



die dahinter liegende Parameterauswahl kenntlich machen.



Rechenlaufsteuerung / Material / Geometrie

Im ersten Registerblatt werden die wesentlichen Parameter zum Ablauf der Berechnung festgelegt. Dazu gehören die Materialangaben, die Materialsicherheitsbeiwerte, die Querschnittsgeometrie. Weiterhin können die zu führenden Nachweise ausgewählt werden. Der Querschnitt wird zur Info maßstäblich am Bildschirm dargestellt.



Bemessungsschnittgrößen

Die Schnittgrößen werden im zweiten Registerblatt festgelegt und können entweder 'per Hand' eingegeben oder aus einem 4H-Stabwerksprogramm importiert werden.



Tabellarische Ergebnisübersicht

Im dritten Registerblatt werden die Ergebnisse (Ausnutzungen) lastfallweise und detailliert im Überblick dargestellt.



Konturendarstellung von Ergebnissen

Im vierten Registerblatt werden ausgewählte Ergebnisse als Konturenplot dargestellt.



nationaler Anhang

Weiterhin ist zur vollständigen Beschreibung der Berechnungsparameter der dem Eurocode zuzuordnende nationale Anhang zu wählen.

Über den [NA-Button](#) wird das entsprechende Eigenschaftsblatt aufgerufen.



Ausdrucksteuerung

Im Eigenschaftsblatt, das nach Betätigen des [Druckeinstellungen](#)-Buttons erscheint, wird der Ausgabeumfang der Druckliste festgelegt.



Druckliste einsehen

Das Statikdokument kann durch Betätigen des [Visualisierungs](#)-Buttons am Bildschirm eingesehen werden.



Ausdruck

Über den [Drucker](#)-Button wird in das Druckmenü gewechselt, um das Dokument auszudrucken. Hier werden auch die Einstellungen für die Visualisierung vorgenommen.



Planbearbeitung

Über den [Pläne](#)-Button wird das [pcae](#)-Programm zur Planbearbeitung aufgerufen. Der aktuelle Querschnitt wird im [pcae](#)-Planerstellungsmodule dargestellt, kann dort weiterbearbeitet, geplottet oder im DXF-Format exportiert werden.



Onlinehilfe

Über den [Hilfe](#)-Button wird die kontextsensitive Hilfe zu den einzelnen Registerblättern aufgerufen.



Eingabe beenden

Das Programm kann mit oder ohne Datensicherung verlassen werden. Bei Speichern der Daten wird die Druckliste aktualisiert und in das globale Druckdokument eingefügt.

Berechnungseinstellungen

im Register 1 (s. [Eingabeoberfläche](#)) werden die allgemeinen Einstellungen der Berechnung festgelegt.



Material

Der Querschnitt kann aus Stahl oder Aluminium bestehen.

☒ Stahl

☐ Aluminium

Stahlsorte

S355

☐ Vorgabe

Kennung

Da die Beschreibung der Stahlparameter für eine Berechnung nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Stahlsorten** verwiesen.

Aluminium

☐ Stahl

☒ Aluminium

Legierung

3004 H16

☐ Vorgabe

Kennung

Aktuell werden folgende Aluminiumlegierungen (typisiert in EC 9-1-1, 3.2.2) vorgehalten

Knetlegierungen für Bleche, Bänder und Platten (s. Tab. 3.2a)

- EN-AW 3004
- EN-AW 3005
- EN-AW 3103
- EN-AW 5005 / 5005A
- EN-AW 5052
- EN-AW 5049
- EN-AW 5454
- EN-AW 5754
- EN-AW 5083
- EN-AW 6061
- EN-AW 6082
- EN-AW 7020
- EN-AW 8011A

Knetlegierungen für Strangpressprofile, stranggepresste Rohre, Stangen und gezogene Rohre (s. Tab. 3.2b)

- EN-AW 5083
- EN-AW 5454
- EN-AW 5754
- EN-AW 6060
- EN-AW 6061
- EN-AW 6063
- EN-AW 6005A
- EN-AW 6082
- EN-AW 7020

Knetlegierungen für Schmiedeerzeugnisse (s. Tab. 3.2c)

- EN-AW 5754
- EN-AW 5083
- EN-AW 6082

Natürlich können die zur Bemessung in diesem Programm verwendeten Parameter verändert und an geeignete Produktnormen angepasst werden.

☒ Vorgabe

Kennung			
0,2%-Dehngrenze	f_o	200.0	N/mm ²
char. Zugfestigkeit	f_u	240.0	N/mm ²
E-Modul	E	70000.0	N/mm ²

Die 'Legierung' steht somit als Synonym für die charakteristischen Werte der 0.2%-Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u sowie den Elastizitätsmodul E, die für die Berechnung verwendet werden.

Zur genaueren Bezeichnung der Legierung steht ein Text-Eingabefeld zur Verfügung.

Materialsicherheitsbeiwerte

Für den Spannungsnachweis n. EC 3-1-1 wird folgender Materialsicherheitsbeiwert verwendet

Materialsicherheit ☒ genormt

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{MO}

Aluminium hat n. EC 9-1-1 folgenden Sicherheitsbeiwert

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{MO}

Die Werte können entweder den entsprechenden Normen (s. Nationaler [Anhang](#)) entnommen oder vom Anwender vorgegeben werden.

Allgemeines

Im Programm 4H-EC3QN besteht die Möglichkeit, die Eingabedaten über die Copy-Paste-Funktion von einem Bauteil in ein anderes desselben Typs zu exportieren.

Dazu ist der aktuelle Datenzustand im abgebenden Bauteil über den Button [Daten exportieren](#) in die Zwischenablage zu kopieren und anschließend über den Button [Daten importieren](#) aus der Zwischenablage in das aktuell geöffnete andere Bauteil zu übernehmen.

Querschnitt

Der Querschnitt kann entweder über den [pcae](#)-eigenen Profilmanager in das Programm importiert oder als parametrisiertes Stahlprofil eingegeben werden.

Ist das [pcae](#)-Programm 4H-QUER, Querschnittswerte, installiert, kann alternativ ein beliebiger Querschnitt erstellt und in das Programm 4H-EC3QN geladen werden.

Um ein Profil aus dem Angebot des [Profilmanagers](#) zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu betätigen.

Das externe Programm wird aufgerufen und ein Profil kann aktiviert werden. Bei Verlassen des Profilmanagers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.

Die hinterlegten Profilparameter können am Bildschirm eingesehen werden, wenn auf [parametrisiertes Stahlprofil](#) umgeschaltet wird.

☒ Profil aus Profilmanager
☐ parametrisiertes Stahlprofil
☐ Profil aus 4H-QUER



Profilname

Zur Definition eines [parametrisierten Stahlprofils](#) ist zunächst die Profilkategorie festzulegen.

In Abhängigkeit davon werden Profilhöhe, Stegdicke sowie ggf. Flanschbreiten und -dicken zur Eingabe angeboten.

Flanschneigungen werden nicht berücksichtigt.

Bei gewalzten Doppel-T-Profilen wird der Ausrundungsradius r zwischen Flansch und Steg bzw. r_2 an den äußeren Flansch-

rändern geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten (Kehlnähte der Dicke a oder durchgeschweißte Stumpfnähte) zusammengefügt sind.
Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

☐ Profil aus Profilmanager

☒ parametrisiertes Stahlprofil

☐ Profil aus ~~4H~~-Quer

Profilklasse

I-Profil

Profilhöhe

h

200.0

mm

Stegdicke

t_w

5.6

mm

Flanschbreite oben

b_{fo}

100.0

mm

Flanschdicke oben

t_{fo}

8.5

mm

Flanschbreite unten

b_{fu}

100.0

mm

Flanschdicke unten

t_{fu}

8.5

mm

☒ gewalztes Profil

Ausrundungsradius

r

12.0

mm

☐ geschweißtes Profil

☐ Profil aus Profilmanager

☐ parametrisiertes Stahlprofil

☒ Profil aus ~~4H~~-Quer

Typ:

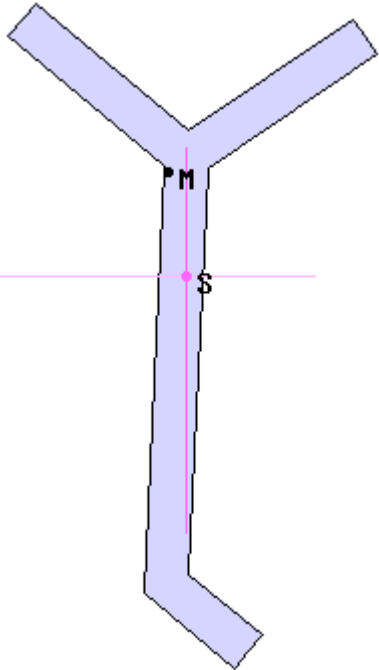
☐ dünnwandig

☐ dickwandig

Ist das **pcae**-Programm **4H-QUER** installiert, wird eine entsprechende Eingabemöglichkeit angeboten.
Zunächst ist festzulegen, ob der Querschnitt **dünnwandig** (über die Mittellinien) oder **dickwandig** (polygonal) beschrieben werden soll.

Das externe Programm wird über den gelb unterlegten **Aktions**-Button mit dieser Vorgabe aufgerufen.
In einer grafischen Oberfläche kann dort der Querschnitt konstruiert oder aus einer Bibliothek geladen und an das aufrufende Programm **4H-EC3QN** übergeben werden.
Der **4H-QUER**-Querschnitt muss den Vorgaben (dünnwandig oder dickwandig) entsprechen.
Weitere Informationen zur Bedienung des Programms **4H-QUER** s. zugehöriges **Handbuch**.

Zur visuellen Kontrolle der Eingabeparameter wird der Querschnitt maßstabsgetreu am Bildschirm dargestellt.
Schwerpunkt S, Schubmittelpunkt M und die Hauptachsen sind markiert.



Spannungsnachweis

Das Programm **4H-EC3QN** bietet drei elastische und drei plastische Spannungsnachweise an.
Die nachweisbezogenen Einschränkungen bzgl. Material, Querschnittstyp oder Schnittgrößen sind am Bildschirm angegeben.
Optional können ein elastischer und ein plastischer Nachweis in einem Rechengang geführt werden.
Die Beschreibung der Nachweise erfolgt **hier**.

Spannungsnachweis
☒ 'Elastisch-Elastisch'
☒ dünnwandiger Querschnitt
nicht Flach-, Rundstahl, 4H-QUER-dickwandig
Ergebnisdarstellung im Konturenplot
☐ Finite-Elemente-Methode (FEM)
Ergebnisdarstellung im Konturenplot
☐ Spannungsebene
ohne Querkraft/Torsion

☒ einschl. c/t-Nachweis
☒ 'Elastisch-Plastisch'
☒ Methode mit Teilschnittgrößen (TSV)
nur 3-Blech-Querschnitte, nicht 4H-QUER
☐ Methode mit Dehnungsiteration (DIV)
nicht Flach-, Rundstahl
Ergebnisdarstellung im Konturenplot
☒ EC 3-1-1, 6.2
nur 2T-, Hohlprofile, nicht 4H-QUER
ohne Wölbkraft

Bedingung für die Gültigkeit der Verfahren ist, dass der Querschnitt nicht beulgefährdet ist. Ein vereinfachter Beulnachweis wird über das c/t-Verhältnis erbracht. Ein entsprechender Nachweis kann deaktiviert werden.

Der Querschnitt kann *elastisch* oder *plastisch* nachgewiesen werden, wobei die Schnittgrößen elastisch berechnet werden.

Die Anwendungsvoraussetzungen für die einzelnen Verfahren sind am Bildschirm in Kurzform und in der folgenden Tabelle ausführlich dargestellt.

	I	C	T	J	L	O	Typi- siert	4H-QUER dickw.	4H-QUER dünnw.	Querkraft Torsion	Wölb- kraft	Aluminium	
elast.	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	-	dünnwandiger Querschnitt *
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Finite-Elemente-Methode (FEM) *
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	Spannungsebene
plast.	x	x	x	x	x	-	-	-	-	x	x	-	Methode mit Teilschnittgrößen (TSV)
	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	-	Methode mit Dehnungsiteration (DIV) *
	x	-	-	-	-	x	x	-	-	x	-	-	EC 3-1-1, 6.2
	x	x	x	x	x	-	-	x	x	Verwölbung möglich			

Zur Info ist zusätzlich angegeben, bei welchen Querschnittstypen Verwölbung auftreten kann.

Mit einem Sternchen sind diejenigen Nachweise gekennzeichnet, deren Ergebnisse als Konturenplot darstellbar sind.

Konturenplot

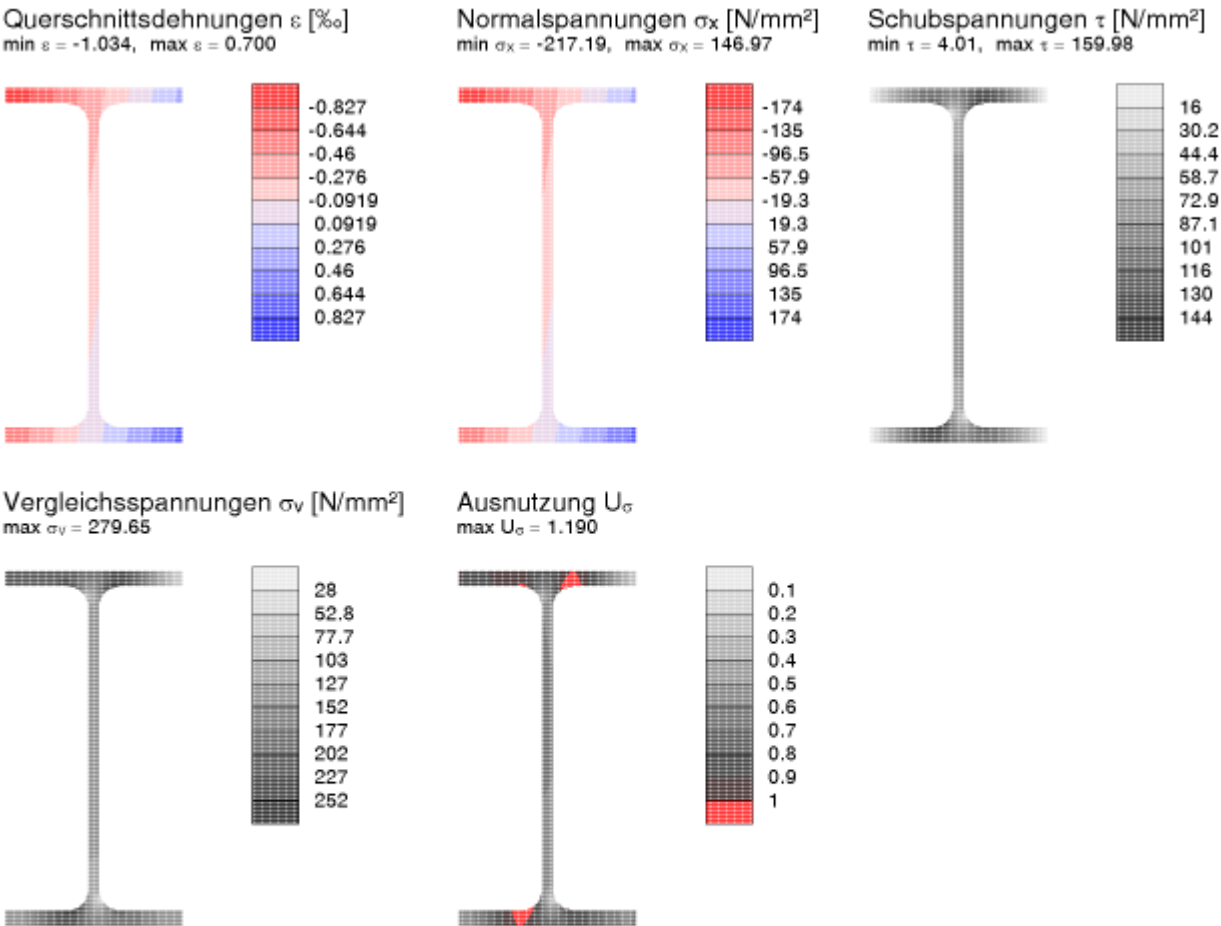
Die Ergebnisse der gekennzeichneten Nachweise können je Lastkombination als Konturenplot und/oder tabellarisch ausgegeben werden.

Ausgabe der Ergebnisse als
☐ Querschnittsdehnungen ϵ
☒ Spannungen σ_x, τ, σ_y
☒ Ausnutzungen U_σ
☒ Endergebnis: max U_σ
einzig Finite-Elemente-Methode

... Konturenplot
☒
☐
☒
☐

... Tabelle
☒
☒
☒
☒

Für jeden Ergebnissatz wird zusätzlich zu den resultierenden Nachweisergebnissen ein eigener Konturenplot ausgegeben, wohingegen die Tabelle um die gewählten Ergebnisspalten erweitert wird.



Dehnung, Spannungen, Ausnutzung

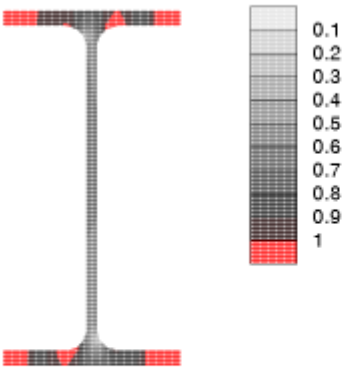
y mm	z mm	ε ‰	σ_x N/mm ²	τ N/mm ²	σ_v N/mm ²	U_σ
100.0	100.0	0.700	146.97	4.97	147.23	0.626
62.4	-91.3	-0.179	-37.68	159.98	279.65	1.190 > 1

y,z: Knotenkoordinaten; σ_x, τ, σ_v : Spannungen; U_σ : Spannungsausnutzung

In den Tabellen können entweder sämtliche Knotenergebnisse (nicht empfehlenswert) oder die je Ergebnisspalte maßgebenden Ergebnissätze (s. [Ausdrucksteuerung](#), [optimierte Tabelle](#)) zeilenweise dargestellt werden. Die Extremalwerte sind markiert.

Wird einzig eine elastische Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt, kann in der schlussendlichen Zusammenfassung die flächenverteilte Ausnutzung des Querschnitts als Resultierende aller Lastkombinationen grafisch und tabellarisch ausgegeben werden.

Maximale Spannungsausnutzung max U_{σ} aus 19 Lk
max max $U_{\sigma} = 1.585$



Maximale Spannungsausnutzung max U_{σ} aus 19 Lk

y mm	z mm	ϵ ‰	σ_x N/mm ²	τ N/mm ²	σ_y N/mm ²	U_{σ}
100.0	100.0	-1.773	-372.42	0.82	372.42	1.585 > 1

y,z: Knotenkoordinaten; ϵ : Querschnittsdehnungen; σ_x, τ, σ_y : Spannungen; U_{σ} : Spannungsausnutzung

Bei besonders komplexen Querschnittsformen ist es übersichtlicher, den Konturenplot in Großformat auszugeben. Außerdem kann die Farbpalette analog der **Visualisierung** gewählt werden.

☐ Konturenplot im Großformat

Farbpalette f. d. Konturenplot

1

Der Übersichtlichkeit halber kann an dieser Stelle die Verwendung von Torsion oder Verwölbung ausgeschaltet werden. Im Register **Schnittgrößen** wird die Einstellung berücksichtigt, indem die entsprechenden Tabellenspalten deaktiviert werden.

Schnittgrößen

☒ einschl. Torsion
☐ einschl. Verwölbung

Versierte Programmanwender (Profis) können die verwendeten Verfahren beeinflussen. Die Bedeutungen der Einstellungen werden bei Beschreibung der **Nachweisverfahren** erläutert. **pcae** empfiehlt, die folgenden Parameter nicht zu ändern

☒ **für den Profi**

Aluminium:

Dehnungen nach EC 9-1-1, Anhang E ☒ berechnen

Spannungsnachweise:

FEM: Netzdichtefaktor f

0.00

 = 0 $\Rightarrow$ angepasst

DIV: Bruchdehnung ϵ_u

150.0

 %

DIV: Wölbgleichgewicht ☒ einhalten

Schnittgrößen



das zweite Register beinhaltet die Masken zur Eingabe der Bemessungsschnittgrößen

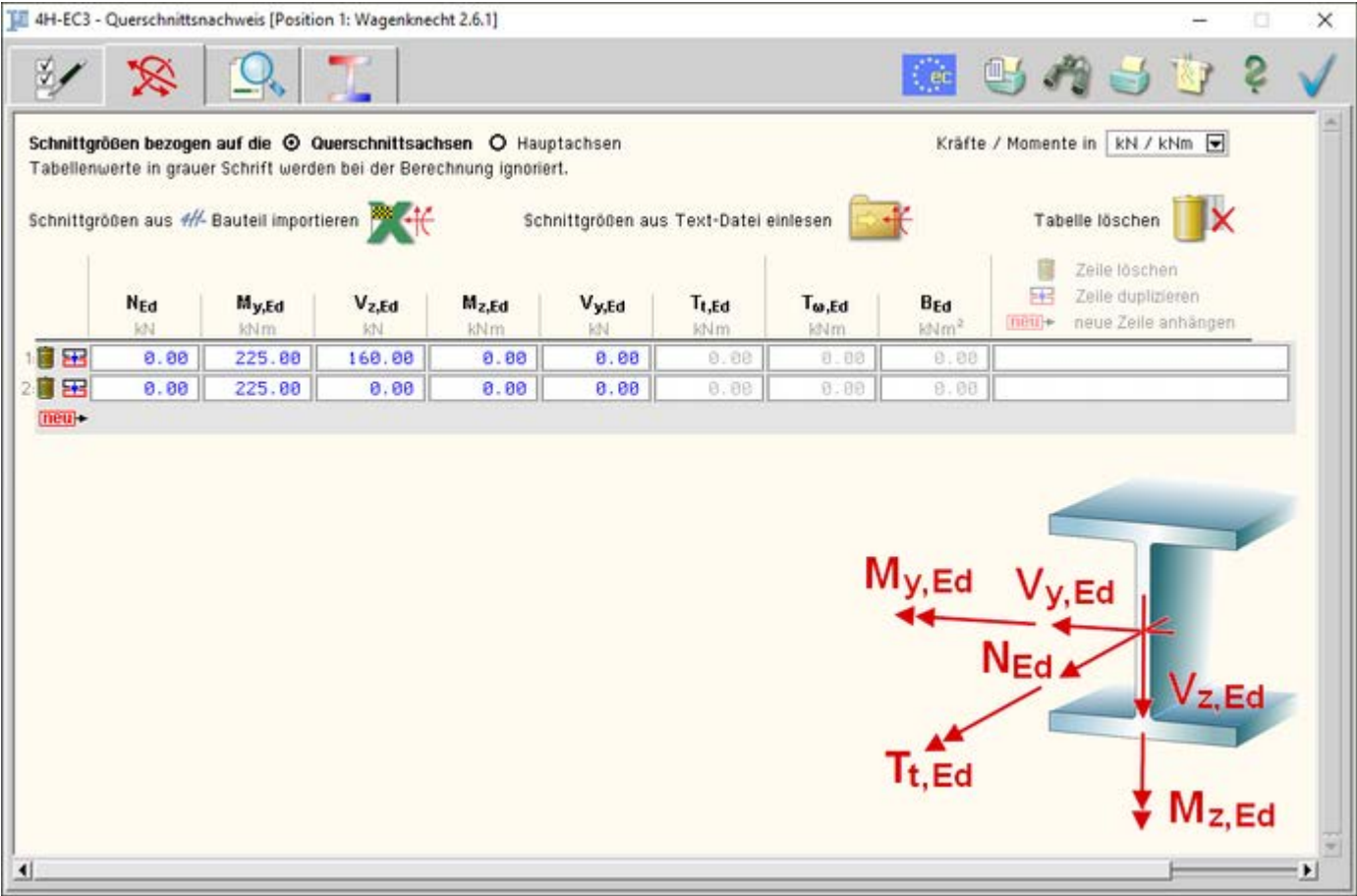
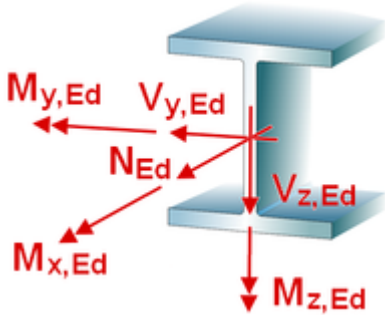


Bild vergrößern

Die Schnittgrößen werden als Bemessungsgrößen mit der Vorzeichendefinition der Statik eingegeben, wobei das x,y,z-Koordinatensystem dem l,m,n-System der **pcae**-Tragwerksprogramme entspricht.

Es können bis zu 10.000 Schnittgrößenkombinationen eingegeben werden.

Bei Übernahme der Schnittgrößen aus einem Tragwerksprogramm ist zu beachten, dass sie sich auch bei unsymmetrischen Querschnittsprofilen (z.B. L-Profil) auf das Stab-Koordinatensystem und **nicht** auf das Hauptachsensystem (**pcae**-Bezeichnung: ξ, η, ζ) beziehen!



Die Schnittgrößen können wahlweise in folgenden Einheiten vorliegen

Kräfte / Momente in

kN / kNm	☒
kN / kNm	☐
kN / kNcm	☐
N / Nm	☐

	NEd	My,Ed	Vz,Ed	Mz,Ed	Vy,Ed	Tt,Ed	Tw,Ed	BEd
	kN	kNm	kN	kNm	kN	kNm	kNm	kNm ²
	0.00	3.00	4.00	2.00	4.00	0.00	0.00	0.00

Im Standardfall

- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N, My, Vz eine Biegung um die starke Achse des Querschnitts
- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N, Mz, Vy eine Biegung um die schwache Achse des Querschnitts
- ist das Torsionsmoment T_t (St.Venant'sche bzw. primäre Torsion) nur für Hohl- und Vollquerschnitte relevant
- wirken die Verwölbungsgrößen T_w, B (sekundäre Torsion, Bimoment) nur bei Querschnitten mit abstehenden Querschnittsteilen

Sind Torsions- oder Verwölbungsschnittgrößen für den betrachteten Querschnitt nicht maßgebend und sollen nicht untersucht werden, können die entsprechenden Schnittgrößenspalten deaktiviert werden, indem in **Register 1** der **Profi**-Button aktiviert und die entsprechende Option abgewählt wird.

Die Zahlenwerte in den Spalten sind grau dargestellt, können jedoch weiter bearbeitet werden. Bei der Bemessung werden diese Schnittgrößen ignoriert.

Da bei unsymmetrischen Querschnitten die Querschnittsachsen nicht mit der Hauptachsenrichtung übereinstimmen, besteht die Möglichkeit, die Schnittgrößen wahlweise auf die Querschnittsachsen oder Hauptachsen zu beziehen.

Schnittgrößen bezogen auf die

☒ Querschnittsachsen

☐ Hauptachsen

$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kN
-------------------	------------------	-------------------	------------------

Schnittgrößen bezogen auf die

☐ Querschnittsachsen

☒ Hauptachsen

$M_{\eta,Ed}$ kNm	$V_{\zeta,Ed}$ kN	$M_{\zeta,Ed}$ kNm	$V_{\eta,Ed}$ kN
----------------------	----------------------	-----------------------	---------------------

Die Bezeichnung der Schnittgrößen M und V wird entsprechend angepasst.



Die Berechnung des Hauptachsenwinkels ist nicht eindeutig.
pcae empfiehlt, die Schnittgrößen auf die Querschnittsachsen zu beziehen.

Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen (Träger/Stütze, Trägerstöße), Fußpunkten (Stütze/Fundament) etc. benötigen Schnittgrößenkombinationen, die häufig von einem Tragwerksprogramm zur Verfügung gestellt werden.

Dabei handelt es sich i.d.R. um eine Vielzahl von Kombinationen, die im betrachteten Bemessungsschnitt des übergeordneten Tragwerkprogramms vorliegen und in das Anschlussprogramm übernommen werden sollen.

pcae stellt neben der 'per Hand'-Eingabe zwei verschiedene Mechanismen zur Verfügung, um Schnittgrößen in das vorliegende Programm zu integrieren.

Schnittgrößen aus  Programm importieren



Schnittgrößen aus Text-Datei einlesen



• Import aus einem 4H-Programm

Voraussetzung zur Anwendung des DTE[®]-Import-Werkzeugs ist, dass sich ein **pcae**-Programm auf dem Rechner befindet, das Ergebnisdaten exportieren kann.
Eine ausführliche Beschreibung zum Schnittgrößenimport aus einem **pcae**-Programm befindet sich [hier](#).

• Import aus einer Text-Datei

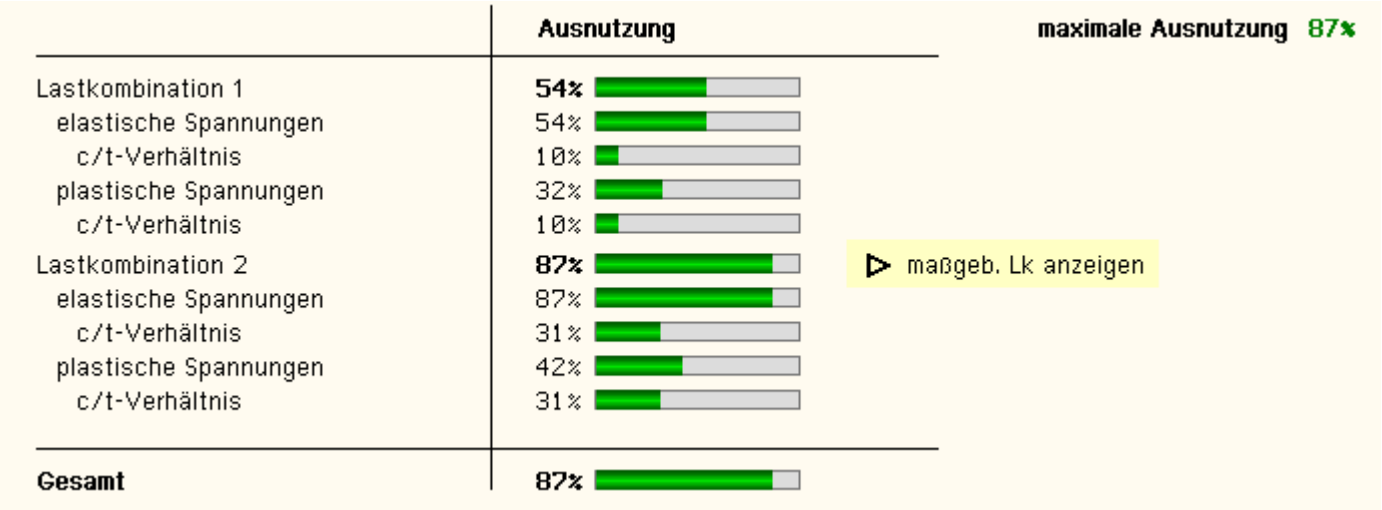
Die Schnittgrößenkombinationen können aus einer Text-Datei im ASCII-Format eingelesen werden.
Die Datensätze müssen in der Text-Datei in einer bestimmten Form vorliegen; der entsprechende Hinweis wird bei Betätigen des **Einlese**-Buttons gegeben.
Anschließend wird der Dateiname einschl. Pfad der entsprechenden Datei abgefragt.
Es werden sämtliche vorhandenen Datensätze eingelesen und in die Tabelle übernommen. Bereits bestehende Tabellenzeilen bleiben erhalten.
Wenn keine Daten gelesen werden können, erfolgt eine entsprechende Meldung am Bildschirm.

Ergebnisübersicht



das dritte Register gibt einen Überblick über die ermittelten Ergebnisse

Zur sofortigen Kontrolle werden die Ergebnisse in diesem Register lastfallweise übersichtlich zusammengestellt.

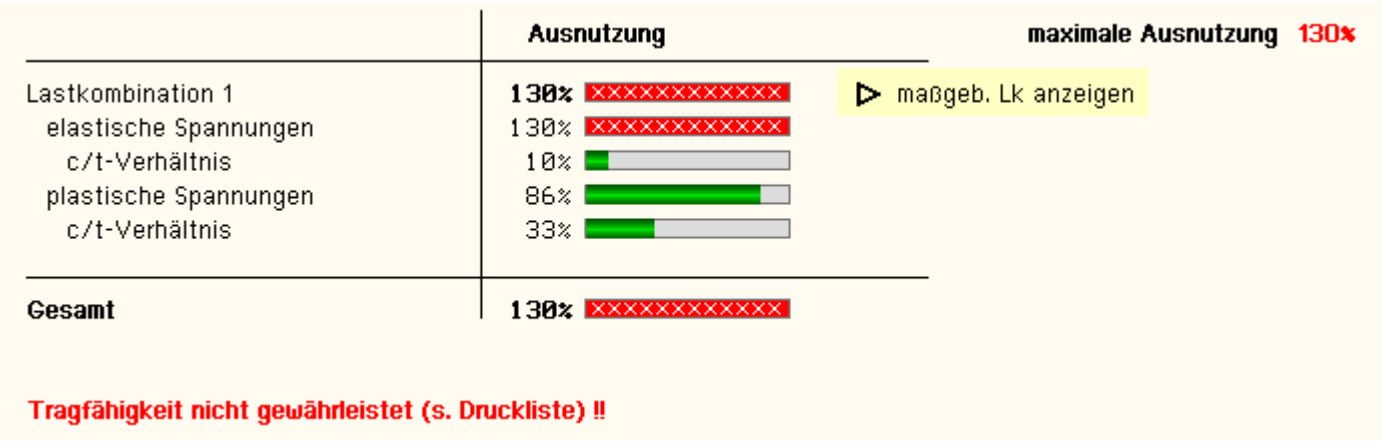


Eine Box zeigt an, ob ein Lastfall die Tragfähigkeit des Anschlusses überschritten hat (rot ausgekreuzt) oder wie viel Reserve noch vorhanden ist (grüner Balken).

Bei bis zu zehn Lastkombinationen werden zur Fehleranalyse oder zur Einschätzung der Tragkomponenten die Einzelberechnungsergebnisse protokolliert.

Die maximale Ausnutzung wird sowohl als 'Gesamt' unterhalb der Zusammenstellung als auch am oberen rechten Fensterrand angezeigt.

Ebenso wird die maßgebende Lastkombination gekennzeichnet und kann über den Aktionslink direkt in der Druckliste eingesehen werden.



Eine Meldung zeigt an, wenn ein Fehler aufgetreten oder die Tragfähigkeit überschritten ist.

Wenn die Ursache des Fehlers nicht sofort ersichtlich ist, sollte die Druckliste in der ausführlichen Ergebnisdarstellung geprüft werden.

Ergebnisse im Konturenplot



das vierte Register stellt für einige Nachweisverfahren die Ergebnisse grafisch dar.

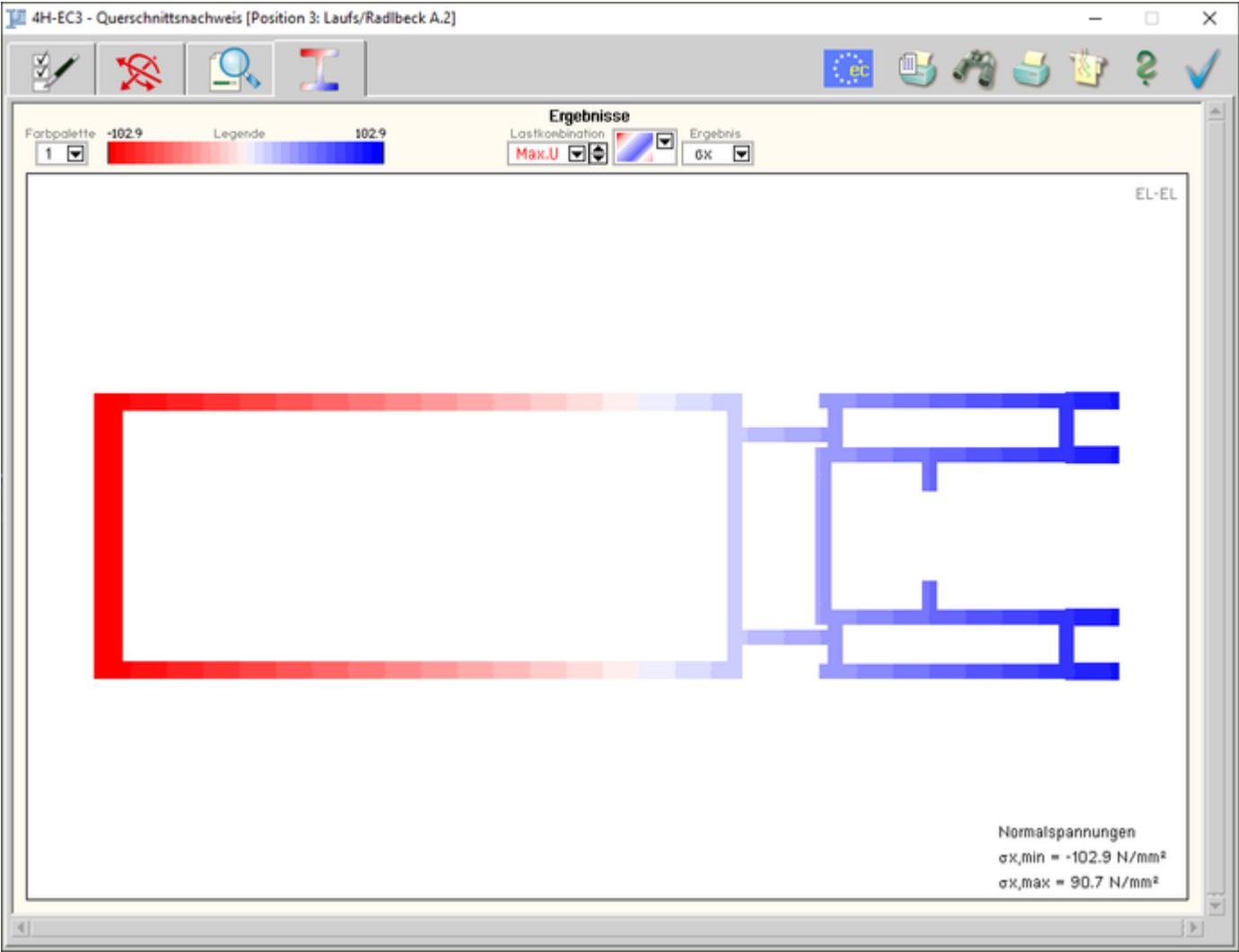
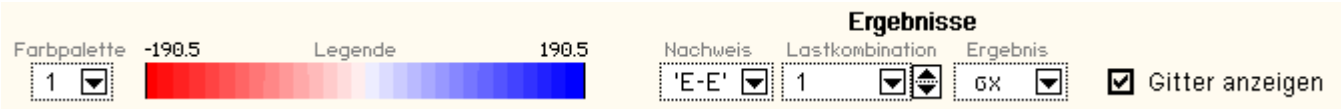


Bild vergrößern

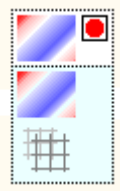
Dazu gehören die Ergebnisse der elastischen Berechnung mit dem Verfahren für dünnwandige Querschnitte und der Methode der Finiten Elemente sowie der plastischen Berechnung mit dem Verfahren der Dehnungsiteration. Es werden die Dehnungen ϵ , die Spannungen σ_x , τ , σ_v und die Traglastausnutzung U visualisiert.



Liegen sowohl aus der elastischen als auch der plastischen Berechnung Ergebnisse vor, wird zunächst aus einer Listbox der Nachweistyp festgelegt. 'E-E' steht für den elastischen, 'E-P' für den plastischen Querschnittsnachweis. Sind Ergebnisse für nur einen Nachweistyp vorhanden, wird die Listbox nicht angezeigt.



Sind elastische Nachweisergebnisse vorhanden, wird In einer weiteren Listbox der Darstellungstyp festgelegt.

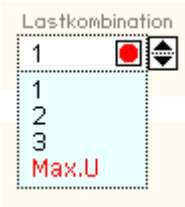


Das erste Listenelement bezeichnet den Konturenplot, der für sämtliche Ergebnisse zur Verfügung steht und über eine abgestufte Palette den Werteverlauf darstellt.

Für ein besseres Verständnis der räumlichen Verformung kann das zweite Listenelement, die Deformationsgrafik, zur Darstellung der Dehnungen angewählt werden.

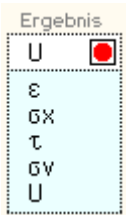
Ergebnisse der plastischen Berechnung können nur als Konturenplot angezeigt werden.

Aus einer weiteren Listbox wird nun eine Lastkombination ausgewählt. Zusätzlich zu den Lastkombinationen können die Ergebnisse, die zur maximalen Ausnutzung gehören, dargestellt werden.



Es stehen die Ergebnisse der

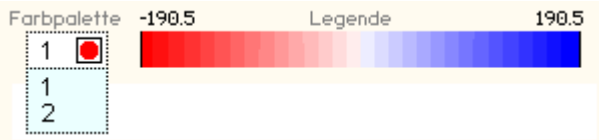
- der Dehnung ϵ ,
- Spannungen σ_x , τ , σ_v und
- Spannungsausnutzung U



zur Verfügung.

Die Zahlenwerte der Ergebnisse werden angezeigt, wenn der Maus-Cursor über die Grafik bewegt wird.

Aus zwei Farbpaletten kann die Einfärbung des Konturenplots für Dehnungen und Normalspannungen gewählt werden.



Die Bandbreite der Palette wird in der Legende angezeigt und bildet jeweils den Extremwert positiv und negativ ab.

Können die Ergebniswerte nicht negativ werden (Schubspannung, Vergleichsspannung, Ausnutzung), wird eine neutrale Palette verwendet.



Auch hier wird die Bandbreite angezeigt.

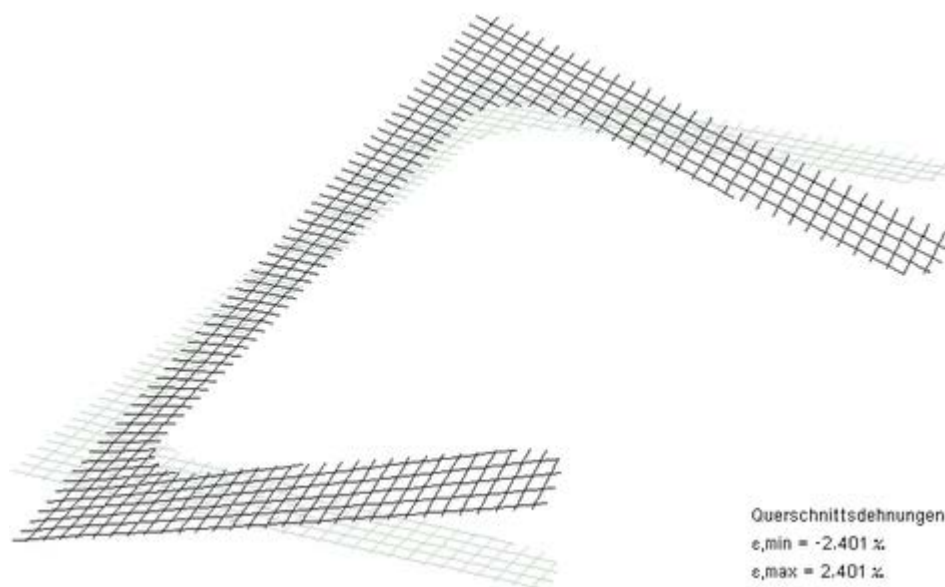
Sonderfall: Die Ausnutzung hat eine feste Bandbreite von 0 bis 1. Überschreitet die vorhandene Ausnutzung den maximal zulässigen Bereich, werden die Querschnittsflächen rot eingefärbt.

Darstellung der Ergebnisse am Bildschirm (Beispiel: U 100 mit Wölbbimoment $B_{Ed} = 0.15 \text{ kNm}^2$)

- Konturenplot der Ausnutzungen mit Angabe eines beliebig ausgewählten Berechnungswerts.
Die maximale Ausnutzung ist protokolliert. Bereiche, in denen $U \geq 1$, sind rot unterlegt.



- Deformationsgrafik der Querschnittsdehnungen. Die Extremalwerte sind angegeben.
Zur Orientierung ist das unverformte System in grau eingefügt.



Zur Darstellung des Druckdokuments s. [Beschreibung der Ergebnisse](#).

Querschnittsnachweise

Es werden sechs Spannungsnachweise, davon drei für den elastisch-elastischen und drei für den elastisch-plastischen Nachweis angeboten.

Die Schnittgrößenermittlung erfolgt auf Grundlage der Elastizitätstheorie, der Nachweis kann elastisch und plastisch geführt werden.

- elastischer Spannungsnachweis
 - als dünnwandiger **Querschnitt**
 - Finite-Elemente-**Methode**
 - **Spannungsebene**
- plastischer Spannungsnachweis
 - Methode mit **Teilschnittgrößen**
 - Methode mit **Dehnungsiteration**
 - EC 3-1-1, **6.2**

Zusätzlich kann für dünnwandige Querschnitte der vereinfachte Beulnachweis (c/t-Nachweis) in die Berechnung der Tragfähigkeit einbezogen werden.

Die Nachweise sind teilweise eingeschränkt, d.h. für einige Querschnittstypen oder bestimmte Schnittgrößenarten nicht nutzbar.

Bei einigen Nachweisen kann eine Analyse der Spannungen und Dehnungen über Querschnittsgrafiken am Bildschirm durchgeführt werden.

Die auf den Querschnitt einwirkenden Schnittgrößen erzeugen Spannungen, die materialspezifische Grenzwerte nicht überschreiten dürfen.

Aus Normalkraft N und Biegemomenten M resultieren Normalspannungen σ_x , aus Querkräften V und einem Torsionsmoment T_t resultieren Schubspannungen τ .

Wirken die Querkräfte nicht im Schubmittelpunkt, wird zusätzliche Torsion erzeugt. Aufgrund des primären Torsionsmoments T_t kann eine Querschnittsverwölbung hervorgerufen werden, die zu einem sekundären Torsionsmoment T_ω (zus. τ -Anteil) und einem Wölbmoment B (zus. σ_x -Anteil) führt.

Der **elastische Spannungsnachweis** erfolgt mit dem Fließkriterium aus DIN EN 1993-1-1, 6.2.1(5)

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

$\sigma_{x,Ed}$ Bemessungswert der Normalspannung in Längsrichtung am betrachteten Punkt

τ_{Ed} Bemessungswert der Schubspannung am betrachteten Punkt

Punktweise wird die Ausnutzung des Querschnitts berechnet mit

$$U_{\sigma} = \sigma_v / \sigma_{Rd} \leq 1 \quad \dots \text{ mit } \dots \sigma_v = \sigma_{x,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2 \quad \dots \text{ und } \dots \sigma_{Rd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Die Berechnung der Normalspannungen erfolgt mit

$$\sigma_x = N/A + M_{\eta} / I_{\eta} \cdot \zeta - M_{\zeta} / I_{\zeta} \cdot \eta$$

wobei sich η , ζ auf das Hauptachsensystem beziehen (s. Theorie).

Die Unterschiede in den Verfahren zum elastischen Querschnittsnachweis liegen in der Berechnung der Schubspannungen aus Querkraft und Torsion.

Der **plastische Spannungsnachweis** wird ganzheitlich am Querschnitt betrachtet und für Normal- und Schubspannungen gemeinsam durchgeführt. Die Querschnittsausnutzung wird über Laststeigerung ermittelt (nicht bei [EC 3-1-1, 6.2](#)).

Der plastische Nachweis erfolgt nur für Stahlquerschnitte.

Nach EC 3-1-1, 5.5, ist über die Klassifizierung der Querschnitte die Begrenzung der Beanspruchbarkeit und Rotationskapazität durch lokales Beulen festzustellen.

Querschnitte der Klassen 1 und 2 dürfen plastisch und elastisch nachgewiesen werden, für Querschnitte in Klasse 3 kann nur der elastische Nachweis geführt werden. Querschnitte in höheren Querschnittsklassen sind beulgefährdet und müssen gesondert untersucht werden.

Die Querschnittsklassifizierung erfolgt nach dem **c/t-Verhältnis** der druckbeanspruchten Querschnittsteile, wobei c der Länge des Querschnittsteils und t dessen Dicke entspricht.

Die Ausnutzung berechnet sich mit

$$U_{c/t} = \text{vorh } c/t / \text{zul } c/t \quad \dots \text{ mit zul } c/t \text{ für die maximal mögliche Querschnittsklasse}$$

Theorie

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen zur Berechnung der Querschnittswerte dargelegt.



Beachte: Das hier eingeführte l,m,n-Koordinatensystem entspricht dem x,y,z-Koordinatensystem der Querschnittsnachweise.

• Koordinatensysteme

Die klassische Stabtheorie geht von der Formerhaltung des Querschnitts aus. Die Querschnittslage lässt sich im lokalen xyz-Querschnittskoordinatensystem über drei Verschiebungen u_x , u_y , u_z und drei Verdrehungen φ_x , φ_y , φ_z beschreiben.

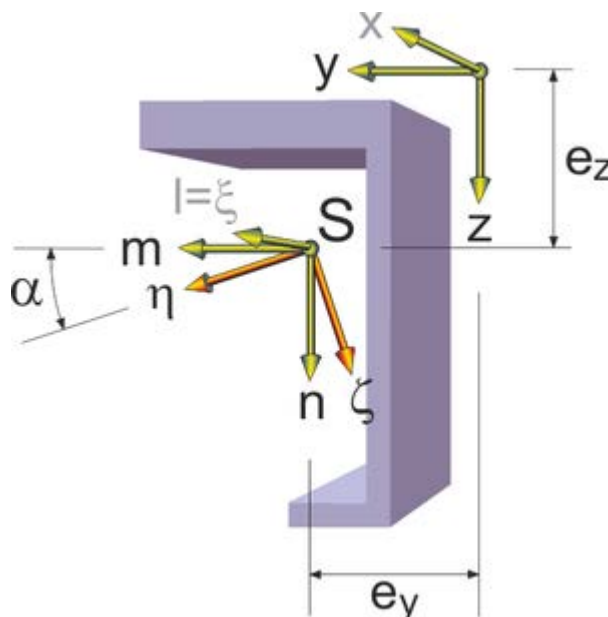
In der Theorie der Wölbkrafttorsion wird die Verwölbung des Querschnitts durch das Produkt der Einheitsverwölbung ω mit der Verwindung ψ_x beschrieben.

Neben dem xyz-Querschnittskoordinatensystem, in dem der Querschnitt modelliert wird, gibt es weiterhin das durch den Schwerpunkt S mit den Koordinaten (e_y, e_z) verlaufende lmn-System, dessen Achsen parallel zu den xyz-Achsen verlaufen (Entkopplung der Fläche und der Trägheitsmomente), sowie das durch S verlaufende $\xi\eta\zeta$ -Hauptachsensystem (Entkopplung der Trägheitsmomente).

Zur Beschreibung der Torsion wird der Schubmittelpunkt M mit den Koordinaten (y_M, z_M) als Drehpunkt verwendet (z.B. normierte Einheitsverwölbung ω , Entkopplung der Biegung und Wölbkrafttorsion).

Die Berechnung der Querschnittswerte und der Spannungen aus Biegung erfolgt am vollständigen Modell mit Verschneidungen, Abschrägungen und Ausrundungen.

Die Verteilung der Schubflüsse, der Schubspannungen und der Verwölbung längs der Mittellinien wird am Linienmodell unter



Berücksichtigung der veränderlichen Dicke ermittelt.

• **Schwerpunkt, Trägheitsmomente und Hauptachsen**

Bei einer konstanten Spannungsverteilung verschwinden die Biegemomente im Schwerpunkt.
Die Schwerpunktskoordinaten (e_y, e_z) lassen sich mit der Querschnittsfläche A und den statischen Momenten S_y bzw. S_z berechnen.

$$e_y = S_z / A \quad \text{... und ...} \quad e_z = S_y / A \quad \text{... mit ...} \quad S_z = \int_A y \cdot dA \quad \text{... und ...} \quad S_y = \int_A z \cdot dA$$

Mit den Trägheitsmomenten im Schwerpunkt lassen sich im linear elastischen Fall aus der Dehnung ϵ_S und den Krümmungen κ_m, κ_n die Schnittgrößen der Biegung ermitteln.

$$N = E \cdot A \cdot \epsilon_S \quad \text{...} \quad M_m = E \cdot (I_m \cdot \kappa_m - I_{mn} \cdot \kappa_n) \quad \text{...} \quad M_n = E \cdot (-I_{nm} \cdot \kappa_m + I_n \cdot \kappa_n)$$
$$I_m = \int_A (z - e_z)^2 \cdot dA \quad \text{...} \quad I_n = \int_A (y - e_y)^2 \cdot dA \quad \text{...} \quad I_{mn} = \int_A (y - e_y) \cdot (z - e_z) \cdot dA$$

Das $\xi\eta\zeta$ -Hauptachsensystem ist bzgl. des Querschnittskoordinatensystems um den Winkel α verdreht.
Im Hauptachsensystem ist das Deviationsmoment I_{mn} gleich Null, so dass die Krümmungen und Momente der Hauptbiegerichtungen entkoppelt sind.

$$\eta = (y - e_y) \cdot \cos \alpha + (z - e_z) \cdot \sin \alpha \quad \text{...} \quad \zeta = -(y - e_y) \cdot \sin \alpha + (z - e_z) \cdot \cos \alpha$$
$$I_\eta = \int_A \zeta^2 \cdot dA = I_m \cdot \cos^2 \alpha + I_n \cdot \sin^2 \alpha - 2 \cdot I_{mn} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$
$$I_\zeta = \int_A \eta^2 \cdot dA = I_m \cdot \sin^2 \alpha + I_n \cdot \cos^2 \alpha + 2 \cdot I_{mn} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$
$$I_{\eta\zeta} = \int_A \eta \cdot \zeta \cdot dA = (I_m - I_n) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + I_{mn} \cdot (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0$$
$$\alpha = 0.5 \cdot \arctan \left(\frac{2 \cdot I_{mn}}{I_n - I_m} \right)$$

Der Hauptachsendifferenzwinkel ist bis auf ein Vielfaches von 90° bestimmt. Der Winkel wird so gewählt, dass er bzgl. des Querschnittskoordinatensystems betragsmäßig möglichst klein ist.

• **Verwölbung und Schubmittelpunkt**

Für dünnwandige Querschnitte berechnet sich die Wölbordinate $\omega_{D,0}$ für den Drehpunkt D mit den Koordinaten (y_D, z_D) als Integral des Hebelarms r_D der Querschnittspunkte zum Drehpunkt längs der Profilkordinate s (β : Winkel der Tangente an die Mittellinie).

$$\omega_{D,0}(s) = \int_0^s r_D \cdot ds \quad \text{... mit ...} \quad r_D = (y - y_D) \cdot \sin \beta - (z - z_D) \cdot \cos \beta$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Verwölbung in Dickenrichtung konstant ist. Die mittlere Querschnittsdehnung der zugehörigen Einheitsverwölbung ω_D ist Null, so dass bei reiner Verwölbung (im linear elastischen Fall) keine Normalkraft vorhanden ist.

$$\omega_D(s) = \omega_{D,0}(s) - \int_A \omega_{D,0} \cdot dA$$

Die Einheitsverwölbungen mit den Drehpunkten (y_D, z_D) und (y_M, z_M) stehen in folgender Beziehung

$$\omega_M = \omega_D + (z_M - z_D) \cdot (y - e_y) - (y_M - y_D) \cdot (z - e_z)$$

Der Schubmittelpunkt (y_M, z_M) ist der Drehpunkt, für den bei reiner Verwölbung (im linear elastischen Fall) keine Biegemomente auftreten. Für den Abstand (y_{SM}, z_{SM}) des Schubmittelpunkts vom Schwerpunkt ergibt sich

$$y_{SM} = y_M - e_y = \frac{R_{Sy} \cdot I_n - R_{Sz} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$$

$$z_{SM} = z_M - e_z = \frac{R_{Sz} \cdot I_m - R_{Sy} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2}$$

$$R_{Sy} = \int_A \omega_S \cdot (z - e_z) \cdot dA \quad \dots \text{und} \dots R_{Sz} = \int_A \omega_S \cdot (y - e_y) \cdot dA$$

• Schnittgrößen und Spannungen

Die Schnittgrößen ergeben sich durch Integration der Normal- bzw. Schubspannungen über den Querschnitt.

Die Schnittkräfte wirken in Richtung der verformten Querschnittsachsen, die Momente drehen um die entsprechenden Achsen in positiver Richtung (Rechte-Hand-Regel).

$$N = \int_A \sigma_x \cdot dA \quad \dots \quad M_y = \int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA \quad \dots \quad M_z = - \int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA \quad \dots \quad M_\omega = \int_A \sigma_x \cdot \omega \cdot dA$$

$$V_y = \int_A \tau_{xy} \cdot dA \quad \dots \quad V_z = \int_A \tau_{xz} \cdot dA \quad \dots \quad T_t = \int_A \left(\tau_{xz} \cdot \left(y - y_M - \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) - \tau_{xy} \cdot \left(z - z_M + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right) \cdot dA$$

Mit den Biegemomenten im Hauptachsensystem, den Torsionsschnittgrößen um den Schubmittelpunkt und den entsprechenden Trägheitsmomenten können im linear elastischen Fall die Normalspannungen aus den Schnittgrößen ermittelt werden.

$$\varepsilon_x(y, z) = u'(y, z) = u'_S - (y - e_y) \cdot \varphi'_z + (z - e_z) \cdot \varphi'_y - \omega_M(y, z) \cdot \vartheta''$$

$$\sigma_x(y, z) = E \cdot \varepsilon_x(y, z) = \frac{N}{A} - (y - e_y) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (z - e_z) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \omega_M \cdot \frac{M_\omega}{C_M}$$

$$\varepsilon_x(\eta, \zeta) = u'(\eta, \zeta) = u'_S - \eta \cdot \varphi'_\zeta + \zeta \cdot \varphi'_\eta - \omega_M(\eta, \zeta) \cdot \vartheta''$$

$$N = E \cdot A \cdot u'_S \quad \dots \quad M_\eta = E \cdot I_\eta \cdot \varphi'_\eta \quad \dots \quad M_\zeta = E \cdot I_\zeta \cdot \varphi'_\zeta \quad \dots \quad M_\omega = -E \cdot C_M \cdot \vartheta''$$

$$\sigma_x(\eta, \zeta) = E \cdot \varepsilon_x(\eta, \zeta) = \frac{N}{A} - \eta \cdot \frac{M_\zeta}{I_\zeta} + \zeta \cdot \frac{M_\eta}{I_\eta} + \omega_M \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \quad \dots \quad I_\eta = \int_A \zeta^2 \cdot dA \quad \dots \quad I_\zeta = \int_A \eta^2 \cdot dA \quad \dots \quad C_M = \int_A \omega_M^2 \cdot dA$$

Für dünnwandige Querschnitte werden zur Berechnung des Schubflusses T und der Schubspannung τ_{xs} in Richtung der Profilmittellinien die statischen Momente S_η , S_ζ , S_ω und die Profildicken t in Abhängigkeit der Profilkordinate s benötigt.

$$V_\eta = -M'_\zeta \quad \dots \quad V_\zeta = M'_\eta \quad \dots \quad T_w = M'_\omega \quad \dots \quad T_t = G \cdot I_T \cdot \vartheta'$$

$$S_\zeta(s) = \int_{A(s)} \eta \cdot ds \quad \dots \quad S_\eta(s) = \int_{A(s)} \zeta \cdot ds \quad \dots \quad S_\omega(s) = \int_{A(s)} \omega_M \cdot ds$$

$$T(s) = - \frac{S_\zeta(s)}{I_\zeta} \cdot V_\eta - \frac{S_\eta(s)}{I_\eta} \cdot V_\zeta - \frac{S_\omega(s)}{C_M} \cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s) \cdot T_t = \vartheta_{V\eta}(s) \cdot V_\eta + \vartheta_{V\zeta}(s) \cdot V_\zeta + \vartheta_{T\omega}(s) \cdot T_w + \vartheta_{Tt,B}(s) \cdot T_t$$

$$\tau_{xs}(s, \lambda) = \frac{T(s)}{t(s)} + \frac{T_t \cdot t(s)}{I_T} = \frac{\vartheta_{V\eta}(s)}{t(s)} \cdot V_\eta + \frac{\vartheta_{V\zeta}(s)}{t(s)} \cdot V_\zeta + \frac{\vartheta_{T\omega}(s)}{t(s)} \cdot T_w + \frac{\vartheta_{Tt,B}(s)}{t(s)} \cdot T_t + \lambda \cdot t(s) \cdot \mu_{Tt,S}(s) \cdot T_t \quad \dots \quad -1 \leq \lambda \leq 1$$

T_t ist dabei das primäre Torsionsmoment aus *St. Venant'scher Torsion* und T_w das sekundäre Torsionsmoment aus *Wölbkrafttorsion*.

Für Querschnitte mit geschlossenen Zellen kommen noch Schubspannungen aus den Schubflüssen der einzelnen Zellen hinzu.

Die Faktoren θ entsprechen den Einheitsschubflüssen der entsprechenden Schnittgröße.

Die Schubspannungen aus V_η , V_ζ und T_w bzw. T_t der Zellen sind nach Voraussetzung konstant in Dickenrichtung.

Die Schubspannung aus T_t der einzelnen Querschnittslinien ist in Dickenrichtung linear veränderlich und verschwindet auf der Mittellinie.

• Wagner-Effekt

Neben dem primären Torsionsmoment T_t tritt bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung des Wagner-Effekts das Torsionsmoment T_σ infolge Normalspannungen auf.

$$T_\sigma = \int_A \sigma_x \cdot r_M^2 \cdot dA \cdot \vartheta' = \int_A \sigma_x \cdot \left((y - y_M)^2 + (z - z_M)^2 \right) \cdot dA \cdot \vartheta' = K_\sigma \cdot \vartheta'$$

Der Wagner-Koeffizient K_σ lässt sich aus den Schnittgrößen im Hauptachsensystem berechnen.

$$K_\sigma = N \cdot i_M^2 + M_\eta \cdot r_\zeta - M_\zeta \cdot r_\eta + M_\omega \cdot r_\omega$$

Die Querschnittsstrecken ergeben sich durch Integration des Quadrats des Schwerpunktabstands r_S über den Querschnitt.

$$i_M^2 = \frac{I_\eta + I_\zeta}{A} + \eta_M^2 + \zeta_M^2 = i_p^2 + \eta_M^2 + \zeta_M^2 \dots r_\eta = \frac{1}{I_\zeta} \cdot \int_A \eta \cdot r_S^2 \cdot dA - 2 \cdot \eta_M \dots r_\zeta = \frac{1}{I_\eta} \cdot \int_A \zeta \cdot r_S^2 \cdot dA - 2 \cdot \zeta_M \dots r_\omega = \frac{1}{C_{MA}} \cdot \int_A \omega_M \cdot r_S^2 \cdot dA$$

• Schubkorrekturfaktoren

Die Schubkorrekturfaktoren werden zur Ermittlung der Schubflächen bzw. Schubsteifigkeiten bei der Berechnung von schubweichen Stäben benötigt.

Die mittleren Schubgleitungen γ_{xy} und γ_{xz} stehen mit den zugehörigen Querkräften in Beziehung.

$$\gamma_{xy} = \kappa_y \cdot \frac{V_y}{G \cdot A} \dots \gamma_{xz} = \kappa_z \cdot \frac{V_z}{G \cdot A} \dots A_{Vy} = \frac{A}{\kappa_y} \dots A_{Vz} = \frac{A}{\kappa_z}$$
$$\kappa_y = \frac{A}{V_y^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty}^2}{t} \cdot ds \dots \kappa_z = \frac{A}{V_z^2} \cdot \int_A (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2) \cdot dA = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Tz}^2}{t} \cdot ds \dots \kappa_{yz} = A \cdot \int_s \frac{\vartheta_{Ty} \cdot \vartheta_{Tz}}{t} \cdot ds$$

ϑ_{Ty} und ϑ_{Tz} sind dabei die Einheitsschubflüsse der Querkräfte in y- und z-Richtung.

Aus den κ -Werten lassen sich die Schubkorrekturfaktoren in einem um den Winkel α verdrehten Koordinatensystem berechnen.

$$\kappa_\eta = \cos^2 \alpha \cdot \kappa_y + \sin^2 \alpha \cdot \kappa_z + 2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \kappa_{yz} \dots \kappa_\zeta = \sin^2 \alpha \cdot \kappa_y + \cos^2 \alpha \cdot \kappa_z - 2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \kappa_{yz}$$

• mehrteilige Querschnitte

Falls nicht alle Querschnittsteile miteinander verbunden sind, liegt ein mehrteiliger Querschnitt vor.

Bei einem mehrteiligen Querschnitt wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Teile durch Riegel oder Platten so miteinander gekoppelt sind, dass sie sich affin zueinander verformen.

Den Schubmittelpunkt des Gesamtquerschnitts erhält man durch gewichtete Summation der Schubmittelpunkte der Teile. Die Verwölbung mit dem Schubmittelpunkt (y_M, z_M) als Drehachse des i-ten Teils im Gesamtquerschnitt kann aus der Verwölbung des Teils mit dem i-ten Schubmittelpunkt $(y_{M,i}, z_{M,i})$ als Drehachse berechnet werden.

Die Verschiebung u in Richtung der Stabachse bzw. die Längsspannung für den linear-elastischen Fall kann dann lokal für jedes Teil formuliert werden.

$$y_M = \frac{\left(\sum_i y_{M,i} \cdot l_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot l_{mn,i} \right) \cdot \sum_i l_{n,i} + \left(\sum_i z_{M,i} \cdot l_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot l_{mn,i} \right) \cdot \sum_i l_{mn,i}}{\sum_i l_{m,i} \cdot \sum_i l_{n,i} - \left(\sum_i l_{mn,i} \right)^2}$$

$$z_M = \frac{\left(\sum_i z_{M,i} \cdot l_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot l_{mn,i} \right) \cdot \sum_i l_{m,i} + \left(\sum_i y_{M,i} \cdot l_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot l_{mn,i} \right) \cdot \sum_i l_{mn,i}}{\sum_i l_{m,i} \cdot \sum_i l_{n,i} - \left(\sum_i l_{mn,i} \right)^2}$$

$$\omega_M = \omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M)$$

$$u = \left(u_S + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \varphi_y - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \varphi_z \right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\varphi_y - (y_{M,i} - y_M) \cdot \vartheta' \right) - (y - e_{y,i}) \cdot \left(\varphi_z - (z_{M,i} - z_M) \cdot \vartheta' \right) - \omega_{M,i} \cdot \vartheta'$$

$$\begin{aligned} \sigma_{x,i}(y,z) &= \frac{N}{A} - \left((y - e_{y,i}) + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \right) \cdot \frac{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + \left((z - e_{z,i}) + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \right) \cdot \frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \\ &\quad + \left(\omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M) \right) \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \\ &= \left(\frac{N}{A} - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \frac{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \right) \\ &\quad - (y - e_{y,i}) \cdot \left(\frac{l_m \cdot M_n + l_{mn} \cdot M_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + (z_{M,i} - z_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\frac{l_n \cdot M_m + l_{mn} \cdot M_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} + (y_{M,i} - y_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \right) + \omega_{M,i} \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \end{aligned}$$

Die Querschnittsteile können biegesteif oder biegeschlaff miteinander verbunden sein. Die Verteilung der Normalkräfte hängt vom Grad α der Biegekopplung ab (biegesteif: $\alpha = 1$, biegeschlaff: $\alpha = 0$).

Der Wert von α hat über den Steiner-Anteil der Teile Einfluss auf die Trägheitsmomente des Gesamtquerschnitts.

Die Querschnittswerte des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Querschnittswerte der Teile.

$$\begin{aligned} A &= \sum_i A_i \quad \dots \quad e_y = \frac{\sum_i e_{y,i} \cdot A_i}{A} \quad \dots \quad e_z = \frac{\sum_i e_{z,i} \cdot A_i}{A} \\ I_m &= \sum_i \left(l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \right) \quad \dots \quad I_n = \sum_i \left(l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i \right) \\ I_{mn} &= \sum_i \left(l_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i \right) \quad \dots \quad I_T = \sum_i I_{T,i} \\ C_M &= \sum_i \left(C_{M,i} + (y_{M,i} - y_M)^2 \cdot l_{m,i} + (z_{M,i} - z_M)^2 \cdot l_{n,i} - 2 \cdot (y_{M,i} - y_M) \cdot (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i} \right) \end{aligned}$$

Die Normalkräfte verteilen sich im Verhältnis der Teilflächen.

$$N_i = \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot dA = \frac{A_i}{A} \cdot N + \alpha \cdot A_i \cdot \left(\frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot l_n - (e_{y,i} - e_y) \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot l_{mn} - (e_{y,i} - e_y) \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_n \right)$$

Wenn die Krümmungen der Querschnittsteile identisch sind, lassen sich die (linear elastischen) Momente $M_{m,i}$ und $M_{n,i}$ der Teile bzgl. ihrer Schwerpunkte aus den Momenten M_m und M_n des Gesamtquerschnitts berechnen.

$$\begin{aligned} M_{m,i} &= \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (z - e_{z,i}) \cdot dA = \frac{l_{m,i} \cdot l_n - l_{mn,i} \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{l_{m,i} \cdot l_{mn} - l_{mn,i} \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot l_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega \\ M_{n,i} &= - \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (y - e_{y,i}) \cdot dA = \frac{l_{n,i} \cdot l_{mn} - l_{mn,i} \cdot l_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{l_{n,i} \cdot l_m - l_{mn,i} \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot l_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega \end{aligned}$$

Für die Aufteilung der Querkkräfte ergeben sich dann ähnliche Beziehungen.

$$V_m = -M'_n = \int_A (y - e_y) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(y - e_{y,i}) + (e_{y,i} - e_y) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(-M'_{n,i} + (e_{y,i} - e_y) \cdot N'_i \right)$$

$$V_n = M'_m = \int_A (z - e_z) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(z - e_{z,i}) + (e_{z,i} - e_z) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(M'_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N'_i \right)$$

$$V_{m,i} = \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_m - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m - \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n - \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot l_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

$$V_{n,i} = -\frac{l_{m,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m + \frac{l_{m,i}^+ \cdot l_n - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot l_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

$$\dots \text{ mit } \dots l_{m,i}^+ = l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \dots \text{ und } \dots l_{n,i}^+ = l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i$$

$$\dots \text{ und } \dots l_{mn,i}^+ = l_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i$$

Die Torsionsmomente und das Wölbmoment verteilen sich im Verhältnis der Querschnittswerte auf die einzelnen Teile.

$$T_{t,i} = \frac{I_{t,i}}{I_T} \cdot T_t \dots T_{w,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot T_\omega \dots M_{w,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

Die Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Teilschnittgrößen.

$$N_i = \sum_i N_i \dots M_m = \sum_i \left(M_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i \right) \dots M_n = \sum_i \left(M_{n,i} - (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i \right)$$

$$M_\omega = \sum_i \left(M_{w,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot M_{m,i} + (z_{M,i} - z_M) \cdot M_{n,i} \right)$$

$$V_m = \sum_i V_{m,i} \dots V_n = \sum_i V_{n,i} \dots T_t = \sum_i T_{t,i}$$

$$T_\omega = M'_\omega = \sum_i \left(T_{w,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot V_{m,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot V_{n,i} \right)$$

• plastische Widerstandsmomente

Die plastischen Grenzmomente können mit Hilfe der plastischen Widerstandsmomente berechnet werden.

Die zugehörige Spannungsverteilung erzeugt dabei keine Normalkraft; die resultierenden Momente beziehen sich auf den Schwerpunkt.

Für jede Achse, um die das Grenzmoment wirkt (z.B. m-, n-, η -, ζ -Achse), sind zwei evtl. unterschiedliche Widerstandsmomente von Interesse.

Das *maximale plastische Widerstandsmoment* liefert das maximal mögliche Moment um die betrachtete Achse.

Die neutrale Achse ist parallel zur Achse und teilt die Querschnittsfläche in zwei gleiche Teile. Das zum Grenzmoment senkrecht wirkende Moment kann dabei von Null verschieden sein (z.B. unsymmetrische Querschnitte, gedrehte Hauptachsen).

Die Spannungsverteilung des *reduzierten plastischen Widerstandsmoments* liefert das maximal mögliche Moment um die betrachtete Achse unter der Zusatzbedingung, dass das zum Grenzmoment senkrecht wirkende Moment gleich Null ist. Die neutrale Achse ist evtl. zur Momentenachse verdreht.

Die Berechnung der Widerstandsmomente erfolgt mit Hilfe der Dehnungsiteration. Als Stoffgesetz wird hierbei eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung verwendet. Zu dem betrachteten Moment wird iterativ ein Dehnungszustand unter Berücksichtigung der Grenzdehnung (z.B. 20%) und der zu beachtenden Nebenbedingungen (keine Normalkraft, evtl. kein Quermoment) ermittelt. Aus der zugehörigen Spannungsverteilung lassen sich das Grenzmoment und das Widerstandsmoment berechnen.

• Berechnung von Wölbfunktion und Torsionskennwerten mit der Methode der Finiten Elemente

Die Verwölbung der primären und sekundären Torsion bzw. des Querkraftschubs berechnen sich mit der Methode der Finiten Elemente aus der Potentialgleichung (in den Hauptachsenkoordinaten η, ζ)

$$\frac{d^2\omega}{d\eta^2} + \frac{d^2\omega}{d\zeta^2} = f(\eta,\zeta)$$

Längs der Querschnittsränder gilt die Randbedingung (mit dem Normalenvektor (n_η, n_ζ))

$$\frac{d\omega}{d\eta} \cdot n_\eta + \frac{d\omega}{d\zeta} \cdot n_\zeta = g(\eta,\zeta)$$

Es werden folgende Funktionen $f(\eta,\zeta)$ und $g(\eta,\zeta)$ für die einzelnen Problemstellungen angesetzt

Primäre Torsion	$f(\eta,\zeta) = 0$	$g(\eta,\zeta) = \eta \cdot n_\zeta - \zeta \cdot n_\eta$
	$\tau_{x\eta} = -G \cdot \vartheta' \cdot \left((\zeta - \zeta_M) + \frac{d\omega_M}{d\eta} \right)$	und $\tau_{x\zeta} = G \cdot \vartheta' \cdot \left((\eta - \eta_M) - \frac{d\omega_M}{d\zeta} \right)$
Sekundäre Torsion	$f(\eta,\zeta) = \frac{\omega_M}{I_\omega}$	$g(\eta,\zeta) = 0$
	$\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$	$\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$
Querkraft in η -Richtung	$f(\eta,\zeta) = \frac{\eta}{I_\zeta}$	$g(\eta,\zeta) = 0$
	$\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$	$\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$
Querkraft in ζ -Richtung	$f(\eta,\zeta) = \frac{\zeta}{I_\eta}$	$g(\eta,\zeta) = 0$
	$\tau_{x\eta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\eta}$	$\tau_{x\zeta} = G \cdot \frac{d\omega}{d\zeta}$

Dabei ist ω_M die normierte Verwölbung der primären Torsion und (η_M, ζ_M) der Schubmittelpunkt. Für die Torsionskennwerte ergeben sich dann

$$I_T = \int_A \left(\left((\eta - \eta_M) - \frac{d\omega_M}{d\zeta} \right) \cdot (\eta - \eta_M) + \left((\zeta - \zeta_M) + \frac{d\omega_M}{d\eta} \right) \cdot (\zeta - \zeta_M) \right) \cdot dA \quad \dots \quad I_\omega = \int_A \omega_M^2 \cdot dA$$

Elastischer Spannungsnachweis

Elastischer Nachweis für dünnwandige Querschnitte

Der elastische Nachweis kann für alle dünnwandigen Querschnitte durchgeführt werden, die entweder der **pcae**-Profiltafel entnommen, parametrisiert eingegeben oder mit dem **pcae**-Programm **4H-QUER** als dünnwandiges Profil erzeugt wurden.

Flach- und Rundstähle sind jedoch vom Nachweis ebenso ausgenommen wie dickwandige **4H-QUER**-Querschnitte.

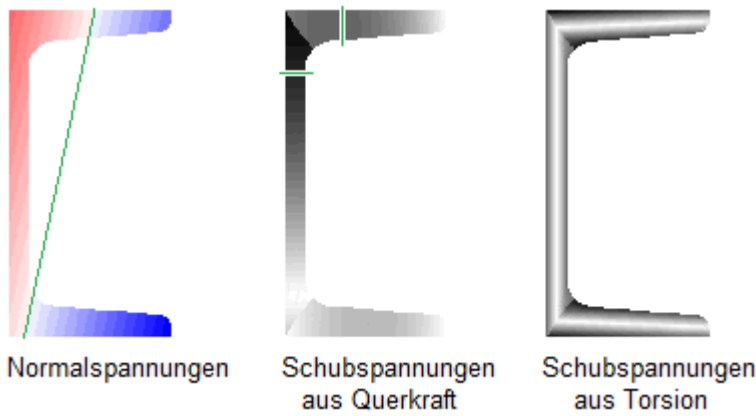
Einen dünnwandigen Querschnitt kennzeichnet, dass seine Blechdicken im Verhältnis zu ihrer Länge klein sind, sodass der Querschnitt über Linien modelliert werden kann.

Jede Linie hat eine ggf. linear veränderliche Dicke und kann Ausrundungen am Anfang und Ende besitzen.

Der elastische Nachweis berücksichtigt sämtliche Schnittgrößen.

Die Normalspannungen werden am polygonalen Querschnitt berechnet, während die Schubspannungen auf die Linien bezogen werden. Demzufolge gilt für den Schubspannungsanteil der Querkräfte, dass die Schubspannungen in der grafischen Darstellung über die Dicke konstant verlaufen (hier: horizontale bzw. vertikale Konturengrenzen), während der Anteil aus primärer Torsion sich linear über die Dicke verändert.





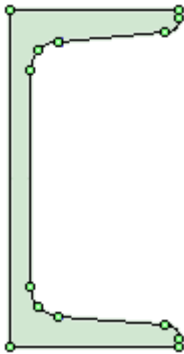
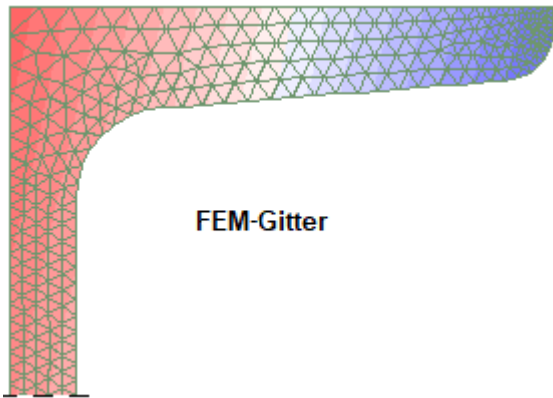
Im Ergebnisausdruck werden der Ort und die Größe der zugehörigen Spannungen bezogen auf das Querschnittskordinatensystem im Schwerpunkt protokolliert.
Der Nachweis wird für die maximale Vergleichsspannung geführt.

Beispiel U100

elastische Spannungen: $\max \sigma_x = 309.25 \text{ N/mm}^2$, $\max \tau = 13.86 \text{ N/mm}^2$, $\max \sigma_v = 309.25 \text{ N/mm}^2$			
$\max \sigma_x$	bei $y = -34.5 \text{ mm}$, $z = 50.0 \text{ mm}$:	$\sigma_x = 309.25 \text{ N/mm}^2$, $\tau = -0.00 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 309.25 \text{ N/mm}^2$	
$\min \sigma_x$	bei $y = 15.5 \text{ mm}$, $z = -50.0 \text{ mm}$:	$\sigma_x = -179.31 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 8.10 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 179.86 \text{ N/mm}^2$	
$\max \tau$	bei $y = 12.5 \text{ mm}$, $z = -44.9 \text{ mm}$:	$\sigma_x = -151.27 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 13.86 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 153.16 \text{ N/mm}^2$	
$\min \tau$	bei $y = -11.0 \text{ mm}$, $z = 45.8 \text{ mm}$:	$\sigma_x = 142.11 \text{ N/mm}^2$, $\tau = -4.28 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 142.30 \text{ N/mm}^2$	
$\max \sigma_v$	bei $y = -34.5 \text{ mm}$, $z = 50.0 \text{ mm}$:	$\sigma_x = 309.25 \text{ N/mm}^2$, $\tau = -0.00 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 309.25 \text{ N/mm}^2$	
zul. Vergleichsspannung: $\text{zul } \sigma_v = 355.00 \text{ N/mm}^2$			
Nachweis: $\sigma_v = 309.25 \text{ N/mm}^2 < \text{zul } \sigma_v = 355.00 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_s = 0.871 < 1$ ok			

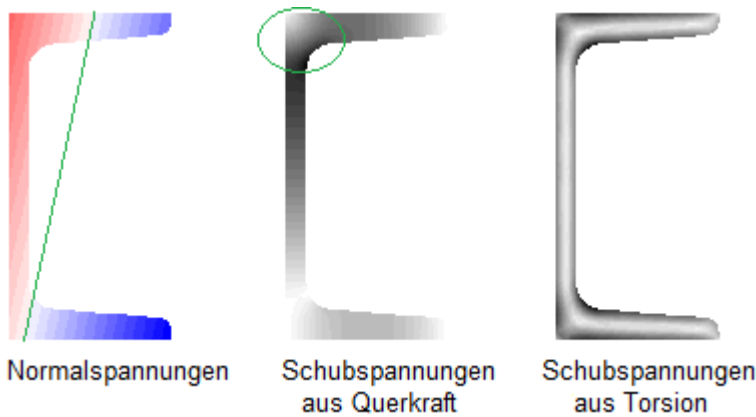
Elastischer Nachweis mit der Finite-Elemente-Methode

Dieser Nachweis wird für sämtliche Querschnittsformen und alle Schnittgrößen angeboten.
Es können dünnwandige, d.h. über ihre Profilmittellinie definierte (s.o.), und dickwandige, d.h. polygonal umrandete, Querschnitte berechnet werden.
Es werden Kennwerte für jeden Elementknoten ermittelt, die nur von der Querschnittsform abhängen und daher nur einmal berechnet werden müssen. Die Spannungen in den Knoten werden anschließend durch Multiplikation der Schnittgrößen mit den Kennwerten ermittelt.



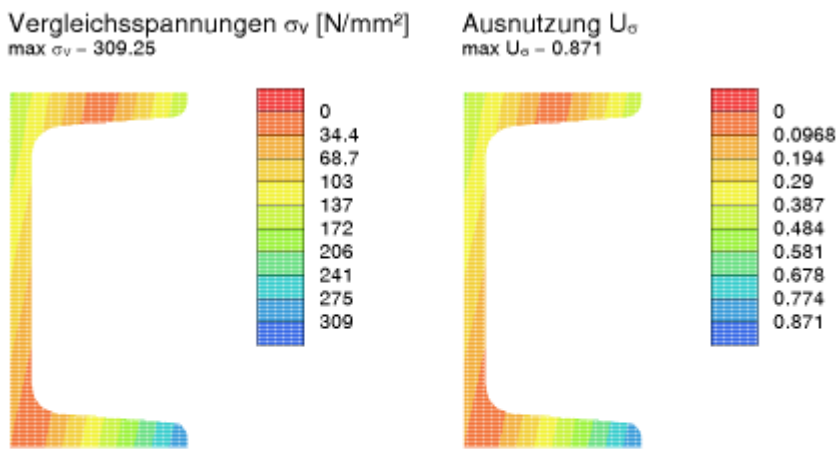
Der Nachweis berücksichtigt sämtliche Schnittgrößen.

Die lineare Normalspannungsverteilung wird aus Querschnittsfläche und Trägheitsmomenten berechnet.
Die Ermittlung der Schubspannung erfolgt auch für dünnwandige Querschnitte nach der 'dickwandigen' Theorie.
Die genauere Erfassung der Schubspannungen aus Querkraft in den Ausrundungsbereichen und Ecken im Vergleich zur Berechnung dünnwandiger Querschnitte (s.o.) ist in der grafischen Darstellung gut zu erkennen.



Im Ergebnisausdruck werden die Verläufe der Dehnungen, Spannungen und Ausnutzung als Konturenplot dargestellt. Eine Tabelle zeigt den Ort und die Größe der zur maximalen Ausnutzung gehörenden Größen; Maximalwerte werden gelb unterlegt. Der Nachweis wird für die maximale Vergleichsspannung geführt.

Beispiel U100



Dehnung, Spannungen, Ausnutzung						
y	z	ε	σ _x	τ	σ _y	U _σ
mm	mm	‰	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
50.0	50.0	1.473	309.25	0.03	309.25	0.871
6.1	-33.7	-0.540	-113.40	14.69	116.22	0.327

y,z: Knotenkoordinaten; σ_x,τ,σ_y: Spannungen; U_σ: Spannungsausnutzung

Elastischer Nachweis mit der Spannungsebene

Dieser Nachweis berücksichtigt nur Normalkraft und Biegemomente und wird für sämtliche Querschnittsformen angeboten.

Aus den Querschnittsgrößen Fläche und Trägheitsmomente werden mit Hilfe der Spannungsebene die Querschnittspunkte mit der maximalen und minimalen Normalspannung ermittelt.

Da die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte gilt, liegen die Normalspannungen auf einer Ebene, die um die Spannungsnulllinie als Achse dreht.

Die Querschnittsfasern mit den größten Abständen beidseitig der Nulllinie erhalten die größte (positive) und die kleinste (negative) Spannung.

Die Gleichung der Normalspannung lautet

$\sigma_x(y,z) = a + b \cdot y + c \cdot z$... mit ...

$$a = N/A \quad \text{... und ...} \quad b = \frac{-M_y \cdot I_{yz} - M_z \cdot I_y}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \quad \text{... und ...} \quad c = \frac{M_y \cdot I_z + M_z \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2}$$

wobei sowohl die Biegemomente M_y , M_z als auch die Trägheitsmomente I_y , I_z , I_{yz} auf das Querschnittskoordinatensystem bezogen sind.

Im Ergebnisausdruck werden der Ort und die Größe der extremalen Spannungen bezogen auf das

Querschnittskoordinatensystem im Schwerpunkt protokolliert.
Der Nachweis wird für die betragsmäßig größte Normalspannung geführt.
Beispiel U100

Spannungsebene $\sigma_x = 0.00 + -6.852 \cdot y + 1.460 \cdot z$
maximale Normalspannung bei $y = -34.5 \text{ mm}, z = 46.7 \text{ mm}$: $\sigma_{x,max} = 304.50 \text{ N/mm}^2$
minimale Normalspannung bei $y = 12.5 \text{ mm}, z = -44.9 \text{ mm}$: $\sigma_{x,min} = -151.27 \text{ N/mm}^2$
Bemessungsnormalspannung $\sigma_{Ed} = \max(|\sigma_{x,max}|, |\sigma_{x,min}|) = 304.50 \text{ N/mm}^2$
zulässige Normalspannung $\sigma_{Rd} = f_y / \gamma_{M0} = 355.0 \text{ N/mm}^2$
Nachweis $U_\sigma = \sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 0.858 < 1$ **ok**

Plastischer Spannungsnachweis

Plastischer Nachweis nach der Methode mit Teilschnittgrößen

Der Nachweis kann für dünnwandige Dreiblechquerschnitte (I-, C-, U-, Z-, L-, T-Querschnitte) durchgeführt werden, die entweder der **pcae**-Profiltafel entnommen oder parametrisiert eingegeben wurden.
4H-QUER-Querschnitte sind generell ausgenommen.
Dieser Nachweis ist der bevorzugte plastische Nachweis für die **pcae**-Programme und wird für sämtliche Schnittgrößen angeboten.

Das Teilschnittgrößenverfahren (TSV) mit Umlagerung wurde von *R. Kindmann, J. Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit* entwickelt. Es wird überprüft, ob die Schnittgrößen vom Querschnitt unter Ausnutzung der plastischen Reserven aufgenommen werden können (plastische Querschnittstragfähigkeit).
Dazu wird zunächst die Schubspannungserzeugende Belastung auf die Einzelbleche aufgebracht, die dadurch eine verminderte Aufnahmekapazität erhalten. Anschließend wird ein Gleichgewichtszustand für die normalspannungserzeugende Belastung und die verbleibende Tragfähigkeit der Bleche gesucht.
Die Ausnutzung des Gesamtquerschnitts entspricht dem Kehrwert des Laststeigerungsfaktors.

Beispiel U100

zul. Normal-/Schubspannung: zul $\sigma_{Rd} = 355.00 \text{ N/mm}^2$, zul $\tau_{Rd} = 204.96 \text{ N/mm}^2$
Obergurt: Querkraft $V_o = 2.77 \text{ kN}$, Schubspannung $\tau_o = 6.52 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\tau,o} = 0.032$
Gurtbiegung $M_{o,o} = 0.42 \text{ kNm}$, Biegespannung $\sigma_o = 44.78 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\sigma,o} = 0.126$
Grenznormalkräfte $N_{max,o} = 80.47 \text{ kN}$, $N_{min,o} = -55.07 \text{ kN}$
Untergurt: Querkraft $V_u = 1.23 \text{ kN}$, Schubspannung $\tau_u = 2.89 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\tau,u} = 0.014$
Gurtbiegung $M_{o,u} = 1.58 \text{ kNm}$, Biegespannung $\sigma_u = 167.39 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\sigma,u} = 0.472$
Grenznormalkräfte $N_{max,u} = 111.02 \text{ kN}$, $N_{min,u} = -13.32 \text{ kN}$
Steg: Querkraft $V_s = 4.00 \text{ kN}$, Schubspannung $\tau_s = 8.03 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\tau,s} = 0.039$
Grenznormalkräfte $N_{max,s} = 176.65 \text{ kN}$, $N_{min,s} = -176.65 \text{ kN}$
Hauptbieg.: Moment $M_y = 3.00 \text{ kNm}$, Grenzmomente $M_{y,max} = 10.90 \text{ kNm}$, $M_{y,min} = -7.43 \text{ kNm} \Rightarrow U_{M_y} = 0.138$
Gesamt (ggf. aus Laststeigerung): max $U = 0.473 < 1$ **ok**

Plastischer Nachweis nach der Methode mit Dehnungsiteration

Der Nachweis kann für alle dünnwandigen Querschnitte durchgeführt werden, die entweder der **pcae**-Profiltafel entnommen, parametrisiert eingegeben oder mit dem **pcae**-Programm **4H-QUER** als dünnwandiges Profil erzeugt wurden.
Flach- und Rundstähle sind jedoch ebenso ausgenommen wie dickwandige 4H-QUER-Querschnitte.
Das Verfahren der Dehnungsiteration (DIV) wird in *R. Kindmann, J. Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit (Kapitel 10.10)* beschrieben.
Ähnlich wie beim Teilschnittgrößenverfahren werden die Schubspannungen aus Querkraft und Torsion der einzelnen Querschnittsteile (Flansche, Stege, ...) aus der elastischen Schubverteilung berechnet. Diese Schubspannungen reduzieren die zulässige Normalspannung der Teile.
Können die Schubspannungen nicht aufgenommen werden, muss der maximal mögliche Lastfaktor reduziert werden.
Die Schubspannungen werden bei Spannungsüberschreitungen nicht umgelagert.
Die Verwölbung der Querschnittsteile wird wie beim elastischen Verfahren für dünnwandige Querschnitte ermittelt und in den einzelnen Teilen als ebene Verformung angesetzt.
Durch Variation der Dehnungsebene und der Verdrillungsableitung wird unter Berücksichtigung der reduzierten

zulässigen Normalspannungen ein Dehnungszustand gesucht, dessen resultierende Schnittgrößen ein maximales Vielfaches der aufzunehmenden Schnittgrößen sind.

Dieser Grenzdehnungszustand darf für keinen Querschnittspunkt die Bruchdehnung ϵ_u überschreiten bzw. $-\epsilon_u$ unterschreiten.

Falls der sich so ergebende maximale Lastfaktor evtl. nicht mit dem für die Schubspannungen verwendeten Lastfaktor übereinstimmt, sind weitere Berechnungsschritte notwendig, bis die Lastfaktoren nahezu gleich sind.

Die plastische Querschnittsausnutzung ist der Kehrwert des maximalen Lastfaktors.

Es ist zu beachten, dass abhängig von der Querschnittsform, auch Lastkombinationen ohne Wölbschnittgrößen im Grenzzustand zu einer Verwölbung des Querschnitts führen können. Eine Vernachlässigung des Wölbgleichgewichts ergibt eine geringere Ausnutzung.

Beispiel U100

zul. Vergleichsspannung: zul $\sigma_v = 355.0 \text{ N/mm}^2$

Nulllinie der Grenzdehnungen (plast.): $y_0 = 1.78 \text{ cm}$, $z_0 = -0.61 \text{ cm}$, $\alpha = 251.155^\circ$

Grenzdehnungen des Querschnitts (plast.): $\epsilon_{\min} = -10.95 \text{ ‰}$, $\epsilon_{\max} = 150.00 \text{ ‰}$

Grenznormalspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{\min} = -354.51 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\max} = 354.84 \text{ N/mm}^2$

Grenzschubspannungen des Querschnitts (plast.): $\tau_{\min} = 6.13 \text{ N/mm}^2$, $\tau_{\max} = 14.06 \text{ N/mm}^2$

Grenzvergleichsspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{v,\min} = 29.58 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{v,\max} = 355.00 \text{ N/mm}^2$

Grenzspannungen der Linien des Querschnitts (plast.) in N/mm^2 :

1: $\sigma_{\min} = -353.82$, $\sigma_{\max} = 353.82$, $\tau = 14.06$, $\sigma_{v,\min} = 29.58$, $\sigma_{v,\max} = 354.66$

2: $\sigma_{\min} = -353.84$, $\sigma_{\max} = 353.83$, $\tau = 14.02$, $\sigma_{v,\min} = 207.01$, $\sigma_{v,\max} = 354.67$

3: $\sigma_{\min} = -354.51$, $\sigma_{\max} = 354.84$, $\tau = 6.13$, $\sigma_{v,\min} = 70.61$, $\sigma_{v,\max} = 355.00$

Lastfaktor der Schubspannungen (plast.): $f_{\tau,pl} = 1.988$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 1.987$

Ausnutzung: $U_{\sigma,pl} = 0.503$

Ausnutzung: max $U = 0.503 < 1$ **ok**

Plastischer Nachweis nach EC 3-1-1, 6.2

Dieser Nachweis wird nur für das Doppel-T-Profil, das Hohlprofil und den Flachstahl angeboten.

4H-QUER-Querschnitte sind generell ausgenommen.

Der Nachweis wird für alle Schnittgrößen mit Ausnahme der Verwölbungsgrößen T_ω und B angeboten.

Er folgt den Regeln des EC 3-1-1, 6.2.2 bis 6.2.10. Es wird der ungeschwächte Bruttoquerschnitt zu Grunde gelegt.

Der Querschnitt gehört den Klassen 1 oder 2 an.

Die plastische Normalkrafttragfähigkeit berechnet sich mit (6.2.3+4)

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Die plastische Biegetragfähigkeit berechnet sich mit (6.2.5)

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Die plastische Querkrafttragfähigkeit berechnet sich mit (6.2.6)

$$V_{pl,Rd} = A \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$$

Die plastische Torsionstragfähigkeit berechnet sich mit (6.2.7)

$$T_{pl,Rd} = W_T \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$$

Die plastische Berechnung basiert auf dem Nachweis der Momentenbeanspruchbarkeit. Dazu wird die plastische Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit der anderen Beanspruchungen (N , V , T) abgemindert.

Bei kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion ergibt sich nach 6.2.7

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1.25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd} \quad \text{für I- oder H-Querschnitte}$$

$$V_{pl,T,Rd} = \left(1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}\right) \cdot V_{pl,Rd} \quad \text{für Hohlprofile}$$

Die ggf. abgeminderte Querkraft wirkt sich nach 6.2.8 auf die Momententragfähigkeit aus, wenn gilt

$$V_{Ed} > V_{pl,Rd} / 2: f_{y,red} = (1 - \rho) \cdot f_y \quad \text{wobei} \quad \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad \text{und} \quad V_{pl,Rd} \text{ ggf. mit Abminderung aus Torsion}$$

Anstelle der Steifigkeit f_y wird das plastische Widerstandsmoment um den ρ -Anteil der querkraftbelasteten Querschnittsteile reduziert. Dadurch ergibt sich die reduzierte plastische Biegetragfähigkeit zu

$$M_{y,V,Rd} = W_{pl,y,red} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{aber} \quad M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$$

Die gleichzeitige Wirkung einer Normalkraft ist nach 6.2.9 bei der Biegetragfähigkeit zu berücksichtigen, wenn gilt

rechteckiger Vollquerschnitt und Hohlquerschnitt: immer

doppelt-symmetrische I- und H-Querschnitte: nur, wenn

$$\text{y-y-Achse} \quad N_{Ed} > 0.25 \cdot N_{pl,Rd} \quad \text{und} \quad N_{Ed} > 0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$$\text{z-z-Achse} \quad N_{Ed} > h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Die reduzierte Biegetragfähigkeit beträgt

$$\text{rechteckiger Vollquerschnitt} \quad M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^2) \quad \text{wobei} \quad n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

doppelt-symmetrische I- und H-Querschnitte

$$\text{y-y-Achse} \quad M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a) \quad \text{jedoch} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$$

$$\text{z-z-Achse} \quad \text{für } n \leq a \quad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$$

$$\text{für } n > a \quad M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left(1 - \left(\frac{n - a}{1 - a} \right)^2 \right)$$

$$\text{... wobei} \quad n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} \quad \text{und} \quad a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \quad \text{jedoch} \quad a \leq 0.5$$

rechteckiger Hohlquerschnitt

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \quad \text{jedoch} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_f) \quad \text{jedoch} \quad M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}$$

$$\text{... wobei} \quad n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} \quad \text{und} \quad a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t) / A \quad \text{jedoch} \quad a_w \leq 0.5$$

$$\text{... und} \quad a_f = (A - 2 \cdot h \cdot t) / A \quad \text{jedoch} \quad a_f \leq 0.5$$

$$\text{runder Hohlquerschnitt} \quad M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1.7}) \quad \text{wobei} \quad n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

wobei die Biegetragfähigkeit bereits durch Querkraft und/oder Torsion abgemindert sein kann.

Ebenso kann die Normalkrafttragfähigkeit durch Querkraft und/oder Torsion abgemindert sein, da die querkraftbeanspruchten Querschnittsteile um den Faktor ρ reduziert werden.

Der Nachweis wird bei einachsiger Biegung mit Normalkraft geführt mit

$$M_{Ed} / M_{pl,N,Rd} \leq 1$$

und bei zweiachsiger Biegung mit Normalkraft mit

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1$$

$$\text{rechteckiger Vollquerschnitt} \quad \alpha = \beta = 1$$

$$\text{I- und H-Querschnitte} \quad \alpha = 2 \quad \text{und} \quad \beta = 5 \cdot n \quad \text{jedoch} \quad \beta \geq 1$$

$$\text{rechteckiger Hohlquerschnitt} \quad \alpha = \beta = 1.66 / (1 - 1.13 \cdot n^2) \quad \text{jedoch} \quad \alpha = \beta \leq 6$$

$$\text{... wobei} \quad n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

Beispiel Blech 50 x 8.5

plastische Kenngrößen: $N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 150.88 \text{ kN}$, $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1.89 \text{ kNm}$
 $V_{pl,z,Rd} = A_{vz} \cdot f_y / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M0}) = 87.11 \text{ kN}$, $M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 0.32 \text{ kNm}$, $V_{pl,y,Rd} = A_{vy} \cdot f_y / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M0}) = 87.11 \text{ kN}$

Torsion

$$\tau_{t,Ed} = |T_{t,Ed}| / \min W_t = 92.71 \text{ N/mm}^2, \min W_t = 1.08 \text{ cm}^3$$

Querkraft und Torsion

Abminderung V_z : $\tau_{t,z,Ed} = |T_{t,Ed}| / W_{t,z} = 92.71 \text{ N/mm}^2$, $W_{t,z} = 1.08 \text{ cm}^3$

$$f_{t,z} = (1 - \tau_{t,z,Ed} / (1.25 \cdot \tau_{Rd}))^{1/2} = 0.799 \Rightarrow V_{pl,T,z,Rd} = V_{pl,z,Rd} \cdot f_{t,z} = 69.58 \text{ kN}$$

Abminderung V_y : $\tau_{t,y,Ed} = |T_{t,Ed}| / W_{t,y} = 92.71 \text{ N/mm}^2$, $W_{t,y} = 1.08 \text{ cm}^3$

$$f_{t,y} = (1 - \tau_{t,y,Ed} / (1.25 \cdot \tau_{Rd}))^{1/2} = 0.799 \Rightarrow V_{pl,T,y,Rd} = V_{pl,y,Rd} \cdot f_{t,y} = 69.58 \text{ kN}$$

Querkraft

Abminderungsfaktoren:

z-Ri: $0.5 \cdot V_{pl,T,z,Rd} = 34.79 \text{ kN} < |V_{z,Ed}| = 50.00 \text{ kN}$: $\rho_z = (2 \cdot |V_{z,Ed}| / V_{pl,T,z,Rd} - 1)^2 = 0.191$

y-Ri: $0.5 \cdot V_{pl,T,y,Rd} = 34.79 \text{ kN} > |V_{y,Ed}| = 5.00 \text{ kN}$: $\rho_y = 0$ (keine Abminderung)

Normalkraft und Querkraft

z-Ri: $\Delta A_w = \rho_z \cdot A_w = 0.81 \text{ cm}^2$, $A_w = 4.25 \text{ cm}^2$

$$\Rightarrow N_{pl,V,Rd} = A_{red} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 122.05 \text{ kN}, A_{red} = A - \Delta A_w = 3.44 \text{ cm}^2$$

Biegung und Querkraft

z-Ri: $W_{v,y} = (1 - \rho_z) \cdot W_{pl,y} = 4.30 \text{ cm}^3$

$$\Rightarrow M_{pl,V,y,Rd} = W_{v,y} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1.53 \text{ kNm}$$

Biegung

Nachweis: $|M_{y,Ed}| / M_{pl,V,y,Rd} + |M_{z,Ed}| / M_{pl,z,Rd} = 1.311 + 0.624 = 1.935 > 1$ **Fehler !!**

Nachweise Aluminium

Das Programm 4H-EC3QN weist Bauteile aus Aluminium elastisch nach.

Beulen ist ausgeschlossen, d.h. der Querschnitt befindet sich mindestens in Querschnittsklasse 3 (s. EC 9-1-1, 6.1.4.4).

Der Spannungsnachweis eines Aluminium-Querschnitts erfolgt mit dem Fließkriterium nach EC 9-1-1, 6.2.1(5).

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq C$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \leq 1 \dots \text{und} \dots \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \leq 1 \dots \text{und} \dots \frac{\sqrt{3} \cdot \tau_{Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Der Sicherheitsbeiwert beträgt nach EC 9-1-1, 6.1.3(1) $\gamma_{M1} = 1.1$ (s. ggf. [EC 9-1-1, NA](#)).

Die zulässige Fließgrenze entspricht der 0.2%-Dehngrenze f_o der jeweiligen Legierung.

Die zulässige Vergleichsspannung darf um den Faktor $C^{0.5} = 1.20^{0.5} = 1.095$ (s. ggf. [EC 9-1-1, NA](#)) erhöht werden, wohingegen die Normal- und Schubspannungen ohne Erhöhung der zulässigen Spannungen nachgewiesen werden.

Die Dehnungen in der Ergebnisausgabe werden mit der materialspezifischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Traglastnachweise (s. Ramberg-Osgood-Modell in EC 9-1-1, E.2.2.2) aus den Normalspannungen berechnet.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_o} \right)^n$$

Der Exponent n ist abhängig vom Dehnungsbereich, der dem untersuchten Verhalten entspricht. Wenn die Berechnung elastisch erfolgt, wird n mit Gl. (E.15) ermittelt, bei plastischer Berechnung wird Gl. (E.18) angewandt.

elastische Berechnung

$$n = \frac{\ln(0.000001/0.002)}{\ln(f_p/f_o)} \quad \dots \text{wobei die Proportionalitätsgrenze } f_p \text{ nur vom Wert der Streckgrenze } f_o \text{ abhängt}$$

$$f_p = f_o - 2 \cdot \sqrt{10} \cdot f_o \quad \dots \text{wenn } f_o > 160 \text{ N/mm}^2$$

$$f_p = f_o / 2 \quad \dots \text{wenn } f_o \leq 160 \text{ N/mm}^2$$

plastische Berechnung

$$n = \frac{\ln(0.002/\epsilon_u)}{\ln(f_o/f_u)} \quad \dots \text{wobei der obere Wert der Gleichmaßdehnung beschrieben wird mit}$$

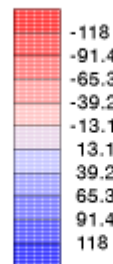
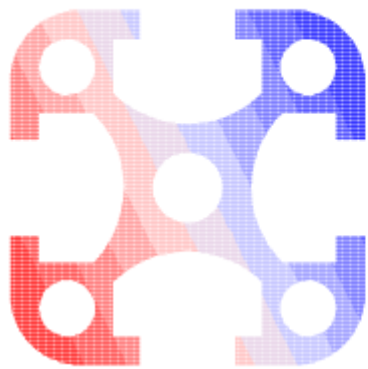
$$\epsilon_u = 0.30 - 0.22 \cdot f_o / 400 \quad \dots \text{wenn } f_o < 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_u = 0.08 \quad \dots \text{wenn } f_o \geq 400 \text{ N/mm}^2$$

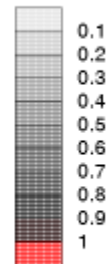
Aktuell wird für Aluminiumlegierungen nur der elastische Nachweis angeboten. Daher erfolgt die Berechnung des Exponenten mit (E.15).

Die Auswirkungen der exponentiellen Zunahme der Dehnungen bei hoher Beanspruchung werden im Deformationsplot deutlich. Beispielhaft wird ein Aluminiumprofil diagonal durch ein Moment belastet. Die Ausnutzung in den diagonal gegenüberliegenden Ecken ist überschritten, d.h. dass die Normalspannungen größer als die 0.2%-Dehngrenze sind.

Normalspannungen σ_x [N/mm²]
min $\sigma_x = -146.9$, max $\sigma_x = 146.9$

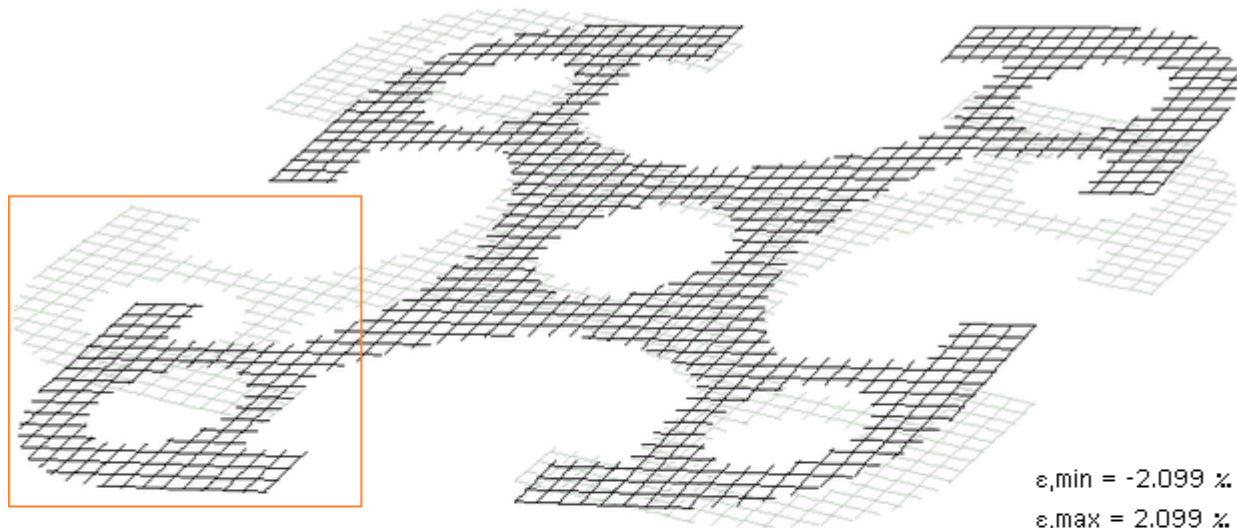


Ausnutzung U_σ
max $U_\sigma = 1.078$

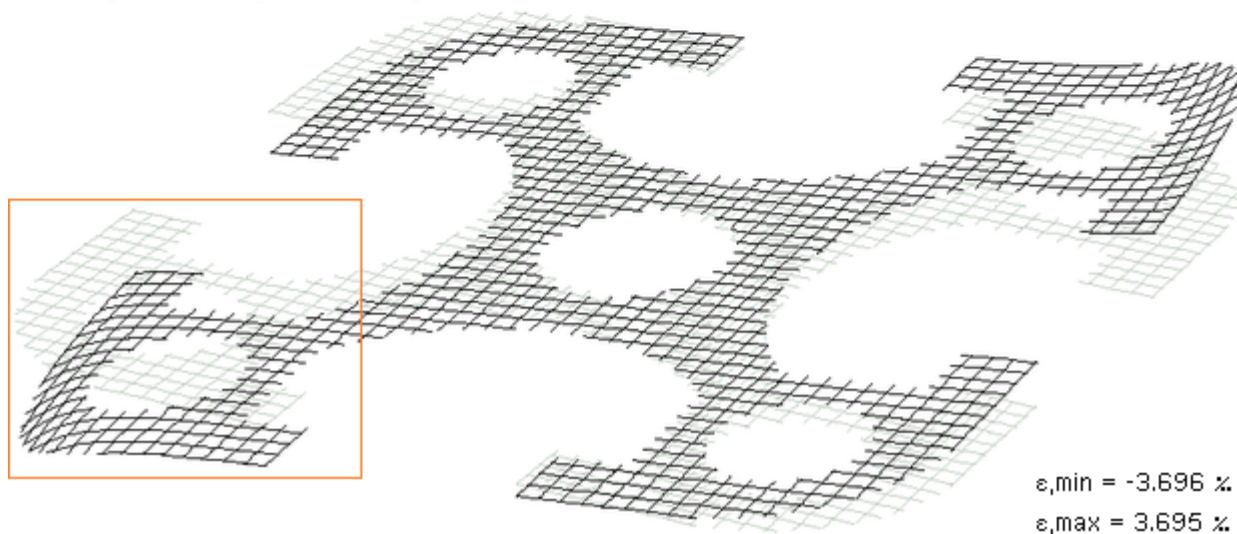


Die Berechnung der Dehnungen nach dem Hooke'schen Gesetz ($\epsilon = \sigma / E$) erzeugt eine Dehnungsebene (gleichmäßig eben), während die Dehnungen bei der Berechnung nach EC 9, Anhang E in den Bereichen, in denen die 0.2%-Dehngrenze der Spannungen überschritten wird, sich nichtlinear verhalten.

Dehnungsberechnung mit Hookeschem Gesetz



Dehnungsberechnung nach Anhang E



Beschreibung der Ergebnisse

Das Programm bietet drei elastische und drei plastische Verfahren an, einen Querschnitt zu bemessen.

Die Verfahren unterscheiden sich i.W. in ihrer Anwendbarkeit auf verschiedene Querschnittstypen. Nähere Informationen zu den Verfahren finden Sie [hier](#).

In der Literatur werden bevorzugt Verfahren entwickelt, die nur für häufig vorkommende Querschnittstypen gelten.

Anhand des Doppel-T-Profils werden im Folgenden die Unterschiede der Verfahren dargestellt (Bsp. 1).

Anschließend wird die Berechnung von frei definierten Querschnitten (s. [4H-QUER](#)) aus Aluminium vorgestellt und der Unterschied zum Material Stahl erläutert (Bsp. 2).

Zum Schluss werden die Auswirkungen der Wölbkrafttorsion dargestellt (Bsp. 3). Beachte: Die Spannungen treten bei Behinderung der Verwölbung auf, also maßgeblich bei Verbindungen.

Bsp. 1 - Wagenknecht, 2.6.1: HE300A, S235, $M_{y,Ed} = 225 \text{ kNm}$, $V_{z,Ed} = 160 \text{ kN}$
• Elastische Spannungsnachweise

Die elastischen Spannungsnachweise berechnen die Normalspannungen generell mit

$$\sigma_x = N/A + M_\eta / I_\eta \cdot \zeta - M_\zeta / I_\zeta \cdot \eta$$

(s. [Querschnittsnachweise](#)), wobei für diesen Querschnittstyp $I_\eta = I_y$ und $I_\zeta = I_z$ gelten

Die Querschnittsparameter werden aus den Profilparametern berechnet und können daher geringfügig von Tabellenwerten abweichen.

Profil HE300A
Rechenwerte:
 $h = 290.0\text{ mm}$, $t_w = 8.5\text{ mm}$, $b_f = 300.0\text{ mm}$, $t_f = 14.0\text{ mm}$, $r = 27.0\text{ mm}$
 $A = 112.53\text{ cm}^2$, $I_y = 18261.89\text{ cm}^4$, $I_z = 6307.96\text{ cm}^4$, $I_T = 78.69\text{ cm}^4$, $y_s = -150.0\text{ mm}$, $z_s = 145.0\text{ mm}$

Abweichungen zwischen den Nachweisen ergeben sich vor allem in der Berechnung der Schubspannungen.
Die maximale Tragfähigkeit wird in *Wagenknecht* mit $U = 0.73$ am Steganschnitt angegeben.

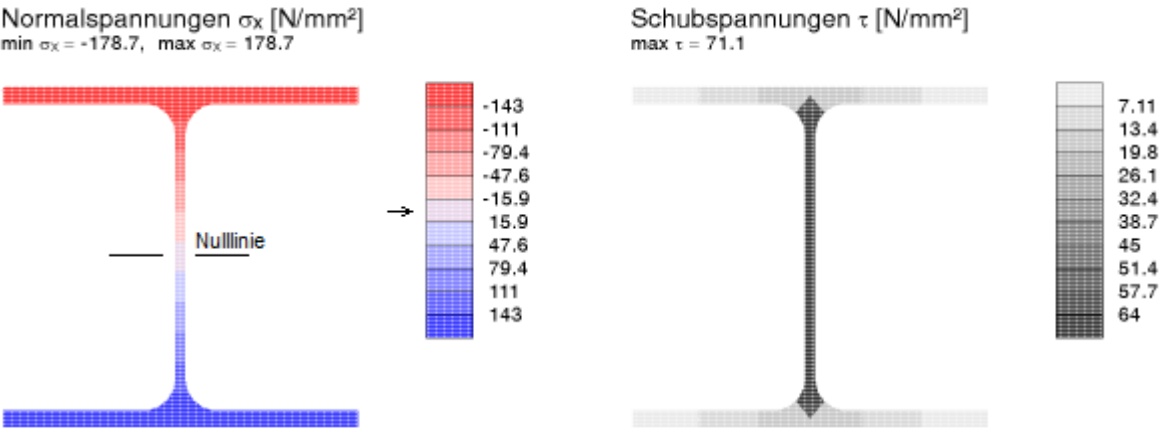
dünnwandiger Querschnitt

Bei diesem Verfahren wird der Querschnitt durch seine Mittellinien und die zugehörigen Blechdicken beschrieben.
Ausrundungen und veränderliche Blechdicken werden berücksichtigt.
Die extremalen Normalspannungen beziehen sich auf die äußersten Querschnittsfasern (nicht auf die Mittellinien!),
wohingegen die Schubspannungen für die Mittellinien berechnet werden.

Zu jeder extremalen Größe werden die Querschnittskordinaten y, z bezogen auf den Schwerpunkt und die zugehörigen Spannungen σ_x , τ , σ_v angegeben.

elastische Spannungen: $\max |\sigma_x| = 178.67\text{ N/mm}^2$, $\max \tau = 71.11\text{ N/mm}^2$, $\max \sigma_v = 201.48\text{ N/mm}^2$
 $\max \sigma_x$ bei $y = 150.0\text{ mm}$, $z = 145.0\text{ mm}$: $\sigma_x = 178.67\text{ N/mm}^2$, $\tau = 0.00\text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 178.67\text{ N/mm}^2$
 $\min \sigma_x$ bei $y = 150.0\text{ mm}$, $z = -145.0\text{ mm}$: $\sigma_x = -178.67\text{ N/mm}^2$, $\tau = 0.00\text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 178.67\text{ N/mm}^2$
 $\max \tau$ bei $y = 0.0\text{ mm}$, $z = 0.0\text{ mm}$: $\sigma_x = 0.00\text{ N/mm}^2$, $\tau = 71.11\text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 123.16\text{ N/mm}^2$
 $\max \sigma_v$ bei $y = 0.0\text{ mm}$, $z = -138.0\text{ mm}$: $\sigma_x = -170.04\text{ N/mm}^2$, $\tau = 62.39\text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 201.48\text{ N/mm}^2$
zul. Vergleichsspannung: $\text{zul } \sigma_v = 235.0\text{ N/mm}^2$
Nachweis: $\sigma_v = 201.48\text{ N/mm}^2 < \text{zul } \sigma_v = 235.00\text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_\sigma = 0.857 < 1$ **ok**
Ausnutzungen: Tragfähigkeit $U_\sigma = 0.857 < 1$ **ok**

Der Nachweis wird für die maximale Vergleichsspannung geführt und ergibt die Tragfähigkeit (Ausnutzung U).
Die maximale Vergleichsspannung und damit auch die maximale Ausnutzung tritt im Flansch bei $z = \pm 138\text{ mm} = h/2 - t_f/2$ auf, also im Schnittpunkt der Mittellinien.
Bei diesem Verfahren ist der Konturenplot verfügbar, er zeigt die Spannungsverteilung an. Die Normalspannungen werden farblich markiert, hier steht rot für Druck und blau für Zug (Palette 1).
Die Schubspannungen sind stets positiv, daher ist die Konturdarstellung neutral gehalten. Die Intensität der Farben zeigt die Größe des Ergebniswerts an.
Deutlich zu erkennen ist der lineare Verlauf der Normalspannungen. Es wird programmintern dafür gesorgt, dass sich die neutrale Zone im hellsten Farbbereich (Palette 1) befindet.
Die Schubspannungen sind senkrecht zur Mittellinie konstant. In den Knotenpunkten (Flansche-Steg) ergeben sich sprunghafte Veränderungen, die auf das Verfahren zurückzuführen sind. Der Maximalwert tritt in Stegmitte auf.



Die Konturergebnisse können zudem tabellarisch dargestellt werden. I.A. werden nur die extremalen Werte ausgegeben, die führenden Werte $\pm \epsilon$, $\pm \sigma_x$, τ , σ_v sind unterlegt.

Dehnungen, Spannungen, Ausnutzungen

y mm	z mm	ε ‰	σ _x N/mm ²	τ N/mm ²	σ _y N/mm ²	U _σ
0.0	-145.0	-0.851	-178.65	0.00	178.65	0.760
150.0	-145.0	-0.851	-178.65	18.94	181.64	0.773
150.0	-138.0	-0.810	-170.10	62.39	201.52	0.858
145.8	0.0	0.000	0.00	71.11	123.16	0.524
0.0	145.0	0.851	178.65	0.00	178.65	0.760
150.0	145.0	0.851	178.65	18.94	181.64	0.773

y,z: Knotenkoordinaten; σ_x,τ,σ_y: Spannungen; U_σ: Spannungsausnutzung

Die maximale Ausnutzung berechnet sich nach dieser Methode zu U = 0.86, liegt also im Vergleich zur Handrechnung (*Wagenknecht*) auf der sicheren Seite.

Finite-Elemente-Methode

Der Querschnitt wird polygonal modelliert und mit FEM ganzheitlich berechnet, d.h. vorab berechnete Querschnittsparameter sind nicht von Belang.

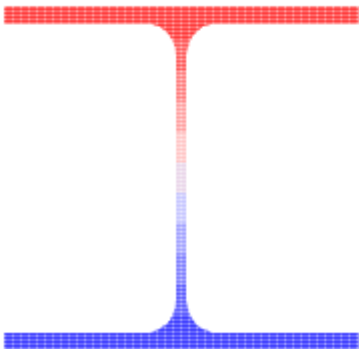
Der Q. wird unter Berücksichtigung der Schlankheit seiner Bleche diskretisiert. Die Netzdichte kann beeinflusst werden, wenn der **Profi-Button** aktiviert ist.

Aus den Ergebnissen in den Knotenpunkten werden die extremalen Dehnungen, Spannungen und Ausnutzungen ermittelt und in einer Tabelle dargestellt.

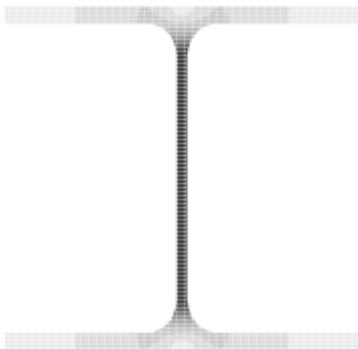
Bei diesem Verfahren ist der Konturenplot obligatorisch (Erläuterung s.o. 'dünnwandiger Querschnitt').

Die Schubspannungen ergeben sich nach diesem Verfahren veränderlich über die Blechdicke. Der Knotenbereich von Flanschen und Steg ist gegenüber dem Verfahren der dünnwandigen Querschnitte besser erfasst. Dadurch ergibt sich ein realitätsnäheres Ergebnis.

Normalspannungen σ_x [N/mm²]
min σ_x = -178.7, max σ_x = 178.7



Schubspannungen τ [N/mm²]
max τ = 71.3



Aus der Ergebnistabelle lässt sich ablesen, dass die maximale Tragfähigkeit an der Flanschaußenkante im Bereich des Stegs auftritt.

Dehnungen, Spannungen, Ausnutzungen

y mm	z mm	ε ‰	σ _x N/mm ²	τ N/mm ²	σ _y N/mm ²	U _σ
-150.0	145.0	0.851	178.67	0.19	178.67	0.760
-0.0	145.0	0.851	178.67	2.09	178.71	0.760
150.0	-145.0	-0.851	-178.67	0.19	178.67	0.760
-0.0	-145.0	-0.851	-178.67	2.10	178.71	0.760
-4.3	0.4	0.002	0.49	71.29	123.47	0.525
-33.1	145.0	0.851	178.67	13.61	180.22	0.767
-29.5	145.0	0.851	178.67	13.57	180.21	0.767

y,z: Knotenkoordinaten; σ_x,τ,σ_y: Spannungen; U_σ: Spannungsausnutzung

Die maximale Ausnutzung berechnet sich nach dieser Methode zu U = 0.77; größer als der Wert der Handrechnung (*Wagenknecht*). Der Grund liegt darin, dass dieses Verfahren die äußerste Querschnittsfaser berücksichtigt, *Wagenknecht* die Normalspannungen nach EC 3-1-1 in Flanschmitte berechnet.

Die FEM berechnet dort eine maximale Ausnutzung von U = 0.74, was in etwa der Ausnutzung am Steganschnitt entspricht.

Die FEM ist genauer als das Verfahren für dünnwandige Querschnitte, jedoch erfordert es bei komplexen Querschnitten

(s. Bsp. 3) erheblich mehr Rechenzeit.

Spannungsebene

Das Verfahren ist ein Handrechenverfahren zur Berechnung von normal- und biegebelasteten Querschnitten. Schubkräfte (Querkraft und Torsion) können nicht nachgewiesen werden.

Es wird die Gleichung der Spannungsebene und der Spannungsnulllinie (neutrale Faser) protokolliert. Daraus berechnen sich die extremalen Normalspannungen, die sich auf die äußersten Querschnittsfasern beziehen.

Zu jeder extremalen Größe werden die Querschnittskordinaten y, z bezogen auf den Schwerpunkt und die zugehörigen Spannungen σ_x angegeben.

```
Spannungsebene  $\sigma_x = 0.00 + -0.000 \cdot y + 1.232 \cdot z$ 
Spannungsnulllinie  $z = -0.00 + 0.000 \cdot y$ 
maximale Normalspannung bei  $y = 150.0$  mm,  $z = 145.0$  mm:  $\sigma_{x,max} = 178.65$  N/mm2
minimale Normalspannung bei  $y = 0.0$  mm,  $z = -145.0$  mm:  $\sigma_{x,min} = -178.65$  N/mm2
Bemessungsnormalspannung  $\sigma_{Ed} = \max(|\sigma_{x,max}|, |\sigma_{x,min}|) = 178.65$  N/mm2
zulässige Normalspannung  $\sigma_{Rd} = f_y / \gamma_{M0} = 235.0$  N/mm2
Nachweis  $U_\sigma = \sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 0.760 < 1$  ok
```

Der Nachweis wird für die Bemessungsnormalspannung geführt und ergibt die Tragfähigkeit (Ausnutzung $U_\sigma = 0.76$).

• Plastische Spannungsnachweise

Nachweis mit Teilschnittgrößen (TSV)

Der Nachweis ist anwendbar für offene, dünnwandige Zwei-/Drei-Blech-Querschnitte aus der **pcae**-Profildatenbank.

Frei definierte Querschnitte (4H-QUER) können nicht nachgewiesen werden.

Für die Einzelbleche (Obergurt, Untergurt, Steg) werden die Grenzkkräfte berechnet und die anteiligen Schnittgrößen nachgewiesen. Die Gesamtausnutzung kann jedoch auf Grund der Spannungsumlagerungen nur durch Laststeigerung berechnet werden.

Daraus ergibt sich für das gewählte Beispiel eine Ausnutzung von $U = 0.75$; für dieses Beispiel nur geringfügig kleiner als die elastische Querschnittsausnutzung.

```
zul. Normal-/Schubspannung: zul  $\sigma_{Rd} = 235.0$  N/mm2, zul  $\tau_{Rd} = 135.7$  N/mm2
Obergurt: Grenznormalkräfte  $N_{max,O} = 987.00$  kN,  $N_{min,O} = -987.00$  kN
Untergurt: Grenznormalkräfte  $N_{max,U} = 987.00$  kN,  $N_{min,U} = -987.00$  kN
Steg: Querkraft  $V_s = 160.00$  kN, Schubspannung  $\tau_s = 68.20$  N/mm2  $\Rightarrow U_{\tau,s} = 0.503$ 
      Grenznormalkräfte  $N_{max,s} = 476.59$  kN,  $N_{min,s} = -476.59$  kN
Hauptbieg.: Moment  $M_y = 225.00$  kNm, Grenzmomente  $M_{y,max} = 305.30$  kNm,  $M_{y,min} = -305.30$  kNm
            $\Rightarrow U_{My} = 0.737$ 
Gesamt (ggf. aus Laststeigerung): max  $U = 0.750 < 1$  ok
Ausnutzungen: Tragfähigkeit  $U_\sigma = 0.750 < 1$  ok
```

Die Ergebnisse können nicht als Konturenplot dargestellt werden.

Methode mit Dehnungssiteration (DIV)

Der Nachweis kann für alle dünnwandigen Querschnitte (**pcae**-Profilmanager, parametrisiert, **4H-QUER** - dünnwandig) geführt werden.

Der Querschnitt wird durch seine Mittellinien beschrieben. Iterativ wird der plastische Grenzdehnungszustand des Querschnitts unter der gegebenen Lastkombination für $\epsilon = \pm 150$ ‰ ermittelt.

Die Grenzdehnungen können modifiziert werden, wenn der **Profi-Button** aktiviert ist. Außerdem kann festgelegt werden, ob das Wölbgleichgewicht bei Berechnung des Grenzzustands eingehalten werden soll.

Die Querschnittsausnutzung beträgt hier nur $U = 0.72$.

Querschnittslinien:

- 1: $y_a = 150.0\text{ mm}$, $z_a = -138.0\text{ mm}$, $y_e = 150.0\text{ mm}$, $z_e = -131.0\text{ mm}$
- 2: $y_a = -150.0\text{ mm}$, $z_a = -138.0\text{ mm}$, $y_e = -150.0\text{ mm}$, $z_e = -145.0\text{ mm}$
- 3: $y_a = 0.0\text{ mm}$, $z_a = -138.0\text{ mm}$, $y_e = 12.2\text{ mm}$, $z_e = -123.1\text{ mm}$
- 4: $y_a = 150.0\text{ mm}$, $z_a = 138.0\text{ mm}$, $y_e = 150.0\text{ mm}$, $z_e = 145.0\text{ mm}$
- 5: $y_a = -150.0\text{ mm}$, $z_a = 138.0\text{ mm}$, $y_e = -150.0\text{ mm}$, $z_e = 131.0\text{ mm}$

zul. Vergleichsspannung: $\text{zul. } \sigma_v = 235.0\text{ N/mm}^2$

Nulllinie der Grenzdehnungen (plast.): $y_0 = 0.00\text{ cm}$, $z_0 = -0.00\text{ cm}$, $\alpha = 180.000^\circ$

Grenzdehnungen des Querschnitts (plast.): $\epsilon_{\min} = -150.00\text{ ‰}$, $\epsilon_{\max} = 150.00\text{ ‰}$

Grenznormalspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{\min} = -233.94\text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\max} = 233.94\text{ N/mm}^2$

Grenzschubspannungen des Querschnitts (plast.): $\tau_{\min} = 12.88\text{ N/mm}^2$, $\tau_{\max} = 84.41\text{ N/mm}^2$

Grenzvergleichsspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{v,\min} = 146.20\text{ N/mm}^2$, $\sigma_{v,\max} = 235.00\text{ N/mm}^2$

Grenzspannungen der Querschnittslinien (plast.) in N/mm^2 :

- 1: $\sigma_{\min} = -233.94$, $\sigma_{\max} = -233.90$, $\tau = 12.88$, $\sigma_{v,\min} = 234.96$, $\sigma_{v,\max} = 235.00$
- 2: $\sigma_{\min} = -233.94$, $\sigma_{\max} = -233.90$, $\tau = 12.88$, $\sigma_{v,\min} = 234.96$, $\sigma_{v,\max} = 235.00$
- 3: $\sigma_{\min} = -183.98$, $\sigma_{\max} = 183.98$, $\tau = 84.41$, $\sigma_{v,\min} = 146.20$, $\sigma_{v,\max} = 234.99$
- 4: $\sigma_{\min} = 233.90$, $\sigma_{\max} = 233.94$, $\tau = 12.88$, $\sigma_{v,\min} = 234.96$, $\sigma_{v,\max} = 235.00$
- 5: $\sigma_{\min} = 233.90$, $\sigma_{\max} = 233.94$, $\tau = 12.88$, $\sigma_{v,\min} = 234.96$, $\sigma_{v,\max} = 235.00$

Lastfaktor der Schubspannungen (plast.): $f_{\tau,pl} = 1.394 \Rightarrow U_{\tau,pl} = 0.717$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 1.394 \Rightarrow U_{\sigma,pl} = 0.717$

Gesamt: Ausnutzung: $U_{pl} = 0.717 < 1$ **ok**

Ausnutzungen: Tragfähigkeit $U_\sigma = 0.717 < 1$ **ok**

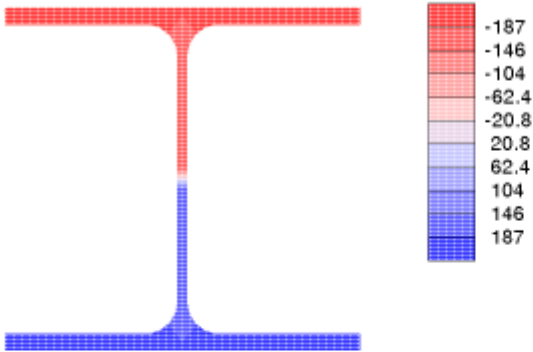
Die Ergebnisse der plastischen Berechnung können im Konturenplot visualisiert werden. Es werden jedoch lediglich die Grenzdehnungen, Grenzspannungen und die lokale Ausnutzung dargestellt. Es lässt sich also nicht der aktuelle Plastizierungsgrad ablesen.

Die Grenznormalspannungen sind unter der gegebenen Lastkombination konstant bis zur Querschnittsachse und erreichen den Grenzwert $\sigma_x = \pm 234\text{ N/mm}^2$.

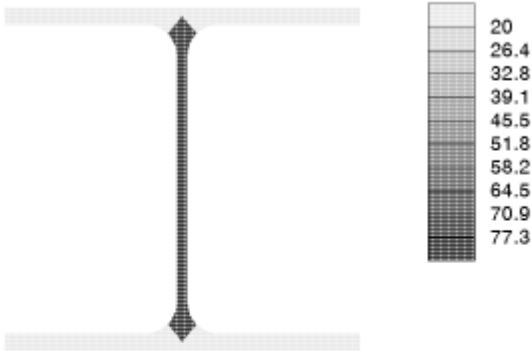
Die Querkraft wird allein vom Steg aufgenommen und bewirkt eine maximale Grenzschubspannung von $\max \tau = 84\text{ N/mm}^2$.

Daraus ergeben sich die Grenzvergleichsspannungen, die in nahezu allen Querschnittspunkten der Grenzspannung $f_{yd} = 235\text{ N/mm}^2$ entsprechen, d.h. der Querschnitt ist optimal plastisch nachgewiesen.

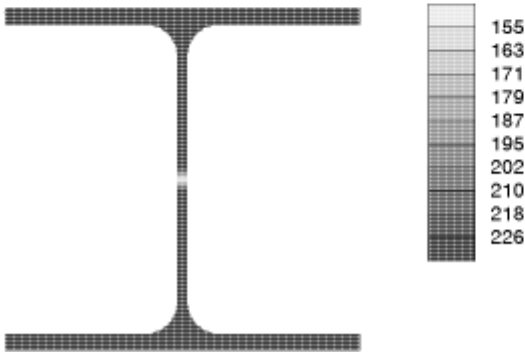
Normalspannungen $\sigma_x\text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\min \sigma_x = -233.9$, $\max \sigma_x = 233.9$



Schubspannungen $\tau\text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\max \tau = 84.4$



Vergleichsspannungen $\sigma_v\text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\max \sigma_v = 235.0$



In der Ergebnistabelle werden die o.a. Werte zahlenmäßig ausgegeben.

Dehnungen, Spannungen					
y	z	ε	σ _x	τ	σ _y
mm	mm	‰	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
-150.0	-145.0	150.000	-233.94	12.88	235.00
-0.0	-145.0	150.000	-233.94	12.88	235.00
-12.2	-123.1	127.336	-183.95	84.41	234.97
-150.0	145.0	150.000	233.94	12.88	235.00
-0.0	145.0	150.000	233.94	12.88	235.00

y,z: Knotenkoordinaten; σ_x,τ,σ_y: Spannungen

Die maximale Ausnutzung bezieht sich bei plastischer Berechnung auf den Gesamtquerschnitt und berechnet sich nach dieser Methode zu U = 0.72.

Das Verfahren mit Dehnungsiteration ist flexibler als das Verfahren mit Teilschnittgrößen, da es beliebige dünnwandige Querschnitte plastisch berechnet. Allerdings geht die Flexibilität einher mit einer erheblich längeren Rechenzeit.

Nachweis nach EC 3-1-1, 6.2

Der Nachweis ist nur für wenige Querschnittstypen, Doppel-T- und dünnwandige Hohlprofile, verfügbar.

4H-QUER-Querschnitte können nicht nachgewiesen werden. Wölbkrafttorsion ist ausgeschlossen.

Es werden die Eurocode-Formeln für den plastischen Querschnittsnachweis angewandt. Nachvollziehbar wird jeder Rechenschritt dargestellt, bis die abgeminderte plastische Momententragfähigkeit bestimmt ist.

Für dieses Beispiel ergibt sich damit eine geringe Ausnutzung von U = 0.70, da nach Norm die Querkraft die Momententragfähigkeit nicht beeinflusst.

Das genauere Verfahren (DIV) bescheinigt jedoch einen, wenn auch geringen, Einfluss der Schubspannung auf die Querschnittsausnutzung.

Plattenbeulen: Q-Klasse des Profils 1 ≤ 2 ok
Schubbeulen: $h_p/t_p = 30.82 \leq 72 \cdot \epsilon / \eta = 60.00$ ok
plastische Kenngrößen: $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 325.04$ kNm, $V_{pl,z,Rd} = A_{vz} \cdot f_y / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M0}) = 505.78$ kN

Querkraft
Abminderungsfaktoren:
Steg: $0.5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 252.89$ kN > $|V_{z,Ed}| = 160.00$ kN: $\rho_z = 0$ (keine Abminderung)
 $|V_{y,Ed}| = 0$: $\rho_y = 0$ (keine Abminderung)

Biegung
Nachweis: $|M_{y,Ed}| / M_{pl,y,Rd} = 0.692 < 1$ ok

Die Ergebnisse können nicht als Konturenplot dargestellt werden.

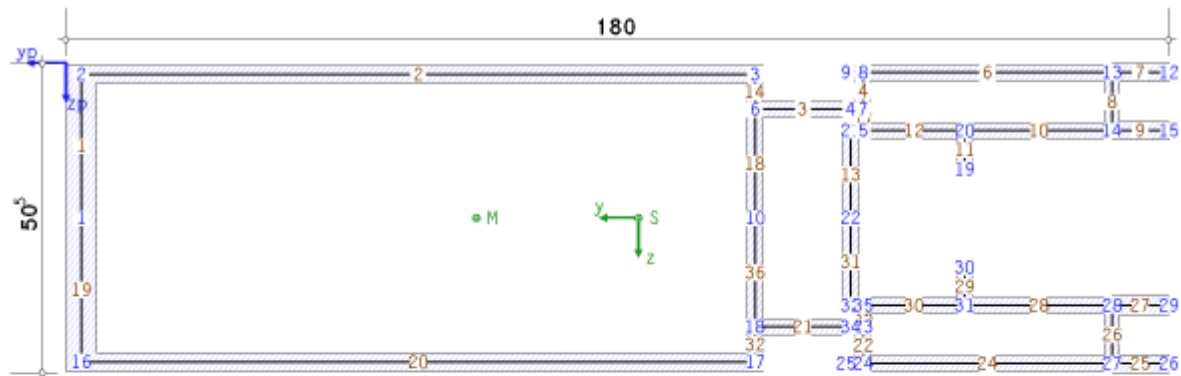
Bsp. 2 - 4H-QUER-Querschnitt (Laufs/Radlbeck A.2), 4H-QUER-Profil, Aluminium 6060 T6 mit t ≤ 15 mm, N = -4.3 kN, M_{z,Ed} = 6.59 kNm, V_{y,Ed} = 3.77 kN

Der Pfosten einer Aluminium-Glasfassade ist zu bemessen. Er wird mit dem Programm 4H-QUER modelliert; einerseits über die Mittellinien seiner Bleche (Typ: dünnwandig), andererseits polygonal (Typ: dickwandig).

Die Beschreibung des dünnwandigen Querschnitts erfolgt über die Mittellinien der Bleche und ihre Dicken.

Die Koordinaten der Knotenpunkte und die zugeordneten Linien können als zusätzliche Information protokolliert werden.

Schwerpunkt und Schubmittelpunkt sind markiert.



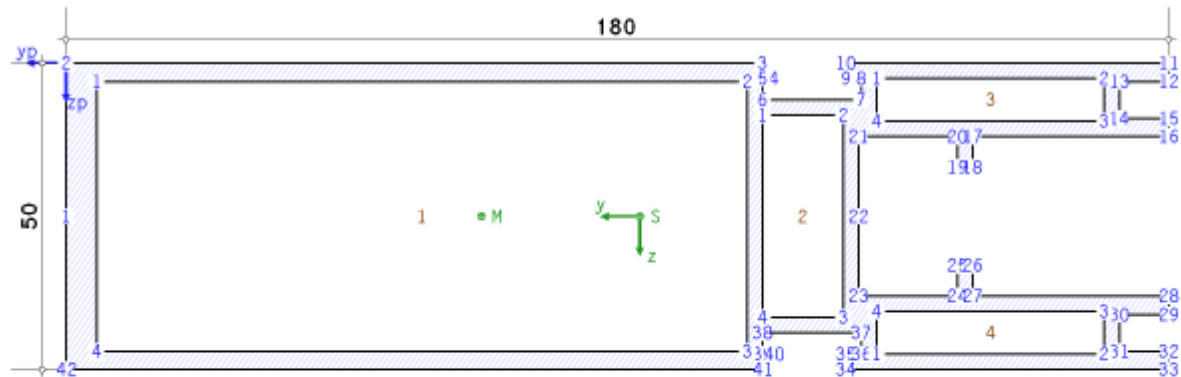
y_p,z_p: Koordinaten der Knotenpunkte (aus 4H-QUER)

	y _p mm	z _p mm		y _p mm	z _p mm		y _p mm	z _p mm		y _p mm	z _p mm		y _p mm	z _p mm
1	-2.5	25.3	12	-180.0	1.5	22	-128.1	25.3	23	-130.1	43.0	30	-146.8	33.3
2	-2.5	1.7	13	-170.8	1.5	4	-128.1	7.5	24	-130.1	49.0	31	-146.8	39.5
3	-112.5	1.7	14	-170.8	11.0	5	-130.1	11.0	25	-127.3	49.0	32	-128.1	39.5
6	-112.5	7.5	15	-180.0	11.0	10	-112.5	25.3	26	-180.0	49.0	34	-128.1	43.0
7	-130.1	7.5	19	-146.8	17.3	16	-2.5	48.8	27	-170.8	49.0	35	-130.1	39.5
8	-130.1	1.5	20	-146.8	11.0	17	-112.5	48.8	28	-170.8	39.5			
9	-127.3	1.5	21	-128.1	11.0	18	-112.5	43.0	29	-180.0	39.5			

p_a,p_e: Punktnummern am Anfang,Ende; d: Blechdicke

	p _a	p _e	d mm		p _a	p _e	d mm		p _a	p _e	d mm		p _a	p _e	d mm
1	1	2	5.00	10	14	20	2.50	19	1	16	5.00	28	28	31	2.50
2	2	3	3.00	11	19	20	2.50	20	16	17	3.00	29	30	31	2.50
3	6	4	2.50	12	20	5	2.50	21	18	34	2.50	30	31	35	2.50
4	7	8	2.50	13	21	22	2.50	22	23	24	2.50	31	32	22	2.50
5	8	9	2.50	14	3	6	2.50	23	24	25	2.50	32	17	18	2.50
6	8	13	2.50	15	4	7	2.50	24	24	27	2.50	33	34	23	2.50
7	12	13	3.00	16	5	21	2.50	25	26	27	3.00	34	35	32	2.50
8	13	14	2.50	17	5	7	2.50	26	27	28	2.50	35	35	23	2.50
9	14	15	3.00	18	6	10	2.50	27	28	29	3.00	36	18	10	2.50

Die Beschreibung des dickwandigen Querschnitts erfolgt über die Knotenpunkte der Außenberandung und der Aussparungen. In einer Tabelle werden die Koordinaten bezogen auf den Ursprung y_p/z_p angegeben. Schwerpunkt und Schubmittelpunkt sind markiert.



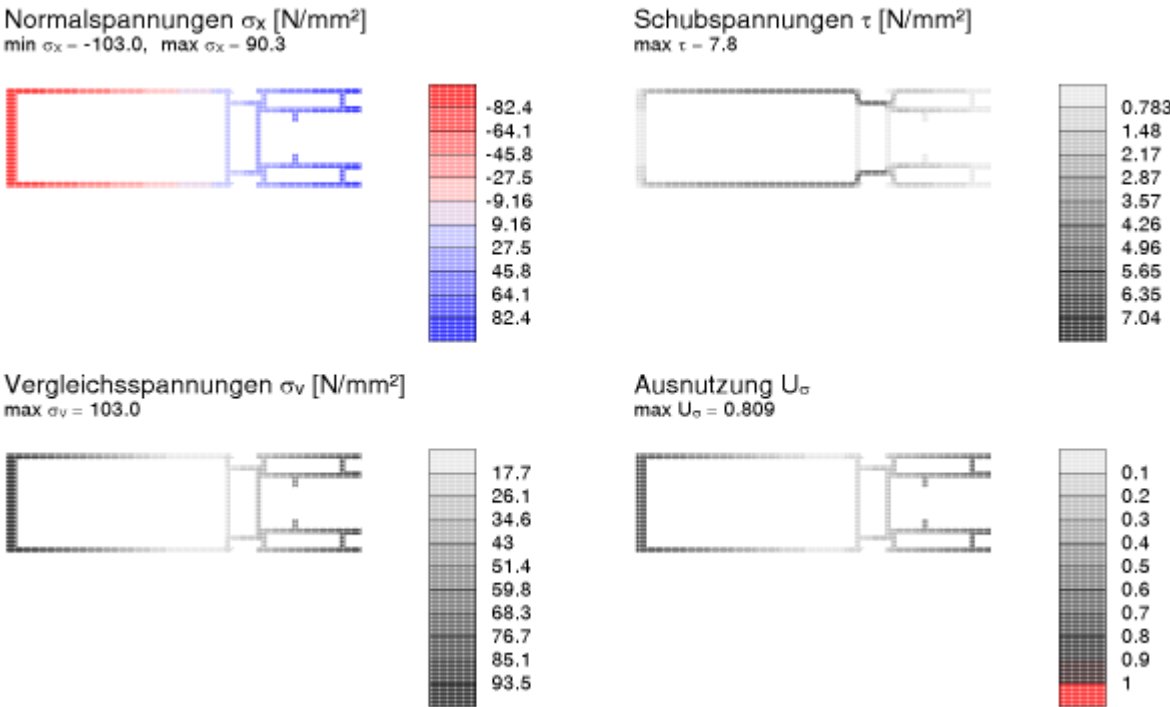
y_p,z_p: Koordinaten der Querschnittspunkte (aus 4H-QUER); Nr: Nummer einer Aussparung

	y _p mm	z _p mm	Nr		y _p mm	z _p mm	Nr		y _p mm	z _p mm	Nr		y _p mm	z _p mm	Nr
1	0.0	25.0		16	-180.0	12.0		31	-172.0	47.0		4	-5.0	47.0	1
2	0.0	0.0		17	-148.0	12.0		32	-180.0	47.0		1	-113.7	8.5	2
3	-113.7	0.0		18	-148.0	17.0		33	-180.0	50.0		2	-126.8	8.5	2
4	-115.6	2.5		19	-145.5	17.0		34	-127.3	50.0		3	-126.8	41.5	2
5	-113.7	2.5		20	-145.5	12.0		35	-127.3	47.5		4	-113.7	41.5	2
6	-113.7	6.0		21	-129.4	12.0		36	-129.8	47.5		1	-132.3	2.5	3
7	-129.8	6.0		22	-129.4	25.0		37	-129.8	44.0		2	-169.5	2.5	3
8	-129.8	2.5		23	-129.4	38.0		38	-113.7	44.0		3	-169.5	9.5	3
9	-127.3	2.5		24	-145.5	38.0		39	-113.7	47.5		4	-132.3	9.5	3
10	-127.3	0.0		25	-145.5	33.0		40	-115.6	47.5		1	-132.3	47.5	4
11	-180.0	0.0		26	-148.0	33.0		41	-113.7	50.0		2	-169.5	47.5	4
12	-180.0	3.0		27	-148.0	38.0		42	0.0	50.0		3	-169.5	40.5	4
13	-172.0	3.0		28	-180.0	38.0		1	-5.0	3.0	1	4	-132.3	40.5	4
14	-172.0	9.0		29	-180.0	41.0		2	-111.2	3.0	1				
15	-180.0	9.0		30	-172.0	41.0		3	-111.2	47.0	1				

Die Berechnung erfolgt mit der Finite-Elemente-Methode, die Ergebnisse werden anschaulich in der Konturendarstellung visualisiert.

Normalspannungen und Schubspannungen werden zu Vergleichsspannungen zusammengefasst, jeder Spannungstyp jedoch einzeln nachgewiesen.

Es ergibt sich eine maximale Ausnutzung, die bei Aluminium im Unterschied zu Stahl nicht unbedingt direkt aus der Vergleichsspannung hervorgeht.



Die maßgebenden Nachweise werden protokolliert.

$\max |\sigma_x| = 103.00 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x,Rd} = 127.27 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\sigma x} = 0.809 < 1$ **ok**

$\max \tau = 7.83 \text{ N/mm}^2 < \tau_{Rd} = 73.48 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_\tau = 0.107 < 1$ **ok**

$\max \sigma_v = 103.01 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{v,Rd} = 139.42 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\sigma v} = 0.739 < 1$ **ok**

Gesamt: max $U_\sigma = 0.809 < 1$ **ok**

Bsp. 3 - IPE 300, S235, $M_y = 60.6 \text{ kNm}$, $V_z = 41.4 \text{ kN}$, $T_t = 1.7 \text{ kNm}$, $T_\omega = 2.3 \text{ kNm}$, $B = 2.4 \text{ kNm}^2$

Ein Träger IPE 300 erhält Schnittgrößen aus Torsion. Da dieser Querschnitt wölbempfindlich ist, werden zusätzlich zur St. Venant'schen Torsion T_t Wölbchnittgrößen T_ω und B angesetzt.

Der elastische Spannungsnachweis (FEM) zeigt eine deutliche Spannungsüberschreitung (Ausnutzung $U = 1.41 > 1$), während der plastische Spannungsnachweis (DIV) mit $U = 0.93$ gelingt.

- 2.1.1. elastischer Spannungsnachweis**

elastischer Spannungsnachweis für $M_y = 60.61 \text{ kNm}$, $V_z = 41.38 \text{ kN}$, $T_t = 1.72 \text{ kNm}$, $T_\omega = 2.33 \text{ kNm}$
 $B = 2.41 \text{ kNm}^2$

Nachweis: $\max \sigma_v = 331.00 \text{ N/mm}^2 > \sigma_{v,Rd} = 235.00 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U = 1.409 > 1$ **Fehler !!**
- 2.1.2. plastischer Spannungsnachweis**

plastischer Spannungsnachweis für $M_y = 60.61 \text{ kNm}$, $V_z = 41.38 \text{ kN}$, $T_t = 1.72 \text{ kNm}$, $T_\omega = 2.33 \text{ kNm}$
 $B = 2.41 \text{ kNm}^2$

Lastfaktor der Schubspannungen (plast.): $f_{\tau,pl} = 1.080 \Rightarrow U_{\tau,pl} = 0.926$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 1.080 \Rightarrow U_{\sigma,pl} = 0.926$

Gesamt: Ausnutzung: $U_{pl} = 0.926 < 1$ **ok**

Es ist zu beachten, dass beim plastischen Nachweis das Wölbgleichgewicht eingehalten wird.

Da sich eine Einhaltung des Gleichgewichts in der fachlichen Diskussion befindet und ggf. nicht zwingend erforderlich ist, kann die Berechnung auch ohne Einhaltung durchgeführt werden. Dazu ist der **Profi-Button** zu aktivieren und die entsprechende Option auszuwählen.

Das Ergebnis zeigt nun eine wesentlich geringere plastische Ausnutzung ($U = 0.71$), wobei das Gleichgewicht (s. ΔB) nicht eingehalten wird.

2.1.2. plastischer Spannungsnachweis

plastischer Spannungsnachweis für $M_y = 60.61 \text{ kNm}$, $V_z = 41.38 \text{ kN}$, $T_t = 1.72 \text{ kNm}$, $T_w = 2.33 \text{ kNm}$
 $B = 2.41 \text{ kNm}^2$

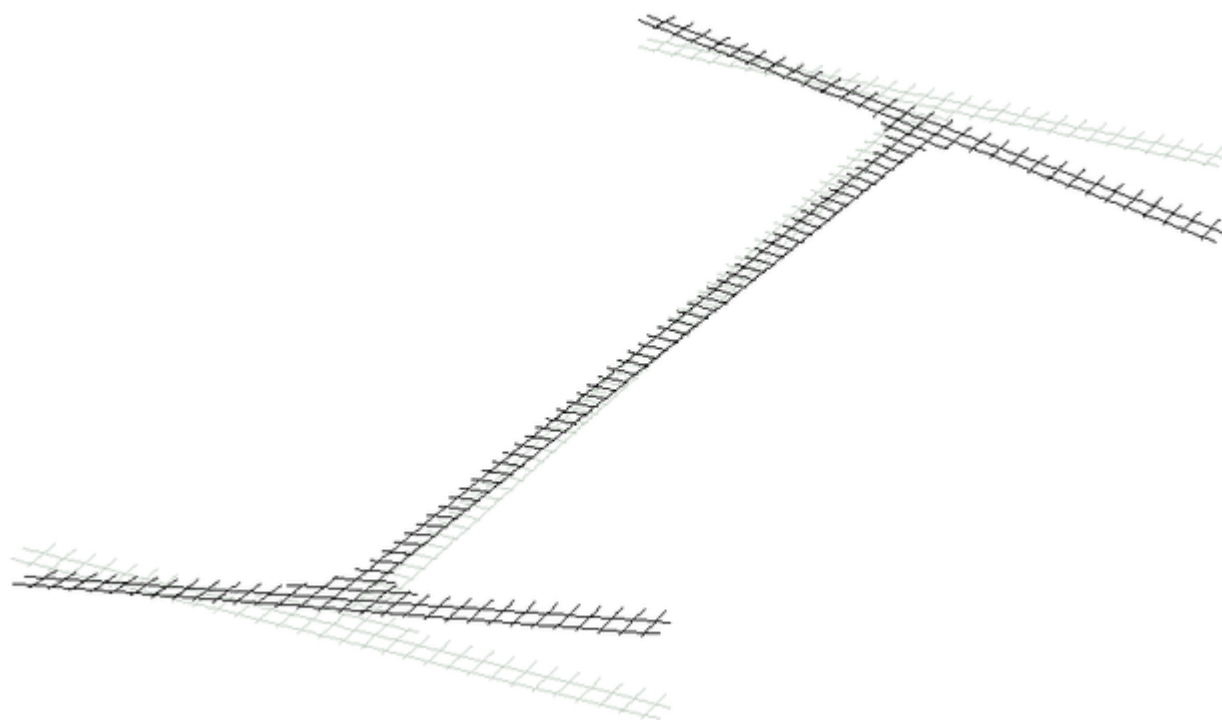
Lastfaktor der Schubspannungen (plast.): $f_{\tau,pl} = 1.408 \Rightarrow U_{\tau,pl} = 0.710$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 1.408 \Rightarrow U_{\sigma,pl} = 0.710$

Verwölbungsungleichgewicht: $\Delta B = -0.024 \text{ kNm}^2$

Gesamt: Ausnutzung (ohne Verwölbungsungleichgewicht): $U_{pl} = 0.710 < 1$ **ok**

Bei elastischer Nachweisführung werden die Daten für die Visualisierung der Dehnungen als Deformationsplot erzeugt. Im Ergebnis-Darstellungsfenster ist die Verwölbung des Querschnitts bzgl. seiner Längsachse gut zu erkennen.



zur Hauptseite [4H-EC3QN](#), Querschnittsnachweis



© [pcae](#) GmbH Kopernikusstr. 4A 30167 Hannover Tel. 0511/70083-0 Fax 70083-99 Mail dte@pcae.de