












4H-EC3BN Brandschutznachweis

Detailinformationen




Seite überarbeitet Dezember 2023

• Kontakt • Programmübersicht • Bestelltext **Infos auf dieser Seite**... als pdf 

- Eingabeoberfläche 
- Berechnungseinstellungen  • Ergebnisübersicht 
- Schnittgrößen  • Temperaturberechnung 
- Schnittgrößenimport  • Mech. Werkstoffeigenschaften 
- Bemessungsverfahren 
- Spannungsnachweise 
- Beschreibung Ergebnisse 

Eingabeoberfläche

4H-EC3xx [Position 33: Brandschutznachweis]



  

Stahl
 Stahlsorte Vorgabe
 Kennung

Materialsicherheit genormt
 Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{M0} 1.00
 Beanspruchbarkeit von Bauteilen im Brandfall $\gamma_{M,fi}$ 1.00

Profiltemperatur (kein Nachweis)
 Brandschutznachweis auf Traglastebene
 Brandschutznachweis auf Temperaturebene

Spannungsnachweis einschl. c/t-Nachweis
 'Elastisch-Elastisch' 'Elastisch-Plastisch'
 zzgl. Nachweis bei Normaltemperatur

Querschnitt
 Profil aus Profilmanager  
 parametrisiertes Stahlprofil
 Profil aus 4H-QUER
 Profilname

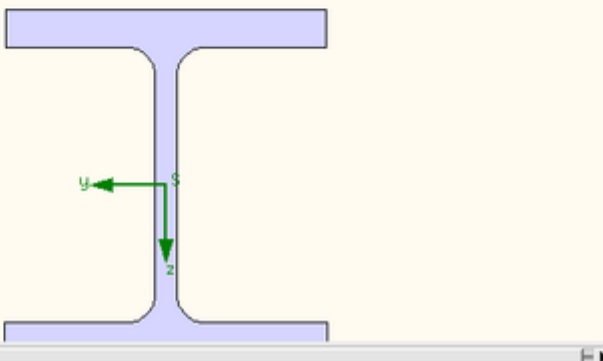

Schnittgrößen einschl. Torsion

Temperatur
 Berechnung der Stahltemperatur
 Feuerwiderstandsdauer t min
 Temperaturkurve
 Emissivität der Profilloberfläche
 Profilmfaktor A_{sh}/V 1/m =0: wird berechnet
 Abschattung (durch Wand, Decke)

Profil ungeschützt
 profilfolgende Bekleidung
 Kastenbekleidung

Korrekturfaktor für Abschattungseffekte (durch Profil) k_{sh} =0: wird berechnet
 Oberfläche d. umschließ. Kastens A_b mm =0: wird berechnet

ungleichmäßige Temperaturverteilung
 Anpassungsfaktor (Querschnitt) κ_1
 Anpassungsfaktor (Träger) κ_2


Bild vergrößern **Brandschutznachweise EC 3**

Das Programm 4H-EC3BN führt den Brandschutznachweis für beliebige Querschnitte unter zweiachsiger Belastung nach Eurocode 3-1-2.

Die zugehörigen Eingabeparameter werden in eigenen Registerblättern verwaltet, die über folgende Symbole

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.



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 **Druckeinstellungs**-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**-Planerstellungsmodul 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 werden die allgemeinen Einstellungen der Berechnung festgelegt.

Material

Der Querschnitt besteht aus Stahl.

Stahl	
Stahlsorte	S355 <input type="checkbox"/> Vorgabe
Kennung	<input type="text"/>

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

Materialsicherheitsbeiwerte

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

Materialsicherheit (<input checked="" type="checkbox"/> genormt)	
Beanspruchbarkeit von Querschnitten	γ_{M0} 1.00
Beanspruchbarkeit von Bauteilen im Brandfall	$\gamma_{M,fi}$ 1.00

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

Allgemeines

Im Programm 4H-EC3BN besteht die Möglichkeit, die Eingabedaten über die Copy-Paste-Funktion von einem Bauteil in ein anderes desselben Typs zu exportieren.

▶ Daten exportieren

▶ Daten importieren

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-EC3BN 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.

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 Flanschrändern geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten (Kehlnähte der Dicke a oder durchgeschweißte Stumpfnähte) zusammengefügt sind.

<input checked="" type="radio"/>	Profil aus Profilmanager	
<input type="radio"/>	parametrisiertes Stahlprofil	
<input type="radio"/>	Profil aus 4H-QUER	
Profilname		IPE200

Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

Ist das **pcae**-Programm **4H-QUER** installiert, wird eine entsprechende Eingabemöglichkeit angeboten.

Das externe Programm wird über den gelb unterlegten **Aktions-**Button ▶ mit der Vorgabe 'dünnwandiger Querschnitt' aufgerufen.

In einer grafischen Oberfläche kann dort der Querschnitt konstruiert oder aus einer Bibliothek geladen und an das aufrufende Programm **4H-EC3BN** übergeben werden.

Der **4H-QUER**-Querschnitt muss der Vorgabe (dünnwandig) entsprechen.

Weitere Informationen zur Bedienung des Programms **4H-QUER** s. zugehöriges **Handbuch**.

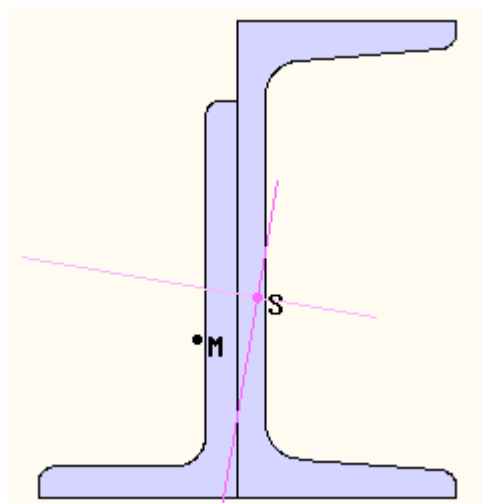
Zur visuellen Kontrolle der Eingabeparameter wird der Querschnitt maßstabsgetreu am Bildschirm dargestellt.

Schwerpunkt S, Schubmittelpunkt M und die Hauptachsen sind markiert.

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
<input checked="" type="radio"/> gewalztes Profil	Ausrundungsradius	r
<input type="radio"/> geschweißtes Profil		

Profil aus Profilmanager
 parametrisiertes Stahlprofil
 Profil aus **4H-Quer** ▶



Spannungsnachweis

Für den Brandschutznachweis ist ein Spannungsnachweis des Querschnitts erforderlich, wobei die Materialparameter der Brandsituation angepasst sind.

Optional können ein **elastischer** und **plastischer** Nachweis in einem Rechengang geführt werden.

Die Beschreibung der Spannungsnachweise erfolgt **hier**.

Spannungsnachweis	<input checked="" type="checkbox"/> einschl. c/t-Nachweis
<input type="checkbox"/> 'Elastisch-Elastisch'	<input checked="" type="checkbox"/> 'Elastisch-Plastisch'
<input checked="" type="checkbox"/> zzgl. Nachweis bei Normaltemperatur	
Lastfaktor	η_{fi} <input type="text" value="0,700"/>

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 aktiviert/deaktiviert werden.

Zusätzlich können Spannungs- und c/t-Nachweis auch **bei Normaltemperatur** geführt werden. Die Schnittgrößen bei Normaltemperatur werden vereinfacht über den Lastfaktor (s. EC3-1-2, 2.4.2(2)) aus den Schnittgrößen im Brandfall berechnet.

Brandschutz

Allgemeines

Brandbedingte Einwirkungen werden als außergewöhnliche Einwirkungen betrachtet, s. EC 1-1-2, 2.1(3)P u. 4.2.1(2).

Der Nachweis der Tragfähigkeit sollte n. EC 1-1-2, 2.5(2) erfolgen im

... Zeitbereich $t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$

... Festigkeitsbereich $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

... Temperaturbereich $\Theta_d \leq \Theta_{cr,d}$... mit ...

$t_{fi,d}$ Bemessungswert der Feuerwiderstandsdauer

$t_{fi,requ}$ erforderliche Feuerwiderstandsdauer

$R_{fi,d,t}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t

$E_{fi,d,t}$ Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchungen im Brandfall zum Zeitpunkt t

Wenn indirekte Brandeinwirkungen nicht ausdrücklich zu berücksichtigen sind, dürfen die Einwirkungen im Brandfall vereinfacht aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur ermittelt werden (s. EC 1-1-2, 4.3.2(2) und EC 3-1-2, 2.4.2(2)).

$E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d$... mit ...

E_d Bemessungsgröße der maßgebenden Beanspruchungen aus der Grundkombination

$E_{fi,d}$ Bemessungsgröße für den Brandfall

η_{fi} Abminderungsfaktor

Vereinfacht darf der Abminderungsfaktor zu $\eta_{fi} = 0.65$ bzw. bei Lasten der Kategorie E zu $\eta_{fi} = 0.7$ gesetzt werden (s. EC 3-1-2, 2.4.2(2), Anmerkung 2).

Temperatur

Bei dünnwandigen Profilen wird davon ausgegangen, dass die thermische Beanspruchung durch den Brand eine gleichmäßige Temperatur im Material erzeugt.

Die Festigkeit des Stahls wird dadurch z.T. stark herabgesetzt, sodass durch einen Spannungsnachweis die Standfestigkeit nach einer Mindestzeit (Feuerwiderstandsdauer) nachgewiesen werden muss.

Die drei Temperaturkurven des EC 1-1-2, 3.2 können angewählt werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, die Emissivität (Absorbtivität) der Bauteiloberfläche anzugeben, die von der Materialbeschaffenheit der Profilloberfläche abhängt. Bei Baustahl wird eine Emissivität von $\epsilon_m = 0.7$ verwendet (EC3-1-2,2.2(2)).

Die Berechnung der Stahltemperatur erfolgt nach EC 1-1-2 unter Berücksichtigung des Profilmfaktors (Formfaktor des Querschnitts) sowie einer ggf. vorhandenen Profilmantelung.

Es werden Eingabefelder für die erforderlichen Werte angeboten. Sind sie nicht belegt, kann das Programm diese Werte berechnen. Voraussetzung ist, dass es sich um ein typisiertes Profil handelt (nicht 4H-QUER-Querschnitt).

Berechnung der Stahltemperatur

Feuerwiderstandsdauer t min

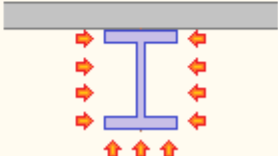
Temperaturkurve

Emissivität der Profilloberfläche

Profilmfaktor A_m/V 1/m =0: wird berechnet

Abschattung (durch Wand, Decke)

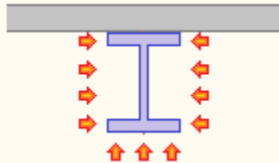
Profil ungeschützt
 profilfolgende Bekleidung
 Kastenbekleidung



Bei ungeschützten Profilen entwickelt sich die Temperatur abhängig von der Oberflächen-Absorbtivität (Emissivität). Programmintern wird sie für 'Stahl' und 'feuerverzinkten Stahl' vorbelegt. Alternativ kann ein Wert vorgegeben werden.

Emissivität der Profiloberfläche	<input type="text" value="Vorgabe"/>	
ϵ_m	<input type="text" value="0.60"/>	=0: Stahl

Das Profil kann durch angrenzende Bauteile teilweise vor der Hitze geschützt sein. Diese Abschattungseffekte durch eine Wand oder aufliegende Deckenplatte können berücksichtigt werden. Sie werden grafisch verdeutlicht.

Abschattung (durch Wand, Decke)	<input type="text" value="oben"/>	
---------------------------------	-----------------------------------	--

Ist das Profil ungeschützt, werden die Abschattungseffekte durch das Profil selbst über einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Der entsprechende Beiwert kann vorgegeben oder vom Programm berechnet werden.

Korrekturfaktor für Abschattungseffekte (durch Profil)	k_{sh}	<input type="text" value="0.000"/>	=0: wird berechnet
Oberfläche d. umschließ. Kastens A_b		<input type="text" value="0"/>	mm ² /mm =0: wird berechnet

Andernfalls sind die Materialparameter der Bekleidung vorzugeben. Im deutschen Anhang des EC 3-1-2, Anhang AA, sind Werte für Putz- und Plattenbekleidung dokumentiert, die hier angewählt werden können.

<input checked="" type="radio"/> Kastenbekleidung			
Brandschutzmaterial:	<input type="text" value="Plattenbekleidung EC"/>		
Wärmeleitfähigkeit	λ_p	<input type="text" value="0.20"/>	W/(m K)
spezifische Wärmekapazität	c_p	<input type="text" value="1700"/>	J/(kg K)
Rohdichte	ρ_p	<input type="text" value="945"/>	kg/m ³

Alternativ können die Parameter frei belegt und ein Name vergeben werden kann.

Feuchtigkeit und Dicke des Dämmmaterials sind ebenfalls anzugeben.

Feuchtigkeitsgehalt	p_p	<input type="text" value="0.0"/>	%
Dicke	d_p	<input type="text" value="25.0"/>	mm

Beim Brandschutznachweis wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung sowohl über den Querschnitt als auch in Stablängsrichtung angenommen. Um z.B. Temperaturdifferenzen durch Abschattung (Querschnitt) oder an Auflagern (Träger) auszugleichen, kann die Brandlast durch Anpassungsfaktoren abgemindert werden. Liegt ein typisierter Querschnitt vor, wird der Beiwert vom Programm gesetzt, andernfalls ist er vorzugeben.

ungleichmäßige Temperaturverteilung			
Anpassungsfaktor (Querschnitt)	κ_1	<input type="text" value="0.85"/>	
Anpassungsfaktor (Träger)	κ_2	<input type="text" value="1.00"/>	

Nachweis

Der Brandschutznachweis kann auf Traglast- oder Temperaturebene geführt werden.

Der Traglastnachweis wird über einen elastischen oder plastischen Spannungsnachweis geführt. Beim Temperaturnachweis ist die vorhandene Temperatur einer kritischen Temperatur gegenüber zu stellen, die entweder vom Programm berechnet oder vorgegeben werden kann.

<input type="radio"/> Brandschutznachweis auf Traglastebene			
<input checked="" type="radio"/> Brandschutznachweis auf Temperaturebene			
kritische Temperatur	T_{cr}	<input type="text" value="500.0"/>	°C =0: wird berechnet

Da die kritische Temperatur abhängig von der Belastung ist, wird auch hier die Spannungsausnutzung nach dem

elastischen oder plastischen Verfahren berechnet.
Alternativ kann nur die Profiltemperatur ermittelt werden.

🕒 Profiltemperatur (kein Nachweis)

Schnittgrößen



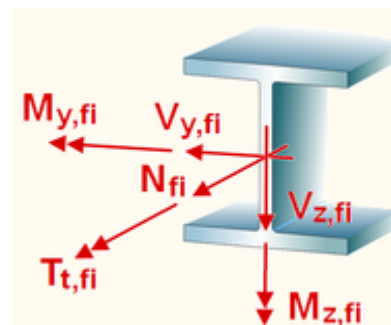
das zweite Register beinhaltet die Masken zur Eingabe der Bemessungsschnittgrößen im Brandfall

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	<input checked="" type="radio"/>
kN / kNm	<input type="radio"/>
kN / kNcm	<input type="radio"/>
N / Nm	<input type="radio"/>

	N_{fi} kN	$M_{y,fi}$ kNm	$V_{z,fi}$ kN	$M_{z,fi}$ kNm	$V_{y,fi}$ kN	$T_{t,fi}$ kNm
	0.0	272.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Im Standardfall

- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N_{fi} , $M_{y,fi}$, $V_{z,fi}$ eine Biegung um die starke Achse des Querschnitts
- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N_{fi} , $M_{z,fi}$, $V_{y,fi}$ eine Biegung um die schwache Achse des Querschnitts
- ist das Torsionsmoment $T_{t,fi}$ (St.Venant'sche bzw. primäre Torsion) nur für Hohl- und Vollquerschnitte relevant

Sind Torsionsschnittgrößen für den betrachteten Querschnitt nicht maßgebend und sollen nicht untersucht werden, kann die entsprechende Schnittgrößenspalte deaktiviert werden, indem in **Register 1** die entsprechende Option ausgewählt wird.

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

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.

Schnittgrößenimport beim Brandschutznachweis

Die statische Berechnung eines Bauteils beinhaltet i.A. die Modellbildung mit anschließender Berechnung des Tragsystems sowie nachfolgender Einzelnachweise von Detailpunkten.

Bei der Beschreibung eines Details sind die zugehörigen Schnittgrößen aus den Berechnungsergebnissen des Tragsystems zu extrahieren und dem Detailnachweis zuzuführen.

In der 4H-Programmorganisation gibt es hierzu verschiedene Vorgehensweisen

- zum einen können Tragwerks- und Detailprogramm fest miteinander verbunden sein, d.h. die Schnittgrößenübergabe erfolgt intern. Es sind i.A. keine weiteren Eingaben (z.B. Geometrie) notwendig, aber auch möglich (z.B. weitere Belastungen), die Programme bilden eine Einheit.

Dies ist z.B. bei dem 4H-Programm *Stütze mit Fundament* der Fall.

- zum anderen können Detailprogramme Schnittgrößen von in Tragwerksprogrammen speziell festgelegten Exportpunkten über ein zwischengeschaltetes Export/Import-Tool einlesen

Das folgende Beispiel eines einfachen Rahmens erläutert diesen 4H-Schnittgrößen-Export/Import.

Zunächst sind im exportierenden 4H-Programm (z.B. 4H-FRAP) die Stellen zu kennzeichnen, deren Schnittgrößen beim nächsten Rechenlauf exportiert, d.h. für den Import bereitgestellt, werden sollen.

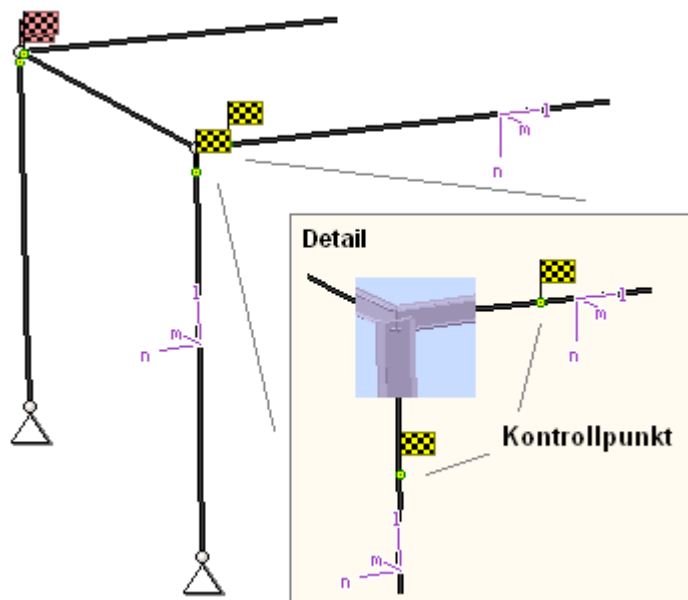
In diesem Beispiel sollen die Schnittgrößen für den Brandschutznachweis übergeben werden.

Dazu ist an der entsprechenden Stelle ein Kontrollpunkt zu setzen.

Ausführliche Informationen zum Export entnehmen Sie bitte dem DTE[®]-**Schnittgrößenexport**.

Es ist ein Nachweis mit einer außergewöhnlichen Einwirkungskombination (Brandfall) zu definieren.

Nach einer Neuberechnung des Rahmens stehen die Exportschnittgrößen dem aufnehmenden 4H-Programm (z.B. 4H-EC3BN) zum Import zur Verfügung.



aus dem aufnehmenden 4H-Programm wird nun über den **Import**-Button das Fenster zur DTE[®]-**Bauteilauswahl** aufgerufen. Hier werden alle berechneten Bauteile dargestellt, wobei diejenigen, die Schnittgrößen exportiert haben, dunkel gekennzeichnet sind.

Das gewünschte Bauteil kann nun markiert und über den **bestätigen**-Button ausgewählt werden. Alternativ kann durch Doppelklicken des Bauteils direkt in die DTE[®]-**Schnittgrößenauswahl** verzweigt werden.

Schnitt	Stab	s	Material
+	Schnitt 1: Stab 3	bei s = 0.18 m	Stahlriegel, Anschnitt, Anschluss 1
+	Schnitt 2: Stab 5	bei s = 0.00 m	Stahlriegel, Anschluss 2
+	Schnitt 3: Stab 7	bei s = 2.00 m	Stahlbetonriegel
+	Schnitt 4: Stab 9	bei s = 4.00 m	Stahlstütze, Anschluss 2
+	Schnitt 5: Stab 10	bei s = 3.88 m	Stahlstütze, Anschnitt, Anschluss 1
+	Schnitt 6: Stab 11	bei s = 0.00 m	Stahlbetonstütze

In der Schnittgrößenauswahl werden die verfügbaren Schnittgrößenkombinationen aller im übergebenden Programm gekennzeichneten Schnitte angeboten. Dabei sind diejenigen Schnitte deaktiviert, deren Material nicht kompatibel mit dem Detailprogramm ist.

Es wird nun der Schnitt angeklickt und damit geöffnet, dessen Schnittgrößen eingelesen werden sollen.

Schnitt 1: Stab 3 bei s = 0.18 m						
Stahlriegel, Anschnitt, Anschluss 1						
Material: Stahl, Querschnitt: Profil: IPE240						
	N kN	V _m kN	V _n kN	T kNm	M _m kNm	M _n kNm
+ Lastfallergebnisse						
+ Nachweis 2: Schnittgrößenermittlung (Th. I. Ord.)						
- Nachweis 3: EC 3 Tragfähigkeit (Th. I. Ord.)						
+ Lastkollektive						
- Zusammenfassung Nachweis 3						
↕ min N	-18.34	15.66	-14.44	0.00	-2.76	13.43
↕ max N	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
↕ min V _n	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
↕ max V _n	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
↕ min V _ζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
↕ max V _ζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
↕ min T	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
↕ max T	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
↕ min M _n	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
↕ max M _n	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
↕ min M _ζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
↕ max M _ζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
+ Schnitt 2: Stab 5 bei s = 0.00 m						
Stahlriegel, Anschluss 2						
+ Schnitt 3: Stab 7 bei s = 2.00 m						
Stahlbetonriegel						
+ Schnitt 4: Stab 9 bei s = 4.00 m						
Stahlstütze, Anschluss 2						
+ Schnitt 5: Stab 10 bei s = 3.88 m						
Stahlstütze, Anschnitt, Anschluss 1						
+ Schnitt 6: Stab 11 bei s = 0.00 m						
Stahlbetonstütze						

Die Schnittgrößenkombinationen können beliebig zusammengestellt werden; **pcae** empfiehlt jedoch, nur diejenigen auszuwählen, die als Bemessungsgrößen für den zu führenden Detailnachweis relevant sind.

ein nützliches Hilfsmittel bietet dabei der dargestellte Button, mit dem die Anzahl zu übertragender Lastkombinationen durch Eliminierung doppelter Zeilen stark reduziert werden kann.

Wird nun die DTE[®]-**Schnittgrößenauswahl** bestätigt, bestückt das Importprogramm die Schnittgrößentabelle, wobei ggf. vorhandene Kombinationen erhalten bleiben.

Wenn eine Reihe von Stäben gleichartig ausgeführt und nachgewiesen werden soll, können in einem Rutsch weitere Schnittgrößen anderer Schnitte aktiviert und so bis zu 10.000 Kombinationen übertragen werden.

Die Kompatibilität der Querschnitts- und Nachweisparameter zwischen exportierendem und importierendem



Programm ist zu gewährleisten.

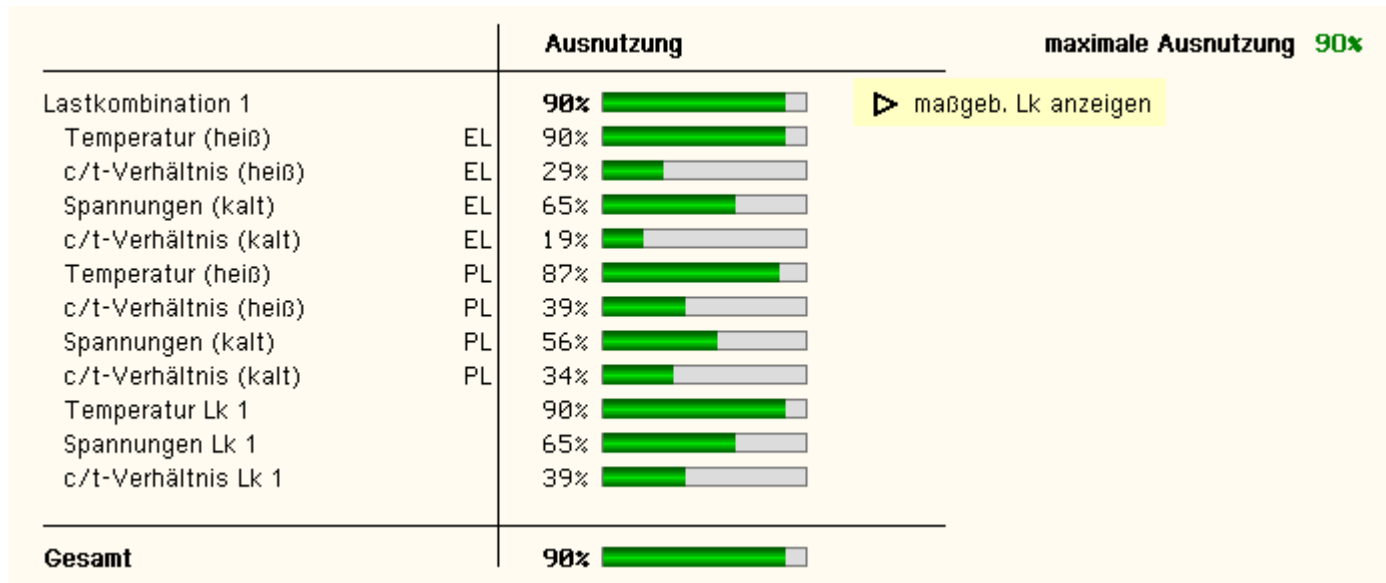
Eine Aktualisierung der importierten Schnittgrößenkombinationen, z.B. aufgrund einer Neuberechnung des exportierenden Tragwerks, erfolgt **nicht!**

Ergebnisübersicht



das dritte Register gibt einen Überblick über die ermittelten Ergebnisse

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



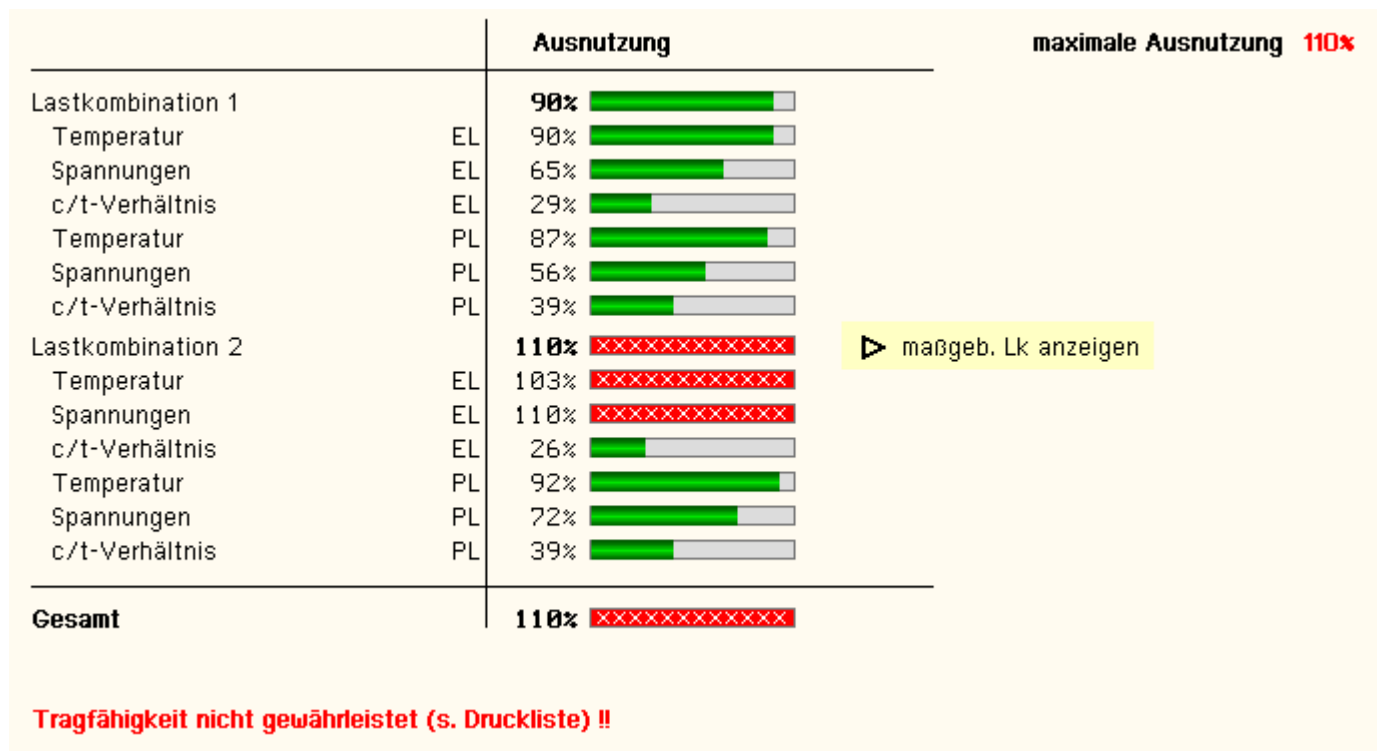
Eine Box zeigt an, ob eine Lastkombination die Ausnutzung überschritten hat (rot ausgekreuzt) oder wie viel Reserve noch vorhanden ist (grüner Balken).

Bei nur wenigen Lastkombinationen werden zur Fehleranalyse oder zur Einschätzung der Tragkomponenten die Einzelberechnungsergebnisse protokolliert.

Sind es mehr, bis zu zehn Lastkombinationen, werden die wesentlichen 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 Ausnutzung überschritten ist.

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

Temperaturberechnung

Bei brandbeanspruchten Oberflächen wird der Netto-Wärmestrom, der von dem Feuer auf die Oberfläche des Bauteils wirkt, ermittelt mit (s. EC 1-1-2, 3.1)

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

konvektiver Wärmestrom $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$

Wärmestrom durch Strahlung $\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot ((\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4)$... alle in [W/m²]

... mit ...

α_c Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [W/m²K]

Θ_g Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils [°C]

Θ_m Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]

Φ Konfigurationsfaktor

ϵ_m Emissivität der Bauteiloberfläche

ϵ_f Emissivität der Flamme

σ Stephan-Boltzmann-Konstante (= 5.67 · 10⁻⁸ W/m²K⁴)

Θ_r wirksame Strahlungstemperatur des Brandes [°C]

Der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion richtet sich nach der verwendeten Temperaturzeitkurve (s. EC 1-1-2, 3.2).

Die Emissivität der Bauteiloberfläche von unbehandeltem Stahl beträgt $\epsilon_m = 0.7$ (s. EC 3-1-2, 2.2(2)).

Eine Feuerverzinkung bewirkt, dass bei Temperaturen bis 500°C nur 50% der Emissivität ($\epsilon_m = 0.35$) vorliegt.

Die Emissivität der Flamme wird mit $\epsilon_f = 1.0$ (s. EC 1-1-2, 3.1(6), Anmerkung 2, EC 3-1-2, 4.2.5.1(3)) angenommen.

Der Konfigurationsfaktor wird n. EC 1-1-2, 3.1(7) gesetzt zu $\phi = 1.0$.

Die Strahlungstemperatur Θ_r wird durch die Gastemperatur Θ_g ausgedrückt, die sich aus den Temperaturzeitkurven ergeben.

Drei nominelle Temperaturzeitkurven sind auswählbar (EC 1-1-2, 3.2)

- Einheits-Temperaturzeitkurve

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt [$^{\circ}\text{C}$]

t Zeit [min]

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Außenbrandkurve

$$\Theta_g = 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur in Bauteilnähe [$^{\circ}\text{C}$]

t Zeit [min]

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Hydrokarbon-Brandkurve

$$\Theta_g = 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt [$^{\circ}\text{C}$]

t Zeit [min]

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Naturbrandmodelle werden nicht unterstützt.

In EC 1-1-2, NA Deutschland ist festgelegt, dass bei Tragwerken im Hochbau i.d.R. die Einheits-Temperaturzeitkurve anzuwenden ist. Die Hydrokarbon-Brandkurve ist für Hochbauten nicht anzuwenden.

Die Normaltemperatur entspricht $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$, die Rohdichte von Stahl ist $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ (temperaturunabhängig, s. EC 3-1-2, 3.2.2(1)).

Nach EC 3-1-2, 4.2.5 wird unterschieden zwischen innen liegenden und außen liegenden Stahlkonstruktionen.

Innen liegende Bauteile können ungeschützt oder durch Brandschutzmaterial geschützt sein.

Bei außen liegenden Konstruktionen sind i.d.R. zu berücksichtigen

- der Wärmestrom durch Strahlung aus dem Brandabschnitt
- der Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion von aus Öffnungen herausschlagenden Flammen
- der Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion der Stahlkonstruktion an die Umgebung
- die Größe und Lage des Bauteils

Sie werden hier nicht behandelt.

Innen liegendes ungeschütztes Stahlbauteil (EC 3-1-2, 4.2.5.1)

Der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ berechnet sich für ein ungeschütztes Profil mit

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad \dots \text{ mit } \dots$$

A_m dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit [m^2/m]

V Volumen des Bauteils pro Längeneinheit [m^3/m]

k_{sh} Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt

c_a spezifische Wärmekapazität von Stahl [J/kgK]

$\dot{h}_{net,d}$ flächenbezogener Bemessungswert des Nettowärmestroms [W/m^2]

Δt Zeitintervall [sec]

ρ_a Rohdichte von Stahl [kg/m^3]

A_m/V wird als Profilmfaktor des ungeschützten Stahlbauteils bezeichnet und kann für typisierte Profile auch der Fachliteratur entnommen werden. Er sollte hier nicht kleiner als 10 1/m sein.

Der Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt durch das Profil selbst wird bestimmt mit

$$k_{sh} = (A_m/V)_b / (A_m/V) \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$(A_m/V)_b$ Profilmfaktor für den das Profil umschließenden Kasten

Die Schrittweite Δt sollte 5 sec nicht überschreiten.

Innen liegendes durch Brandschutzmaterialien geschütztes Stahlbauteil (EC 3-1-2, 4.2.5.2)

Der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ berechnet sich für ein geschütztes Profil mit

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \Phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad \dots \text{aber } \Delta\theta_{a,t} \geq 0, \text{ wenn } \Delta\theta_{g,t} > 0 \quad \dots \text{mit } \dots$$

$$\Phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot A_p / V \quad \dots \text{und } \dots$$

A_p Fläche des Brandschutzmaterials bezogen auf die Bauteillänge [m²/m]

V Bauteilvolumen bezogen auf die Bauteillänge [m²/m]

c_a temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Stahl [J/kgK]

c_p temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Brandschutzmaterials [J/kgK]

d_p Dicke des Brandschutzmaterials [m]

Δt Zeitintervall [sec]

$\theta_{a,t}$ Stahltemperatur zum Zeitpunkt t [°C]

$\theta_{g,t}$ Temperatur der umgebenden Luft zum Zeitpunkt t [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$ Anstieg der Umgebungstemperatur während des Zeitintervalls Δt [K]

λ_p Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzsystems [W/mK]

ρ_a Rohdichte von Stahl [kg/m³]

ρ_p Rohdichte des Brandschutzmaterials [kg/m³]

Für die Fläche A_p wird die innere Fläche des umgebenden Kastens angesetzt.

A_p/V wird als Profillfaktor des wärme gedämmten Stahlbauteils bezeichnet und kann für typisierte Profile auch der Fachliteratur entnommen werden.

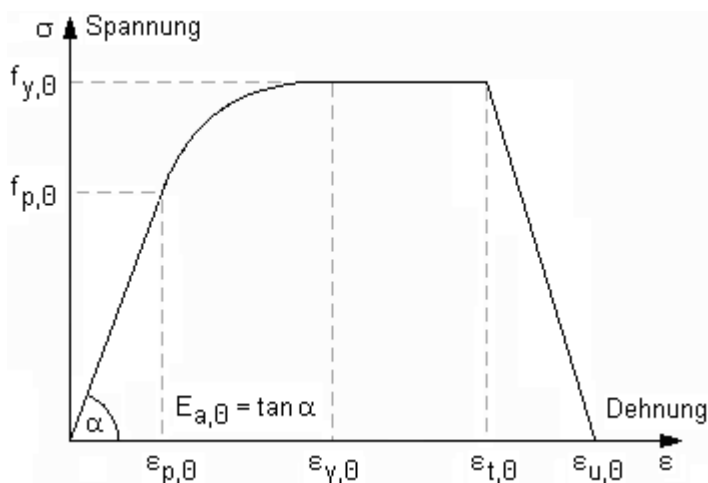
Die Schrittweite Δt sollte 30 sec nicht überschreiten.

Bei feuchten Brandschutzmaterialien wird der Temperaturanstieg im Stahl verzögert. Die Zeitverzögerung ergibt sich für den Feuchtigkeitsanteil p [in %] zu (s. J.-M. Franssen, P Vila Real: *Fire design of steel structures, 2nd Edition, ECCS 2015*)

$$t_v = \frac{p \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{5 \cdot \lambda_p} \quad [\text{min}]$$

Mechanische Werkstoffeigenschaften

Die Spannungs-Dehnungsbeziehung für Stahl unter erhöhter Temperatur sollte wie folgt angenommen werden (EC 3-1-2, 3.2.1, Bild 3.1)



wobei die Festigkeiten des erwärmten Stahls aus denen bei Normaltemperatur abgeleitet werden.

effektive Fließgrenze $f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_y$

Proportionalitätsgrenze $f_{p,\theta} = k_{p,\theta} \cdot f_y$

Steigung in elastischen Bereich $E_{a,\theta} = k_{E,\theta} \cdot E_a$

mit den Abminderungsbeiwerten (s. EC 3-1-2, 3.2.1, Tab. 3.1)

Stahltemperatur θ_a	Abminderungsfaktoren bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20 °C		
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Fließgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1.000	1.000	1.000
100 °C	1.000	1.000	1.000
200 °C	1.000	0.807	0.900
300 °C	1.000	0.613	0.800
400 °C	1.000	0.420	0.700
500 °C	0.780	0.360	0.600
600 °C	0.470	0.180	0.310
700 °C	0.230	0.075	0.130
800 °C	0.110	0.050	0.090
900 °C	0.060	0.0375	0.0675
1.000 °C	0.040	0.0250	0.0450
1.100 °C	0.020	0.0125	0.0225
1.200 °C	0.000	0.0000	0.0000

Anm.: Zwischenwerte dürfen interpoliert werden.

Die Dehnungen sind z.T. temperaturunabhängig

$\epsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ Dehnung an der Proportionalitätsgrenze

$\epsilon_{y,\theta} = 0.02$ Fließdehnung

$\epsilon_{t,\theta} = 0.15$ Grenzdehnung für die Fließgrenze

$\epsilon_{u,\theta} = 0.20$ Bruchdehnung

Es wird ein einfaches Berechnungsmodell angewandt, das für einzelne Bauteile auf der Grundlage konservativer Annahmen gilt (EC 3-2-1, 4.1).

Die thermische Dehnung von Stahl bestimmt sich nach EC 3-1-2, 3.4.1.1, zu

bei $20\text{ °C} \leq \theta_a < 750\text{ °C}$... $\Delta l / l = 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a + 0.4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2.416 \cdot 10^{-4}$

bei $750\text{ °C} \leq \theta_a \leq 860\text{ °C}$... $\Delta l / l = 1.1 \cdot 10^{-2}$

bei $860\text{ °C} < \theta_a \leq 1.200\text{ °C}$... $\Delta l / l = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a - 6.2 \cdot 10^{-3}$... mit ...

l Länge bei Normaltemperatur

Δl Ausdehnung infolge Temperatur

θ_a Stahltemperatur [°C]

Der Temperaturexpansionskoeffizient ergibt sich daraus zu

$\alpha_T = \frac{\Delta l / l}{\Delta \theta_a}$... mit ... $\Delta \theta_a = \theta_a - \theta_0$... und ... θ_0 Normaltemperatur

Die spezifische Wärmekapazität wird wie folgt ermittelt

$$\text{bei } 20^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 600^\circ\text{C} \quad \dots \quad c_a = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot \vartheta_a - 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta_a^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta_a^3 \quad \text{J/kgK}$$

$$\text{bei } 600^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 735^\circ\text{C} \quad \dots \quad c_a = 666 + 13002 / (738 - \vartheta_a) \quad \text{J/kgK}$$

$$\text{bei } 735^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 900^\circ\text{C} \quad \dots \quad c_a = 545 + 17820 / (\vartheta_a - 731) \quad \text{J/kgK}$$

$$\text{bei } 900^\circ\text{C} \leq \vartheta_a \leq 1.200^\circ\text{C} \quad \dots \quad c_a = 650 \quad \text{J/kgK} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

ϑ_a Stahltemperatur [$^\circ\text{C}$]

Die Wärmeleitfähigkeit wird berechnet mit

$$\text{bei } 20^\circ\text{C} \leq \vartheta_a < 800^\circ\text{C} \quad \dots \quad \lambda_a = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta_a \quad \text{W/mK}$$

$$\text{bei } 800^\circ\text{C} \leq \vartheta_a \leq 1.200^\circ\text{C} \quad \dots \quad \lambda_a = 27.3 \quad \text{W/mK} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

ϑ_a Stahltemperatur [$^\circ\text{C}$]

Bemessungsverfahren

Der Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung $E_{fi,d}$ darf die Beanspruchbarkeit des Stahlbauteils $R_{fi,d,t}$ zum Zeitpunkt t nicht überschreiten

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

Es wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Querschnitt angenommen (s. EC 3-1-2, 4.2.1(2)).

Bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung z.B. durch Abschattung oder an Auflagern kann die Momentenbeanspruchbarkeit durch Anpassungsfaktoren κ_1 und κ_2 erhöht werden (s. EC 3-1-2, 4.2.3.3(3)).

Anpassungsfaktor κ_1 für eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt

$$\kappa_1 = 1.0 \quad \dots \quad \text{für einen Träger, der von allen vier Seiten brandbeansprucht wird}$$

$$\kappa_1 = 0.70 \quad \dots \quad \text{für einen ungeschützten Träger mit einer Stahlbeton- oder Stahlbetonverbundplatte auf der einen Seite und Brandbeanspruchung auf den drei anderen Seiten}$$

$$\kappa_1 = 0.85 \quad \dots \quad \text{für einen brandgeschützten Träger mit einer Stahlbeton- oder Stahlbetonverbundplatte auf der einen Seite und Brandbeanspruchung auf den drei anderen Seiten}$$

Anpassungsfaktor κ_2 für eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Träger

$$\kappa_2 = 0.85 \quad \dots \quad \text{an den Auflagern statisch unbestimmt gelagerter Träger}$$

$$\kappa_2 = 1.0 \quad \dots \quad \text{in allen anderen Fällen}$$

Anstelle der Erhöhung des aufnehmbaren Moments $M_{fi,Rd}$ wird hier das einwirkende Moment $M_{fi,Ed}$ reduziert

$$M_{fi,\theta,Ed} = M_{fi,Ed} \cdot (\kappa_1 \cdot \kappa_2)$$

Der Nachweis wird über den elastischen oder plastischen Spannungsnachweis erbracht

$$U = E_{fi,d} / R_{fi,d,t} \leq 1$$

Alternativ darf die Bemessung auf Temperaturebene durchgeführt werden (EC 3-1-2, 4.2.4), indem die vorhandene Temperatur im Stahl ϑ_a der kritischen Temperatur $\vartheta_{a,cr}$ gegenübergestellt wird.

$$\vartheta_a \leq \vartheta_{a,cr} \quad \dots \text{ bzw. } \dots \quad U = \vartheta_a / \vartheta_{a,cr} \leq 1$$

Die kritische Temperatur berechnet sich mit

$$\vartheta_{a,cr} = 39.19 \cdot \ln \left(1 / (0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}) - 1 \right) + 482 \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} \geq 0.013$$

$$R_{fi,d,0} \quad \text{Wert von } R_{fi,d,t} \text{ zum Zeitpunkt } t = 0$$

Spannungsnachweise

Die Schnittgrößenermittlung erfolgt auf Grundlage der Elastizitätstheorie.

Der Nachweis kann elastisch und plastisch geführt werden. Der elastische Spannungsnachweis wird für einen **dünnwandigen Querschnitt** geführt, der plastische Spannungsnachweis nach der Methode mit **Dehnungsiteration**.

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

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.

Für Nachweise im Brandfall wird der Material Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$ (anstelle von γ_{M0}) verwendet.

Die Schubspannungen werden nach der dünnwandigen Theorie ermittelt.

Der **plastische Spannungsnachweis** wird ganzheitlich am Querschnitt betrachtet und für Normal- und Schubspannungen gemeinsam durchgeführt. Die Querschnittsausnutzung wird über Laststeigerung ermittelt.

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 Querschnittsklasse 4 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.

Im Brandfall wird der Materialbeiwert abgemindert mit (s. EC 3-1-2, 4.2.2(1))

$$\epsilon = 0.85 \cdot \sqrt{235 / f_y} \quad \dots \text{mit } \dots f_y \quad \text{Streckgrenze bei Normaltemperatur}$$

Die Ausnutzung berechnet sich mit

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

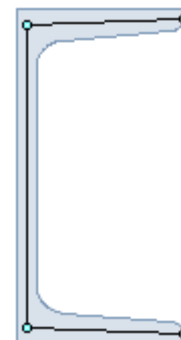
elastisch Q-Klasse 3 und plastisch Q-Klasse 2

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.

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.



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 über die Dicke konstant verlaufen (hier: horizontale bzw. vertikale Konturengrenzen), während der Anteil aus Torsion sich linear über die Dicke verändert.

Der Nachweis wird für die maximale Vergleichsspannung geführt.

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 ausgenommen.

Das Verfahren der Dehnungsiteration (DIV) wird in *R. Kindmann, J. Fricke: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit (Kapitel 10.10)* beschrieben.

Die Schubspannungen aus Querkraft und Torsion der einzelnen Querschnittsteile (Flansche, Stege, ...) werden aus der elastischen Schubverteilung berechnet. Diese Schubspannungen reduzieren die zulässige Normalspannung der Teile.

Können die Schubspannungen nicht aufgenommen werden, muss der maximale mögliche Lastfaktor reduziert werden.

Die Schubspannungen werden bei Spannungsüberschreitungen nicht umgelagert.

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.

Beschreibung der Ergebnisse

Das Programm weist die Brandschutztragfähigkeit für dünnwandige Querschnitte der Klassen 1 bis 3 nach.

Der Nachweis kann auf Traglast- und Temperaturebene geführt werden.

Nähere Informationen zu den Verfahren finden Sie [hier](#).

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

Anschließend wird die Berechnung von frei definierten Querschnitten (s. **4H-QUER**) der Querschnittsklasse 3 vorgestellt (**Bsp. 2**).

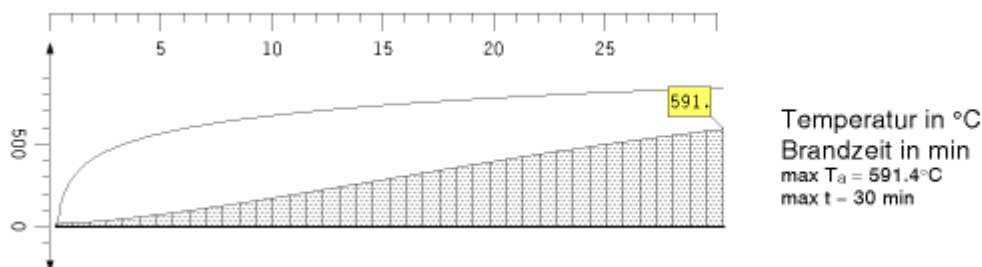
Abschließend werden die Auswirkungen der Bekleidung mit Brandschutzmaterial gezeigt (**Bsp. 3**).

Bsp. 1: HE280M, S235, $M_{y,Ed} = 272 \text{ kNm}$, $t_{fi} = 30 \text{ min}$, oben abgeschattet, ungeschützt

Der Querschnitt wirkt als Träger einer Stahlbetonplatte. Die Brandbeanspruchung ist an den drei anderen Seiten und bewirkt eine ungleichmäßige Temperaturverteilung. Nach 30 min ergibt sich die Stahltemperatur T_a

brandbeanspruchte Oberfläche des Profils $A_m = 1405.8 \text{ mm}^2/\text{mm}$
 Profilmfaktor des ungeschützten Bauteils $A_m/V = 1405.8 / 24016.4 \cdot 10^3 = 58.5 \text{ 1/m}$
 brandbeanspruchte innenseitige Oberfläche des umschließenden Kastens $A_b = 908.0 \text{ mm}^2/\text{mm}$
 Profilmfaktor für den umschließenden Kasten $A_b/V = 908.0 / 24016.4 \cdot 10^3 = 37.8 \text{ 1/m}$
 Korrekturfaktor $k_{sh} = (A_b/V) / (A_m/V) = 37.8 / 58.5 = 0.646$, I-Profil: $0.9 \cdot k_{sh} = 0.581$
 Temperatur des Profils nach $t = 30 \text{ min}$: $T_a = 591.4 \text{ °C}$

Eine grafische Darstellung zeigt die Temperaturentwicklung in Bezug zur Einheitstemperaturkurve.



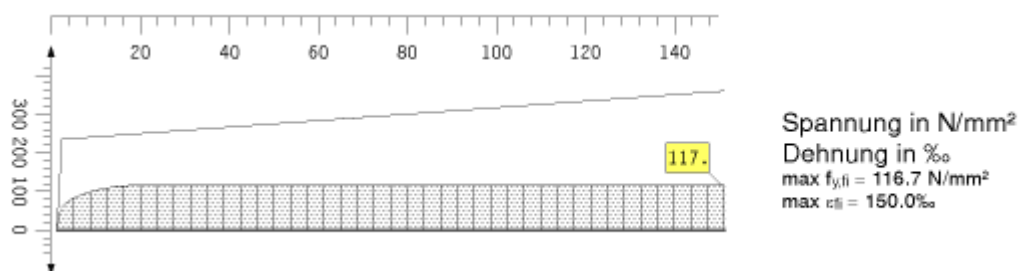
Daraus ergeben sich die Materialkennwerte $f_{y,fi}$, E_{fi} , $\alpha_{T,fi}$

Abminderungsfaktoren: $k_{y,fi} = 0.497$, $k_{p,fi} = 0.195$, $k_{E,fi} = 0.335$

Materialkennwerte: $f_{p,fi} = 45.9 \text{ N/mm}^2$, $f_{y,fi} = 116.7 \text{ N/mm}^2$, $E_{fi} = 70330.6 \text{ N/mm}^2$, $\alpha_{T,fi} = 1.44 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$

Grenzdehnungen: $\varepsilon_{p,fi} = 0.653\text{‰}$, $\varepsilon_{y,fi} = 20\text{‰}$, $\varepsilon_{t,fi} = 150\text{‰}$

Eine grafische Darstellung zeigt die Spannungsdehnungslinie im Brandfall in Bezug zur Linie bei Normaltemperatur.



Für die Bemessung mit dem einfachen Bemessungsverfahren n. EC 3-1-2, 4.2 sind lediglich $f_{y,fi}$ und E_{fi} relevant.

Es liege eine ungleichmäßige Temperaturverteilung vor, so dass das einwirkende Moment für den Spannungsnachweis mit dem Faktor $\kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0.7$ abgemindert werden darf auf

Schnittgrößen (Brandfall, ungleichmäßige Temperaturverteilung): $M_{y,fi} = 190.40 \text{ kNm}$

Der Nachweis auf **Traglastebene** wird mit dem plastischen Spannungsnachweis geführt und ergibt die Ausnutzung U_{pl} .

plastischer Spannungsnachweis für $M_y = 190.40 \text{ kNm}$

zul. Vergleichsspannung: $\sigma_{v,Rd} = 116.7 \text{ N/mm}^2$

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

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

Grenznormalspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{min} = -116.71 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{max} = 116.71 \text{ N/mm}^2$

Grenzvergleichsspannungen des Querschnitts (plast.): $\sigma_{v,min} = 0.00 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{v,max} = 116.71 \text{ N/mm}^2$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 1.818 \Rightarrow U_{\sigma,pl} = 0.550$

Nachweis: $U_{pl} = 0.550 < 1$ **ok**

Mit dem c/t-Nachweis kann die Zulässigkeit des Verfahrens (elastisch bzw. plastisch) überprüft werden.

Querschnitt in Klasse 1, Materialbeiwert $\varepsilon = 0.85 \cdot (235/235.0)^{0.5} = 0.850$

c/t-Nachweis: einseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.395 < 1$ **ok**

beidseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.150 < 1$ **ok**

gesamt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.395 < 1$ **ok** (bzgl. Querschnittsklasse 2)

Für den Nachweis auf **Temperaturebene** ist der Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt $t = 0$ (bei Normaltemperatur) zu bestimmen.

Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt $t = 0$

plastischer Spannungsnachweis für $M_y = 190.40 \text{ kNm}$

max. Lastfaktor der Normalspannungen (plast.): $f_{\sigma,pl} = 3.660 \Rightarrow U_{\sigma,pl} = 0.273$

Nachweis: $U_{pl} = 0.273 < 1$ **ok**

Ist der Nachweis erfüllt, kann die kritische Temperatur T_{cr} bestimmt werden, mit der der Brandschutznachweis geführt wird.

kritische Temperatur $T_{a,cr} = 39.19 \cdot \ln[1/(0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}) - 1] + 482 = 677.9 \text{ °C}$ mit $\mu_0 = 0.273$

vorhandene Temperatur $T_a = 591.4 \text{ °C}$

Nachweis: $U_T = T_a/T_{a,cr} = 0.872 < 1$ **ok**

Bsp. 2: U120 + L100x50x8, S275, $t_{fi} = 60 \text{ min}$, allseitig beflammt, ungedämmt

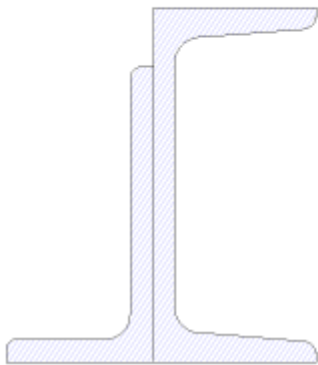
Die Profile sind rückseitig aneinander geschweißt.

Geometrie

Querschnittsabmessungen: $y_{\min} = 486.2 \text{ mm}$, $y_{\max} = 591.2 \text{ mm}$, $z_{\min} = 128.2 \text{ mm}$, $z_{\max} = 248.2 \text{ mm}$

Querschnittsbreite/höhe: $b = 105.0 \text{ mm}$, $h = 120.0 \text{ mm}$

Schwerpunkt, Hauptachseneckwinkel: $e_y = 536.1 \text{ mm}$, $e_z = 197.8 \text{ mm}$, $\alpha = -9.70^\circ$



Querschnittsfläche	A	=	28.43 cm ²
Biegeträgheitsmoment	I_{η}	=	532.46 cm ⁴
Biegeträgheitsmoment	I_{ζ}	=	101.71 cm ⁴
Widerstandsmoment	$W_{\eta+}$	=	90.43 cm ³
Widerstandsmoment	$W_{\eta-}$	=	69.10 cm ³
Widerstandsmoment	$W_{\zeta+}$	=	21.85 cm ³
Widerstandsmoment	$W_{\zeta-}$	=	17.63 cm ³
Torsionsträgheitsmoment	I_T	=	6.20 cm ⁴

Der Querschnitt ist allseitig beflammt. Der den Flammen ausgesetzte Umfang des Gesamtquerschnitts beträgt $A_m = U_U + U_L \cdot 2 \cdot 100 = 416.4 + 277.1 \cdot 2 \cdot 100 = 493.5 \text{ mm}$. Die Oberfläche des umschließenden Kastens für die Abschattungseffekte durch den Querschnitt selbst beträgt $A_b = U_b,U + U_b,L \cdot 2 \cdot 100 = 350 + 261.8 \cdot 2 \cdot 100 = 411.8 \text{ mm}$.

Profiltemperatur

thermische Beanspruchung mit der Einheitstemperaturkurve, Feuerwiderstandsdauer $t = 60 \text{ min}$

brandbeanspruchte Profiloberfläche $A_m = 493.5 \text{ mm}^2/\text{mm}$

dem Feuer ausgesetzte Oberfläche des profil-umschließenden Kastens $A_b = 411.8 \text{ mm}^2/\text{mm}$

Nach 60 min ergibt sich die Querschnittstemperatur T_a

Profilfaktor des ungeschützten Bauteils $A_m/V = 493.5 / 2842.9 \cdot 10^3 = 173.6 \text{ 1/m}$

Profilfaktor für den umschließenden Kasten $A_b/V = 411.8 / 2842.9 \cdot 10^3 = 144.9 \text{ 1/m}$

Korrekturfaktor $k_{sh} = (A_b/V) / (A_m/V) = 144.9 / 173.6 = 0.834$

Temperatur des Profils nach $t = 60 \text{ min}$: $T_a = 940.4^\circ\text{C}$

Der Nachweis wird auf Temperaturebene geführt und ergibt für die Schnittgrößen im Brandfall

Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt $t = 0$

elastischer Spannungsnachweis für $M_y = 2.00 \text{ kNm}$, $M_z = -3.00 \text{ kNm}$

Nachweis: $\sigma_v = 145.43 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{v,Rd} = 235.00 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_{\sigma} = 0.619 < 1$ **ok**

kritische Temperatur $T_{a,cr} = 39.19 \cdot \ln[1/(0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}) - 1] + 482 = 548.8^\circ\text{C}$ mit $\mu_0 = 0.619$

vorhandene Temperatur $T_a = 940.4^\circ\text{C}$

Nachweis: $U_T = T_a/T_{a,cr} = 1.713 > 1$ **Fehler !!**

Bsp. 3: IPE300, S235, $t_{fi} = 90 \text{ min}$, oben abgeschattet, gedämmt

Mit diesem Beispiel wird die Berechnung der Temperatur eines brandgeschützten Profils gezeigt. Der Querschnitt ist kastenförmig mit Faser-Zement-Platten bekleidet und wird dreiseitig beflammt.

Kastenbekleidung durch Faser-Zement-Platten:

Wärmeleitfähigkeit $\lambda_p = 0.15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, spezifische Wärmekapazität $c_p = 1200 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, Rohdichte $\rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$

Dicke des Dämmmaterials $d_p = 20.2 \text{ mm}$

Nach 90 min ergibt sich die Stahltemperatur T_a

innere Abwicklung der brandbeanspruchten Kastenverkleidung $A_p = 750.0 \text{ mm}^2/\text{mm}$

Profilfaktor des geschützten Bauteils $A_p/V = 750.0 / 5381.2 \cdot 10^3 = 139.4 \text{ 1/m}$

Temperatur des Profils nach $t = 90 \text{ min}$: $T_a = 557.2^\circ\text{C}$

