4H-EC3EM Ermüdungsnachweis EC 3-1-9
Detailinformationen

Seite überarbeitet Dezember 2023 • Kontakt • Programmübersicht • Bestelltext

Infos auf dieser Seite **... als pdf**

- Eingabeoberfläche .....
- Geometrie u. Material .....
- Rechenlaufsteuerung .....
- Kerbfälle .....
- Schnittgrößen .....
- Schnittgrößenimport .....
- Theorie Ermüdung EC 3-1-9
- ... Allgemeines .....
- ... Bemessungskonzept .....
- ... Beanspruchungen .....
- ... Ermüdungsnachweis .....
- ... Kerbfalltabellen .....
- ... Beispiel .....
- Kranbahn Obergurt.....
- ... Untergurt .....

Eingabeoberfläche

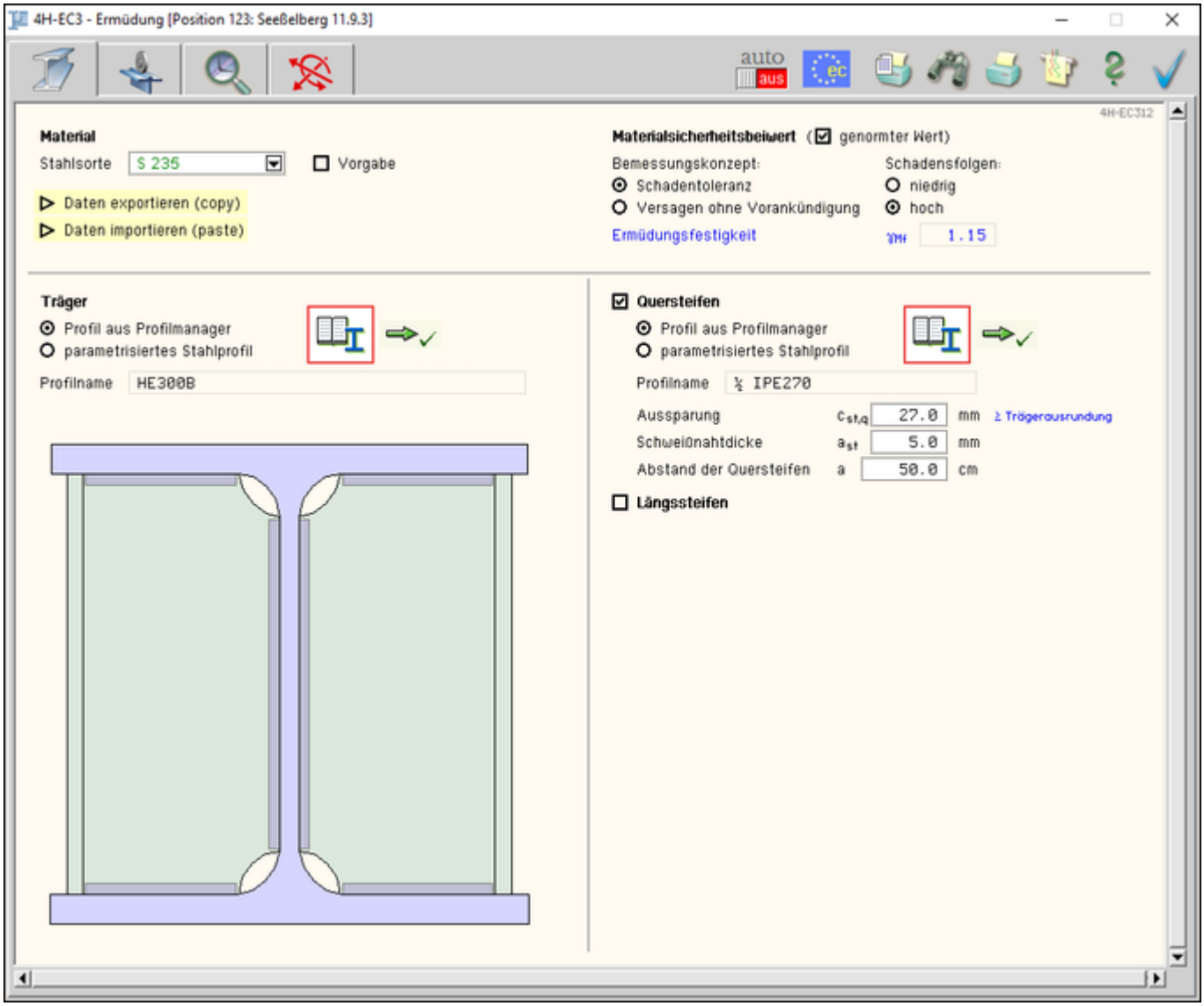
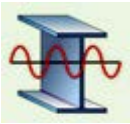


Bild vergrößern

EC 3-1-9, Ermüdungsnachweis

Mit dem Programm *4H*-EC3EM, Ermüdungsnachweis, wird ein Doppel-T-Profil unter



Errmüdungsbelastung nachgewiesen.

Die zugehörigen Eingabeparameter werden in eigenen Registerblättern verwaltet, die über folgende Symbole die dahinter liegende Parameterauswahl kenntlich machen.

Geometrie und Material

Im ersten Registerblatt werden das Trägerprofil beschrieben und die Stahlgüte festgelegt.

Der Querschnitt wird zur visuellen Kontrolle maßstäblich am Bildschirm dargestellt.

Kranbahn / Ermüdungsnachweis

Im zweiten Registerblatt werden die Kranbahn sowie die nachweisrelevanten Parameter für den Ermüdungsnachweis angegeben.

Kerbfälle

Im dritten Registerblatt werden die Kerbpunkte und -spannungen definiert.

Bemessungsschnittgrößen

Die Schnittgrößen werden im vierten Registerblatt festgelegt und können entweder 'per Hand' eingegeben oder aus einem pcae-Programm importiert werden.

Um Schnittgrößen importieren zu können, muss das entsprechende *4H*-Programm in der exportfähigen Version installiert sein.

Die Schnittgrößen beziehen sich auf den Schwerpunkt des ggf. ausgesteiften Profils und das Koordinatensystem der Statik (x-y-z bzw. l-m-n).

automatische Onlineberechnung

Dieser Schalter kann ***an*** oder ***aus*** sein. Ist er ***an***, wird das Berechnungsergebnis online während der Eingabe aktualisiert und am Bildschirm protokolliert.

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.

Geometrie und Material

im Register 1 werden die Material- und Geometrie-Parameter festgelegt

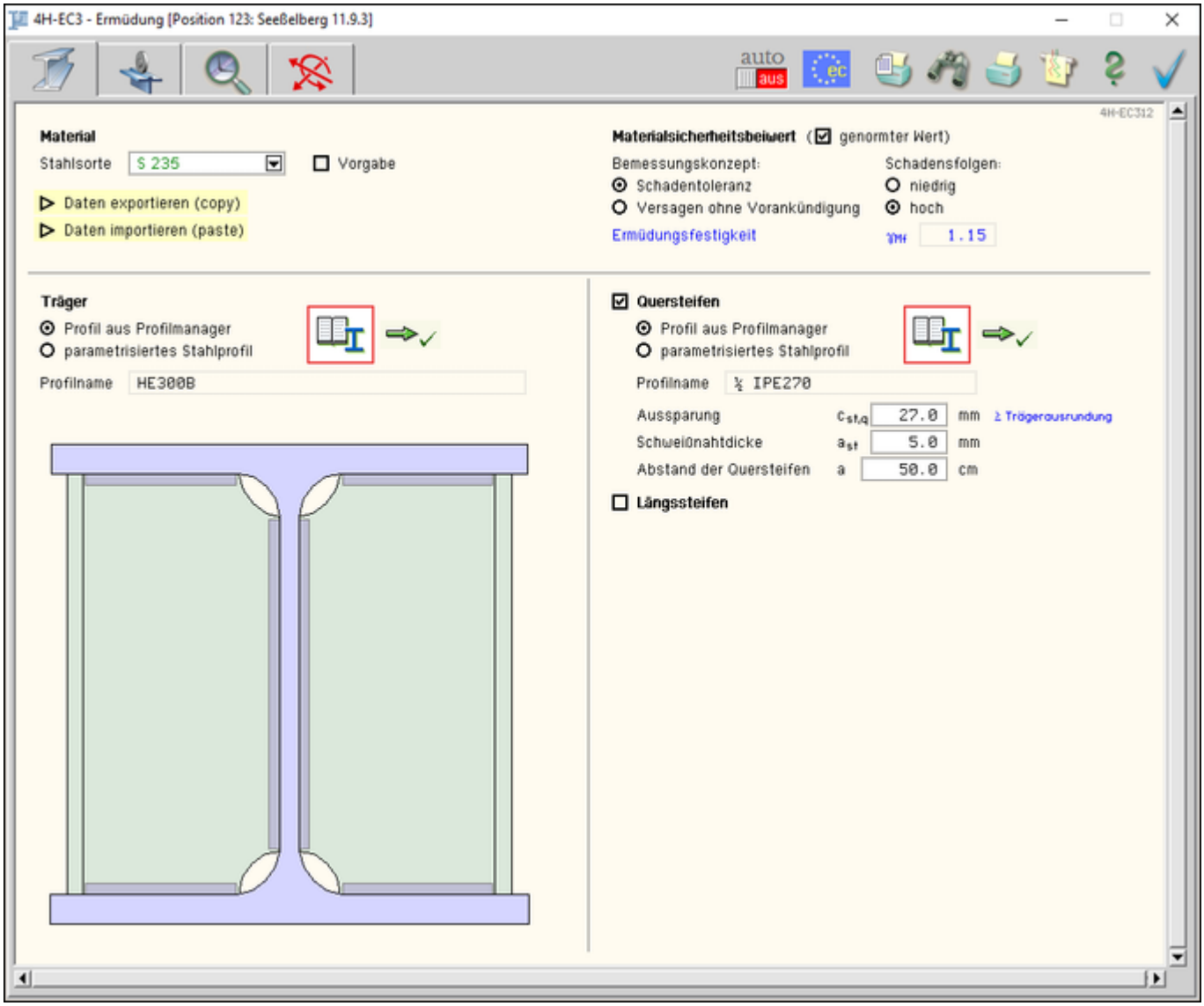
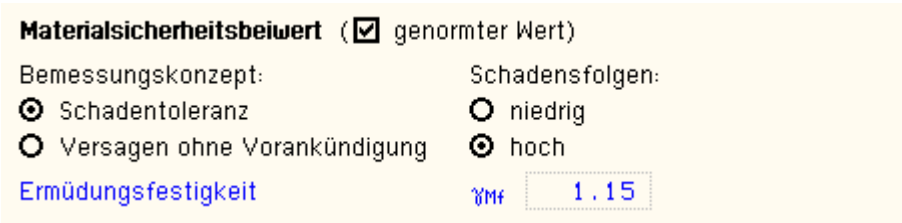


Bild vergrößern

Materailsicherheitsbeiwerte

Im Programm *4H*-EC3EM werden nach EC 3-1-9 folgende Materialsicherheitsbeiwerte herangezogen.



Die Werte können entweder in Abhängigkeit des Bemessungskonzepts und der Schadensfolgen den entspr.

Normen (s.a. Nationaler **Anhang**) entnommen oder vom Anwender direkt vorgegeben werden.

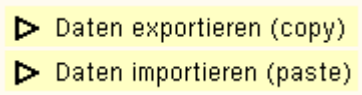
Stahlsorte

Es wird eine einheitliche Stahlgüte für die Einzelelemente (Trägerprofil, Quersteifen, Längssteifen, Kranschiene) festgelegt.

Da die Beschreibung der Stahlparameter nach EC3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Stahlsorten** verwiesen.

Export / Import

Die Eingabedaten können über die Copy-Paste-Funktion von einem Bauteil in ein anderes übertragen werden.



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*** in das aktuell geöffnete Bauteil aus der Zwischenablage zu übernehmen.

Diese Funktionalität ermöglicht es außerdem, die Eingabedaten aus dem Programm *4H*-EC3EM, Ermüdungsnachweis, in die Programme *4H*-EC3BL, Beulen, oder *4H*-EC3LK, Lasteinleitung aus Kranbahn, zu übertragen.

Die Daten können natürlich auch zurücktransportiert werden.

Geometrie

Das Programm *4H*-EC3EM weist die Ermüdungstragfähigkeit eines typisierten Doppel-T-Profils nach.

Die Parameter des Trägerprofils können dabei entweder über den **pcae**-eigenen ***Profilmanager*** in das Programm importiert oder als ***typisiertes Stahlprofil*** parametrisiert eingegeben werden.

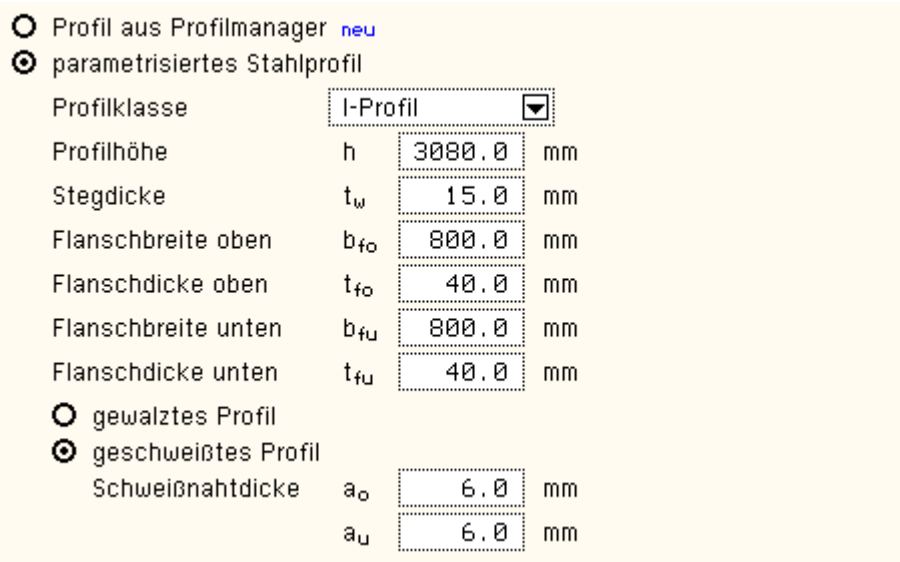
Um ein Profil aus dem Angebot des Profilmanagers zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu betätigen.

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

Zur Definition eines parametrisierten Profils wird zunächst seine Klasse über eine Listbox festgelegt, anhand derer bestimmt wird, welche weiteren Parameter freigelegt werden.

Das Programm berechnet Träger mit Doppel-T-Profilen (I, H-, DIL-, S-, W-Profile).

Andere Profilklassen sind in der Listbox farblich gekennzeichnet und können nicht verwendet werden.



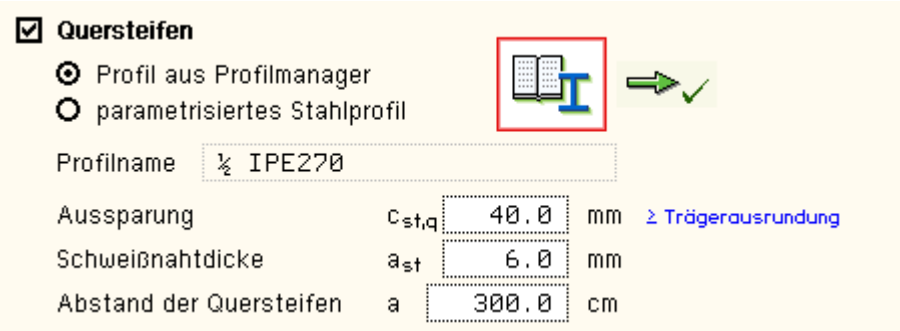
Bei gewalzten Profilen werden die Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten zusammengefügt sind.

Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

Das Trägerprofil kann mittels vertikaler Quersteifen unterstützt werden.

Die St. können ebenso entweder aus dem Profilmanager ausgewählt oder parametrisiert eingegeben werden.

Als Quersteifen stehen Winkel-, U- bzw. C-, T- bzw. 1/2I-, Trapez-Profile und Flachstähle zur Verfügung, wobei Trapezprofil und Flachstahl nur parametrisiert eingegeben werden können.



Zur Bestimmung der Kerbfälle sind die Aussparung der Quersteife an der Verbindung zwischen Trägerflansch und -steg (Trägerausrundung oder Trägerschweißnaht) sowie die Schweißnahtdicke zwischen Quersteife und Trägerprofil anzugeben.

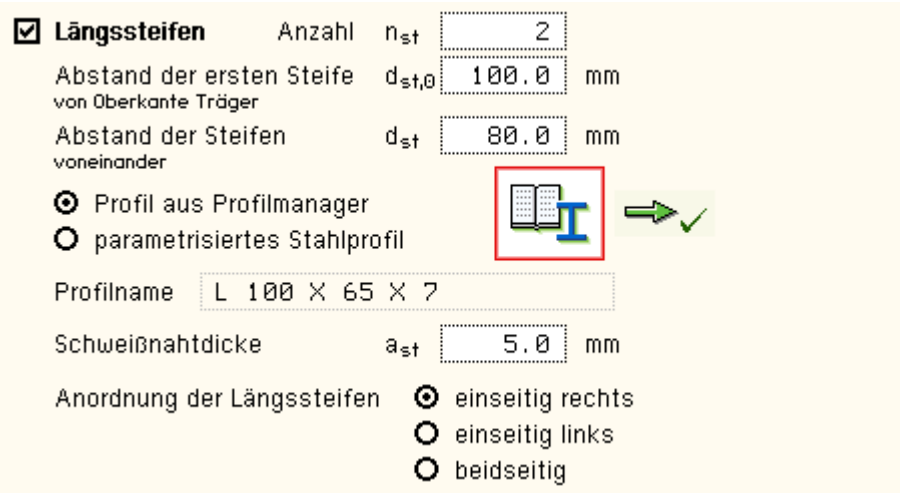
Außerdem ist der Abstand der Quersteifen voneinander für die Berechnung erforderlich.

Der Trägersteg kann längs ausgesteift sein. Dazu können bis zu fünf Längssteifen mit äquidistantem Abstand voneinander angeordnet werden.

Zunächst ist die Anzahl an Steifen festzulegen, anschießend der Abstand der ersten Steife von Oberkante Träger bzw. vom oberen Blechrand sowie der Abstand der Steifen voneinander.

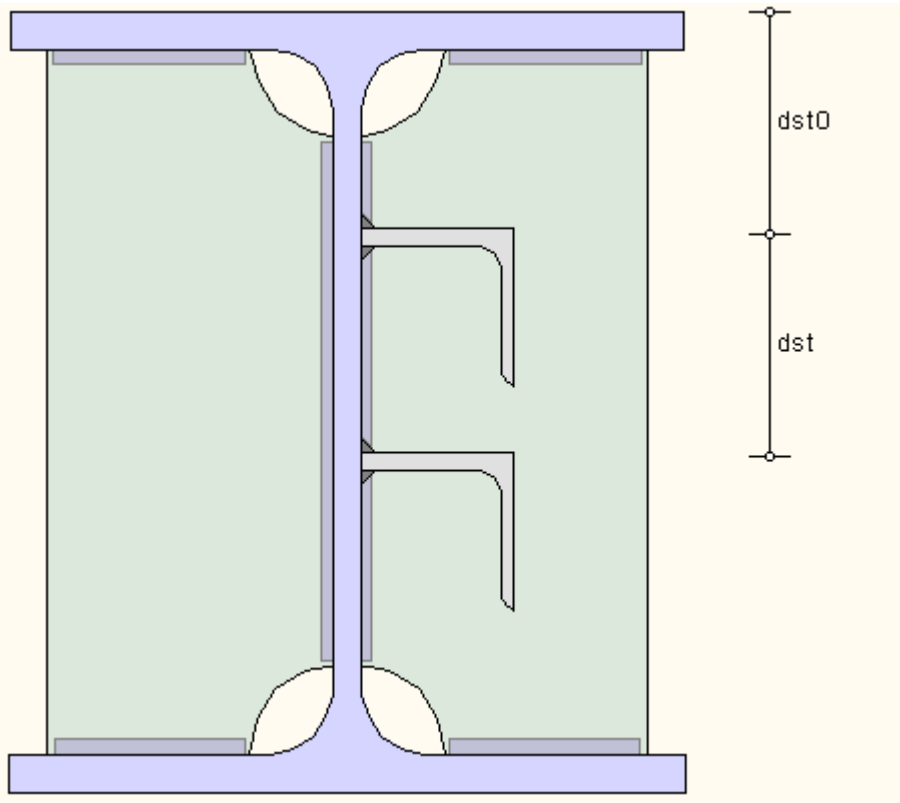
Es ist darauf zu achten, dass die Steifen sich nicht berühren bzw. überschneiden!

Das Steifenprofil wird dann analog zu den Quersteifen definiert.



Zur Bestimmung der Kerbfälle sind Schweißnahtdicke sowie die Lage der Längssteifen am Trägersteg anzugeben.

Zur visuellen Kontrolle wird das ausgewählte Profil einschl. Längs- und Quersteifen maßstäblich am Bildschirm angezeigt. Die Abstände der Längssteifen sind bezeichnet.



Rechenlaufsteuerung

im Register 2 befinden sich die Angaben zur Belastung des Trägers durch eine Kranbahn sowie nachweisspezifische Einstellungen

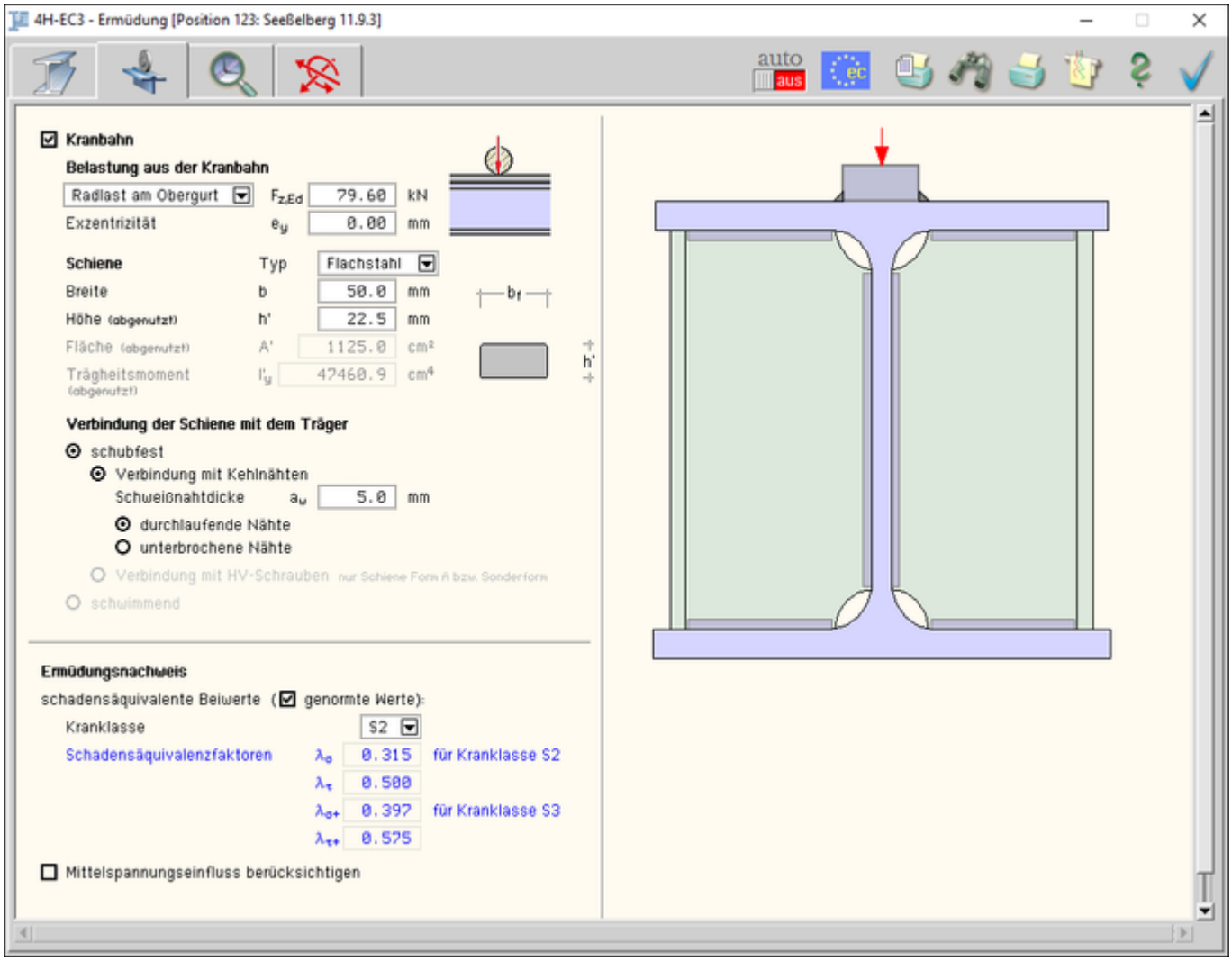
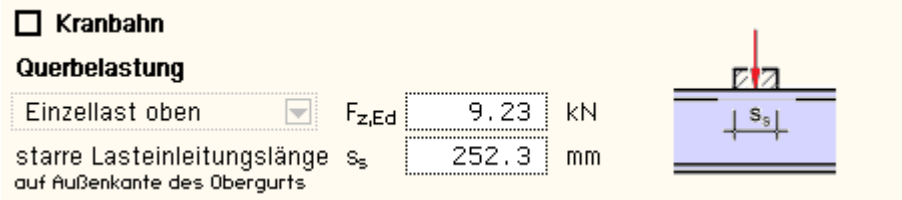


Bild vergrößern

Der Ermüdungsnachweis wird für einen Doppel-T-Träger ggf. mit Kranbahnbelastung am Ober- oder Untergurt geführt.
Die Beschreibung der Rechenparameter der Kranbahn finden Sie **hier**.

Falls keine Angaben zur Kranbahn vorliegen, kann auch eine Einzellast auf den Obergurt mit zugehöriger Lasteinleitungslänge definiert werden.



Für den Ermüdungsnachweis sind schadensäquivalente Beiwerte der Normalspannungs- und der Schubspannungs-differenz festzulegen.

Ist eine Kranbahn definiert, können die Werte über die Kranklasse normentsprechend gesetzt werden; andernfalls sind sie vorzugeben.

Da die Überfahrt einer Kranbahn stets zu zwei Spannungsspitzen führt, sind die Beiwerte für eine um 1 höhere Kranklasse ebenfalls anzugeben (nur bei Definition einer Kranbahn).

Ermüdungsnachweis

schadensäquivalente Beiwerte (☑ genormte Werte):

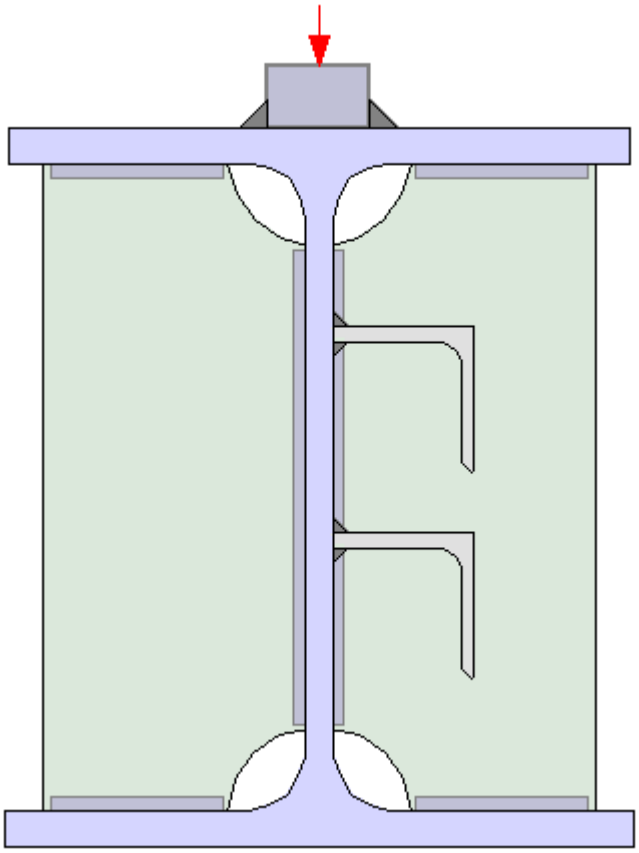
Kranklasse		S2	
Schadensäquivalenzfaktoren	λ_σ	0.315	für Kranklasse S2
	λ_τ	0.500	
	$\lambda_{\sigma+}$	0.397	für Kranklasse S3
	$\lambda_{\tau+}$	0.575	

☑ Mittelspannungseinfluss berücksichtigen

Außerdem kann optional der Mittelspannungseinfluss berücksichtigt werden.
Hintergründe und Erläuterungen der Eingabewerte finden Sie **hier**.

Der Querschnitt wird einschl. Kranbahn und Belastung maßstäblich am Bildschirm angezeigt.

Änderungen in diesem Register werden direkt umgesetzt.



Ist der Button ***auto*** in der Kopfzeile des Programmfensters aktiviert, werden die Berechnungsergebnisse permanent abgeglichen und online am Bildschirm dargestellt (s.a. **Schnittgrößen**).

Maximale Ausnutzung U_{max}= 0.322 ≤ 1 ok.

Kerbfälle

Register 3 enthält Angaben zu den Kerbfällen

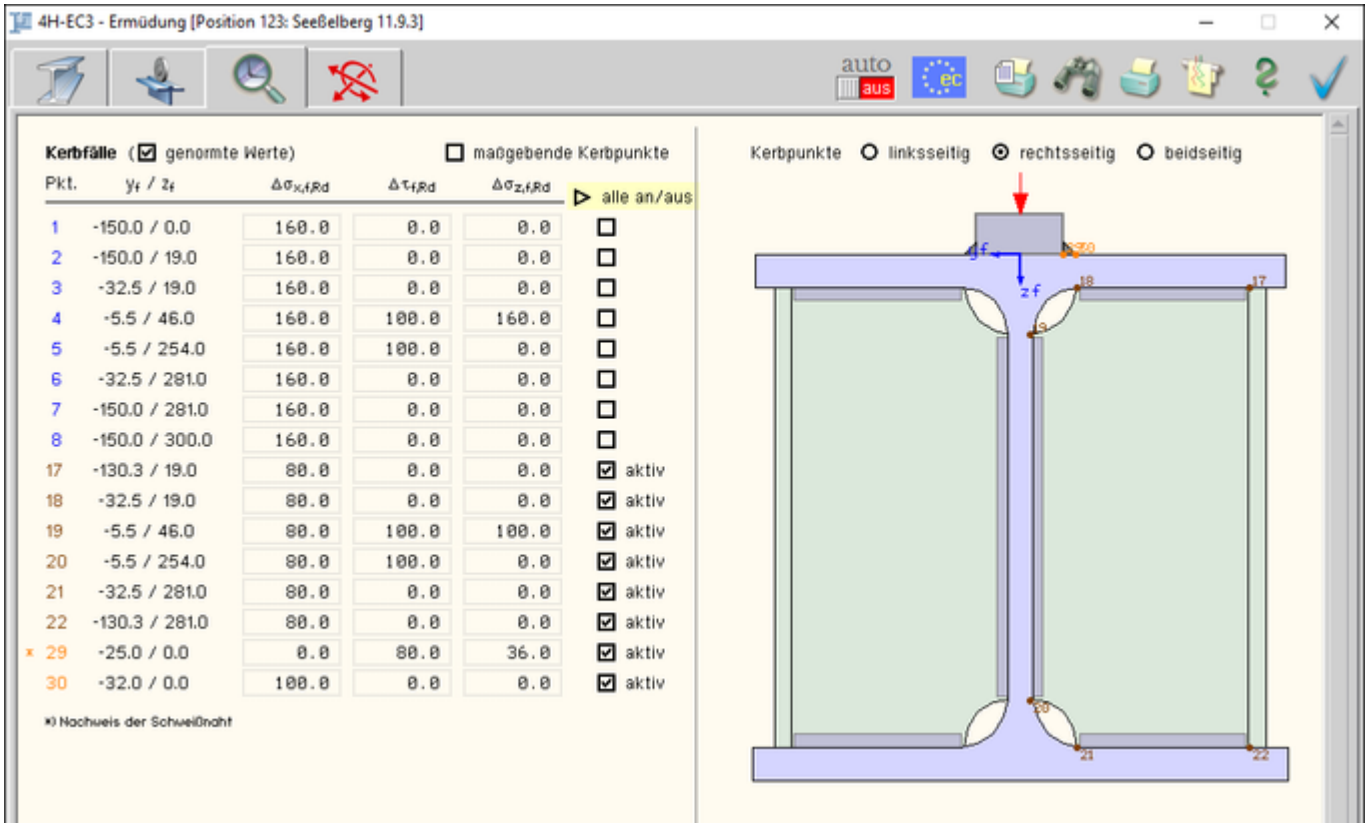


Bild vergrößern

Unter Ermüdungsbelastung ist ein Querschnitt an den Stellen besonders empfindlich gegen Versagen, an denen sein äußeres Gefüge infolge von Kerben gestört ist.

Eine Störung erfolgt an Schweißnähten (sowohl in der Wurzel als auch am Schenkelende), an Schraubenlöchern, bei Ausrundungen und an Querschnittskanten allgemein.

Die ermüdungsempfindlichen Stellen eines Querschnitts werden als Kerbfälle bezeichnet, an denen die Ermüdungsspannung vorgegebene Kerbspannungen nicht überscheiten darf.

In diesem Register werden alle verfügbaren Kerbfälle des Doppel-T-Trägerprofils tabellarisch aufgeführt und grafisch dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber werden die Kerbpunkte nach ihrer Ursache farblich unterschieden.

- blau: Profilkanten, -ausrundungen / -schweißnähte
- braun: Schweißnähte der Quersteifen am Trägerprofil
- grün: Schweißnähte der Längssteifen am Trägerprofil
- orange: Befestigung der Kranbahnschiene auf dem Trägerobergurt / Einleitung der Kranbahnlast in den Trägeruntergurt

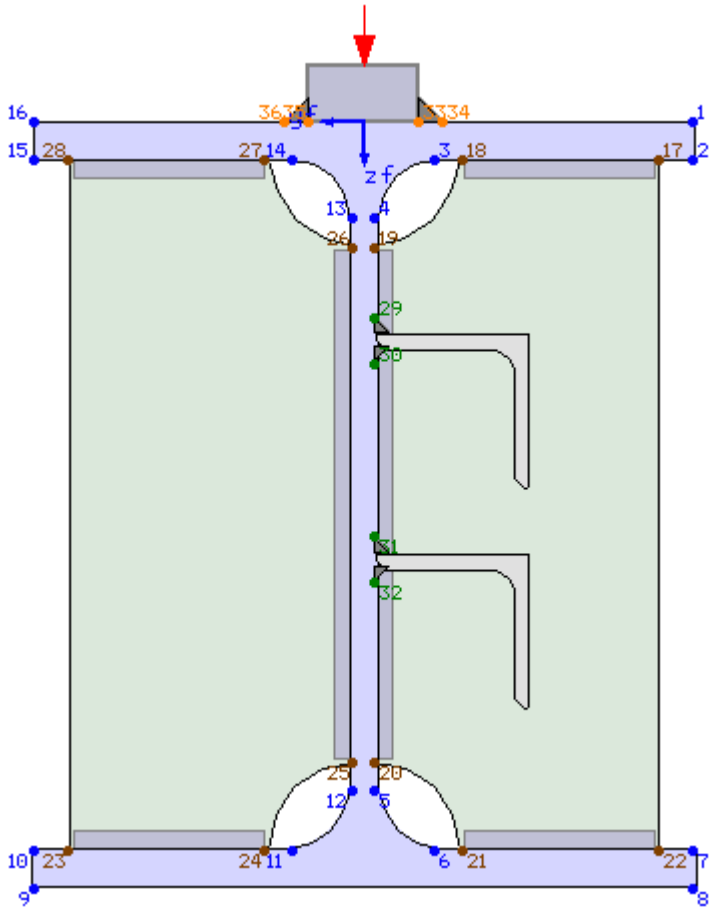
Ein (*) kennzeichnet, wenn der Nachweis für die Schweißnaht geführt wird.

Kerbfälle

Pkt.	y_f / z_f	$\Delta\sigma_{x,f,Rd}$	$\Delta\tau_{f,Rd}$	$\Delta\sigma_{z,f,Rd}$	
1	-150.0 / 0.0	160.0	0.0	0.0	☑ aktiv
⋮					
4	-5.0 / 44.5	160.0	100.0	160.0	☑ aktiv
⋮					
6	-32.0 / 332.5	160.0	0.0	0.0	☑ aktiv
⋮					
17	-135.0 / 17.5	80.0	0.0	0.0	☑ aktiv
⋮					
29	-5.0 / 89.4	56.0	100.0	0.0	☑ aktiv
⋮					
* 33	-25.0 / 0.0	36.0	80.0	0.0	☑ aktiv

Neben der Punktnummer und der y-/z-Lage im Querschnitt werden die zulässigen Kerbnormalspannungen $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_z$ und die zulässige Kerbschubspannung $\Delta\tau$ angegeben.

Der Schalter ***aktiv*** kennzeichnet den Kerbpunkt als Nachweispunkt, d.h. ist der Schalter für einen Punkt nicht aktiviert, wird er nicht nachgewiesen.



Die Kerbspannungen können entweder nach Norm (EC 3-1-9, Tab. 8.xx) vorbelegt oder frei eingegeben werden.

Ebenso können nur die für den Querschnitt maßgebenden Kerbpunkte vom Programm als ***aktiv*** gesetzt werden.

Kerbfälle (☑ genormte Werte) ☑ maßgebende Kerbpunkte

Um die Anzahl an Nachweispunkten zu reduzieren und aus Gründen der Übersichtlichkeit, können auch nur die rechtsseitigen oder linksseitigen Kerbpunkte angezeigt und aktiviert werden.

Kerbpunkte ○ linksseitig ○ rechtsseitig ◉ beidseitig

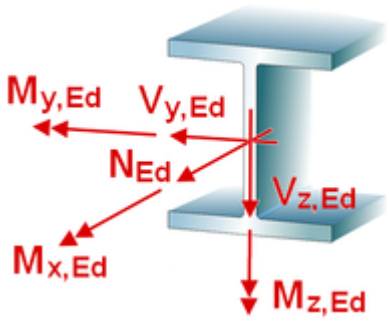
Bei unsymmetrischem Querschnitt oder mehrachsiger Belastung sollten die Kerbpunkte stets beidseitig des Querschnitts untersucht werden, da sonst der maßgebende Punkt ggf. nicht aktiviert ist.

Ist der Button ***auto*** in der Kopfzeile des Programmfensters angeschaltet, werden die Berechnungsergebnisse permanent abgeglichen und online am Bildschirm dargestellt (s.a. **Schnittgrößen**).

Maximale Ausnutzung U_{max}= 0.322 ≤ 1 ok.

Schnittgrößen

das dritte Register beinhaltet die Maske zur Eingabe der Bemessungs-schnittgrößen



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

Es können bis zu 10.000 Schnittgrößenkombinationen eingegeben werden.

Beim Ermüdungsnachweis müssen mindestens 2 Kombinationen vorhanden sein.

Bemessungssituation: Grenzzustand der Ermüdung.

	N_{Ed} kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kNm	$M_{x,Ed}$ kNm	Bezeichnung
	-9.4	-145.6	135.7	2.7	2.3	-0.0	
	-3.3	-30.2	31.6	3.5	4.4	-0.0	

Sind Längssteifen an den Querschnitt angeschweißt, verschiebt sich die Träger-Schwerachse.

Es besteht daher die Möglichkeit, die Schnittgrößen entweder bezogen auf den unversteiften (relevant z.B. bei Übernahme der Schnittgrößen aus einem *4H*-Programm) oder auf den versteiften Querschnitt einzugeben.

Schnittgrößen in der Schwerachse des ⊙ **unversteiften** ○ versteiften **Querschnitts**

Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen, Fußpunkten und zum Nachweis von Sonderproblemen (Beulen, Ermüdung, Lasteinleitung) 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 *4H*- 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.

Nachweisergebnis

Ist der Button ***auto*** in der Kopfzeile des Programmfensters angeschaltet, werden die Berechnungsergebnisse permanent abgeglichen und online am Bildschirm dargestellt.

Maximale Ausnutzung U_{max}= 0.322 ≤ 1 ok.

Je nach Nachweisoptionen und Anzahl an Lastkollektiven kann die Berechnung und damit der Bildaufbau sehr lange dauern. **pcae** empfiehlt, den Button ***auto*** zunächst auszuschalten.

Schnittgrößenimport Ermüdungsnachweis

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 zugehörenden 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.

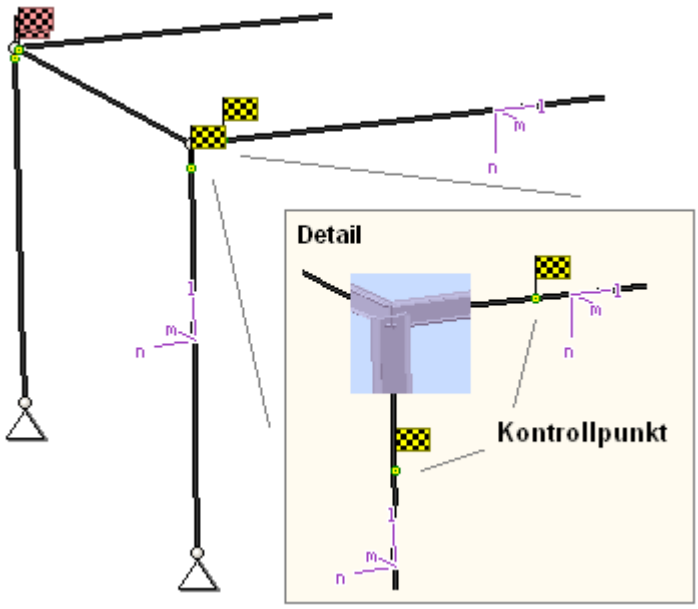
Zunächst sind im exportierenden *4H*-Programm (z.B. *4H*-FRAP) die Stellen zu kennzeichnen, deren Schnittgrößen beim nächsten Rechenlauf exportiert, d.h. für den Import bereitgestellt, werden sollen.

In diesem Beispiel sollen die Schnittgrößen für eine Querschnittsbemessung übergeben werden.

Dazu ist an der entsprechenden Stelle ein Kontrollpunkt zu setzen.

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

Nach einer Neuberechnung des Rahmens stehen die Exportschnittgrößen dem aufnehmenden *4H*-Programm (z.B. *4H*-BETON, *4H*-EC3SA, *4H*-EC3IH, *4H*-EC3BT, *4H*-EC3GT, *4H*-EC3IS) zum Import zur Verfügung.



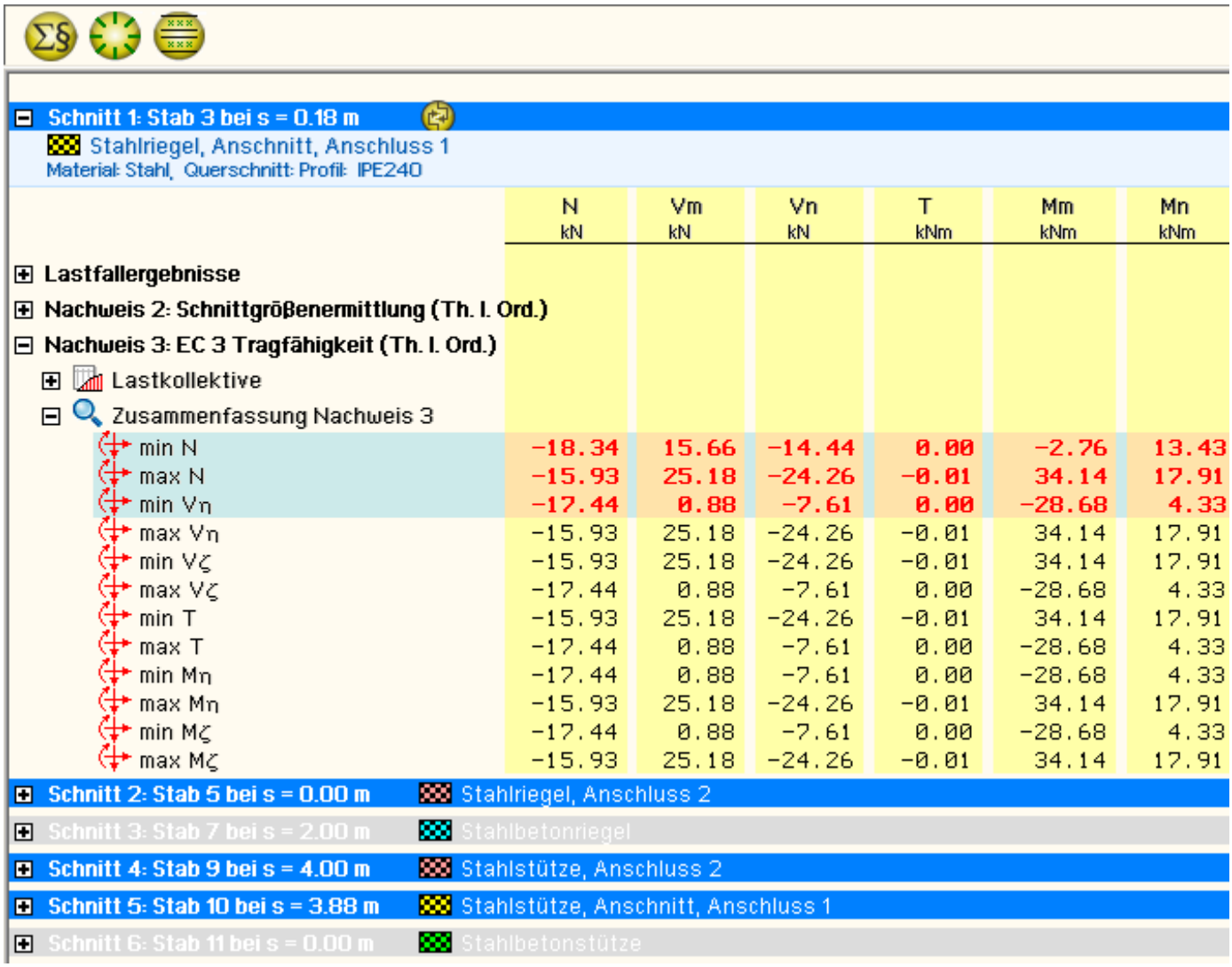
aus dem aufnehmenden *4H*-Programm wird nun über den ***Import***-Button das Fenster zur DTE®-**Bauteilauswahl** aufgerufen. Hier werden alle berechneten Bauteile dargestellt, wobei diejenigen, die Schnittgrößen exportiert haben, dunkel gekennzeichnet sind.

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.

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.



	N kN	Vm kN	Vn kN	T kNm	Mm kNm	Mn kNm
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 Vη	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Vη	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min Vζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
max Vζ	-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 Mη	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mη	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min Mζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91

In *4H*-EC3SA ist der komplette verfügbare Schnittgrößensatz importierbar. Die Programme *4H*-EC3BT, *4H*-EC3RE, *4H*-EC3IH und *4H*-EC3IS importieren dagegen nur einen auf ebene Beanspruchung reduzierten Satz, was jeweils durch gelbe Hinterlegung der Spalten angezeigt wird. Im Programm *4H*-EC3GT werden nur Normal- und Querkräfte erwartet. Im Programm *4H*-EC3IS werden nur Querkräfte erwartet.

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.

	N_{Ed} kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kNm	nur für o,D-Profile $M_{x,Ed}$ kNm	Bezeichnung
	-18.34	-2.76	-14.44	13.43	15.66	-0.00	min N
	-15.93	34.14	-24.26	17.91	25.18	-0.01	max N
	-17.44	-28.68	-7.61	4.33	0.88	0.00	min Vn

Wenn eine Reihe von Anschlüssen gleichartig ausgeführt 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!

Theorie Ermüdung EC 3-1-9

Allgemeines

Die Materialermüdung ist eine der grundlegenden Schadensursachen im Stahlbau.

Bei Tragwerken unter wiederkehrenden veränderlichen Einwirkungen können Schäden durch Rissbildung und Risswachstum entstehen, die im Laufe der Zeit zum Verlust des Bauteilwiderstands führen.

Ermüdungsrisse entstehen meist im Bereich von Spannungsspitzen an geometrischen Diskontinuitäten (Verarbeitungs-, Schweiß- oder Verbindungsdetails).

Eine wiederholte veränderliche Belastung, die weit unterhalb der statischen Traglast liegen kann, führt zu Spannungswechseln, die zum vorzeitigen Versagen führen können.

Die Anzahl der Spannungswechsel definiert die Lebensdauer eines Bauteils, die wiederum maßgeblich abhängig ist von

- der Spannungsschwingbreite, definiert als die Differenz der größten zur kleinsten Spannung an einer Stelle
- der Kerbwirkung, da Kerben (Diskontinuitäten) zu einer Störung des Kraftflusses innerhalb eines Bauteils und damit zu Spannungsspitzen führen
- den Werkstoffeigenschaften, da sich bei nicht geschweißten Bauteilen gezeigt hat, dass eine erhöhte Zugfestigkeit i.d.R. einen günstigen Einfluss auf die Lebensdauer hat

Bei der Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit wird anstelle der vorhandenen Spannungsschwingbreite, die auf Grund der regellosen Beanspruchung nur schwer abzuschätzen ist, auf Grundlage der Theorie der Schadensakkumulation eine äquivalente Spannungsschwingbreite berechnet, die bei einer bestimmten Anzahl von Spannungsschwingspielen und bei gegebener Ermüdungsfestigkeitskurve den gleichen Gesamtschaden D ergibt.

$$\Delta\sigma_E = \left(\frac{(1/D) \cdot \sum_{i=1}^{k} \Delta\sigma_i^m \cdot n_i^{1/m}}{N_{tot}} \right)$$

$\Delta\sigma_E$	äquivalente Spannungsschwingbreite
D	Gesamtwert der Schädigung
$\Delta\sigma_i$	Spannungsschwingbreite i
n_i	Anzahl des Auftretens der Spannungsschwingbreiten i
N_{tot}	Gesamtzahl der Spannungsschwingspiele
m	Steigung der Ermüdungsfestigkeitskurve
k	Anzahl der Spannungsschwingbreiten

Diese Spannungsschwingbreite wird nach dem Konzept des Schadensäquivalenzfaktors in eine ingenieurmäßig praktikablere Form gebracht, indem für einen festgelegten Bezugswert $N_{tot} = 2 \cdot 10^6$ sich infolge einer normierten Ermüdungslast mittels des Schadensäquivalenzfaktors λ ergibt

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$$

$\Delta\sigma_{E,2}$ äquivalente Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen
λ Schadensäquivalenzfaktor
$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$ Spannungsschwingbreite aus dem Ermüdungslastmodell infolge der normierten Ermüdungslast $\gamma_{Ff} \cdot Q_k$

Ermüdungslastmodell und Schadensäquivalenzfaktor sind in den zuständigen Normen geregelt. Im Folgenden wird sich auf EC 3-1-9, Ermüdung, und EC 3-6, Kranbahnen, bezogen (s. **Literatur**).

Die Ermittlung der Ermüdungslasten erfolgt über Ermüdungslastmodelle, die sich normalerweise von den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) und den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) unterscheiden.

Dementsprechend resultieren die verwendeten Schnittgrößenkombinationen aus dem Grenzzustand der Ermüdung (GZE), der entweder im EC 1, Einwirkungen, oder in speziellen Vorschriften (z.B. für Stahlbrücken EC 3-2, für Türme und Maste EC 3-3-1, für Schornsteine EC 3-3-2, für Silos EC 3-4-1, für Tankbauwerke EC 3-4-2, für Kranbahnen EC 3-6) bestimmt ist.

Für Kranbahnen ist kein separates Lastmodell definiert, es wird das statische Lastmodell mit den Ermüdungslasten nach EC 1-3, 2.12, verwendet.

Die ermüdungsrelevante Belastung setzt sich aus den vertikalen Eigengewichts- und Hublasten sowie den horizontalen Fahr- und Spurführungslasten zusammen.

Die schadensäquivalente Ermüdungslast aus der Kranbahn wird berechnet zu

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda \cdot Q_{max,i}$$

Q_e Ermüdungslast
φ_{fat} schadensäquivalenter dynamischer Faktor
$Q_{max,i}$ Maximalwert der charakteristischen vertikalen Radlast

Der schadensäquivalente dynamische Faktor kann angenommen werden zu

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1+\varphi_1}{2} \quad \text{... und ...} \quad \varphi_{fat,2} = \frac{1+\varphi_2}{2} \quad \text{... mit ...}$$

φ_1, φ_2 aus EC 1-3, Tab. 2.4

In Abhängigkeit der Gesamtzahl von Arbeitsspielen und der Lastkollektivklasse können die Ermüdungseinwirkungen von Kranen mit Hilfe von EC 1-3, Tab. 2.11, in Klassen S0 bis S9 eingeteilt werden.

Für diese Kranklassen lassen sich die schadensäquivalenten Beiwerte λ aus EC 1-3, Tab. 2.12, ablesen.

Klassen	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Normalspg.	0.198	0.250	0.315	0.397	0.500	0.630	0.794	1.00	1.260	1.587
Schubspg.	0.379	0.436	0.500	0.575	0.660	0.758	0.871	1.00	1.149	1.320

Werden mehrere Krane eingesetzt, ist nach EC 3-6, 9.4.2, die Summe der Schädigungsanteile der unabhängig wirkenden Einzelkrane mit der Summe der zeitweise gemeinsam wirkenden Krane zu addieren.

$$\sum_i D_i + D_{dup} \leq 1$$

D_i Schädigung infolge eines einzelnen unabhängig wirkenden Krans i
D_{dup} zusätzliche Schädigung infolge der Kombination von zwei oder mehr Kranen, die zeitweise zusammenwirken

Bemessungskonzept

Der Ermüdungsnachweis ist entweder nach dem Konzept der *Schadenstoleranz* oder dem Konzept der ausreichenden *Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung* durchzuführen.

Die geforderte Zuverlässigkeit kann durch Festlegung des Materialsicherheitsbeiwerts erreicht werden (s. EC 3-1-9, Tab. 3.1).

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1.00	1.15
Sicherheit gg. Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1.15	1.35

Beanspruchungen

Für den Ermüdungsnachweis können die Spannungen als Nennspannungen bzw. korrigierte Nennspannungen oder als Strukturspannungen ermittelt werden.

Die Bestimmung der Nennspannungen beruht auf dem elastischen Verhalten von Bauteilen. Sie werden auf Gebrauchsniveau an der Stelle der potentiellen Rissentstehung berechnet.

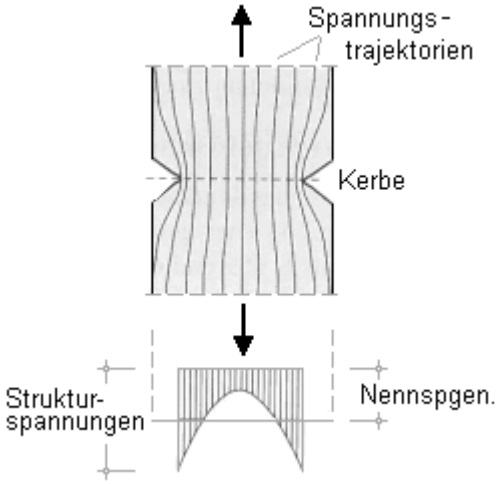
Die Spannungsschwingbreite der Nennspannungen wird bestimmt mit

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$$

Um außerplanmäßige Spannungserhöhungen zu erfassen, wie sie z.B. bei abrupten Querschnittsänderungen in Nähe der Rissentstehung auftreten, werden korrigierte Nennspannungen verwendet.

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$$

k_f Spannungskonzentrationsfaktor zur Berücksichtigung der lokalen Spannungserhöhung in Bezug auf die Kerbfallsituation der Bezugs-Wöhlerlinie



Strukturspannungen sind realitätsnahe Kerbspannungen, die z.B. bei voll durchgeschweißten Stumpfnähten oder an Nahtübergängen von unbelasteten Kehlnähten zum Tragen kommen.

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_f(\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2})$$

Spannungskonzentrationsfaktoren (Kerbfaktoren) können der Literatur entnommen werden.

Ermüdungsnachweis

Das Nennspannungskonzept wird verwendet.

Die Spannungsschwingbreiten werden im GZE, d.h. nach EC 3-1-9, 8(1), infolge der häufig auftretenden Lasten, ermittelt.

Die Spannungen werden je nach Kerbrichtung unterschieden in globale Längs- und Schubspannungen σ_x und τ_{xz} aus globaler Tragwirkung und lokale Längs- und Schubspannungen σ_{oz} und τ_o am Obergurt bzw. σ_{uz} und τ_u am Untergurt z.B. aus der Kranbahn.

Die Spannungsdifferenzen werden für die globale Tragwirkung gebildet mit

$$\Delta\sigma_{x,global} = \sigma_{x,max} - \sigma_{x,min} \quad \text{... und ...} \quad \Delta\tau_{global} = \tau_{xz,max} - \tau_{xz,min}$$

$\sigma_{x,max}, \tau_{xz,max}$ Oberspannung aus Biegung mit/ohne Normalkraft, Querkraft mit/ohne Torsion
$\sigma_{x,min}, \tau_{xz,min}$ Unterspannung ...

und für die lokale Tragwirkung (s. **Kranbahn**) mit

$$\Delta\sigma_{z,lokal} = \sigma_{oz} \pm \sigma_T \quad \text{... und ...} \quad \Delta\tau_{lokal} = 2 \cdot \tau_o \quad \text{... bzw. ...} \quad \Delta\sigma_{z,lokal} = \sigma_{uz} \quad \text{... und ...} \quad \Delta\tau_{lokal} = 2 \cdot \tau_u$$

σ_{oz}, τ_o Normal- u. Schubspannung aus Kranbahn am Obergurt
σ_{uz}, τ_u ... am Untergurt
σ_T Stegbiegespannung aus exzentrischer Lasteinleitung

Bei nicht geschweißten oder geschweißten, spannungsarm geglühten Konstruktionen darf der Mittelspannungseinfluss bei Normalspannungen aus globaler Tragwirkung berücksichtigt werden, indem der Druckanteil der Spannungsschwingbreite auf 60 % reduziert wird.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad \text{... wenn } \sigma_{min} \geq 0$$
$$\Delta\sigma = 0.6 \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad \text{... wenn } \sigma_{max} \leq 0$$
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - 0.6 \cdot \sigma_{min} \quad \text{... sonst}$$

Werden die Spannungsschwingbreiten nur aus veränderlichen Lasten ermittelt, darf der Mittelspannungseinfluss nicht berücksichtigt werden.

Die Spannungen sind zu begrenzen auf

$\Delta\sigma \le 1.5 \cdot f_y$ für Längsspannungen
$\Delta\tau \le 1.5 \cdot f_y / \sqrt{3}$ für Schubspannungen

Die Ermüdungsnachweise sind zu führen mit

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \le 1.0 \quad \text{... und ...} \quad \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \le 1.0$$

$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen für Normal- bzw. Schubspannungen
γ_{Ff} Last-Sicherheitsbeiwert für Nachweise im GZE, i.A. $\gamma_{Ff} = 1.0$
γ_{Mf} Material-Sicherheitsbeiwert für Nachweise im GZE

Bei gleichzeitiger Wirkung von $\Delta\sigma_{E,2}$ und $\Delta\tau_{E,2}$ gilt die Interaktionsbeziehung

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \le 1.0$$

Jedoch darf der Einfluss der Schubspannungen vernachlässigt werden, wenn gilt

$$\Delta\tau \le 0.15 \cdot \Delta\sigma$$

Bei einem n_R-achsigen Kran wird der Steg während einer Kranüberfahrt infolge n_R Radlasten lokal durch n_R Spannungszyklen beansprucht. Deren gemeinsame Wirkung ist durch die Summe der Einzelschädigungen zu berücksichtigen.

$$n_R \cdot \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{z,lokal,E,2}}{\Delta\sigma_{z,C} / \gamma_{Mf}}\right)^3 \le 1.0 \quad \text{... bzw. ...} \quad n_R \cdot \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{lokal,E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \le 1.0$$

n_R Anzahl der Kranachsen

Es kann gezeigt werden, dass eine Vervielfachung der Spannungsspiele durch eine Erhöhung der Beanspruchungsgruppe um $n_R/2$ kompensiert werden kann.

Bei einem zweiachsigen Kran wird daher beispielsweise die Beanspruchungsgruppe S_i erhöht auf S_{i+1}.

Außerdem ist die Kerbwirkung zu beachten, d.h. in welcher Richtung der zu erwartende Riss verläuft.

Z.B. erzeugen die lokalen Spannungen aus einer Kranbahn senkrecht verlaufende Risse, während aus den globalen Spannungen am Träger waagerechte Risse resultieren.

Daher sind an einigen Kerbpunkten Spannungsdifferenzen beider Normalspannungen zu berücksichtigen.

Unter dieser Voraussetzung kann **pcae** der Interaktionsbeziehung von Seeßelberg (s. **Literatur**) folgen mit

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{x,E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{z,E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \le 1.0$$

Alternativ schlagen Nussbaumer/Günther ohne Erhöhung der Beanspruchungsgruppe (s. Literatur) vor

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{x,E,2}}{\Delta\sigma_{x,C} / \gamma_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 + n_R \cdot \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{z,lokal,E,2}}{\Delta\sigma_{z,C} / \gamma_{Mf}}\right)^3 + n_R \cdot \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{lokal,E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}}\right)^5 \le 1.0$$

Kerbfalltabellen

In den Tabellen 8.1 bis 8.10 des EC 3-1-9 werden die Ermüdungsfestigkeiten für wesentliche typisierte Kerbfälle angegeben. Die Bezeichnung der Kerbfälle richtet sich nach deren maximaler Ermüdungsfestigkeit.

Im Programm 4*H*-EC3EM werden folgende Kerbfälle verwendet

Tab. 8.1 160, 125, 100 und 90
Tab. 8.2 100
Tab. 8.4 80, 71, 56, 80 und 71
Tab. 8.5 80, 71, 63, 56, 50, 45, 40, 56*, 50, 45, 40, 36 und 80
Tab. 8.10 160, 71 und 36*

Beispiel

Für einen längsversteiften Kranbahnträger (HEA360, eine

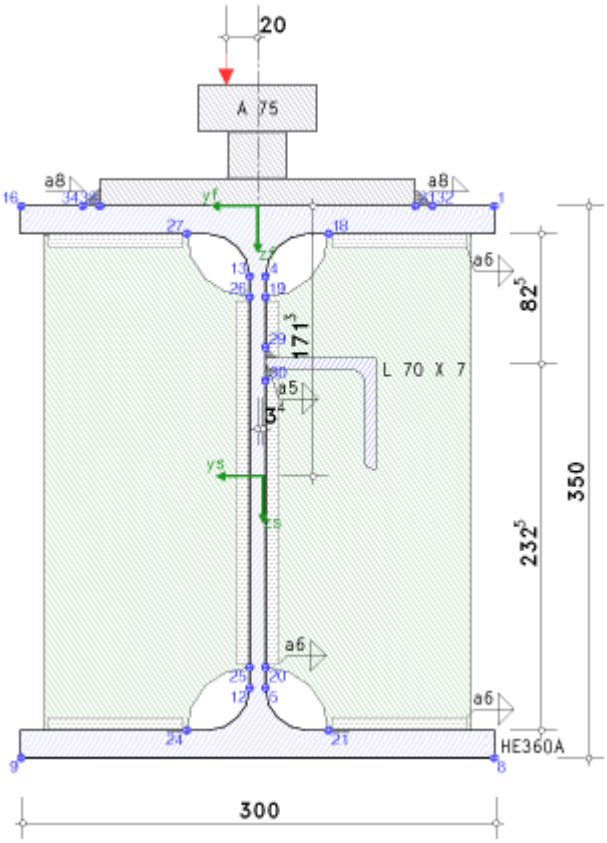
Steife L 70x7, Stahlgüte S 235) wird im Bereich des Mittelauflagers (Quersteife 130x7, Abstand a = 3.0 m) der Ermüdungsnachweis an den maßgebenden Kerbpunkten geführt.

Die Kranbahn (Kranklasse S3) läuft auf einer Schiene A 75, die schubfest an den Träger angeschweißt ist.

Die Last wird exzentrisch eingeleitet.

Die relevanten Kerbpunkte des Trägerprofils sind seine äußeren Ecken (Pkte. 1, 8, 9, 16) und die Ausrundungen am Steg (Pkte. 4, 5, 12, 13).

Weitere Kerbpunkte ergeben sich infolge der Schweißnähte der Quersteife (Pkte. 18, 21, 24, 27 an den Flanschen, Pkte. 19, 20, 25, 26 am Steg), der Längssteife (Pkte. 29, 30) sowie durch die Befestigung der Kranbahnschiene am Trägerflansch (Pkte. 31, 32, 33, 34).



Bei normenkonformer Berechnung sind für die zulässigen Kerbspannungen $\Delta\sigma_{Rd}$, $\Delta\tau_{Rd}$ die zuständigen Abschnitte des EC 3-1-9 angegeben.

Pkt	y_f mm	z_f mm	$\Delta\sigma_{x,Rd}$ N/mm²	$\Delta\tau_{Rd}$ N/mm²	$\Delta\sigma_{z,Rd}$ N/mm²	Kerbpunkt	EC 3-1-9, Tab.
1	-150.0	0.0	160.0	0.0	0.0	am Obergurt	8.1(2)
4	-5.0	44.5	160.0	100.0	160.0	am Trägersteg	8.1(2) 8.1(6) 8.10(1)
5	-5.0	305.5	160.0	100.0	0.0	am Trägersteg	8.1(2) 8.1(6)
8	-150.0	350.0	160.0	0.0	0.0	am Untergurt	8.1(2)
9	150.0	350.0	160.0	0.0	0.0	am Untergurt	8.1(2)
12	5.0	305.5	160.0	100.0	0.0	am Trägersteg	8.1(2) 8.1(6)
13	5.0	44.5	160.0	100.0	160.0	am Trägersteg	8.1(2) 8.1(6) 8.10(1)
16	150.0	0.0	160.0	0.0	0.0	am Obergurt	8.1(2)
18	-45.0	17.5	80.0	0.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7)
19	-5.0	57.5	80.0	100.0	100.0	infolge Quersteife	8.4(7) 8.1(6) 8.2(7)
20	-5.0	292.5	80.0	100.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7) 8.1(6)
21	-45.0	332.5	80.0	0.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7)
24	45.0	332.5	80.0	0.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7)
25	5.0	292.5	80.0	100.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7) 8.1(6)
26	5.0	57.5	80.0	100.0	100.0	infolge Quersteife	8.4(7) 8.1(6) 8.2(7)
27	45.0	17.5	80.0	0.0	0.0	infolge Quersteife	8.4(7)
29	-5.0	89.4	56.0	100.0	0.0	infolge Längssteife	8.4(1) 8.1(6)
30	-5.0	110.6	56.0	100.0	0.0	infolge Längssteife	8.4(1) 8.1(6)
* 31	-100.0	0.0	36.0	80.0	0.0	infolge Kranbahn	8.5(3) 8.5(8)
32	-107.0	0.0	100.0	0.0	0.0	infolge Kranbahn	8.2(7)
* 33	100.0	0.0	36.0	80.0	0.0	infolge Kranbahn	8.5(3) 8.5(8)
34	107.0	0.0	100.0	0.0	0.0	infolge Kranbahn	8.2(7)

*) Nachweis der Schweißnaht

Für die mit * gekennzeichneten Kerbpunkte sind die Spannungen bezogen auf die Schweißnähte (z.B. wegen eines Wurzelrisses) zu ermitteln; alle anderen Kerbpunktspannungen beziehen sich auf das Trägerprofil.

Die Schadensäquivalenzfaktoren werden für die Kranklassen S3 (vorgegeben) und S4 (Erhöhung wegen zweier Überfahrten) angegeben mit

Kranklasse S3: $\lambda_\sigma = 0.397$, $\lambda_\tau = 0.575$
S4: $\lambda_{\sigma+} = 0.500$, $\lambda_{\tau+} = 0.660$

Das Sicherheitsniveau liegt für das Bemessungskonzept der Schadenstoleranz bei hoher Schadensfolge bei $\gamma_{Mf} = 1.15$.

Zunächst werden die Querschnittswerte für die lineare Spannungsberechnung bereitgestellt.

Querschnittswerte
$A = 152.20\ cm^2$, $z_s = 171.3$ mm, $I_y = 33439.16\ cm^4$, $y_s = 3.4$ mm, $I_z = 8198.64\ cm^4$

Die wirksame Lasteinleitungslänge und die lokalen Spannungen aus der Kranbahn werden berechnet (**Kranbahn**).

wirksame Lasteinleitungslänge aus der Kranbahn
effektive Breite $b_{eff} = b_r + h_r + t_{fo} = 294.5$ mm $\leq b_{fo}$
Trägheitsmoment Schiene mit Trägerflansch $I_{rf} = 1059.39\ cm^4$
effektive Länge $l_{eff} = 3.25 \cdot (I_{rf}/t_w)^{1/3} = 331.3$ mm

lokale Spannungen aus der Kranbahn
wirksame Lasteinleitungslänge bezogen ...
... auf die Flanschaußenkante $s_s = l_{eff} - 2 \cdot t_f = 296.3$ mm / ... auf den Steg $s_w = l_{eff} + 2 \cdot r = 385.3$ mm
lokale Spannungen ...
... an der Schiene $\sigma_{oz} = -27.0\ N/mm^2$, $\tau_o = 5.4\ N/mm^2$
... am Trägersteg $\sigma_{oz} = -20.8\ N/mm^2$, $\tau_o = 4.2\ N/mm^2$

Stegbiegespannung
$M_{T,Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y = 1.60$ kNm $\Rightarrow$ $\sigma_T = (6 \cdot M_{T,Ed})/(a \cdot t_w^2) \cdot \eta \cdot \tanh(\eta) = 36.7\ N/mm^2$
mit $\eta = ((0.75 \cdot a \cdot t_w^3)/I_t \cdot \sinh^2(\pi \cdot h_w/a)/(\sinh^2(2 \cdot \pi \cdot h_w/a) - 2 \cdot \pi \cdot h_w/a))^{0.5} = 1.323$, $I_t = 296.59\ cm^4$

Zur Ermittlung der globalen Spannungen sind ggf. die Biegemomente auf den versteiften Querschnitt zu beziehen.
An jedem aktiven Kerbpunkt werden die Normal- und Schubspannungen σ_x und τ_{xz} aller Lastkollektive (s. **Schnittgrößen**) berechnet.
Mit den lokalen Spannungen σ_{oz}, τ_o und σ_T (s.o.) ergeben sich die Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{x,Ed}$, $\Delta\tau_{Ed}$, $\Delta\sigma_{z,Ed}$.

Im Folgenden wird der Berechnungsablauf exemplarisch für zwei Lastkollektive im Kerbpunkt 26 (Quersteife am Steg oben) gezeigt.

Da sich die eingegebenen Schnittgrößen im GZE auf den unversteiften Querschnitt beziehen, sind die Biegemomente zu transformieren.

Biegemomente bezogen auf den versteiften Querschnitt
$M_{y,Ed}' = M_{y,Ed} - N_{Ed} \cdot \Delta z_s$ ($\Delta z_s = -3.7$ mm), $M_{z,Ed}' = M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot \Delta y_s$ ($\Delta y_s = -3.4$ mm)
Lk 1: $M_{y,Ed}' = -30.2$ kNm $M_{z,Ed}' = 3.5$ kNm
Lk 2: $M_{y,Ed}' = -145.8$ kNm $M_{z,Ed}' = -1.3$ kNm

Die Spannungsschwingbreiten ergeben sich damit zu

elastische Spannungen / Spannungsschwingbreiten
$\Delta\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,max} - \sigma_{x,min}$, $\tau_{Ed} = \tau_{xz,max} - \tau_{xz,min} + 2 \cdot \tau_o$, $\Delta\sigma_{z,Ed} = -\sigma_{oz} \pm \sigma_T$
Pkt. 26: $y_f = 5.0$ mm, $z_f = 57.5$ mm Lk 1: $\sigma_x = 10.0\ N/mm^2$ $\tau_{xz} = 9.0\ N/mm^2$
2: $\sigma_x = 49.1\ N/mm^2$ $\tau_{xz} = 39.1\ N/mm^2$
$\Delta\sigma_{x,Ed} = 39.0\ N/mm^2$ $\Delta\tau_{Ed} = 38.4\ N/mm^2$ $\Delta\sigma_{z,Ed} = 57.5\ N/mm^2$

mit

$$\Delta\sigma_{x,Ed} = 49.1 - 10.0 \approx 39.0\ N/mm^2$$
$$\Delta\tau_{Ed} = (39.1 - 9.0) + 2 \cdot 4.2 \approx 38.4\ N/mm^2$$
$$\Delta\sigma_{z,Ed} = -(-20.8) + 36.7 = 57.5\ N/mm^2$$

Mit den entsprechenden Schadensäquivalenzfaktoren für Normal- und Schubspannung ergeben sich die Spannungsschwingbreiten infolge Ermüdung zu

Spannungsschwingbreiten infolge Ermüdung
$\Delta\sigma_{x,f} = \Delta\sigma_{x,Ed} \cdot \lambda_\sigma$, $\Delta\tau_f = \Delta\tau_{Ed} \cdot \lambda_\tau$, $\Delta\sigma_{z,f} = \Delta\sigma_{z,Ed} \cdot \lambda_\sigma$
Pkt. 26: $y_f = 5.0$ mm, $z_f = 57.5$ mm ($\lambda_{\sigma\tau+}$) $\Delta\sigma_{x,f} = 15.5\ N/mm^2$ $\Delta\tau_f = 25.3\ N/mm^2$ $\Delta\sigma_{z,f} = 28.7\ N/mm^2$

wobei an diesem Kerbpunkt die Schadensäquivalenzfaktoren für die höhere Kranklasse ($\lambda_{\tau\sigma z+}$) zu verwenden sind.
Mit den zulässigen Kerbspannungen kann der Ermüdungsnachweis geführt werden.

zul. Kerbspannungen

$\Delta\sigma_{x,Rd,f} = \Delta\sigma_{x,Rd}/\gamma_{Mf}$, $\Delta\tau_{Rd,f} = \Delta\tau_{Rd}/\gamma_{Mf}$, $\Delta\sigma_{z,Rd,f} = \Delta\sigma_{z,Rd}/\gamma_{Mf}$

Pkt. 26: $y_f = 5.0$ mm, $z_f = 57.5$ mm $\quad \Delta\sigma_{x,Rd,f} = 69.6$ N/mm² $\quad \Delta\tau_{Rd,f} = 87.0$ N/mm² $\quad \Delta\sigma_{z,Rd,f} = 87.0$ N/mm²

Nachweis der Kerbspannungen

Pkt. 26: $y = 5.0$ mm, $z = 57.5$ mm

$\Delta\sigma_{x,f} = 15.5$ N/mm² < $\Delta\sigma_{x,Rd,f} = 69.6$ N/mm² $\Rightarrow U_{\Delta\sigma x} = 0.223$ ok.

$\Delta\tau_f = 25.3$ N/mm² < $\Delta\tau_{Rd,f} = 87.0$ N/mm² $\Rightarrow U_{\Delta\tau} = 0.291$ ok.

$\Delta\sigma_{z,f} = 28.7$ N/mm² < $\Delta\sigma_{z,Rd,f} = 87.0$ N/mm² $\Rightarrow U_{\Delta\sigma z} = 0.331$ ok.

Interaktion $U_i = U_{\Delta\sigma x}^3 + U_{\Delta\sigma z}^3 + U_{\Delta\tau}^5 = 0.049 < 1$ ok.

Neben den Nachweisen der einzelnen Spannungsschwingbreiten ist das Zusammenwirken von Normal- und Schubspannungen mittels Interaktion sicherzustellen, da

$$\Delta\tau_{Ed} = 38.4\ \text{N/mm}^2 > 5.9\ \text{N/mm}^2 = 0.15 \cdot \Delta\sigma_{Ed}$$

Im Endergebnis werden die maximale Ausnutzung max U sowie der maßgebende Kerbpunkt ausgegeben.

Endergebnis

Ermüdungsnachweis [Pkt. 33]: max U = 0.804 < 1 ok.

Nachweise erbracht

Kranbahn

Eine Kranbahn kann am Ober- oder Untergurt des Trägers laufen.

Kranbahn am Obergut

Verläuft die Kranbahn am Obergurt, wird der Träger durch das Rad einer Kranbahnachse belastet, das andere Rad der Achse fährt auf einem zweiten Träger.

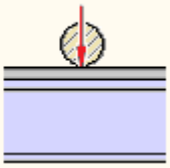
Das Rad läuft auf einer Schiene, die zentrisch über dem Trägersteg angeordnet ist. Dadurch wird die Kranbahnlast möglichst günstig in die Unterkonstruktion geleitet.

Für die lokalen Nachweise der Lasteinleitung, der Ermüdung und des Beulens sind die lokalen Spannungen aus der Radlast der Kranbahn zu berechnen.

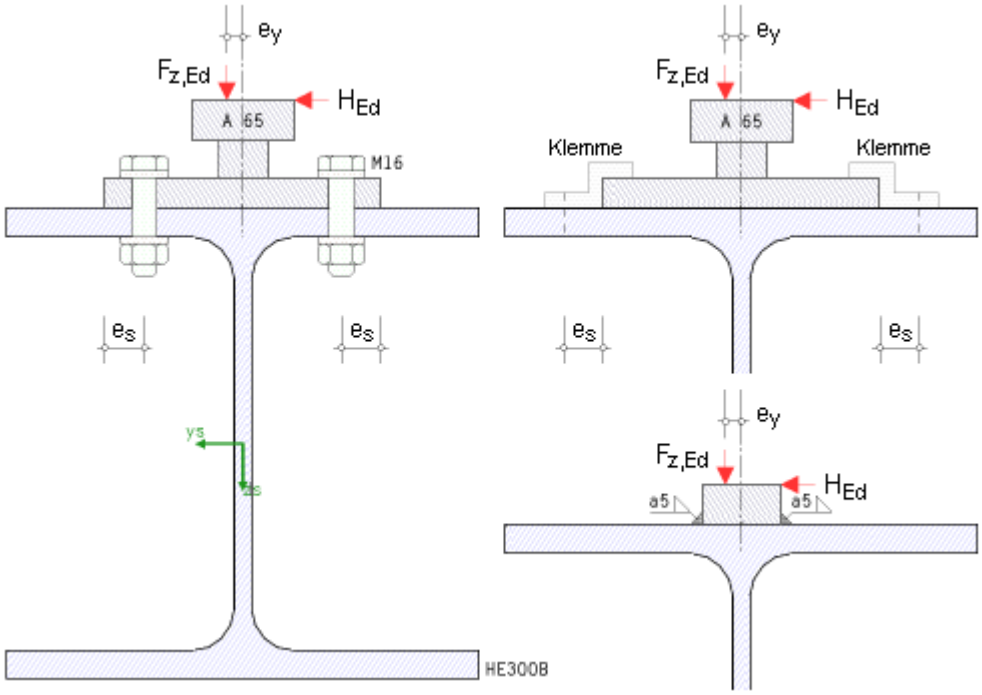
Die Radlast setzt sich zusammen aus einer ggf. exzentrisch zur Trägerachse z wirkenden Druckkraft $F_{z,Ed}$ sowie einer am Schienenkopf angreifende Horizontallast H_{Ed}.

Belastung aus der Kranbahn

Radlast am Obergurt	$F_{z,Ed}$	80.00	kN
Exzentrizität	e_y	20.00	mm
seitliche Horizontallast	H_{Ed}	17.50	kN



Bei exzentrischen Querlasten sind stets Quersteifen im Steg anzuordnen!



In **pcae**-Programmen werden die Schienentypen *Flachstahl*, *Form A* und *Form F* unterstützt.

Die zur Berechnung erforderlichen Parameter werden aus den Abmessungen des Typs *Flachstahl* berechnet bzw. sind für die Typen *Form A* und *Form F* hinterlegt.

Über den Typ *Sonderform* können die Berechnungsparameter vom Anwender vorgegeben werden.

Schiene	Typ	Form A	65	
Fußbreite	b_f	175.0	mm	
Höhe (abgenutzt)	h'	68.0	mm	
Fläche (abgenutzt)	A'	5060.0	cm²	
Trägheitsmoment (abgenutzt)	I'_y	2410000.0	cm⁴	

Die Verbindung der Schiene mit dem Träger kann schubfest oder schwimmend erfolgen. Bei einer schubfesten Verbindung darf der (abgenutzte) Schienenquerschnitt dem Trägerquerschnitt zugeordnet werden.

Verbindung der Schiene mit dem Träger

- ○ schubfest
- ◉ schwimmend

Eine schubfeste Verbindung kann durch Schweißnähte oder HV-Schrauben erfolgen.

Bei einer Verbindung mit Schweißnähten sind die Schweißnahtdicke und je nach Ausführung (durchlaufend oder unterbrochen mit gegenüberliegender oder versetzter Nahtanordnung) die Abschnittslänge der Naht anzugeben.

- ◉ Verbindung mit Schweißnähten
  - Schweißnahtdicke a_w 5.0 mm
  - ○ durchlaufende Nähte
  - ◉ unterbrochene Nähte
    - Abschnittslänge l_w 60.0 mm
    - ◉ gegenüberliegende Anordnung
    - ○ versetzte Anordnung

HV-Schrauben haben die Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 und können nur an die breitfüßige Schiene *Form A* (ggf. *Sonderform*) angebracht werden. Hier ist der Abstand der Schrauben vom seitlichen Rand des Schienenfußes anzugeben.

Verbindung mit HV-Schrauben nur Schiene Form A bzw. Sonderform

Schraubengröße	16	☐ Vorgabe
Festigkeitsklasse	8.8	☐ Vorgabe
Abstand einer Schraube e_s vom Schienenfußrand	25.0 mm	

Eine schwimmende Verbindung kann über Klemmen hergestellt werden, wobei eine Klemmplatte den Schienenfuß am Trägergurt fixiert.

Eine elastische Schienenunterlage kann vorgesehen werden, die die Lasteinleitungsbreite der Radlasten erheblich reduziert.

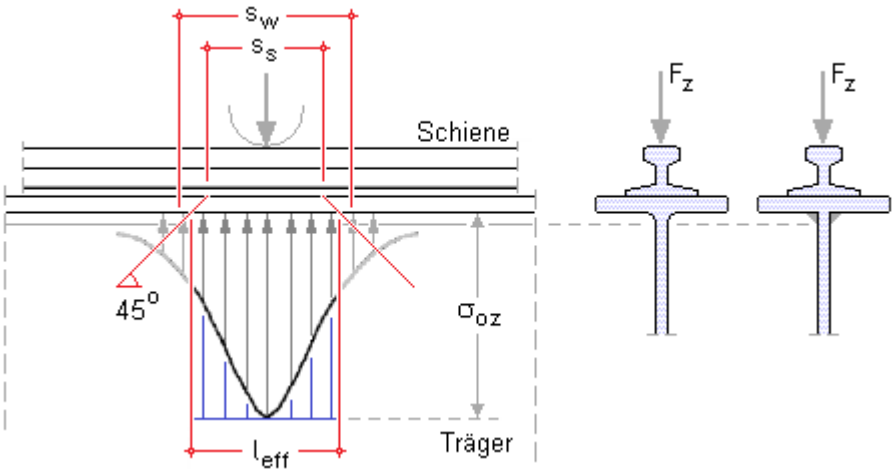
Verbindung mit Klemmen nur Schiene Form A, F bzw. Sonderform

☐ elastische Schienenunterlage

Alternativ kann die schwimmende Verbindung mit Kehlnähten ausgeführt sein.

Verbindung mit Kehlnähten

Berechnung der effektiven Lastausbreitungslänge



Die Lasteinleitung eines Kranbahnrads am Obergurt darf im Bereich der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} als gleichmäßig verteilt angenommen werden.

Bezogen auf die Unterkante des oberen Trägerflanschs wird entspr. DIN EN 1993-6, Tab. 5.1, berechnet.

$l_{eff} = 3.25 \cdot (l_{rf}/t_w)^{1/3}$ ..... Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt

$l_{eff} = 3.25 \cdot ((l_r + l_{f,eff})/t_w)^{1/3}$ Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt

$l_{eff} = 4.25 \cdot ((l_r + l_{f,eff})/t_w)^{1/3}$ Kranschiene auf einer mind. 6 mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage

$l_{f,eff}$ Flächenmoment 2. Grades um die horizontale Schwerlinie des Flanschs mit der effektiven Breite b_{eff}

l_r Flächenmoment 2. Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene

l_{rf} Flächenmoment 2. Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschl. Schiene und Flansch mit der effektiven Breite b_{eff}

t_w Stegdicke

$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ ... aber ... $b_{eff} \leq b$

b Gesamtbreite Obergurt

b_{fr} Breite Schienenfuß

h_r Schienenhöhe

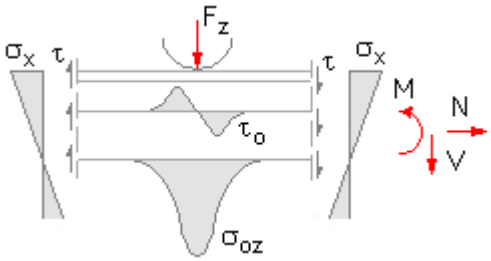
t_f Flanschdicke

lokale Spannungen

Die Kranbahnlast wird über die Schiene in den Träger geleitet.

Bei aufgeschweißter Schiene wird davon ausgegangen, dass die Last nur über die Schweißnähte in den Träger übertragen wird.

Lokale Spannungen sind daher sowohl in der Wurzel der Schienennaht an der Flanschaußenkante des Trägers als auch im Trägersteg am Übergang zur Ausrundung (gewalztes Profil) oder Schweißnaht (geschweißter Blechträger) zu ermitteln.



im Trägersteg ..... $\sigma_{oz} = \dfrac{F_{z,Ed}}{s_w \cdot t_w}$ ... und ... $\tau_o = 0.2 \cdot \sigma_{oz}$ ... mit ... $s_w = l_{eff} + 2 \cdot r$ ... oder ... $l_{eff} + 2 \cdot a_w \cdot \sqrt{2}$

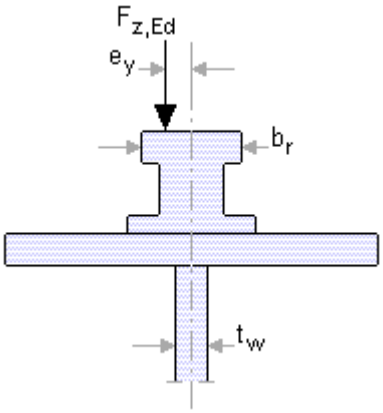
in der Schienennaht $\sigma_{oz} = \dfrac{F_{z,Ed}}{2 \cdot s_s \cdot a_w}$ ... und ... $\tau_o = 0.2 \cdot \sigma_{oz}$ ... mit ... $s_s = l_{eff} - 2 \cdot t_{fo}$

exzentrische Lasteinleitung

I.A. ist eine Exzentrizität der Radlast am Schienenkopf nicht auszuschließen, die zu einer Stegbiegung im Bereich des Obergurts führt.

Die Exzentrizität braucht allerdings nur bei Kranklassen S3 bis S9 berücksichtigt zu werden (s. EC 3-6, 9.3.3(1)).

Nach EC 1-3 sollte die Exzentrizität als Bruchteil der Schienenkopfbreite (s. EC 1-3, 2.5.2.1(2): $e_y = 0.25 \cdot b_r$) angenommen werden.



Bei quer ausgesteiftem Träger wird die Stegbiegespannung berechnet mit

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot \tanh(\eta) \quad \text{... mit ...} \quad \eta = \left(\frac{0.75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\eta \cdot h_w / a)}{\sinh(2 \cdot \eta \cdot h_w / a) - 2 \cdot \pi \cdot h_w / a} \right)^{0.5}$$

a	Abstand der Quersteifen im Steg
h_w	Gesamthöhe des Stegs als lichter Abstand zwischen den Flanschen
I_t	Torsionsträgheitsmoment des Flanschs (einschl. Schiene, falls schubstarr fest)
$T_{Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y$	Torsionsmoment aus exzentrischer Radlast
e_y	Exzentrizität e der Radlast, wobei $e_y \geq 0.5 \cdot t_w$
t_w	Stegblechdicke

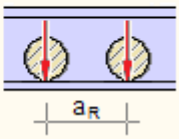
Kranbahn am Untergurt

Eine Kranbahn kann auch am Untergurt angebracht sein. Im Gegensatz zur Obergurtbahn hängt sie normalerweise mit beiden Rädern an einem Träger, wobei die Räder links und rechts direkt auf dem unteren Flansch laufen.

Der Abstand der Räder vom seitlichen Flanschrand und der Abstand zwischen den Radachsen sind anzugeben.

Belastung aus der Kranbahn

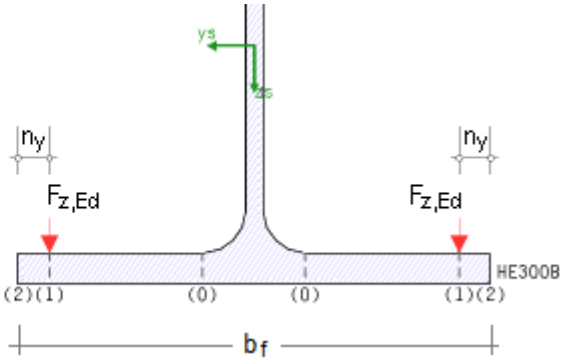
Radlast am Untergurt	$F_{z,Ed}$	10.00	kN	je Seite
Abstand der Räder vom seitlichen Flanschrand	n_y	20.0	mm	
Abstand der Radachsen	a_R	100.0	cm	



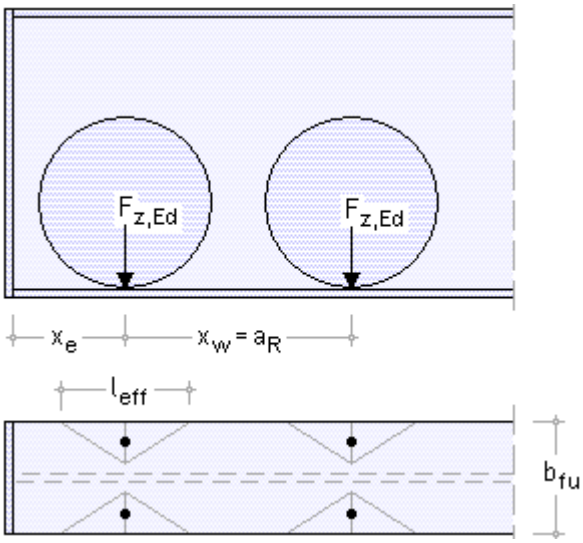
Bei der Unterflanschkranbahn bleibt eine ggf. auftretende Horizontallast bei den lokalen Nachweisen unberücksichtigt. Um die wirksame Lasteinleitungslänge zu berechnen, ist der Nachweisort anzugeben.

Nachweisort

- ○ Rad außerhalb der Trägerendbereiche
- ○ Rad am Trägerende (ungestützter Unterflansch)
- ◉ Rad am Trägerende (gestützter Unterflansch)
  - Abstand des Rads vom Trägerende x_e 40.0 cm
- ○ Rad am Trägerende (Prellbock)



wirksame Lasteinleitungslänge



In Abhängigkeit vom Nachweisort wird die effektive Lasteinleitungslänge auf dem Untergurt berechnet mit
(DIN EN 1993-6, Tab. 6.2)

Rad an einem ungestützen Flanschende

$2\cdot(m+n)$

Rad außerhalb der Trägerendbereiche

$4\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)$ ..... für ... $x_w \geq 4\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)$

$2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+0.5:x_w$ ... für ... $x_w < 4\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)$

Rad in einem Abstand $x_e \leq 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)$ von einem Prellbock, am Trägerende

$2\cdot(m+n)\cdot\left(x_e/m+\sqrt{1+(x_e/m)^2}\right)$ ... aber ... $\leq \sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e$ ... für ... $x_w \geq 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e$

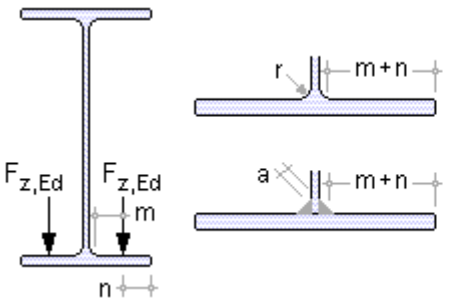
$2\cdot(m+n)\cdot\left(x_e/m+\sqrt{1+(x_e/m)^2}\right)$ ... aber ... $\leq \sqrt{2}\cdot(m+n)+0.5:(x_w+x_e)$ ... für ... $x_w < 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e$

Rad in einem Abstand $x_e \leq 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)$ am gestützten Flanschende, das entweder unten oder durch ein angeschweißte Stirnplatte gelagert ist

$2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e+2\cdot(m+n)^2/x_e$ ..... für ... $x_w \geq 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e+2\cdot(m+n)^2/x_e$

$\sqrt{2}\cdot(m+n)+0.5\cdot(x_w+x_e)+(m+n)^2/x_e$ ... für ... $x_w < 2\cdot\sqrt{2}\cdot(m+n)+x_e+2\cdot(m+n)^2/x_e$

wobei gilt



x_e Abstand vom Trägerende bzw. von der Stützung am Trägerende zur Schwerlinie des Rads

$x_w = a_R$ Abstand der Räder voneinander

m Abstand von der Schwerlinie des Rads zum Steg abzgl. 80% des Ausrundungsradius' bzw. Schweißnahtschenkels

$n = n_y$ Abstand von der Schwerlinie des Rads zum seitlichen Flanschrand

lokale Spannungen

Die Biegespannungen, die durch eine Untergurtbahn erzeugt werden, sind an den bezeichneten Stellen (0 = Übergang von Steg zum Flansch), (1 = Schwerlinie der Lasteinleitung) und (2 = äußere Flanschkante) zu berücksichtigen.

Unter der Voraussetzung, dass die Radlasteinleitung in einem Abstand größer b_f vom Trägerende ($x_e > b_f$, s. wirksame **Lasteinleitungslänge**) erfolgt, können die Biegespannungen ermittelt werden mit

$\sigma_{ox,Ed} = c_x \cdot F_{z,Ed} / t_f^2$ ... und ... $\sigma_{oy,Ed} = c_y \cdot F_{z,Ed} / t_f^2$

Die Koeffizienten dürfen bestimmt werden zu (DIN EN 1993-6, Tab. 5.2; c_{xi} und c_{yi} sind positiv bei Zugspannungen an der Flanschunterseite)

	parallele Flansche	geneigte Flansche
Längsbiegespannung $\sigma_{ox,Ed}$	$c_{x0} = 0.050 - 0.580 \cdot \mu + 0.148 \cdot e^{3.015\,\mu}$ $c_{x1} = 2.230 - 1.490 \cdot \mu + 1.390 \cdot e^{-18.33\,\mu}$ $c_{x2} = 0.730 - 1.580 \cdot \mu + 2.910 \cdot e^{-6.00\,\mu}$	$c_{x0} = -0.981 - 1.479 \cdot \mu + 1.120 \cdot e^{1.322\,\mu}$ $c_{x1} = 1.810 - 1.150 \cdot \mu + 1.060 \cdot e^{-7.700\,\mu}$ $c_{x2} = 1.990 - 2.810 \cdot \mu + 0.840 \cdot e^{-4.690\,\mu}$
Querbiegespannung $\sigma_{oy,Ed}$	$c_{y0} = -2.110 + 1.977 : \mu + 0.0076 \cdot e^{6.530\,\mu}$ $c_{y1} = 10.108 - 7.408 : \mu - 10.108 \cdot e^{-1.364\,\mu}$ $c_{y2} = 0.0$	$c_{y0} = -1.096 + 1.095 \cdot \mu + 0.192 \cdot e^{-6.00\,\mu}$ $c_{y1} = 3.965 - 4.835 \cdot \mu - 3.965 \cdot e^{-2.675\,\mu}$ $c_{y2} = 0.0$

wobei

$\mu = 2 \cdot n_y / (b - t_w)$

Geneigte Flansche werden nicht berücksichtigt.

Erfolgt die Radlasteinleitung am Trägerende und ist der Unterflansch unverstärkt, ist die Querbiegespannung mindestens anzunehmen mit

$\sigma_{oy,end,Ed} = (5.6 - 3.225 \cdot \mu - 2.8 \cdot \mu^3) \cdot F_{z,Ed} / t_f^2$

Ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Radlasten < $1.5 \cdot b_f$, sind die für jedes Rad getrennt berechneten Spannungen zu überlagern.

Die Spannungen werden addiert.

---

zur Hauptseite ***4H*-EC3EM**, Ermüdungsnachweis

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