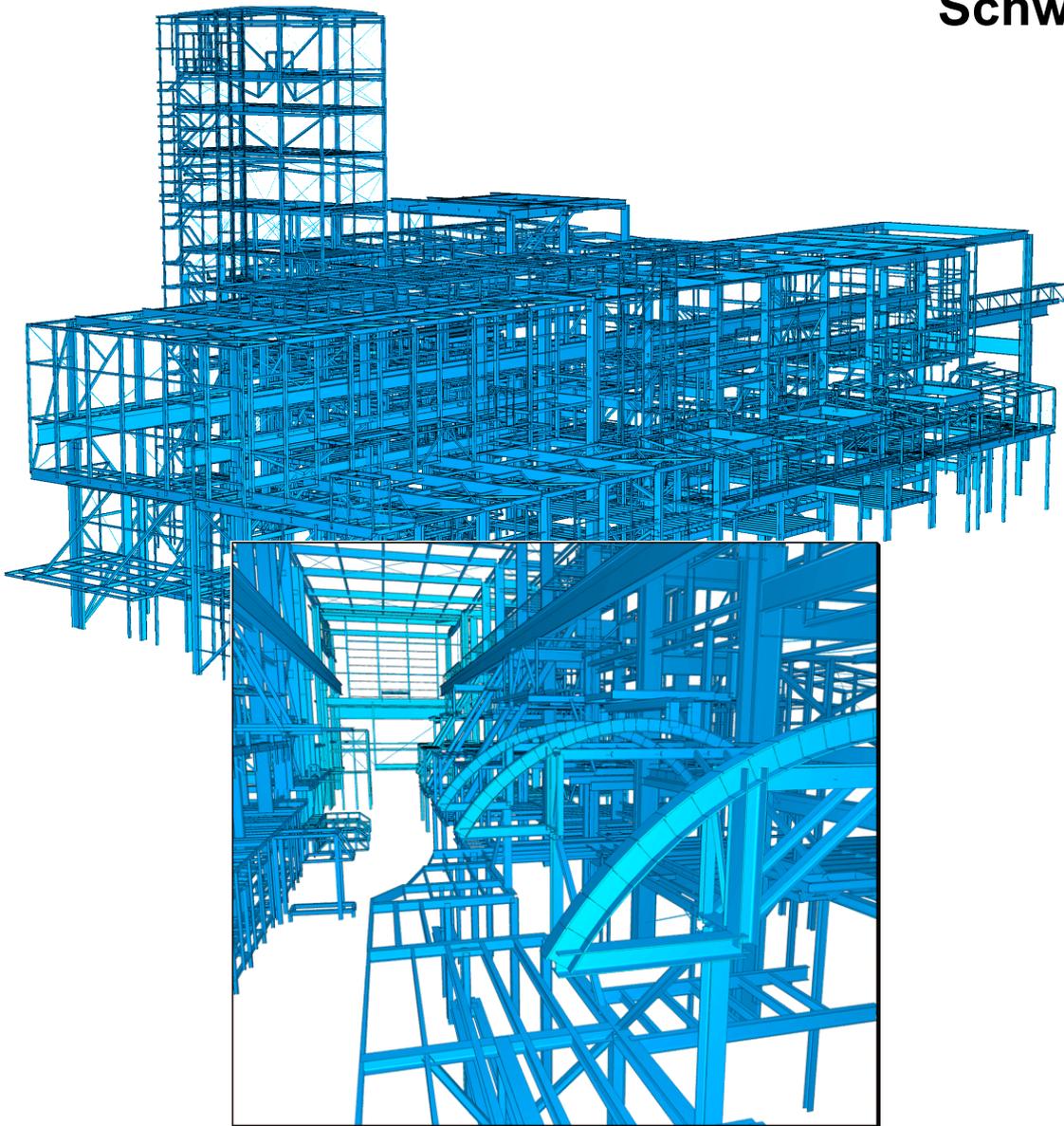


Stahlnachweise nach EN 1993-1-1

mit nationalen Anhängen
Deutschland
Großbritannien
Österreich
Schweden



Die Beschreibung von Programmfunktionen im Rahmen dieser Dokumentation gilt nicht als Zusicherung von Produkteigenschaften. Gewährleistungs- und Haftungsansprüche aus der Benutzung der Dokumentation sind ausgeschlossen.

InfoGraph® ist ein eingetragenes Warenzeichen der InfoGraph GmbH Aachen. Im Text genannte Hersteller und Produktbezeichnungen sind Warenzeichen der jeweiligen Inhaber.

Diese Dokumentation ist urheberrechtlich geschützt. Nachdruck, Vervielfältigung, Übersetzung und elektronische Speicherung, auch auszugsweise, sind nur nach schriftlicher Genehmigung der InfoGraph GmbH zulässig.

InfoGraph® Software nutzt Microsoft® MFC- und Intel® MKL-Bibliotheken.

© InfoGraph GmbH, Aachen, Mai 2024. Alle Rechte vorbehalten.

Titelbild: Industrieanlage der Norddeutschen Affinerie AG in Hamburg.
Mit freundlicher Genehmigung von Dr.-Ing. Jörg Kobarg, Ingenieurbüro für Bauwesen, Hamburg.

Inhaltsverzeichnis

Grundlagen	3
Eingaben für Nachweise am Gesamtsystem	4
Einwirkungen und Bemessungssituationen	4
Definition einer Einwirkung	6
Berechnungseinstellungen	7
Querschnittseingaben	8
Eingaben für Nachweise am Ersatzstab	9
Einstellungen	9
Querschnitt & Material	10
Last & System	11
Biegedrillknickparameter	12
Drehbettung	13
Nachweisschnittgrößen	14
Grenzzustände der Tragfähigkeit	15
Nachweiskombinationen	15
Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung	16
Charakteristische Werte	16
Spannungsermittlung	16
Querschnittsklassifizierung	18
Elastische Querschnittstragfähigkeit	19
Plastische Querschnittstragfähigkeit	19
Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken	21
Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	23
Nachweiskombinationen	23
Begrenzung der Verformungen	23
Ergebnisse	23
Beispiele	24
Stahlnachweise am Gesamtsystem	24
Biegedrillknicknachweis Zweigelenrahmen	30
Biegedrillknicknachweis Rahmenstiel mit zweiachsiger Biegung und Normalkraft	33
Literaturhinweise	38

EN 1993-1-1 Stahlnachweise

Grundlagen

Die Stahlnachweise nach EN 1993-1-1 (Eurocode 3) sind anwendbar für Hoch- und Ingenieurbauwerke unter Berücksichtigung der folgenden Normen:

- EN 1993-1-1:2005/A1:2014 als Basisdokument
- DIN EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Deutschland 2022-10
- ÖNORM EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Österreich B 1993-1-1:2017-11
- SS EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Schweden 2019-01 (EKS 11)
- BS EN 1993-1-1:2005 mit Nationalem Anhang Großbritannien 2008-12

Die Auswahl der gewünschten Vorschrift erfolgt im Dialog *Einstellungen* des Berechnungsmenüs. Bei der Materialauswahl stehen folgende Alternativen zur Verfügung:

- *S235-EN* bis *S500-EN* für Baustahl nach EN 1993-1-1, Tabelle 3.1, bzw. EN 10025-2
- *Stahl* für eine freie Definition der Materialeigenschaften

Die Nachweise am Gesamtsystem erfolgen im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle den Einwirkungen nach EN 1991-1-1:2002/AC:2009 (Eurocode 1), zuzuordnen. In den gewünschten Nachweissituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte nach EN 1990:2021 (Eurocode 0) automatisch die maßgeblichen Nachweisschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente. Die Spannungsnachweise werden für alle Kombinationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit einschließlich der *besonderen Kombination* geführt. Für jeden Schnittkraftsatz dieser Nachweiskombinationen wird automatisch die Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Kapitel 5.5, ermittelt und wahlweise die elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit nach Kapitel 6.2 nachgewiesen. Ein Nachweis gegen Schubbeulen nach EN 1993-1-5 wird nicht geführt.

Als Querschnitte können die vordefinierten Stahlbauprofile, projektbezogene Parameter- und Polygonquerschnitte oder Profile aus der Anwenderdatenbank benutzt werden. Stäbe mit der Querschnittsart *Stab* werden nicht nachgewiesen, da für sie die Querschnittsgeometrie nicht bekannt ist.

Bei Flächenquerschnitten werden - ohne Nachweis - die extremalen Schnittgrößen für die definierten Einwirkungskombinationen ermittelt und zur graphischen Darstellung in der Datenbasis gespeichert.

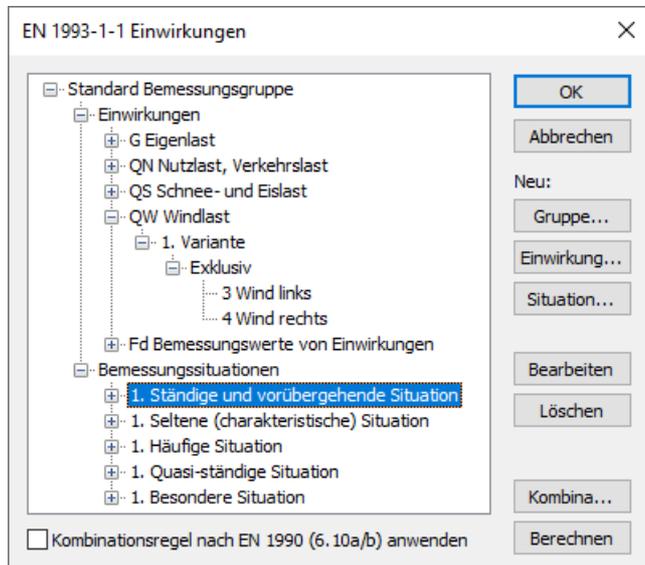
Der Biegeknick- und Biegedrillknicknachweis erfolgt am gabelgelagerten Ersatzstab mit einem eigenständigen Programm, das aus dem Ordner *Infograph* des Startmenüs aufgerufen wird.

In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften der EN 1993-1-1 zitiert. Auf die jeweiligen nationalen Festlegungen wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthalten. Die betreffenden Passagen werden durch senkrechten Strich am Text markiert.

Eingaben für Nachweise am Gesamtsystem

Einwirkungen und Bemessungssituationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die gewünschten Bemessungssituationen. Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



Einwirkung...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Einwirkungen:

- Ständige Einwirkungen (G, GE, GH)
- Veränderliche Einwirkungen (QN, QS, QW, QT, QH, QD)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)
- Einwirkungen infolge Erdbeben (AE)
- Bemessungswerte von Einwirkungen (Fd)

Die zugeordneten Lastfälle sollten eine nachweisrelevante Lastzusammenstellung mit Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Material enthalten, wie z.B. eine Lastgruppe für den Stabilitätsnachweis am Gesamttragwerk nach EN 1993-1-1, Kapitel 5.2.2 (3). Die gewählten Lastfälle werden exklusiv kombiniert.

Gruppe...

Startet den Dialog zur Eingabe einer neuen Bemessungsgruppe. Nach z.B. Norm EN 1991-1-1, Kapitel 6.2.2 (2) darf für bestimmte Bauteile (Querschnitte) mit abgeminderten Nutzlasten bemessen werden. Daher können hier veränderliche Einwirkungen (Q) und Bemessungssituationen geändert werden.

Situation...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Bemessungssituationen.

Bearbeiten

Öffnet den Bearbeitungsdialog der markierten Einwirkung oder Situation.

Löschen

Entfernt die markierte Einwirkung oder Situation.

Kombinationen...

Startet den Dialog mit den ersten 999.999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung oder für die nichtlineare Analyse nutzen.

Das nachfolgende Beispiel zeigt die insgesamt zu untersuchenden Varianten der *Ständigen und vorübergehenden Situation* nach Gl. (6.10) mit den beteiligten Lastfällen (L1...L6) und ihren Wichtungsfaktoren.

Einwirkungen	Lastfälle	γ_{sup}	γ_{inf}	Ψ_0
Eigenlast	1	1,35	1,0	-
Nutzlast, Verkehrslast	2, 3 (inklusive)	1,5	0	0,7
Windlast	4	1,5	0	0,6
F_d Bemessungswerte von Einwirkungen	5, 6	1,0	1,0	-

1. Ständige und vorübergehende Situation

Kombinationen (24 von 24):

Nr.	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1	1,35					
2	1,35	1,50	1,50	0,90		
3	1,35	1,50	1,50			
4	1,35	1,50		0,90		
5	1,35	1,50				
6	1,35		1,50	0,90		
7	1,35		1,50			
8	1,35	1,05	1,05	1,50		
9	1,35	1,05		1,50		
10	1,35		1,05	1,50		
11	1,35			1,50		
12	1,00					

OK Abbrechen Lastgruppe...

1. Ständige und vorübergehende Situation

Kombinationen (24 von 24):

Nr.	L1	L2	L3	L4	L5	L6
13	1,00	1,50	1,50	0,90		
14	1,00	1,50	1,50			
15	1,00	1,50		0,90		
16	1,00	1,50				
17	1,00		1,50	0,90		
18	1,00		1,50			
19	1,00	1,05	1,05	1,50		
20	1,00	1,05		1,50		
21	1,00		1,05	1,50		
22	1,00			1,50		
23					1,00	
24						1,00

OK Abbrechen Lastgruppe...

Berechnen

Berechnet die definierten Bemessungssituationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Situationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls. Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

Kombinationsregel nach EN 1990 (6.10a/b) anwenden

Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen wird optional nach Gl. (6.10a/b) kombiniert, anderenfalls nach Gl. (6.10).

Definition einer Einwirkung

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Dialogfeld zur Eingabe einer veränderlichen Einwirkung. Die Dialogfelder für die weiteren Einwirkungsarten sehen entsprechend aus.

Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

Gamma.sup, Gamma.inf

Teilsicherheitsbeiwerte γ_{sup} und γ_{inf} .

SS EN 1990:

Im Programm werden die Teilsicherheitsbeiwerte so vorgeschlagen, wie sie sich für Sicherheitsklasse 3 gemäß Abschnitt A, Artikel 11, aus $\gamma_d \cdot \gamma_{sup}$ mit dem Abminderungsfaktor $\gamma_d = 1,0$ nach Artikel 14 ergeben. Niedrigere Sicherheitsklassen lassen sich bei Bedarf durch Eingabe geringerer Werte berücksichtigen.

Kombinationsbeiwerte psi für:

Eingabefelder zur Auswahl der Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen. Die Schaltfläche ermöglicht die Einsicht und Änderung der gewählten Kombinationsbeiwerte ψ_0 , ψ_1 und ψ_2 .

Lastfälle

Liste der möglichen Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen. Die Auswahl geschieht durch Markieren und Betätigung der Schaltfläche oder Drag & Drop.

Mehrfachauswahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

Exklusive Varianten

Veränderliche Einwirkungen können aus mehreren exklusiven Varianten bestehen, die sich gegenseitig ausschließen. Die Varianten selber enthalten inklusive und exklusive Anteile. Mit den Schaltflächen oder können Einwirkungsvarianten hinzugefügt oder gelöscht werden.

Inklusive Lastfälle

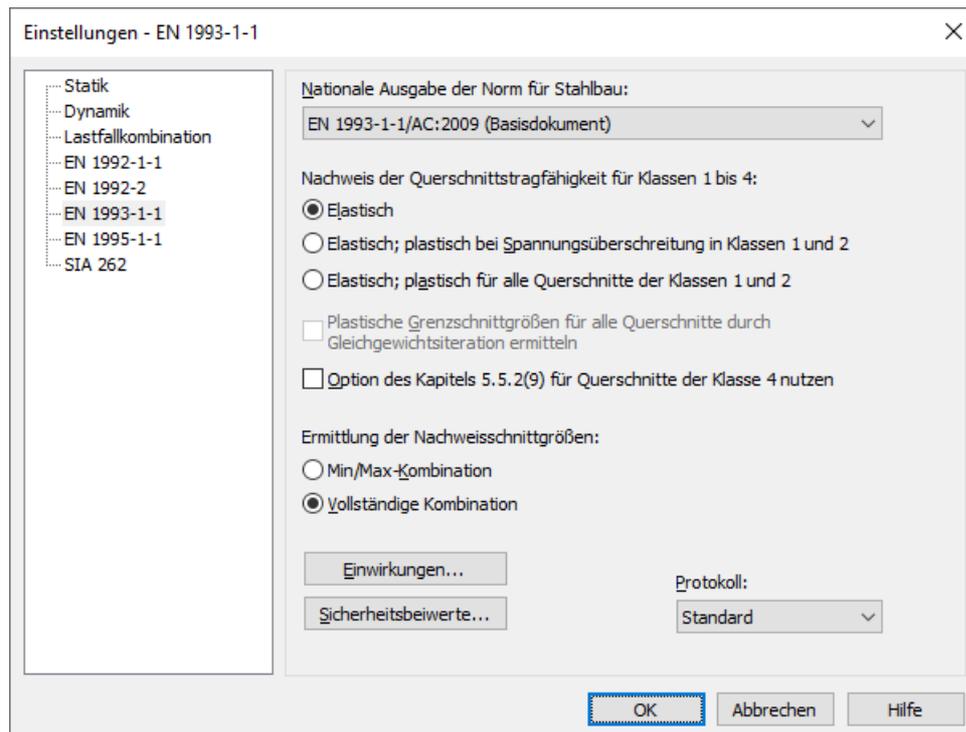
Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

Exklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *EN 1993-1-1* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



Nationale Ausgabe der Norm

Die gewählte Ausgabe kommt bei allen nachfolgenden Eingaben und Berechnungen zur Anwendung.

Im einzelnen stehen folgende Nachweise zur Auswahl:

Elastisch

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1 bis 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen. Für Klasse 4 erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten nach EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.

Elastisch; plastisch bei Spannungsüberschreitung in Klassen 1 und 2

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1 bis 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen. Wenn in den Klassen 1 und 2 die Vergleichsspannung den zulässigen Grenzwert überschreitet, wird die plastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen.

Elastisch; plastisch für alle Querschnitte der Klassen 1 und 2

In den Klassen 1 und 2 wird generell die plastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen, auch wenn die Vergleichsspannung den zulässigen Grenzwert nicht überschreitet.

Plastische Grenzschnittgrößen für alle Querschnitte durch Gleichgewichtsiteration ermitteln

Bei gesetzter Auswahl werden zum Nachweis der Querschnittstragfähigkeit die plastischen Grenzschnittgrößen durch Spannungsintegration und Gleichgewichtsiteration ermittelt. Anderenfalls erfolgt für doppelsymmetrische I- und H-Profile mit konstanter Flanschdicke sowie für rechteckige Kastenquerschnitte der Nachweis mit Hilfe der Interaktionsformeln gemäß EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.3 bis 6.2.10. Bei allen anderen Querschnitten wird immer die Gleichgewichtsiteration verwendet.

Option des Kapitels 5.5.2(9) für Querschnitte der Klasse 4 nutzen

Querschnitte der Klasse 4 werden wie Querschnitte der Klasse 3 behandelt, wenn das c/t -Verhältnis die mit dem Faktor nach Kapitel 5.5.2 (9) erhöhten Grenzwerte für Klasse 3 nicht überschreitet.

Ermittlung der Nachweisschnittgrößen

- *Min/Max-Kombination*
Für jede Komponente der Schnittgrößen werden unter Beachtung der Kombinationsvorschrift die minimalen und maximalen Werte ermittelt. Diese bilden mit den jeweils zugehörigen Werten die Nachweisschnittgrößen.
- *Vollständige Kombination*
Zur Bestimmung der Nachweisschnittgrößen werden alle sich aus der Kombinationsvorschrift ergebenden Möglichkeiten des Zusammenwirkens von Einwirkungen berücksichtigt.

Die Besonderheiten der beiden Verfahren werden im Kapitel *Nachweisschnittgrößen* näher erläutert.

Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

Sicherheitsbeiwerte...

Startet den Dialog zur Änderung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_{M0} . Er ist gemäß Kapitel 6.1 (1) mit 1,0 vorbelegt.

Protokoll

- *Nicht erstellen*: Vom Bemessungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll mit einer tabellarischen Ausgabe der ermittelten Ausnutzungen erstellt.
- *Ausführlich*: Dieses Protokoll unterscheidet sich vom Standard-Protokoll durch zusätzliche Ausgabe der untersuchten Schnittgrößenkombinationen.
- *Standard>zulässig*: Standard-Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.
- *Ausführlich>zulässig*: Ausführliches Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.

Querschnittseingaben

Eigenschaften für Element 16 - Querschnitt - Form

Querschnitt

- Form
- Schubspannungen
- Material
- Bettung
- Thermische Berechnung
- Allgemein
- Exzentrizität

Nummer: 1 - 2 x Querschnittsart: Polygon Materialart: S235-EN Neu Kopie

Bezeichnung: 2 x IPE 200 Es sind weitere Elemente betroffen.

A: 0,0057199 m² Bearbeiten...

Ix: 1,74216e-05 m⁴ Ix berechnen

Iy: 3,90387e-05 m⁴ Faktor für Ix: 1

Iz: 1,71486e-05 m⁴ In Stabsteifigkeit vernachlässigen

Iyz: 0 m⁴ EG vermindern Betonstahl...

Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1: I

OK Abbrechen Hilfe

Querschnittsklasse

Bei Polygon- und Datenbankquerschnitten erfolgt die Einstufung in die Querschnittsklasse gemäß EN 1993, Tab. 5.2 durch den Anwender. Der Nachweis der plastischen Querschnittstragfähigkeit erfolgt unabhängig von den Berechnungseinstellungen grundsätzlich durch Gleichgewichtsiteration.

Eingaben für Nachweise am Ersatzstab

Einstellungen

Protokoll

Anzahl der Berechnungsorte:

Ausführliches Protokoll ausgeben
 Protokoll für alle Berechnungsorte ausgeben

Seitenrahmen

Blattnr.:
 Datum, Uhrzeit

Projekt:

Titel:

Benutzernamen aus InfoCAD Seiteneinrichtung übernehmen

Anzahl der Berechnungsorte

Die Schnittgrößen werden an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Für jeden Berechnungsort werden dann die Nachweise mit den zugehörigen Schnittgrößen und dem zugehörigen M_{cr} geführt.

Ausführliches Protokoll ausgeben

Bei der Berechnung wird ein ausführliches Protokoll mit allen erforderlichen Werten erstellt.

Protokoll für alle Berechnungsorte ausgeben

Zusätzlich zum maßgebenden Berechnungsort werden die Ergebnisse aller Berechnungsorte ausgegeben.

Blattnr.

Blattnummer, die auf der 1. zu druckenden Seite ausgegeben wird. Die Nummer wird bei jedem Druckvorgang inkrementiert. Durch Eingabe von „0“ kann die Nummerierung unterdrückt werden.

Datum, Uhrzeit

Diese Informationen erscheinen automatisch im Standardrahmen.

Projekt, Titel

Diese Texte erscheinen automatisch im Standardrahmen.

Benutzername aus InfoCAD Seiteneinrichtung übernehmen

Bei gesetztem Haken wird der Benutzername automatisch aus der Datei *lgraph.dat* geholt und in den Standardrahmen eingefügt. Durch Entfernen des Hakens kann ein anderer Benutzername angegeben werden.

Querschnitt & Material

Querschnitt

IPE 200

- IPE 80
- IPE 100
- IPE 120
- IPE 140
- IPE 160
- IPE 180
- IPE 200
- IPE 220
- IPE 240
- IPE 270
- IPE 300

Material

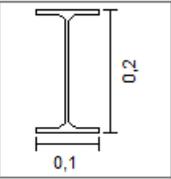
S235-EN

Gamma.M1: 1

fyk [N/mm²]: 235

E-Modul [N/mm²]: 210000

G-Modul [N/mm²]: 81000



A = 28,5 cm²

I_x = 7,02 cm⁴

I_y = 1940 cm⁴

I_z = 142 cm⁴

I_w = 12990,0 cm⁶

Benutzerdefiniertes Profil

bo [mm]: 480

h [mm]: 544

bu [mm]: 200

to [mm]: 24

s [mm]: 12

tu [mm]: 20

Eigenschaften:

geschweißt

Abrechnen

OK

Querschnitt

Auswahl eines Stahlbauprofils aus der Querschnittsbibliothek oder Eingabe eines benutzerdefinierten Profils durch Angabe vorgegebener Abmessungen.

Benutzerdefiniertes Profil

Für das definierte I-Profil kann die Eigenschaft *geschweißt* oder *gewalzt* für die Zuordnung der Knicklinien nach EN 1993-1-1, Tabellen 6.2 und 6.5 gewählt werden.

Material

- S235-EN bis S500-EN: Baustahl gemäß EN 1993-1-1, Tab. 3.1, bzw. EN 10025-2.
- Stahl: Anwenderdefinierter Stahl.

Gamma.M1

Mit dem materialbezogenen Beiwert γ_{M1} erhält man den Bemessungswert der Festigkeit $f_{y,d}$.

fyk

Charakteristische Streckgrenze [N/mm²] von Baustahl S235-EN bis S450-EN gemäß EN 1993-1-1, Tab. 3.1, für Erzeugnisdicken $t \leq 40$ mm und von S460-EN und S500-EN gemäß EN 10025-2 für Erzeugnisdicken $t \leq 16$ mm. Davon abweichende Größen können durch Wahl der Materialart *Stahl* berücksichtigt werden.

E-Modul

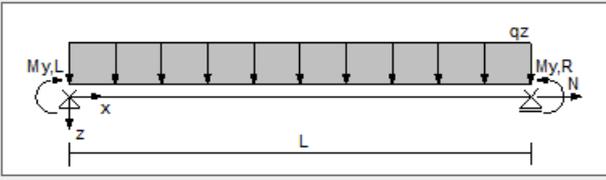
Elastizitätsmodul [N/mm²].

G-Modul

Schubmodul [N/mm²].

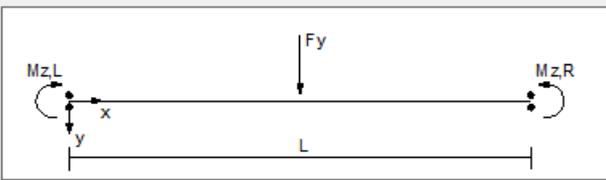
Last & System

Last & System



Last in z-Richtung:
 My,d links [kNm]:
 qz,d [kN/m]:
 My,d rechts [kNm]:

Länge L [m]:
 Nd [kN]:



Last in y-Richtung:
 Mz,d links [kNm]:
 Fy,d [kN]:
 Mz,d rechts [kNm]:

Last in z-Richtung

- *Gleichlast*: Der Ersatzstab wird mit einer Gleichlast $q_{z,d}$ [kN/m] belastet.
- *Einzellast*: Der Ersatzstab wird mit einer Einzellast $F_{z,d}$ [kN/m] belastet. Der Lasthebelarm z_p wird bei dieser Auswahl immer gleich Null gesetzt.

My,d links, My,d rechts

Stabendmomente $M_{y,d}$ [kNm] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F . Die Stabendmomente sind erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

qz,d oder Fz,d

Streckenlast $q_{z,d}$ [kN/m] oder Einzellast $F_{z,d}$ [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F .

Nd

Normalkraft N_d [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F (Druck negativ). Es können nur Druckkräfte berücksichtigt werden. Die Normalkraft ist erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

Länge L

Ersatzstablänge [m].

Last in y-Richtung

- *Gleichlast*: Der Ersatzstab wird mit einer Gleichlast $q_{y,d}$ [kN/m] belastet.
- *Einzellast*: Der Ersatzstab wird mit einer Einzellast $F_{y,d}$ [kN/m] belastet.

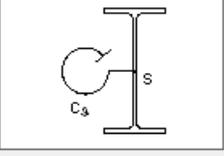
Mz,d links, Mz,d rechts

Stabendmomente $M_{z,d}$ [kNm] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F . Die Stabendmomente sind erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

qy,d oder Fy,d

Streckenlast $q_{y,d}$ [kN/m] oder Einzellast $F_{y,d}$ [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F .

Biegedrillknickparameter

Berechnungsverfahren 2 - Anhang B Interaktionsbeiwerte: B.2 - verdrehweich Lastangriffspunkt zp Am Obergurt zp [m]: -0,1	Drehbettung Null  C.theta [kNm/m]: 0 <input type="button" value="Bearbeiten..."/>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Berechnungsverfahren

- 1 - Anhang A: Ermittlung der Interaktionsbeiwerte k_{ij} mit dem Verfahren 1 nach EN 1993-1-1, Anhang A.
- 2 - Anhang B: Ermittlung der Interaktionsbeiwerte k_{ij} mit dem Verfahren 2 nach EN 1993-1-1, Anhang B.

Für Rohrquerschnitte kann nur Verfahren 1 verwendet werden.

ÖNORM B 1993-1-1:

Es soll Verfahren 2 angewendet werden. Rohrquerschnitte können deshalb nur auf Biegeknicken untersucht werden.

SS EN 1993-1-1:

Es soll Verfahren 1 angewendet werden.

Interaktionsbeiwerte

Bei Auswahl von Verfahren 2 ist zusätzlich anzugeben, ob das Bauteil gemäß EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.3 (1), verdrehsteif oder verdrehweich ist.

- B.1 - verdrehsteif: Die Interaktionsbeiwerte k_{ij} sind bei verdrehsteifen Bauteilen nach Tabelle B.1 zu ermitteln.
- B.2 - verdrehweich: Die Interaktionsbeiwerte k_{ij} sind bei verdrehweichen Bauteilen nach Tabelle B.2 zu ermitteln.

Rechteckige Hohlquerschnitte werden automatisch verdrehsteif angenommen.

Lastangriffspunkt zp

- Obergurt: Die Last greift am Obergurt an.
- Schubmittelpunkt: Die Last greift am Schubmittelpunkt an.
- Schwerpunkt: Die Last greift am Schwerpunkt an.
- Untergurt: Die Last greift am Untergurt an.
- Benutzerdefiniert: Lastangriffspunkt ist benutzerdefiniert.

zp

Der Lasthebelarm z_p wird für den entsprechenden Lastangriffspunkt berechnet.

Korrekturbeiwert kc

DIN EN 1993-1-1, BS EN 1993-1-1:

- Automatisch: Berechnung entsprechend der Momentenverteilung nach Tab. 6.6.
- Benutzerdefiniert: Beiwert $0 \leq k_c \leq 1$, z.B. gemäß DIN EN 1993-1-1, Gl. (NA.4) bzw. BS EN 1993-1-1, NA.2.18.

Drehbettung

- Benutzerdefiniert: Es wird die vom Benutzer eingegebene Drehfeder $C_{\theta,k}$ berücksichtigt.
- Berechnen: Die Drehfeder $C_{\theta,k}$ wird aus den Eingabedaten (siehe Dialog Drehbettung) berechnet. Bei U-Profilen wird die Drehbettung aus der Profilverformung des gestützten Trägers nicht berücksichtigt.
- Null: Es wird keine Drehfeder berücksichtigt.

Bearbeiten...

Startet den Dialog für die Eingabe der Drehfeder $C_{\theta,k}$ [kNm/m].

C.theta

Die Drehfeder $C_{\theta,k}$ wird durch ein ideales Torsionsflächenmoment 2. Grades $I_{T,ideell}$ berücksichtigt.

$$I_{T,ideell} = I_T + C_{\theta,k} \cdot L^2 / (\pi^2 \cdot G)$$

Mit $I_{T,ideell}$ wird dann M_{cr} wie für Träger ohne Drehbettung berechnet. Diese Näherung ist nur für kleine Drehbettungswerte $C_{9,k}$ anwendbar, z.B. für Drehbettungswerte für Trapezprofile, berechnet nach EN 1993-1-3, Kapitel 10.1.5.2; für größere Werte von $C_{9,k}$ können die mit $I_{T,ideell}$ berechneten Biegedrillknickmomente auf der unsicheren Seite liegen (siehe Meister).

Drehbettung

Drehbettung nach EN 1993-1-3, Kapitel 10.1.5.2 ✕

Abstützendes Bauteil
Trapezblech

Faktor k , Bild 10.7: Material:
2 Endfeld o. S235-EN

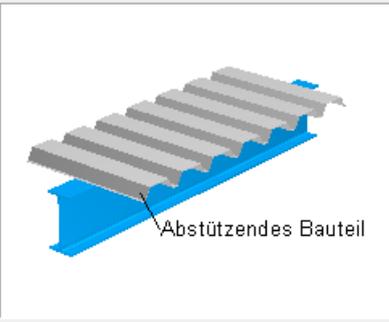
Stützweite s [m]: f_{yk} [N/mm²]:
2,5 240

I_{eff} [cm⁴/m]: E-Modul [N/mm²]:
250 210000

Pfettenabstand e [m]:

Anschlusssteifigkeit
 $C_{\theta, C, k} = C_{D, A}$ nach Gl. (10.17):
5,2 kNm/m

OK Abbrechen



Abstützendes Bauteil

- *Trapezblech*
- *Pfetten*: Es wird keine Anschlusssteifigkeit berücksichtigt.

Faktor k , Bild 10.7

Faktor zur Ermittlung von $C_{D,C}$ nach EN 1993-1-3, Gl. (10.16):

- *2 Endfeld o.*: $k = 2$; Endfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 oben.
- *3 Endfeld u.*: $k = 3$; Endfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 unten.
- *4 Innenfeld o.*: $k = 4$; Innenfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 oben.
- *6 Innenfeld u.*: $k = 6$; Innenfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 unten.

Stützweite s

Stützweite [m] des abstützenden Bauteils.

I_{eff}

Das wirksame Flächenmoment 2. Grades [cm⁴/m] des abstützenden Bauteils.

Pfettenabstand e

Abstand der Pfetten quer zur Tragrichtung [m].

Material

Material des abstützenden Bauteils.

- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 1993-1-1, Tab.3.1.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

f_{yk}

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze entsprechend EN 1993-1-1 einzugeben [N/mm²].

E-Modul

Elastizitätsmodul [N/mm²] des abstützenden Bauteils.

$C_{\theta, C, k} = C_{D, A}$ nach Gl. (10.17)

Anschlusssteifigkeit [kNm/m] für Trapezbleche nach EN 1993-1-3, Gl. (10.17).

Nachweisschnittgrößen

Aus der Berechnung von Lastfällen ergibt sich je Lastfall eine Satz Schnittgrößen am Nachweisort (z.B. N_x , M_y). Die Nachweisschnittgrößen werden dann aus den Ergebnissen der Lastfälle mit den für die Nachweissituationen maßgebenden Kombinationsvorschriften bestimmt. Hierfür kann in den Berechnungseinstellungen eine der folgenden Methoden gewählt werden:

- Min/Max-Kombination**
 Zum Schnittgrößensatz mit dem Minimum bzw. Maximum einer Schnittgröße werden die Ergebnisse eines Lastfalls addiert, wenn dadurch der Betrag des Extremwerts erhöht wird. Ergebnissätze aus veränderlichen Einwirkungen, in denen die Steuergröße kleiner als der Schwellenwert 10^{-3} ist, werden nicht kombiniert. Die Min/Max-Kombination liefert unabhängig von der Anzahl der Lastfälle eine konstante Anzahl von Sätzen und stellt damit für die Nachweise eine besonders wirtschaftliche Lösung dar.
- Vollständige Kombination**
 Zur Bestimmung der Nachweisschnittgrößen werden alle sich aus der Kombinationsvorschrift ergebenden Möglichkeiten des Zusammenwirkens von Einwirkungen berücksichtigt. Die Anzahl der Sätze steigt exponentiell mit der Anzahl inklusiver Lastfälle und kann dadurch einen hohen Zeit- und Speicherbedarf für die Nachweise zur Folge haben.

Die für die Nachweise relevanten Schnittgrößen werden im ausführlichen Nachweisprotokoll dokumentiert. Unabhängig von der getroffenen Auswahl werden für die graphische Darstellung die Ergebnisse der Min/Max-Kombination gespeichert. Über die Kontextfunktion *Kombinationsinfo* lassen sich die an der Kombination beteiligten Lastfälle anzeigen.

Die Unterschiede der beiden vorgenannten Kombinationsmethoden werden aus nachfolgendem Beispiel eines einachsigen beanspruchten Stabs ersichtlich. Die dargestellten Lastfälle 2, 3 und 4 können gleichzeitig wirken (inklusiv). Alle Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte werden für das Beispiel mit 1 angenommen.

Einwirkungen	N_x	M_y	Lastfall
G - ständig	-15	40	1
Q - veränderlich	0	20	2
	5	10	3
	0	-10	4

Schnittgrößen der Lastfälle

Extremwert	N_x	M_y	Kombination
min N_x	-15	40	L1
max N_x	-10	50	L1+L3
min M_y	-15	30	L1+L4
max M_y	-10	70	L1+L2+L3

Ergebnisse der Min/Max-Kombination

Satz	N_x	M_y	Kombination
1	-15	40	L1
2	-15	60	L1+L2
3	-10	50	L1+L3
4	-15	30	L1+L4
5	-10	70	L1+L2+L3
6	-15	50	L1+L2+L4
7	-10	40	L1+L3+L4
8	-10	60	L1+L2+L3+L4

Ergebnisse der vollständigen Kombination

Grenzzustände der Tragfähigkeit

Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.4.3, berücksichtigt:

- Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen darf entweder nach Gleichung (6.10) oder mit der ungünstigeren der beiden Gleichungen (6.10a) und (6.10b) kombiniert werden.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Der Beiwert ξ ergibt sich nach Tabelle A.1.2(B) zu $\xi = 0,85$.

DIN EN 1990, ÖNORM B 1990:

Die Kombination erfolgt nach Gleichung (6.10).

SS EN 1990:

Die Gleichungen (6.10a) und (6.10b) kommen mit folgenden Modifikationen zur Anwendung:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_d \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P \quad (6.10aSS)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_d \cdot \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_d \cdot \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10bSS)$$

Der Faktor γ_d wird programmseitig unter Annahme der Sicherheitsklasse 3 zu $\gamma_d = 1$ angenommen

(vgl. Abschnitt A, Artikel 11 und 14). Der Beiwert ξ wird zu $\xi = 0,89$ gesetzt.

BS EN 1990:

Der Beiwert ξ in Gleichung (6.10b) wird zu $\xi = 0,925$ gesetzt.

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Für die Kombination kommt im Programm $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$ zur Anwendung.

ÖNORM B 1990-1:

$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ ist maßgebend.

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

Zusätzlich steht für die Ergebnisse eines Stabilitätsnachweises nach Theorie 2. Ordnung eine

- Besondere Kombination

$$F_{d,1}; \dots; F_{d,n}$$

zur Verfügung, in der die Bemessungswerte der Einwirkungen ($F_{d,j}$) exklusiv überlagert werden.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung

Die Berechnung nach der Theorie 2. Ordnung gemäß Kapitel 5.2.2 erfolgt im Rahmen der Schnittkraftermittlung. Dazu sind mit Hilfe von *Lastgruppen* geeignete Lastfälle aus maßgeblichen Beanspruchungen zusammenzustellen (s. auch Funktion *Kombinationen* im Einwirkungsdialog).

Da die Teilsicherheitsbeiwerte bereits bei der Schnittkraftermittlung zu berücksichtigen sind, müssen die Einwirkungen dort mit ihrem jeweiligen Teilsicherheitsbeiwert γ_G bzw. γ_Q sowie mit γ_{M0} gemäß Kapitel 6.1 (1) multipliziert werden.

DIN EN 1993-1-1:

Anstelle von γ_{M0} ist der Wert $\gamma_{M1} = 1,1$ anzusetzen.

Im Nachweis werden die nach Theorie 2. Ordnung berechneten Lastfälle einer Einwirkung F_d zugeordnet und in der *Besonderen Kombination* als exklusive Auswahl überlagert. Die Ergebnisse werden ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten gegen die charakteristischen Größen der Beanspruchbarkeiten geprüft.

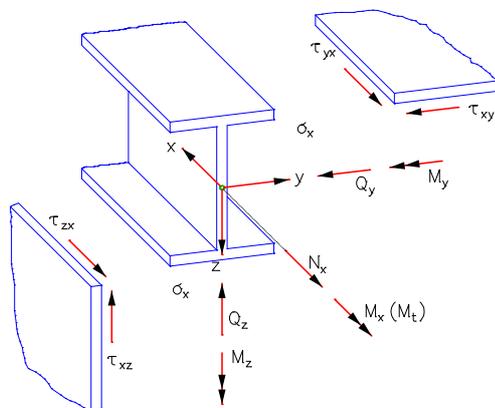
Charakteristische Werte

Für Querschnitte aus Baustahl *S235-EN* bis *S450-EN* wird die Streckgrenze gemäß EN 1993-1-1, Tabelle 3.1 für Erzeugnisdicken $t \leq 40$ mm angenommen. Für *S460-EN* und *S500-EN* wird die Streckgrenze gemäß EN 10025-2 für Erzeugnisdicken $t \leq 16$ mm verwendet. Wenn davon abweichende Größen zur Anwendung kommen sollen, ist die allgemeine Materialart *Stahl* zu wählen, die eine freie Definition aller Eigenschaften zulässt.

Spannungsermittlung

Koordinatensysteme

Die folgende Abbildung zeigt am Beispiel eines Stabes mit I-Querschnitt die Definition der Koordinatensysteme für Schnittgrößen, Beanspruchungen und Spannungen. Der Querschnittsrand ist als geschlossenes Polygon definiert.



Die Längskraft N_x verläuft durch den Schwerpunkt, die Querkräfte Q_y und Q_z durch den Schubmittelpunkt des Querschnitts, der hier mit dem Schwerpunkt zusammenfällt. Die Vektoren der Momente M_x , M_y , M_z und Spannungen σ_x , τ_{xy} , τ_{xz} verlaufen parallel zu den Koordinatenachsen.

Längsspannungen

Die erforderlichen Querschnittswerte zur Ermittlung der Längsspannungen aus Längskraft und Biegung werden elementar mit der Umformungsmethode aus den Koordinaten des Polygonzugs ermittelt. Sie sind als Bruttoquerschnittswerte im Sinne der Vorschrift 6.2.2.1 der Norm anzusehen.

Im Einzelnen sind dies:

y_s, z_s	Schwerpunktkoordinaten.
A	Fläche des Querschnitts.
I_y, I_z	Trägheitsmomente bezüglich der Koordinatenachsen.
I_{yz}	Deviationsmoment.
I_1, I_2	Trägheitsmomente bezüglich der Hauptachsen.
φ	Verdrehungswinkel der Hauptachsen.
W_y, W_z	Widerstandsmomente zur Berechnung der extremalen Längsspannungen aus M_y, M_z .

Bei der Untersuchung eines Querschnitts werden die Spannungen an den automatisch festgelegten Berechnungspunkten ermittelt. Die Längsspannung σ für einen Punkt (y,z) des Querschnitts ergibt sich durch

$$\sigma(y, z) = N_x \frac{1}{A} + M_y \frac{\Delta z I_z - \Delta y I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} + M_z \frac{\Delta y I_y - \Delta z I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}$$

mit $\Delta y = y - y_s$ und $\Delta z = z - z_s$.

Schubspannungen

Querkraft

Für die Beanspruchung infolge Querkraft wird die Differentialgleichung der sogenannten Schubverwölbung ω_τ

$$\frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial z^2} = -\frac{Q_z z}{G I_y} \quad \text{bzw.} \quad -\frac{Q_y y}{G I_z}$$

mit Hilfe der Rand-Element-Methode numerisch gelöst. Daraus werden folgende Schubkenngrößen bestimmt:

$\tau_{Q_y,1}$	Schubspannung für die Querkraft $Q_y = 1$.
$\tau_{Q_z,1}$	Schubspannung für die Querkraft $Q_z = 1$.
W_{qy}, W_{qz}	Flächenwerte zur Berechnung der extremalen Schubspannungen aus Q_y und Q_z mit $\tau_{Q_y} = Q_y / W_{qy}$ und $\tau_{Q_z} = Q_z / W_{qz}$.

Sofern im Querschnittsdialog gewählt, werden die Schubspannungen über die Querschnittsbreite gemittelt.

Torsion

Für die Beanspruchung infolge St. Venant'scher Torsion ist die Differentialgleichung der Einheitsverwölbung ω

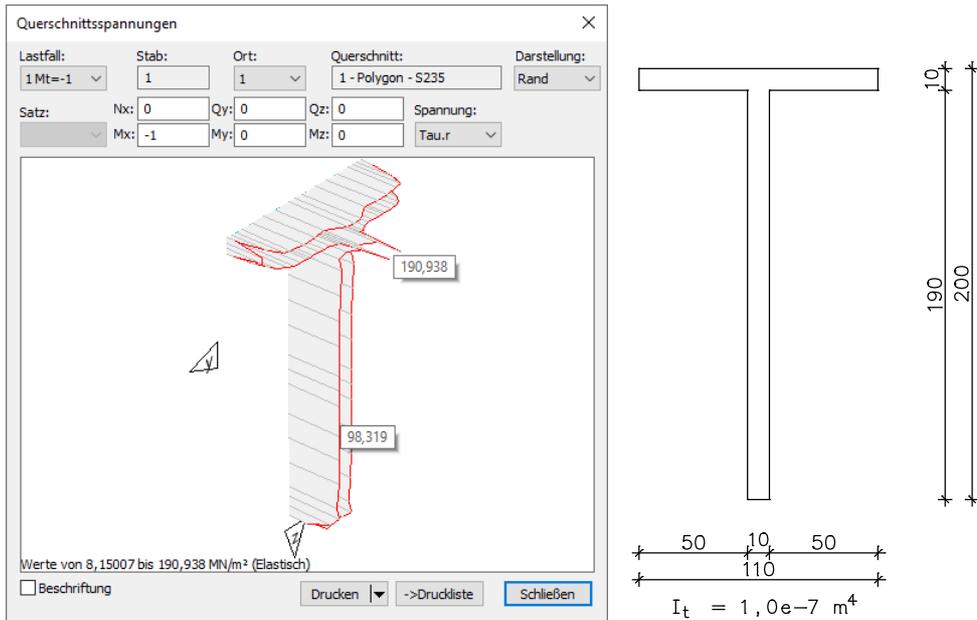
$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} = 0$$

maßgebend, deren Lösung die folgenden Kenngrößen liefert:

I_t	Torsionsträgheitsmoment.
$\tau_{M_x,1}$	Schubspannung für das Torsionsmoment $M_x = 1$.
W_t	Widerstandsmoment zur Berechnung der extremalen Schubspannung aus M_x .

Im Ausrundungsbereich von Walzprofilen oder in stumpfen Ecken von geschweißten Profilen ergeben sich danach größere Torsions-Schubspannungen als nach der Theorie dünnwandiger Profile. Im Querschnittsdialog lassen sich durch Angabe der maximalen Blechdicke (offene Profile) oder des Torsionswiderstandsmoments (Kastenprofile) die Spannungen optional auf den Maximalwert nach der Theorie dünnwandiger Profile begrenzen.

Nachfolgend ist beispielhaft der Spannungsverlauf für $M_x = 1$ dargestellt (Funktion "Querschnittsspannungen"):



Der im Beispiel für den Steg numerisch ermittelte Wert entspricht der theoretischen Schubspannung für offene dünnwandige Querschnitte $\tau = M_x \cdot t / I_t = 100 \text{ MN/m}^2$. Der Spitzenwert von 190 MN/m^2 resultiert aus einer Singularität in den stumpfen Ecken.

Alle Einheitsschubspannungen werden an diskreten Punkten auf den Querschnittsrändern berechnet. Die Diskretisierung wird vom Programm automatisch vorgenommen. Die Einheitsschubspannungen sind Randspannungen, die längs der betrachteten Querschnittskante verlaufen. Ihr Vorzeichen orientiert sich an der Richtung der Kante. Die aus Querkraft und Torsion resultierende Schubspannung τ lautet dann: $\tau = Q_y \cdot \tau_{Qy,1} + Q_z \cdot \tau_{Qz,1} + M_x \cdot \tau_{Mx,1}$

Querschnittsklassifizierung

Die Klassifizierung erfolgt für Listenprofile und parametrisierte Stahlbauquerschnitte nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2. Dazu wird die Spannungsverteilung für die gleichzeitige Beanspruchung aus zweiachsiger Biegung mit Normalkraft in der Mittellinie der Querschnittsteile betrachtet. T-Profile werden wie einseitig gestützte Flansche nach Tab. 5.2 behandelt. Winkelprofile werden nicht wie einseitig gestützte Flansche, sondern nach dem gesonderten Tabellenabschnitt für Winkelprofile der Tab. 5.2 klassifiziert (siehe Kuhlmann et al. 2016, Anmerkung zu Tab. 5.2). Benutzerdefinierte Rechteckquerschnitte werden ohne weitere Untersuchung in Klasse 3 eingestuft. Für Polygon- und Datenbankquerschnitte kann die Klasse im Querschnittsdialog vorgegeben werden, wobei die Einstufung nach Tab. 5.2 vorab durch den Anwender erfolgen muss. Ein Querschnitt wird generell durch die ungünstigste Klasse seiner druckbeanspruchten Querschnittsteile klassifiziert. Die in den Kapiteln 5.5.2 (11) und 5.5.2 (12) sowie 6.2.1 (10) und 6.2.2.4 (1) zugelassenen Ausnahmen werden im Programm nicht genutzt.

Beispiel

Querschnitt: HEAA 360 – S355
 Beanspruchung: $N = -400 \text{ kN}$, $M_y = 175 \text{ kNm}$, $M_z = 65 \text{ kNm}$

Dehnungszustand			Steg	F1	F2	F3	F4
F1	F2	ϵ	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
F1	F2	α	0,70	1	0,66		0,78
F1	F2	ψ	-0,45	0,58	-0,15		-0,52
F1	F2	c/t	29	9,88	9,88		9,88
F1	F2	1: $c/t \leq$	39,95	7,32	13,63		9,35
F1	F2	2: $c/t \leq$	46,01	8,14	15,14		10,39
F1	F2	3: $c/t \leq$	65,56	11,73	28,73		14,28
F1	F2	Klasse	1	3	1	1	2

Unter der gegebenen Beanspruchung wird der Querschnitt wegen der Klassifizierung des Flansches F1 insgesamt in Klasse 3 eingestuft und ist somit nur elastisch nachweisbar.

Elastische Querschnittstragfähigkeit

Die elastische Querschnittstragfähigkeit wird für alle Querschnitte der Klassen 1 bis 4 untersucht. Querschnitte der Klasse 4 werden nach Benutzerauswahl wie Querschnitte der Klasse 3 behandelt, wenn das c/t -Verhältnis die mit dem Faktor nach Kapitel 5.5.2 (9) erhöhten Grenzwerte für Klasse 3 nicht überschreitet. Anderenfalls erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten nach EN 1993-1-5, Kapitel 4.3, unter Berücksichtigung der Zusatzmomente nach EN 1993-1-1, Gl. (6.4). Die effektiven Querschnittswerte werden unter gleichzeitiger Wirkung von N_{Ed} und M_{Ed} ohne Iteration ermittelt. Runde Hohlprofile können in Klasse 4 nicht nachgewiesen werden, da die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} nach Kapitel 4.3 nicht bestimmbar ist. Bei Winkelprofilen werden die effektiven Querschnittswerte für den ungünstigen Fall eines komplett gedrückten Querschnittes ermittelt (vgl. Kuhlmann et al. 2016, Anmerkung zu Tab. 5.2).

Nachweis

Im Nachweis wird die Zulässigkeit der Vergleichsspannung mit dem Fließkriterium nach Gl. (6.1) geprüft:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.1)$$

Dabei ist

- $\sigma_{x,Ed}$ der Bemessungswert der einwirkenden Normalspannung in Längsrichtung am betrachteten Punkt.
- $\sigma_{z,Ed}$ der Bemessungswert der einwirkenden Normalspannung in Querrichtung am betrachteten Punkt. $\sigma_{z,Ed} = 0$.
- τ_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Schubspannung am betrachteten Punkt.
- f_y der Nennwert der Streckgrenze nach Tab. 3.1.
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten nach Kap. 6.1 (1).

Spannungen aus der *Besonderen Kombination* werden gegen den Nennwert der Streckgrenze f_y geprüft, da der Teilsicherheitsbeiwert γ_{M0} bereits bei der Schnittkraftermittlung berücksichtigt wurde.

Plastische Querschnittstragfähigkeit

Die plastische Querschnittstragfähigkeit wird gemäß Benutzerauswahl für alle Querschnitte der Klassen 1 und 2 untersucht, sofern für den betrachteten Schnittkraftsatz die elastische Querschnittstragfähigkeit überschritten wird. Dabei kommen folgende Verfahren zur Anwendung:

- Interaktionsformeln für doppelt symmetrische I- und H-Profile sowie für rechteckige Kastenquerschnitte
- Gleichgewichtsiteration der plastischen Grenzschnittgrößen für die übrigen Querschnitte

Optional ist wählbar, die Tragfähigkeit für **alle** Querschnitte durch Gleichgewichtsiteration zu ermitteln.

Interaktionsformeln

Bei doppelt symmetrischen I- und H-Profilen mit konstanter Flanschdicke sowie bei rechteckigen Kastenquerschnitten erfolgt die Berechnung der plastischen Tragfähigkeit nach EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.3 bis 6.2.10. Falls nicht bereits eine einzelne Einwirkung die plastische Tragfähigkeit überschreitet, wird die Interaktion der Schnittgrößen mit den in Kapitel 6.2 angegebenen Interaktionsformeln untersucht. Dabei wird gemäß Kapitel 6.2.10 (2) die Tragfähigkeit von auf Biegung und Normalkraft beanspruchten Querschnitten nicht abgemindert, wenn die Querkrafteinwirkung die Hälfte der plastischen Querkrafttragfähigkeit nicht überschreitet. Weiterhin gelten folgende Besonderheiten:

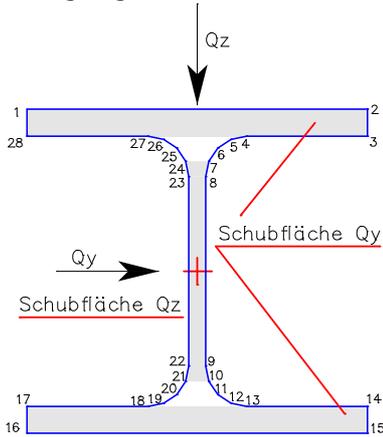
- Der Beiwert η nach Kapitel 6.2.6 (3) wird zu 1 angenommen
- Bei der Querkraftinteraktion gemäß Kapitel 6.2.8 (3) und 6.2.10 (3) werden die abgeminderten Steckgrenzen für gewalzte I- und H-Profile bei Querkraftbeanspruchung in z-Richtung auf die Schubfläche A_{Vz} und bei Querkraftbeanspruchung in y-Richtung auf die Schubfläche $A - A_{Vz}$ angewendet.
- Die Vereinfachung gemäß Kapitel 6.2.8 (5) wird nicht angewendet.
- Wenn die gleichzeitige Interaktion von Biegung, Normalkraft und Querkraft berücksichtigt werden muss, werden die Faktoren a , a_w und a_f aus Kapitel 6.2.9.1 (5) mit den entsprechend abgeminderten Schubflächen berechnet. Dies erfolgt in Anlehnung an die Auslegungen des NABau zur DIN EN 1993-1-1 von April 2017.

Gleichgewichtsiteration

Die Untersuchung der plastischen Querschnittstragfähigkeit wird durch Vergleich der aufnehmbaren Schnittgrößen (Beanspruchbarkeit) mit den Beanspruchungsschnittgrößen eines Querschnitts geführt. Hierbei ist sicherzustellen, dass es zu keiner Überschreitung der Grenzschnittgrößen im plastischen Zustand kommt. Die Ermittlung der aufnehmbaren Schnittgrößen erfolgt durch Integration der Spannungen am Querschnittspolygon und Gleichgewichtsiteration unter folgenden Voraussetzungen:

- Linearelastische-idealplastische Spannungs-Dehnungsbeziehung.
- Ebenbleiben des Querschnitts.
- Huber-v.Mises-Fließbedingung.

Die Interaktion aller 6 Schnittgrößen $N_x, Q_y, Q_z, M_x, M_y, M_z$ ist dabei zu berücksichtigen. Um dies zu gewährleisten, sind vereinfachende Annahmen bezüglich der Schubspannungsverteilung aus Querkraft und Torsion zu treffen, da eine geschlossene Lösung des Interaktionsproblems nicht zur Verfügung steht. Da im Stahlbau i.d.R. dünnwandige Profile vorliegen, können in guter Näherung Teilflächen definiert werden, die für die Abtragung der Schubspannungen herangezogen werden:



Für die Stahlbauprofile der Querschnittsbibliothek sind die Teilflächen vordefiniert und werden in der Querschnittstabelle des Protokolls ausgegeben. Dabei gelten im einzelnen folgende Annahmen:

- Die Querkräfte erzeugen in ihrer zugehörigen Teilfläche konstante Schubspannungen $\tau_{xy} = Q_y/A_{qy}$ bzw. $\tau_{xz} = Q_z/A_{qz}$.
- In den Teilflächen und der Restfläche ergeben sich aus dem Torsionsmoment M_x gebietsweise konstante Schubspannungszustände mit der maximalen Randschubspannung τ_t des Gebiets.

Bei Polygonquerschnitten und Profilen aus der Anwenderdatenbank können Teilflächen nicht berücksichtigt werden. In diesem Fall gelten für den gesamten Querschnitt folgende Annahmen:

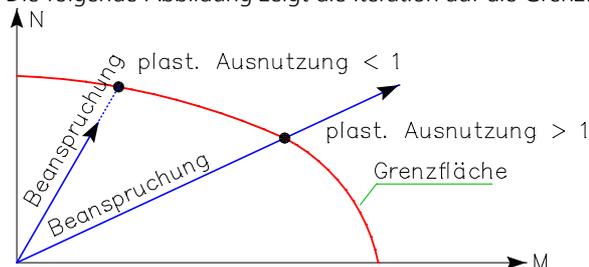
- Die Querkräfte erzeugen konstante Schubspannungen $\tau_{xy} = Q_y/W_{qy}$ bzw. $\tau_{xz} = Q_z/W_{qz}$.
- Das Torsionsmoment M_x erzeugt einen konstanten Schubspannungszustand $\tau_t = M_x/W_t$.

Die Bemessungswerte der Festigkeiten werden jeweils gebietsweise um die oben beschriebene Schubspannung abgemindert. Für die Ermittlung der aufnehmbaren Schnittgrößen wird dann die im jeweiligen Gebiet noch verfügbare Festigkeit angesetzt. Die Berechnung der Schubkenngrößen erfolgt bei der Ermittlung der Querschnittswerte wie oben beschrieben. Die Ausnahme für geringe Querkrafteinwirkung nach EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.10 (2), wird nicht genutzt.

Der dargestellte Berechnungsansatz liefert stets auf der sicheren Seite liegende Grenzschnittgrößen, wobei im Einzelfall unter Umständen nicht alle Reserven genutzt werden.

Damit der Anwender den Grad der plastischen Ausnutzung eines Querschnittes abschätzen kann, wird der Beanspruchungsvektor mit der Grenzfläche des 6-dimensionalen Schnittgrößenraums zum Schnitt gebracht. Hieraus kann ein Faktor für die plastische Ausnutzung berechnet werden, der bei Unterschreiten der Grenzfläche ≤ 1 und bei Überschreitung > 1 ist.

Die folgende Abbildung zeigt die Iteration auf die Grenzfläche am Beispiel einer N-M-Interaktion.



Nachweis

Im Nachweis wird geprüft, ob die Beanspruchungsschnittgrößen unter Beachtung der Interaktion aller Schnittgrößen die Grenzschnittgrößen im vollplastischen Zustand überschreiten. Die plastischen Grenzschnittgrößen werden in der *Besonderen Kombination* mit dem Nennwert der Streckgrenze f_y , in den übrigen Kombinationen mit dem Bemessungswert f_y / γ_{M0} berechnet.

Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken

Der Nachweis der Tragsicherheit stabilitätsgefährdeter Stabwerke kann nach EN 1993-1-1, Abschnitt 5.2.2 (7b) am Einzelbauteil erfolgen. Im Programm wird der Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken gemäß Kapitel 6.3 am gabelgelagerten Ersatzstab durchgeführt. Die Stabendschnittgrößen sind aus der Berechnung des Gesamttragwerks unter Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung und globaler Imperfektionen zu ermitteln und auf den Ersatzstab aufzubringen. Als Knicklänge des Einzelbauteils darf die Systemlänge angesetzt werden.

Für den Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken am Ersatzstab gelten die nachfolgenden Voraussetzungen:

- Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt nach der Elastizitätstheorie.
- Der Ersatzstab wird als gerade angenommen.
- Querschnitt und Material sind über die Stablänge konstant.
- Die Querschnittsabmessungen sind klein gegenüber den übrigen Abmessungen.
- Die mathematische Krümmung wird linearisiert.
- Der Einfluss der Schubverformungen auf die Schnittgrößen bleibt unberücksichtigt.
- Die Belastung wird langsam auf ihren Endwert gesteigert und erfährt durch die Systemverformung keine Richtungsabweichung.
- Die Einwirkungen in z-Richtung greifen im Abstand z_p vom Schubmittelpunkt an.
- Die Einwirkungen in y-Richtung greifen im Schubmittelpunkt an.
- Der Ersatzstab ist beidseitig gabelgelagert.
- Blechbeulen wird nicht erfasst.
- Torsionseinwirkungen werden nicht erfasst.

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken kann für I-, U- und benutzerdefinierte Stahlprofile durchgeführt werden, für andere Querschnitte wird nur der Nachweis gegen Biegeknicken gemäß Kapitel 6.3.1 geführt.

Berechnung der Beanspruchbarkeit

Zunächst wird für jeden Nachweisort mit den entsprechenden Schnittgrößen eine Querschnittsklassifizierung nach Kapitel 5.5 durchgeführt. Abhängig von der Querschnittsklasse werden nach Tabelle 6.7 die aufnehmbaren Schnittgrößen ermittelt. Bei Querschnitten der Klassen 1 und 2 erfolgt die Ermittlung der plastischen Schnittgrößen durch Integration der Spannungen am Querschnittspolygon, wie oben beschrieben.

Bei Querschnittsklasse 4 werden die Querschnittswerte mit der wirksamen Fläche der druckbeanspruchten Querschnittsteile ermittelt. Kommt es dabei zu einer Verschiebung der Hauptachsen des wirksamen Querschnitts gegenüber dem Bruttoquerschnitt, werden zudem die daraus resultierenden Zusatzmomente ($\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$) ermittelt.

Berechnung von N_{cr}

$N_{cr,y}$ und $N_{cr,z}$ sind die idealen Verzweigungslasten für Knicken um die y- bzw. z-Achse. Diese werden im Programm nach folgenden Formeln berechnet:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

Berechnung des idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr}

Das ideale Biegedrillknickmoment M_{cr} lässt sich z.B. nach Petersen (1980) mit folgender Gleichung ermitteln:

$$M_{cr} = M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 \cdot z_p \right)$$

Diese Formel ist nur für doppelsymmetrische I-Profile anwendbar. Zusätzlich gestaltet sich bei allgemeinerem Momentenverlauf die Bestimmung des Momentenbeiwertes ζ recht aufwendig. Bei einfachsymmetrischen Profilen ist eine Ermittlung von M_{cr} in der o.a. Form nicht mehr möglich.

Um bei Bedarf beliebige einfachsymmetrische Profile unter allgemeiner Beanspruchung berechnen zu können, wurde im vorliegenden Programmmodul eine Methode zur direkten Ermittlung von M_{cr} nach Martin (1996) implementiert.

Die Lösung erfolgt durch Variation des elastischen Potentials Π unter Vernachlässigung der Terme aus der rechnerischen Durchbiegung w . Für die unbekannt Funktionen v und φ wird ein mehrgliedriger Reihenansatz gemacht, der die Randbedingungen erfüllt.

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ \left[G I_x + (r_y - 2 z_m) M_y(x) \eta_{cr} \right] \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + E I_w \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 + E I_z \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + 2 M_y(x) \eta_{cr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \varphi + q \eta_{cr} z_p \varphi^2 \right\} dx$$

Der geometrisch nichtlineare Anteil aus Einwirkungen in z-Richtung wird durch eine Gleichlast q_z erfasst. Diese wird so gewählt, dass das gleiche maximale Feldmoment erzeugt wird, wie durch die gegebene Einwirkung.

Das hieraus resultierende Eigenwertproblem liefert den kleinsten positiven Verzweigungslastfaktor η_{cr} und damit das gesuchte Biegedrillknickmoment M_{cr} . Dieses wird für jede Nachweisstelle wie folgt berechnet.

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

Das beschriebene Verfahren bietet den Vorteil, dass der Benutzer keine Angaben zum Momentenbeiwert ζ machen muss.

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.5.3, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

Begrenzung der Verformungen

Nach EN 1993-1-1, Kapitel 7.2, sollen die vertikalen und horizontalen Verformungen in Abstimmung mit dem Auftraggeber entsprechend EN 1990, Anhang A1.4, begrenzt werden. Nach A.1.4.3 (3) ist für diesen Nachweis die quasi-ständige Kombination maßgebend.

ÖNORM B 1990-1, Kapitel 8.2:

Unter quasi-ständiger Kombination darf die Durchbiegung unter Berücksichtigung der Langzeitverformung in der Regel 1/250 der Stützweite nicht übersteigen. Für die in Kapitel 8.2 beschriebenen Sonderfälle kann eine Begrenzung auf 1/500 der Stützweite unter der häufigen oder der quasi-ständigen Kombination notwendig sein.

SS EN 1993-1-1:

Bei dünnwandigen Konstruktionen darf gemäß Artikel 16 und 17 unter der häufigen Kombination mit reversibler Grenzlast die Verformung 1/200 der Stützweite nicht überschreiten.

Die Einhaltung der vorgenannten Restriktionen kann in der graphischen oder numerischen Verformungsdarstellung geprüft werden. Dazu lassen sich im Abschnitt *Knotendeformationen* des Ergebnisbaums die Verformungen für alle maßgebenden Nachweissituationen abrufen.

Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Das ausführliche Protokoll gibt zusätzlich für jeden Berechnungsort die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen aus.

Spannungen

σ_x, σ_y	Extremale Normalspannungen aus Biegung und Normalkraft.
σ_{xy}	Extremale Schubspannungen aus Drillmoment und Schubkraft.
τ_{xy}, τ_{xz}	Extremale Schubspannungen aus Querkraft und Torsion.
σ_v	Maximale Vergleichsspannung.
σ_1, σ_2	Extremale Hauptspannungen.

Alle Spannungen werden in [MN/m²] ausgegeben.

Ausnutzungen

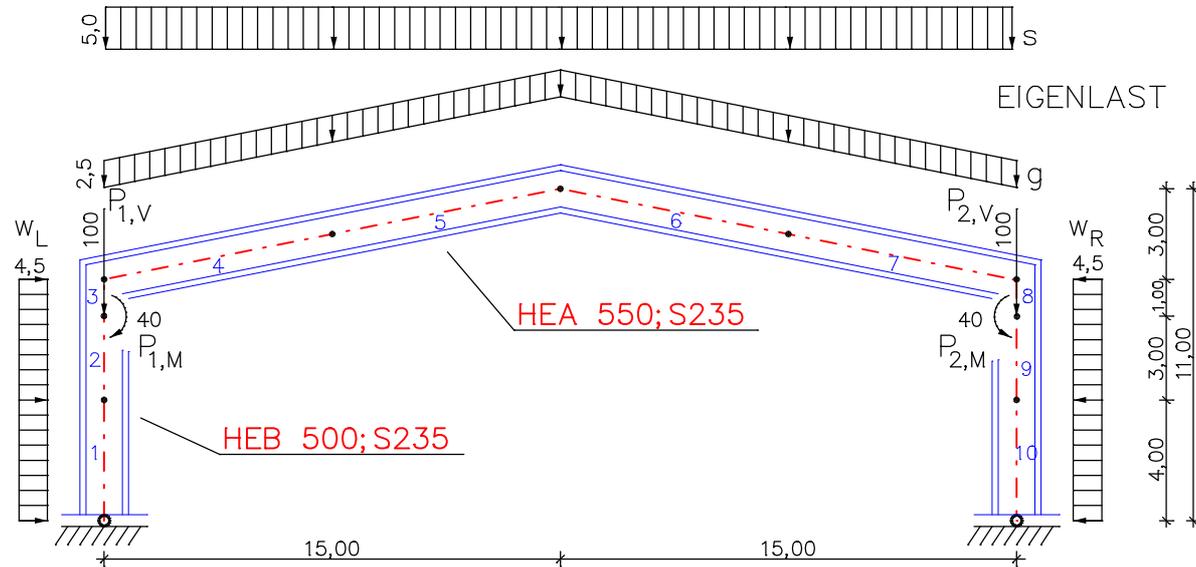
Die Ausnutzung ist definiert als das Verhältnis zwischen der Beanspruchung E_d und - abhängig von der Benutzerauswahl - der elastischen oder plastischen Beanspruchbarkeit R_d eines Querschnitts. Im Abschnitt *Spannungen > Stahlnachweise* des Ergebnisbaums stehen folgende Größen zur Verfügung:

- Ausnutzung der Stäbe für jede einzelne Nachweissituation.
- Maximale Ausnutzung der Stäbe aus allen Nachweissituationen.
- Maximale Ausnutzung der Querschnitte aus allen Nachweissituationen.

Beispiele

Stahlnachweise am Gesamtsystem

Am unten dargestellten Hallenrahmen werden eine Stabwerksanalyse sowie ein Stabilitätsnachweis nach Theorie 2. Ordnung durchgeführt. Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erfolgt plastisch für alle Querschnitte der Klassen 1 und 2, da bei einem elastischen Spannungsnachweis Überschreitungen auftreten.



Statisches System und Abmessungen

Summe der aufgebrachtten Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fz [kN]
1	Eigenlast	0,000	200,250
	Auflagerreaktionen	-0,000	200,250
2	Schnee	0,000	150,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	150,000
3	Wind links	36,000	0,000
	Auflagerreaktionen	36,000	-0,000
4	Wind rechts	-36,000	0,000
	Auflagerreaktionen	-36,000	0,000
5	Kranbahn links	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	0,000	100,000
6	Kranbahn rechts	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	100,000
7	Kranbahn mitte (LF5+LF6)/2	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	100,000
11	Th2+VV1 für My min,rechts;SK.1	32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	32,400	600,338
12	Th2+VV2 für My min,links;SK.1	-32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	-32,400	600,338
13	Th2 für My max,mitte;SK.1	0,000	495,338
	Auflagerreaktionen	0,000	495,338
14	Th2+VV1 für Nx min,rechts;SK.1	32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	32,400	600,338
15	Th2+VV2 für Nx min,links;SK.1	-32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	-32,400	600,338

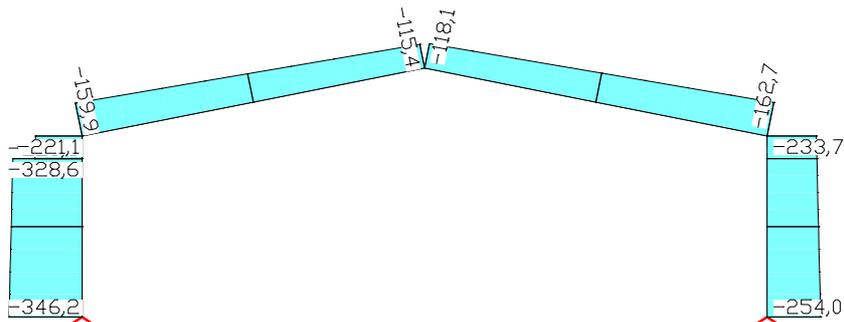
Materialkennwerte

Nr.	Material- Art	E-Modul [MN/m ²]	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m ³]	k _{bx} -a	k _{bx} -e [MN/m ³]	k _{bz} -a	k _{bz} -e	b _x	b _z
1	S235-EN	210000	1,200e-05	78,500	0	0	0	0	1,00	1,00
2	S235-EN	210000	1,200e-05	78,500	0	0	0	0	1,00	1,00

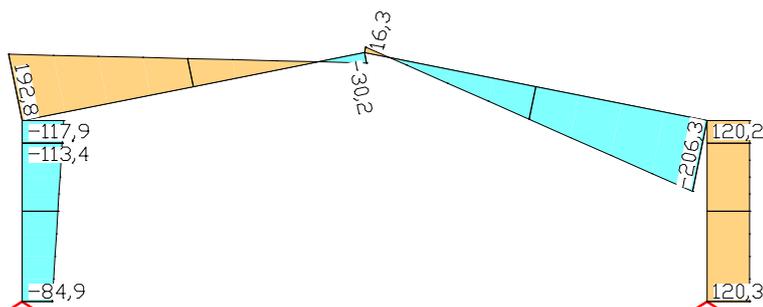
Querschnittswerte

Nr.	1	HEB 500
		A = 2,390e-02 [m ²], I _y = 1,072e-03 [m ⁴]
Nr.	2	HEA 550
		A = 2,120e-02 [m ²], I _y = 1,119e-03 [m ⁴]

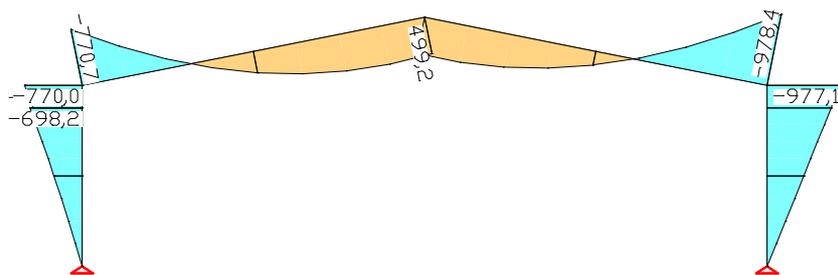
Für die Stabilitätsnachweise nach Theorie 2. Ordnung wurden entsprechend den Kombinationsinformationen zu den jeweiligen Schnittgrößen Lastgruppen zusammengestellt. Aus einem so erzeugten Lastfall 11 unter Berücksichtigung einer Vorverformung von I/200 nach rechts resultieren beispielhaft die folgenden Schnittgrößenverläufe:



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen N_x



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen Q_z



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen M_y

Zur Durchführung der Nachweise sind die Einwirkungen zuzuordnen, wie sie im nachfolgenden Protokoll abgedruckt sind. Das Nachweisprogramm führt die erforderlichen Schnittgrößenkombinationen durch und weist die Querschnittstragfähigkeit nach.

Nachweise nach EN 1993-1-1:2005/A1:2014

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1 und 2 die plastische, für Klasse 3 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen.

Für Querschnitte der Klasse 4 erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten gemäß EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.

Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach EN 1990:2021 kombiniert.

Der Nachweis erfolgt für alle möglichen Kombinationen der Einwirkungen.

Bezeichnungen im Ausdruck

Sigma.x, Sigma.v : Längsspannungen, Vergleichsspannungen gemäß Gl. (6.1).
 Tau.xy, Tau.xz : Schubspannungen aus Querkraft Qz.
 A : Querschnittsfläche.
 Iy, Iz, Iyz : Trägheitsmomente.
 Aqz : Schubfläche für die Abtragung von Qz.
 Wqz : Widerstandsgröße der ext. Schubspannung aus Qz.
 y, z : Ort im Querschnittspolygon [m].

Spannungsermittlung

Die Längs- und Schubspannungen werden für polygonal berandete, homogene Querschnitte infolge Längskraft, Biegemoment und Querkraft berechnet. Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode. Die Berechnungspunkte für alle Spannungen sind Randpunkte des Querschnitts.

Bei folgenden Querschnitten werden die Schubspannungen aus Querkraft über die Querschnittsbreite gemittelt.

Querschnitt	Querschnitt	Querschnitt
1 HEB 500	2 HEA 550	-

Querschnittsklassifizierung

Die Klassifizierung erfolgt für Listenprofile und Parameterquerschnitte nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2. T-Profile werden wie einseitig gestützte Flansche behandelt. Benutzerdefinierte Polygonquerschnitte werden generell in Klasse 3 eingestuft.

Plastische Querschnitttragfähigkeit

Bei doppelt symmetrischen I- und H-Profilen mit konstanter Flanschdicke sowie bei rechteckigen Kastenquerschnitten erfolgt die Berechnung der plastischen Tragfähigkeit nach EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.3 bis 6.2.10. Falls nicht bereits eine einzelne Einwirkung die plastische Tragfähigkeit überschreitet, wird die Interaktion der Schnittgrößen untersucht. Dabei wird gemäß Kapitel 6.2.10 (2) die Beanspruchbarkeit nicht abgemindert, wenn die Querkrafteinwirkung die Hälfte der plastischen Querkrafttragfähigkeit nicht überschreitet. Der Beiwert eta nach Kapitel 6.2.6 (3) wird zu 1 angenommen.

Für alle anderen Profile werden die plastischen Grenzschnittgrößen durch Integration der Spannungen und Gleichgewichtsiteration am polygonal berandeten Querschnitt ermittelt. Dabei wird die Interaktion aller Schnittgrößen berücksichtigt und die Ausnahme für geringe Querkrafteinwirkungen nach EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.10 (2), nicht genutzt.

Zur Vereinfachung wird bei der Integration von einer in der zugehörigen Schubfläche konstanten Schubspannung $\tau = Q_z / A_{qz}$ ausgegangen.

Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode am Querschnittsrand.

Als Fließbedingung gilt die Huber-v. Mises-Bedingung nach Gl. (6.1).

Teilsicherheitsbeiwerte für Baustahl

	gamma.M0
Ständige und vorüberg. Komb.	1,00
Außergew. Kombination	1,00
Besondere Kombination	1,00

Charakteristische Materialkennwerte

Streckgrenzen für Baustahl nach EN 1993-1-1, Tab. 3.1, für $t \leq 40$ mm [MN/m²]. Grenzspannungen gemäß Gl. (6.19) und Gl. (6.42).

		Ständige K.		Außergew. K.		Besondere K.	
Material	fyk	Sigma.Rd	Tau.Rd	Sigma.Rd	Tau.Rd	Sigma.Rk	Tau.Rk
S235-EN	235	235,00	135,68	235,00	135,68	235,00	135,68

Querschnittswerte

Querschnitt	Material	A[mm ²]	Aqz[mm ²]	Iy[m ⁴]	Iz[m ⁴]	Iyz[m ⁴]
1 HEB 500	S235-EN	23900	5997	1,0720e-03	1,2620e-04	0,0000e+00
2 HEA 550	S235-EN	21200	5776	1,1190e-03	1,0820e-04	0,0000e+00

EN 1993-1-1 Einwirkungen

Standard Bemessungsgruppe

G - Eigenlast

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lastfälle

 1 Eigenlast

QN - Nutzlast, Verkehrslast

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten
 Fahrzeugverkehr - Kategorie G: Fahrzeuggewicht über 30 kN bis zu 160 kN
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,7 / 0,5 / 0,3

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 5 Kranbahn links
- 6 Kranbahn rechts
- 7 Kranbahn mitte (LF5+LF6)/2

QS - Schnee- und Eislast

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten
 Schneelasten - Orte in CEN-Mitgliedsstaaten niedriger als 1000 m ü. NN
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,5 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 2 Schnee

QW - Windlast

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten
 Windlasten
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 3 Wind links
- 4 Wind rechts

Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen

Lastfälle

- 11 Th2+VV1 für My min, rechts;SK.1
- 12 Th2+VV2 für My min, links;SK.1
- 13 Th2 für My max, mitte;SK.1
- 14 Th2+VV1 für Nx min, rechts;SK.1
- 15 Th2+VV2 für Nx min, links;SK.1

1. Ständige und vorübergehende Situation

Endzustand

- G - Eigenlast
- QN - Nutzlast, Verkehrslast
- QS - Schnee- und Eislast
- QW - Windlast

1. Quasi-ständige Situation

Endzustand

- G - Eigenlast
- QN - Nutzlast, Verkehrslast
- QS - Schnee- und Eislast
- QW - Windlast

1. Besondere Situation

Endzustand

Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen

Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Klasse Maßgebende Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.
 3+ Die Klassen 1 und 2 wurden nicht untersucht, da wegen zulässiger elastischer Ausnutzung kein plastischer Nachweis erforderlich war.
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung Ed und der Beanspruchbarkeit Rd. Plastische Beanspruchbarkeit nach Kap. 6.2.10 wird mit "!" markiert.
 SK, BK Ständige und vorüberg. Komb., Besondere Kombination

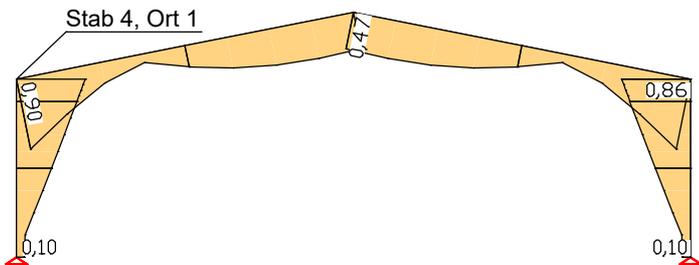
Stab	Qu.	Ort	Komb.	Klasse	Ausnutzung	
					elastisch	plastisch
1	1	1	BK.1	1	0,14	0,10!
		2	BK.1	1	0,20	0,11!
		3	BK.1	1	0,31	0,22!
		4	BK.1	1	0,43	0,33!
		5	BK.1	1	0,55	0,44!
2	1	1	BK.1	1	0,55	0,44!
		2	BK.1	1	0,64	0,52!
		3	BK.1	1	0,73	0,60!
		4	BK.1	1	0,82	0,68!
		5	BK.1	1	0,92	0,76!

Stab	Qu.	Ort	Komb.	Klasse	Ausnutzung	
					elastisch	plastisch
3	1	1	BK.1	1	0,89	0,76!
		2	BK.1	1	0,92	0,78!
		3	BK.1	1	0,95	0,81!
		4	BK.1	1	0,98	0,84!
		5	BK.1	1	1,01	0,86!
4	2	1	BK.1	1	1,04	0,90!
		2	BK.1	1	0,66	0,56!
		3	BK.1	1	0,33	0,27!
		4	BK.1	2	0,15	0,11!
		5	BK.1	1	0,33	0,27!
5	2	1	BK.1	1	0,33	0,27!
		2	BK.1	1	0,47	0,39!
		3	BK.1	1	0,54	0,46!
		4	BK.1	1	0,57	0,49!
		5	BK.1	1	0,55	0,47!
6	2	1	BK.1	1	0,55	0,47!
		2	BK.1	1	0,57	0,49!
		3	BK.1	1	0,54	0,46!
		4	BK.1	1	0,47	0,39!
		5	BK.1	1	0,33	0,27!
7	2	1	BK.1	1	0,33	0,27!
		2	BK.1	2	0,15	0,11!
		3	BK.1	1	0,33	0,27!
		4	BK.1	1	0,66	0,56!
		5	BK.1	1	1,04	0,90!
8	1	1	BK.1	1	1,01	0,86!
		2	BK.1	1	0,98	0,84!
		3	BK.1	1	0,95	0,81!
		4	BK.1	1	0,92	0,78!
		5	BK.1	1	0,89	0,76!
9	1	1	BK.1	1	0,92	0,76!
		2	BK.1	1	0,82	0,68!
		3	BK.1	1	0,73	0,60!
		4	BK.1	1	0,64	0,52!
		5	BK.1	1	0,55	0,44!
10	1	1	BK.1	1	0,55	0,44!
		2	BK.1	1	0,43	0,33!
		3	BK.1	1	0,31	0,22!
		4	BK.1	1	0,20	0,11!
		5	BK.1	1	0,14	0,10!

Max. Querschnittsausnutzung

Klasse Maßgebende Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung Ed und der Beanspruchbarkeit Rd.
 x Abstand vom Stabanfang [m].
 SK,BK Ständige und vorüberg. Komb., Besondere Kombination

Querschnitt	Material	Stab	Ort	x[m]	Komb.	Klasse	Ausnutzung
1 HEB 500	S235-EN	3	5	1,00	BK.1	1	0,86
2 HEA 550	S235-EN	4	1	0,00	BK.1	1	0,90



Plastische Ausnutzungen

Nachfolgend wird zusätzlich ein Auszug aus dem ausführlichen Protokoll für Stab 4 abgedruckt. Daraus wird ersichtlich, dass an diesem Ort die elastische Querschnittstragfähigkeit überschritten und deshalb der plastische Nachweis notwendig wurde.

Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Klasse Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.
 S, F, W Querschnittsteil bei Listenprofilen: Steg, Flansch, Winkel.
 A.eff, I.eff Effektive Querschnittswerte Klasse 4 gemäß EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.
 e.z Verschiebung des Schwerpunkts von A.eff gegen den Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts zur Bestimmung des Zusatzmoments nach Gl. (6.4).
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung Ed und der Beanspruchbarkeit Rd.
 x Abstand vom Stabanfang [m].

Stab 4: x = 0,00 m (Stablänge 7,65 m)
 Querschnitt 2: HEA 550, S235-EN, fyk=235 MN/m², A=21200 mm²
 Steg : c = 438,0 mm, t = 12,5 mm, c/t = 35,04
 Flansch: c = 116,7 mm, t = 24,0 mm, c/t = 4,86

1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QN+QS+QW

Kein Schnittkraftsatz dieser Kombination war maßgebend.

1. Besondere Kombination (BK.1): Fd

Maßgebende Schnittgrößen aus 5 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	Qz [kN]	My [kNm]	Klasse				S	F	F	F
2	-162,73	206,31	-978,36	1	1	1	1	1	1	1	1

Lastfallkombination des maßgebenden Schnittkraftsatzes

Satz Kombination
2 : L12

Normalspannungen [MN/m²]

Min. Sigma.x	: -243,74	Klasse	: 1
Sigma.x (Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,2
Sigma.x (My)	: -236,07	Qu.punkt y [m]	: 0,150
		z [m]	: 0,270

Max. Sigma.x	: 228,39	Klasse	: 1
Sigma.x (Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,2
Sigma.x (My)	: 236,07	Qu.punkt y [m]	: -0,150
		z [m]	: -0,270

Schubspannungen [MN/m²]

Ext. Tau.xy	: -5,53	Klasse	: 1
Tau.xy (Qz)	: -5,53	Situation	: BK.1,2
		Qu.punkt y [m]	: -0,033
		z [m]	: 0,246

Ext. Tau.xz	: 34,05	Klasse	: 1
Tau.xz (Qz)	: 34,05	Situation	: BK.1,2
		Qu.punkt y [m]	: 0,006
		z [m]	: -0,000

Vergleichsspannung [MN/m²]

Max. Sigma.v	: 243,90	Klasse	: 1
Sigma.x (Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,2
Sigma.x (My)	: -236,07	Qu.punkt y [m]	: 0,045
Tau.xy (Qz)	: 5,13	z [m]	: 0,270
Tau.xz (Qz)	: 0,00		

Nachweis der Beanspruchbarkeit und der Ausnutzung

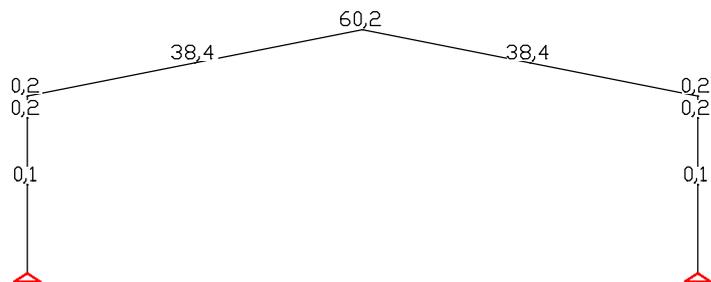
Elastisch		Ed	Rd		
Nx [kN]	: -162,73	-156,79		Ausnutzung	: 1,04 > 1
Qz [kN]	: 206,31	198,78		Klasse	: 1
My [kNm]	: -978,36	-942,65		Situation	: BK.1,2

Plastisch		Ed	Rd	Kap. 6.2.10	
Nx [kN]	: -162,73	4982,00		Ausnutzung	: 0,90
Qz [kN]	: 206,31	1139,15		Klasse	: 1
My [kNm]	: -978,36	1086,13		Situation	: BK.1,2

Die plastische Ausnutzung ist maßgebend.

Begrenzung der Verformung

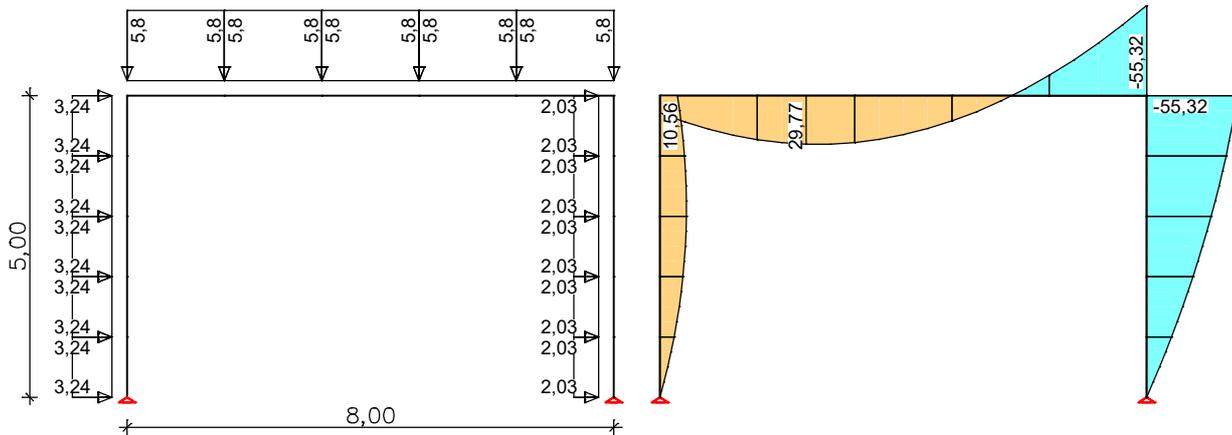
Die maximalen Durchbiegungen $uz.max$ unter der quasi-ständigen Situation sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die größte Durchbiegung in Rahmenmitte beträgt 1/498 der Stützweite.



Maximale Durchbiegungen $uz.max$ unter der 1. quasi-ständigen Situation [mm]

Biegedrillknicknachweis Zweigelenrahmen

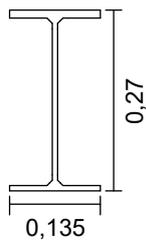
Die Eingangswerte entsprechen dem Beispiel 2b Seite 79 aus dem Aufsatz von W. Martin (1996).



Protokollausdruck:

Biegedrillknicknachweis nach EN 1993-1-1:2014

Querschnitt: IPE 270



$h = 270,0 \text{ mm}$
 $b = 135,0 \text{ mm}$
 $s = 6,6 \text{ mm}$
 $t = 10,2 \text{ mm}$
 $r = 15,0 \text{ mm}$

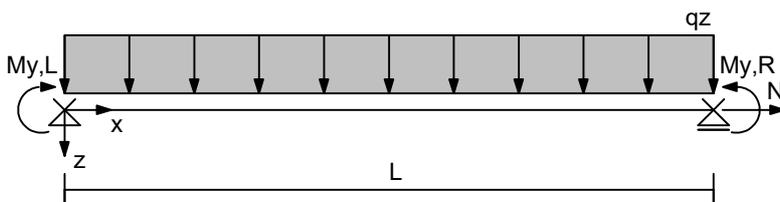
$A = 45,9 \text{ cm}^2$ $I_y = 5790,0 \text{ cm}^4$ $I_z = 420,0 \text{ cm}^4$
 $I_T = 16,0 \text{ cm}^4$ $I_{\omega} = 70580 \text{ cm}^6$
 $i_y = 11,23 \text{ cm}$ $i_z = 3,02 \text{ cm}$ $i_p = 11,63 \text{ cm}$

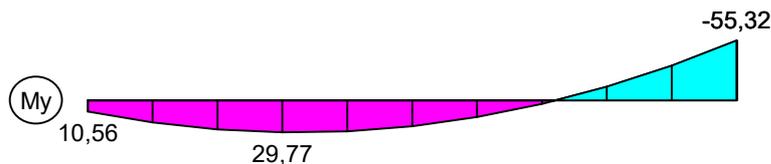
Material: S235-EN

$f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$
 $E\text{-Modul} = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $G\text{-Modul} = 81000 \text{ N/mm}^2$
 $\gamma_{M1} = 1,00$

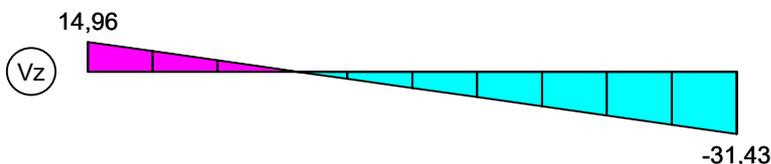
Einwirkungen in z-Richtung

$L = 8,00 \text{ m}$ $N_d = 0,00 \text{ kN}$ $q_{z,d} = 5,80 \text{ kN/m}$
 $M_{y,d,links} = 10,56 \text{ kNm}$ $M_{y,d,rechts} = -55,32 \text{ kNm}$
 Lastangriffspunkt Schubmittelpunkt $\Rightarrow z_p = 0,00 \text{ cm}$
 Die Stabenden sind gabelgelagert.

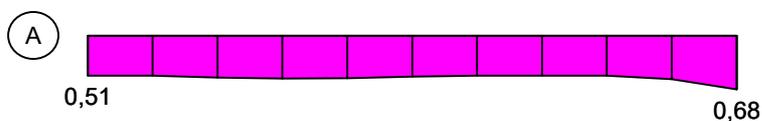




Max $M_{y,d} = 29,77$ kNm, Min $M_{y,d} = -55,32$ kNm



Max $V_{z,d} = 14,96$ kN, Min $V_{z,d} = -31,43$ kN



Maximale Ausnutzung = 0,68

Ideale Verzweigungslast $N_{cr,y}$ für Knicken um die y-Achse

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad I_y = 5790,0 \text{ cm}^4 \quad L_{cr,y} = 8,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,y} = 1875,07 \text{ kN}$$

Ideale Verzweigungslast $N_{cr,z}$ für Knicken um die z-Achse

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad I_z = 420,0 \text{ cm}^4 \quad L_{cr,z} = 8,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,z} = 136,02 \text{ kN}$$

Verzweigungslastfaktor η_{cr} für das ideale Biegedrillknickmoment M_{cr}

$$\eta_{cr} = 1,97$$

Maßgebender Nachweis an der Stelle $x = 8,00$ m

Bemessungswerte der Einwirkungen

$$N_{Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = -31,43 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -55,32 \text{ kNm}$$

$$V_{y,Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

⇒ Querschnittsklasse 1

Plastische Beanspruchbarkeiten nach Tabelle 6.7

$$N_{Rk} = \pm 1078,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = \pm 113,74 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = \pm 22,78 \text{ kNm}$$

Ideales Biegedrillknickmoment M_{cr}

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

$$M_{cr} = 1,97 \cdot (-55,32) = -108,73 \text{ kNm}$$

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2.3

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \leq 1 \quad (6.57)$$

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

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

mit $\bar{\lambda}_{LT} = 1,02$

$\bar{\lambda}_{LT0} = 0,40$

$\beta = 0,75$

$\alpha_{LT} = 0,34$

nach Tabellen 6.3 und 6.5

$M_{cr} = -108,73 \text{ kNm}$

$W_{pl,y} = -4,8400e-4 \text{ m}^3$

nach Tabelle 6.7

$$\chi_{LT} = 0,69$$

Modifikation nach Gleichung (6.58)

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1 \quad (6.58)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1$$

$f = 0,96$

$k_c = 0,91$

nach Tabelle 6.6

$$\chi_{LT,mod} = 0,71$$

Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.54)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.55)$$

mit $M_{Ed} = -55,32 \text{ kNm}$

$W_y = 4,8400e-4 \text{ m}^3$

$\gamma_{M1} = 1,00$

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

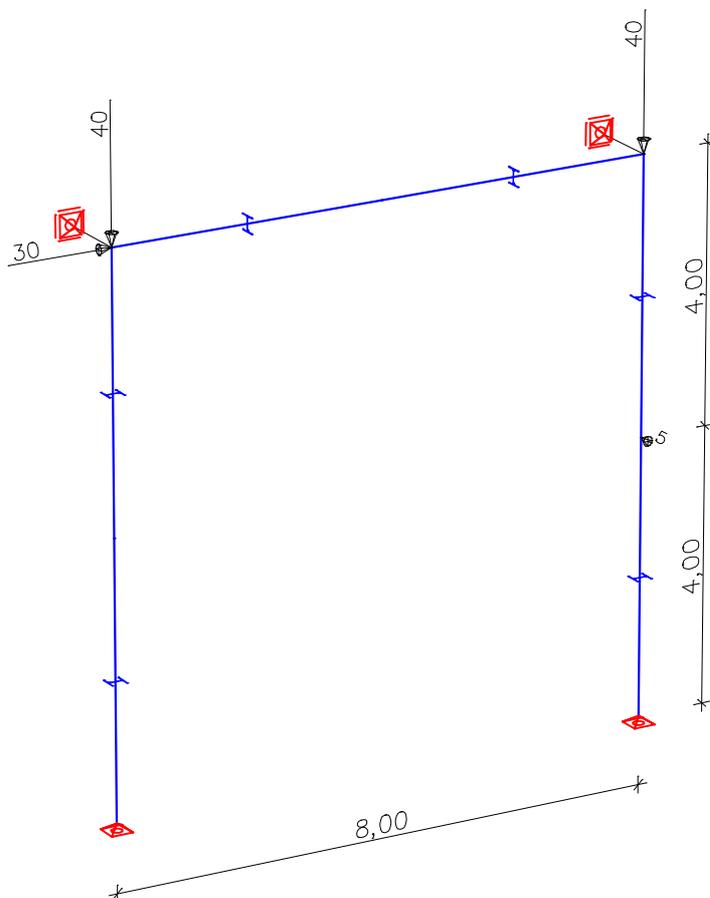
$\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,71$

$$M_{Ed} / M_{b,Rd} = 0,68 \leq 1$$

Nachweis erfüllt !

Biegedrillknicknachweis Rahmenstiel mit zweiachsiger Biegung und Normalkraft

Die Eingangswerte entsprechen dem Beispiel 7c (Nachweis mit zugehörigen Schnittgrößen) Seite 262 aus dem Buch von J. Meister (2002).



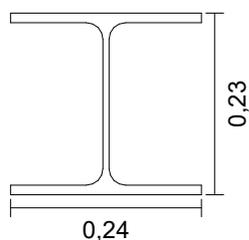
Es wird der rechte Rahmenstiel nachgewiesen.

$\gamma_M = 1,00$ (Wird im Beispiel zur Vereinfachung angenommen)

Protokollausdruck:

Biegedrillknicknachweis nach EN 1993-1-1:2014

Querschnitt: HEA 240



$h = 230,0 \text{ mm}$
 $b = 240,0 \text{ mm}$
 $s = 7,5 \text{ mm}$
 $t = 12,0 \text{ mm}$
 $r = 21,0 \text{ mm}$

$A = 76,8 \text{ cm}^2$

$I_T = 41,7 \text{ cm}^4$

$i_y = 10,05 \text{ cm}$

$I_y = 7760,0 \text{ cm}^4$

$I_{\omega} = 328500 \text{ cm}^6$

$i_{\omega} = 6,01 \text{ cm}$

$I_z = 2770,0 \text{ cm}^4$

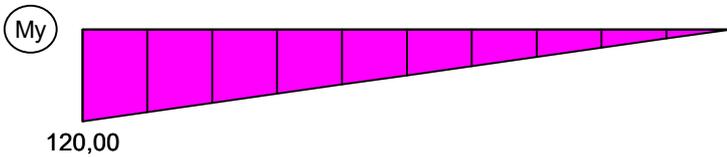
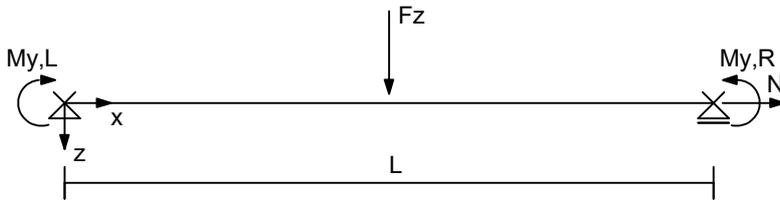
$i_p = 11,71 \text{ cm}$

Material: S235-EN

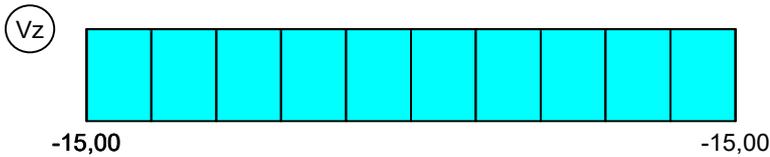
$f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$
 $E\text{-Modul} = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $G\text{-Modul} = 81000 \text{ N/mm}^2$
 $\gamma_{M1} = 1,00$

Einwirkungen in z-Richtung

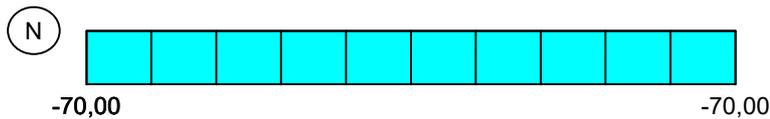
$L = 8,00 \text{ m}$ $N_d = -70,00 \text{ kN}$ $F_{z,d} = 0,00 \text{ kN}$
 $M_{y,d,links} = 120,00 \text{ kNm}$ $M_{y,d,rechts} = 0,00 \text{ kNm}$
 Lastangriffspunkt Schubmittelpunkt $\Rightarrow z_p = 0,00 \text{ cm}$
 Die Stabenden sind gabelgelagert.



Max $M_{y,d} = 120,00 \text{ kNm}$



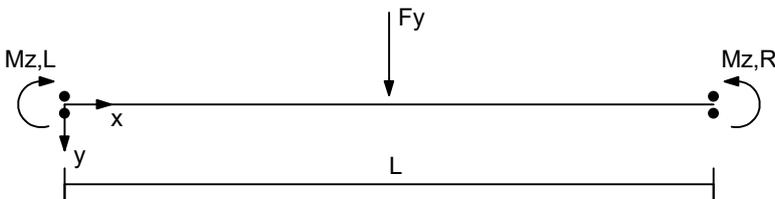
Max $V_{z,d} = -15,00 \text{ kN}$

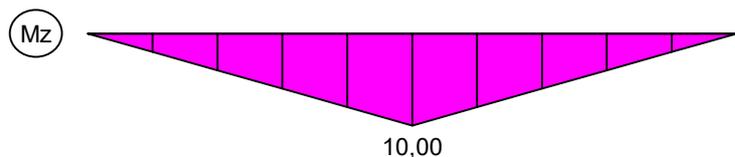


Min $N_{,d} = -70,00 \text{ kN}$

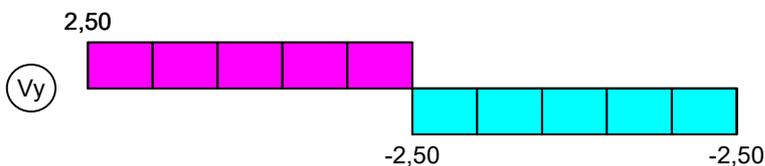
Einwirkungen in y-Richtung

$L = 8,00 \text{ m}$ $F_{y,d} = 5,00 \text{ kN}$
 $M_{z,d,links} = 0,00 \text{ kNm};$ $M_{z,d,rechts} = 0,00 \text{ kNm}$

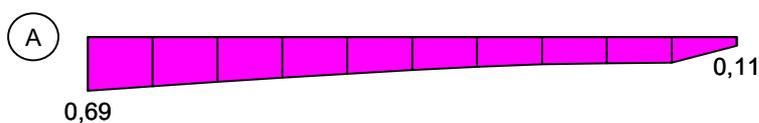




Max $M_{z,d} = 10,00$ kNm



Max $V_{y,d} = 2,50$ kN, Min $V_{y,d} = -2,50$ kN



Maximale Ausnutzung = 0,69

Ideale Verzweigungslast $N_{cr,y}$ für Knicken um die y-Achse

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad I_y = 7760,0 \text{ cm}^4 \quad L_{cr,y} = 8,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,y} = 2513,05 \text{ kN}$$

Ideale Verzweigungslast $N_{cr,z}$ für Knicken um die z-Achse

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad I_z = 2770,0 \text{ cm}^4 \quad L_{cr,z} = 8,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,z} = 897,05 \text{ kN}$$

Verzweigungslastfaktor η_{cr} für das ideale Biegedrillknickmoment M_{cr}

$$\eta_{cr} = 3,03$$

Maßgebender Nachweis an der Stelle $x = 0,00$ m

Bemessungswerte der Einwirkungen

$$N_{Ed} = -70,00 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = -15,00 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = 120,00 \text{ kNm}$$

$$V_{y,Ed} = 2,50 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

⇒ Querschnittsklasse 1

Plastische Beanspruchbarkeiten nach Tabelle 6.7

$$N_{Rk} = \pm 1804,80 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = \pm 174,99 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = \pm 82,65 \text{ kNm}$$

Abminderungsbeiwerte für Biegeknicken nach Kapitel 6.3.1

$$\chi = \frac{1}{\Theta + \sqrt{\Theta^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (6.49)$$

$$\Theta = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

mit	$\bar{\lambda}_y = 0,85$	$\bar{\lambda}_z = 1,42$	
	$\alpha_y = 0,34$	$\alpha_z = 0,49$	nach Tabellen 6.1 und 6.2
	$N_{cr,y} = 2513,05 \text{ kN}$	$N_{cr,z} = 897,05 \text{ kN}$	

$$\chi_y = 0,69$$

$$\chi_z = 0,34$$

Nachweis gegen Biegeknicken nach Kapitel 6.3.1

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.46)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.47)$$

mit	$N_{Ed} = -70,00 \text{ kN}$	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
	$A = 76,80 \text{ cm}^2$	$\gamma_{M1} = 1,00$
	$\chi_y = 0,69$	$\chi_z = 0,34$

$$N_{Ed} / N_{b,y,Rd} = 0,06 \leq 1$$

$$N_{Ed} / N_{b,z,Rd} = 0,11 \leq 1$$

Nachweis erfüllt !**Ideales Biegedrillknickmoment M_{cr}**

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

$$M_{cr} = 3,03 \cdot 120,00 = 363,60 \text{ kNm}$$

Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2.3

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \leq 1 \quad (6.57)$$

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

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

mit	$\bar{\lambda}_{LT} = 0,69$	$\bar{\lambda}_{LT0} = 0,40$	
	$\beta = 0,75$	$\alpha_{LT} = 0,34$	nach Tabellen 6.3 und 6.5
	$M_{cr} = 363,60 \text{ kNm}$	$W_{pl,y} = 7,4462 \text{e-4 m}^3$	nach Tabelle 6.7

$$\chi_{LT} = 0,87$$

Modifikation nach Gleichung (6.58)

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1 \quad (6.58)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1$$

$$f = 0,88$$

$$k_c = 0,75$$

nach Tabelle 6.6

$$\chi_{LT,mod} = 0,99$$

Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.54)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.55)$$

mit $M_{Ed} = 120,00 \text{ kNm}$ $W_y = 7,4462e-4 \text{ m}^3$
 $\gamma_{M1} = 1,00$ $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
 $\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,99$

$$M_{Ed} / M_{b,Rd} = 0,69 \leq 1$$

Nachweis erfüllt !

Interaktionsfaktoren nach Anhang B

Äquivalente Momentenbeiwerte nach Tabelle B.3

$$\psi_y = 0,00$$

$$\psi_z = 0,00$$

$$\alpha_{h,z} = 0,00$$

$$C_{my} = 0,60$$

$$C_{mz} = 0,90$$

$$C_{mLT} = 0,60$$

Interaktionsfaktoren nach Tabelle B.1 für verdrehsteife Bauteile

Für I-Profile und rechteckige Hohlquerschnitte unter Druck und einachsiger Biegung $M_{y,Ed}$ darf $k_{zy} = 0$ angenommen werden

$$k_{yy} = 0,62$$

$$k_{yz} = 0,63$$

$$k_{zy} = 0,00$$

$$k_{zz} = 1,04$$

Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.3

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.62)$$

mit $N_{Ed} = -70,00 \text{ kN}$ $M_{y,Ed} = 120,00 \text{ kNm}$ $M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$
 $N_{Rk} = -1804,80 \text{ kN}$ $\Delta M_{y,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$ $\Delta M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$
 $\chi_y = 0,69$ $M_{y,Rk} = 174,99 \text{ kNm}$ $M_{z,Rk} = 82,65 \text{ kNm}$
 $\chi_z = 0,34$ $k_{yy} = 0,62$ $k_{yz} = 0,63$
 $\gamma_{M1} = 1,00$ $k_{zy} = 0,00$ $k_{zz} = 1,04$
 $\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,99$

$$0,06 + 0,43 + 0,00 = 0,49 \leq 1 \quad (6.61)$$

$$0,11 + 0,00 + 0,00 = 0,11 \leq 1 \quad (6.62)$$

Nachweis erfüllt !

Literaturhinweise

Auslegungen des Normenausschusses Bauwesen (NABau)
zur DIN EN 1993-1-1. Stand: April 2017

BS EN 1990/NA:2009-06

UK National Annex to BS EN 1990:2002+A1:2005, Eurocode: Basis of structural design
Herausgeber: British Standards Institution (BSI).
BSI Group, London 2009

BS EN 1993-1-1/NA:2008-12

UK National Annex to BS EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-1 : General rules and rules for buildings
Herausgeber: British Standards Institution (BSI).
BSI Group, London 2008

DIN EN 1990/NA:2010+A1:2012-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Beuth Verlag, Berlin 2012.

DIN EN 1993-1-1/NA:2022-10

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Beuth Verlag, Berlin 2022.

EN 1990:2021

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2021.

EN 1991-1-1:2002+AC:2009

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1993-1-1:2005+A1:2014

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2014.

EN 1993-1-3:2006+AC:2009

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2009.

EN 1993-1-5:2006+AC:2009

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2009.

EN 10025-2:2019-10

Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2019.

Gardner, L.; Nethercot, D.

Designers' Guide to EN 1993-1-1 –
Eurocode 3: Design of Steel Structures – General Rules and Rules for Buildings.
Thomas Telford Publishing, London 2005.

Johannsson, J.; Marquoi, R.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Beg, D.

Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-5 "Plated Structural Elements".
JRC – ECSS Joint Report.
First Edition, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 2007.

Martin, W.

ζ - Werte für den Biegedrillknicknachweis von I-Profilen.
Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 1, S. 69-83.
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Leipzig 1996.

Meister, J.

Nachweispraxis Biegeknicken und Biegedrillknicknachweis.
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2002.

ÖNORM B 1990-1:2016-01

Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung – Teil 1: Hochbau –
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 und nationale Ergänzungen.
Herausgeber: Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien.
Austrian Standards plus GmbH, Wien 2016.

ÖNORM B 1993-1-1:2017-11

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau –
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
Herausgeber: Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
Austrian Standards plus GmbH, Wien 2017.

Petersen, C.

Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.
Vieweg Verlag, Braunschweig 1980.

Roik, K.

Vorlesungen über Stahlbau.
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1978.

Simoes da Silva, Luis; Simoes, Rui; Gervasio, Helena

Design of Steel Structures.
Herausgeber: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.
1. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2010.

SS EN 1990:2019-01

BFS 2011:10 with amendments up to BFS 2019:1 (EKS 11).
Boverket mandatory provisions amending the board's mandatory provisions and general recommendations (2011:10) on
the application of European design standards (Eurocodes).
Section B – Application of EN 1990 – Basis of structural design.
Herausgeber: Swedish National Board of Housing, Building and Planning (Boverket). Boverket, Karlskrona 2019.

SS EN 1993-1-1:2019-01

BFS 2011:10 with amendments up to BFS 2019:1 (EKS 11).
Boverket mandatory provisions amending the board's mandatory provisions and general recommendations (2011:10) on
the application of European design standards (Eurocodes).
Section E – Application of EN 1993 – Design of steel structures.
Herausgeber: Swedish National Board of Housing, Building and Planning (Boverket).
Boverket, Karlskrona 2019.

InfoGraph GmbH

Kackertstraße 10

D-52072 Aachen

Tel.: +49 241 889980

Fax: +49 241 8899888

info@infograph.de

www.infograph.de

InfoGraph 
Software für die Tragwerksplanung