

7

79. Jahrgang
Juli 2010, S. 491 – 504
ISSN 0038-9145
A 6449

Sonderdruck

Stahlbau

Tragverhalten und EN 1993-1-konforme Nachweisformate für Rahmenecken mit geschraubter Zuglasche

Prof. Dr.-Ing. Achim Rubert
M. Eng. Steffen Schäfer

Tragverhalten und EN 1993-1-konforme Nachweisformate für Rahmenecken mit geschraubter Zuglasche

Für im Sinne der EN 1993-1-8 als biegesteif/starr zu bewertende Rahmenecken mit geschraubter Zuglasche wird mittels eines einfachen Stabwerkmodells unter Berücksichtigung der Grenztragfähigkeiten der Komponenten (plastische Berechnung) das Tragverhalten des Riegels im Bereich der Laschenverschraubung analysiert. Daraus werden zum Handnachweis geeignete Formeln zur Berechnung der Beanspruchungen und geeignete Nachweisformate der Tragfähigkeit nach EN 1993-1-1 und 1993-1-8 einschließlich eines Abschätzungsnachweises mit Extremwerten vorgestellt. Mögliche Sonderregelungen der nationalen Anhänge von EN 1993-1-1 und 1993-1-8 bleiben hier ohne Berücksichtigung. Unter Beachtung des statischen Satzes der Traglasttheorie werden damit sichere und gleichzeitig wirtschaftliche untere Grenzen der Tragfähigkeit der riegelseitigen Rahmenecke mit geschraubter Zuglasche dargestellt.

Am Beispiel einer ausgeführten Hallenkonstruktion zeigt sich, dass für den Bereich der Zuglaschenverschraubung mit diesen Nachweisformaten eine häufig geforderte und kosten erhöhende Zugflanschverstärkung unnötig ist.

Structural performance and EN 1993-1 compliant design formats for frame corners with a bolted tension splice. *For frame knees considered as fixed/stiff according to EN 1993-1-8, the structural performance of the rafter bolted to a tension slice is analyzed by means of a simple frame model with respect to maximum load-carrying capacities of components (plastic calculation). Referring to this, formulas of calculations to determine the internal forces and the proofs of carrying capacity of the components due to EN 1993-1-1 and 1993-1-8 including a proof with extreme values are shown. Possible special regulations of national appendices of EN 1993-1-1 and 1993-1-8 remain here without consideration. With regard to the guaranteed lower limit of the plastic collapse load several safe and economic calculation formats for the bolted side of a frame knee are shown.*

The example of a built hall construction shows that – following the proposed design formats – frequently demanded/arranged and additionally costs raising tension flange reinforcements are unnecessary.

1 Einleitung

Für Rahmenecken mit geschraubter Zuglasche fehlen einfache und wirtschaftliche Nachweisformate, weil – je nach Konstruktion – darüber recht wenig oder nichts in Nachweisnormen wie der DIN 18800 [1] oder der EN 1993-1-1/8 [2], [3] und Standardwerken [7] bis [10]

enthalten ist. In der Praxis werden meistens die vereinfachten Regeln der DIN 18800-1 (Formeln (44) bis (46)) benutzt, wobei nicht klar ist, welche globalen Beanspruchungen (Schnittgrößen) des Rahmenriegels zur Bemessung des Zug- und Druckflansches sowie der Zuglasche des anzuschließenden Riegelprofils maßgebend sind. Wenn fälschlicherweise die Beanspruchungen der Systemlinie in der Rahmenecke benutzt werden und/oder nur der Zugflanschquerschnitt zur Aufnahme der gesamten Zuglaschenkraft benutzt wird, ergibt sich bei hoher Ausnutzung der Tragfähigkeit des Riegelquerschnitts eine rechnerisch notwendige Zugflanschverstärkung.

Auf der Basis des statischen Satzes der Traglasttheorie unter Berücksichtigung der plastischen Grenztragfähigkeit der beteiligten Komponenten (elastisch-plastische bzw. plastisch/plastische Berechnung) führen das folgende einfache Stabwerksmodell und die daraus entwickelten Nachweisformate zu einer wirtschaftlichen Abschätzung der Tragfähigkeit einer Rahmenecke mit geschraubter Zuglasche, ohne dass auch bei hoher Momentenbeanspruchung eine Zugflanschverstärkung notwendig wird.

2 Hallenkonstruktion

Die Untersuchungen erfolgen an der Rahmenecke der Haupttrahmen einer bereits mehrfach ausgeführten Serienhalle mit unsymmetrischem Satteldach unter 18° Neigung und mit Vordach. Bei fünf Feldern mit je 6,00 m Rahmenabstand ergibt sich eine Hallenlänge von ca. 30,00 m zzgl. Außenwandbekleidungen. Die Breite der Stahlkonstruktion beträgt 18,77 m. Die Traufenhöhe an der Oberkante der Stahlstütze ist 4,45 m in Achse A und 4,66 m in Achse E (Bild 1). Die folgenden Untersuchungen behandeln die Rahmenecke in Achse A.

Stütze und Riegel bestehen jeweils aus einem IPE 360. Der Riegel ist mittels verschweißter Kopfplatte an den inneren Stützenflansch verschraubt. Eine 20 mm dicke und am Kopf der Stütze angeschweißte Zuglasche ist mit vier Schrauben am Oberflansch des Riegels befestigt. Eine Stegverstärkung der Rahmenecke und die Horizontalsteife an der Stütze in Höhe des Riegeluntergurtes versteifen die Rahmenecke zusätzlich. Eine (hier nicht dargestellte) Untersuchung nach EN 1993-1-8 weist den Anschluss als biegesteif aus. In der Rahmenstatik wird die Rahmenecke in Achse A daher als steife Ecke modelliert, die sich in Bild 1 nahe der Position 7 befindet. Die ge-

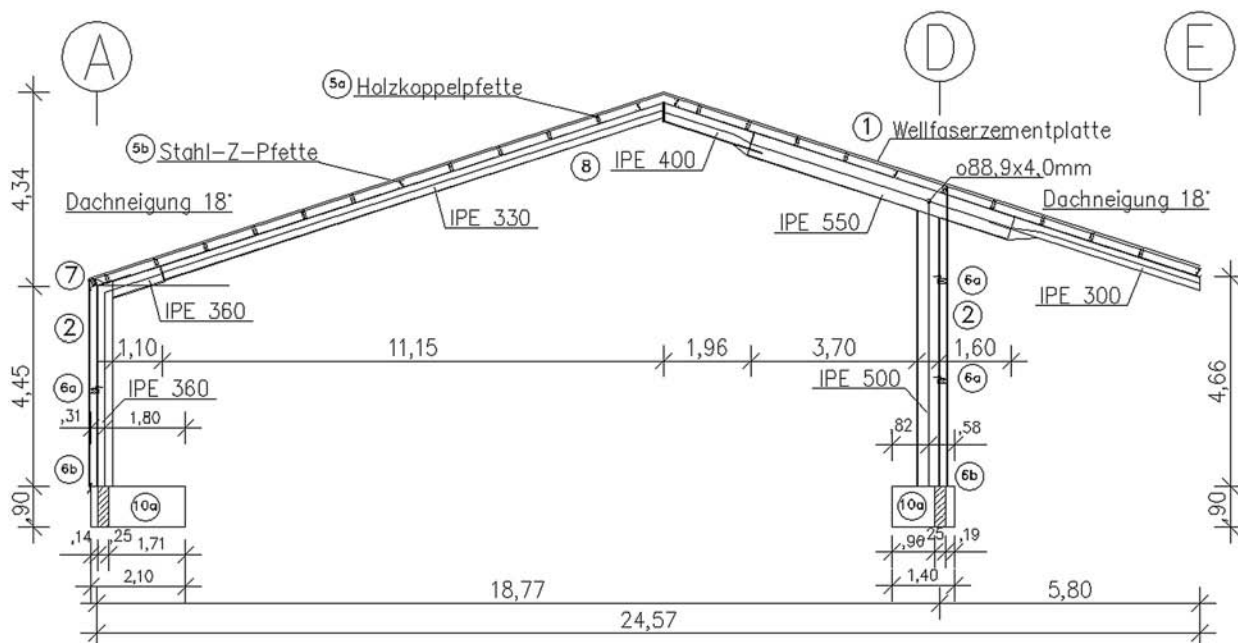


Bild 1. Haupttrahmen
Fig. 1. Main frame

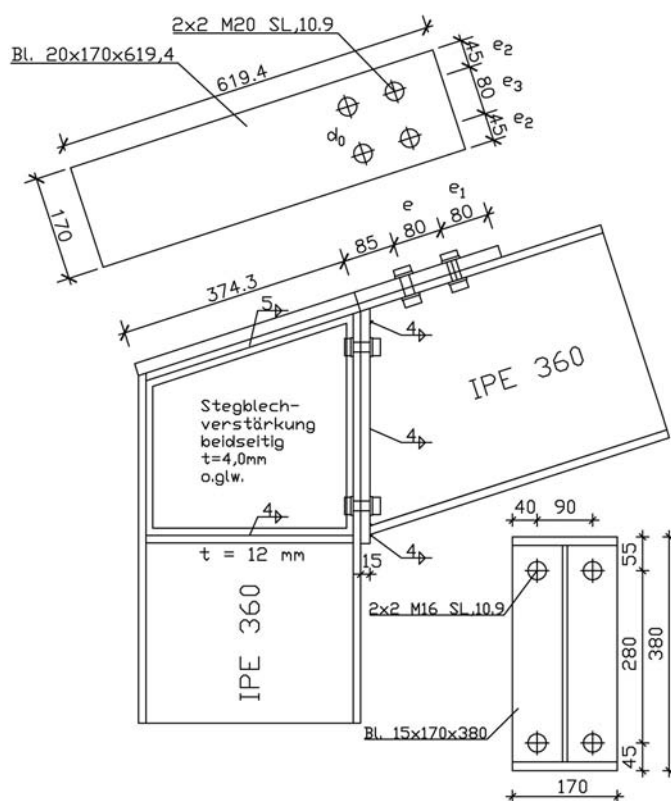


Bild 2. Konstruktion der Rahmenecke
Fig. 2. Construction of frame knee

nauen Abmessungen der einzelnen Bauteile der Rahmenecke können Bild 2 entnommen werden.

3 Problematik

In den Erläuterungen zur DIN 18800 [4] wird zu Abschnitt 8.2.1 von DIN 18800-1 unter der lokalen Überschrift „Statisches System für Scherverbindungen“ darauf

hingewiesen, dass Verbindungen gewissermaßen ein statisch unbestimmtes Mikro-Tragwerk darstellen, das allein mit den Gleichgewichtsbeziehungen nicht zu berechnen ist. Die dort jedoch im Folgenden dargestellten detaillierten Feder- und Berechnungsmodelle sind recht praxisfremd und werden daher in der täglichen Baustatik einfacherer (Standard-) Konstruktionen weitestgehend ignoriert. Den Verfassern der DIN 18800-1 ist dies natürlich bewusst und daher erlaubt (nicht: verlangt!) Element 801 mit den Formeln (44) bis (46) [1] bei doppelsymmetrischen I-förmigen Biegeträgern (hier: der Riegel) die Verbindungen vereinfacht mit folgenden Schnittgrößenanteilen und getrennt für die entsprechenden Profilteile nachzuweisen.

$$\begin{aligned} \text{Zugflansch: } N_Z &= N/2 + M_y/h_F && ((44) \text{ nach DIN 18800-1}) \\ \text{Druckflansch: } N_D &= N/2 - M_y/h_F && ((45) \text{ nach DIN 18800-1}) \\ \text{Steg: } V_{St} &= V_Z && ((46) \text{ nach DIN 18800-1}) \end{aligned}$$

Hierbei ist h_f der Schwerpunktabstand der Flansche:
 $h_F = h - t_f$
mit t_f als Flanschdicke und h als Profilhöhe

Es wird aber ausdrücklich verlangt, dass insbesondere die Flansche die ihnen zugewiesenen Teilschnittgrößen N_Z und N_D aufnehmen können. Dieses Nachweiskonzept mit seiner trennenden Aufteilung der Beanspruchungen auf Ober- und Unterflansch sowie den Steg ist äußerst sinnvoll beim Nachweis der Schweißnähte zwischen Kopfplatte und Riegelende biegesteifer Riegelanschlüsse, nicht jedoch bei Anschlüssen mit geschraubten Zuglaschen. Denn nachteilig bei dieser Aufteilung der Beanspruchungen ist die Konzentrierung der Momente und Normalkräfte in beiden Flanschen. Bei hoch ausgelasteten Konstruk-

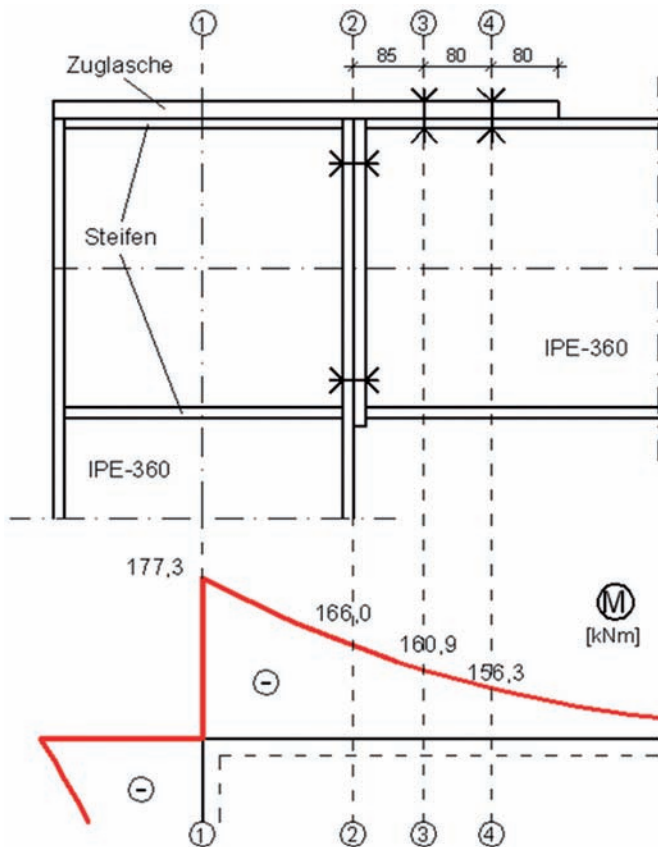


Bild 3. Rahmenecke und zugehöriger Momentenverlauf
Fig. 3. Bending moments of frame corner

tionen wie Serienhallen werden rechnerisch damit schnell Überlastungen der Flansche und besonders des gelochten Zugflansches (Nettoquerschnitt) erreicht. Dann muss eine Zugflanschverstärkung angeordnet werden, die einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor darstellt und daher bei Stahlbauunternehmen unbeliebt ist.

Weiterhin können die DIN 18800-1 und auch die EN 1993-1-8 keine Hinweise geben, welches Moment M_y der globalen Systemstatik in die Formeln (44) und (45) einzusetzen ist, weil keine konkreten Anschlusskonstruktionen betrachtet werden. Bei üblichen Rahmenecken (Streckenlasten auf dem Riegel aus Eigenlast/Schnee/Wind) fällt das (betragsmäßige) Moment an einer biegesteifen oder nachgiebigen Rahmenecke von der Rahmenecke (Systemlinie) über die Fuge zwischen Stützenflansch und Kopfplatte des Riegels bis zum Ende der Zuglasche ab (Bild 3). Bei einem klassischen Kopfplattenstoß braucht nur das „Anschnittmoment“ (Bild 3, Achse 2) in die Gleichungen (44) und (45) eingesetzt zu werden, da alle Teilschnittgrößen in dieser Fuge übertragen werden.

Eine zusätzliche Zuglasche „überbrückt“ jedoch diese Fuge und verbindet den Stützenkopf mit dem Zugflansch

des Riegels mittels „verteilter Lastenleitungsgebiete“ im Bereich der Zuglaschenverschraubung, was – wie im Folgenden mittels eines gegenüber Gln. (44) und (45) modifizierten Tragmodells gezeigt wird – den Querschnitt des Riegelprofils und damit auch den Zugflansch entlastet, so dass Zugflanschverstärkungen überflüssig werden.

4 Globales System

4.1 Beanspruchungen

Der Rahmen ist als Zweigelenrahmen ausgeführt und als ebenes elastisches Stabwerk berechnet. Die Berechnung ergibt ein maximales negatives Rahmeneckmoment von $-177,3$ kNm (Bild 3). Weiterhin sind eher geringe Normal- und Querkräfte am Riegelende vorhanden: Die Normalkraft N_4 beträgt $-58,79$ kN und die Querkraft V_4 im Schnitt 4 $-57,55$ kN. Alle Beanspruchungen sind bereits Bemessungsgrößen. Für die folgenden Untersuchungen wird auf die Neigung des Rahmenriegels verzichtet, da sie keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Der Anschluss von der Rahmenecke bis zum Ende der Zuglasche wird in vier Schnitte mit den Achsen 1, 2, 3, und 4 eingeteilt. Achse 1 ist der theoretische Schnittpunkt der Rahmenecke im Stabwerksmodell, Achse 2 befindet sich in der Fuge zwischen Kopfplatte und Stützenflansch, und die Achsen 3 und 4 kennzeichnen die Lage der Schrauben in Zuglasche und Oberflansch.

4.2 Teilschnittgrößen nach DIN 18800-1

Mit $h_f = 360 - 12,7 = 347,3$ mm für ein IPE 360 ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengefassten Zugkräfte nach Element (801) bzw. Gleichung (44) infolge der Momente und der Normalkraft $N = -58,79$ kN. Der Vergleich mit der Grenztragfähigkeit des Nettoquerschnittes des Zugflansches $N_{t,Rd} = 421,4$ kN nach EN 1993-1-1 fordert sofort eine Zugflanschverstärkung.

5 Mikromodell

5.1 Modellbeschreibung

Das folgende Mikromodell ist ein vereinfachendes Stabtragwerk im Bereich der Riegelverschraubung, das das Element (801) nur für die unmittelbare Krafteinleitung in Zuglasche und Druckflansch benutzt. Der Riegel wird dagegen im Bereich der Laschenverschraubung als normaler Doppel-T-Träger betrachtet. Es wird damit bewusst auf die Ermittlung des realen elastischen/plastischen Spannungszustandes (z. B. mit FEM) verzichtet. Das Mikromodell erstreckt sich von der Kopfplatte (Schnitt 2) bis zur letzten Schraubenachse (Schnitt 4). Bild 4 zeigt links das Mikrosystem vor dem Hintergrund der realen Konstruktion und

Tabelle 1. Zugkräfte im Oberflansch infolge Moment- und Normalkraft
Table 1. Tensile force of upper flange due to bending moment and axial force

Beanspruchungen	Schnitt ①	Schnitt ②	Schnitt ③	Schnitt ④
Moment M_y [kNm]	-177,3	-166,0	-160,9	-156,3
Zugkraft N_z [kN]	481,1	448,5	433,8	420,6

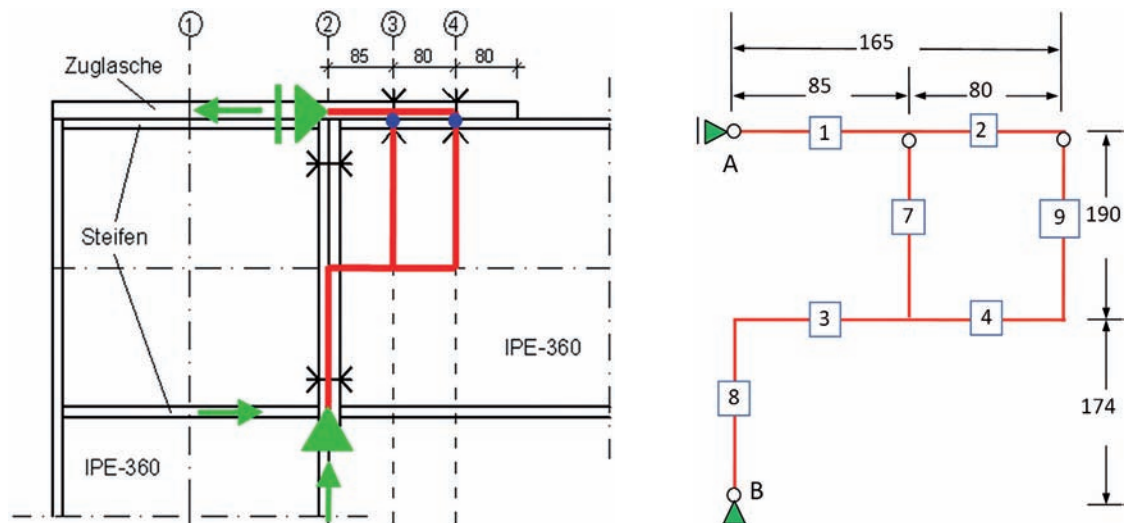


Bild 4. a) Stabwerksmodell mit hinterlegter Konstruktion; b) Stabmodell
 Fig. 4. a) Calculation model deposited with construction drawing; b) calculation model

Tabelle 2. Systemdaten des Mikromodells
 Table 2. Parameters of the micro model

Stab-Nr.	Komponente	Länge mm	Querschnittswerte		plastische Grenztragfähigkeit	
			I [cm ⁴]	A [cm ²]	Art	Wert
1 und 2	Zuglasche	850	-	34,0	Zug	⇒ ∞
3 und 4	IPE 360	850	16270	72,7	Biegung	⇒ ∞
7 und 9	2 Schrauben	je 190	⇒ 0/⇒ ∞	⇒ ∞	Abscheren [kN]	⇒ ∞/214,0
8	Zusatzstab	174	⇒ ∞	⇒ ∞	alles	⇒ ∞

rechts das elementierte Stabwerksmodell. Die Zahlen auf den Stäben sind die Stabnummern.

Bei einer Rahmenecke gemäß Bild 3, deren Riegelende im Bemessungsfall mit hohem negativem Moment und eher geringer Riegeldruckkraft und positiver Querkraft beansprucht ist, übernimmt die Zuglasche unter Ausbildung einer klaffenden Fuge im oberen Kontaktbereich der Kopfplatte die komplette Übertragung der Zugkraft, die in den Kopf der Stütze eingeleitet wird. Die Druckkraft im unteren Flansch des Riegels wird über dessen Fläche (und ggfs. einen gewissen Teils des Steges) durch die Kopfplatte hindurch in die Querstreifen und damit in den Stützensteg übertragen. Die Querkraft (des Riegelsteges) überträgt sich mittels der Scher- und Lochleibungstragfähigkeit der Schrauben über die Kopfplatte in den Innenflansch der Stütze, was hier allerdings nicht weiter betrachtet wird.

Im Modell bilden die Stäbe 1 und 2 die Zuglasche mit realer Längssteifigkeit und das vertikale Gleitlager in Knoten 1 den Stützenkopf. Die Stäbe 3 und 4 simulieren das IPE-Riegelprofil mit den realen elastischen Steifigkeiten. Der senkrechte Stab 8 mit einer unendlich großen fiktiven Längs-, Schub- und Biegesteifigkeit ersetzt mit Hilfe des Festlagers am unteren linken Knoten die exzentrische Druckkräfteinleitung in Höhe der Mittellinie des unteren Riegelflansches. Gleichzeitig erlaubt das Lager die Aufnahme der Querkraft am Riegelende und ersetzt die zwei Schraubenpaare der Kopfplatte. Die senkrechten Stäbe 7

und 9 befinden sich in den Schraubenachsen und simulieren je zwei Schrauben mit Scher-/Lochleibungstragverhalten inklusive der Lastweiterleitung im Steg des Riegelprofils bis in die Schwerachse [11]. Die Momentengelenke der Stabenden verhindern ungewollte Zwangsmomente in der Zuglasche. Die Art der statisch bestimmten Punkt Lagerung garantiert äußere Zwängungsfreiheit und einen Lastabtrag analog zu Element (801) von DIN 18800-1:

- die Zuglasche und das untere Flanschende übertragen M_y und N
- der Trägersteg überträgt V_z über die angeschweißte und verschraubte Kopfplatte

Die Zuordnung der Stäbe, Längen, Querschnittswerte sowie plastischen Grenztragfähigkeiten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Berechnungen¹ erfolgen mit zwei Grenzwerten der Biegesteifigkeiten der Schraubenstäbe 7 und 9:

- Im Vergleich zum Resttragwerk
- simuliert $EI \Rightarrow 0$ sehr weiches Scher-/Lochleibungsverhalten
- simuliert $EI \Rightarrow \infty$ sehr steifes Scher-/Lochleibungsverhalten

¹ Die Stabwerksberechnungen wurden durch Herrn M. Eng. Steffen Schäfer an der HAWK Holzminden mit dem Stabwerksprogramm RSTAB 6 durchgeführt.

Tabelle 3. Einwirkungen
Table 3. Loads

Einwirkungen	Wert*1)
N_4	58,79 kN
$V_{z,4}$	57,55 kN
$M_{y,4}$	156,30 kNm

*1) Wirkungsrichtung wie in Bild 5

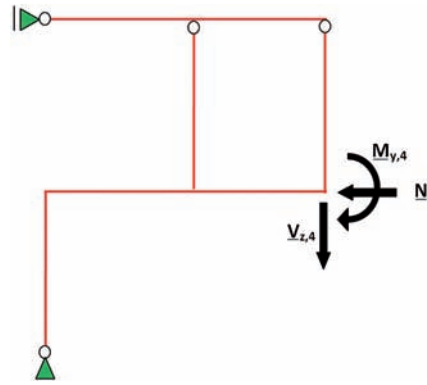


Bild 5. Einwirkungen am Mikromodell
Fig. 5. Loads of micro model

Reale Schrauben mit üblichen Durchmessern verhalten sich eher weich.

Einmal wird das System unter Annahme elastischen Tragverhaltens aller Komponenten und zum anderen unter Berücksichtigung der realen Scher-/Lochleibungsgrenztragfähigkeiten der Schrauben berechnet. Um allgemeine Aussagen treffen zu können, wird zusätzlich eine dritte Schraubenreihe hinzugefügt und deren Grenztragfähigkeit entsprechend heruntersetzt (um den plastischen Beanspruchungsbereich der Schrauben zu erreichen).

5.2 Einwirkungen

Am unteren rechten Knoten wirken die Beanspruchungen M_y , N und V_z der Rahmenstatik (s. Tabelle 3; Achse 4) nach Bild 5. Der Unterstrich kennzeichnet sie als Schnitt-

größen der globalen Statik (Rahmenberechnung). Im Unterschied zur Rahmenberechnung (globales Modell) fehlt im Mikromodell zwischen Achse 2 und 4 die Streckenlast. Der Fehler im Momentenverlauf ist kleiner 1 %.

5.3 Beanspruchungen

Am Mikromodell ergeben sich mit den Einwirkungen $M_{y,4}$, $V_{z,4}$ und N_4 folgende zur Beurteilung des Lastabtrags maßgebenden Beanspruchungen, unterteilt nach elastischem (Tabellen 4a und 5a) und elastisch/plasti-

Tabelle 4. a) Elastische Beanspruchungen bei zwei Schraubenreihen; b) elastisch/plastische Beanspruchungen bei zwei Schraubenreihen

Table 4. a) Elastic reactions of model with two rows of bolts; b) elastic/plastic reactions of model with two rows of bolts

Größe	elastisches Tragmodell			
	weiches Schraubenverhalten		steifes Schraubenverhalten	
Achsen	②	③	④	0
Zuglasche	N [kN]	427,4	213,8	0
	N [kN]	-486,2	-272,6	58,8
Riegel	V_z [kN]	57,6	57,6	57,6
	M_y [kNm]	-84,6	-120,3	-115,7
a)				
plastisches Tragmodell				
Größe	weiches Schraubenverhalten		steifes Schraubenverhalten	
	②	③	④	0
Zuglasche	N [kN]	427,4	214,0	0
	N [kN]	-486,2	-272,8	58,8
Riegel	V_z [kN]	57,6	57,6	57,6
	M_y [kNm]	-84,6	-120,2	-115,6
b)				

schem Modell (Tabellen 4b und 5b) für zwei und drei Schraubenreihen. Die Ergebnisse sind zur besseren Vergleichbarkeit gerundet dargestellt.

5.3.1 Auflagerkräfte

Bei allen Systemvarianten ergeben sich aufgrund der statisch bestimmten Lagerung identische Lagerkräfte: $A_H = -427,4 \text{ kN}$, $B_H = 486,2 \text{ kN}$, $B_V = 57,5 \text{ kN}$

B_V ist mit der Querkraft $V_{z,4}$ identisch, und die beiden horizontalen Lagerkräfte entstehen durch $V_{z,4}$, $M_{y,4}$ sowie N_4 .

5.3.2 Schnittgrößen

In den Tabellen 4a, 4b, 5a und 5b sind nur die folgenden zu den Tragfähigkeitsnachweisen notwendigen Schnittgrößen dargestellt:

- Normalkraft der Zuglasche
- lokale Schnittgrößen (M_y , V_z und N) des Riegels im Bereich der Verschraubung, wobei sich unmittelbar rechts neben der letzten Schraubenreihe die Schnittgrößen der globalen Rahmenstatik anschließen

Die Beanspruchungen nach Tabelle 4b stellen sich ein, wenn für jede Schraubenreihe (mit je zwei Schrauben) die rechnerische Grenztragfähigkeit von $2 \times 107 = 214 \text{ kN}$ berücksichtigt wird. Diese Grenztragfähigkeit ist (abweichend von der realen Verschraubung nach Bild 2) derart definiert, dass auch die linke Schraubenreihe in Achse 2 eine Beanspruchung im Grenzbereich der Tragfähigkeit erhält.

Mit drei Schraubenreihen ergeben sich Beanspruchungen gemäß den Tabellen 5a und 5b. Bei der plastischen Berechnung ist rechnerisch die Grenztragfähigkeit einer Schraubenreihe auf 145 kN gesetzt, um den plastischen Grenzzustand aller Schraubenreihen (Traglast) nahezu zu erreichen. Bei V_z sind geringfügige Unterschiede (infolge Eigenzwängung) zwischen den Schraubenreihen 3 bis 5 herausgefiltert.

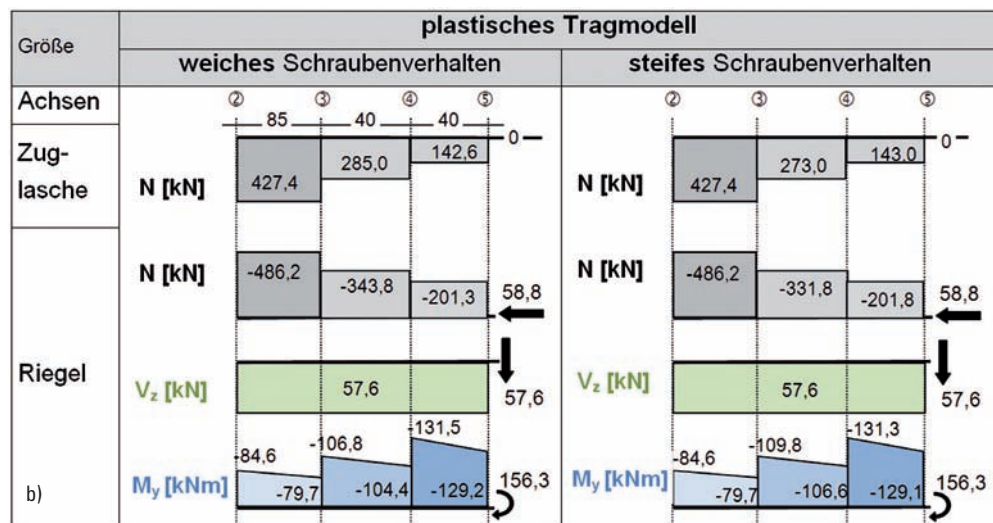
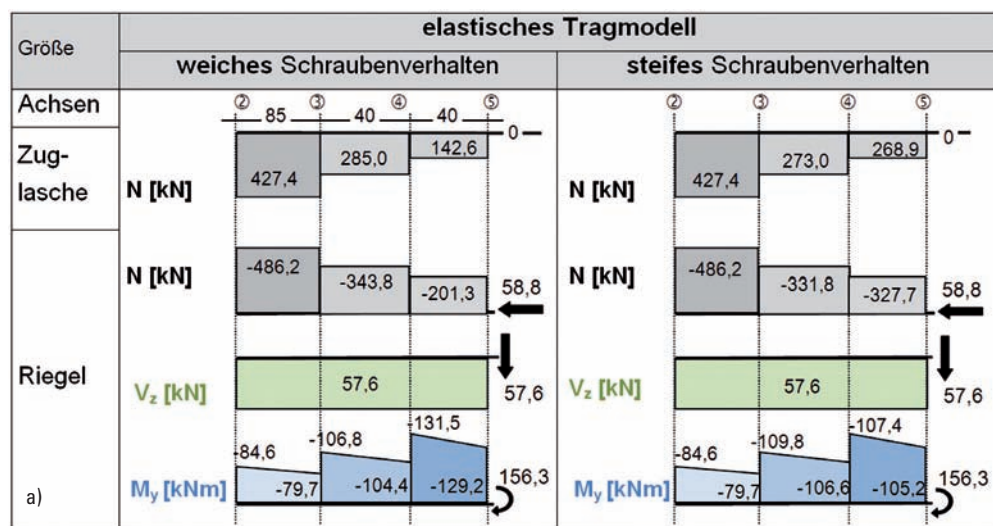
6 Analyse der Beanspruchungen

6.1 Auflagerkräfte

Die Auflagerkräfte sind aufgrund der statisch bestimmten Lagerung unabhängig vom statischen Modell, von der Anzahl der Schraubenreihen der Zuglasche und der Grenz-

Tabelle 5. a) Elastische Beanspruchungen bei drei Schraubenreihen; b) elastisch/plastische Beanspruchungen bei drei Schraubenreihen

Table 5. a) Elastic reactions of model with three rows of bolts; b) Elastic/plastic reactions of model with three rows of bolts



tragfähigkeit der Schrauben. Ein allgemeines Nachweis-konzept unter Ansatz des äußeren (statisch bestimmten) Gleichgewichts und der daraus resultierenden horizontalen Auflagerkräfte, die unmittelbar die Beanspruchungen der Zuglasche und des Riegeldruckflansches darstellen, ist daher genau.

6.2 Beanspruchungen

6.2.1 Zuglasche

Die maximale Zugkraftbeanspruchung ist bei allen Rechenvarianten identisch mit der oberen horizontalen Auflagerkraft und liegt zwischen Achse 1 und 3 (Kopfplattenüberbrückung). Mit jeder Schraubenreihe nach rechts wird sie entsprechend den realen Schraubenbeanspruchungen reduziert. Bei elastischer Berechnung mit steifen Schrauben übernimmt die jeweils rechte Schraube den Großteil der Scherkraftübertragung. Die Annahme hoher Schraubenverformbarkeit führt zu einer besseren Gleichverteilung der Schraubenkräfte. Berücksichtigt man die plastischen Grenztragfähigkeiten der Schrauben, ergeben sich sowohl bei weicher als auch steifer Schraubencharakteristik nahezu identisch gleichverteilte Schraubenkräfte.

6.2.2 Riegelprofil

Parallel zu der Abnahme der Riegelzugkraft nimmt für alle Steifigkeitsverhältnisse die negative Normalkraft des Riegels – ausgehend von der im Vergleich zur Normalkraft der Rahmenstatik ca. achtfach größeren Anfangsdruckkraft am Riegelende – an jeder Schraubenachse sprunghaft ab, bis sie rechts neben der letzten Schraubenreihe die Normalkraft der Rahmenstatik erreicht. Dabei korrespondieren die Sprünge der Normalkraftlinien von Riegel und Zuglasche.

Die Momente M_y sind im gesamten Bereich der Verschraubung negativ und verhalten sich sägezahnartig. Sie verspringen infolge der exzentrischen Normalkrafteinleitung an jeder Schraubenachse jeweils in negativer Richtung. Ausgehend vom linken Randmoment, das unabhängig vom statischen Modell und den Steifigkeiten ist, steigen die Beträge der Peaks vom linken Minimum bis zum Belastungsmoment des Mikromodells. Zwischen benachbarten Schrauben fällt das Moment infolge der positiven konstanten (moderaten) Querkraft linear ab. Die Unterschiede der negativen Momentenspitzen (zwischen den immer identischen betragsmäßigen Minimalwerten links und Maximalwerten rechts) der verschiedenen Rechenmodelle ergeben sich ausschließlich aus den unterschiedlich verteilten Schraubenkräften. Bei weicheren Schrauben und Berücksichtigung der Plastizierungen der Schrauben nähern sich die Momentenlinien sehr an, so dass baupraktisch von einer Gleichverteilung gesprochen werden kann.

7 Nachweisformate

Mit den Erkenntnissen des Mikromodells werden einige Nachweisformate vorgeschlagen und in Abschnitt 8 auf die Rahmenecke nach Bild 2 angewendet. Voraussetzungen der Konzepte sind:

- Es ist eine Stützensteife in Höhe des Riegeluntergurtes vorhanden.
- Es liegt eine symmetrische Zuglaschenverschraubung mit identischen Schrauben vor.
- Die Scherkraftübertragung zwischen Zuglasche und Profilverflansch erfolgt gleichverteilt über alle Schrauben der Zuglaschenverschraubung (nachgiebige Schrauben/plastische Verteilung).
- Im Bereich der Zuglaschenverschraubung ist der Momentenverlauf M_y negativ.

7.1 Beanspruchungen

Abgesehen von weiteren notwendigen Nachweisen der Schweißnähte, Querkraftverschraubung der Kopfplatte und der Stützenkopfsteifen werden im Folgenden die Nachweisvorschläge für die Zuglasche, die Flächenpressung am Druckflansch und für die Beanspruchungen des Riegelprofils im Bereich der Zuglaschenverschraubung dargestellt. In die Gleichungen (1) bis (5) sind teilweise die Beanspruchungen $\underline{M}_{y,2}$, \underline{N}_2 und $\underline{V}_{z,2}$ des Schnittes 2 der globalen Rahmenstatik einzusetzen. Die Vorzeichen der Schnittgrößen sind nach Regeln der Statik zu berücksichtigen (Zugkraft ist plus/Momente nach Zugfaser). Mit den Bezeichnungen von Bild 6 ergibt sich:

- Beanspruchung der Zuglasche:

$$N_{Ed}^{tb} = - \frac{\underline{M}_{y,2,Ed}}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} + \underline{N}_{2,Ed} \frac{(h - t_f)/2}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} \quad (1)$$

- Beanspruchung einer Schraube:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}^{tb}}{n} \quad (2)$$

- Beanspruchungen des Riegels:

$$N_{2-3,Ed} = \frac{\underline{M}_{y,2,Ed}}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} + \underline{N}_{2,Ed} \frac{(h + t_{tb})/2}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} \quad (3a)$$

$$N_{3-4,Ed} = N_{2-3,Ed} + k \cdot F_{V,Ed} \quad (3b)$$

$$N_{4-5,Ed} = N_{2-3,Ed} + 2k \cdot F_{V,Ed} \quad (3c)$$

usw. bei weiteren Schraubenreihen

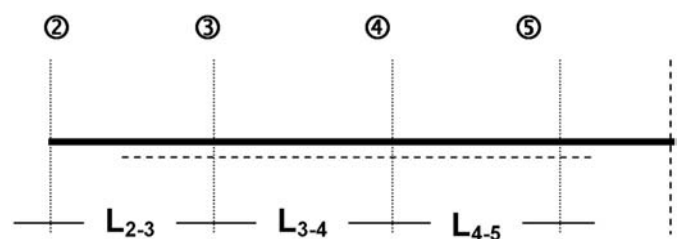


Bild 6. Bezeichnungen zu den Gleichungen (1) bis (5)
Fig. 6. Notation of formulas (1) to (5)

$$M_{y,2,Ed} = N_{2-3,Ed} \cdot (h - t_f) / 2 \quad (4a)$$

$$M_{y,3r,Ed} = M_{y,2,Ed} + \underline{V}_{z,2} \cdot L_{2-3} - k \cdot F_{V,Ed} \cdot (h + t_{tb}) / 2 \quad (4b)$$

$$M_{y,4r,Ed} = M_{y,3,Ed} + \underline{V}_{z,2} \cdot L_{3-4} - k \cdot F_{V,Ed} \cdot (h + t_{tb}) / 2 \quad (4c)$$

usw. bei weiteren Schraubenreihen

$$\underline{V}_{z,2-5,Ed} = \underline{V}_{z,2,Ed} \quad (5)$$

mit

h Riegelhöhe (height of beam)

t_f Flanschdicke des Riegels (thickness of flange)

t_{tb} Dicke der Zuglasche (thickness of tension bar)

m Anzahl Schraubenreihen in Krafrichtung (Zugflansch)

k Anzahl Schrauben quer zur Krafrichtung (Zugflansch)

n Gesamtanzahl Schrauben n = m · k (Zugflansch)

7.2 Beanspruchbarkeiten nach EN 1993-1-1/8

7.2.1 Zuglasche

Die Grenztragfähigkeit ist nach EN 1993-1-1 (6.2.2.1, 6.2.2.2 und 6.2.3) zu berechnen:

$$N_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{aligned} N_{pl,Rd} &= \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} &= \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \end{aligned} \right. \quad (6a)$$

mit

Bruttofläche $A = b_{tb} \cdot t_{tb}$

Nettofläche $A_{net} = A - k \cdot t_{tb} \cdot d_0$

7.2.2 Verschraubung Zuglasche/Zugflansch

Die Grenztragfähigkeit bei Schrauben der Kategorie A (Scher-/Lochleibungsverbinding) ist nach EN 1993-1-8 (Tabellen 3.4 und 3.3) zu berechnen. Für jede Schraube gilt zunächst:

$$F_{Rd,i} = \min \left\{ \begin{aligned} F_{v,Rd,i} &= \tau_{a,Rd} \cdot A = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \\ F_{b,Rd,i} &= \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \end{aligned} \right. \quad (7a)$$

$$(7b)$$

mit:	in Scherfuge liegt	
	Schraubenschaft	Gewinde
α _v =	0,6	0,6 für Schrauben 4.6 bis 8.8 0,5 für Schrauben 10.9
A =	Schaftquerschnitt	Spannungsquerschnitt A _s
Randschraube Krafrichtung	Innenschraube Krafrichtung	
α _d = e ₁ /3d ₀	α _d = p ₁ /3d ₀ - 0,25	
α _b =	min [α _d f _{ub} /f _u 1,0]	
Randschraube ⊥ Krafrichtung	Innenschraube ⊥ Krafrichtung	
k ₁ = 2,8 · e ₂ /d ₀ - 1,7 ≤ 2,5	k ₁ = 1,4 · p ₂ /d ₀ - 1,7 ≤ 2,5	

Bei gemeinsamer Tragwirkung einer Schraubengruppe ist EN 1993-1-8 Abschnitt 3.7 zu beachten:

Regelung nach 3.7	Grenztragfähigkeit jeder Schraube
wenn die Abschertragfähigkeiten F _{v,Rd} jeder Schraube größer oder gleich ihrer Lochleibungstragfähigkeit F _{b,Rd} ist, dürfen die individuellen Lochleibungstragfähigkeiten jeder Schraube zu einer gemeinsamen Lochleibungstragfähigkeit ΣF _{b,Rd} summiert werden	$F_{Rd} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{b,Rd,i}}{n} \quad (8a)$
falls die Abschertragfähigkeiten F _{v,Rd,i} einer oder mehrerer Schrauben kleiner als die zugehörige Lochleibungskraft ist, erhalten alle Schrauben der Gruppe den Minimalwert der Lochleibungs- und Abschertragfähigkeiten aller Schrauben	$F_{Rd} = \min [F_{v,Rd,i} F_{b,Rd,i}] \quad (8b)$ i = 1, ... n

Es wird daher empfohlen, die Schrauben derart zu wählen, dass deren Tragfähigkeit auf Abscheren größer oder zumindest gleich der auf Lochleibung ist, damit sich sicher eine Gleichverteilung der Schraubenkräfte einstellt.

7.2.3 Druckflansch

Die Grenztragfähigkeit des Druckflansches ist nach EN 1993-1-1 (6.2.2.1, 6.2.2.2 und 6.2.4) zu berechnen:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{für die Querschnittsklassen 1 bis 3} \quad (9a)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{f,eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{für die Querschnittsklasse 4} \quad (9b)$$

Falls der Nachweis (9) nicht erfüllt werden kann, ist es nach Auffassung der Autoren bei kleinen Querkräften am

Riegelende (etwa $\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} \leq 0,5$ siehe Abschnitt 7.2.4.2)

gerechtfertigt, zu der Flanschfläche noch 5 bis 10 % der Stegfläche (Ausrundungsbereich) rechnerisch hinzuzuziehen.

7.2.4 Riegelprofil

Unter der Annahme der Querschnittsklassen 1 und 2 für das Riegelprofil im Bereich der Verschraubung werden plastische Nachweisformate vorgeschlagen, die einen plastischen Ausgleich örtlich begrenzt auftretender elastischer Spannungskonzentrationen berücksichtigen. Bei kombinierter Beanspruchung infolge Normkraft, Querkraft und Moment M_y sind Interaktionsnachweise zu führen. Da die Momente betragsmäßig von links nach rechts zunehmen, die Normalkräfte dagegen abnehmen, ist es

wegen der Komplexität einiger Nachweisformeln notwendig, Interaktionsnachweise an allen Stellen der Momentenspitzen zu führen. Es muss dabei beachtet werden, ob der Nachweis am Bruttoquerschnitt geführt werden darf oder die Lochschwächungen des Zuggurtes zu berücksichtigen sind.

7.2.4.1 Lochabzug

Nach EN 1993-1-1 (6.2.5 (4)) dürfen bei Biegebeanspruchung die Löcher im Zugflansch vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{A_{f,net} \cdot 0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (10)$$

mit
 Bruttoflanschfläche $A_f = b \cdot t_f$
 Nettoflanschfläche $A_{f,net} = A_f - k \cdot t_f \cdot d_0$

7.2.4.2 Nachweis am Bruttoquerschnitt

Bei Erfüllung der Gleichung (10) können nach EN 1993-1-1 (6.2.6, 6.2.9.1, 6.2.10) für die Querschnittsklassen 1 und 2 plastische Querschnittsnachweise am Bruttoquerschnitt geführt werden, wobei entweder nur der Einfluss der Querkraft oder der Normalkraft berücksichtigt werden kann. Die Norm stellt (außer allgemeinen Hinweisen in 6.2.10) keine Nachweisformeln zur gleichzeitigen Berücksichtigung beider Schnittkräfte zur Verfügung.

Dann kann auf die Nachweisformate von *Rubin* [5] oder das Teilschnittgrößenverfahren nach *Kindmann* [6] zurückgegriffen werden, die für doppelt- und einfachsymmetrische I-Profile anwendbar sind.

Beanspruchung aus Biegemoment

Bei geringeren Normal- und Querkraften braucht nur das Biegemoment nachgewiesen zu werden:

$$M_{c,y,Rd} \hat{=} M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (11)$$

Beanspruchung aus Biegemoment und Querkraft

Falls $\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} > 0,5$ ist

$$\text{mit } V_{z,pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

und $A_v = A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$

wird das Grenzmoment der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Querkraftwirkung zu:

$$M_{c,y,Rd} \hat{=} M_{V,y,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_w^2}{4 \cdot t_w} \right] \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \leq M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

mit

$$W_{pl,y} = \frac{M_{pl,y}}{f_y}, \rho = \left[\frac{2 \cdot V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} \right]^2 \text{ und } A_w = t_w \cdot h_w$$

Beanspruchung aus Biegemoment und Normalkraft

Die Reduktion der Momenten Tragfähigkeit infolge einer Normalkraft kann entfallen, wenn die folgenden Bedingungen beide erfüllt sind:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} \text{ und } N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Bei Berücksichtigung der Normalkraftwirkung ist das Grenzmoment der Tragfähigkeit:

$$M_{c,y,Rd} \hat{=} M_{N,y,Rd} = \frac{1-n}{1-0,5a} M_{pl,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13)$$

mit

$$n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}, N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ und } a = (A - 2bt_f) / A \leq 0,5$$

In (11) bis (13) sind alle Beanspruchungen betragsmäßig zu verwenden.

Nachweisformat

Mit dem Grenzmoment der Bemessung $M_{c,y,Rd}$ nach (11) bis (13) ergibt sich die plastische Querschnittsausnutzung zu

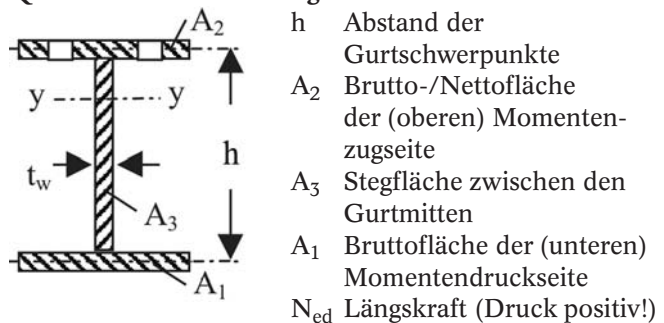
$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 \quad (14)$$

7.2.4.3 Nachweis am Nettoquerschnitt

Kann Gleichung (10) nicht erfüllt werden, ist der Lochabzug im Zugflansch des Riegelprofils notwendig, und es entsteht zum Nachweis ein einfach symmetrisches Profil. Für plastische Nachweise der Querschnittsklassen 1 und 2 bleibt DIN EN 1993-1 allerdings ein Nachweisformat dafür schuldig. Der österreichische nationale Anhang zur ÖNORM B 1993-1-1 ergänzt diese Lücke und bietet das Nachweisverfahren nach *Rubin* [5] an, das im Folgenden benutzt und in der Schreibweise angepasst wird. Die hier dargestellte Version beschränkt sich auf den Nachweis für Normal- und Querkraft sowie Biegung um die starke Achse y-y. Die Voraussetzungen dazu lauten:

- Es liegt ein negatives Moment $M_{y,Ed}$ vor.
- Zuggurtnetto- oder -bruttofläche $A_2 \leq$ Druckgurtbruttofläche A_1 (einfach- oder doppelsymmetrischer Querschnitt)
- Die Beanspruchungen $M_{y,Ed}$ und $V_{z,Ed}$ werden betragsmäßig eingesetzt.
- Die Ausrundungen der Profile werden vernachlässigt.

Querschnitt/Bezeichnungen



Vorwerte

$$V_{z,pl,Rd} = A_3 \cdot f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}) \text{ mit } A_3 = h \cdot t_w$$

(plastische Querkraft)

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} \leq \frac{1}{3} \Rightarrow \eta = 1$$

(keine Reduktion der Momententragfähigkeit)

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} > \frac{1}{3} \Rightarrow \eta = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}}\right)^2}$$

(Reduktion der Momententragfähigkeit)

$$A_1 = b_f \cdot t_f \quad A_2 = A_1 - k \cdot d_0 \cdot t_f \quad A_3 = h \cdot t_w$$

$$A_r = A_1 + A_2 + \eta A_3$$

(Restfläche für Normal- und Momententragfähigkeit)

$$\delta_1 = A_1/A_r \quad \delta_2 = A_2/A_r \quad \delta_3 = \eta \cdot A_3/A_r$$

$$N_{pl,V,Rd} = A_r \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ (reduzierte plastische Normalkraft)}$$

Gültigkeitsbereich I

$$1 - 2 \delta_2 \leq N_{Ed}/N_{pl,V,Rd} \leq 1$$

plastischer Nachweis (Ausnutzung)

$$\frac{|M_{y,Ed}| / (h \cdot N_{pl,V,Rd})}{(\delta_1 + 0,5 \cdot \delta_3) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,V,Rd}}\right)} \leq 1 \quad (15a)$$

Gültigkeitsbereich II

$$2 \delta_1 - 1 \leq N_{Ed}/N_{pl,V,Rd} \leq 1 - 2 \delta_2$$

plastischer Nachweis (Ausnutzung)

$$\frac{|M_{y,Ed}| / (h \cdot N_{pl,V,Rd})}{(\delta_1 + 0,5 \cdot \delta_3) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,V,Rd}}\right) - \frac{1}{4\delta_3} \left(1 - 2\delta_2 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,V,Rd}}\right)^2} \leq 1 \quad (15b)$$

Gültigkeitsbereich III

$$-1 \leq N_{Ed}/N_{pl,V,Rd} \leq 2 \delta_1 - 1$$

plastischer Nachweis (Ausnutzung)

$$\frac{|M_{y,Ed}| / (h \cdot N_{pl,V,Rd})}{(\delta_2 + 0,5 \cdot \delta_3) \cdot \left(1 + \frac{N_{Ed}}{N_{pl,V,Rd}}\right)} \leq 1 \quad (15c)$$

Entsprechend dem aktuellen Normalkraftverhältnis $N_{Ed}/N_{pl,V,Rd}$ ist einer der Nachweise I, II oder III zu führen. Es sei darauf hingewiesen, dass sich im Bereich II bei Einfachsymmetrie (wg. Lochabzug) unter moderaten Druckkräften (Bild 7) eine höhere Momententragfähigkeit ergibt als ohne Normalkraft. Dieses Nachweisformat kann (unter Einbuße von Tragfähigkeit gegenüber dem Nachweis nach Gl. (13)) auch gewählt werden, wenn nach Gleichung (10) keine Schraubenlöcher und/oder

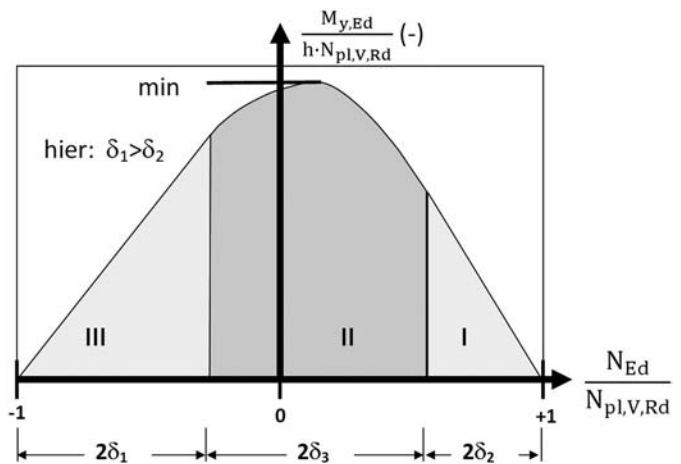


Bild 7. Plastische Interaktion der Beanspruchungen nach [5]

Fig. 7. Plastic Interaction of the internal forces after [5]

nur eine der Schnittkräfte N oder V_z zu berücksichtigen sind.

8 Tragsicherheitsnachweise nach EN 1993-1

Die Konstruktion und ursprüngliche Berechnung erfolgte nach DIN 18800-1. Im Folgenden werden die Nachweise dagegen nach EN 1993-1-1 und EN 1993-1-8 geführt.

Konstruktionsdaten: $h = 360 \text{ mm}$; $t_f = 12,7 \text{ mm}$; $t_{tb} = 20 \text{ mm}$; $b_f = b_{tb} = 170 \text{ mm}$

8.1 Material- und Sicherheitsbeiwerte

Die Material- und Sicherheitsbeiwerte sind nach EN 1993-1-1/8 berücksichtigt (Tabelle 6), wobei die Werte der DIN 18800 hier nur zur Gegenüberstellung angegeben aber in den folgenden Nachweisen nicht weiter benutzt werden.

8.2 Beanspruchungen

Es werden die Beanspruchungen mit den Formeln (1) bis (5) berechnet:

Zuglasche:

$$N_{Ed}^{tb} = - \frac{M_{y,Ed}}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} + N_{Ed} \frac{(h - t_f)/2}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}}$$

$$= \frac{166}{0,364} - 58,79 \frac{0,174}{0,364} = 456,04 - 28,10 = 427,94 \text{ kN}$$

Tabelle 6. Rechenwerte nach EN 1993-1-1/8 und DIN 18800-1

Table 6. Values for Calculation according EN 1993-1-1/8 and DIN 18800-1

EN 1993-1-1 und EN 1993-1-8		DIN 18800-1	
$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$	$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$	$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
$f_{y,b} = 900 \text{ N/mm}^2$		$f_{u,b} = 1000 \text{ N/mm}^2$	
$\gamma_{M0} = 1,0$	$\gamma_{M2} = 1,25$	$\gamma_M = 1,1$	

Tabelle 7. Zusammenfassung der Riegelbeanspruchungen
Table 7. Summary of the rafter stresses

Beanspruchung	Einheit	Querschnitte			Extremalwerte
		2	3-r	4-r	
N_{Ed}	[kN]	-487,20	-272,99	-58,79	-487,20
$V_{z,Ed}$	[kN]	57,55	57,55	57,55	57,55
$M_{y,Ed}$	[kNm]	-84,60	-120,41	-156,50	-156,50

Druckflansch:

$$N_{Ed}^{cf} = N_{2-3,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}} + N_{Ed} \frac{(h + t_{tb})/2}{h - \frac{t_f}{2} + \frac{t_{tb}}{2}}$$

$$= \frac{-166}{0,364} - 58,79 \frac{0,190}{0,364} = -456,04 - 30,69 = -486,73 \text{ kN}$$

Schraube:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}^{tb}}{4} = \frac{427,92}{4} = 106,98 \text{ kN}$$

Riegel:

Die nach den Formeln (1) bis (5) berechneten Beanspruchungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. In der Spalte Extremalwerte sind die maximalen Beträge der Einzelbeanspruchungen aller Querschnitte zusammengestellt.

8.3 Beanspruchbarkeiten und Tragfähigkeitsnachweise

8.3.1 Schrauben

Die Zuglasche ist mit vier Schrauben M20-10.9 ohne Vorspannung und 1 mm Lochspiel mit dem Zugflansch verschraubt.

- Grenzabscherkraft

$$F_{v,Rd} = \tau_{a,R,d} \cdot A = \frac{a_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 1000 \cdot 3,14}{1,25} \cdot 10^{-1} = 150,4 \text{ kN}$$

$A = 3,14 \text{ cm}^2$ Schaftquerschnitt

$a_v = 0,6$ für Festigkeitsklasse 10.9 und Schaft in der Scherfuge

$f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes

$\gamma_{M2} = 1,25$ für einschnittig gestützte und mehrschnittige Verbindungen

- Grenzlochleibungskraft

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 360 \cdot 2,0 \cdot 1,27}{1,25} \cdot 10^{-1} = 183 \text{ kN} > 150,4 \text{ kN}$$

Randschraube:

$$\alpha_d = e_1 / 3d_0 \begin{cases} 80 / (3 \cdot 21) = 1,27 \text{ (Zuglasche)} \\ > 1 \text{ (Zugflansch)} \end{cases}$$

$\alpha_b = \min [1,27 | 1000/360 | 1,0] = 1,0$

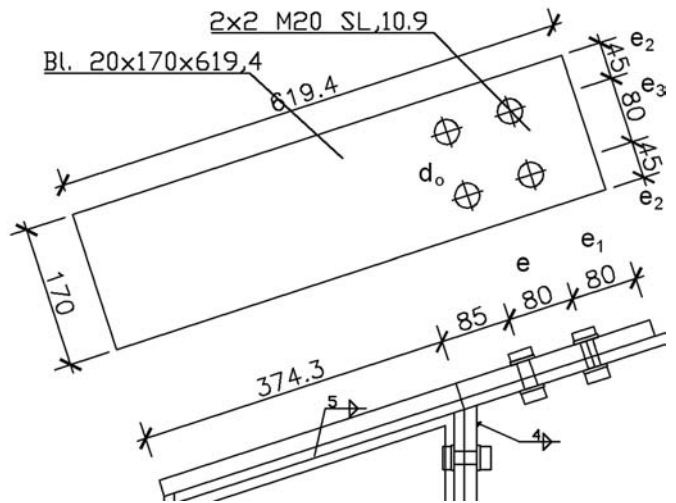


Bild 8. Schraubenabmessungen
Fig. 8. Dimensions of bolt connection

Mittelschraube:

$\alpha_d = p_1 / 3d_0 - 0,25 = 80 / (3 \cdot 21) - 0,25 = 1,02$

$\alpha_b = \min [1,02 | 1000/360 | 1,0] = 1,0$

$k_1 = \min [2,8 \cdot 45/21 - 1,7 | 2,5] = 2,5$

- $e_1 = 80 \text{ mm}$ Randabstand in Krafrichtung (Zuglasche)
- $e_1 > 85 \text{ mm}$ Randabstand in Krafrichtung (Zugflansch)
- $p_1 = 80 \text{ mm}$ Lochabstand in Krafrichtung (Zugflansch und Zuglasche)
- $e_2 = 45 \text{ mm}$ Randabstand rechtwinklig zur Krafrichtung
- $p_2 = 80 \text{ mm}$ Schraubenabstand rechtwinklig zur Krafrichtung
- $d = 20 \text{ mm}$ Schraubenschaftdurchmesser (M20)
- $d_0 = 21 \text{ mm}$ Lochdurchmesser (für M20 + 1 mm Lochspiel)

Damit ergibt sich nach EN 1993-1-8 Abschnitt 3.7 für jede Schraube die gleiche Grenztragfähigkeit

$F_{Rd} = \min [183 | 150,4] = 150,4 \text{ kN}$.

Der Nachweis der Schraubentragfähigkeit ergibt:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{106,98}{150,40} = 0,71 \leq 1$$

8.3.2 Zuglasche

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 2560 \cdot 360}{1,25} \cdot 10^{-3} = 663,6 \text{ kN}$$

mit $A = 170 \cdot 20 = 3400 \text{ mm}^2$ und $A_{net} = (170 - 2 \cdot 21) \cdot 20 = 2560 \text{ mm}^2$

$$\frac{A}{A_{net}} \leq \frac{0,9 \cdot f_{u,k}}{1,25 \cdot f_{y,k}} \frac{3400}{2560} = 1,33 > \frac{0,9 \cdot 360}{1,25 \cdot 140} = 1,08 \Rightarrow \text{Nettonachweis erforderlich}$$

Der Nachweis der Lasche ergibt:

$$\frac{N_{Ed}^{tb}}{N_{t,Rd}} = \frac{427,92}{663,60} = 0,65 \leq 1$$

8.3.3 Druckflansch

$$N_{c,Rd} = \frac{2159,0 \cdot 240}{1,0} \cdot 10^{-3} = 518 \text{ kN}$$

mit $A = 170 \cdot 12,7 = 2159 \text{ mm}^2$

Der Nachweis der Lasteinleitungsfläche am Druckflansch ergibt:

$$\frac{N_{Ed}^{cf}}{N_{c,Rd}} = \frac{486,71}{518} = 0,94 \leq 1$$

8.3.4 Riegelprofil

8.3.4.1 Nachweis mit zugeordneten Beanspruchungen

Gemäß den Erkenntnissen der Abschnitte 5.3.2 und 6.2.2 ist das Riegelprofil am Anschluss der Kopfplatte (Achse 2) und unmittelbar rechts jeder Schraubenreihe (hier: Achsen 3 und 4) mit den in Abschnitt 8.2 berechneten lokalen Beanspruchungen V_z , N und M_y nachzuweisen.

8.3.4.2 Kurznachweis mit Extremwerten

Ein schnelle und immer auf der sicheren Seite liegende Abschätzung kann erfolgen, wenn das (globale) Moment aus der Rahmenstatik an der vom Riegelende (Kopfplatte) am weitesten entfernten Schraubenreihe (rechts von Achse 4) mit der lokalen Normalkraft am Riegelende (Achse 2) im Nachweis kombiniert wird. Die Normalkraft kann auch schnell abgeschätzt werden mit:

$$N_{2-3,Rd} \approx \frac{M_2}{h} + \frac{N_2}{2} = \frac{-166}{0,36} - \frac{58,8}{2} = -461,1 - 29,4 = -490 \text{ kN}$$

8.3.4.3 Plastische Nachweise der Riegelauslastung

Die geringe Querkraft hat keinen Einfluss auf den Nachweis. Dagegen ergibt die Überprüfung von Gleichung (10) die Notwendigkeit des Nettonachweises:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,pl,Rd}} = \frac{57,55}{476,34} = 0,12 < 0,5$$

mit $V_{z,pl,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = 476,34 \text{ kN}$ und $A_V = 35,11 \text{ cm}^2$

$$\frac{A_{f,net} \cdot 0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{526,70}{1,25} = 421,36 < \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{518,16}{1} = 518,16 \text{ kN}$$

Somit hat korrekterweise eine Nachweisführung am einachsigen Nettoquerschnitt nach Gleichungen (15a) bis (15c) zu erfolgen (in der folgenden Auswertung mit „Rubin ($A_1 > A_2$)“ bezeichnet). Es ist jedoch auch möglich, den (unteren) Druckflansch auf die Größe der Nettofläche des gelochten Zugflansches rechnerisch zu reduzieren, um einen fiktiven doppelt symmetrischen Querschnitt zu erhalten. Somit kann dann der Nachweis mit den Normformeln (13) und (14) mit angepassten Querschnittswerten (mit „EC 3 ($A_1 = A_2$)“ bezeichnet) oder auch (als symmetrischer Sonderfall) wiederum nach (15a) bis (15c) (mit „Rubin ($A_1 = A_2$)“ bezeichnet) geführt

werden. Exemplarisch wird zunächst für jedes Nachweisformat eine Detailrechnung gezeigt:

Nachweisformat Rubin ($A_1 > A_2$):

Beanspruchungen des Querschnitts 4-r:

$$M_{y,Ed} = -156,2 \text{ kNm}; V_{z,Ed} = 57,77 \text{ kN}; N_{Ed} = -58,79 \text{ kN};$$

$$A_1 = 17 \cdot 1,27 = 21,59 \text{ cm}^2;$$

$$A_2 = 21,59 - 2 \cdot 2,1 \cdot 1,27 = 16,26 \text{ cm}^2;$$

$$A_3 = 34,73 \cdot 0,8 = 27,78 \text{ cm}^2$$

$$V_{z,pl,Rd} = 27,78 \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3}} = 376,91 \text{ kN},$$

$$57,55/376,91 = 0,15 < \frac{1}{3} \Rightarrow \eta = 1$$

$$A_r = 21,59 + 16,26 + 1 \cdot 27,78 = 65,63 \text{ cm}^2,$$

$$N_{pl,V,Rd} = 65,63 \cdot \frac{23,5}{1} = 1542,31 \text{ kN}$$

$$\delta_1 = 21,59/65,63 = 0,33,$$

$$\delta_2 = 16,26/65,63 = 0,25,$$

$$\delta_3 = 27,78/65,63 = 0,42,$$

$$2\delta_1 - 1 = 2 \cdot 0,33 - 1 = -0,34 \leq 58,79/1542,31 = 0,038$$

$$\leq 1 - 2\delta_2 = 1 - 2 \cdot 0,25 = 0,5$$

\Rightarrow Nachweisformat II (15b) maßgebend:

$$\frac{|-156,2| / (0,347 \cdot 1542,31)}{(0,33 + 0,5 \cdot 0,42) \cdot (1 - 0,038) - \frac{1}{4 \cdot 0,42} (1 - 2 \cdot 0,25 - 0,038)^2} = \frac{0,292}{0,392} = 0,75 \leq 1$$

Nachweisformat Rubin ($A_1 = \text{red } A_2$):

Beanspruchungen des Querschnitts 2:

$$M_{y,Ed} = -84,60 \text{ kNm}; V_{z,Ed} = 57,77 \text{ kN}; N_{Ed} = -487,2 \text{ kN}$$

$$A_1 = A_2 = 21,59 - 2 \cdot 2,1 \cdot 1,27 = 16,26 \text{ cm}^2;$$

$$A_3 = 34,73 \cdot 0,8 = 27,78 \text{ cm}^2$$

$$V_{z,pl,Rd} = 27,78 \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3}} = 376,91 \text{ kN},$$

$$57,55/376,91 = 0,15 < \frac{1}{3} \Rightarrow \eta = 1$$

$$A_r = 2 \cdot 16,26 + 1 \cdot 27,78 = 60,30 \text{ cm}^2,$$

$$N_{pl,V,Rd} = 60,30 \cdot \frac{23,5}{1} = 1417,05 \text{ kN}$$

$$\delta_1 = \delta_2 = 16,26/60,30 = 0,27$$

$$\delta_3 = 27,78/60,30 = 0,46,$$

$$2\delta_1 - 1 = 2 \cdot 0,27 - 1 = -0,46 \leq 487,20/1417,05$$

$$= 0,344 \leq 1 - 2\delta_2 = 1 - 2 \cdot 0,27 = 0,46$$

\Rightarrow Nachweisformat II (15b) maßgebend:

$$\frac{|-84,60| / (0,347 \cdot 1417,05)}{(0,27 + 0,5 \cdot 0,46) \cdot (1 - 0,344) - \frac{1}{4 \cdot 0,46} (1 - 2 \cdot 0,27 - 0,0344)^2} = \frac{0,172}{0,321} = 0,54 \leq 1$$

Nachweisformat EC 3 ($A_1 = \text{red } A_2$):

Beanspruchungen des Querschnitts 2:

$$M_{y,Ed} = -84,60 \text{ kNm}; V_{z,Ed} = 57,77 \text{ kN}; N_{Ed} = -487,2 \text{ kN}$$

$$A_{red} = A - 2 \cdot (2 \cdot d_0 \cdot t_f) = 72,70 - 2 \cdot (2 \cdot 2,1 \cdot 1,27) = 62,03 \text{ cm}^2; b_{red} = b - 2 \cdot d_0 = 17 - 2 \cdot 2,1 = 12,80 \text{ cm}^2$$

$$M_{pl,y,red,Rd} = 2 \cdot S_{y,red} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2 \cdot [510 - 2,1 \cdot 1,27 \cdot (36 - 1,27)] \cdot \frac{23,5}{1} = 196,2 \text{ kNm}$$

$$N_{pl,red,Rd} = 62,03 \cdot \frac{23,5}{1} = 1457,8 \text{ kN}$$

$$|N_{ED}| = 487,20 \text{ kN} > \min \left(0,25 \cdot 1457,8 = 364,44 \mid 0,5 \cdot (36 - 2 \cdot 1,27) \cdot 0,8 \cdot 23,5 / 1 = 314,52 \right)$$

⇒ Grenzmomentabminderung infolge Normalkraft nach (13) ist notwendig :

$$a = \frac{62,03 - 2 \cdot 12,8 \cdot 1,27}{62,03} = \frac{29,52}{62,03} = 0,476 < 0,5$$

$$n = \frac{487,20}{1457,8} = 0,334$$

$$M_{c,y,N,red,Rd} = 196,2 \cdot \frac{1 - 0,334}{1 - 0,5 \cdot 0,476} = 196,2 \cdot 0,874 = 171,4 \text{ kNm}$$

Nachweis: $(| - 84,60 |) / 171,4 = 0,49 < 1$

Tabelle 8 und Bild 9 stellen die Berechnungsergebnisse der Nachweisformate der Abschnitte 8.3.4.1 und 8.3.4.2 für die Beanspruchungen und Extremalwerte der Tabelle 7 gegenüber.

Alle benutzten plastischen Nachweisverfahren zeigen für alle Querschnitte (Achsen 2 bis 4) sowie auch für die extremale Abschätzung mit $\max |N|$ und $\max |M_y|$ ausreichende Tragfähigkeit. Das genaueste Verfahren (RUBIN $A_1 > A_2$; Gl. (15)) ist auch das wirtschaftlichste, da es die geringste Ausnutzung ergibt. Das Verfahren

Tabelle 8. Plastische Querschnittsausnutzung verschiedener Nachweismöglichkeiten

Table 8. Plastic resistance of the rafter utilizing various design methods

Querschnitt	2	3	4	extremal
Rubin ($A_1 > A_2$)	45,28 %	58,91 %	74,63 %	83,76 %
Rubin ($A_1 = A_2$)	53,61 %	67,10 %	82,85 %	99,18 %
EC 3 ($A_1 = A_2$)	49,36 %	61,38 %	79,78 %	92,66 %

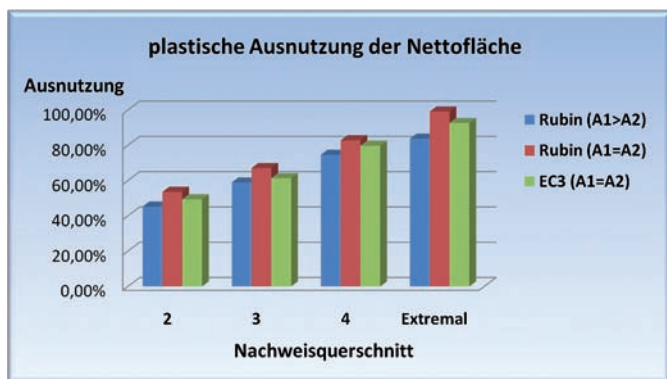


Bild 9. Plastische Querschnittsausnutzung verschiedener Nachweismöglichkeiten

Fig. 9. Plastic limit states utilizing different design formats

nach EC 3 mit reduziertem Zug- und Druckflansch (EC 3/ $A_1 = red A_2$; Gln. (13) und (14)) ist zwar eine Näherung, kommt aber RUBIN $A_1 > A_2$ nahe. Dagegen ist RUBIN $A_1 = red A_2$ die unwirtschaftliche Nachweisform und wird daher zur Anwendung nicht empfohlen.

8.3.4.4 Abschätzung der maximalen elastischen Zugflanschbeanspruchung

Wer dennoch die elastische Zugflanschbeanspruchung abschätzen will, kann z. B. in Achse 4L die elastische Normalspannung aus Rieglmoment und Normalkraft im Zugflansch berechnen und diese mit der dort infolge der Schraubenreihe zusätzlich eingeleiteten Normalkraft (lokal nur im Flansch gerechnet) überlagern. Dabei wird hier zwar der Nettoquerschnitt berücksichtigt, aber das Trägheits- und Widerstandsmoment (vereinfacht) auf den Schwerpunkt des Bruttoquerschnittes bezogen:

$$I_{y,net} = 16272 - 2 \cdot 2,1 \cdot 1,27 \cdot [0,5 \cdot (36 - 1,27)]^2 = 16272 - 1608 = 14664 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,net} = 14664 / 18 = 814,6 \text{ cm}^3$$

$$A_{net} = 72,7 - 2 \cdot 2,1 \cdot 1,27 = 67,4 \text{ cm}^2$$

$$A_{f,net} = (17,0 - 2 \cdot 2,1) \cdot 1,27 = 16,3 \text{ cm}^2$$

$$M_{y,4L} = -156,0 + 2 \cdot 106,98 \cdot 0,19 = -156 + 40,7 = -115,3 \text{ kNm}; N_{4L} = -273 \text{ kN}$$

$$res \sigma_f = 11530 / 814,6 - 273 / 67,4 + 2 \cdot 106,98 / 16,3 = 14,15 - 4,05 + 13,13 = 23,23 \text{ kN/cm}^2$$

Nettonachweis nach EN 1993-1-1:

$$res \sigma_f / (f_u \cdot 0,9 / \gamma_{M2}) = 23,23 / (36 \cdot 0,9 / 1,25) = 0,90 < 1$$

9 Zusammenfassung

Mit Hilfe eines lokalen elastisch/plastischen Stabwerkmodells (Mikromodell) wurde ein durch den statischen Satz der Traglasttheorie abgesichertes Tragmodell für den riegelseitigen Bereich einer unter negativer Momentenbeanspruchung stehenden Rahmenecke mit geschraubter Zuglasche vorgestellt. Es wurden einfache – für Handrechnung geeignete – Formeln zur Berechnung der Beanspruchungen der Zuglasche, der (gleichmäßig verteilt angenommenen) Schraubenkräfte, des Riegels und der Kontaktkraft am Druckflansch erarbeitet.

Anschließend wurden für diese Tragkomponenten geeignete (plastische) Nachweisformate nach EN 1993-1-1/8 vorgestellt und für eine konkrete Ausführung einer Rahmenecke angewendet, für die in der Vergangenheit von diversen Bauaufsichten Zugflanschverstärkungen gefordert wurden. Die Berechnungen nach allen hier vorgestellten Nachweisformaten (und sogar eine genauere elastische Abschätzung als die Gleichungen (44) und (45) aus [1]) beweisen dagegen, dass das Riegelprofil bzw. der gelochte Zugflansch im Bereich der Zuglaschenverschraubung keineswegs überlastet ist.

Literatur

- [1] DIN 18800-1(11/08): Bemessung und Konstruktion.
- [2] DIN EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [3] DIN EN 1993-1-8:2005: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen. Beuth-Verlag GmbH.
- [4] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H.: Stahlbauten – Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Berlin: Beuth-Verlag GmbH 1998.
- [5] Rubin, H.: Interaktionsbeziehungen zwischen Biegemoment, Querkraft und Normalkraft für einfachsymmetrische I- und Kasten-Querschnitte bei Biegung um die starke und für doppelsymmetrische I-Querschnitte bei Biegung um die schwache Achse. S. 76–85, Interaktionsbeziehungen für doppelsymmetrische I- und Kasten-Querschnitte bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft. S. 145–151. Interaktionsbeziehungen für doppelsymmetrische I- und Kasten-Querschnitte bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft. S. 174–281, Stahlbau 47 (1978).
- [6] Kindmann, R., Fricke, J.: Grenztragfähigkeiten von I-Querschnitten für beliebige Schnittgrößen. Stahlbau 68 (1999), Heft 4, S. 290–301.
- [7] Petersen, C.: Stahlbau. Braunschweig: Vieweg Verlag 1993.
- [8] Kindmann, R., Stracke M.: Verbindungen im Stahl- und Verbundbau. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 2009.
- [9] Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis. Band 2, Berlin: Bauwerk-Verlag 2005.
- [10] Lohse, W.: Stahlbau 2. Wiesbaden: Verlag B.G. Teubner 2005.
- [11] Rubert, A.: Tragverhalten und Schubnachweis für exzentrische Normalkrafteinleitung. In Vorbereitung.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Achim Rubert,
HAWK HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFT UND KUNST
(University of Applied Sciences and Arts), Hildesheim/Holzminde/
Göttingen, Fachgebiet Baustatik und Stahlbau, Haarmannplatz 3,
37603 Holzminde, rubert@hawk-hhg.de

M.Eng. Steffen Schäfer, Friedrichstraße 5, 34385 Bad Karlshafen,
steffen.schaefer@ing-buero-kubat.de