

Übersicht

Stahlträger mit großen Stegöffnungen bezeichnen I/H-Profile aus Stahl oder Stahlverbund, die durch gezielte Aussparungen im Steg ästhetische Vorteile bieten, das Gewicht reduzieren, den CO₂-Fußabdruck senken und die Integration von Installationen wie Leitungen, Rohren und Kabelkanälen ermöglichen (siehe Bild 1). Um die Tragfähigkeit und Stabilität dieser Konstruktionselemente sicherzustellen, ist eine sorgfältige statische Berechnung unerlässlich. Dabei müssen insbesondere die lokalen Spannungen und Scherspannungen im Bereich der Öffnungen sowie deren Einfluss auf das globale Tragverhalten des Tragwerkes berücksichtigt werden [1, 2]. Stahlträger mit großen Stegöffnungen finden breite Anwendung in modernen Baukonstruktionen, wie beispielsweise in Gebäuden, Brücken und Infrastrukturprojekten.



Bild 1 - Stahlträger mit großflächigen Stegöffnungen: Optimierte Leichtbaukonstruktion für die Integration von Gebäudetechnik (links) und die Erfüllung hoher architektonischer Ansprüche (rechts)

Herstellung, Geometrie und Typen von Stegöffnungen

Stahlträger mit großen Stegöffnungen werden i. d. R. durch zwei Fertigungsverfahren hergestellt:

- **Schneiden:** Der Steg eines vollwandigen Stahlprofils (warmgewalzt oder geschweißt) wird an den gewünschten Stellen geschnitten, um die Öffnungen zu erzeugen;
- **Längstrennung und Schweißen:** Ein warmgewalzter Stahlprofil wird längs in zwei Teile getrennt und anschließend mit den gewünschten Öffnungen wieder zusammengeschweißt.

Stegöffnungen sind Durchbrüche im Steg eines Stahlträgers, die unterschiedlichen Formen vorweisen können (siehe Bild 2). Typische Öffnungsformen und -größen sind:

- **Kreisförmige Öffnungen** – Diese sind am einfachsten herzustellen und verursachen die geringsten Lokalspannungen im Stahlträger. Um die Tragfähigkeit nicht zu gefährden, sollte der Durchmesser der Öffnung im Verhältnis zur Höhe des Stegs begrenzt werden;
- **Rechteckige Öffnungen** – Sie ermöglichen größere Durchbrüche, jedoch treten an den Öffnungsecken signifikante Spannungskonzentrationen auf. Um die Tragfähigkeit zu gewährleisten, sind häufig lokale Versteifungen notwendig;
- **Elliptische (hexagonale) Öffnungen** – Diese bieten einen guten Kompromiss zwischen Materialeinsparung und Tragfähigkeit. Durch ihre Form reduzieren sie die Spannungskonzentrationen im Vergleich zu rechteckigen Öffnungen und ermöglichen größere Öffnungen als kreisförmige Öffnungen.

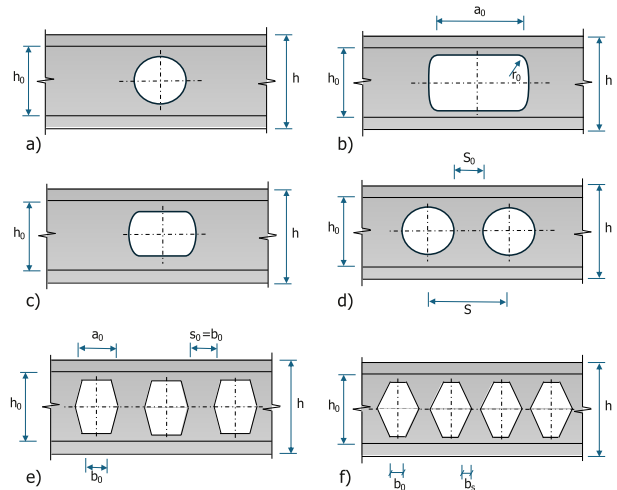


Bild 2 - Verschiedene Arten/Formen von Stegöffnungen in Stahlträgern nach [3]: a) runde (b) rechteckige (c) längliche (elliptische) (d) nah beieinanderliegende runde (e) nah beieinanderliegende hexagonale, (f) nah beieinanderliegende sinusförmige

Positionierung der Stegöffnungen

Um eine optimale Ausnutzung des Materials und eine sichere Tragfunktion zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Positionierung von Stegöffnungen in Stahlträgern erforderlich. Hierbei sind die folgenden Grundsätze zu beachten:

- **Fernhaltung von Auflagern:** Aufgrund der am größten wirkenden Querkkräfte sollten Stegöffnungen möglichst weit von den Auflagern entfernt angeordnet werden;
- **Vermeidung von Spannungskonzentration:** Ecken und Kanten an den Stegöffnungen können zu einer lokalen Erhöhung der Spannungen führen, wobei die Radien an den Stegausschnitten diese Spannungsspitzen reduzieren können;
- **Symmetrische Anordnung:** Eine symmetrische Anordnung der Stegöffnungen kann zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Spannungen führen;
- **Ausnutzung von Bereichen mit geringen Spannungen:** Stegausschnitten sollten möglichst in Bereichen mit geringen Biegemomenten und Schubspannungen angeordnet werden;
- **Zusätzliche Aussteifungen:** In Bereichen mit großen Öffnungen und hohen Belastungen besteht die Gefahr eines lokalen Stabilitätsverlustes. Um dies zu vermeiden, werden i. d. R. zusätzliche Aussteifungen vorgesehen, die die Biege- und die Schubspannung im Bereich der Öffnung reduzieren.

Die optimale Positionierung von Stegöffnungen in einem Stahlprofil, das als Tragwerkelement dient, setzt eine detaillierte Betrachtung zahlreicher Einflussfaktoren voraus. Besonders relevant sind dabei die Art und Intensität der auftretenden Lasten, sowohl statische als auch dynamische, die Spannweite der Tragwerkelemente, die spezifische Querschnittsgeometrie des Stahlträgers sowie die gegebenen Randbedingungen des Tragelements.

Grundlagen der Tragwerksplanung

Die Querschnittsreduktion durch Stegöffnungen in Stahlträgern führt zu einer lokalen Schwächung und einer komplexeren Spannungsverteilung. Besonders kritisch sind die hohen Spannungskonzentrationen an den Rändern der Öffnung. Zudem können erhöhte Durchbiegungen und Verdrehungen auftreten, insbesondere bei langen und dünnwandigen Profilen. Für eine sichere Bemessung und Konstruktion solcher Träger sind daher neben den allgemeinen Anforderungen (DIN EN 1990 [4], DIN EN 1991 [5]) und den spezifischen Bemessungsregeln für Stahlbauten (DIN EN 1993-1-1 [6], DIN EN 1993-1-5 [7], DIN EN 1993-1-2 [8]) die zusätzlichen Bemessungsregeln der E DIN EN 1993-1-13 [3] zu berücksichtigen.

Bemessungsmethoden

Für eine sichere und effektive Bemessung von Stahlträgern mit großen Stegöffnungen sind verschiedene Methoden zur Verfügung. Diese Methoden müssen insbesondere den Einfluss der Stegöffnungen auf das Tragverhalten, die Lastverteilung und die strukturelle Integrität des Trägers berücksichtigen. Zu den wichtigsten Bemessungsmethoden zählen:

- Analytische Methode (z.B. Handrechnungen nach Normen);
- Finite-Elemente-Methode (z.B. lineare und nichtlineare Analysen, Modellierung von Spannungsverteilungen);
- (Semi-)Empirische Methode (z.B. Vereinfachte Formeln, Trägerkataloge, Tabellenwerke).

Bei der Bemessung von Stahlträgern mit großen Stegausschnitten greifen Tragwerksplaner i. d. R. auf analytische Berechnungen nach nationalen und europäischen Normen (z.B. [3]) sowie Richtlinien zurück. Diese Vorgehensweise ist insbesondere bei Standardfällen sinnvoll. Für komplexere Bauteile wie Träger mit variablem Querschnitt oder gekrümmter Achse sind die analytischen Lösungsansätze jedoch häufig begrenzt. Hierfür kommen häufig numerische Berechnungsmethoden zum Einsatz.

Bemessung der Stahlträger mit großen Stegöffnungen

Bei der Bemessung von Stahlträgern mit großen Stegöffnungen müssen sowohl die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) als auch die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG) berücksichtigt werden, um die Tragsicherheit und Funktionalität der Konstruktion unter verschiedenen Belastungen sicherzustellen. Neben den allgemeinen Bemessungsregeln nach DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-5 sind für Stahlträger mit großen Stegöffnungen gemäß E DIN EN 1993-1-13 [3] zusätzliche Nachweise für beide Grenzzustände erforderlich. Insbesondere sind an den Stegöffnungen folgende Nachweise der GZT durchzuführen:

- globale Momententragfähigkeit (siehe Bild 3: II);
- Querkraftbeanspruchbarkeit (siehe Bild 3: I, III, VIII);
- kombinierte Vierendeel-Momententragfähigkeit der T-Stücke (siehe Bild 3: III);
- Stabilität des T-Stücks unter Druckbeanspruchung (siehe Bild 3: IV, V, VII);
- Beanspruchung von Stegpfosten durch Querkraft, Biegung und Biegeknicken (siehe Bild 3: V).

Hierbei ist zwischen den dicht und weit auseinanderliegenden Stegöffnungen zu unterscheiden (siehe Bild 3: V, IV).

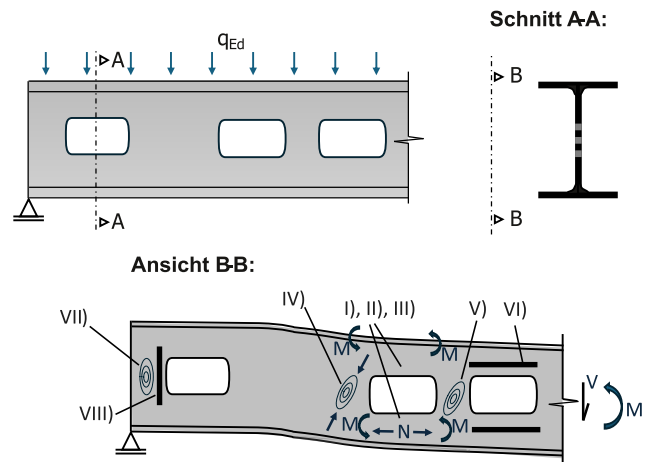


Bild 3 - Zusätzliche Nachweise für die Bemessung von Stahlträgern mit großen Stegöffnungen nach E DIN EN 1993-1-13

Neben den genannten Nachweisen sind bei Stahlträgern mit großen Stegöffnungen folgende zusätzliche Nachweise der GZT erforderlich:

- Biegedrillknicken (siehe Bild 3: V);
- zusätzliche Durchbiegungen, verursacht durch die Öffnungen (siehe Bild 3: II);
- Nachweise an Anschlüssen und Lasteinleitungspunkten an oder nahe den Öffnungen (IV);
- Nachweise zur Vermeidung von Brüchen bei zwei verschweißten T-Stücken.

Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen an Stahlbauten gemäß DIN EN 1990 – insbesondere der Begrenzung von Verformungen, Verschiebungen und Schwingungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – sind bei Stahlträgern mit großen Stegöffnungen besondere Nachweise zur Beurteilung der durch die Öffnungen verursachten zusätzlichen Biege- und Schubverformungen erforderlich. Um die gesamte zusätzliche Durchbiegung infolge einer oder mehrerer Öffnungen, insbesondere im Bereich der maximalen Biegemomente (häufig in Trägermitte), zu ermitteln, können elastische Berechnungsmodelle, wie z.B. Vierendeel-Träger-Modelle, eingesetzt werden. Dabei ist insbesondere auf die Wechselwirkung zwischen den Öffnungen und dem umgebenden Tragwerk zu achten.

In Fällen, in denen die Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und/oder den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) nicht erbracht werden, können u.a. folgende verstärkende Maßnahmen in Betracht gezogen werden:

- Reduzierung der Öffnungsabmessungen, Vergrößerung der Abstände zwischen den Öffnungen oder Anpassung der Öffnungsform;
- Erhöhung der Steifigkeit: Einbau von Längs- und/oder Quersteifen (vgl. Bild 3: VI, VIII), Verwendung höherfester Stähle (vgl. Bild 3: VI), Anbringen von Verstärkungsrippen, Verschließen von Ausschnitten (vgl. Bild 4: I) sowie Verstärkung des Öffnungsrandes (vgl. Bild 4: II);
- Erhöhung der Querschnittsfläche: Verstärkung des Stegs oder des gesamten Profils durch Erhöhung der Dicke.

Eine detaillierte Darstellung der Bemessungsverfahren für diese Trägertypen ist im Anhang zu finden.

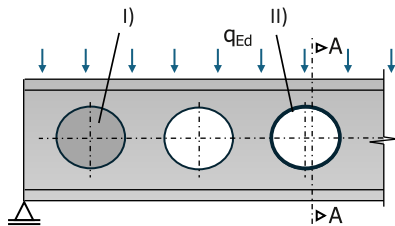
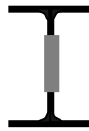


Bild 4 - Verstärkungsmaßnahmen: I) Verschließen der Öffnung(en); II) Verstärkung des Öffnungsrandes, z. B. durch das Einschweißen eines Rings entlang des Randes.

Schnitt A-A:



Fertigung

Große Stegöffnungen in Stahlträgern werden i.d.R. durch zwei Verfahren hergestellt: (i) Schneiden, oder (ii) Längstrennung und Schweißen. Hierzu ist ein hochpräzises und effizientes Fertigungsverfahren anzuwenden. Während früher thermisches Schneiden und Fräsen üblich waren, bieten moderne Methoden wie Laserschneiden höhere Präzision und Flexibilität. Laserschneiden ermöglicht komplexe Geometrien mit engen Toleranzen und reduziert thermische Belastungen, wodurch Verzug, Spannungskonzentrationen und Rissbildung minimiert werden. Weitere Verfahren wie Wasserstrahl- und Plasmaschneiden sowie mechanisches Stanzen kommen je nach Öffnungsgröße, Materialdicke und Toleranzanforderungen zum Einsatz.

Transport- und Montagehinweise

Beim Transport und der Montage der Stahlträger ist besonders darauf zu achten, dass die Stegöffnungen nicht zusätzlichen Belastungen ausgesetzt werden, die zu ungewollten Verformungen oder Beschädigungen führen könnten. Während der Montage ist sicherzustellen, dass die Stahlträger ordnungsgemäß abgestützt werden, um ungewollte Biegespannungen zu vermeiden.

Regelmäßige Inspektionen

Stahlträger mit großen Stegöffnungen unterliegen aufgrund ihrer komplexen Geometrie und der hohen Beanspruchung der Öffnungsbereiche einer erhöhten Anfälligkeit für Schäden. Regelmäßige Inspektionen sind daher unerlässlich, um frühzeitig Risse, Korrosion, Abplatzungen, Verformungen oder andere Schädigungen zu erkennen und entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen einzuleiten.

Besondere Aufmerksamkeit gilt den Schweißnähten, den Öffnungen selbst sowie den umliegenden Bereichen. Hierbei sind visuelle Inspektionen durchzuführen, wobei auf Anomalien wie Unterbrechungen der Kontinuität, Farbveränderungen, Ausbrüche oder Abweichungen von den Sollmaßen zu achten ist.

Zur genaueren Untersuchung können zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Ultraschallprüfung zur Detektion innerer Risse oder die Magnetpulverprüfung zur Anzeige oberflächennaher Risse eingesetzt werden. Die Wahl des geeigneten Prüfverfahrens richtet sich nach der Art des zu erwartenden Schadensbildes und den spezifischen Anforderungen der Konstruktion.

Maßnahmen bei Schäden

Bei Feststellung von Schäden an Stahlträgern mit großen Stegöffnungen sind unverzüglich geeignete Instandsetzungsmaßnahmen einzuleiten, um die statische Sicherheit der Konstruktion zu gewährleisten. Die Art und der Umfang der erforderlichen Maßnahmen richten sich nach der Schwere und der Ausdehnung des Schadensbildes. Kleinere Risse oder oberflächliche Korrosion können häufig durch lokale Reparaturen, wie z.B. das Ausschneiden und Ersetzen betroffener Bereiche, behoben werden.

Bei größeren Schäden oder einer Beeinträchtigung tragender Bauteile ist i. d. R. eine statische Neuberechnung erforderlich, um die Tragfähigkeit und Stabilität des Stahlträgers und somit das gesamte Konstruktionsverhalten sicherzustellen. Mögliche Instandsetzungsmaßnahmen umfassen das Anbringen von Verstärkungsprofilen oder das Verschweißen von Verstärkungsplatten. In schwerwiegenden Fällen, bei denen die Tragfähigkeit des Trägers nachhaltig gefährdet ist, kann ein Austausch des Bauteils unumgänglich sein.

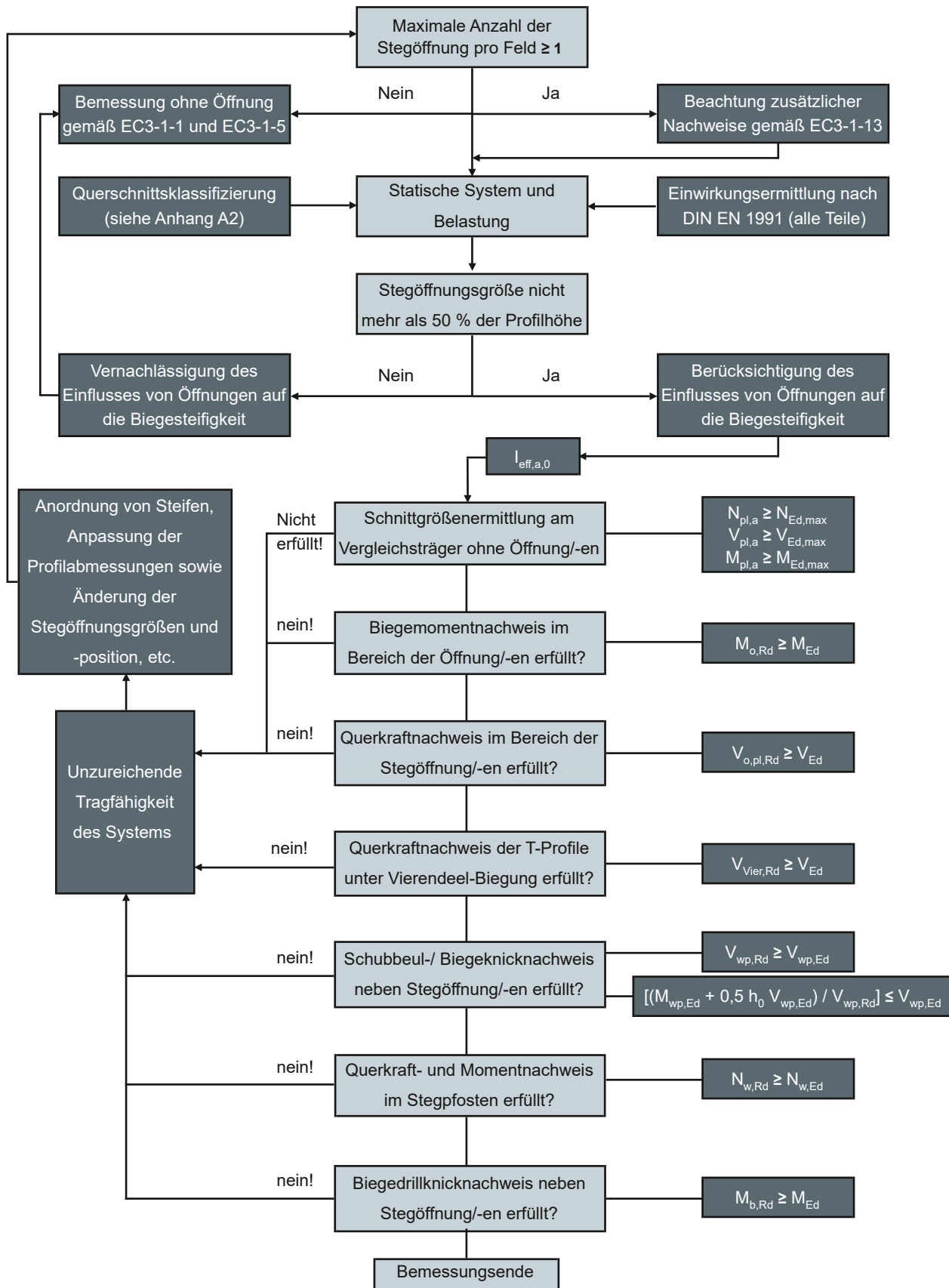
Die Wahl der optimalen Instandsetzungsmaßnahme sollte stets in enger Abstimmung mit einem qualifizierten Statiker erfolgen. Dieser kann anhand einer detaillierten Schadensanalyse die erforderlichen Maßnahmen festlegen und die statische Sicherheit der reparierten Konstruktion nachweisen.

Literatur

- [1] Technische Dokumentation 603: Stahlverbundträger mit großen Stegausschnitten, 3. Auflage, Verlag: Bauen mit Stahl e.V., Düsseldorf, 1998;
- [2] Technische Dokumentation 604: Stahlverbundträger mit großen Stegausschnitten, 3. Auflage, Verlag: Bauen mit Stahl e.V., Düsseldorf, 1998;;
- [3] E DIN EN 1993-1-13:2022-03, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-13: Regeln für Träger mit großen Stegöffnungen; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-13:2022;
- [4] DIN EN 1990:2021-10, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010;
- [5] DIN EN 1991, Einwirkungen auf Tragwerke (verschiedene Teile);
- [6] E DIN EN 1993-1-1:2020-08 - Entwurf, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-1:2020;
- [7] E DIN EN 1993-1-5:2022-03 - Entwurf, Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-5:2022;
- [8] E DIN EN 1993-1-2:2022-03 - Entwurf, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-2:2022.

Anhang A1 - Flussdiagramm zur Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Anhand des folgenden Flussdiagramms lässt sich der Bemessungsprozess für Stahlträger mit großen Öffnungen im Hinblick auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit nachvollziehen. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Bemessung gemäß den Vorgaben und Regeln der einschlägigen Teile von DIN EN 1993 (alle Teile) erfolgt und die spezifischen Anforderungen der Material-, Ausführungs- und Produktnormen berücksichtigt werden.



Anhang A2 - Flussdiagramm zur Querschnittsklassifizierung

Anhand des folgenden Flussdiagramms können die Querschnitte von Flanschen, Stegen, Stegpfosten sowie Stegöffnungen eines Stahlträgers mit großen Stegöffnungen den Klassen 1, 2, 3 oder 4 zugeordnet werden (siehe Bild 5).

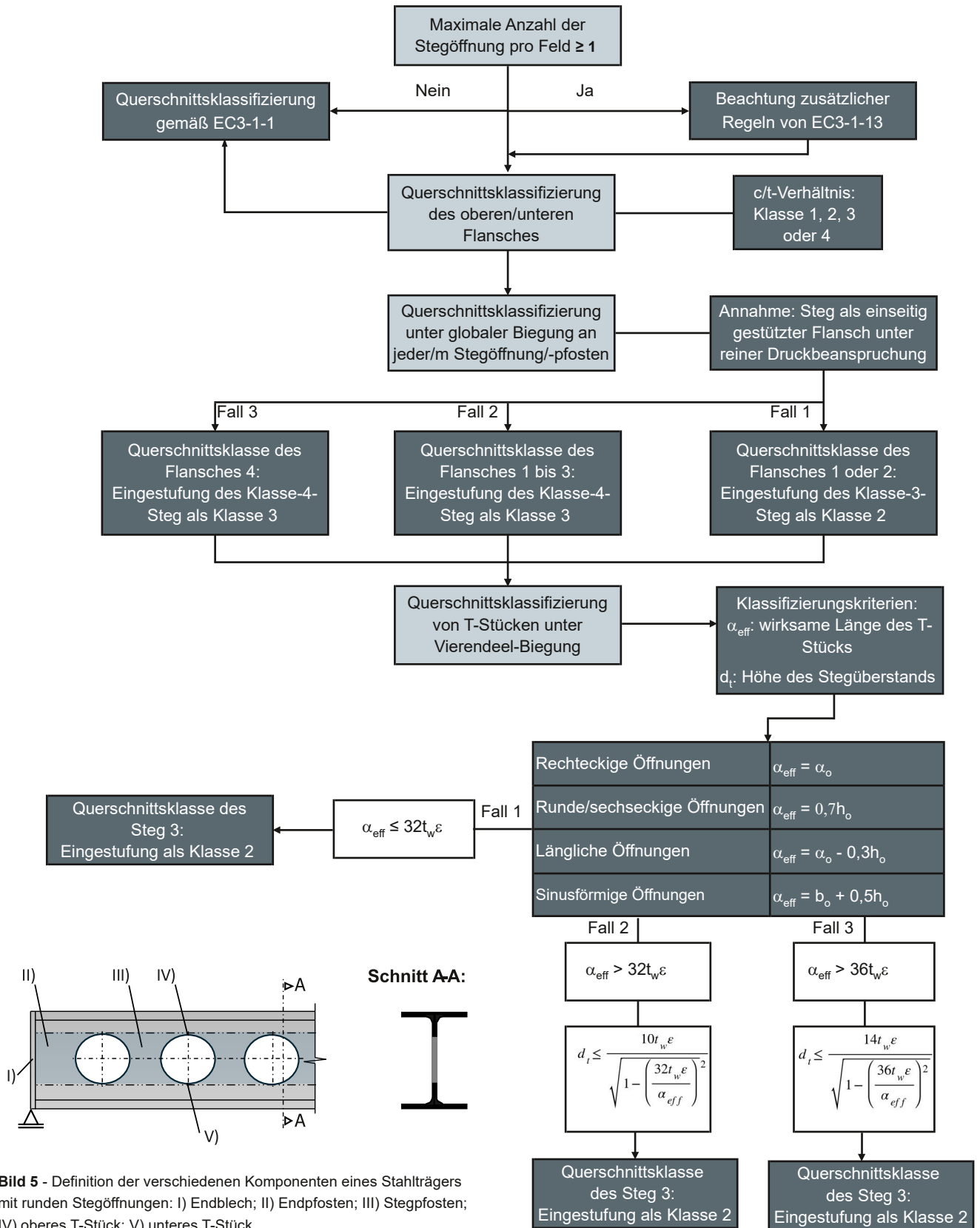


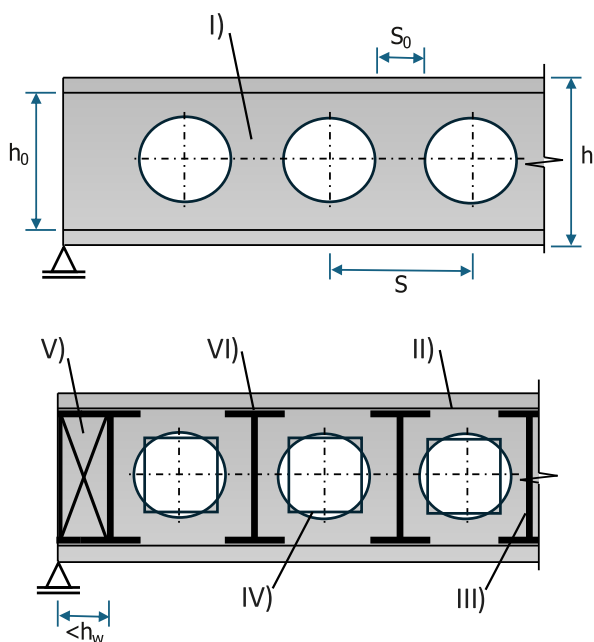
Bild 5 - Definition der verschiedenen Komponenten eines Stahlträgers mit runden Stegöffnungen: I) Endblech; II) Endpfosten; III) Stegpfosten; IV) oberes T-Stück; V) unteres T-Stück.

Anhang A3 - Geometrische Grenzen für (un-)ausgesteifte Stegöffnungen

Um die in der DIN EN 1993-1-13 entwickelten Bemessungsregeln für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) auf Stahlträger mit großen Stegöffnungen anwenden zu können, sind für verschiedene Öffnungsformen Höchstmaße der Stegausschnitte festgelegt (siehe folgende Tabellen und Bild 6). Diese Höchstmaße müssen bereits bei der Entwurfsplanung eines Stahlträgers mit großen Stegöffnungen berücksichtigt werden, um komplizierte Bemessungsprozesse zu vermeiden.

Grenzmaße für unterschiedliche Formen von unausgesteiften Stegöffnungen der Stahlträger					
Form der Stegöffnung	Maximale Höhe der Stegöffnung (h_o)	Maximale Länge der Stegöffnung (α_o)	Mindest-Randabstand (s_o)	Mindesthöhe des Druckbeanspruchtes T-Stück	Mindesthöhe des Zugbeanspruchtes T-Stück
Rund	$0,8h$	-	$0,1h_o$	Max(t_f+r+10 mm; t_f+30 mm)	
Sechseckig	$0,75h$	$1,5h_o$	$0,25h_o$		
Rechteckig	$0,75h$	$2,5h_o$	Max($0,5\alpha_o$; h_o)	Max($\alpha_o/12$; $0,1h$)	$0,1h$
Länglich	$0,8h$	$3h_o$	Max($0,25\alpha_{eff}$; $0,5h_o$)	$\alpha_{eff}/12$	Max(t_f+r+10 mm; t_f+30 mm)
Sinusförmig	$0,8h$	$5h_o$	$0,25h_o$	$\alpha_{eff}/12$	

Grenzmaße für unterschiedliche Formen von ausgesteiften Stegöffnungen der Stahlträger					
Rechteckig	$0,75h$	$3,2h_o$	Max($0,5\alpha_o$; h_o)	Max($\alpha_o/14$; $0,1h$)	$0,1h$
Länglich	$0,8h$	$3,5h_o$	Max($0,25\alpha_{eff}$; $0,5h_o$)	Max($\alpha_{eff}/14$; t_f+50 mm)	t_f+50 mm
Sinusförmig	$0,8h$	$5h_o$	$0,25h_o$		



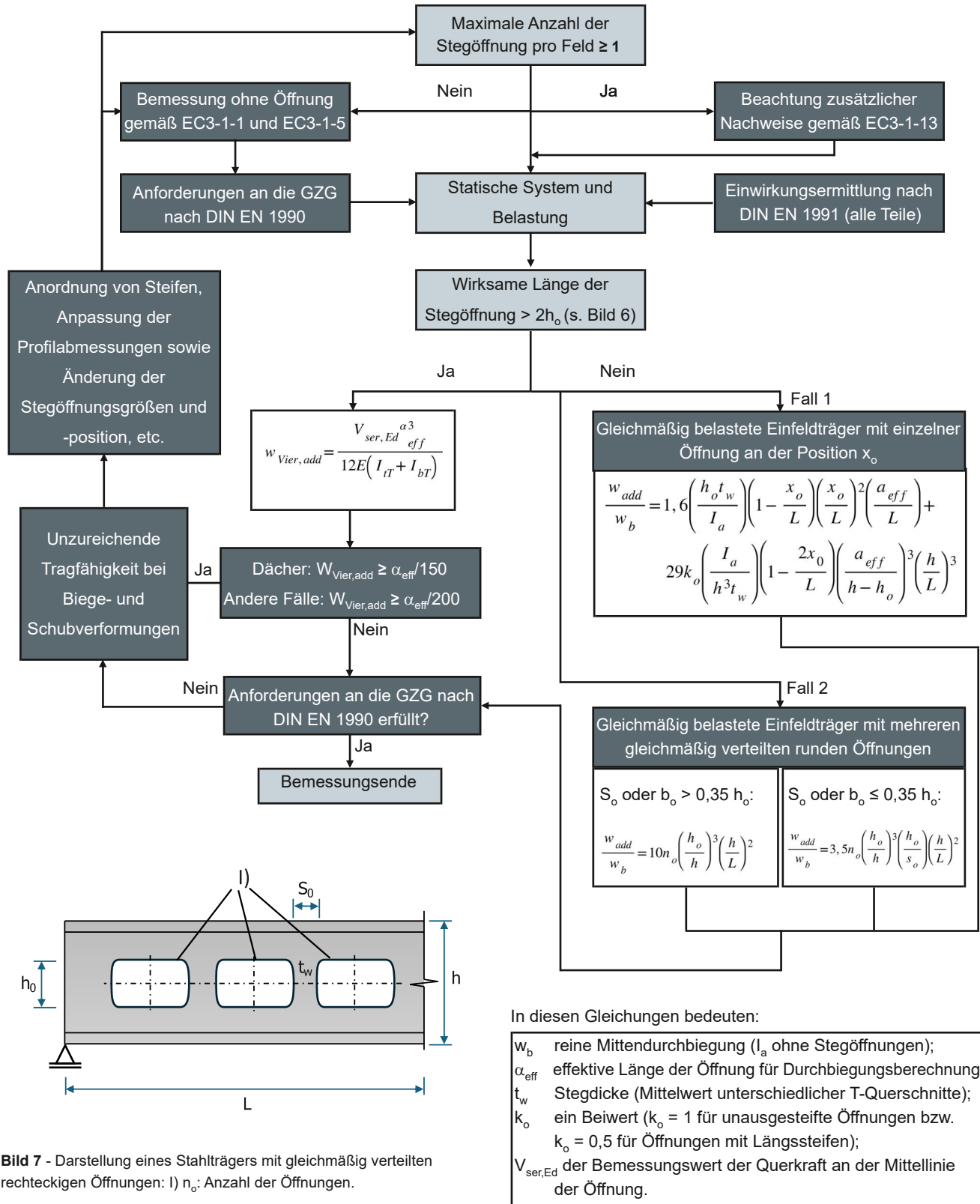
Hinweis:

Falls die Abmessungen der (un-)ausgesteiften Stegöffnungen diese Höchstwerte überschreiten, kann eine aufwändigere Bemessung nach DIN EN 1993-1-14 erfolgen. Diese erfordert jedoch spezielle Kenntnisse in der Durchführung von Finite-Elemente-Berechnungen und der Interpretation der Ergebnisse.

Bild 6 - Darstellung eines Stahlträgers mit gleichmäßig verteilten runden Öffnungen: I) Träger mit gleichmäßig verteilten runden Öffnungen; II) Gurtstab; III) Stegpfosten; IV) äquivalente Öffnung; V) Element ohne Öffnung (diagonale Fläche = $0,5 h_w t_w$); VI) Gurtstab mit erhöhter Steifigkeit.

Flussdiagramm zur Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Große Stegöffnungen in Stahlträgern können zu zusätzlichen Biege- und Schubverformungen führen. Anhand des folgenden Flussdiagramms lässt sich der Bemessungsprozess für Stahlträger mit großen Öffnungen im Hinblick auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachvollziehen. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Bemessung gemäß den Vorgaben und Regeln der einschlägigen Teile von DIN EN 1993 (alle Teile) erfolgt und die spezifischen Anforderungen der Material-, Ausführungs- und Produktnormen berücksichtigt werden.



Arbeitshilfe B.1.7 | Stahlträger mit großen Stegöffnungen

Anwendungsbeispiel - Stahlträger mit weit auseinanderliegenden und eng beieinanderliegenden Stegöffnungen

Zur Bemessung liegt ein Stahlträger mit einer Spannweite von 10 m vor. Der Träger weist eine rechteckige Stegöffnung sowie zwei eng beieinanderliegende runde Öffnungen auf (siehe Bild 8). Der Abstand zwischen den einzelnen Trägern in der Gesamtkonstruktion beträgt 3 m. Das gewählte I-Profil und die Stahlsorte S355 ist in Tabelle 1 aufgeführt.

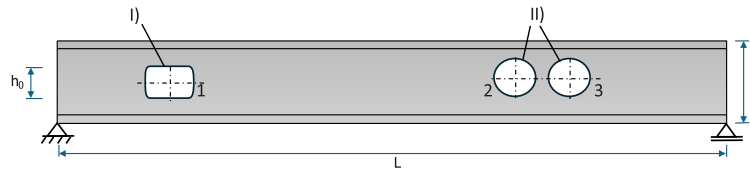


Bild 8 - Aufbau des Stahlträgers mit: I) einer rechteckigen Stegöffnung (links) und II) zwei eng beieinanderliegenden runden Stegöffnungen (rechts).

Basisprofil	IPE450
Stahlsorte	S355
h	450 mm
b _f	190 mm
t _f	14,6 mm
t _w	9,4 mm
r	21 mm

Tabelle 1 - Stahlprofil.

	Typ	Abstand Mittelachse (vom linken Ende des Trägers)	Abmessungen
Öffnung 1	rechteckig	2,95 m	a ₀ = 0,50 m h ₀ = 0,30 m
Öffnung 2	rund	7,60 m	a ₀ = 0,30 m
Öffnung 3	rund	8,05 m	a ₀ = 0,30 m

Tabelle 2 - Beschreibung der Stegöffnungen.

Lastannahmen (ständige und veränderliche Lasten)

Die in den nachfolgenden Tabellen dargestellten Lastannahmen bilden die Grundlage für die statische Berechnung des Stahlbauwerks. Hierbei wurden sowohl die selbstinduzierten Lasten (Eigengewicht) als auch die veränderlichen Lasten (Nutzlast, Schneelast, Windlast, etc.) berücksichtigt:

Ständige Lasten	Last
Eigengewicht des Stahlträgers (3 m Trägerabstand)	0,761 kN/m (0,254 kN/m ²)
Zusätzliche ständige Lasten	2,331 kN/m ²
Summe	g_{ges} = 2,59 kN/m²

Tabelle 3 - Ständige Lasten.

Veränderliche Lasten	Last
Veränderliche Lasten	0,75 kN/m
Summe	q_{ges} = 0,75 kN/m²

Tabelle 4 - Veränderliche Lasten.

Mit $\gamma_g = 1,35$ und $\gamma_q = 1,5$ ergibt sich die Konstruktionslast zu:

$$Q_{ges} = \gamma_g g_{ges} + \gamma_q q_{ges} = 1,35 \cdot 2,59 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 0,75 \text{ kN/m}^2 = 4,62 \text{ kN/m}^2$$

Bemessungsschnittgrößen

Die Schnittgrößen stellen die inneren Kräfte dar, die in einem Bauteil infolge äußerer Einwirkungen auftreten. Im Folgenden werden die Bemessungsschnittgrößen betrachtet, die für die Beurteilung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Trägers von entscheidender Bedeutung sind:

Maximale Querkraft an den Auflagern (siehe Bild 9): $V_{Ed,max} = (Q_{ges} \cdot b) / 2 = 4,62 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} / 2 = 69,30 \text{ kN}$

Maximales Biegemoment in der Feldmitte (siehe Bild 9): $M_{Ed,max} = ((Q_{ges} \cdot b)^2 / 8) = 4,62 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot (10 \text{ m})^2 / 8 = 173,25 \text{ kNm}$

Querkraft an der Mittelachse der Stegöffnung 1 ($x_1 = 2,95 \text{ m}$, siehe Bild 9): $V_{1,Ed} = 28,41 \text{ kN}$

Biegemoment an der Mittelachse der Stegöffnung 1 ($x_1 = 2,95 \text{ m}$, siehe Bild 9): $M_{1,Ed} = 144,13 \text{ kNm}$

Querkraft an der Mittelachse der Stegöffnung 2 ($x_2 = 7,60 \text{ m}$, siehe Bild 9): $V_{2,Ed} = 36,04 \text{ kN}$

Biegemoment an der Mittelachse der Stegöffnung 2 ($x_2 = 7,60 \text{ m}$, siehe Bild 9): $M_{2,Ed} = 126,40 \text{ kNm}$

Querkraft an der Mittelachse der Stegöffnung 3 ($x_3 = 8,05 \text{ m}$, siehe Bild 9): $V_{3,Ed} = 42,27 \text{ kN}$

Biegemoment an der Mittelachse der Stegöffnung 3 ($x_3 = 8,05 \text{ m}$, siehe Bild 9): $M_{3,Ed} = 108,78 \text{ kNm}$

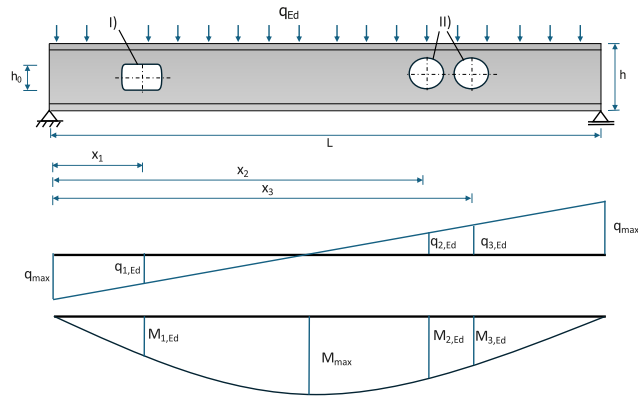


Bild 9 - Querkraft- und Biegemomentverlauf eines Stahlträgers mit: I) einer rechteckigen Stegöffnung (links) und II) zwei eng beieinanderliegende runde Stegöffnungen (rechts).

Nachweise - Stahlträger ohne Stegöffnungen :

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise erbracht:

- Momentbeanspruchbarkeit des Stahlträgers ohne Stegöffnungen;
- Querkraftbeanspruchbarkeit des Stahlträgers ohne Stegöffnungen.

Bemessungswert der vollplastischen Normaltragfähigkeit des Stahlträgers nach DIN EN 1993-1-1:

$$N_{pl,a} = (A_a \cdot f_y) / \gamma_{M0} = 98,8 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0 = 3508 \text{ kN}$$

Querschnittsklasse des Stahlträgers unter reiner Biegung nach DIN EN 1993-1-1: Klasse 1 mit $M_{pl,Rd} = 939 \text{ kNm}$

Nachweis der Momententragfähigkeit in der Mitte des Trägers (voller Querschnitt ohne Stegöffnungen):

$$M_{Ed,max} / M_{pl,Rd} = 173,25 \text{ kNm} / 939 \text{ kNm} = 0,18 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers nach DIN EN 1993-1-1:

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / 3^{0,5}) / \gamma_{M0} = 50,8 \text{ cm}^2 \cdot (35,5 \text{ kN/cm}^2 / 3^{0,5}) / 1,0 = 1043 \text{ kN}$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit an den Auflagern des Stahlträgers (Vollquerschnitt ohne Stegöffnungen):

$$V_{Ed,max} / V_{pl,Rd} = 69,30 \text{ kN} / 1043 \text{ kN} = 0,07 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Die Bemessung des Vollquerschnitts hat gezeigt, dass dieser die maximalen auftretenden Momente und Querkraft sicher aufnehmen kann. Im nächsten Schritt wird untersucht, inwieweit die Stegöffnungen die Tragfähigkeit des Trägers beeinflussen, indem die Nachweise für den geschwächten Querschnitt durchgeführt werden.

Nachweise - Stahlträger mit weit voneinander liegenden Stegöffnungen (rechteckige Stegöffnung)

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise erbracht:

- Momentbeanspruchbarkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnungen;
- Querkraftbeanspruchbarkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnungen;
- Querkraftbeanspruchbarkeit der T-Profile unter Vierendeel-Biegung;
- Stegbeulen/Biegeknicken des Stags neben weit auseinanderliegenden Stegöffnungen.

Momententragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der rechteckigen Stegöffnung (Bild 10, I)

Der Nachweis der Biegemomenttragfähigkeit des Stahlträgers an der Stegöffnung 1 wird gemäß DIN EN 1993-1-13 für einen einseitig gelagerten Steg (im oberen T-Profil) unter reiner Druckbelastung wie folgt geführt:

Momententragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnung 1:

$$M_{o,Rd} = M_{o,pl,Rd} = (h - z_b - z_t) \cdot \min(A_{bT} f_{y,bT}; A_{tT} f_{y,tT}) / \gamma_{M0} = (45 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm}) \cdot \min(35,31 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2; 35,31 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2) / 1,0 = 529 \text{ kNm}$$

Arbeitshilfe B.1.7 | Stahlträger mit großen Stegöffnungen

Nachweis der Momententragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnung 1:

$$M_{1,Ed,max} / M_{o,pl,Rd} = 144 \text{ kNm} / 529 \text{ kNm} = 0,27 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Nachweis der Stabilität des gedrückten T-Profils bei langer Stegöffnung, falls die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$a_{eff} \geq 6 h_t \cdot \varepsilon \cdot (M_{o,pl,Rd} / M_{1,Ed})^{0,5}$$

$$50 \text{ cm} < 6 \cdot 7,5 \text{ cm} \cdot 0,814 \cdot (529 \text{ kNm} / 144 \text{ kNm})^{0,5} = 70,2 \quad \text{Stabilitäts-/Biegeknicknachweis nicht erforderlich!}$$

Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der rechteckigen Stegöffnung (siehe Bild 10, II)

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnung wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnung 1:

$$V_{opl,Rd} = V_{pl,Rd,b} + V_{pl,Rd,t} = 2 A_{VT} \cdot (f_{yd} / 3^{0,5}) / \gamma_{M0} = 2 \cdot 11,31 \text{ cm}^2 \cdot (35,5 \text{ kN/cm}^2 / 3^{0,5}) / 1,0 = 464 \text{ kN}$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnung 1:

$$V_{1,Ed} / V_{pl,Rd} = 28 \text{ kN} / 464 \text{ kN} = 0,06 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Querkrafttragfähigkeit der T-Profile unter Vierendeel-Biegung - Rechteckigen Stegöffnung (siehe Bild 10, III)

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit der T-Profile unter Vierendeelbiegung wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Querschnittsklassifizierung der T-Profile unter Vierendeel-Biegung gemäß DIN EN 1993-1-1 - Oberer Flansch:

$$c = (190 \text{ mm} / 2) - (9,4 \text{ mm} / 2) - 21 \text{ mm} = 69,3 \text{ mm} \quad (\text{mit } t_f = 14,6 \text{ mm})$$

$$c/t = 4,75 < 9 \varepsilon = 7,32 \quad \text{QK1}$$

Querschnittsklassifizierung der T-Profile unter Vierendeel-Biegung gemäß DIN EN 1993-1-1 - Einseitig gestützter Steg:

$$c = (450 \text{ mm} - 300 \text{ mm}) / 2 - 21 \text{ mm} - 14,6 \text{ mm} = 39,4 \text{ mm} \quad (\text{mit } t_w = 9,4 \text{ mm})$$

$$c/t = 4,19 / 9 \cdot \varepsilon = 7,32 \quad \text{QK1}$$

Zusätzliche Betrachtungen hinsichtlich einer günstigeren Einstufung nach DIN EN 1993-1-3 sind nicht erforderlich, da sowohl der Steg als auch der Flansch in die Querschnittsklasse 1 eingestuft sind.

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit von T-Profilen unter Vierendeel-Biegung - Stegöffnung 1:

$$N_{m,Ed} = M_{1,Ed} / (h_a - z_{bT} - z_{iT}) = (144 \cdot 100) \text{ kNm} / (45 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm}) = 342 \text{ kN}$$

$$M_{NV,bT,Rd} = M_{NV,iT,Rd} = 11,71 \text{ kNm} \cdot (1 - (342 \text{ kN} / 1254 \text{ kN})^2) = 8,52 \text{ kN}$$

$$V_{Vier,Rd} = (2 M_{NV,bT,Rd} + 2 M_{NV,iT,Rd}) / a_{eq} = (2 \cdot 8,52 \text{ kNm} + 2 \cdot 8,52 \text{ kNm}) / 0,5 \text{ m} = 68 \text{ kN} \quad (\text{für rechteckige Öffnungen } a_{eff} = a_0)$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit von T-Profilen unter Vierendeel-Biegung - Stegöffnung 1:

$$V_{1,Ed} / V_{Vier,Rd} = 28 \text{ kN} / 68 \text{ kN} = 0,41 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Stegbeulen/Biegeknicken des Stegs neben der rechteckigen Stegöffnung (siehe Bild 10, IV)

Der Stegbeulennachweis neben Stegöffnung 1 (bei weit auseinanderliegenden Stegöffnungen) wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Bestimmung der bezogenen Schlankheit bei rechteckigen Stegöffnungen:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_{wp} = 3,5 h_0 / t_w \lambda_1 = (3,5 \cdot 30 \text{ cm}) / (0,94 \text{ cm} \cdot 76,4) = 1,46$$

Bestimmung des Abminderungsfaktors für das Biegeknicken des Stegpfostens:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{wp} - 0,2) + \bar{\lambda}_{wp}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,46 - 0,2) + 1,46^2] = 1,70$$

$$\chi_{wp} = 1 / [\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}_{wp}^2)^{0,5}] = 1 / [1,70 + (1,70^2 - 1,46^2)^{0,5}] = 0,389 \quad \text{Annahmen: } b_w = 0,5 h_0 \text{ und Knicklinie } a \text{ (d.h. } \alpha = 0,21)$$

Bemessungswert der Biegeknicktragfähigkeit des Stegs neben der rechteckigen Öffnung:

$$N_{1,w,Rd} = \chi_{wp} \cdot b_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,389 \cdot 15 \text{ cm} \cdot 0,94 \text{ cm} \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,1 = 177 \text{ kN}$$

Normalkraft neben Stegöffnung 1 (oberes und unteres T-Profil symmetrisch):

$$N_{1,w,Ed} = V_{b,Ed} = V_{t,Ed} = 0,5 V_{Ed} = 0,5 \cdot 28 \text{ kN} = 14 \text{ kN}$$

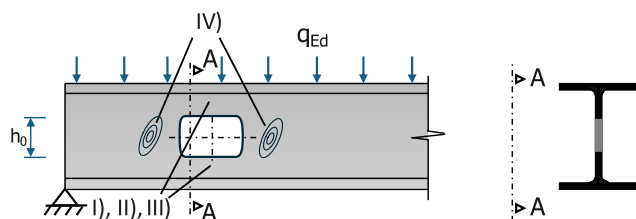


Bild 10 - Zusätzliche Nachweise für die Bemessung von Stahlträgern mit weit voneinander liegenden Stegöffnungen nach DIN EN 1993-1-13.

Nachweise - Stahlträger mit dicht beieinanderliegenden Stegöffnungen (runde Stegöffnungen):

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise erbracht:

- Momentbeanspruchbarkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnungen;
- Querkraftbeanspruchbarkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnungen;
- Querkraftbeanspruchbarkeit der T-Profile unter Vierendeel-Biegung;
- Querkraft- und Momentenbeanspruchbarkeit zwischen zwei dicht beieinanderliegenden Stegöffnungen;
- Stegbeulen/Biegeknicken des Stags neben weit auseinanderliegenden Stegöffnungen;
- Biegeknicken des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden Stegöffnungen.

Momententragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der runden Stegöffnungen

Der Nachweis der Biegemomententragfähigkeit des Stahlträgers an den Stegöffnungen 2 und 3 wird gemäß DIN EN 1993-1-13 für einen einseitig gelagerten Steg (im oberen T-Profil) unter reiner Druckbelastung wie folgt geführt:

Momententragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnung 2 (kritischste Öffnung):

$$M_{o,Rd} = M_{o,pl,Rd} = (h - z_b - z_t) \cdot \min(A_{bT} f_{y,bT}; A_{tT} f_{y,tT}) / \gamma_{M0} \\ = (45 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm} - 1,4 \text{ cm}) \cdot \min(35,31 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2; 35,31 \text{ cm}^2 \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2) / 1,0 = 529 \text{ kNm}$$

Nachweis der Momententragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnungen 2 (kritischste Öffnung):

$$M_{2,Ed,max} / M_{o,pl,Rd} = 126 \text{ kNm} / 529 \text{ kNm} = 0,24 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Stabilitäts-/Biegeknicknachweis nicht erforderlich (wie Stegöffnung 1)!

Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der runden Stegöffnungen

Der Nachweis der Quertragfähigkeit des Stahlträgers an der Position der Stegöffnung wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnung 3 (kritischste Öffnung):

$$V_{opl,Rd} = V_{pl,Rd,b} + V_{pl,Rd,t} = 2 A_{vT} \cdot (f_{yd} / 3^{0,5}) / \gamma_{M0} = 2 \cdot 11,31 \text{ cm}^2 \cdot (35,5 \text{ kN/cm}^2 / 3^{0,5}) / 1,0 = 464 \text{ kN}$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers im Bereich der Stegöffnung 3 (kritischste Öffnung):

$$V_{3,Ed} / V_{pl,Rd} = 42 \text{ kN} / 464 \text{ kN} = 0,09 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Querkrafttragfähigkeit der T-Profile unter Vierendeel-Biegung - Runde Stegöffnungen

Nachweis der Quertragfähigkeit der T-Profile unter Vierendeelbiegung wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Zusätzliche Betrachtungen hinsichtlich einer günstigeren Einstufung nach DIN EN 1993-1-3 sind nicht erforderlich, da sowohl der Steg als auch der Flansch in die Querschnittsklasse 1 eingestuft sind.

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit von T-Profilen unter Vierendeel-Biegung - Stegöffnung 3 (kritischste Öffnung):

$$N_{m,Ed} = M_{3,Ed} / (h_a - z_{bT} - z_{tT}) = (109 \cdot 100) \text{ kNm} / (45 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm}) = 262 \text{ kN}$$

$$M_{NV,bT,Rd} = M_{NV,tT,Rd} = 15,36 \text{ kNm} \cdot (1 - (262 \text{ kN} / 1304 \text{ kN})^2) = 12,27 \text{ kNm}$$

$$V_{Vier,Rd} = (2 M_{NV,bT,Rd} + 2 M_{NV,tT,Rd}) / a_{eq} = (2 \cdot 12,27 \text{ kNm} + 2 \cdot 12,27 \text{ kNm}) / (0,45 \cdot 0,30 \text{ m}) = 364 \text{ kN} \quad \text{(für runde Öffnungen: } a_{eq} = 0,45 \cdot h_0, h_{eq} = 0,9 h_0)$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit von T-Profilen unter Vierendeel-Biegung - Stegöffnung 3 (kritischste Öffnung):

$$V_{3,Ed} / V_{Vier,Rd} = 42 \text{ kN} / 364 \text{ kN} = 0,11 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Querkraft- und Momententragfähigkeit zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen

Der Nachweis der Querkraft- und Momententragfähigkeit zwischen den dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen 2 und 3 wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt (siehe Bild 11):

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit des Stegpfostens:

$$V_{wp,Rd} = 2 s_o \cdot \min(t_{w,tT} \cdot f_{y,tT}; t_{w,bT} \cdot f_{y,bT}) / (3^{0,5} \cdot \gamma_{M0}) = 15 \text{ cm} \cdot 0,94 \text{ cm} \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2 / (3^{0,5} \cdot 1,0) = 289 \text{ kN}$$

$$V_{wp,Ed} = \Delta N_{Ed,b} = \Delta N_{Ed,t}$$

$$\Delta N_{Ed,b} = \Delta N_{Ed,t} = I N_{m,Ed,left} - N_{m,Ed,right}$$

$$N_{m,Ed,right} = M_{3,Ed} / (h_a - z_{bT} - z_{iT}) \\ = (109 \cdot 100) \text{ kNcm} / (45 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm}) = 262 \text{ kN}$$

$$N_{m,Ed,left} = M_{2,Ed} / (h_a - z_{bT} - z_{iT}) \\ = (126 \cdot 100) \text{ kNcm} / (45 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm} - 1,66 \text{ cm}) = 302 \text{ kN}$$

$$\Delta N_{Ed,b} = \Delta N_{Ed,t} = 302 - 262 = 40 \text{ kN} \quad (V_{wp,Ed} = 40 \text{ kN})$$

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Stegpfostens zwischen den beiden runden Stegöffnungen:

$$V_{wp,Ed} / V_{wp,Rd} = 40 \text{ kN} / 289 \text{ kN} = 0,14 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Hinweis: Bei symmetrischen Stegausschnitten tritt im Stegpfosten kein Biegemoment in der Ebene auf. Der Nachweis erfolgt für runde Ausschnitte an der Stelle minimaler Stegbreite, für rechteckige Ausschnitte am Übergang zum T-Stück. Der Nachweis wird wie folgt geführt:

$$M_{wp,Ed} + 0,5 h_0 V_{wp,Ed} / M_{wp,Rd}$$

Stegbeulen/Biegeknicken des Stegs neben weit auseinanderliegenden runden Stegöffnungen

Der Nachweis sollte an der kritischsten Stelle – hier an dem rechten Ende der Stegöffnung 3 – geführt werden. Da dieser im Wesentlichen dem Nachweis für rechteckige Öffnungen entspricht, wird er hier nicht detailliert aufgeführt. Es ist jedoch auf die Ermittlung der bezogenen Schlankheit hinzuweisen, die sich von derjenigen für rechteckige Öffnungen unterscheidet.

$$\bar{\lambda}_{wp} = 2,4 h_0 / t_w \lambda_1$$

Biegeknicken des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen

Der Nachweis des Biegeknickens des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen wird gemäß DIN EN 1993-1-13 wie folgt geführt:

Bestimmung der bezogenen Schlankheit bei runden Stegöffnungen:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_{wp} = 1,75 (s_o^2 + h_o^2)^{0,5} / t_w \lambda_1 \\ = 1,75 (15^2 \text{ cm}^2 + 30^2 \text{ cm}^2)^{0,5} / (0,94 \text{ cm} \cdot 76,4) = 0,817$$

$$0,817 < 2,4 \cdot h_0 / t_w \lambda_1 = 2,4 \cdot 30 \text{ cm} / 0,94 \text{ cm} \cdot 76,4 = 1,0$$

Bestimmung des Abminderungsfaktors für das Biegeknicken des Stegpfostens:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{wp} - 0,2) + \bar{\lambda}_{wp}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,817 - 0,2) + 0,817^2] = 0,899$$

$$\chi_{wp} = 1 / [\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}_{wp}^2)^{0,5}] = 1 / [0,899 + (0,899^2 - 0,817^2)^{0,5}] = 0,786$$

Annahmen: $b_w = 0,5 h_0$ und Knicklinie a (d.h. $\alpha = 0,21$)

Bemessungswert der Biegeknicktragfähigkeit des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen:

$$N_{wp,Rd} = \chi_{wp} \cdot s_o \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,786 \cdot 15 \text{ cm} \cdot 0,94 \text{ cm} \cdot 35,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,1 = 358 \text{ kN}$$

Nachweis der Biegeknicktragfähigkeit des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen:

$$N_{wp,Ed} = V_{wp,Ed} = 40 \text{ kN} \quad (\text{Dies gilt für Stegpfosten ohne Biegemomentenbeanspruchung})$$

$$N_{wp,Ed} / N_{wp,Rd} = 40 \text{ kN} / 358 \text{ kN} = 0,11 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$

Hinweis: Falls Biegemoment $M_{wp,Ed}$ nicht gleich 0 => Normalkraft im Stegpfosten fürs untere T-Profil $N_{wp,Ed} = N_{wp,Ed} - 2 M_{wp,Ed} / h_o$
=> Normalkraft im Stegpfosten fürs obere T-Profil $N_{wp,Ed} = N_{wp,Ed} + 2 M_{wp,Ed} / h_o$

Biegedrillknicken des Trägers

Für einen Träger mit Stegöffnungen, der seitlich nicht durchgehend am Druckgurt gehalten und auf Biegung um die Hauptachse beansprucht wird, muss im Allgemeinen gemäß DIN EN 1993-1-13 (Kap. 8.12) der Nachweis gegen Biegedrillknickenversagen erbracht werden. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Träger an beiden Enden seitlich gestützt ist, wodurch der Stahlträger in zwei Abschnitte unterteilt werden kann (siehe Bild 13).

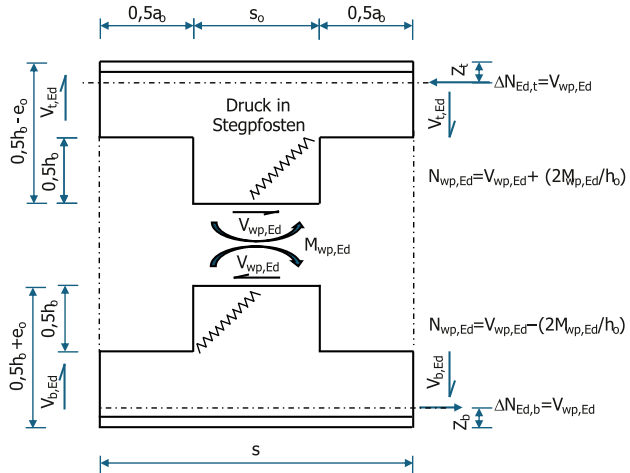


Bild 11 - Querkraft und Moment, die im Stegpfosten aufgrund des Kräftegleichgewichts zwischen den rechteckigen Öffnungen auftreten.

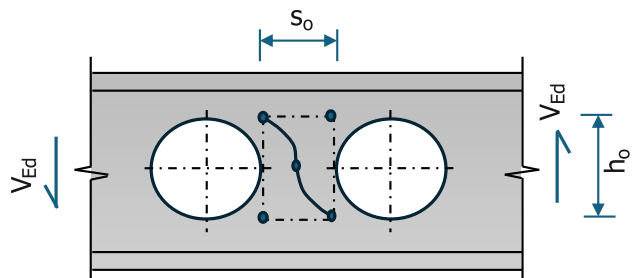


Bild 12 - Modell für das Biegeknicken des Stegpfostens zwischen zwei dicht beieinanderliegenden runden Stegöffnungen.

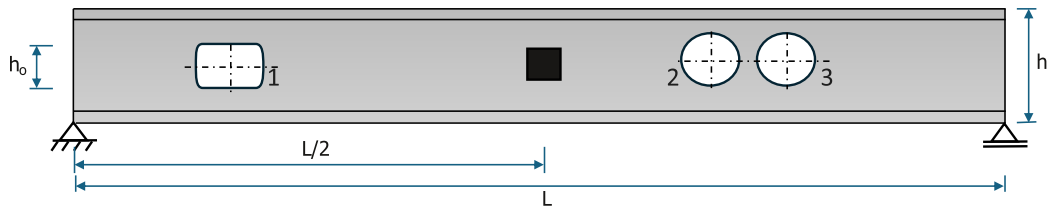


Bild 13 - Stahlträger mit dicht beieinanderliegenden und weit auseinanderliegenden Stegöffnungen sowie seitlicher Halterung in der Feldmitte.

Bestimmung der bezogenen Schlankheit bei runden Stegöffnungen:

$$\bar{\lambda}_{LT} = (M_{Rk} / M_{cr})^{0,5} = (529 \text{ kNm} / 467 \text{ kNm}) = 1,06 \quad (M_{cr} = 467 \text{ kNm nach DIN EN 1993-1-1; } M_{Rk} = 529 \text{ kNm aus vorheriger Berechnung})$$

$$\bar{\lambda}_z = L_{cr} / (i_z \lambda_1) = 500 \text{ cm} / (4,86 \text{ cm} \cdot 76,4) = 1,35 \quad (L_{cr} = 500 \text{ cm als Hälfte der Trägerlänge aufgrund der seitlichen Halterung in der Feldmitte; } \lambda_1 = 76,4 \text{ aus vorheriger Berechnung})$$

Bestimmung des Abminderungsfaktors für das Biegedrillknicken des Stahlträgers

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + f_M \cdot (\bar{\lambda}_{LT} / \bar{\lambda}_z)^2 \cdot \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 \cdot [1 + 1 \cdot ((1,06 / 1,35)^2 \cdot 0,49 \cdot (1,35 - 0,2) + 1,06^2)] = 1,24$$

$$\chi_{LT} = 1 / [\phi_{LT} + (\phi_{LT}^2 - f_M \bar{\lambda}_{LT}^2)^{0,5}] = 1 / [1,24 + (1,24^2 - 1 \cdot 1,06^2)^{0,5}] = 0,53 \quad \text{Annahmen: Knickspannungslinie c (d.h. } \alpha_{LT} = 0,49 \text{)}$$

Bestimmungswert der Biegedrillknicktragfähigkeit des Stahlträgers:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot M_{Rk} / \gamma_{M1} = 0,53 \cdot 529 \text{ kNm} / 1,1 = 255 \text{ kNm}$$

Nachweis der Biegedrillknicktragfähigkeit des Stahlträgers:

$$M_{Ed} / M_{b,Rd} = 173,25 \text{ kNm} / 255 \text{ kNm} = 0,68 < 1,0 \quad \text{Nachweis erfüllt!}$$