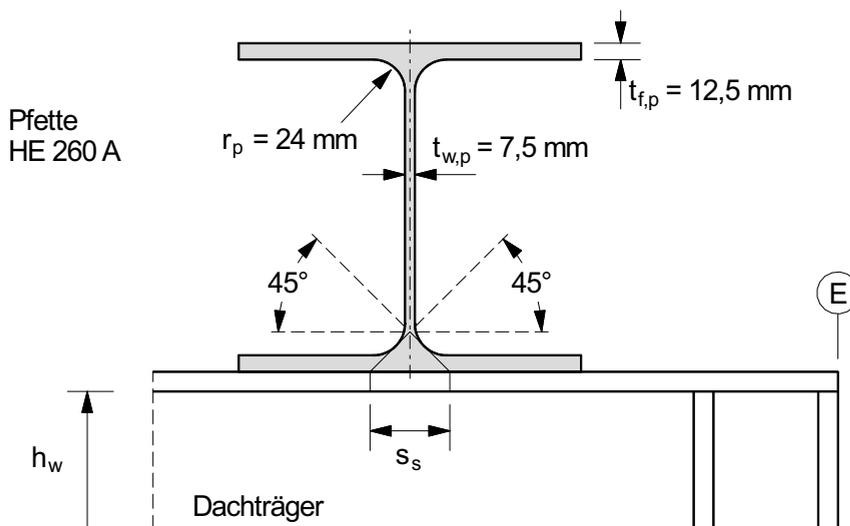
Ausnutzung der plastische Tragfähigkeit der Flansche im Interaktionsnachweis (siehe oben)!

DIN EN 1993-1-5, Glg. (8.1)

3.7 Nachweis der Lasteinleitung für die Firstpfetten

Die Einleitung von Querlasten (hier die Pfettenauflagerkräfte), die über die Flansche an den Längsrändern einwirken, ist für gewalzte und geschweißte Träger nachzuweisen.

DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.1 (1)



Für die Lastausbreitung kann bei Lasteinleitung über Futter oder Bleche (hier der untere Flansch der Pfette) nach DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.3 (1) ein Lastausbreitungswinkel von 1:1 angenommen werden.

Die Pfettenauflagerkraft wird einseitig am oberen Flansch des Dachträgers eingeleitet.

Diese Art der Lasteinleitung entspricht DIN EN 1993-1-5, Absatz 6.1 (2) a).

a) wirksame Lastausbreitungslänge ohne Einfluss des Stegbeulens

$$s_s = t_{w,p} + 2[r_p(2 - \sqrt{2}) + t_{f,p}] = 7,5 + 2 \cdot (24 \cdot 0,59 + 12,5) = 60,6 \text{ mm}$$

$$m_1 = (f_{yf}/f_{yw}) \cdot (b_f/t_w) = \frac{b_f}{t_w} = \frac{360}{5} = 72$$

$$\bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = \begin{cases} \bar{\lambda}_F \geq 0,5: & 0,02(h_w/t_f)^2 \\ \bar{\lambda}_F < 0,5: & 0 \end{cases} \rightarrow m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{80}{1,5}\right)^2 = 56,89$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \\ = 60,6 + 2 \cdot 15 \cdot (1 + \sqrt{72 + 56,89}) = 431,2 \text{ mm} < 4398 \text{ mm} = a$$

Länge der starren Lasteinleitung, DIN EN 1993-1-5, Bild 6.2

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.8)

Abschätzung für den Schlankheitsgrad

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.9)

wirksame Lastausbreitungslänge ohne Einfluss des Stegbeulens, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.10)

b) Beanspruchbarkeit des Steges bei Plattenbeulen unter Querbelastung

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 6 + 2 \cdot \left(\frac{800}{4398}\right)^2 = 6,066$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \approx 0,9 \cdot 6,066 \cdot 21000 \cdot \frac{0,5^3}{80} = 179,1 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw} / F_{cr}} = \sqrt{43,12 \cdot 0,5 \cdot 23,5 / 179,1} = 1,68 > 0,5$$

→ Die Abschätzung für den Schlankheitsgrad ist zutreffend!

Beulwert für einseitige Lasteinleitung am Flansch, DIN EN 1993-1-5, Bild 6.1 (a)

ideale Verzweigungslast für Stegbeulen infolge Querlasteinleitung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.5)

Schlankheitsgrad, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.4)

siehe oben

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{1,68} = 0,298 < 1,0$$

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 0,298 \cdot 431,2 = 128,5 \text{ mm}$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{23,5 \cdot 128,5 \cdot 0,5}{1,1} = 137,3 \text{ kN}$$

Abminderungsbeiwert für die wirksame Lastausbreitungslänge, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.3)

wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.2)

Beanspruchbarkeit des Steges bei Plattenbeulen unter Querbelastung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.1)

c) Nachweis der Lasteinleitung für die Pfettenauflagerkräfte (Querlast)

$$\eta_2 = F_{2,Ed} / F_{Rd} = 53,89 / 137,3 = 0,39 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-5, Glg. (6.14)

d) Interaktionsnachweise

$$\left[\eta_3 \left(1 - \frac{F_{2,Ed}}{2 \cdot V_{Ed}^E} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 = \left[0,79 \cdot \left(1 - \frac{53,89}{2 \cdot 215,6} \right) \right]^{1,6} + 0,39 = 0,94 < 1$$

Interaktion von Querlast und Querkraft, DIN EN 1993-1-5/NA, Glg. (NA.7)

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 = 0,39 + 0,8 \cdot 0,84 = 1,06 < 1,4$$

Interaktion von Querlast und Biegemoment, DIN EN 1993-1-5, Glg. (7.2)

→ Die Interaktionsnachweise sind erfüllt.

3.8 Biegedrillknicknachweis für den Träger

Der Biegedrillknicknachweis für den Träger wird als Knicknachweis des gedrückten oberen Flansches, der durch die Pfetten gegen Ausweichen senkrecht zur Stegebene gehalten ist, geführt.

$$A_{eff,f} = b_f \cdot t_f = 36 \cdot 1,5 = 54 \text{ cm}^2$$

$$I_{eff,f} = \frac{b_f^3 \cdot t_f}{12} = \frac{36^3 \cdot 1,5}{12} = 5832 \text{ cm}^4$$

$$b_{eff} = 314 \text{ mm}$$

$$A_{eff,w,c} = b_{eff} \cdot t_w = 31,4 \cdot 0,5 = 15,7 \text{ cm}^2$$

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{eff,f}}{A_{eff,f} + \frac{1}{3}A_{eff,w,c}}} = \sqrt{\frac{5832}{54 + \frac{1}{3} \cdot 15,7}} = 9,92 \text{ cm}$$

$$\psi = \frac{M_{y,Ed}^D}{M_{y,Ed}^C} = \frac{708,3}{941,9} = 0,752 \begin{matrix} \leq 1 \\ \geq -1 \end{matrix}$$

$$k_c \approx \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,752} = 0,924$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1 = 0,4 + 0,1 = 0,5$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y} = \pi \cdot \sqrt{210000/235} = 93,91$$

$$L_{cr} = a = 4500 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff} = 4785 \text{ cm}^3$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{4785 \cdot 23,5}{1,1} \cdot 10^{-2} = 1022,3 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c \cdot L_c}{i_{f,z} \cdot \lambda_1} = \frac{0,924 \cdot 450}{9,92 \cdot 93,91} = 0,45 < 0,54 = 0,5 \cdot \frac{1022,3}{941,9} = \bar{\lambda}_{c0} \cdot \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}^C}$$

→ Der Nachweise gegen Biegedrillknicken ist erfüllt.

3.9 Nachweise für die Quersteifen

3.9.1 Auflagersteifen

a) Querschnittsklassifikation

einseitig gestützte Bleche unter Druckbeanspruchung:

$$\frac{b_{st}}{t_{st}} = \frac{175}{15} = 11,67 > 10 = 10 \cdot 1,0 = 10 \cdot \varepsilon < 14 = 14 \cdot 1,0 = 14 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Klasse 3}$$

Die Auflagersteifen sind voll wirksam, d.h. ein Beulen der Steifen unter Druckbeanspruchung kann ausgeschlossen werden.

vereinfachtes Bemessungsverfahren für Träger mit Biegedrillknickbehinderungen im Hochbau, DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.2.4

wirksame Fläche und wirksames Flächenmoment um die schwache Querschnittsachse für den gedrückten Flansch

wirksame Breite, siehe Abschnitt 3.3 c)

wirksame Fläche der Biegedruckzone des Steges

Trägheitsradius des gedrückten Flansches um die schwache Querschnittsachse unter Berücksichtigung von 1/3 der wirksamen Fläche der Biegedruckzone des Steges

Verhältnis der Stabendmomente des maßgebenden Bereiches zwischen Achse © und ©, siehe Abschnitt 2.1

Korrekturbeiwert für die Verteilung der Momente entlang der Stabachse, DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.6

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.3 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.4 (1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.4 (1)

Knicklänge = Pfettenabstand

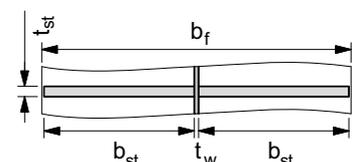
siehe Abschnitt 3.3 c)

Biegemomentebeanspruchbarkeit, DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.4 (1)

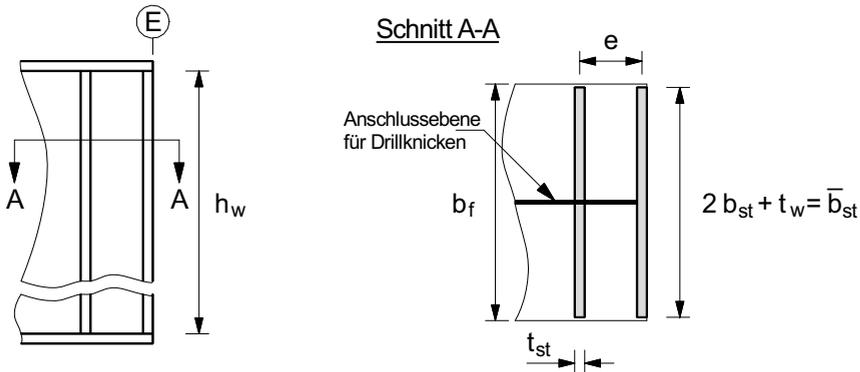
DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.59)

für die Abmessungen der Auflagersteifen siehe Abschnitt 1.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



b) Mindestanforderung an Quersteifen – Drillknicken



$$I_t = \frac{1}{3} \cdot b_{st} \cdot t_{st}^3 = \frac{1}{3} \cdot 17,5 \cdot 1,5^3 = 19,7 \text{ cm}^4$$

$$I_p = \frac{b_{st}^3 \cdot t_{st}}{3} + \frac{b_{st} \cdot t_{st}^3}{12} = \frac{17,5^3 \cdot 1,5}{3} + \frac{17,5 \cdot 1,5^3}{12} = 2684,6 \text{ cm}^4$$

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{19,7}{2684,6} = 7,33 \cdot 10^{-3} > 5,93 \cdot 10^{-3} = 5,3 \cdot \frac{235}{210000} = 5,3 \cdot \frac{f_y}{E}$$

→ Die Mindestanforderung an die Quersteifen ist erfüllt.

c) Anforderungen an starre Auflagersteifen

$$e = 94,5 \text{ mm} > 80 \text{ mm} = 0,1 \cdot 800 = 0,1 \cdot h_w$$

$$\bar{b}_{st} = 2 \cdot b_{st} + t_w = 2 \cdot 175 + 5 = 355 \text{ mm}$$

$$A_{\min} = 4 \cdot h_w \cdot t_w^2 / e = 4 \cdot 80 \cdot 0,5^2 / 9,45 = 8,47 \text{ cm}^2$$

$$A_e = \bar{b}_{st} \cdot t_{st} = 35,5 \cdot 1,5 = 53,25 \text{ cm}^2 > 8,47 \text{ cm}^2 = A_{\min}$$

→ Die Anforderungen an starre Auflagersteifen sind erfüllt.

d) Nachweis der Einleitung der Auflagerkräfte in die Auflagersteifen

Dieser Nachweis ist als Nachweis gegen Biegeknicken der Auflagersteife senkrecht zur Stegebene des Dachträgers zu führen.

$$I_{st} = b_{st}^3 \cdot t_{st} / 12 = 35,5^3 \cdot 1,5 / 12 = 5592 \text{ cm}^4$$

$$L_{cr,\perp} = \beta_{\perp} \cdot b = 0,75 \cdot 815 = 611 \text{ mm}$$

$$N_{cr,\perp} = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 5592 / 61,1^2 = 310459 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = A_e \cdot f_y / \gamma_{M0} = 53,25 \cdot 23,5 / 1,0 = 1251,4 \text{ kN}$$

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (8)

I_t ist für ein einzelnes Steifenblech anzusetzen.

I_p ist bezogen auf die Ansohlsebene zwischen einem einzelnen Steifenblech und dem Trägersteg!

DIN EN 1993-1-5, Glg. (9.3)

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.3.1 (3)

Steifenabstand

siehe Skizze unter b)

erforderliche Fläche einer Steife

vorhandene Fläche einer Steife

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.4 (2)

Maßgebend für diesen Nachweis ist die Auflagersteife in der Achse ©.

Trägheitsmoment einer Auflagersteife

Knicklänge und Verzweigungslast für das Knicken der Auflagersteife senkrecht zur Stegebene des Trägers

Druckbeanspruchbarkeit einer Auflagersteife DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.10)

$$N_{Ed}/N_{cr} = V_{Ed}^E/N_{cr,L} = 215,6/310459 = 6,9 \cdot 10^{-4} \ll 0,04$$

→ Der Biegeknicknachweis darf entfallen und es ist nur ein Querschnittsnachweis zu führen.

$$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 215,6/1251,4 = 0,17 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

e) Nachweis der Schweißnähte zwischen Steg und Auflagersteifen bzw. Steg und Flanschen

Der Steg ist mit Doppelkehlnähten $a_w = 4 \text{ mm}$ an die Auflagersteifen und die Flansche angeschlossen.

$$t_{\max} = \max(t_{st}|t_f|t_w) = \max(15|15|5) = 15 \text{ mm}$$

$$a_w = 4 \text{ mm} > \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3,37 \text{ mm} = \sqrt{15} - 0,5 = \sqrt{t_{\max}} - 0,5 \end{cases}$$

$$\frac{V_{Ed}^E}{V_{bw,Rd}} = \frac{215,6}{267,4} = 0,81 < 1 \rightarrow F_{w,Ed} = \frac{V_{Ed}^E}{h_w} = \frac{215,6}{80} = 2,7 \text{ kN/cm}$$

$$\beta_w = 0,8$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{360/\sqrt{3}}{0,8 \cdot 1,25} = 207,8 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = 2 \cdot f_{vw,d} \cdot a_w = 2 \cdot 207,8 \cdot 0,4 = 16,6 \text{ kN/cm}$$

$$F_{w,Ed}/F_{w,Rd} = 2,7/16,6 = 0,16 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

3.9.2 Zwischenliegende Quersteifen

a) Querschnittsklassifikation

einseitig gestützte Bleche unter Druckbeanspruchung:

$$\frac{b_{st}}{t_{st}} = \frac{150}{12} = 12,5 > 10 = 10 \cdot 1,0 = 10 \cdot \varepsilon < 14 = 14 \cdot 1,0 = 14 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Klasse 3}$$

Die Quersteifen sind voll wirksam, d.h. ein Beulen der Quersteifen unter Druckbeanspruchung kann ausgeschlossen werden.

b) Mindestanforderungen an Quersteifen – Knicken

Quersteifen, die als starre Auflager des Steges senkrecht zu seiner Ebene wirken, haben folgenden Mindestanforderungen zu genügen:

DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.1.2 (4)

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.9)

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

maßgebende Blechdicke

Grenzwerte für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

Bemessungswert des Schubflusses in den Schweißnähten, DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.3.5 (1)

materialabhängiger Korrelationsbeiwert DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

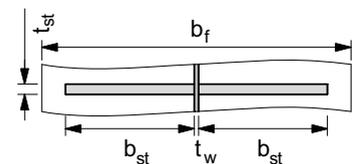
Scherfestigkeit der Kehlnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

Tragfähigkeit der Kehlnähte je Längeneinheit, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

für die Abmessungen der Quersteifen siehe Abschnitt 1.1

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



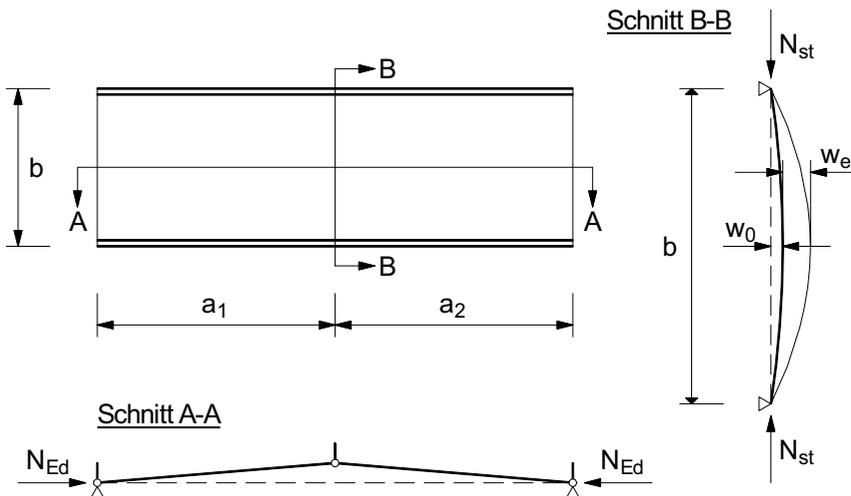
DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (4)

Festigkeit: $\sigma_{\max} \leq f_y / \gamma_{M1}$

Steifigkeit: $w_{el} \leq b/300$

Die Einhaltung der Mindestanforderungen an die Quersteifen für Knicken wird hier mit dem in *Braun/Kuhlmann* [41], Abschnitt 8.1.2.3 angegebenen Verfahren nachgewiesen.

Maßgebend für die zu führenden Nachweise ist die zwischenliegende Quersteife in der Achse ©!



Die Spannungen und Verformungen sind mit einer elastischen Berechnung nach Theorie II. Ordnung zu ermitteln.

System zum Nachweis der Quersteifen in Anlehnung an [41] Bild 51

Stich der sinusförmigen geometrischen Imperfektion, DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (2)

Pfettenauflagerkraft, Abschnitt 1.4.1 c)

Trägereigengewicht, Abschnitt 1.4.1 c)

maßgebende Schubkraft im Falle veränderlicher Schubkraft gemäß DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.3.3 (3)

Schlankheitsgrad, Abschnitt 3.4 a)

Normalkraft aus Zugfeldwirkung, DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.3.3 (3)

in die Steife eingeleitete Normalkraft

siehe Abschnitt 3.3 c)

Abstand zwischen Stegdruckrand und Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts

Moment in Achse ©, Abschnitt 2.1

größte Druckspannung in den benachbarten Stegfeldern

siehe Abschnitt 3.8

größte einwirkende Druckkraft in den Nachbarfeldern, [41] Glg. (98)

Beulwert, DIN EN 1993-1-5, Tabelle 4.1

$$w_0 = \min \left(\begin{array}{l} a_1/300 \\ a_2/300 \\ b/300 \end{array} \right) = \min \left(\begin{array}{l} 4330/300 \\ 4500/300 \\ 815/300 \end{array} \right) = 2,72 \text{ mm}$$

$$N_{st,Ed} = F_{1,d} = 99,5 \text{ kN}$$

$$e_d = 1,57 \text{ kN/m}$$

$$V_{Ed} = V_{Ed}^{B,l} + \frac{1}{2} \cdot e_d \cdot h_w = 157,5 + \frac{1}{2} \cdot 1,57 \cdot 0,8 = 158,1 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_w = 1,829$$

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{h_w \cdot t_w}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 158,1 - \frac{80 \cdot 0,5}{1,829^2} \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 10,6 \text{ kN}$$

$$N_{st} = N_{st,Ed} + N_{st,ten} = 99,5 + 10,6 = 110,1 \text{ kN}$$

$$e_{z,eff} = 6,92 \text{ mm}$$

$$z_{c,max} = \frac{h_w}{2} + e_{z,eff} = \frac{800}{2} + 6,92 = 406,92 \text{ mm}$$

$$M_{y,Ed}^C = 941,9 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{c,max} = \frac{M_{y,Ed}^C}{I_{y,eff}} \cdot z_{c,max} = 10 \cdot \frac{94190}{198296,5} \cdot 40,69 = 193,3 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{eff,w,c} = 15,7 \text{ cm}^2$$

$$N_{Ed} = A_{eff,w,c} \cdot \frac{\sigma_{c,max}}{2} = 15,7 \cdot \frac{19,33}{2} = 151,7 \text{ kN}$$

$$k_\sigma = 23,9$$

$$\sigma_{cr,p} = 189800 \cdot k_{\sigma} \cdot \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 = 189800 \cdot 23,9 \cdot \left(\frac{5}{800}\right)^2 = 177,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,c} = 189800 \cdot \left(\frac{t_w}{a_2}\right)^2 = 189800 \cdot \left(\frac{5}{4390}\right)^2 = 0,246 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = \frac{0,246}{177,2} = 0,0014 \ll 0,5 \rightarrow \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = 0,5$$

$$\sigma_m = \frac{N_{Ed}}{b} \cdot \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right) \cdot \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = \frac{151,7}{81,5} \cdot \left(\frac{10}{433} + \frac{10}{450}\right) \cdot 0,5 = 0,042 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta N_{st} = \sigma_m \cdot \left(\frac{b}{\pi}\right)^2 = 0,042 \cdot \left(\frac{815}{\pi}\right)^2 \cdot 10^{-3} = 2,84 \text{ kN}$$

Nach DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.1 (2) darf beim Nachweis der Knicksicherheit von Steifen für den Steifenquerschnitt eine mitwirkende Breite des Steges von $15 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ auf jeder Seite einer Steife angenommen werden. Die mitwirkenden Breiten zweier benachbarter Steifen dürfen sich dabei nicht überschneiden.

$$b_{w,eff} = 15 \cdot \varepsilon \cdot t_w = 15 \cdot 1 \cdot 5 = 75 \text{ mm} < 2165 \text{ mm} = 4330/2 = a_1/2$$

$$A_{st,eff} = (2 \cdot b_{st} + t_w) \cdot t_{st} + 2 \cdot b_{w,eff} \cdot t_w = (2 \cdot 15 + 0,5) \cdot 1,2 + 2 \cdot 7,5 \cdot 0,5 = 44,1 \text{ cm}^2$$

$$I_{st} = \frac{(2 \cdot b_{st} + t_w)^3 \cdot t_{st}}{12} = \frac{(2 \cdot 15 + 0,5)^3 \cdot 1,2}{12} = 2837,3 \text{ cm}^4$$

$$e_{st,max} = b_{st} + 0,5 \cdot t_w = 150 + 0,5 \cdot 5 = 152,5 \text{ mm}$$

$$W_{st} = I_{st}/e_{st,max} = 2837,3/152,5 = 186 \text{ cm}^3$$

$$N_{cr,st} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{st}}{b^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2837}{81,5^2} = 88534 \text{ kN}$$

$$w_{el} = w_0 \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{N_{st} + \Delta N_{st}} - 1} = 2,72 \cdot \frac{1}{\frac{88534}{110,1 + 2,84} - 1} = 3,47 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$f = w_0 + w_{el} = 2,72 + 3,47 \cdot 10^{-3} = 2,72 \text{ mm}$$

$$M_{st} = (N_{st} + \Delta N_{st}) \cdot f = (110,1 + 2,84) \cdot 0,272 = 30,72 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{N_{st}}{A_{st}} + \frac{M_{st}}{W_{st}} = 10 \cdot \left(\frac{110,1}{44,1} + \frac{30,72}{186}\right) = 26,62 \text{ N/mm}^2$$

$$b/w_{el} = 815/3,47 \cdot 10^{-3} = 234870 \gg 300$$

→ Die Mindestanforderung an die Steifigkeit der Quersteifen ist erfüllt.

$$\gamma_{M1} \cdot \sigma_{max}/f_y = 1,1 \cdot 26,62/235 = 0,12 < 1,0$$

→ Die Mindestanforderung an die Festigkeit der Quersteifen ist erfüllt.

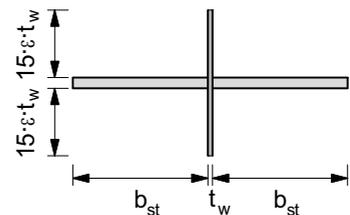
elastische kritische Beulspannung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (A.1)

elastische kritische Knickspannung, DIN EN 1993-1-5, Glg. (4.8)

Verhältnis der kritischen Spannungen, [41] Glg. (97)

auf die Quersteife wirkende Abtriebsspannung, DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (5)

den Abtriebsspannungen äquivalente Normalkraftbeanspruchung, [41] Glg. (101)



mitwirkende Breite des Steges

wirksame Querschnittsfläche und Trägheitsmoment für Biegung um die Stegebene einer Quersteife

Die Mitwirkung des Steges ist für das Trägheitsmoment vernachlässigbar.

Randfaserabstand \perp zum Steg und Widerstandsmoment der Quersteife

Verzweigungslast der Steife für Knicken senkrecht zur Stegebene

Stich der Verformung der Steife senkrecht zur Stegebene berechnet nach Elastizitätstheorie II. Ordnung, [41] Glg. (102)

Gesamtverformung und Biegemoment der Steife berechnet nach Elastizitätstheorie II. Ordnung

größte Normalspannung in der Steife berechnet nach Elastizitätstheorie II. Ordnung, [41] Glg. (103)

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (4)

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (4)

c) Mindestanforderung an Quersteifen – Drillknicken

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot b_{st} \cdot t_{st}^3 = \frac{1}{3} \cdot 15 \cdot 1,2^3 = 8,64 \text{ cm}^4$$

$$I_p = \frac{b_{st}^3 \cdot t_{st}}{3} + \frac{b_{st} \cdot t_{st}^3}{12} = \frac{15^3 \cdot 1,2}{3} + \frac{15 \cdot 1,2^3}{12} = 1352,2 \text{ cm}^4$$

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{8,64}{1352,2} = 6,39 \cdot 10^{-3} > 5,93 \cdot 10^{-3} = 5,3 \cdot \frac{235}{210000} = 5,3 \cdot \frac{f_y}{E}$$

→ Die Mindestanforderung an die Quersteifen ist erfüllt.

d) Mindestanforderung an das Trägheitsmoment starrer Quersteifen

$$a = a_1 = 4330 \text{ mm}$$

$$I_{\min} = \begin{cases} \frac{a}{h_w} < \sqrt{2}: & \frac{3}{2} \cdot \frac{h_w^3 \cdot t_w^3}{a^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{80^3 \cdot 0,5^3}{433^2} = 0,51 \text{ cm}^4 & (1) \\ \frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}: & \frac{3}{4} \cdot h_w \cdot t_w^3 = \frac{3}{4} \cdot 80 \cdot 0,5^3 = 7,5 \text{ cm}^4 & (2) \end{cases}$$

$$a/h_w = 433/80 = 5,41 > \sqrt{2} \rightarrow \text{Fall (2) ist anzuwenden.}$$

$$I_{st}/I_{\min} = 2837,3/7,5 = 378 > 1 \rightarrow \text{Die Mindestanforderung ist erfüllt.}$$

e) Schweißnähte zwischen Steg und Quersteifen

Der Steg ist in gleicher Weise an die Quersteifen angeschlossen wie an die Auflagersteifen und Flansche, d.h. mit Doppelkehlnähten $a_w = 4 \text{ mm}$.

4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit**4.1 Effektives Trägheitsmoment**

Das für die Berechnung der Durchbiegung erforderliche effektive Trägheitsmoment I_{eff} kann wie folgt bestimmt werden:

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{gr}} - \frac{\sigma_{\text{gr}}}{\sigma_{\text{com,Ed,ser}}} [I_{\text{gr}} - I_{\text{eff}}(\sigma_{\text{com,Ed,ser}})]$$

$$I_{\text{gr}} = 200694,3 \text{ cm}^4$$

$$M_{y,\text{char}} = 665,3 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{\text{gr}} = \frac{M_{y,\text{char}}}{I_{\text{gr}}} \cdot \frac{h}{2} = 10 \cdot \frac{66530}{200694,3} \cdot \frac{83}{2} = 137,6 \text{ N/mm}^2$$

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.2.1 (8)

I_t ist für ein einzelnes Steifenblech anzusetzen.

I_p ist bezogen auf die Anchlussebene zwischen einem einzelnen Steifenblech und dem Trägersteg!

DIN EN 1993-1-5, Glg. (9.3)

DIN EN 1993-1-5, Absatz 9.3.3 (3)

maßgebende Beulfeldlänge

Mindestwerte für das Trägheitsmoment von starren Quersteifen senkrecht zur Stegebene des Trägers in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis der benachbarten Beulfelder entsprechend DIN EN 1993-1-5, Glg. (9.6)

Der Nachweis für die Schweißnähte ist wie in Abschnitt 3.9.1 gezeigt zu führen und wird hier nicht dargestellt.

DIN EN 1993-1-5, Glg. (E.4)

Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts, siehe Abschnitt 1.2.2
Biegemoment, siehe Abschnitt 2.3

größte Biegespannung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, ermittelt am Bruttoquerschnitt

Das effektive Trägheitsmoment und die am wirksamen Querschnitt zu ermittelnde größte Biegespannung $\sigma_{\text{com,Ed,ser}}$ sind voneinander abhängig, d.h. es ist eine iterative Berechnung erforderlich.

Wird konservativ als größte Biegespannung der Wert der Streckgrenze angesetzt, kann die Berechnung in einem Schritt erfolgen.

$$\sigma_{\text{com,Ed,ser}} = f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Ausgangswert für das spannungsabhängige effektive Trägheitsmoment ist der für den Grenzzustand der Tragfähigkeit berechnete Wert $I_{y,\text{eff}}$.

$$I_{y,\text{eff}} = 198296,5 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,\text{eff,ser}} \approx I_{\text{gr}} - \frac{\sigma_{\text{gr}}}{f_y} \cdot (I_{\text{gr}} - I_{y,\text{eff}})$$

$$I_{y,\text{eff,ser}} \approx 200694,3 - \frac{137,6}{235} \cdot (200694,3 - 198296,5) = 199290,3 \text{ cm}^4$$

siehe Abschnitt 3.3 c)

konservative Näherung für das Trägheitsmoment des wirksamen Querschnitts im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

4.2 Nachweis der Verformungsbegrenzung

Die Durchbiegung δ_z in Trägermitte ergibt sich wie folgt:

$$EI_y \cdot \delta_z = 21410 \text{ kNm}^3$$

$$\delta_z = \frac{EI_y \cdot \delta_z}{E \cdot I_{y,\text{eff,ser}}} = 10 \cdot \frac{21410 \cdot 10^6}{21000 \cdot 199290,3} = 51,2 \text{ mm}$$

siehe Abschnitt 2.3

DIN EN 1990 und DIN EN 1993-1-1 enthalten keine Grenzwerte für die Durchbiegung. Es wird hier zur Orientierung der Grenzwert nach DIN V ENV 1993-1-3 herangezogen:

$$\delta_z = 51,2 \text{ mm} < 90 \text{ mm} = \frac{18000}{200} = \frac{L_{\text{sym}}}{200} \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN V ENV 1993-1-3, Tabelle 4.1

Beispiel 1.9: Eingespannter Stützenfuß

Inhalt

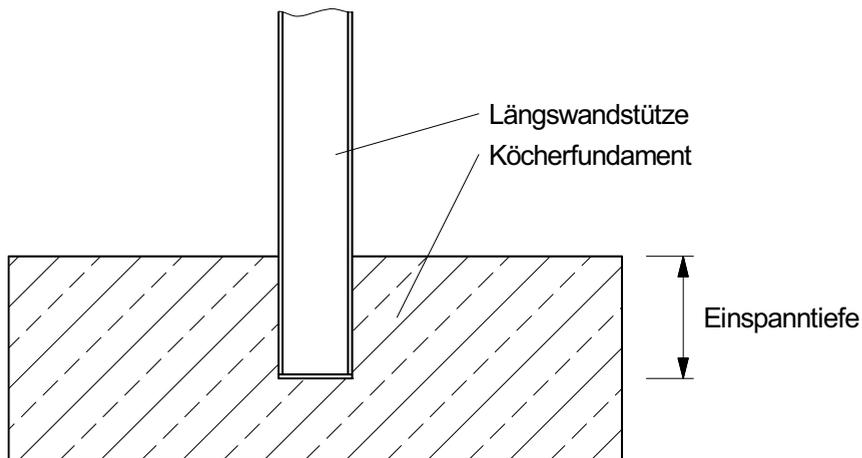
| | Seite |
|--|-------|
| Einordnung in das Projekt | 156 |
| Aufgabenstellung | 156 |
| 1 System und Einwirkungen | 157 |
| 1.1 Lastabtragungsmodell | 157 |
| 1.2 Querschnitts- und Materialkennwerte der Stütze | 158 |
| 1.3 Materialkennwerte des Fundamentes | 158 |
| 1.4 Bemessungswerte der Einwirkungen | 158 |
| 2 Grenzzustände der Tragfähigkeit | 159 |
| 2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten | 159 |
| 2.2 Klassifikation des Stützenquerschnitts | 159 |
| 2.3 Bestimmung der erforderlichen Einspanntiefe der Stütze | 159 |
| 2.3.1 Biegung um die starke Querschnittsachse (y-Achse) | 159 |
| 2.3.2 Biegung um die schwache Querschnittsachse (z-Achse) | 161 |
| 2.4 Schnittgrößenermittlung für das Stützenprofil | 162 |
| 2.4.1 Festlegung der Einspanntiefe | 162 |
| 2.4.2 Lastkombination 2 | 163 |
| 2.4.3 Lastkombination 6 | 165 |
| 2.5 Tragfähigkeitsnachweise für das Stützenprofil | 166 |
| 2.5.1 Lastkombination 2 | 166 |
| 2.5.2 Lastkombination 6 | 168 |
| 2.6 Einleitung der Normalkraft in das Fundament | 169 |

Beispiel 1.9: Eingespannter Stützenfuß

Einordnung in das Projekt

Den Nachweisen für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Längswandstützen in den Achsen Ⓐ bzw. ① liegt eine starre Einspannung dieser Stützen um beide Querschnittsachsen zugrunde.

Zur Realisierung der starren Einspannung werden die Längswandstützen in Stahlbetonköcherfundamenten gegründet.



DIN EN 1993-1-8 enthält kein Verfahren für die Nachweise der Tragfähigkeit von Stützen, die in Köcherfundamente eingespannt sind.

In *Kindmann/Laumann* [48] wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, mit dem diese Nachweise in Übereinstimmung mit den Regelungen in DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1994-1-1 geführt werden können, das nachfolgend angewendet wird.

Aufgabenstellung

Es ist die erforderliche Einspanntiefe der Stütze in das Köcherfundament zu bestimmen und dann für eine gewählte Einspanntiefe die Nachweise der Tragfähigkeit für die Längswandstütze im Einspannbereich zu führen.

Die Rotationssteifigkeit des eingespannten Stützenfußes wird ohne weiteren Nachweis als ausreichend für eine Klassifizierung als starr angenommen.

Die Bemessung des Fundamentes selbst ist nicht Gegenstand dieses Beispiels.

Für die Bezeichnung der Achsen siehe Vorbemerkungen S. 1.

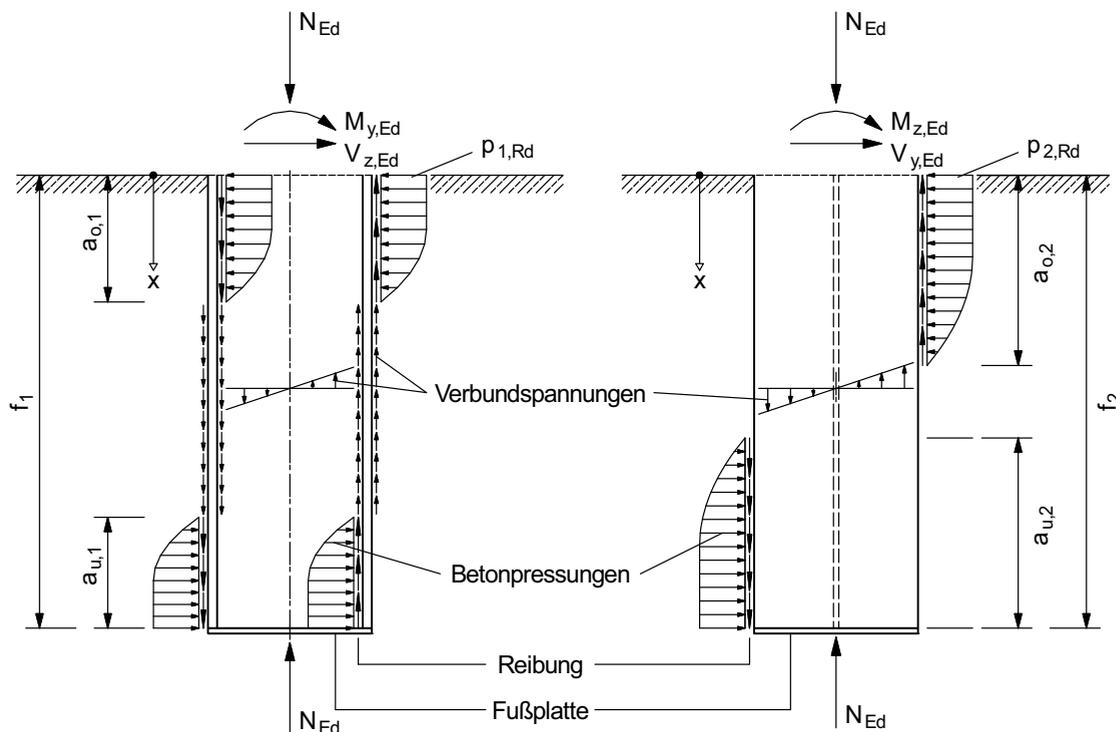
Für die Längswandstützen siehe Beispiel 1.7.

Die Klassifizierung der Rotationssteifigkeit von eingespannten Stützenfüßen mit Fußplatte und Zugankern erfolgt nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 5.2.2.5 (2).

1 System und Einwirkungen

1.1 Lastabtragungsmodell

[48], Abschnitt 1 und Bild 4



Die Druckkraft N_{Ed} wird am Boden des Köchers über eine Fußplatte in das Fundament eingeleitet.

Für die Einspanntiefe sind folgende Bedingungen einzuhalten, um ein Versagen des Betons auszuschließen:

- Biegung um die starke Querschnittsachse: $f_1 \geq a_{o,1} + a_{u,1}$
- Biegung um die schwache Querschnittsachse: $f_2 \geq a_{o,2} + a_{u,2}$

Das Biegemoment $M_{y,Ed}$ wird überwiegend durch ein Kräftepaar, das sich aus den Betonpressungen in den Druckbereichen mit den Längen $a_{o,1}$ bzw. $a_{u,1}$ aufbaut, in die Köcherwandung eingeleitet.

In den Fugen zwischen den Profilflanschen und der Köcherwandung sind in den Druckbereichen Reibungskräfte aktiv, die ebenfalls für den Abtrag des Biegemomentes $M_{y,Ed}$ berücksichtigt werden.

Für den Reibbeiwert gilt folgender Bemessungswert: $C_{f,d} = 0,2$

Für Verbundstützen dürfen zwischen Stahlprofil und Beton Verbundspannungen τ_{Rd} angesetzt werden, die im vorliegenden Fall außerhalb der Druckbereiche zwischen dem Stützenprofil und der Köcherwandung angenommen werden.

Der Bemessungswert der Verbundtragfähigkeit für vollständig einbetonierte I-Profile beträgt $\tau_{Rd} = 0,3 \text{ N/mm}^2$.

Der Abtrag des Biegemomentes $M_{z,Ed}$ erfolgt prinzipiell wie für $M_{y,Ed}$ beschrieben, aber mit größeren Längen der Druckbereiche $a_{o,2}$ bzw. $a_{u,2}$ wegen der im Vergleich zur Flanschbreite geringen Flanschdicke.

Die Querkräfte $V_{y,Ed}$ und $V_{z,Ed}$ werden über die oberen Druckbereiche in die Köcherwandung eingetragen.

Die Bemessung der Fußplatte wird in Abschnitt 2.6 dargestellt.

Für den Verlauf der Betonpressungen wird in [48] das Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN EN 1992-1-1, Bild 3.3 zugrunde gelegt.

Die Grenzwerte $p_{1,Rd}$ und $p_{2,Rd}$ für mit den zugehörigen Breiten multiplizierte Betonpressungen werden in Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 ermittelt.

Der Ansatz der Reibung ist konform zu DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.2 (5).

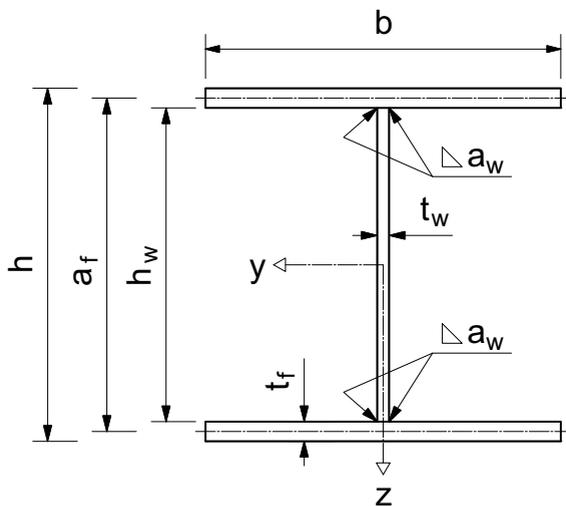
DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.2 (6)

Der Ansatz der Verbundspannungen erfolgt in Übereinstimmung mit DIN EN 1994-1-1, Absatz 6.7.4.3 (3).

DIN EN 1994-1-1, Tabelle 6.6

1.2 Querschnitts- und Materialkennwerte der Stütze

Der Stützenquerschnitt ist ein geschweißtes I-Profil aus Baustahl S275. Die Querschnitts- und Materialkennwerte sind Beispiel 1.7 entnommen.



- $h = 360 \text{ mm}$
- $a_f = 340 \text{ mm}$
- $b = 360 \text{ mm}$
- $t_f = 20 \text{ mm}$
- $h_w = 320 \text{ mm}$
- $t_w = 12 \text{ mm}$
- $a = 4 \text{ mm}$
- $A = 182,4 \text{ cm}^2$
- $I_y = 44940,8 \text{ cm}^4$
- $I_z = 15556,6 \text{ cm}^4$
- $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$
- $f_u = 430 \text{ N/mm}^2$
- $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Beispiel 1.7, Abschnitte 1.2.1 bis 1.2.3

- Querschnittshöhe
- Abstand der Flanschsmitellinien
- Flanschbreite
- Flanschdicke
- Höhe des Stegblechs
- Stegdicke
- Nahtdicke der Halsnähte
- Querschnittsfläche
- Trägheitsmoment um die y-Achse
- Trägheitsmoment um die z-Achse
- Streckgrenze und Zugfestigkeit für Baustahl S275 (DIN EN 10025-2), DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1
- Elastizitätsmodul für Baustahl, DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.3 Materialkennwerte des Fundamentes

Für das Köcherfundament wird Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 verwendet:

Betonfestigkeitsklasse entsprechend DIN EN 1992-1-1, Absatz 3.1.2 (1)

- charakteristische Zylinderdruckfestigkeit: $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$
- Elastizitätsmodul: $E_{cm} = 30000 \text{ N/mm}^2$
- Abminderungsfaktor für die Druckfestigkeit: $\alpha_{cc} = 0,85$

- DIN EN 1992-1-1, Tabelle 3.1
- DIN EN 1992-1-1, Tabelle 3.1
- DIN EN 1992-1-1/NA, (NDP) 3.1.6 (1)

1.4 Bemessungswerte der Einwirkungen

Als Bemessungswerte der Einwirkungen werden die für die Stütze berechneten Schnittgrößen an der Einspannstelle angesetzt.

Die Schnittgrößenermittlung ist in Beispiel 1.7, Abschnitt 2.1 enthalten.

Für die zu führenden Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist die Berücksichtigung der Lastkombinationen 2, 3 und 6 ausreichend.

Nummerierung der Lastkombinationen wie in Beispiel 1.7, Abschnitt 2.1

| Lastkombination | N_{Ed} [kN] | $V_{z,Ed}$ [kN] | $M_{ya,Ed}$ [kNm] | $V_{y,Ed}$ [kN] | $M_{za,Ed}$ [kNm] |
|-----------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 2 | 434,5 | 24,6 | 233,1 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | 453,5 | 0,0 | 79,1 | 6,2 | 45,7 |
| 6 | 309,3 | -28,1 | -153,3 | 10,4 | 76,1 |

- maßgebend für die Einspanntiefe f_1
- maßgebend für die Fußplattendicke
- maßgebend für die Einspanntiefe f_2

2 Grenzzustände der Tragfähigkeit

2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten:

| | |
|--|----------------------|
| plastische Baustahlquerschnittstragfähigkeit: | $\gamma_{M0} = 1,0$ |
| Bruchversagen zugbeanspruchter Baustahlquerschnitte: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen: | $\gamma_{M2} = 1,25$ |
| Beanspruchbarkeit von Beton: | $\gamma_c = 1,5$ |

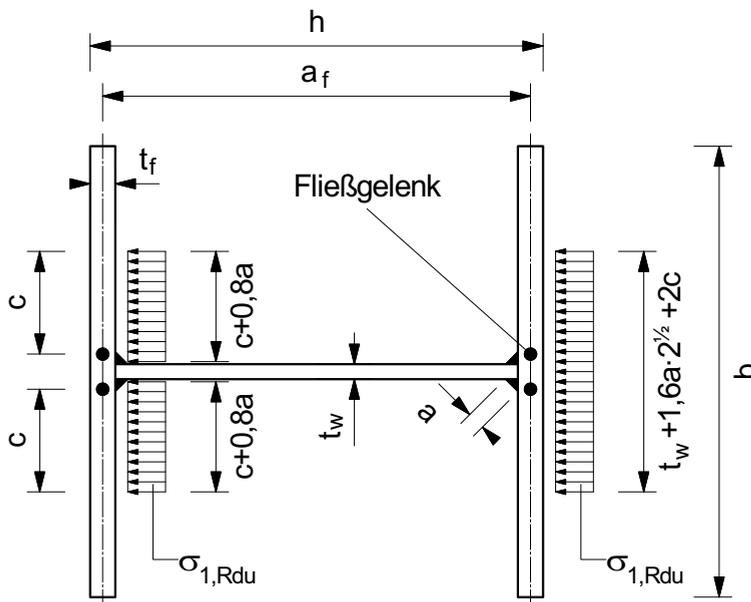
2.2 Klassifikation des Stützenquerschnitts

Der Stützenquerschnitt ist der Klasse 2 zugeordnet, d.h. die Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit ist zulässig.

2.3 Bestimmung der erforderlichen Einspanntiefe der Stütze

2.3.1 Biegung um die starke Querschnittsachse (y-Achse)

a) aufnehmbare Betonpressung und mitragende Flanschbreite



Das Maß c lässt sich aus dem Modell des Kragträgers ableiten:

$$m_{Ed} = \sigma_{1,Rdu} \cdot \frac{c^2}{2} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{t_f^2}{4} = m_{pl,d} \rightarrow c = t_f \cdot \sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{2 \cdot \sigma_{1,Rdu}}}$$

ständige Bemessungssituation nach DIN EN 1990, Absatz 3.2 (2)P

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-8, Absatz 2.2 (2) Anm.

DIN EN 1992-1-1/NA, Tabelle 2.1 DE

DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 5.2.2

Die Querschnittsklassifikation ist in Beispiel 1.7, Abschnitt 3.2 dargestellt.

Maßgebend ist die Lastkombination 2 entsprechend Abschnitt 1.4.

Annahme der Betonpressungen nach [48] Bild 4

In den Flanschen entstehen infolge Blechbiegung Fließgelenke.

Der Abstand der Fließgelenke zum Steg beträgt $0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a$ und entspricht damit der Festlegung aus Bild 6.8 a) der DIN EN 1993-1-8 für geschraubte Stirnplattenverbindungen geschweißter I-Profile.

[48] Glg. (7) und Glg. (8)

Als maximale Betonpressung wird der um den Faktor $\sqrt{b_{c1}/b} = \sqrt{2}$ zur Erfassung der Teilflächenbelastung vergrößerte Bemessungswert der Betondruckfestigkeit angesetzt:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 0,85 \cdot 20 / 1,5 = 11,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,Rdu} = \sqrt{2} \cdot f_{cd} = \sqrt{2} \cdot 11,33 = 16,0 \text{ N/mm}^2$$

Die Länge c und daraus die mittragende Flanschbreite $b_{eff,1}$ ergeben sich zu:

$$c = \min \left(t_f \cdot \left[f_y / (2 \cdot \sigma_{1,Rdu} \cdot \gamma_{M0}) \right]^{0,5} \mid (b - t_w - 1,6 \cdot a \cdot \sqrt{2}) / 2 \right)$$

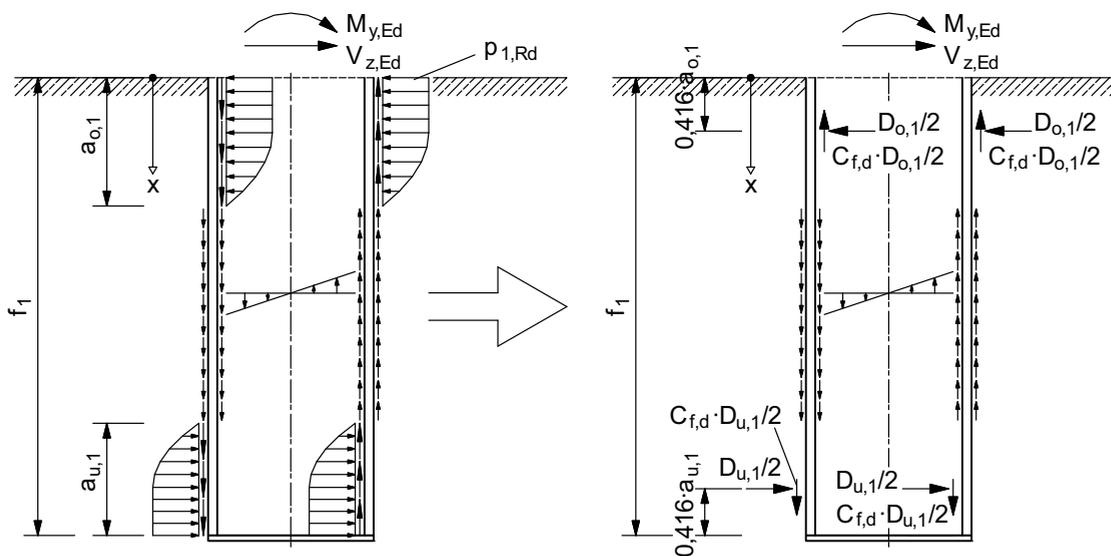
$$c = \min \left(20 \cdot \sqrt{275 / (2 \cdot 16 \cdot 1,0)} \mid (360 - 12 - 2,26 \cdot 4) / 2 \right)$$

$$c = 58,6 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1} = t_w + 1,6 \cdot (\sqrt{2} + 1) \cdot a + 4 \cdot c = 12 + 3,86 \cdot 4 + 4 \cdot 58,6$$

$$b_{eff,1} = 261,8 \text{ mm} < 360 \text{ mm} = b$$

b) erforderliche Einspanntiefe f_1 für Biegung um die y-Achse



Die in den Druckbereichen $a_{o,1}$ und $a_{u,1}$ angenommenen Betonpressungen $p_{1,Rd}$ können zu den horizontalen Abstützkräften zusammengefasst werden. Dabei wird angenommen, dass die Abstützkräfte sich hälftig auf beide Flansche verteilen.

$$p_{1,Rd} = \min \left(\frac{b_{eff,1} \cdot \sigma_{1,Rdu}}{2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}} \right) = \min \left(\frac{261,8 \cdot 16}{2 \cdot 1,2 \cdot 27,5 / 1,0} \right) = 41,9 \text{ kN/cm}$$

[48], Abschnitt 3.2

Der Faktor $\sqrt{2}$ ist kleiner als $\sqrt{3}$ und damit nach DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63) zulässig.

Bemessungswert der Betondruckfestigkeit DIN EN 1992-1-1, Glg. (3.15) aufnehmbare Betonpressung im Sinn von DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63)

Zur Berechnung der Länge c siehe die Skizze und die Erläuterungen am Anfang des Abschnitts.

[48], Bild 5

[48] Abschnitt 3.4

Die Koeffizienten in den Formeln zur Bestimmung der Einspanntiefe wurden in einer Nebenrechnung ermittelt und weichen z.T. etwas von [48] ab.

Grenzwert der angesetzten Betonpressung, [48] Bild 4

Die zur Bestimmung der Einspanntiefe f_1 erforderliche untere Abstützkraft $D_{u,1}$ ist unbekannt und geeignet zu wählen.

$$V_{pl,z} = h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 32 \cdot 1,2 \cdot \frac{27,5}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 609,7 \text{ kN}$$

$$D_{u,1} = 0,8 \cdot V_{pl,z} = 0,8 \cdot 609,7 = 487,8 \text{ kN}$$

$$k_{n,1} = 1 + 2 \frac{\tau_{Rd}}{D_{u,1}} \left(\frac{h^2}{6} + b \cdot a_f \right) = 1 + 2 \frac{0,03}{487,8} \left(\frac{36^2}{6} + 36 \cdot 34 \right) = 1,177$$

$$\Delta f_1 = \left(1 + \frac{V_{z,Ed}}{2 \cdot D_{u,1}} \right) \cdot \left(C_{f,d} - \frac{84 \tau_{Rd} \cdot b}{17 p_{1,Rd}} \right) \cdot a_f$$

$$= \left(1 + \frac{24,6}{2 \cdot 487,8} \right) \cdot \left(0,2 - \frac{84 \cdot 0,03 \cdot 36}{17 \cdot 41,9} \right) \cdot 34 = 2,53 \text{ cm}$$

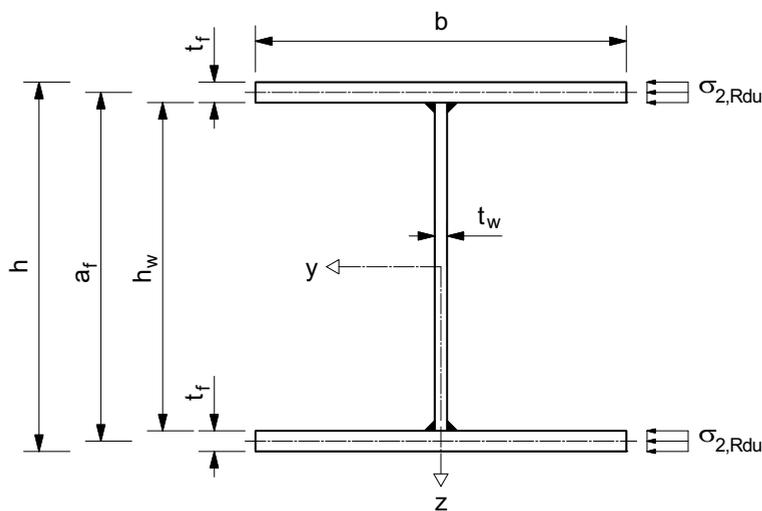
$$f_1 = \left[\frac{M_{y,Ed}}{D_{u,1}} + \frac{297}{289} \cdot \frac{1}{p_{1,Rd}} \left(D_{u,1} + V_{z,Ed} + \frac{V_{z,Ed}^2}{2 \cdot D_{u,1}} \right) - \Delta f_1 \right] \cdot \frac{1}{k_{n,1}}$$

$$= \left[\frac{23310}{487,8} + \frac{297}{289} \cdot \frac{1}{41,9} \left(487,8 + 24,6 + \frac{24,6^2}{2 \cdot 487,8} \right) - 2,53 \right] \cdot \frac{1}{1,177}$$

$$f_1 = 49,2 \text{ cm}$$

2.3.2 Biegung um die schwache Querschnittsachse (z-Achse)

a) aufnehmbare Betonpressung



Als maximale Betonpressung wird der um den Faktor $\sqrt{b_{c1}/t_f} = \sqrt{3}$ zur Erfassung der Teilflächenbelastung vergrößerte Bemessungswert der Betondruckfestigkeit angesetzt:

$$\sigma_{2,Rdu} = \sqrt{3} \cdot f_{cd} = \sqrt{3} \cdot 11,33 = 19,6 \text{ N/mm}^2$$

In [48] wird empfohlen, die Abstützkraft mit 80% bis 100% der plastischen Querkrafttragfähigkeit anzunehmen.

plastische Querkrafttragfähigkeit, [48] Tabelle 3

Abschätzung für die Abstützkraft $D_{u,1}$

Faktor zur Erfassung der Einflüsse der Reibung und der Verbundspannungen, [48] Glg. (17)

Summand zur Erfassung der Einflüsse der Reibung und Verbundspannungen, [48] Glg. (16)

erforderliche Einspanntiefe für Biegung um die y-Achse, [48] Glg. (15)

Maßgebend ist die Lastkombination 6 entsprechend Abschnitt 1.4.

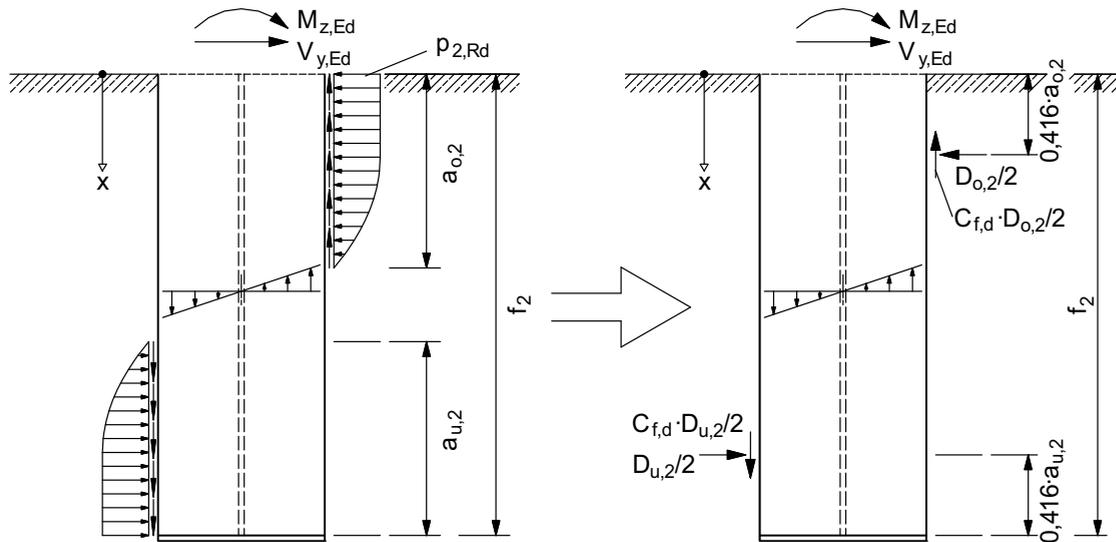
Annahme der Betonpressungen nach [48] Bild 4

[48], Abschnitt 4.1

Der Faktor $\sqrt{3}$ entspricht dem Grenzwert nach DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63).

aufnehmbare Betonpressung im Sinn von DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63)

b) erforderliche Einspanntiefe f_2 für Biegung um die z-Achse



$$p_{2,Rd} = 2 \cdot t_f \cdot \sigma_{2,Rdu} = 2 \cdot 2,0 \cdot 1,96 = 7,84 \text{ kN/cm}$$

$$k = \frac{294}{139} \cdot \frac{1}{p_{2,Rd}} \cdot \left(\frac{V_{y,Ed}}{2} - \frac{17}{42} \cdot C_{f,d} \cdot b \cdot p_{2,Rd} - \frac{2}{3} \cdot \tau_{Rd} \cdot b^2 \right)$$

$$= \frac{294}{139} \cdot \frac{1}{7,84} \cdot \left(\frac{10,4}{2} - \frac{17}{42} \cdot 0,2 \cdot 36 \cdot 7,84 - \frac{2}{3} \cdot 0,03 \cdot 36^2 \right)$$

$$k = -11,7 \text{ cm}$$

$$f_2 = k + \sqrt{k^2 + \frac{588}{139} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{p_{2,Rd}} + \frac{43659}{40171} \cdot \frac{V_{y,Ed}^2}{p_{2,Rd}^2}}$$

$$f_2 = -11,7 + \sqrt{11,7^2 + \frac{588}{139} \cdot \frac{7610}{7,84} + \frac{43659}{40171} \cdot \frac{10,4^2}{7,84^2}} = 53,5 \text{ cm}$$

Grenzwert der angesetzten Betonpres-
sung, [48] Glg. (23)

Hilfswert, [48] Glg. (30)

erforderliche Einspanntiefe für Biegung
um die z-Achse, [48] Glg. (29)

2.4 Schnittgrößenermittlung für das Stützenprofil

2.4.1 Festlegung der Einspanntiefe

Als Einspanntiefe wird gewählt:

$$f = 800 \text{ mm} > \begin{cases} f_1 = 492 \text{ mm} \\ f_2 = 535 \text{ mm} \end{cases}$$

Die Kontrolle der Einhaltung des Anwendungsbereiches ergibt:

$$\left. \begin{array}{l} 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 360 = 540 \text{ mm} \\ 1,5 \cdot b = 1,5 \cdot 360 = 540 \text{ mm} \end{array} \right\} < f < \begin{cases} 1440 \text{ mm} = 4 \cdot 360 = 4 \cdot h \\ 1440 \text{ mm} = 4 \cdot 360 = 4 \cdot b \end{cases}$$

→ Der Anwendungsbereich ist eingehalten.

Die gewählte Einspanntiefe ist größer
als die erforderlichen Einspanntiefen.

[48] Glg. (14)

2.4.2 Lastkombination 2

Für die Schnittgrößenermittlung ist vorab die Größe der Abstützkräfte $D_{o,1}$ und $D_{u,1}$ infolge Betonpressung zu bestimmen.

Die Abstützkräfte werden aus den Gleichgewichtsbedingungen, bezogen auf den Angriffspunkt der oberen Abstützkraft, bestimmt:

$$\Sigma V_z = 0 = V_{z,Ed} - D_{o,1} + D_{u,1} \quad (1)$$

$$\Sigma M_y = 0 = M_{y,Ed} + V_{z,Ed} \cdot 0,416 \cdot a_{o,1} \dots \quad (2)$$

$$\dots - D_{u,1} \cdot [f - 0,416 \cdot (a_{o,1} + a_{u,1})] - C_{f,d} \cdot (D_{o,1} + D_{u,1}) \cdot a_f/2 \dots$$

$$\dots - \tau_{Rd} \cdot [2 \cdot b \cdot a_f \cdot (f - a_{o,1} - a_{u,1}) + h^2 \cdot f/3]$$

Die Höhen der Druckbereiche $a_{o,1}$ und $a_{u,1}$ können durch die zugeordneten Abstützkräfte ersetzt werden:

$$a_{o,1} = \frac{21 D_{o,1}}{17 p_{1,Rd}} \approx \frac{D_{o,1}}{0,81 \cdot p_{1,Rd}} \quad a_{u,1} = \frac{21 D_{u,1}}{17 p_{1,Rd}} \approx \frac{D_{u,1}}{0,81 \cdot p_{1,Rd}} \quad (3)$$

Durch Einsetzen von Glg. (1) und (3) in Glg. (2) ergibt sich eine quadratische Gleichung zur Bestimmung der unteren Abstützkraft. Die Koeffizienten der Normalform dieser Gleichung ergeben sich zu:

$$p_1 = V_{z,Ed} + 4,808 \cdot \tau_{Rd} \cdot b \cdot a_f - 0,973 \cdot p_{1,Rd} \cdot (f + C_{f,d} \cdot a_f)$$

$$= 24,6 + 4,808 \cdot 0,03 \cdot 36 \cdot 34 - 0,973 \cdot 41,9 \cdot (80 + 0,2 \cdot 34)$$

$$= -3338 \text{ kN}$$

$$q_1 = 0,5 \cdot V_{z,Ed}^2 + 2,404 \cdot V_{z,Ed} \cdot \tau_{Rd} \cdot b \cdot a_f - 0,973 \cdot p_{1,Rd} \cdot r_1$$

$$= 0,5 \cdot 24,6^2 + 2,404 \cdot 24,6 \cdot 0,03 \cdot 36 \cdot 34 - 0,973 \cdot 41,9 \cdot (-16314)$$

$$= 667575 \text{ kN}^2$$

$$r_1 = \tau_{Rd} \cdot f \cdot (h^2/3 + 2 \cdot b \cdot a_f) + 0,5 \cdot C_{f,d} \cdot V_{z,Ed} \cdot a_f - M_{y,Ed}$$

$$= 0,03 \cdot 80 \cdot (36^2/3 + 2 \cdot 36 \cdot 34) + 0,5 \cdot 0,2 \cdot 24,6 \cdot 34 - 23310$$

$$= -16314 \text{ kNcm}$$

Für die Abstützkräfte und die Höhen der Druckbereiche folgt daraus:

$$D_{u,1} = -p_1/2 - \sqrt{p_1^2/4 - q_1} = 3338/2 - \sqrt{3338^2/4 - 667575} = 214 \text{ kN}$$

$$D_{o,1} = V_{z,Ed} + D_{u,1} = 24,6 + 214 = 238,6 \text{ kN}$$

$$a_{o,1} = 238,6 / (0,81 \cdot 41,9) = 7,03 \text{ cm}$$

$$a_{u,1} = 214 / (0,81 \cdot 41,9) = 6,31 \text{ cm}$$

Die Ermittlung der Biegemomente und Querkräfte in den Druckbereichen ist wegen der parabolischen Verteilung der Betonpressung aufwendig. In der Regel ist es aber ausreichend genau, die Schnittgrößen an ausgezeichneten Punkten der Druckbereiche zu bestimmen und dazwischen einen linearen Verlauf anzunehmen:

Die Lage der Abstützkräfte ist in der Skizze in Abschnitt 2.3.1 angegeben.

Gleichgewichtsbedingungen, [48] Glg. (11) und Glg. (12)

Anteil aus einwirkender Belastung

Anteil aus Betonpressung und Reibung

Anteil aus Verbundspannungen

Die Koeffizienten weichen geringfügig von [48] Glg. (18) ab.

Die Ableitung der Formeln für die Koeffizienten bedarf einer längeren Zwischenrechnung. Deshalb werden hier nur die Ergebnisse angegeben.

untere Abstützkraft

obere Abstützkraft

Höhe des oberen Druckbereiches

Höhe des unteren Druckbereiches

Die Normalkraft ist entlang der Einspanntiefe konstant und bedarf deshalb keiner Berechnung.

$$M_{y,0} = M_{y,Ed} = 23310 \text{ kNm}$$

$$V_{z,0} = V_{z,Ed} = 24,6 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_{y,1} &= M_{y,Ed} + \frac{3}{7} a_{o,1} \cdot \left[V_{z,Ed} - \left(\frac{3}{14} a_{o,1} + \frac{a_f}{2} C_{fd} \right) \cdot p_{1,Rd} - \frac{h^2}{3} \tau_{Rd} \right] \\ &= 23310 + \frac{3}{7} 7,03 \cdot \left[24,6 - \left(\frac{3}{14} \cdot 7,03 + \frac{34}{2} \cdot 0,2 \right) \cdot 41,9 - \frac{36^2}{3} \cdot 0,03 \right] \\ &= 22726 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

$$V_{z,1} = V_{z,Ed} - \frac{3}{7} \cdot p_{1,Rd} \cdot a_{o,1} = 24,6 - \frac{3}{7} \cdot 41,9 \cdot 7,03 = -101,6 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_{y,2} &= M_{y,Ed} + a_{o,1} \cdot \left(V_{z,Ed} - \frac{139}{238} D_{o,1} - \frac{h^2}{3} \tau_{Rd} \right) - \frac{a_f}{2} C_{fd} \cdot D_{o,1} \\ &= 23310 + 7,03 \cdot \left(24,6 - 0,584 \cdot 238,6 - \frac{36^2}{3} 0,03 \right) - \frac{34}{2} 0,2 \cdot 238,6 \\ &= 21601 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

$$V_{z,2} = V_{z,Ed} - D_{o,1} = 24,6 - 238,6 = -214 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_{y,3} &= M_{y,2} + (f - a_{o,1} - a_{u,1}) [V_{z,Ed} - D_{o,1} - \tau_{Rd} (h^2/3 + 2 \cdot b \cdot a_f)] \\ &= 21601 + (80 - 7,03 - 6,31) \left[24,6 - 238,6 - 0,03 \left(\frac{36^2}{3} + 72 \cdot 34 \right) \right] \\ &= 1576 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

$$V_{z,3} = V_{z,2} = -D_{u,1} = -214 \text{ kN}$$

Biegemoment und Querkraft an der Einspannstelle: $x = 0 \text{ cm}$

Biegemoment und Querkraft am Übergang zwischen rechteckiger und parabolischer Verteilung der Betonpresung im oberen Druckbereich:

$$x = \frac{3}{7} a_{o,1} = 0,429 \cdot 7,03 = 3,02 \text{ cm}$$

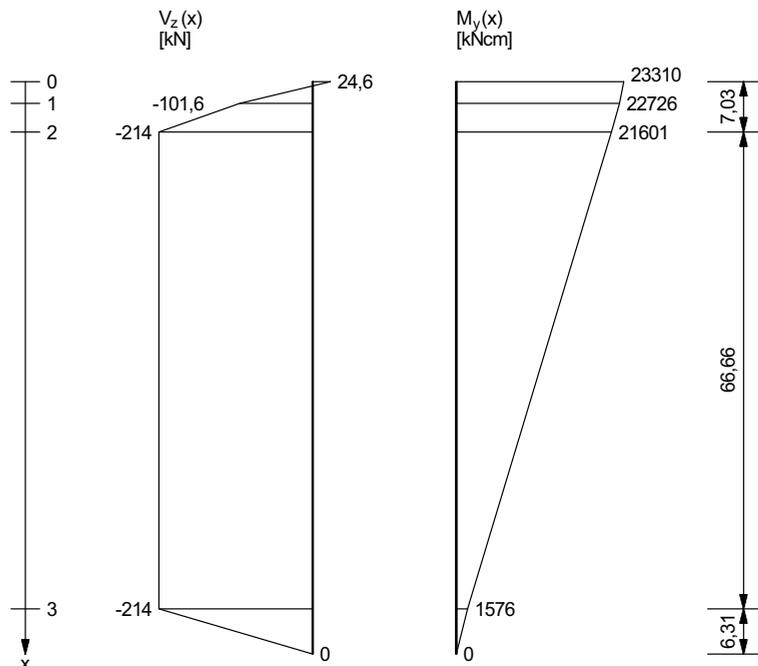
Biegemoment und Querkraft am unteren Rand des oberen Druckbereiches:

$$x = a_{o,1} = 7,03 \text{ cm}$$

Biegemoment und Querkraft am oberen Rand des unteren Druckbereiches:

$$x = f - a_{u,1} = 80 - 6,31 = 73,69 \text{ cm}$$

Zusammenfassend ergeben sich folgende Schnittgrößenverläufe:



2.4.3 Lastkombination 6

Die Schnittgrößenermittlung für Biegung um die y-Achse erfolgt, wie im vorhergehenden Abschnitt für die Lastkombination 2. Auf eine ausführliche Darstellung der Schnittgrößenermittlung wird hier verzichtet und nur deren Ergebnisse angegeben:

$$a_{o,1} = 3,95 \text{ cm} \quad D_{o,1} = 134,1 \text{ kN}$$

$$a_{u,1} = 3,12 \text{ cm} \quad D_{u,1} = 106,0 \text{ kN}$$

Die Höhe der Druckbereiche und die Größe der Abstützkräfte für Biegung um die z-Achse sind ohne den Ansatz von Verbundspannungen zu berechnen, da diese bereits für die maßgebende Einspannachse y berücksichtigt werden:

$$p_2 = V_{y,Ed} - 0,973 \cdot p_{2,Rd} \cdot (f + C_{f,d} \cdot b)$$

$$= 10,4 - 0,973 \cdot 7,84 \cdot (80 + 0,2 \cdot 36) = -654,8 \text{ kN}$$

$$q_2 = 0,5 \cdot V_{y,Ed}^2 - 0,973 \cdot p_{2,Rd} \cdot (0,5 \cdot C_{f,d} \cdot V_{y,Ed} \cdot b - M_{z,Ed})$$

$$= 0,5 \cdot 10,4^2 - 0,973 \cdot 7,84 \cdot (0,5 \cdot 0,2 \cdot 10,4 - 7610) = 58098 \text{ kN}^2$$

$$D_{u,2} = -\frac{p_2}{2} - \sqrt{\frac{p_2^2}{4} - q_2} = \frac{654,8}{2} - \sqrt{\frac{654,8^2}{4} - 58098} = 105,8 \text{ kN}$$

$$D_{o,2} = V_{y,Ed} + D_{u,2} = 10,4 + 105,8 = 116,2 \text{ kN}$$

$$a_{o,2} = 116,2 / (0,81 \cdot 7,84) = 18,3 \text{ cm}$$

$$a_{u,2} = 105,8 / (0,81 \cdot 7,84) = 16,7 \text{ cm}$$

Mit Kenntnis der Höhe der Druckbereiche und der Größe der Abstützkräfte können die Schnittgrößen für die ausgezeichneten Punkte berechnet werden:

$$M_{z,0} = M_{z,Ed} = 7610 \text{ kNm}$$

$$V_{y,0} = V_{y,Ed} = 10,4 \text{ kN}$$

$$M_{z,1} = M_{z,Ed} + \frac{3}{7} a_{o,2} \cdot \left[V_{y,Ed} - \left(\frac{3}{14} a_{o,2} + \frac{b}{2} C_{f,d} \right) \cdot p_{1,Rd} \right]$$

$$= 7610 + \frac{3}{7} 18,3 \cdot \left[10,4 - \left(\frac{3}{14} \cdot 18,3 + \frac{36}{2} \cdot 0,2 \right) \cdot 7,84 \right] = 7229 \text{ kNcm}$$

$$V_{y,1} = V_{y,Ed} - \frac{3}{7} \cdot p_{2,Rd} \cdot a_{o,2} = 10,4 - \frac{3}{7} \cdot 7,84 \cdot 18,3 = -51,1 \text{ kN}$$

$$M_{z,2} = M_{z,Ed} + a_{o,2} \left(V_{y,Ed} - \frac{139}{238} D_{o,2} \right) - \frac{b}{2} C_{f,d} \cdot D_{o,2}$$

$$= 7610 + 18,3 \cdot (10,4 - 0,584 \cdot 116,2) - \frac{36}{2} \cdot 0,2 \cdot 116,2$$

$$= 6140 \text{ kNcm}$$

$$V_{y,2} = V_{y,Ed} - D_{o,2} = 10,4 - 116,2 = -105,8 \text{ kN}$$

$$M_{z,3} = M_{z,2} + (f - a_{o,2} - a_{u,2}) (V_{y,Ed} - D_{o,2})$$

$$= 6140 + (80 - 18,3 - 16,7) \cdot (10,4 - 116,2) = 1379 \text{ kNcm}$$

$$V_{y,3} = V_{y,2} = -D_{u,2} = -105,8 \text{ kN}$$

Die Schnittkraftverläufe für Biegung um die y-Achse und für Biegung um die z-Achse sind am Ende des Abschnitts dargestellt.

Höhe der Druckbereiche und Größe der Abstützkräfte für Biegung um die y-Achse

[48], Abschnitt 5.1

linearer Koeffizient der quadratischen Gleichung zur Bestimmung der unteren Abstützkraft

konstanter Koeffizient der quadratischen Gleichung zur Bestimmung der unteren Abstützkraft

untere Abstützkraft

obere Abstützkraft

Höhe des oberen Druckbereiches

Höhe des unteren Druckbereiches

Die ausgezeichneten Punkte werden wie für Biegung um die y-Achse gewählt.

Biegemoment und Querkraft an der Einspannstelle:
x = 0 cm

Biegemoment und Querkraft am Übergang zwischen rechteckiger und parabolischer Verteilung der Betonpressung im oberen Druckbereich:

$$x = \frac{3}{7} a_{o,2} = 0,429 \cdot 18,3 = 7,84 \text{ cm}$$

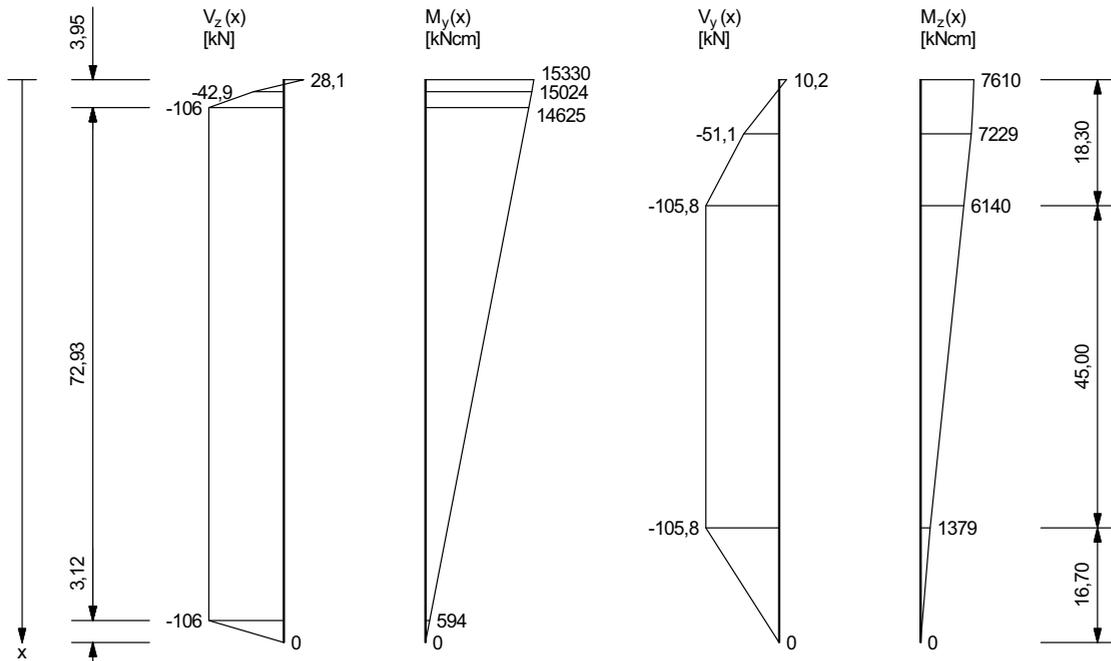
Biegemoment und Querkraft am unteren Rand des oberen Druckbereiches:

$$x = a_{o,2} = 18,3 \text{ cm}$$

Biegemoment und Querkraft am oberen Rand des unteren Druckbereiches:

$$x = f - a_{u,2} = 80 - 16,7 = 63,3 \text{ cm}$$

Zusammenfassend ergeben sich folgende Schnittgrößenverläufe:



Aus den Schnittkraftverläufen ist gut erkennbar, dass für Biegung um die z-Achse die Druckbereiche wesentlich ausgeprägter sind als für Biegung um die y-Achse. Ursächlich dafür ist die im Vergleich zur mittragenden Flanschbreite kleine Flanschdicke.

2.5 Tragfähigkeitsnachweise für das Stützenprofil

Als Tragfähigkeitsnachweise sind Querschnittsnachweise für die Stütze im Bereich der Einspannung zu führen. Diese Nachweise können nach DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.2 erfolgen, worin aber für I-Profile bei Beanspruchung durch Normalkraft und zweiachsige Biegung keine verwertbare nichtlineare Interaktionsbeziehung enthalten ist.

Als Alternative dazu wird hier das Teilschnittgrößenverfahren angewendet, das in *Kindmann/Laumann* [48] speziell für doppelsymmetrische I-Profile mit Beanspruchung durch Druckkraft und zweiachsige Biegung aufbereitet wurde.

Vereinfachend werden die Nachweise mit den maximalen Schnittgrößen geführt, um den Berechnungsaufwand zu minimieren.

2.5.1 Lastkombination 2

a) Querschnittsnachweis für die Querkraft V_z

$$V_{pl,z} = 609,7 \text{ kN}$$

$$\eta_{vz} = D_{u,1}/V_{pl,z} = 214/609,7 = 0,351 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Für die Anwendung der Querschnittsnachweise nach DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.2 siehe Beispiel 1.7, Abschnitt 3.4.

[48] Tabelle 3

Querkrafttragfähigkeit, Abschnitt 2.3.1

b) Querschnittsnachweis für die Normalkraft N und das Moment M_y

$$N_{gr,w} = h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot \sqrt{1 - \eta_{Vz}^2} = 32 \cdot 1,2 \cdot \frac{27,5}{1,0} \cdot \sqrt{1 - 0,351^2} = 989 \text{ kN}$$

$$N_{gr,f} = b \cdot t_f \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 36 \cdot 2 \cdot \frac{27,5}{1,0} = 1980 \text{ kN}$$

$$N_{gr} = 2 \cdot N_{gr,f} + N_{gr,w} = 2 \cdot 1980 + 989 = 4949 \text{ kN}$$

$$\eta_{nw} = \frac{N}{N_{gr,w}} = \frac{N_{Ed}}{N_{gr,w}} = \frac{434,5}{989} = 0,439 < 1$$

$$M_w = \begin{cases} \eta_{nw} < 1: (1 - \eta_{nw}^2) N_{gr,w} \cdot h_w / 4 & (1) \\ \eta_{nw} \geq 1: 0 & (2) \end{cases}$$

$$M_{gr,y} = \begin{cases} \eta_{nw} < 1: N_{gr,f} \cdot a_f + M_w & (1) \\ \eta_{nw} \geq 1: (N_{gr} - N) \cdot a_f / 2 & (2) \end{cases}$$

→ Fall (1) ist für die Ermittlung der plastischen Momententragfähigkeiten anzuwenden!

$$M_w = (1 - 0,439^2) 989 \cdot 32 / 4 = 6387 \text{ kNcm}$$

$$M_{gr,y} = 1980 \cdot 34 + 6387 = 73707 \text{ kNcm}$$

$$\frac{M_y}{M_{gr,y}} = \frac{M_{y,Ed}}{M_{gr,y}} = \frac{23310}{73707} = 0,316 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

c) Nachweis der Halsnähte für den Bereich der Einspannung

$$S_{y,f} = b \cdot t_f \cdot a_f / 2 = 36 \cdot 2 \cdot 34 / 2 = 1224 \text{ cm}^3$$

$$F_{w,Ed} = \frac{D_{u,1} \cdot S_{y,f}}{2 \cdot I_y} = 100 \cdot \frac{214 \cdot 1224}{2 \cdot 44940,8} = 291,4 \text{ N/mm}$$

$$t_{\max} = \max(t_f | t_w) = \max(20 | 12) = 20 \text{ mm}$$

$$a_w = 4 \text{ mm} > \left(\sqrt{\frac{3 \text{ mm}}{t_{\max}}} - 0,5 \right) = \sqrt{20} - 0,5 = 3,97 \text{ mm}$$

$$\beta_w = 0,85$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{430 / \sqrt{3}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,7 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a_w = 233,7 \cdot 4 = 934,8 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,Ed} / F_{w,Rd} = 144,3 / 934,8 = 0,15 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

plastische Normalkrafttragfähigkeit des Steges, [48] Tabelle 3

plastische Normalkrafttragfähigkeit eines Flansches, [48] Tabelle 3

plastische Normalkrafttragfähigkeit des Querschnitts

Ausnutzung des Steges für Druckkraft

plastische Momententragfähigkeit des Steges für Biegung um die y-Achse des Querschnitts, [48] Tabelle 3

plastische Momententragfähigkeit des Querschnitts, [48] Tabelle 3

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

statisches Moment des Flansches

Bemessungswert der auf die Halsnaht einwirkenden Kraft je Längeneinheit für die maßgebende Lastkombination 2

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwerte für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

materialabhängiger Korrelationsbeiwert DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Halsnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

Tragfähigkeit der Halsnähte, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

2.5.2 Lastkombination 6

a) Querschnittsnachweis für die Querkraft V_y

$$V_{pl,y} = 2 \cdot b \cdot t_f \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 2 \cdot 36 \cdot 2,0 \cdot \frac{27,5}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 2286 \text{ kN}$$

plastische Querkrafttragfähigkeit der Flansche, [48] Tabelle 3

$$\eta_{vy} = D_{u,2}/V_{pl,y} = 105,8/2286 = 0,046 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

b) Querschnittsnachweis für die Querkraft V_z

$$V_{pl,z} = 609,7 \text{ kN}$$

Querkrafttragfähigkeit, Abschnitt 2.3.1

$$\eta_{vz} = D_{u,1}/V_{pl,z} = 106/609,7 = 0,174 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

c) Querschnittsnachweis für das Moment M_z

$$M_{pl,z,\tau} = \frac{b^2 \cdot t_f \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0}} \sqrt{1 - \eta_{vy}^2} = \frac{36^2 \cdot 2 \cdot 27,5}{2 \cdot 1,0} \sqrt{1 - 0,046^2} = 35602 \text{ kNcm}$$

plastische Momententragfähigkeit des Querschnitts für Biegung um die z-Achse, [48] Tabelle 3

$$\eta_{mz} = \frac{M_z}{M_{pl,z,\tau}} = \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,\tau}} = \frac{7610}{35602} = 0,214 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

d) Querschnittsnachweis für die Normalkraft N und das Moment M_y

$$N_{gr,w} = h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot \sqrt{1 - \eta_{vz}^2} = 32 \cdot 1,2 \cdot \frac{27,5}{1,0} \cdot \sqrt{1 - 0,174^2} = 1040 \text{ kN}$$

plastische Normalkrafttragfähigkeit des Steges, [48] Tabelle 3

$$N_{gr,f} = b \cdot t_f \cdot (f_y/\gamma_{M0}) \cdot \sqrt{1 - \eta_{vy}^2} \cdot \sqrt{1 - \eta_{mz}}$$

$$= 36 \cdot 2 \cdot (27,5/1,0) \cdot \sqrt{1 - 0,046^2} \cdot \sqrt{1 - 0,214} = 1754 \text{ kN}$$

plastische Normalkrafttragfähigkeit eines Flansches, [48] Tabelle 3

$$N_{gr} = 2 \cdot N_{gr,f} + N_{gr,w} = 2 \cdot 1754 + 1040 = 4548 \text{ kN}$$

plastische Normalkrafttragfähigkeit des Querschnitts

$$\eta_{nw} = N/N_{gr,w} = 309,8/1040 = 0,298 < 1$$

Ausnutzung des Steges für Druckkraft

→ Berechnung von M_w und $M_{gr,y}$ mit den in Abschnitt 2.5.1 c) für Fall (1) angegebenen Gleichungen!

$$M_w = (1 - 0,298^2) \cdot 1040 \cdot 32/4 = 7581 \text{ kNcm}$$

vgl. Abschnitt 2.5.1 c)

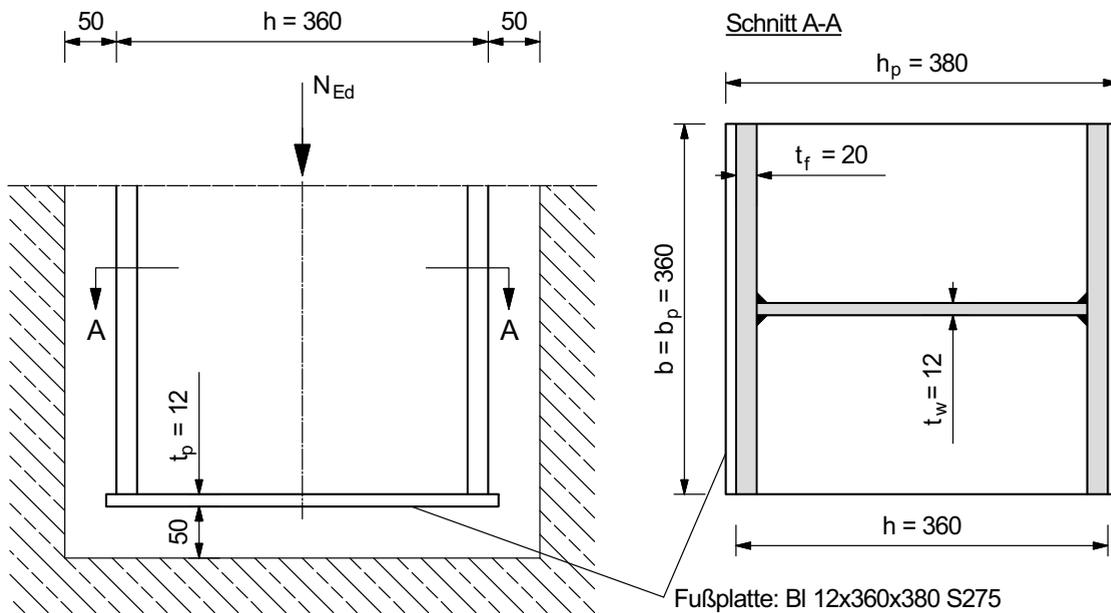
$$M_{gr,y} = 1754 \cdot 34 + 7581 = 67217 \text{ kNcm}$$

vgl. Abschnitt 2.5.1 c)

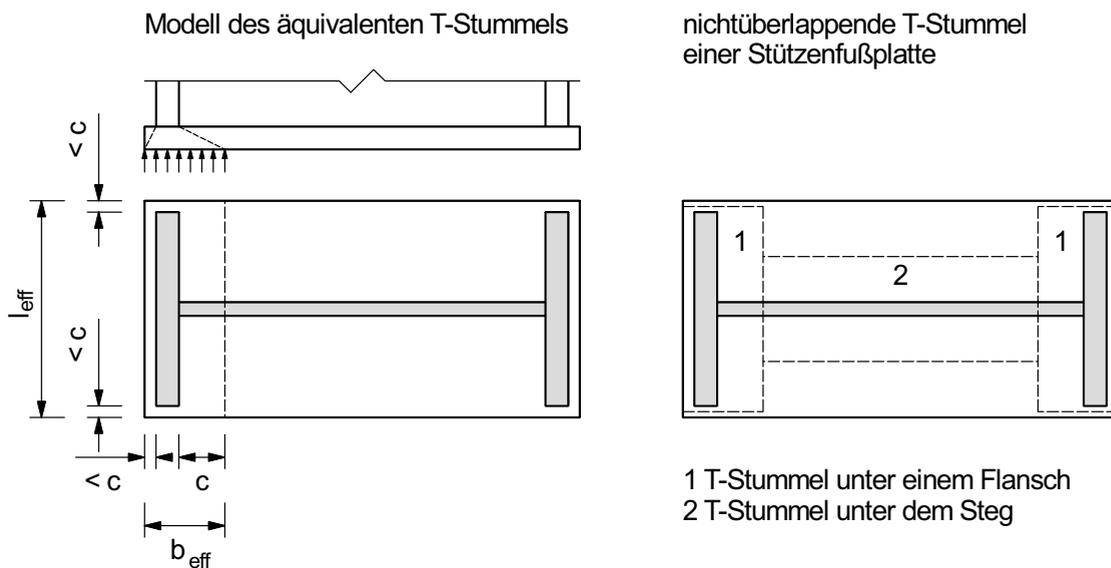
$$\frac{M_y}{M_{gr,y}} = \frac{M_{y,Ed}}{M_{gr,y}} = \frac{15330}{67217} = 0,228 < 1 \quad \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.6 Einleitung der Normalkraft in das Fundament

Die Druckkraft N_{Ed} wird am Boden des Köchers über eine Fußplatte in das Fundament eingeleitet. Die Fußplatte ist mit Doppelkehlnähten $a = 4\text{ mm}$ an die Flansche und den Steg der Stütze angeschweißt.



Der Nachweis der Tragfähigkeit der Fußplatte erfolgt mit dem Verfahren, das für Stützenfußplatten unter zentrischer Druckbeanspruchung gilt. DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.8.2 (1)



Die Tragfähigkeit der Fußplatte ergibt sich als Summe der Tragfähigkeiten der drei nicht überlappenden T-Stummel. DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.8.1 (1)
 Für die Spannungsverteilung unter den T-Stummeln darf eine konstante Verteilung angenommen werden. DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.5 (4)

a) Bemessungswert der Mörtelfestigkeit f_{jd} unter Lagerpressung

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}$$

$$f_{jd} = \beta_j \cdot F_{Rdu}/A_{c0} = \beta_j \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1}/A_{c0}}$$

Es wird hier angenommen, dass die charakteristische Druckfestigkeit des Mörtels mindestens so hoch wie die des Betons des Fundamentes ist.

Damit ergibt sich der Anschlussbeiwert β_j zu:

$$\frac{50 \text{ mm}}{b_p} = \frac{50 \text{ mm}}{360 \text{ mm}} = 0,14 < 0,2 \rightarrow \beta_j = 2/3$$

Als maximale Betonpressung wird der um den Faktor $\sqrt{A_{c1}/A_{c0}} = \sqrt{2,25}$ zur Erfassung der Teilflächenbelastung vergrößerte Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} angesetzt:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} = \frac{2}{3} \cdot 11,33 \cdot \sqrt{2,25} = 11,33 \text{ N/mm}^2$$

b) Ausbreitungsbreite c

$$c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}} = 12 \cdot \sqrt{\frac{275}{3 \cdot 11,33 \cdot 1,0}} = 34,1 \text{ mm}$$

c) Tragfähigkeitsnachweis für die Fußplatte

$$A_{c0,f} = l_{\text{eff},f} \cdot b_{\text{eff},f} = b_p \cdot [0,5 \cdot (h_p - h) + t_f + c]$$

$$= 36 \cdot [0,5 \cdot (38 - 36) + 2 + 3,41] = 230,8 \text{ cm}^2$$

$$A_{c0,w} = l_{\text{eff},w} \cdot b_{\text{eff},w} = [h - 2 \cdot (t_f + c)] \cdot (t_w + 2 \cdot c)$$

$$= [36 - 2 \cdot (2 + 3,41)] \cdot (1,2 + 2 \cdot 3,41) = 201,9 \text{ cm}^2$$

$$N_{j,Rd} = (2 \cdot A_{c0,f} + A_{c0,w}) \cdot f_{jd} = (2 \cdot 230,8 + 201,9) \cdot 1,133 = 751,7 \text{ kN}$$

$$N_{Ed}/N_{j,Rd} = 453,5/751,7 = 0,6 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

aufnehmbare Teilflächenlast, DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63)
DIN EN 1993-1-8, Glg. (6.6)

Empfehlung in DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.5 (7)

DIN EN 1993-1-8, Absatz 6.2.5 (7)

Der Faktor $\sqrt{2,25}$ ist kleiner als 3 und damit nach DIN EN 1992-1-1, Glg. (6.63) zulässig.

Bemessungswert der Mörtelfestigkeit

DIN EN 1993-1-8, Glg. (6.5)

Ansatz der Ausbreitungsbreite wie in der Skizze (siehe oben) dargestellt

Maßgebend ist die Lastkombination 3!

Fläche des äquivalenten T-Stummels unter einem Stützenflansch

Fläche des äquivalenten T-Stummels unter dem Stützensteg

Tragfähigkeit der Fußplatte unter zentrischer Druckbeanspruchung

d) Tragfähigkeitsnachweis für die Schweißnähte zwischen Fußplatte und Stützenprofil

Anwendung des vereinfachten Verfahrens für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 4.5.3.3

größte Blechdicke in der Verbindung

Grenzwerte für die Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.2 (2) und DIN EN 1993-1-8/NA, NCI zu 4.5.2

wirksame Nahtlänge entsprechend DIN EN 1993-1-8, Absatz 4.5.1 (1)

Bemessungswert der auf die Nähte einwirkenden Kraft je Längeneinheit für die maßgebende Lastkombination 3 materialabhängiger Korrelationsbeiwert DIN EN 1993-1-8, Tabelle 4.1

Scherfestigkeit der Kehlnaht, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.4)

Tragfähigkeit der Kehlnaht, DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.3)

DIN EN 1993-1-8, Glg. (4.2)

$$t_{\max} = \max(t_f | t_w | t_p) = \max(20 | 12 | 12) = 20 \text{ mm}$$

$$a_w = 4 \text{ mm} > \left(\frac{3 \text{ mm}}{\sqrt{t_{\max}}} - 0,5 \right) = \sqrt{20} - 0,5 = 3,97 \text{ mm}$$

$$l_{\text{eff}} = 4 \cdot b_p + 2 \cdot h_w - 4 \cdot t_f - 2 \cdot t_w - 8 \cdot a_w \\ = 4 \cdot 360 + 2 \cdot 320 - 4 \cdot 20 - 2 \cdot 12 - 8 \cdot 4 = 1944 \text{ mm}$$

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{l_{\text{eff}}} = 100 \cdot \frac{453,5}{1944} = 23,3 \text{ N/mm}$$

$$\beta_w = 0,85$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{430 / \sqrt{3}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,7 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a_w = 233,7 \cdot 4 = 934,8 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,Ed} / F_{w,Rd} = 23,3 / 934,8 = 0,02 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Beispiel 1.10: Giebelwandstütze

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| Aufgabenstellung | 174 |
| 1 System, Querschnitt und Einwirkungen | 174 |
| 1.1 System | 174 |
| 1.2 Querschnitt..... | 174 |
| 1.2.1 Materialkennwerte | 174 |
| 1.2.2 Abmessungen und Querschnittswerte | 175 |
| 1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen | 175 |
| 1.3.1 Zusammenstellung der Einwirkungen | 175 |
| 1.3.2 Einwirkungen für die Stützen in den Achsen C und G | 175 |
| 1.3.3 Einwirkungen für die Stützen in der Achse E | 176 |
| 1.4 Lastkombinationen | 176 |
| 1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 1 (andrückende Last)..... | 176 |
| 1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Lastkombination 1 (abhebende Last)..... | 177 |
| 2 Grenzzustände der Tragfähigkeit..... | 177 |
| 2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten..... | 177 |
| 2.2 Querschnittsklassifikation..... | 177 |
| 2.3 Bauteilnachweise | 177 |
| 2.3.1 Stützen in den Achsen C und G..... | 177 |
| 2.3.2 Stützen in der Achse E..... | 179 |

Beispiel 1.10: Giebelwandstütze

Aufgabenstellung

Die Giebelwandstützen in den Achsen ① und ⑩ sind Pendelstützen, die ausschließlich die Vertikallasten aus dem Dach, die über die Giebelwandriegel und die Pfetten eingeleitet werden, in die Fundamente abtragen.

Für die Giebelwandstützen ist der Nachweis der Tragfähigkeit zu führen.

Die Windlasten auf die Giebelwände werden über die Sandwichpaneele hälftig in deren Fußträger und über die Giebelwandriegel, die Pfetten, den Dachverband und die Längswandriegel in die Längswandstützen weitergeleitet.

Die Dachneigung $\alpha = 3,18^\circ$ ist gering und bleibt in diesem Beispiel unberücksichtigt.

Für die Bezeichnung der Achsen siehe die Vorbemerkungen S. 1.

Pfetten siehe Beispiel 1.3

Dachverband siehe Beispiel 1.5

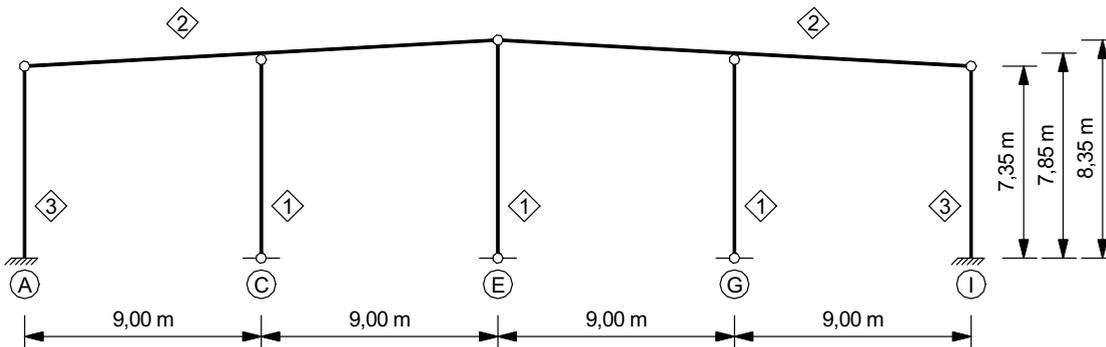
Längswandriegel siehe Beispiel 1.6

Längswandstützen siehe Beispiel 1.7

siehe Beispiel 1.4, Abschnitt 1.1

1 System, Querschnitt und Einwirkungen

1.1 System



① Giebelwandstützen: warmgewalztes kreisförmiges Hohlprofil (KHP) 139,7x5, S235, DIN EN 10210-2

② Giebelwandriegel: HE 200 B, S235

③ Längswandstützen: I 360x12 - 360x20 - 4, S275

Die Giebelwandstützen sind am Kopf durch die Giebelwandriegel gegen Ausweichen in der Wandebene und senkrecht dazu gehalten.

Die Giebelwandriegel wirken als Zweifeldträger, die auf den Längswandstützen in der Achse A bzw. ① und den Giebelwandstützen in der Achse C bzw. ③ und der Achse E aufliegen.

Die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Riegel wurde in einer hier nicht dargestellten Nebenrechnung überprüft.

1.2 Querschnitt

1.2.1 Materialkennwerte

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 81000 \text{ N/mm}^2$$

Profil entsprechend Abschnitt 1.1

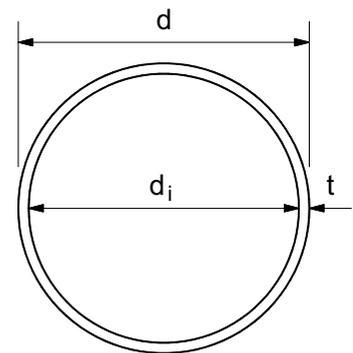
Baustahl S235, DIN EN 10210-1

Streckgrenze und Zugfestigkeit nach DIN EN 1993-1-1, Tabelle 3.1

Elastizitäts- und Schubmodul nach DIN EN 1993-1-1, Absatz 3.2.6 (1)

1.2.2 Abmessungen und Querschnittswerte

$$\begin{aligned}
 d &= 139,7 \text{ mm} \\
 t &= 5 \text{ mm} \\
 d_i &= d - 2 \cdot t = 139,7 - 2 \cdot 5 = 129,7 \text{ mm} \\
 A &= \frac{\pi}{4}(d^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (13,97^2 - 12,97^2) = 21,16 \text{ cm}^2 \\
 I &= \frac{\pi}{64}(d^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (13,97^4 - 12,97^4) = 480,5 \text{ cm}^4 \\
 W_{pl} &= \frac{1}{6}(d^3 - d_i^3) = \frac{1}{6} \cdot (13,97^3 - 12,97^3) = 90,76 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

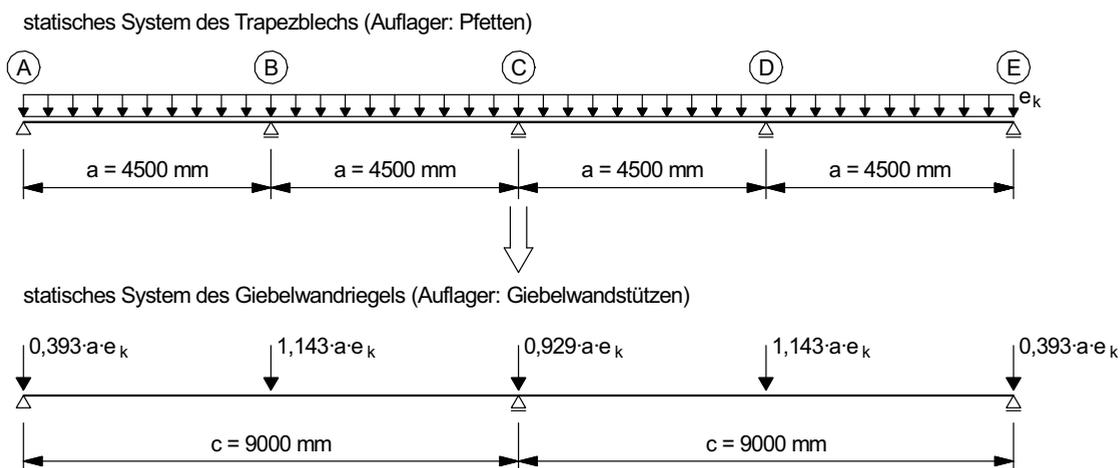


1.3 Charakteristische Werte der Einwirkungen

1.3.1 Zusammenstellung der Einwirkungen

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| Eigenlast, Giebelwandstütze (KHP 139,7x5): | $g_{0,k}^c = +0,17 \text{ kN/m}$ | [54] S. 8.189 |
| Eigenlast, Giebelwandriegel (HE 200 B): | $g_{0,k}^b = +0,61 \text{ kN/m}$ | [54] S. 8.179 |
| Eigenlast, Pfette: | $g_{0,k}^p = +0,68 \text{ kN/m}$ | siehe Beispiel 1.3, Abschnitt 1.2.1 |
| Eigenlast, Dachkonstruktion: | $g_{1,k} = +0,41 \text{ kN/m}^2$ | siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 1.2 |
| Schnee: | $s = +1,03 \text{ kN/m}^2$ | siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 3 |
| Windsog, Bereich H: | $w_{e,H} = -0,46 \text{ kN/m}^2$ | siehe Beispiel 1.1, Abschnitt 4.3.2 b) |

1.3.2 Einwirkungen für die Stützen in den Achsen C und G



Die ungleichmäßige Verteilung der Lasten aus dem Dach auf die Giebelwandstützen infolge der Durchlaufwirkung der Trapezbleche und der Giebelwandriegel wird für die resultierenden Lasten berücksichtigt.

Trapezbleche der Dachkonstruktion (Vierfeldträger) siehe Beispiel 1.2

resultierende Kräfte am Stützenkopf:

$$L = 7,85 \text{ m}$$

Länge der Stütze, siehe Abschnitt 1.1

$$G_{0,k}^c = g_{0,k}^c \cdot L = 0,17 \cdot 7,85 = 1,33 \text{ kN}$$

$$G_{0,k}^b = 1,25 \cdot g_{0,k}^b \cdot c = 1,25 \cdot 0,61 \cdot 9 = 6,86 \text{ kN}$$

$$b = 9,0 \text{ m}$$

$$G_{0,k}^p = (1,375 + 1) \cdot g_{0,k}^p \cdot b/2 = 2,375 \cdot 0,68 \cdot 9/2 = 7,27 \text{ kN}$$

$$G_{1,k} = (1,375 \cdot 1,143 + 0,929) \cdot g_{1,k} \cdot a \cdot \frac{b}{2} = 2,5 \cdot 0,41 \cdot 4,5 \cdot \frac{9}{2} = 20,76 \text{ kN}$$

$$G_k = G_{0,k}^c + G_{0,k}^b + G_{0,k}^p + G_{1,k} = 1,33 + 6,86 + 7,27 + 20,76 = 36,22 \text{ kN}$$

$$S_k = (1,375 \cdot 1,143 + 0,929) \cdot s \cdot a \cdot \frac{b}{2} = 2,5 \cdot 1,03 \cdot 4,5 \cdot \frac{9}{2} = 52,14 \text{ kN}$$

$$W_k = 2,5 \cdot w_{e,H} \cdot a \cdot \frac{b}{2} = -2,5 \cdot 0,46 \cdot 4,5 \cdot \frac{9}{2} = -23,29 \text{ kN}$$

aus Eigenlast der Stütze

aus Eigenlast des Giebelwandriegels

Binderabstand, Vorbemerkungen S. 1

aus Eigenlast der Pfetten

aus Eigenlast der Dachkonstruktion

Eigenlast der Stütze vereinfachend am Stützenkopf angesetzt

aus Schneelast auf dem Dach

aus Windsog auf dem Dach (Faktor 2,5 gilt wie für Schneelast.)

1.3.3 Einwirkungen für die Stützen in der Achse E

Für die Stützen in der Achse © wird als konservative Näherung eine gleichmäßige Verteilung der Lasten aus dem Dach angenommen.

Die Lastenzugsbreite c für die Dachlasten beträgt 9,0 m (siehe Skizze in Abschnitt 1.1!)

resultierende Kräfte am Stützenkopf:

$$L = 8,35 \text{ m}$$

$$G_{0,k}^c = g_{0,k}^c \cdot L = 0,17 \cdot 8,35 = 1,42 \text{ kN}$$

$$G_{0,k}^b = g_{0,k}^b \cdot c = 0,61 \cdot 9 = 5,49 \text{ kN}$$

$$G_{0,k}^p = (2 \cdot 0,5 + 2) \cdot g_{0,k}^p \cdot b/2 = 3 \cdot 0,68 \cdot 9/2 = 9,18 \text{ kN}$$

$$G_{1,k} = g_{1,k} \cdot c \cdot b/2 = 0,41 \cdot 9 \cdot 9/2 = 16,61 \text{ kN}$$

$$G_k = G_{0,k}^c + G_{0,k}^b + G_{0,k}^p + G_{1,k} = 1,42 + 5,49 + 9,18 + 16,61 = 32,7 \text{ kN}$$

$$S_k = s \cdot c \cdot b/2 = 1,03 \cdot 9 \cdot 9/2 = 41,72 \text{ kN}$$

$$W_k = w_{e,H} \cdot c \cdot b/2 = -0,46 \cdot 9 \cdot 9/2 = -18,63 \text{ kN}$$

Länge der Stütze, siehe Abschnitt 1.1

aus Eigenlast der Stütze

aus Eigenlast des Giebelwandriegels

aus Eigenlast der Pfetten (am First befinden sich zwei Pfetten!)

aus Eigenlast der Dachkonstruktion

Eigenlast der Stütze vereinfachend am Stützenkopf angesetzt

aus Schneelast auf dem Dach

aus Windsog auf dem Dach

1.4 Lastkombinationen

1.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 1 (andrückende Last)

Abkürzung für Lastkombinationen nachfolgend „LK“

a) Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen

ständige Bemessungssituation

$$\text{ständige Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: } \gamma_{G,\text{sup}} = 1,35$$

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

$$\text{ständige Einwirkungen, Auswirkung günstig: } \gamma_{G,\text{inf}} = 1,0$$

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

$$\text{veränderliche Einwirkungen, Auswirkung ungünstig: } \gamma_Q = 1,5$$

DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2(B)

b) Bemessungswerte der Einwirkungen

$$F_{\text{Ed}}^C = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot G_k + \gamma_Q \cdot S_k = 1,35 \cdot 36,22 + 1,5 \cdot 52,14 = 127,11 \text{ kN}$$

Vertikalkraft am Stützenkopf, Achse ©

$$F_{\text{Ed}}^E = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot G_k + \gamma_Q \cdot S_k = 1,35 \cdot 32,70 + 1,5 \cdot 41,72 = 106,73 \text{ kN}$$

Vertikalkraft am Stützenkopf, Achse ©

1.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – LK 2 (abhebende Last)

Bemessungswerte der Einwirkungen:

$$F_{Ed}^C = \gamma_{G,inf} \cdot G_k + \gamma_Q \cdot W_k = 1,0 \cdot 36,22 - 1,5 \cdot 23,29 = 1,29 \text{ kN}$$

$$F_{Ed}^E = \gamma_{G,inf} \cdot G_k + \gamma_Q \cdot W_k = 1,0 \cdot 32,70 - 1,5 \cdot 18,63 = 4,76 \text{ kN}$$

Auch für Windsoglasten auf dem Dach ergeben sich in den Giebelwandstützen keine Zugkräfte, d.h. die Lastkombination 1 ist maßgebend für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

2 Grenzzustände der Tragfähigkeit

2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeiten

elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit: $\gamma_{M0} = 1,0$

Bauteiltragfähigkeit (Stabilitätsversagen): $\gamma_{M1} = 1,1$

Bruchversagen von zugbeanspruchten Querschnitten: $\gamma_{M2} = 1,25$

2.2 Querschnittsklassifikation

runder Hohlquerschnitt: auf Biegung und/oder Druck beansprucht

$$\varepsilon = (235/f_y)^{0,5} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$d = 139,7 \text{ mm}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$d/t = 139,7/5 = 27,94 < 50 = 50 \cdot 1,0^2 = 50 \cdot \varepsilon^2 \rightarrow \text{Klasse 1}$$

2.3 Bauteilnachweise

2.3.1 Stützen in den Achsen C und G

a) Überprüfung des Abgrenzungskriteriums

$$F_{cr} = \pi^2 \cdot EI/L_{cr}^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 480,5/785^2 = 161,61 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} = \frac{161,61}{127,11} = 1,27 < 10$$

Eine Berechnung nach Theorie I. Ordnung ist nicht zulässig, weil der Einfluss der Verformungen auf die Schnittgrößen nicht mehr vernachlässigbar ist (Vergrößerungsfaktor $\alpha_{cr} < 10$).

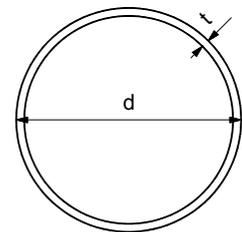
Der Bauteilnachweis wird als Querschnittsnachweis mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung geführt, die am imperfekten Stab bestimmt werden.

Vertikalkraft am Stützenkopf, Achse ©

Vertikalkraft am Stützenkopf, Achse ©

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1)
Anmerkung 2B

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.2



DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.2.1 (3)

ideale Verzweigungslast für Knicken

Vergrößerungsfaktor gemäß DIN EN 1993-1-1, Glg. (5.1)

DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.2.1 (2)

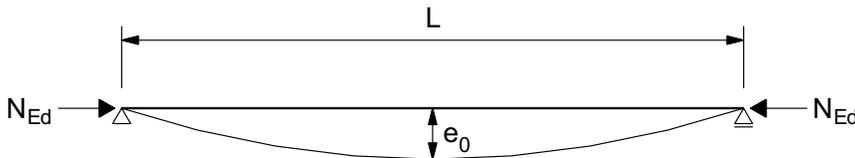
Nachweis gemäß DIN EN 1993-1-1, Absatz 5.2.2 (2)

b) Bauteilimperfection

Für verdrehsteife Bauteile, z.B. Stäbe mit Hohlprofilquerschnitt, ist ein Nachweis gegen Biegedrillknicken nicht erforderlich.

Die Größe der Vorkrümmung ist abhängig vom Verfahren zur Ermittlung der Schnittgrößen (elastisch oder plastisch) und der Knicklinie, die dem Bauteilquerschnitt zugeordnet ist.

Für den Nachweis gegen Biegeknicken eines seitlich unverschieblich gelagerten Bauteils genügt der Ansatz einer Vorkrümmung:



DIN EN 1993-1-1, Absatz 6.3.2.1 (2) bzw. Absatz 6.3.3 (4) Anmerkung

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 5.1 bzw. DIN EN 1993-1-1/NA, Tabelle NA.1

Bauteilvorkrümmung gemäß DIN EN 1993-1-1, Bild 5.4

Warmgefertigten Hohlquerschnitten der Stahlsorte S235 ist die Knicklinie „a“ zugeordnet.

Die Schnittgrößen werden nach der Elastizitätstheorie berechnet. Für eine elastische Querschnittsausnutzung gilt für die Vorkrümmung:

$$e_0 = L/550 = 7850/550 = 14,27 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-1, Tabelle 6.2

DIN EN 1993-1-1/NA, Tabelle NA.1

Für eine plastische Querschnittsausnutzung ist die Vorkrümmung zu vergrößern:

$$e_0 = \frac{L}{550} \frac{M_{pl,k}}{M_{el,k}} = \frac{L}{550} \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{L}{550} \frac{W_{pl} d}{I} \frac{1}{2} = 14,27 \cdot \frac{90,76}{480,5} \frac{13,97}{2} = 18,8 \text{ mm}$$

DIN EN 1993-1-1/NA, Tabelle NA.1

c) Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung

$$N_{Ed} = F_{Ed} = 127,11 \text{ kN}$$

$$e_0 = 18,8 \text{ mm}$$

$$M^0 = 8 \cdot N_{Ed} \cdot e_0 = 8 \cdot 127,11 \cdot 1,88 = 1911,7 \text{ kNcm}$$

$$\varepsilon = L \cdot \sqrt{N_{Ed}/EI} = 785 \cdot \sqrt{127,11/(21000 \cdot 480,5)} = 2,786$$

$$\gamma = \tan(\varepsilon/2)/\varepsilon = \tan(2,786/2)/2,786 = 1,997$$

$$M_{Ed} = \frac{\gamma^2 \cdot M^0}{1 + \sqrt{\gamma^2 \cdot \varepsilon^2 + 1}} = \frac{1,997^2 \cdot 1911,7}{1 + \sqrt{1,997^2 \cdot 2,786^2 + 1}} = 1146 \text{ kNcm}$$

$$V_{Ed} = \frac{\gamma \cdot M^0}{L} = \frac{1,997 \cdot 1911,7}{785} = 4,86 \text{ kN}$$

Berechnung nach [54], S. 4.78/4.79

Bemessungswert der Normalkraft

plastische Querschnittsausnutzung

Hilfswert

Stabkennzahl

Hilfswert

Bemessungswert des Biegemomentes in Stabmitte (Maximalwert)

Der Bemessungswert der Querkraft an den Stabenden ist vernachlässigbar gering.

d) Bemessungswerte der Querschnittsbeanspruchbarkeiten

Die Ermittlung der Beanspruchbarkeiten für Bauteilnachweise in Form von Querschnittsnachweisen hat abweichend von DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.2 mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{M1} statt γ_{M0} zu erfolgen.

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 21,16 \cdot \frac{23,5}{1,1} = 452,1 \text{ kN}$$

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 90,76 \cdot \frac{23,5}{1,1} = 1938,9 \text{ kNcm}$$

e) Nachweis der Tragfähigkeit

Der Querschnittsnachweis ist bei Ansatz der Vorkrümmung nach DIN EN 1993-1-1/NA, Tabelle NA.1 mit einer linearen Querschnittsinteraktion zu führen!

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{127,11}{452,1} + \frac{1146}{1938,9} = 0,87 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

2.3.2 Stützen in der Achse E

Der Bauteilnachweis wird wie für die Stützen in den Achsen © und © geführt:

$$e_0 = \frac{L}{550} \cdot \frac{W_{pl}}{I} \cdot \frac{d}{2} = \frac{835}{550} \cdot \frac{90,76}{480,5} \cdot \frac{13,97}{2} = 20,0 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = F_{Ed} = 106,73 \text{ kN}$$

$$M^0 = 8 \cdot N_{Ed} \cdot e_0 = 8 \cdot 106,73 \cdot 2,0 = 1707,7 \text{ kNcm}$$

$$\varepsilon = L \cdot \sqrt{N_{Ed}/EI} = 835 \cdot \sqrt{106,73/(21000 \cdot 480,5)} = 2,716$$

$$\gamma = \tan(\varepsilon/2)/\varepsilon = \tan(2,716/2)/2,716 = 1,704$$

$$M_{Ed} = \frac{\gamma^2 \cdot M^0}{1 + \sqrt{\gamma^2 \cdot \varepsilon^2 + 1}} = \frac{1,704^2 \cdot 1707,7}{1 + \sqrt{1,704^2 \cdot 2,716^2 + 1}} = 864,6 \text{ kNcm}$$

$$V_{Ed} = \frac{\gamma \cdot M^0}{L} = \frac{1,704 \cdot 1707,7}{835} = 3,48 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{106,73}{452,1} + \frac{864,6}{1938,9} = 0,69 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B

Druckbeanspruchbarkeit für Querschnitte der Klasse 1 oder 2, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.10)

Momentenbeanspruchbarkeit für Querschnitte der Klasse 1 oder 2, DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.13)

DIN EN 1993-1-1/NA, NDP zu 5.3.2 (3) Anmerkung

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.2)

siehe Abschnitt 2.3.1

Vorkrümmung, DIN EN 1993-1-1/NA, Tabelle NA.1

Bemessungswert der Normalkraft

Hilfswert

Stabkennzahl

Hilfswert

Bemessungswert des Biegemomentes in Stabmitte (Maximalwert)

Der Bemessungswert der Querkraft an den Stabenden ist vernachlässigbar gering.

DIN EN 1993-1-1, Glg. (6.2)

