

**Fassung
Dezember 2010**

Zusatzmodul

RF-EL-PL

**Tragsicherheitsnachweise nach
Verfahren Elastisch-Plastisch**

Programm- Beschreibung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der INGENIEUR-SOFTWARE DLUBAL GMBH ist es nicht gestattet, diese Programmbeschreibung oder Teile daraus auf jedwede Art zu vervielfältigen.

© Ingenieur-Software Dlubal GmbH
Am Zellweg 2 D-93464 Tiefenbach

Tel.: +49 (0) 9673 9203-0
Fax: +49 (0) 9673 9203-51
E-Mail: info@dlubal.com
Web: www.dlubal.de

Inhalt

	Inhalt	Seite		Inhalt	Seite
1.	Einleitung	4	5.6	Stückliste stabsatzweise	35
1.1	Zusatzmodul RF-EL-PL	4	6.	Ergebnisauswertung	36
1.2	RF-EL-PL Team	5	6.1	Zwischenergebnisse	36
1.3	Gebrauch des Handbuchs	6	6.2	Ergebnisse am RFEM-Modell	37
1.4	Aufruf des RF-EL-PL-Moduls	6	6.3	Ergebnisverläufe	40
2.	Theoretische Grundlagen	8	6.4	Filter für Ergebnisse	41
2.1	Überprüfung von grenz (c/t)	8	7.	Ausdruck	43
2.2	Interaktion nach RUBIN	9	7.1	Ausdruckprotokoll	43
2.3	Interaktion nach KAHLMEYER	12	7.2	Grafikausdruck	44
2.4	Interaktion nach DIN 18800	14	8.	Allgemeine Funktionen	46
2.5	Interaktion nach KINDMANN	16	8.1	RF-EL-PL-Bemessungsfälle	46
3.	Eingabedaten	21	8.2	Querschnittsoptimierung	48
3.1	Basisangaben	21	8.3	Materialexport nach RFEM	50
3.2	Materialien	23	8.4	Einheiten und Dezimalstellen	51
3.3	Querschnitte	25	8.5	Export der Ergebnisse	51
4.	Berechnung	28	9.	Beispiel	53
4.1	Berechnungsdetails	28	9.1	Bemessungswerte	53
4.2	Start der Berechnung	30	9.2	Allgemeine Spannungsanalyse	56
5.	Ergebnisse	31	9.3	Nachweis RF-EL-PL nach DIN 18800	57
5.1	Nachweise querschnittsweise	31	9.4	Nachweis RF-EL-PL nach KAHLMEYER	57
5.2	Nachweise stabsatzweise	32	9.5	Nachweis RF-EL-PL nach RUBIN	59
5.3	Nachweise stabweise	33	A	Literatur	60
5.4	Nachweise x-stellenweise	33	B	Index	61
5.5	Stückliste stabweise	34			

1. Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-EL-PL

Sehr geehrte Anwender von RFEM und RF-EL-PL,

die meisten Stabilitätsnachweise nach DIN 18800 Teil 2 sind auf das Nachweisverfahren Elastisch-Plastisch ausgerichtet. Bei diesem Verfahren wird für die Berechnung der Beanspruchungen S_d linearelastisches Werkstoffverhalten, für die Berechnung der Beanspruchbarkeiten R_d linearelastisch-idealplastisches Werkstoffverhalten angenommen. Damit werden die Reserven des Querschnitts genutzt, die möglicherweise vorhandenen plastischen Reserven des Systems jedoch nicht berücksichtigt.

Beim Erreichen der Grenzschnittgrößen im vollplastischen Zustand stellt sich der Grenzzustand der Tragfähigkeit ein. Es ist nachzuweisen, dass die Beanspruchungen unter Beachtung der Interaktion zu keiner Überschreitung der Grenzschnittgrößen im vollplastischen Zustand führen.

Für den Nachweis stehen neben den Interaktionsbedingungen der DIN 18800 Teil 1 [1] drei weitere Verfahren zur Auswahl: Die Berechnung kann nach KAHLMEYER [6] geführt werden, wenn bei einfach- und doppelsymmetrischen I- oder Kastenprofilen nur eine einachsige Biegebeanspruchung um die starke Achse vorliegt. Liegen allerdings allgemeine einfach- oder doppelsymmetrische I- und Kastenquerschnitte oder Rohre vor, können die Grenzschnittgrößen in plastischem Zustand nach dem Verfahren von RUBIN [4], [5] berechnet werden. Die Nachweise erfassen hier einachsige Biegung bei einfachsymmetrischen I- und Kastenquerschnitten, zweiachsige Biegung bei doppelsymmetrischen I- und Kastenprofilen und zusätzlich Torsion bei Kastenquerschnitten und Rohren. Alternativ wird für I-förmige Querschnitte und Doppelbiegung das Verfahren nach KINDMANN [8], [9] verwendet.

Neben den gängigen gewalzten Doppel-T-Profilen werden die frei definierbaren I-Profile der RFEM-Querschnittsbibliothek von den Nachweisen abgedeckt. Über die programminterne Optimierungsmöglichkeit lässt sich zudem ein hoher Ausnutzungsgrad der Querschnitte erreichen. Der Nachweisquotient eines jeden Profils erscheint in den übersichtlichen Tabellen und in der RFEM-Grafik, sodass die Auslastung bestimmter Stäbe auf einen Blick erkennbar ist. Für jeden Bemessungsschnitt werden detaillierte Informationen zur Interaktion (z. B. das maßgebende (c/t) -Feld oder die plastischen Schnittgrößen) angezeigt.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Erfolg mit RF-EL-PL und freuen uns auf Ihre Hinweise und Verbesserungsvorschläge.

Ihr Team von ING.-SOFTWARE DLUBAL GMBH

1.2 RF-EL-PL Team

An der Entwicklung von RF-EL-PL waren beteiligt:

Programmkoordinierung

Dipl.-Ing. Georg Dlubal
Dipl.-Ing. (FH) Younes El Frem

Programmierung

Ing. Jiří Hanzálek	Ing. Roman Svoboda
Dipl.-Ing. Georg Dlubal	Dis. Jiří Šmerák
Mgr. Petr Oulehle	Lukáš Tůma

Querschnitts- und Materialdatenbank

Ing. Ph.D. Jan Rybín	Jan Brnušák
Stanislav Krytinář	

Programmdesign, Dialogbilder und Icons

Dipl.-Ing. Georg Dlubal	Ing. Jan Miléř
MgA. Robert Kolouch	

Programmkontrolle

Ing. Jiří Hanzálek	Bc. Michala Sobotková
Ing. Ing. František Knobloch	

Handbuch und Übersetzungen

Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl	Dipl.-Ü. Gundel Pietzcker
-----------------------------	---------------------------

Technische Unterstützung und Endkontrolle

Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel	Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn
Dipl.-Ing. (BA) Sandy Baumgärtel	M.Sc. Dipl.-Ing. Frank Lobisch
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß	Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer
Dipl.-Ing. (FH) Matthias Entenmann	M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier
Dipl.-Ing. Frank Faulstich	M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler
Dipl.-Ing. (FH) René Flori	M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel	Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner
Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich	Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hörold	Dipl.-Ing. (FH) Andreas Wopperer

1.3 Gebrauch des Handbuchs

Da die Themenbereiche Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck im RFEM-Handbuch ausführlich erläutert sind, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit dem Zusatzmodul RF-EL-PL ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken. Im Text sind die beschriebenen **Schaltflächen** (Buttons) in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Anwenden]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Tabellen und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut nachzuvollziehen sind.

Am Ende dieses Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie trotzdem nicht fündig werden, so steht auf unserer Website www.dlubal.de eine Suchfunktion zur Verfügung. Dort können Sie in der umfangreichen Liste aller *Fragen und Antworten* das Problem nach bestimmten Kriterien eingrenzen und die Lösungsvorschläge nutzen.

1.4 Aufruf des RF-EL-PL-Moduls

Es bestehen in RFEM folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul RF-EL-PL zu starten.

Menü

Der Programmaufruf kann erfolgen über das RFEM-Menü

Zusatzmodule → **Stahlbau** → RF-EL-PL.

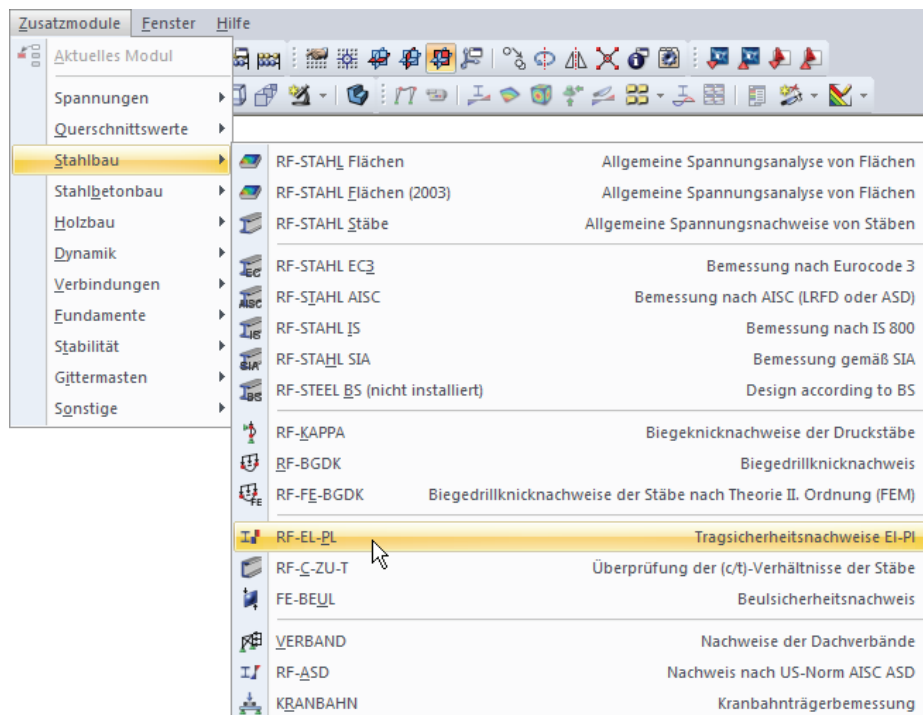


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stahlbau* → RF-EL-PL

Navigator

RF-EL-PL kann im *Daten-Navigator* aufgerufen werden über den Eintrag
Zusatzmodule → **RF-EL-PL**.

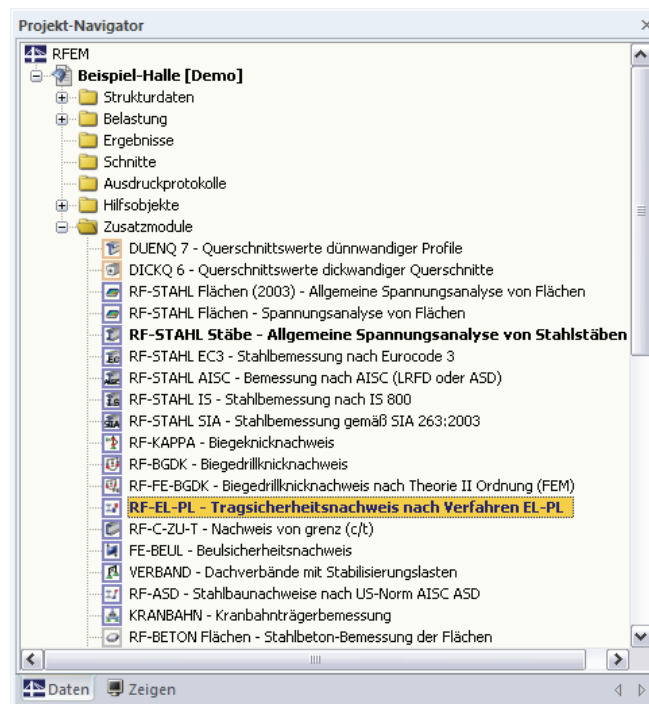
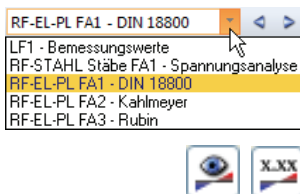


Bild 1.2: Daten-Navigator *Zusatzmodule* → *RF-EL-PL*

Panel

Falls in der RFEM-Position bereits Ergebnisse für RF-EL-PL vorliegen, kann der gewünschte Bemessungsfall in der Liste der Lastfälle eingestellt werden. Gegebenenfalls ist noch mit der Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] die grafische Anzeige der Nachweise zu aktivieren.

Im Panel wird nun die Schaltfläche [RF-EL-PL] angeboten, die den Sprung in das Zusatzmodul ermöglicht.



RF-EL-PL

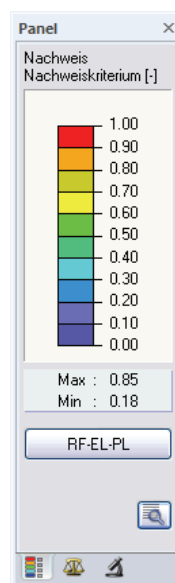


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [RF-EL-PL]

2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen vor, die für die Arbeit mit dem Programm RF-EL-PL von Bedeutung sind. Im Wesentlichen werden die theoretischen Ansätze der Literatur wiedergegeben. Dieses einführende Kapitel kann daher kein Lehrbuch ersetzen.

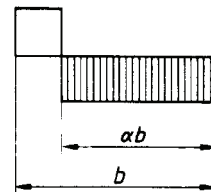
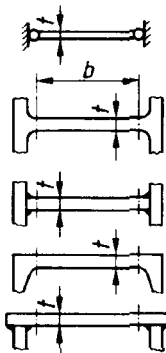
Die elastisch-plastischen Nachweise werden unter Berücksichtigung von Interaktionsbeziehungen geführt. Dabei werden keine vorhandenen Spannungen mit Grenzspannungen verglichen, sondern die vorhandenen Schnittgrößen den plastischen Grenzschnittgrößen gegenübergestellt. Falls Momente, Querkkräfte und Normalkräfte gleichzeitig wirken, wird überprüft, ob Interaktionsbeziehungen berücksichtigt werden müssen. Mit dem Verfahren Elastisch-Plastisch werden nicht die plastischen Reserven des Systems ausgenutzt, sondern die der Querschnitte.

2.1 Überprüfung von grenz (c/t)

Der Nachweis erfordert bei allen in RF-EL-PL benutzten Methoden, dass das System im stabilen Gleichgewicht ist. Zudem müssen in allen Querschnitten die Grenzwerte *grenz (c/t)* gemäß DIN 18800 Teil 1, Tabelle 15 eingehalten sein ($f_{y,k}$ in N/mm²).

Beidseitig gelagerter Plattenstreifen

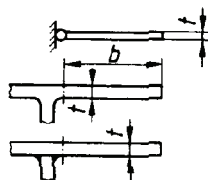
Lagerung und Breite b



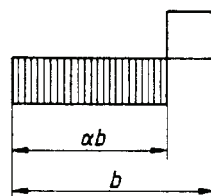
$$\text{grenz } (b/t) = \frac{37}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{240}{f_{y,k}}}$$

Einseitig gelagerter Plattenstreifen

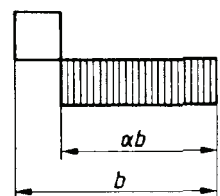
Lagerung und Breite b



Druckspannung $f_{y,k}/\gamma_M$ am
gelagerten Rand freien Rand



$$\text{grenz } (b/t) = \frac{11}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{240}{f_{y,k}}}$$



$$\text{grenz } (b/t) = \frac{11}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{240}{f_{y,k}}}$$

Bild 2.1: Grenzwerte (c/t) nach DIN 18800 Teil 1, Tabelle 15

2.2 Interaktion nach RUBIN

Für allgemeine einfach- oder doppelsymmetrische I- und Kastenquerschnitte sowie Rohre können die Grenzschnittgrößen in plastischem Zustand nach dem Verfahren von RUBIN [3, 4] berechnet werden (vgl. DIN 18800 Teil 1, Anmerkung nach Bild 19). Die Nachweise erfassen ein- und zweiachsige Biegung für doppelsymmetrische I- und Kastenprofile, einachsige Biegung für einfachsymmetrische I-Profile und zusätzlich Torsion bei Kastenquerschnitten und Rohren. Mit diesem recht umfassenden Berechnungsverfahren werden meist günstigere Ausnutzungen als mit den Interaktionsbedingungen nach DIN 18800 erreicht.

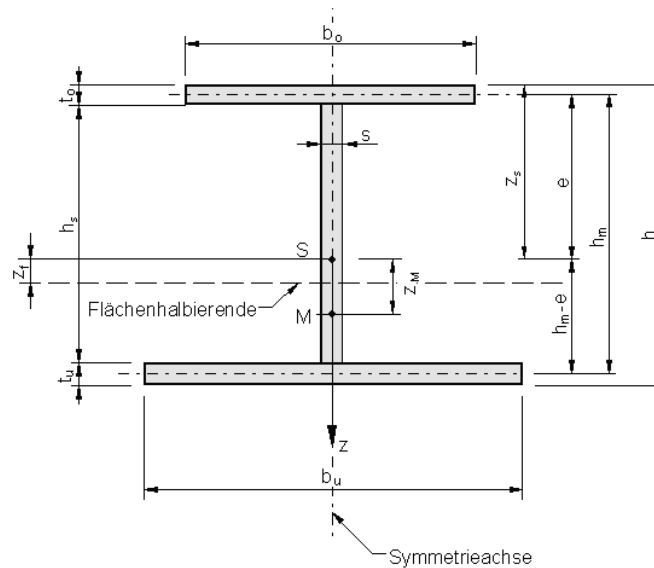


Bild 2.2: Profilparameter

Einfachsymmetrische Profile mit zweiachsiger Biegung

$$V_{pl,z,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \cdot h_m \cdot s$$

$$V_{pl,y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \cdot (b_o \cdot t_o + b_u \cdot t_u)$$

$$N_{pl,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot [(b_o \cdot t_o + b_u \cdot t_u) \cdot \eta_y + h_s \cdot s \cdot \eta_z]$$

$$\text{mit} \quad \eta_z = \sqrt{1 - (V_z / V_{\text{pl},z,d})^2} \quad \eta_y = \sqrt{1 - (V_y / V_{\text{pl},y,d})^2}$$

$$M_{pl,z,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot \frac{1}{4} \cdot [b_o^2 \cdot t_o + b_u^2 \cdot t_u] \cdot \eta_y$$

$$M_{pl,y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} (\eta_y \cdot f_1 + \eta_z \cdot f_2)$$

mit $f_1 = b_o \cdot t_o \cdot (z_s + z_f - 0.5 \cdot t_o) + b_u \cdot t_u \cdot (h - z_s + z_f - 0.5 \cdot t_u)$

$$f_2 = 0,5 \cdot s \cdot [(z_s + z_f - t_o)^2 + (h - z_s - z_f + t_o)^2]$$

$$\left. \begin{aligned} M_{pl,y,k} &= M_{pl,y,d} \cdot \gamma_M \\ M_{pl,z,k} &= M_{pl,z,d} \cdot \gamma_M \\ N_{pl,k} &= N_{pl,d} \cdot \gamma_M \end{aligned} \right\} \quad \text{mit} \quad \eta_z = \eta_y = 1,0$$

$$V_{pl,z,k} = V_{pl,z,d} \cdot \gamma_M$$

$$V_{pl,y,k} = V_{pl,y,d} \cdot \gamma_M$$

Gleichung 2.1: Querschnittsgrößen für einfachsymmetrische Querschnitte im plastischen Zustand

Walzprofile

$$V_{pl,z,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \cdot (h - t) \cdot s$$

$$V_{pl,y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \cdot 2 \cdot b \cdot t$$

$$N_{pl,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot A_r$$

mit $A_r = \eta_z \cdot h_s + 2 \cdot \eta_y \cdot b \cdot t$

$$\eta_z = \sqrt{1 - (V_z / V_{pl,z,d})^2} \quad \eta_y = \sqrt{1 - (V_y / V_{pl,y,d})^2}$$

$$M_{pl,z,d} = 0,25 \cdot (1 - \delta) \cdot b \cdot N_{pl,d}$$

mit $\delta = \frac{\eta_z \cdot h_s}{A_r}$

$$M_{pl,y,d} = 0,25 \cdot (2 - \delta) \cdot h_m \cdot N_{pl,d}$$

$$V_{pl,z,k} = V_{pl,z,d} \cdot \gamma_M$$

$$V_{pl,y,k} = V_{pl,y,d} \cdot \gamma_M$$

Gleichung 2.2: Querschnittsgrößen für Walzprofile im plastischen Zustand

Falls keine Interaktion erforderlich ist, gelten für Walzprofile vereinfachte Formeln. Die plastischen Querkräfte berechnen sich hier wie mit Interaktion.

$$M_{pl,y,d} = \frac{2 \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot S_y \quad M_{pl,y,k} = M_{pl,y,d} \cdot \gamma_M$$

$$M_{pl,z,d} = \frac{2 \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot S_z \quad M_{pl,z,k} = M_{pl,z,d} \cdot \gamma_M$$

$$N_{pl,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \cdot A \quad N_{pl,k} = N_{pl,d} \cdot \gamma_M$$

Gleichung 2.3: Querschnittsgrößen für Walzprofile, falls keine Interaktion erforderlich

Bei **einfachsymmetrischen I-Profilen** werden die reduzierten Grenzkkräfte nach den Gleichungen (4.1) bis (4.5) in [4], die Interaktionsbedingungen nach den Gleichungen (4.11), (4.14) oder (4.17) in [4] berechnet.

Im Falle **einfachsymmetrischer Kastenquerschnitte** erfolgt die Berechnung nach den Gleichungen (6.4) bis (6.9) in [4] und anschließend wiederum gemäß den Interaktionsformeln (4.11), (4.14) oder (4.17) in [4].

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass zweiachsige Biegung nach RUBIN nur für doppeltsymmetrische I- und Kastenquerschnitte definiert ist.

Für **doppeltsymmetrischen I-Querschnitten mit zweiachsiger Biegung** und Normalkraft werden die reduzierten Grenzkkräfte und Grenzmomente nach den Formeln in Abschnitt 5.2 in [5] ermittelt. Die Nachweise erfolgen anschließend gemäß den Interaktionsgleichungen in Tabelle 1 des Abschnitts 5.3 in [5].

Im Falle **doppeltsymmetrischer Kastenprofile mit zweiachsiger Biegung** und Normalkraft werden ebenfalls die reduzierten Grenzkkräfte und Grenzmomente nach den Formeln des Abschnitts 5.2 in [5] ermittelt. Für diese Querschnitte finden anschließend die Interaktionsgleichungen gemäß Tabelle 2 des Abschnitts 5.4 in [5] Anwendung.

Torsionsbeanspruchte Kastenquerschnitte werden nach Abschnitt 7 [5] nachgewiesen. Dieser Ansatz liegt auf der sicheren Seite, da die Schubkräfte aus Querkraft und Torsion sich nur in einem der beiden Stege bzw. Gurte addieren, im anderen dagegen subtrahieren, während bei der Berechnung die Addition in allen Querschnittsteilen angenommen wird.

Rohre

$$V = \sqrt{V_y^2 + V_z^2}$$

$$M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

$$V_{pl,d} = 2 \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}}$$

mit d Durchmesser bezogen auf die Blechmittellachse
 t Wanddicke

$$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq \frac{1}{4} \quad : \quad \eta = 1$$

$$\frac{V}{V_{pl,d}} > \frac{1}{4} \quad : \quad \eta = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2}$$

$$N_{pl,d,v} = A_r \cdot f_{y,k}$$

$$\text{mit} \quad A_r = \eta \cdot \pi \cdot d \cdot t$$

$$M_{pl,d,v} = \frac{d}{\pi} \cdot N_{pl,d,v}$$

$$\frac{M}{M_{pl,d,v}} \leq \cos \left(\frac{N}{N_{pl,d,v}} \cdot \frac{\pi}{2} \right)$$

Gleichung 2.4: Querschnittsgrößen für Rohre im plastischen Zustand

2.3 Interaktion nach KAHLMEYER

Der Nachweis kann nach dem Verfahren von KAHLMEYER [6] erfolgen, wenn bei einfach- und doppelsymmetrischen I- oder Kastenprofilen nur eine einachsige Biegebeanspruchung um die starke Achse vorliegt.

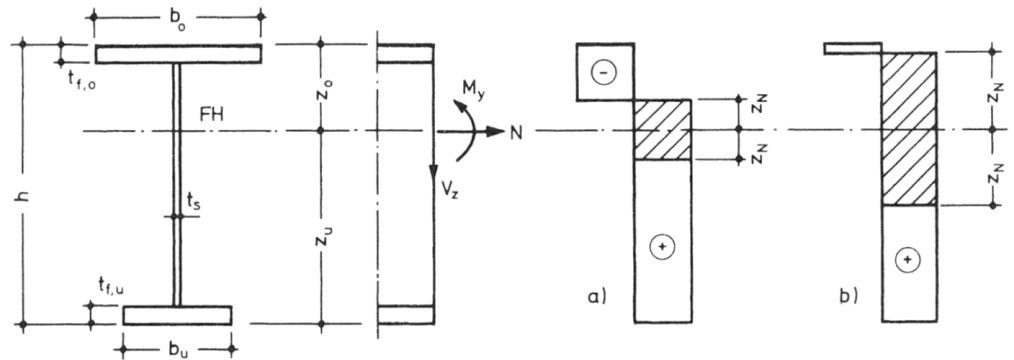


Bild 2.3: Interaktion M_y - V_z - N nach KAHLMEYER

Die Berechnung verläuft nach folgendem Schema:

1. Reduzierung der Stegdicke

$$t_{s,r} = t_s \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_z}{V_{pl,z,d}} \right)^2}$$

2. Bestimmung der Flächenhalbierenden

$$A_{f,o} = b_o \cdot t_{f,o} > A_{f,u} = b_u \cdot t_{f,u}$$

Für $A_{f,o}$ ist die größere der beiden Flanschflächen einzusetzen. Damit gilt: $z_o < z_u$

$$0,5 \cdot A = A_{f,o} + t_{s,r} \cdot (z_o - t_{f,o})$$

$$z_o = t_{f,o} + \frac{0,5 \cdot A - A_{f,o}}{t_{s,r}} \quad z_u = t_{f,u} + \frac{0,5 \cdot A - A_{f,u}}{t_{s,r}}$$

3. Ermittlung des Normalkraftanteils im Spannungskörper

Der N -Anteil erstreckt sich beiderseits der Flächenhalbierenden FH (siehe Bild 2.3), wobei er im Steg bleiben (Fall 1) oder bei großen Längskräften in den Flansch hineinreichen kann (Fälle 2 und 3). Das Kriterium ist die zur Aufnahme der halben Längskraft im Steg erforderliche Länge z_N .

$$\frac{|N|}{2} = z_N \cdot t_{s,r} \cdot f_{y,d} \quad \rightarrow \quad z_N = \frac{|N|}{2 \cdot t_{s,r} \cdot f_{y,d}}$$

- Fall 1: $z_N \leq (z_o - t_{f,o})$ mit $z_o < z_u$

Der Normalkraftanteil liegt mit der Länge $2 \cdot z_N$ nur im Steg.

- Fall 2: $(z_o - t_{f,o}) < z_N < (z_u - t_{f,u})$ mit $z_o < z_u$

Der Normalkraftanteil greift mit der Länge $\Delta t_{f,o}$, bezogen auf den Innenrand, in den größeren der beiden Flansche.

$$\frac{|N|}{2} = [\Delta t_{f,o} \cdot b_o + (z_o - t_{f,o}) \cdot t_{s,r}] \cdot f_{y,d}$$

$$\Delta t_{f,o} = \frac{1}{b_o} \cdot \left[\frac{|N|}{2 \cdot f_{y,d}} - (z_o - t_{f,o}) \cdot t_{s,r} \right]$$

- Fall 3: $(z_o - t_{f,o}) < z_N > (z_u - t_{f,u})$

Der Normalkraftanteil greift mit den Längen $\Delta t_{f,o}$ und $\Delta t_{f,u}$ in beide Flansche.

$$\Delta t_{f,o} = \frac{1}{b_o} \cdot \left[\frac{|N|}{2 \cdot f_{y,d}} - (z_o - t_{f,o}) \cdot t_{s,r} \right]$$

$$\Delta t_{f,u} = \frac{1}{b_u} \cdot \left[\frac{|N|}{2 \cdot f_{y,d}} - (z_u - t_{f,u}) \cdot t_{s,r} \right]$$

4. Berechnung des Grenzmoments im plastischen Zustand

Das Grenzmoment kann aus dem durch V-N-Interaktion reduzierten Spannungskörper bestimmt werden. Die Querkraft wird somit bei diesem Verfahren durch eine Reduzierung der Stegdicke berücksichtigt; der Längskraft wird ein zur Flächenhalbierenden symmetrischer Anteil des Spannungskörpers zugewiesen. Aus der Restfläche wird das reduzierte Grenzmoment im plastischen Zustand $red M_{pl,y,d}$ errechnet, das auf dem Gleichgewicht der Resultierenden des Biegedruck- und Biegezugbereichs beruht.

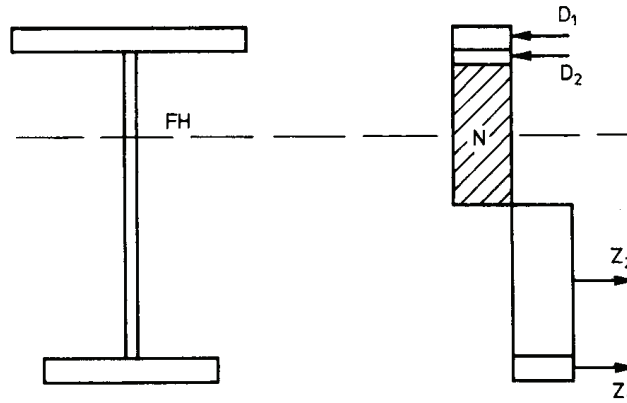


Bild 2.4: Resultierende im Biegedruck- und Biegezugbereich

Der Nachweis bei einachsiger Biegung um die y-Achse lautet:

$$\frac{M_y}{red M_{y,pl,d}} \leq 1$$

mit M_y
 $red M_{pl,y,d}$

Absolutwert des beanspruchenden Moments
durch Interaktionsbeziehungen abgemindertes
Grenzmoment im plastischen Zustand

Gleichung 2.5: Nachweis nach KAHLMEYER

2.4 Interaktion nach DIN 18800

DIN 18800 Teil 1 beschreibt in Abschnitt 7.5.3 die Grundlagen des Nachweises für doppelt-symmetrische I-Querschnitte nach dem Verfahren Elastisch-Plastisch.

In keinem Querschnitt dürfen die berechneten Beanspruchungen (Schnittgrößen) unter Beachtung der Interaktion zu einer Überschreitung der Grenzschnittgrößen im vollplastischen Zustand führen. Die Spannungen sind DIN 18800 Teil 1, Bild 18 zu entnehmen.

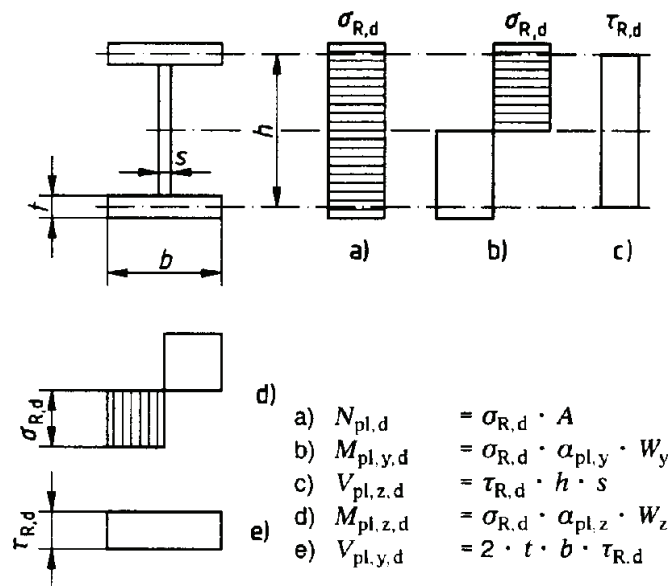


Bild 2.5: Spannungen doppelsymmetrischer I-Querschnitte im plastischen Zustand nach DIN 18 800 Teil 1, Bild 18

Für einachsige Biegung gibt DIN 18 800 Teil 1 die in den Tabellen 16 und 17 genannten Interaktionsbedingungen an, die beim Nachweis erfüllt werden müssen.

Momente um z-Achse	Gültigkeitsbereich	$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,25$	$0,25 < \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,9$
	$\frac{N}{N_{pl,d}} \leq 0,3$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \leq 1$	$0,95 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0,82 \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2 \leq 1$
	$0,3 < \frac{N}{N_{pl,d}} \leq 1$	$0,91 \frac{M}{M_{pl,d}} + \left(\frac{N}{N_{pl,d}} \right)^2 \leq 1$	$0,87 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0,95 \left(\frac{N}{N_{pl,d}} \right)^2 + 0,75 \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2 \leq 1$

Bild 2.6: Tragsicherheitsnachweis mit N , M_y , V_z nach DIN 18 800 Teil 1, Tabelle 16

Momente um y-Achse	Gültigkeitsbereich	$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,33$	$0,33 < \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,9$
	$\frac{N}{N_{pl,d}} \leq 0,1$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \leq 1$	$0,88 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0,37 \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 1$
	$0,1 < \frac{N}{N_{pl,d}} \leq 1$	$0,9 \frac{M}{M_{pl,d}} + \frac{N}{N_{pl,d}} \leq 1$	$0,8 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0,89 \frac{N}{N_{pl,d}} + 0,33 \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 1$

Bild 2.7: Tragsicherheitsnachweis mit N , M_z , V_y nach DIN 18 800 Teil 1, Tabelle 17

Für zweiachsige Biegung und Normalkraft kann der Nachweis nach den Gleichungen (41) und (42) geführt werden, wenn für die Querkkräfte die Bedingungen

$$V_z \leq 0,33 V_{pl,z,d} \quad \text{und} \quad V_y \leq 0,25 V_{pl,y,d}$$

eingehalten sind.

Mit
$$M_y^* = \left[1 - \left(\frac{N}{N_{pl,d}} \right)^{1,2} \right] \cdot M_{pl,y,d}$$

gilt

$$\text{- für } M_y \leq M_y^* : \quad \frac{M_z}{M_{pl,z,d}} + c_1 + c_2 \left(\frac{M_y}{M_{pl,y,d}} \right)^{2,3} \leq 1 \quad \text{Gl. (41)}$$

$$\text{mit} \quad c_1 = \left(N / N_{pl,d} \right)^{2,6}$$

$$c_2 = \left(1 - c_1 \right)^{-N_{pl,d} / N}$$

$$\text{- für } M_y > M_y^* : \quad \frac{1}{40} \left(\frac{M_z}{M_{pl,z,d}} - \frac{M_z^*}{M_{pl,z,d}} \right) + \left(\frac{N}{N_{pl,d}} \right)^{1,2} + \frac{M_y}{M_{pl,y,d}} \leq 1 \quad \text{Gl. (42)}$$

$$\text{mit} \quad \frac{M_z^*}{M_{pl,z,d}} = 1 - c_1 - c_2 \left(\frac{M_y^*}{M_{pl,y,d}} \right)^{2,3}$$

Gleichung 2.6: Nachweisbedingungen nach DIN 18800 Teil 1, El. (757) für zweiachsige Biegung und Normalkraft

Bei Rundrohren wird das Bemessungsverfahren automatisch umgestellt. RF-EL-PL führt dann den Nachweis nach DIN 4420 Teil 1.

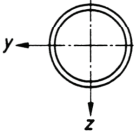
Querschnitt	Momente um y-Achse	Gültigkeitsbereich	$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq \frac{1}{3}$	$\frac{1}{3} \leq \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,9$
	$\frac{N}{N_{pl,d}} \leq \frac{1}{10}$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2}} \leq 1$
	$\frac{1}{10} < \frac{N}{N_{pl,d}} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d} \cos \left(\frac{\pi N}{2 N_{pl,d}} \right)} \leq 1$		$\frac{M}{M_{pl,d} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2} \cos \left(\frac{\pi N}{2 N_{pl,d} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}} \right)^2}} \right) \right]} \leq 1$

Bild 2.8: Vereinfachte Nachweise für Rundrohre nach DIN 4420 Teil 1, Tabelle 7

$$\text{mit} \quad N_{pl,d} = \sigma_{Rd} \cdot A$$

$$M_{pl,d} = \sigma_{Rd} \cdot \alpha_{pl} \cdot W_{el}$$

$$V_{pl,d} = \tau_{Rd} \cdot \frac{2}{\pi} A$$

2.5 Interaktion nach KINDMANN

Nach dem Verfahren von KINDMANN [8] lassen sich Querschnitte bemessen, die aus zwei oder drei Blechen bestehen: Obergurt, Steg und ggf. Untergurt. Die Gurte müssen horizontal, der Steg vertikal angeordnet sein. Damit werden die im Stahlbau am häufigsten verwendeten Querschnitte erfasst.

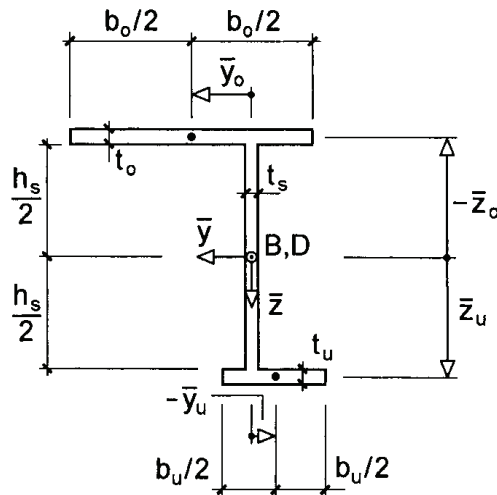
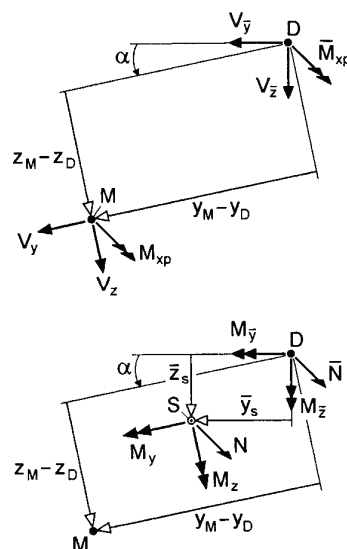


Bild 2.9: Drei- und Zweiblechquerschnitte des Typs HVH

Wird der Ober- oder der Untergurt weggelassen, können auch Zweiblechquerschnitte wie T- oder L-Profile erfasst werden.

Für die Berechnungen werden die Querschnittskennwerte (Lage von Schwerpunkt und Schubmittelpunkt, Hauptachsenwinkel) benutzt. Die Schnittgrößen werden dann in das $\bar{y} - \bar{z}$ -Bezugssystem transformiert. Da RFEM keine sekundären Torsionsmomente und Wölbbimomente ausgibt, werden diese vernachlässigt.



τ -Schnittgrößen:

$$\bar{M}_{xp} = M_{xp}$$

$$V_{\bar{y}} = V_y \cdot \cos \alpha - V_z \cdot \sin \alpha$$

$$V_{\bar{z}} = V_z \cdot \cos \alpha + V_y \cdot \sin \alpha$$

σ -Schnittgrößen:

$$\bar{N} = N$$

$$M_{\bar{y}} = M_y \cdot \cos \alpha - M_z \cdot \sin \alpha + N \cdot \bar{z}_s$$

$$M_{\bar{z}} = M_z \cdot \cos \alpha + M_y \cdot \sin \alpha - N \cdot \bar{y}_s$$

Bild 2.10: Schnittgrößentransformation in das Bezugskordinatensystem

Im nächsten Schritt wird das Gleichgewicht zwischen Schnittgrößen und Teilschnittgrößen hergestellt.

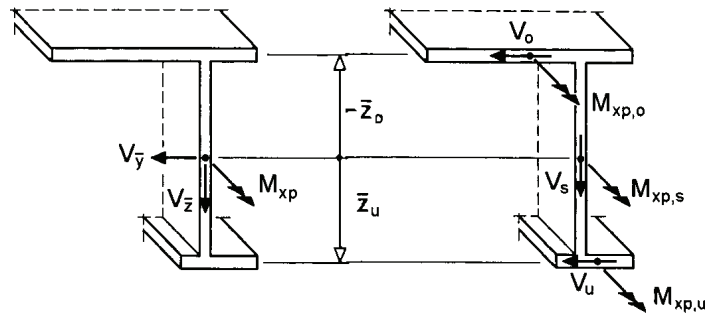


Bild 2.11: τ -Schnittgrößen

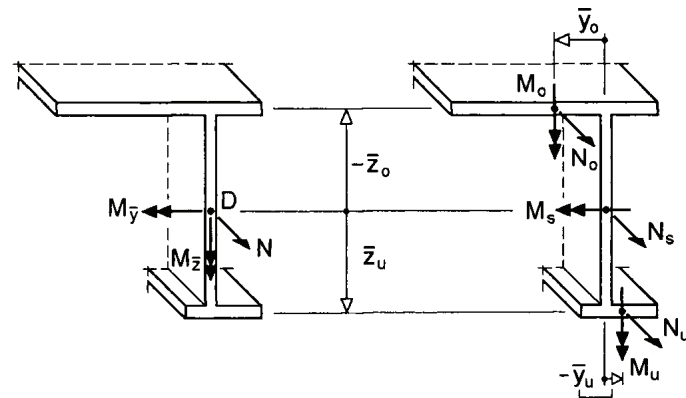


Bild 2.12: σ -Schnittgrößen

τ -Schnittgrößen

Infolge der τ -Schnittgrößen ergeben sich die Teilschnittgrößen V_o , V_s und V_u .

$$\text{Obergurt (o):} \quad V_o = \frac{V_y \cdot z_u}{z_u - z_o} \quad M_{x,o} = M_x \cdot \frac{I_{T,o}}{I_T}$$

$$\text{Steg (s):} \quad V_s = V_z \quad M_{x,s} = M_x \cdot \frac{I_{T,s}}{I_T}$$

$$\text{Untergurt (u):} \quad V_u = \frac{V_y \cdot z_o}{z_u - z_o} \quad M_{x,u} = M_x \cdot \frac{I_{T,u}}{I_T}$$

Gleichung 2.7: Teilschnittgrößen infolge τ

Die Nachweisbedingungen lauten dann jeweils für Steg, Ober- und Untergurt ($i = s, o, u$).

$$\frac{\tau_i}{\tau_R} = \frac{|M_{x,i}|}{2 \cdot M_{pl,x,i}} + \sqrt{\left(\left(\frac{M_{x,i}}{2 \cdot M_{pl,x,i}} \right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{pl,i}} \right)^2 \right)} \leq 1$$

$$\text{mit} \quad I_T = I_{T,o} + I_{T,s} + I_{T,u}$$

$$\tau_R = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

$$V_{pl,i} = \tau_R \cdot b_i + t_i$$

$$M_{pl,x,i} = \frac{\tau_R \cdot t_i^2 \cdot (2 \cdot b_i - t_i)}{4}$$

Gleichung 2.8: Nachweisbedingung für τ -Schnittgrößen

σ - Schnittgrößen

Der nächste Schritt berücksichtigt die σ-Schnittgrößen N , $M_{\bar{y}}$ und $M_{\bar{z}}$:

Es werden die Gurtbiegung und die verbleibende $N - M_{\bar{y}}$ - Tragfähigkeit berechnet.

$$M_o - N_o \cdot \bar{y}_o = \frac{M_{\bar{z}} \cdot \bar{z}_u}{\bar{z}_u - \bar{z}_o} = M_{Sa,o}$$

$$M_u - N_u \cdot \bar{y}_u = \frac{-M_{\bar{z}} \cdot \bar{z}_o}{\bar{z}_u - \bar{z}_o} = M_{Sa,u}$$

Gleichung 2.9: Gurtbiegemomente

$M_{Sa,o}$ und $M_{Sa,u}$ stellen die Gurtbiegemomente mit Wirkungslinie in der Stegachse (Index Sa) dar. Da die Schnittgrößen bekannt sind, können obige Gleichungen nach M_o und M_u umgestellt werden. Allgemein gilt mit dem Index i (anstelle o und u für Ober- und Untergurt):

$$M_i = M_{Sa,i} + N_i \cdot \bar{y}_i$$

Gleichung 2.10: Momentengleichung

Diese Beziehung wird in die Interaktion des Rechteckquerschnitts eingesetzt.

$$\left(\frac{N_i}{N_{pl,i,\tau}} \right)^2 + \frac{|M_i|}{M_{pl,i,\tau}} \leq 1$$

$$\Rightarrow \left(\frac{N_i}{N_{pl,i,\tau}} \right)^2 + \left| \frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}} + 2 \cdot \delta_i \cdot \frac{N_i}{N_{pl,i,\tau}} \right| \leq 1$$

mit $\delta_i = 2 \cdot \frac{\bar{y}_i}{b_i}$

Gleichung 2.11: Interaktionsgleichung für Rechteckquerschnitt

Als einzige Unbekannte in der Gleichung verbleibt die Teilschnittgröße N_i . Wird der Grenzfall betrachtet (= 1 anstatt ≤ 1), kann eine minimale und eine maximale Grenznormalkraft berechnet werden. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse dieser Fallunterscheidung.

für:	$N_{gr,i,min} =$	für:	$N_{gr,i,max} =$
$\frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}} \geq 2 \cdot \delta_i$	$N_{pl,i,\tau} \cdot \left(-\delta_i - \sqrt{\delta_i^2 + 1 - \frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}}} \right)$	$-\frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}} \geq 2 \cdot \delta_i$	$N_{pl,i,\tau} \cdot \left(+\delta_i + \sqrt{\delta_i^2 + 1 + \frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}}} \right)$
$\frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}} < 2 \cdot \delta_i$	$N_{pl,i,\tau} \cdot \left(+\delta_i - \sqrt{\delta_i^2 + 1 + \frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}}} \right)$	$-\frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}} < 2 \cdot \delta_i$	$N_{pl,i,\tau} \cdot \left(-\delta_i + \sqrt{\delta_i^2 + 1 - \frac{M_{Sa,i}}{M_{pl,i,\tau}}} \right)$

Bild 2.13: Grenznormalkräfte in den Gurten (i=o: Obergurt; i=u: Untergurt)

Es ergeben sich folgende Bedingungen zum Nachweis ausreichender Gurttragfähigkeiten.

$$\frac{|M_{Sa,o}|}{M_{pl,o,\tau}} \leq 1 + \delta_o^2 \quad \text{und} \quad \frac{|M_{Sa,u}|}{M_{pl,u,\tau}} \leq 1 + \delta_u^2$$

Gleichung 2.12: Nachweisbedingungen für Gurte

Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, können die Schnittgrößen $M_{\bar{z}}$ nicht mehr aufgenommen werden. Damit erübrigt sich eine weitere Untersuchung.

Beim Einhalten der Bedingungen können die minimalen und maximalen Grenznormalkräfte in den Gurten gemäß obiger Tabelle bestimmt werden.

Querschnittstragfähigkeit

Abschließend wird die Querschnittstragfähigkeit für die Schnittgrößen N und $M_{\bar{y}}$ überprüft.

Es werden die vier Teilschnittgrößen N_o , N_u , N_s und M_s über die Gleichgewichtsbedingungen $\Sigma N = 0$ und $\Sigma M_{\bar{y}} = 0$ und die Grenztragfähigkeiten der Teilquerschnitte berechnet.

Zur Bestimmung von $\min M_{\bar{y}}$ und $\max M_{\bar{y}}$ sind folgende sechs Fälle zu unterscheiden.

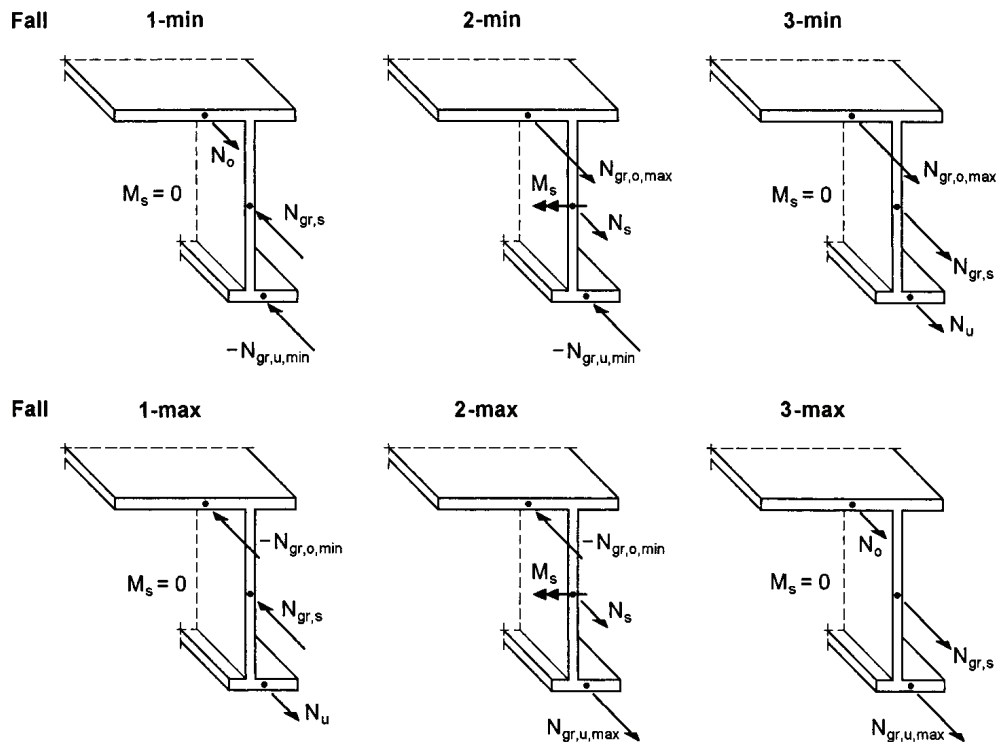


Bild 2.14: Fallunterscheidungen zur Ermittlung von $\min M_{\bar{y}}$ und $\max M_{\bar{y}}$

Die Tabelle auf folgender Seite bietet eine Übersicht über die erforderlichen Untersuchungen. Hier wird das Gleichgewicht für $\Sigma N = 0$ durch die Fallunterscheidungen hinsichtlich N erfasst.

Fall	Normalkraft N	min $M_{\bar{y}} =$
1-min	$N \geq N_{gr,o,min} + N_{gr,u,min} - N_{gr,s}$ $N < N_{gr,o,max} + N_{gr,u,min} - N_{gr,s}$	$N_{gr,u,min} \cdot (\bar{z}_u - \bar{z}_o) + (N + N_{gr,s}) \cdot \bar{z}_o$
2-min	$N \geq N_{gr,o,max} + N_{gr,u,min} - N_{gr,s}$ $N < N_{gr,o,max} + N_{gr,u,min} + N_{gr,s}$	$N_{gr,u,min} \cdot \bar{z}_u + N_{gr,o,max} \cdot \bar{z}_o - (N_{gr,s}^2 - N_s^2) \cdot h_s / (4 \cdot N_{gr,s})$ mit : $N_s = N - N_{gr,o,max} - N_{gr,u,min}$
3-min	$N \geq N_{gr,o,max} + N_{gr,u,min} + N_{gr,s}$ $N \leq N_{gr,o,max} + N_{gr,u,max} + N_{gr,s}$	$-N_{gr,o,max} \cdot (\bar{z}_u - \bar{z}_o) + (N - N_{gr,s}) \cdot \bar{z}_u$
Fall	Normalkraft N	max $M_{\bar{y}} =$
1-max	$N \geq N_{gr,o,min} + N_{gr,u,min} - N_{gr,s}$ $N < N_{gr,o,min} + N_{gr,u,max} - N_{gr,s}$	$-N_{gr,o,min} \cdot (\bar{z}_u - \bar{z}_o) + (N + N_{gr,s}) \cdot \bar{z}_u$
2-max	$N \geq N_{gr,o,min} + N_{gr,u,max} - N_{gr,s}$ $N < N_{gr,o,min} + N_{gr,u,max} + N_{gr,s}$	$N_{gr,u,max} \cdot \bar{z}_u + N_{gr,o,min} \cdot \bar{z}_o + (N_{gr,s}^2 - N_s^2) \cdot h_s / (4 \cdot N_{gr,s})$ mit : $N_s = N - N_{gr,o,min} - N_{gr,u,max}$
3-max	$N \geq N_{gr,o,min} + N_{gr,u,max} + N_{gr,s}$ $N \leq N_{gr,o,max} + N_{gr,u,max} + N_{gr,s}$	$N_{gr,u,max} \cdot (\bar{z}_u - \bar{z}_o) + (N - N_{gr,s}) \cdot \bar{z}_o$
Vorzeichen beachten!		

Bild 2.15: Tabelle zur Ermittlung von min $M_{\bar{y}}$ und max $M_{\bar{y}}$ in Abhängigkeit von N

mit $N_{gr,i,min}$ und $N_{gr,i,max}$ Grenznormalkräfte in den Gurten (vgl. vorherige Seite)

$$N_{gr,s} = N_{pl,s,\tau} = h_s \cdot t_s \cdot f_y \cdot \sqrt{1 - \frac{\tau_s}{\tau_R}}$$

Zuletzt wird noch überprüft, ob folgende Bedingung eingehalten ist.

$$\min M_{\bar{y}} \leq M_{\bar{y}} \leq \max M_{\bar{y}}$$

Gleichung 2.13: Nachweisbedingung

3. Eingabedaten



Alle Eingaben zur Definition der Bemessungsfälle erfolgen in Masken. Mit der Funktion [Pick] ist es möglich, die zu bemessenden Stäbe und Stabsätze grafisch auszuwählen.

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls wird in einem neuen Fenster links ein Navigator angezeigt, der alle verfügbaren Masken verwaltet. Oberhalb befindet sich eine Pulldownliste mit den Bemessungsfällen (siehe Kapitel 8.1, Seite 46).

Wird RF-EL-PL zum ersten Mal in einer RFEM-Position aufgerufen, so liest das Zusatzmodul folgende bemessungsrelevante Daten automatisch ein:

- Stäbe und Stabsätze
- Lastfälle, Lastfallgruppen und Lastfallkombinationen
- Materialien
- Querschnitte
- Schnittgrößen (im Hintergrund – sofern berechnet)



Die Ansteuerung der Masken erfolgt entweder durch Anklicken eines bestimmten Eintrags im RF-EL-PL-Navigator oder durch Blättern mit den beiden links gezeigten Schaltflächen. Die Funktionstasten [F2] und [F3] blättern ebenfalls eine Maske vorwärts bzw. zurück.

Mit [OK] werden die vorgenommenen Eingaben gesichert und das Modul RF-EL-PL verlassen. [Abbruch] beendet das Zusatzmodul, ohne die Daten zu speichern.

3.1 Basisangaben

In Maske 1.1 *Basisangaben* sind die zu bemessenden Stäbe, Stabsätze und Einwirkungen auszuwählen.

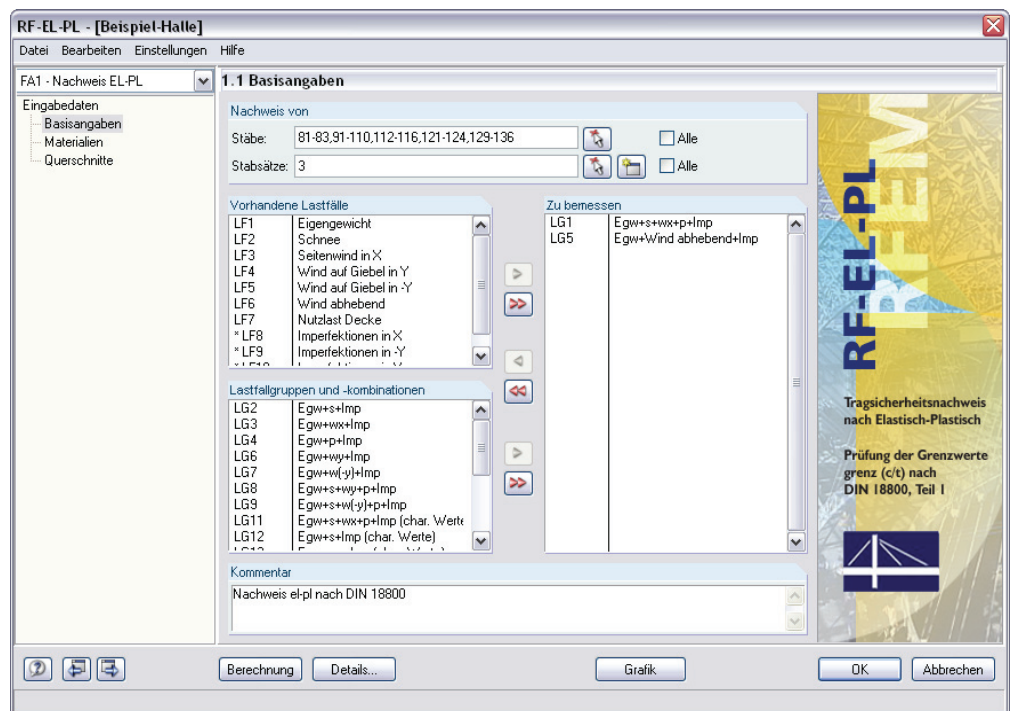


Bild 3.1: Maske 1.1 *Basisangaben*

Nachweis von



Die Bemessung kann sowohl für *Stäbe* als auch für *Stabsätze* erfolgen. Falls nur bestimmte Objekte bemessen werden sollen, ist das Kontrollfeld *Alle* zu deaktivieren. Damit werden die Eingabefelder zugänglich, in die die Nummern der relevanten Stäbe oder Stabsätze eingetragen werden können. Über die Schaltfläche [Pick] ist auch eine grafische Auswahl im RFEM-Arbeitsfenster möglich. Die Liste der voreingestellten Objektnummern kann schnell per Doppelklick selektiert und dann durch manuelle Einträge überschrieben werden.



Falls in RFEM noch keine Stabsätze definiert wurden, so können diese über die Schaltfläche [Neu] auch im RF-EL-PL-Modul angelegt werden. Es erscheint der aus RFEM bekannte Dialog zum Anlegen eines neuen Stabsatzes, in dem die weiteren Angaben erfolgen.

Bei der Stabsatzbemessung wird das maximale Nachweiskriterium von allen Stäben ermittelt, die im Stabsatz enthalten sind.

Vorhandene Lastfälle / Lastfallgruppen und -kombinationen



In den beiden Abschnitten werden die in RFEM definierten Lastfälle, Lastfallgruppen und Lastfallkombinationen sowie ggf. RF-DYNAM-Fälle aufgelistet, die für die Bemessung infrage kommen. Mit der Schaltfläche [►] können selektierte Einträge nach rechts in die Liste *Zu bemessen* übertragen werden. Die Auswahl kann auch per Doppelklick erfolgen. Die Schaltfläche [►►] übergibt die ganze Liste des Abschnitts nach rechts.

Sollten Lastfälle mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet sein wie beispielsweise die Lastfälle 8 und 9 in Bild 3.1, so können diese nicht bemessen werden. Es sind keine Lasten definiert oder es handelt sich wie im Beispiel um reine Imperfektionslastfälle.

RF-EL-PL ist auch in der Lage, RF-DYNAM-Fälle zu bemessen.



Zu bemessen



In der rechten Spalte werden die für den Nachweis ausgewählten Einwirkungen aufgelistet. Mit der Schaltfläche [◄] lassen sich selektierte Einträge wieder aus der Liste entfernen. Auch hier kann die Auswahl per Doppelklick erfolgen. Die Schaltfläche [◄◄] leert die ganze Liste.

Die Bemessung einer einhüllenden Oder-Lastfallkombination verläuft schneller als die Analyse für alle pauschal übernommenen Einwirkungen.

Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung, die z. B. den aktuellen RF-EL-PL-Bemessungsfall erläuternd beschreibt.

3.2 Materialien

Diese Maske ist zweigeteilt. Im oberen Abschnitt sind alle in RFEM definierten Materialien aufgelistet. Im Abschnitt *Materialkennwerte* unterhalb werden die Eigenschaften des aktuellen Materials angezeigt, d. h. des Materials, dessen Zeile im oberen Abschnitt selektiert ist.

Materialien, die bei der Bemessung nicht benutzt werden, erscheinen in grauer Schrift. Unzulässige Materialien sind in roter, geänderte Materialien in blauer Schrift eingetragen.

Die zur Schnittgrößenermittlung in RFEM benötigten Materialkennwerte sind im Kapitel 5.3 des RFEM-Handbuchs ausführlich beschrieben. In der globalen Materialbibliothek sind die bemessungsrelevanten Materialeigenschaften gespeichert; sie sind automatisch eingestellt.

Die Einheiten und Nachkommastellen der Materialkennwerte und Spannungen lassen sich über das Menü **Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen** ändern (siehe Bild 8.10, Seite 51).

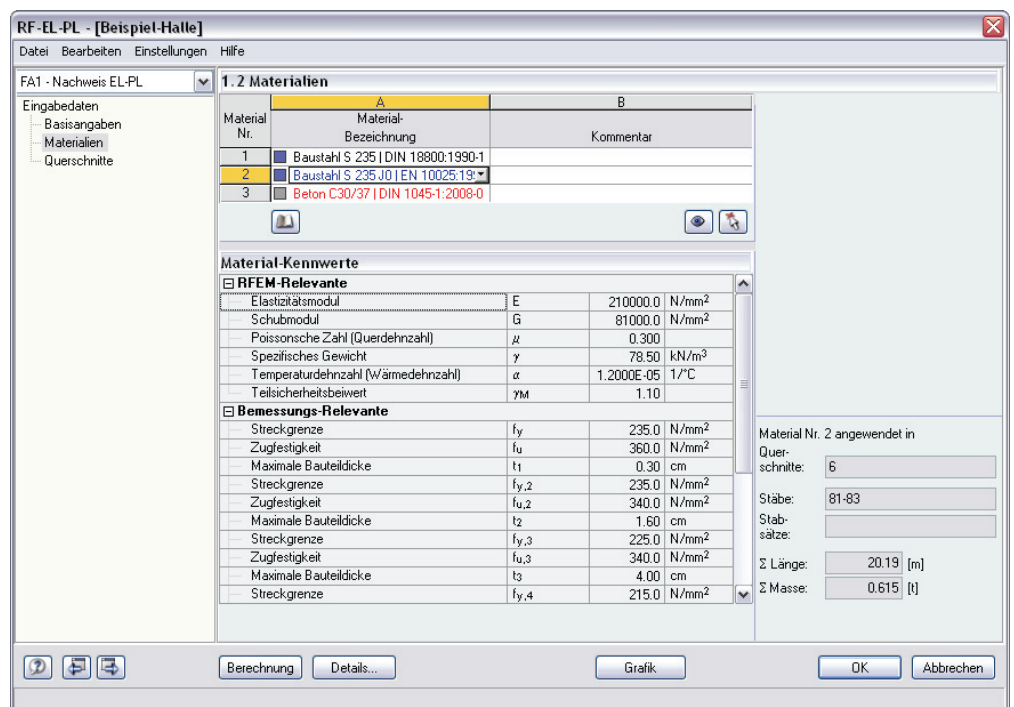


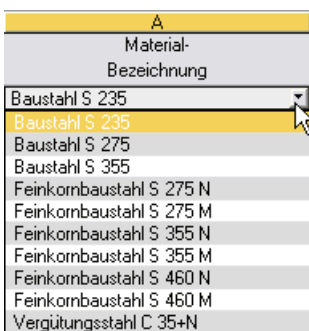
Bild 3.2: Maske 1.2 *Materialien*

Materialbezeichnung

Die in RFEM definierten Materialien sind voreingestellt. In dieser Spalte sind keine manuellen Einträge möglich. Über die Liste kann das Material geändert werden: Platzieren Sie den Cursor in Spalte A und klicken dann auf die Schaltfläche [▼] oder betätigen die Funktionstaste [F7], um die links dargestellte Liste zu öffnen. Nach der Übernahme werden die Kennwerte im unteren Abschnitt aktualisiert.

In der Liste werden dem Bemessungskonzept von RF-EL-PL entsprechend nur Materialien der Kategorie **Stahl** angeführt. Es stehen die Stahlgüten verschiedener Stahlbaunormen zur Wahl.

Die Übernahme von Materialien aus der Bibliothek ist nachfolgend beschrieben.



Materialbibliothek

Viele Materialien sind in einer Bibliothek hinterlegt. Diese wird aufgerufen über Menü

Bearbeiten → Materialbibliothek

oder die links dargestellte Schaltfläche.

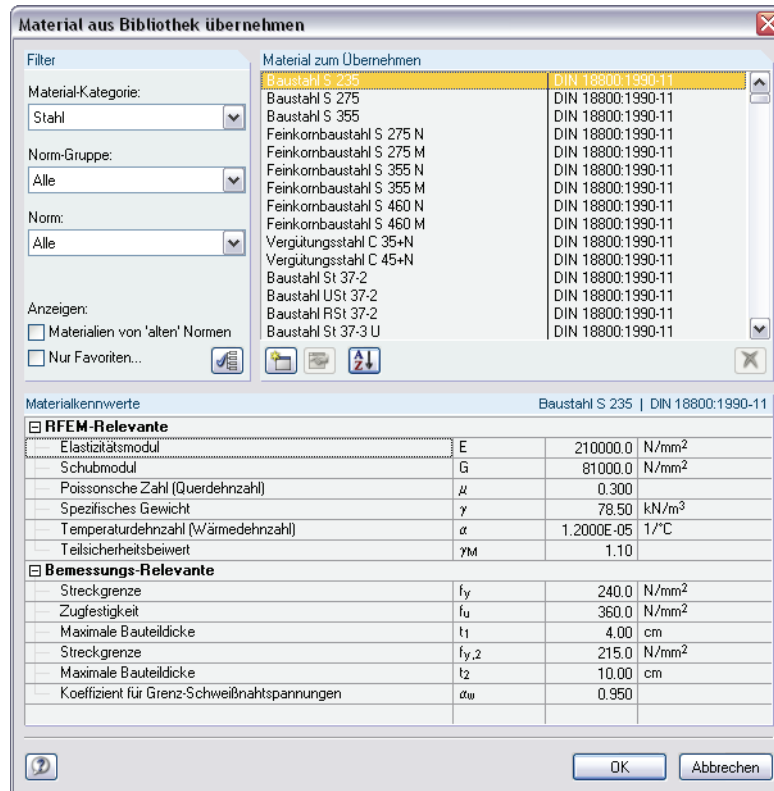


Bild 3.3: Dialog *Material aus Bibliothek übernehmen*

Im Abschnitt *Filter* ist die Materialkategorie *Stahl* voreingestellt. Die gewünschte Stahlgüte kann in der Liste *Material zum Übernehmen* ausgewählt werden; die Kennwerte lassen sich im unteren Abschnitt überprüfen.

Mit [OK] oder [↵] wird das gewählte Material in die RF-EL-PL-Maske 1.2 übernommen.



Im Kapitel 5.3 des RFEM-Handbuchs ist ausführlich beschrieben, wie Materialien gefiltert, ergänzt oder neu sortiert werden können. Auf diese Weise lässt sich über die Schaltfläche [Neu] ein neuer Stahl mit benutzerdefinierten Materialkennwerten anlegen und für spätere Anwendungszwecke speichern.

Über die Bibliothek können auch Materialien der Kategorien *Nichtrostender Stahl* oder *Gusseisen* ausgewählt werden. Beachten Sie dabei bitte, dass diese Materialien nicht vom Bemessungskonzept z. B. der DIN 18800 abgedeckt sind.

3.3 Querschnitte

In dieser Maske werden die für die Bemessung infrage kommenden Querschnitte verwaltet. Des Weiteren können hier Optimierungsparameter festgelegt werden.

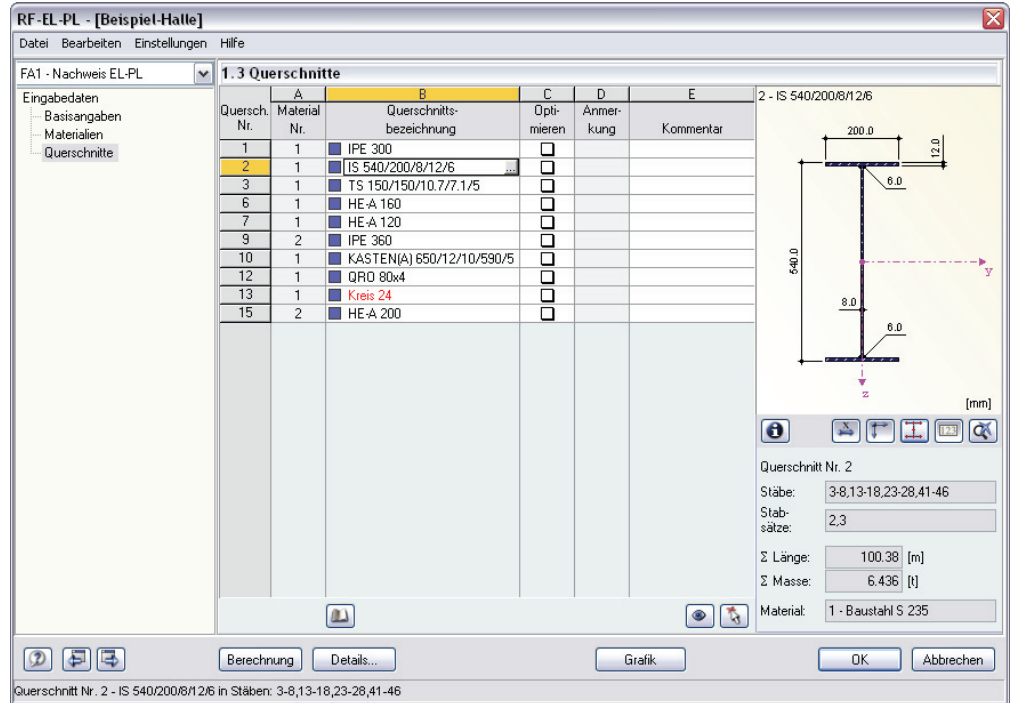


Bild 3.4: Maske 1.3 Querschnitte

Querschnittsbezeichnung

Die in RFEM verwendeten Querschnitte sind voreingestellt, ebenso die zugeordneten Materialnummern.

Die Querschnitte können für die Bemessung jederzeit abgeändert werden. Die Bezeichnung eines modifizierten Querschnitts wird in dieser Spalte in blauer Schrift hervorgehoben. Ein unzulässiges Profil (z. B. massiver Querschnitt) wird in roter Schrift dargestellt.

Um ein Profil zu ändern, ist die neue Querschnittsbezeichnung in die entsprechende Zeile einzutragen oder das Profil in der Bibliothek auszuwählen. Die Bibliothek lässt sich wie aus RFEM gewohnt mit der Schaltfläche [Querschnittsbibliothek] aufrufen. Sie können auch den Cursor in die relevante Zeile setzen und dann [...] oder die Funktionstaste [F7] drücken. Es erscheint die RFEM-Querschnittsbibliothek bzw. die Profilreihe des Eingabefeldes.

Die Auswahl von Querschnitten aus der Bibliothek ist im Kapitel 5.13 des RFEM-Handbuchs ausführlich beschrieben.

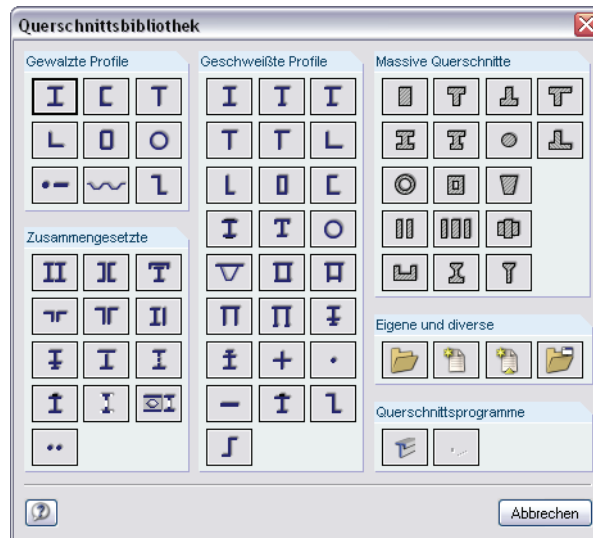
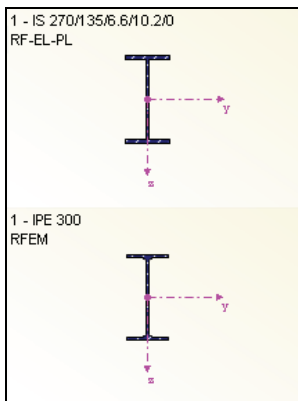


Bild 3.5: Querschnittsbibliothek



Falls unterschiedliche Querschnitte in RF-EL-PL und in RFEM vorliegen, zeigt die Grafik rechts in der Maske beide Profile an.

RF-EL-PL bemisst eine Vielzahl gewalzter und geschweißter Doppel-T-Profile, zusammengesetzter Profile sowie einfachsymmetrischer I- und Kastenquerschnitte. Es sind dies folgende Profilreihen der Bibliothek:

- Gewalzte: I, T, QR, RR, RO
- Geschweißte: S, IU, TS, TO, IV, UI, Rohr, Kasten(A), Kasten(B), Pi(A), Pi(B), KB
- Zusammengesetzte: 2I(a=0), 2UR(a=0), 2LA(a=0), ICU, ICO, IBU, IBO, SFBu, SFBu, IFBo, IFBu, ICM, KB(L).

Stab mit Voutenquerschnitt

Bei gevouteten Stäben mit unterschiedlichen Profilen am Stabanfang und Stabende werden die beiden Querschnittsnummern gemäß der Definition in RFEM in zwei Zeilen angegeben. RF-EL-PL führt auch die Nachweise für Voutenstäbe durch, sofern die gleiche Anzahl von Spannungspunkten für den Anfangs- und Endquerschnitt vorliegt. Ist dies nicht der Fall, können keine Zwischenwerte interpoliert werden. Im Verlauf der Berechnung erscheint dann eine entsprechende Fehlermeldung.

Zur Kontrolle lassen sich die Spannungspunkte eines Querschnitts mitsamt Nummerierung in der Querschnittsgrafik rechts einblenden (vgl. Abbildung neben Tabelle 3.1 auf Seite 27).



Max. Ausnutzung

Diese Spalte dient als Entscheidungshilfe für den Optimierungsprozess. Sie wird angezeigt, sobald eine Bemessung durchgeführt wurde. Anhand der Ausnutzung und der farbigen Relationsbalken wird deutlich, welche Profile kaum ausgenutzt und somit überdimensioniert bzw. zu stark beansprucht und damit unterdimensioniert sind.

Optimieren

Jedes Profil kann einem Optimierungsprozess unterzogen werden. Dabei wird mit den RFEM-Schnittgrößen das Profil der gleichen Querschnittsreihe ermittelt, das der maximalen Ausnutzung am nächsten kommt, die im Register *Sonstiges* des Dialogs *Details* vorgegeben ist (siehe Bild 4.1, Seite 28).

Um einen Querschnitt zu optimieren, ist das entsprechende Kontrollfeld in Spalte C bzw. D zu aktivieren. Empfehlungen zur Profilloptimierung finden Sie im Kapitel 8.2 auf Seite 48.

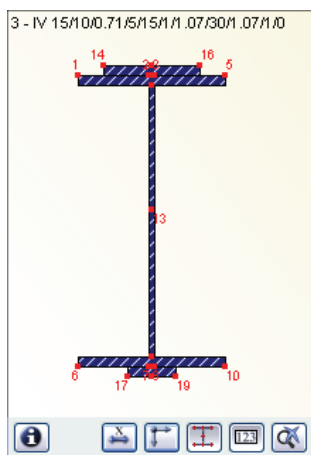
Anmerkung

In dieser Spalte werden Hinweise in Form von Fußnoten angezeigt, die am unteren Ende der Querschnittsliste näher erläutert sind.

Querschnittsgrafik

Im rechten Teil der Maske 1.3 wird die Grafik des aktuellen Querschnitts angezeigt. Die Darstellungsgröße der Profilgrafik lässt sich mit dem Maus-Scrollrad anpassen (Zoomfunktion).

Die Schaltflächen unterhalb der Profilgrafik sind mit folgenden Funktionen belegt:









Schaltfläche	Funktion
	Der Dialog <i>Info über Querschnitt</i> mit den Profildetails wird aufgerufen.
	Die Bemaßung des Querschnitts wird ein- oder ausgeblendet.
	Die Hauptachsen des Profils werden ein- oder ausgeschaltet.
	Die Spannungspunkte werden angezeigt oder ausgeblendet.
	Die Nummerierung der Spannungspunkte wird ein- oder ausgeblendet.
	Die Gesamtansicht des Querschnitts wird wiederhergestellt.

Tabelle 3.1: Schaltflächen der Querschnittsgrafik

4. Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden. Die Bemessung erfolgt mit den in RFEM ermittelten Schnittgrößen. Vorher jedoch empfiehlt sich eine kurze Überprüfung der Berechnungsparameter.

4.1 Berechnungsdetails

Details...

In jeder Maske kann mit der Schaltfläche [Details] der Dialog zur Kontrolle der Berechnungsparameter aufgerufen werden.

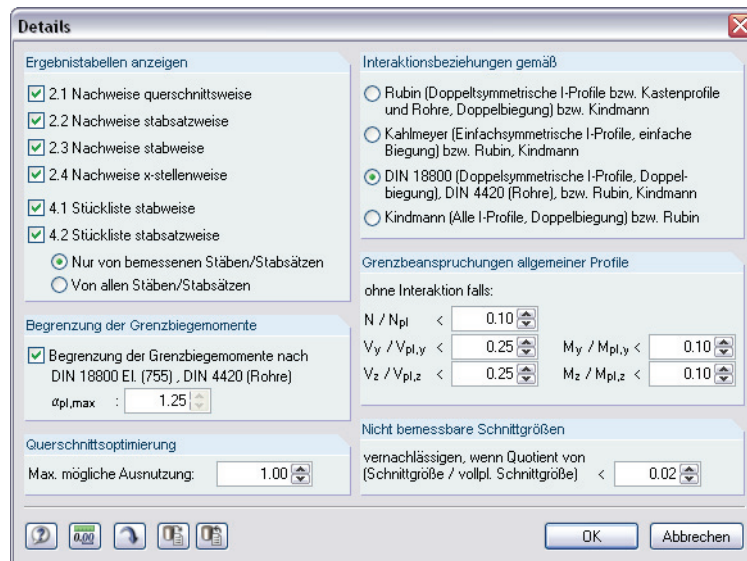


Bild 4.1: Dialog Details

Ergebnistabellen anzeigen

Dieser Abschnitt steuert die Anzeige der Ergebnismasken einschließlich Stückliste. Die einzelnen Ergebnismasken sind im Kapitel 5 beschrieben.

Begrenzung der Grenzbiegemomente

Das Kontrollfeld ist nur zugänglich, wenn die Interaktionen gemäß DIN 18800 untersucht werden. Die Norm fordert in El. (755), dass die Grenzbiegemomente auf den 1,25fachen Wert des elastischen Grenzbiegemoments zu begrenzen sind. Beim Aktivieren dieser Option erscheint ein Eingabefeld, in dem der Faktor $\alpha_{pl, max}$ ggf. angepasst werden kann.

Bei Rohren wird der plastische Formbeiwert zum Nachweis gemäß DIN 4420 benutzt.

Querschnittsoptimierung

Falls die Optimierung nicht auf eine maximale Ausnutzung von 100 % abzielt, so kann in diesem Eingabefeld ein anderer Grenzwert vorgegeben werden.

Interaktionsbeziehungen

Die Interaktionsbeziehungen können nach folgenden Verfahren untersucht werden:

- RUBIN [4], [5] → Kapitel 2.2, Seite 9
- KAHLMEYER [6] → Kapitel 2.3, Seite 12
- DIN 18800 [1] bzw. DIN 4420 [2] → Kapitel 2.4, Seite 14
- KINDMANN [8], [9] → Kapitel 2.5, Seite 16



Falls die Voraussetzung für die Verfahren nach KAHLMEYER, DIN 18800 oder KINDMANN nicht erfüllt sind, finden automatisch die Interaktionsbeziehungen nach RUBIN Anwendung.

Grenzbeanspruchungen allgemeiner Profile

RF-EL-PL führt den Nachweis für einfach- und doppelsymmetrische I-Profile, Kastenprofile und Rohre. Liegt ein Querschnitt vor, der mit keinem der vier Nachweisverfahren erfasst wird, so können die Grenzbeanspruchung ohne Interaktionsbeziehungen ermittelt werden. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die Nachweisquotienten von Normalkraft, Querkräften oder Momenten innerhalb gewisser Schranken liegen: Falls von den fünf Quotienten vier Bedingungen erfüllt sind, wird der plastische Nachweis nach der fünften und damit maßgebenden Bedingung geführt.

Durch Anpassung der Schranken für Querkräfte und Momente lässt sich beispielsweise ein DUENQ-Profil plastisch auf Normalkraft bemessen.

Nicht bemessbare Schnittgrößen

Wenn der Quotient von Schnittgröße zu vollplastischer Schnittgröße einen Wert unterschreitet, wird diese Schnittgröße beim Nachweis ausgeklammert. Auf diese Weise kann z. B. ein geringes Moment um die schwache Achse vernachlässigt und damit ein Verfahren für zweiachsige Biegung umgangen werden. Der Nachweis ist so nach KAHLMEYER möglich.

Der Quotient ist global mit 0,02 voreingestellt.



Die Schaltfläche [Standard] stellt die programmseitigen Voreinstellungen wieder her.

4.2 Start der Berechnung

Berechnung

In jeder der Eingabemasken des Modul RF-EL-PL kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

RF-EL-PL sucht nach den Ergebnissen der nachzuweisenden Lastfälle und Lastfallgruppen und -kombinationen. Werden diese nicht gefunden, startet zunächst die RFEM-Berechnung zur Ermittlung der bemessungsrelevanten Schnittgrößen. Dabei wird auf die vorgegebenen Berechnungsparameter von RFEM zurückgegriffen.

Falls eine Optimierung der Querschnitte (siehe Kapitel 8.2, Seite 48) erfolgen soll, werden die erforderlichen Profile ermittelt und die entsprechenden Nachweise geführt.

Auch aus der RFEM-Oberfläche kann die Berechnung der RF-EL-PL-Ergebnisse gestartet werden: Die Zusatzmodule werden im Dialog *Zu berechnen* wie ein Lastfall oder eine Lastfallgruppe aufgelistet. Dieser Dialog wird in RFEM aufgerufen über Menü

Berechnung → Zu berechnen.

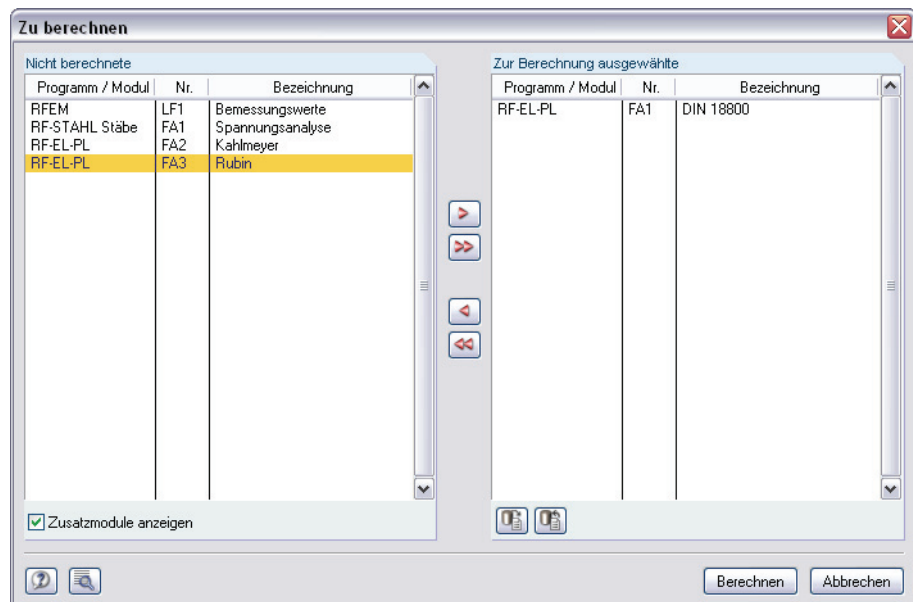


Bild 4.2: Dialog *Zu berechnen*

Falls die RF-EL-PL-Bemessungsfälle in der Liste *Nicht berechnet* fehlen, muss das Kontrollfeld *Zusatzmodule anzeigen* am Ende der Liste aktiviert werden.

Mit der Schaltfläche [►] werden die selektierten RF-EL-PL-Fälle in die rechte Liste übergeben. Die Berechnung wird dann mit der entsprechenden Schaltfläche gestartet.

Ein Bemessungsfall kann auch über die Liste der Symbolleiste direkt berechnet werden: Stellen Sie den RF-EL-PL-Fall ein und klicken dann auf die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus].

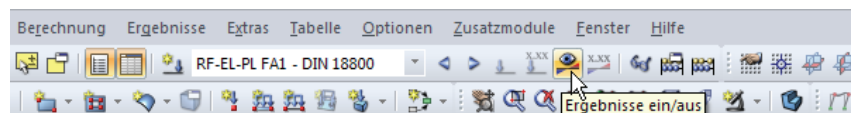


Bild 4.3: Direkte Berechnung eines RF-EL-PL-Bemessungsfalls in RFEM

Der Ablauf der Berechnung kann anschließend in einem Dialog verfolgt werden.

Berechnen

5. Ergebnisse

Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske 2.1 *Nachweise querschnittsweise*. Im oberen Teil dieser Maske wird eine Übersicht mit den maximalen Ausnutzungen eines jeden Querschnitts angezeigt. Der untere Teil enthält detaillierte Angaben zu den Querschnittswerten, Bemessungsschnittgrößen, plastischen Schnittgrößen, (c/t)-Verhältnissen und Nachweisen für den oben gewählten Querschnitt.

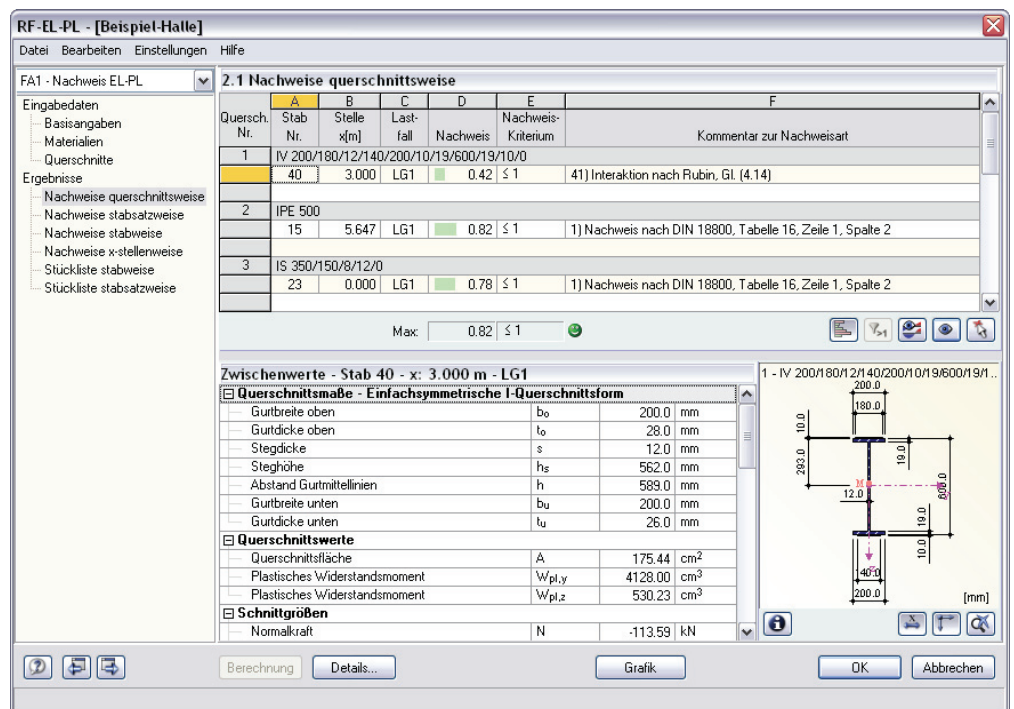


Die Masken 2.1 bis 2.4 geben die Nachweise nach diversen Kriterien geordnet aus. In den Ergebnismasken 4.1 und 4.2 werden die Stücklisten stab- oder stabsatzbezogen angezeigt. Jede der Masken kann über den RF-EL-PL-Navigator angesteuert werden. Alternativ werden die beiden links dargestellten Schaltflächen oder die Funktionstasten [F2] und [F3] benutzt, um eine Maske vor- oder zurückzublättern.

[OK] sichert die Ergebnisse. Das Modul RF-EL-PL wird verlassen und man gelangt zurück in das RFEM-Arbeitsfenster.

Das Kapitel 5 *Ergebnisse* stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Überprüfung der Resultate ist im folgenden Kapitel 6 *Ergebnisauswertung* ab Seite 36 beschrieben.

5.1 Nachweise querschnittsweise



RF-EL-PL - [Beispiel-Halle]

Datei Bearbeiten Einstellungen Hilfe

FA1 - Nachweis EL-PL

2.1 Nachweise querschnittsweise

Quersch. Nr.	A	B	C	D	E	F
Stab Nr.	Stelle x(m)	Lastfall	Nachweis	Kriterium	Kommentar zur Nachweisart	
1	IV 200/180/12/140/200/10/19/600/19/10/0					
40	3.000	LG1	0.42	≤ 1	41) Interaktion nach Rubin, Gl. (4.14)	
2	IPE 500					
15	5.647	LG1	0.82	≤ 1	1) Nachweis nach DIN 18800, Tabelle 16, Zeile 1, Spalte 2	
3	IS 350/150/8/12/0					
23	0.000	LG1	0.78	≤ 1	1) Nachweis nach DIN 18800, Tabelle 16, Zeile 1, Spalte 2	

Max: 0.82 ≤ 1

Zwischenwerte - Stab 40 - x: 3.000 m - LG1

Querschnittsmaße - Einfachsymmetrische I-Querschnittsform

Gurtbreite oben	b _o	200.0	mm
Gurtdicke oben	t _o	28.0	mm
Stegdicke	s	12.0	mm
Steghöhe	h _s	562.0	mm
Abstand Gurtmittellinien	h	589.0	mm
Gurtbreite unten	b _u	200.0	mm
Gurtdicke unten	t _u	26.0	mm

Querschnittswerte

Querschnittsfläche	A	175.44	cm ²
Plastisches Widerstandsmoment	W _{pl,y}	4128.00	cm ³
Plastisches Widerstandsmoment	W _{pl,z}	530.23	cm ³

Schnittgrößen

Normalkraft	N	-113.59	kN
-------------	---	---------	----

1 - IV 200/180/12/140/200/10/19/600/19/10/0

Berechnung Details... Grafik OK Abbrechen

Bild 5.1: Maske 2.1 *Nachweise querschnittsweise*

Die Maske weist die maximalen Nachweisquotienten für alle nachgewiesenen Querschnitte aus, die sich mit den Schnittgrößen der maßgebenden Einwirkungen oder Kombinationen ergeben. Die Auflistung erfolgt nach Querschnitten geordnet.

Stab Nr.

Für jeden bemessenen Lastfall bzw. jede bemessene LF-Gruppe oder LF-Kombination wird die Nummer des Stabes angegeben, der jeweils das maximale Nachweis-kriterium aufweist.

Stelle x

Es wird jeweils die x-Stelle im Stab angegeben, für die das größte Nachweiskriterium ermittelt wurde. Zur tabellarischen Ausgabe werden diese RFEM-Stabstellen x herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RFEM-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Optionen*)
- Extremwerte der Schnittgrößen

Lastfall

In dieser Spalte werden die Nummern der Lastfälle, Lastfallgruppen und -kombinationen angegeben, die jeweils für den Nachweis maßgebend sind.

Nachweis

In dieser Spalte werden die maximalen Nachweisquotienten ausgewiesen. Sie drücken das Verhältnis von vorhandenem Nachweis zum Nachweiskriterium aus. Die Nachweise erfolgen nach dem Verfahren, das im Dialog *Details* eingestellt ist (siehe Bild 4.1, Seite 28).

Die farbigen Balken veranschaulichen die Ausnutzungen eines jeden Querschnitts.

Nachweiskriterium

Die Nachweisbedingung ist erfüllt, wenn das Interaktionskriterium kleiner oder gleich 1 ist.

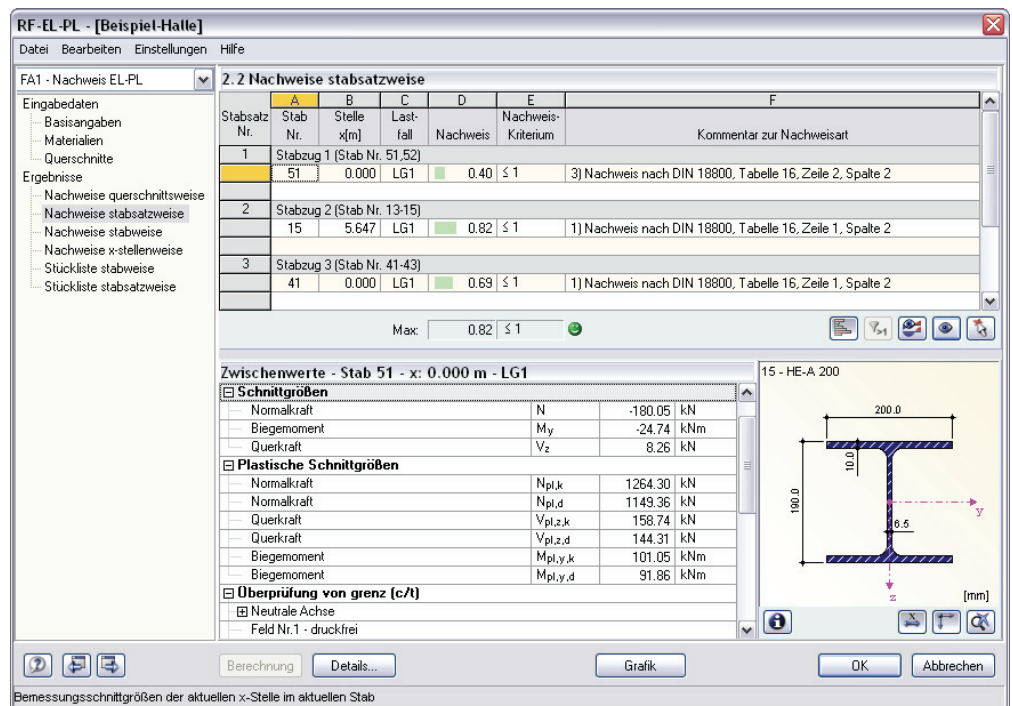
Kommentar zur Nachweisart

In der letzten Spalte wird die Bemessungsgrundlage erläutert.

Details...

Max: 0.92 ≤ 1

5.2 Nachweise stabsatzweise



2.2 Nachweise stabsatzweise

Stabsatz Nr.	Stab Nr.	Stelle x[m]	Lastfall	Nachweis	Nachweis-Kriterium	Kommentar zur Nachweisart
1	Stabzug 1 (Stab Nr. 51-52)					
	51	0.000	LG1	0.40	≤ 1	3) Nachweis nach DIN 18800, Tabelle 16, Zeile 2, Spalte 2
2	Stabzug 2 (Stab Nr. 13-15)					
	15	5.647	LG1	0.82	≤ 1	1) Nachweis nach DIN 18800, Tabelle 16, Zeile 1, Spalte 2
3	Stabzug 3 (Stab Nr. 41-43)					
	41	0.000	LG1	0.69	≤ 1	1) Nachweis nach DIN 18800, Tabelle 16, Zeile 1, Spalte 2

Max: 0.82 ≤ 1

Zwischenwerte - Stab 51 - x: 0.000 m - LG1

Schnittgrößen

Größe	Einheit	Wert
Normalkraft	N	-180.05 kN
Biegemoment	M _y	-24.74 kNm
Querkraft	V _z	8.26 kN

Plastische Schnittgrößen

Größe	Einheit	Wert
Normalkraft	N _{pl,k}	1264.30 kN
Normalkraft	N _{pl,d}	1149.36 kN
Querkraft	V _{pl,z,k}	158.74 kN
Querkraft	V _{pl,z,d}	144.31 kN
Biegemoment	M _{pl,y,k}	101.05 kNm
Biegemoment	M _{pl,y,d}	91.86 kNm

Überprüfung von grenz (c/t)

- ☐ Neutrale Achse
- ☐ Feld Nr.1 - druckfrei

15 - HE-A 200

200.0

10.0

8.5

100.0

[mm]

Bild 5.2: Maske 2.2 Nachweise stabsatzweise

In dieser Maske werden die maximalen Nachweise nach Stabsätzen geordnet aufgelistet. Die einzelnen Spalten sind im vorherigen Kapitel 5.1 erläutert.

5.3 Nachweise stabweise

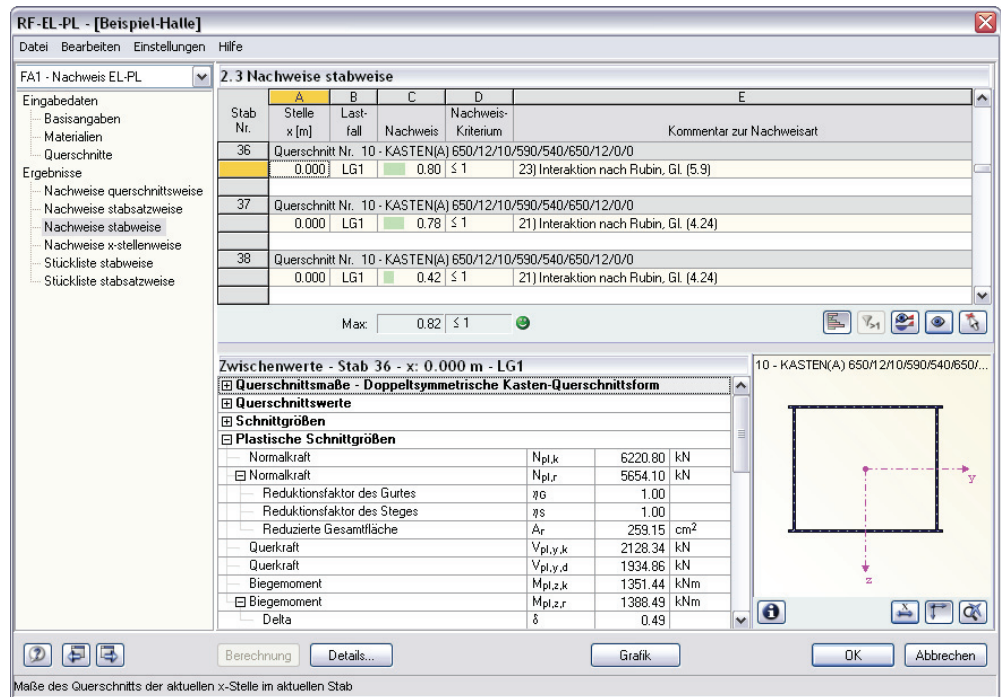


Bild 5.3: Maske 2.3 Nachweise stabweise

Diese Maske listet die Nachweise nach Stäben geordnet auf.

5.4 Nachweise x-stellenweise

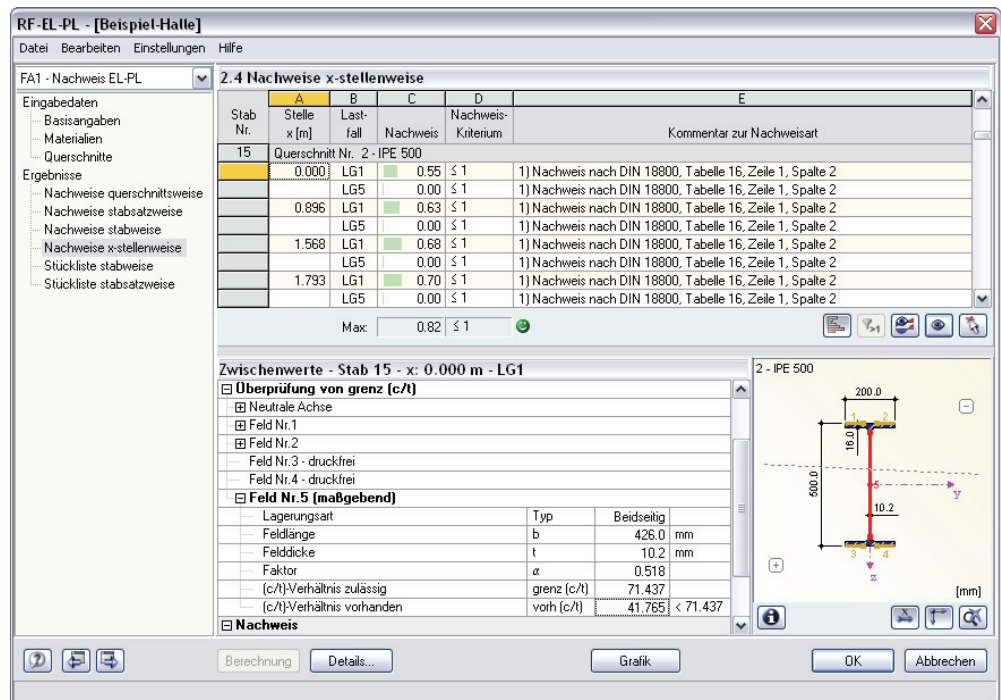


Bild 5.4: Maske 2.4 Nachweise x-stellenweise

Die Nachweise werden nach x-Stellen geordnet ausgegeben (siehe Kapitel 5.1, Seite 32).

5.5 Stückliste stabweise

Die Ausgabe wird durch eine Stückliste abgerundet.

RF-EL-PL - [Beispiel-Halle]

Datei Bearbeiten Einstellungen Hilfe

FA1 - Nachweis EL-PL

4.1 Stückliste stabweise

Position Nr.	Querschnitt	Anzahl Stäbe	Länge [m]	G-Länge [m]	Oberfläche [m²]	Volumen [m³]	E-Gewicht [kg/m]	Gewicht [kg]	G-Gewicht [t]
1	1 - IV 200/180/12/140/200/10/	6	6.00	36.00	72.58	0.63	137.72	826.32	4.958
2	3 - IS 350/150/8/12/0	4	3.01	12.05	15.47	0.07	48.73	146.75	0.587
3	2 - IPE 500	8	3.26	26.10	45.52	0.30	91.06	297.08	2.377
4	2 - IPE 500	8	6.27	50.19	87.53	0.58	91.06	571.31	4.570
5	2 - IPE 500	4	3.01	12.05	21.01	0.14	91.06	274.21	1.097
6	1 - IV 200/180/12/140/200/10/	4	3.00	12.00	24.19	0.21	137.72	413.16	1.653
7	10 - KASTEN(A) 650/12/10/590	3	3.00	9.00	22.14	0.23	203.47	610.42	1.831
8	10 - KASTEN(A) 650/12/10/590	2	3.55	7.09	17.45	0.18	203.47	721.51	1.443
9	10 - KASTEN(A) 650/12/10/590	1	4.09	4.09	10.07	0.11	203.47	833.01	0.833
10	15 - HE-A 200	4	3.00	12.00	13.68	0.06	42.23	126.70	0.507
11	6 - HE-A 160	3	3.00	9.00	8.15	0.03	30.46	91.37	0.274
12	6 - HE-A 160	2	3.55	7.09	6.43	0.03	30.46	108.00	0.216
13	6 - HE-A 160	1	4.09	4.09	3.71	0.02	30.46	124.70	0.125
14	7 - HE-A 120	4	6.27	25.10	16.99	0.06	19.86	124.60	0.498
15	9 - IPE 360	8	6.25	50.00	67.65	0.36	57.07	356.68	2.853
16	6 - HE-A 160	2	6.55	13.09	11.86	0.05	30.46	199.38	0.399
17	6 - HE-A 160	1	7.09	7.09	6.43	0.03	30.46	216.07	0.216
18	12 - QRO 80x4	25	5.00	125.00	39.13	0.15	9.42	47.10	1.178
19	13 - Kreis 24	4	7.81	31.24	2.36	0.01	3.55	27.74	0.111
20	13 - Kreis 24	8	8.02	64.18	4.84	0.03	3.55	28.49	0.228
Summe		102		516.46	497.17	3.31			25.954

Berechnung Details... Grafik OK Abbrechen

Bild 5.5: Maske 4.1 Stückliste stabweise

Details...

Als Standard werden in der Liste nur die bemessenen Stäbe erfasst. Wird eine Stückliste für alle Stäbe der Struktur gewünscht, so kann dies im Dialog *Details* eingestellt werden (siehe Bild 4.1, Seite 28).

Position Nr.

Es werden automatisch Positionsnummern für gleichartige Stäbe vergeben.

Querschnitt

In dieser Spalte werden die Querschnittsbezeichnungen aufgelistet.

Anzahl Stäbe

Es wird für jede Position angegeben, wie viele gleichartige Stäbe zur Verwendung kommen.

Länge

In dieser Spalte wird die Länge eines einzelnen Stabes ausgewiesen.

Gesamtlänge

Diese Spalte stellt das Produkt aus den beiden vorherigen Spalten dar.

Oberfläche

Es wird die auf die Gesamtlänge bezogene Oberfläche der jeweiligen Positionen angegeben, die aus der *Mantelfläche* der Profile ermittelt wird. Diese kann in den Masken 1.3 und 2.1 bis 2.5 bei den Querschnittsinformationen kontrolliert werden.

Volumen

Das Volumen einer Position ermittelt sich aus der Querschnittsfläche und der Gesamtlänge.



E-Gewicht

Das *Einheitsgewicht* des Querschnitts stellt die auf den Meter Länge bezogene Masse dar. Bei Voutenquerschnitten erfolgt eine Mittelung der beiden Profilkennwerte.

Gewicht

Diese Spalte ermittelt sich aus dem Produkt der Spalten C und G.

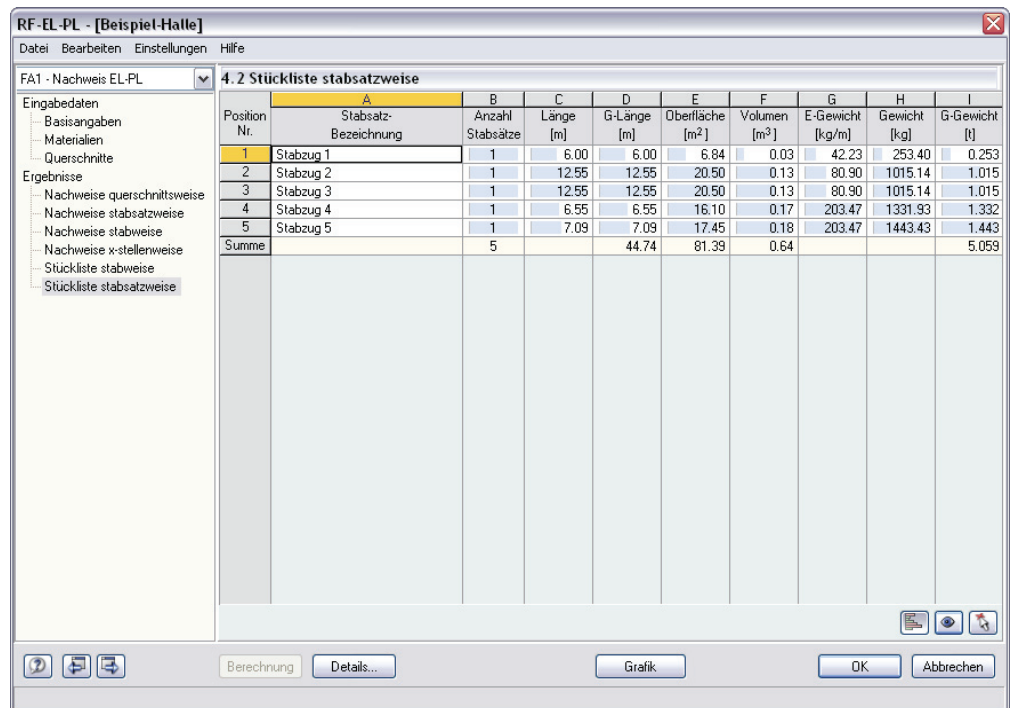
Gesamtgewicht

In der letzten Spalte wird das Gesamtgewicht der jeweiligen Position angegeben.

Summe

Am unteren Ende der Liste findet sich eine Bilanz mit den Summen der Spalten B, D, E, F und I. Das Feld *Gesamtgewicht* gibt Aufschluss über die insgesamt benötigte Stahlmasse.

5.6 Stückliste stabsatzweise



Position Nr.	Stabsatz-Bezeichnung	Anzahl Stabsätze	Länge [m]	G-Länge [m]	Oberfläche [m²]	Volumen [m³]	E-Gewicht [kg/m]	Gewicht [kg]	G-Gewicht [t]
1	Stabzug 1	1	6.00	6.00	6.84	0.03	42.23	253.40	0.253
2	Stabzug 2	1	12.55	12.55	20.50	0.13	80.90	1015.14	1.015
3	Stabzug 3	1	12.55	12.55	20.50	0.13	80.90	1015.14	1.015
4	Stabzug 4	1	6.55	6.55	16.10	0.17	203.47	1331.93	1.332
5	Stabzug 5	1	7.09	7.09	17.45	0.18	203.47	1443.43	1.443
Summe		5		44.74	81.39	0.64			5.059

Bild 5.6: Maske 4.2 *Stückliste stabsatzweise*

Die letzte RF-EL-PL-Maske wird angezeigt, wenn Stabsätze zur Bemessung ausgewählt wurden. Die stabsatzweise Ausgabe bietet den Vorteil einer zusammenfassenden Stückliste für eine ganze Baugruppe, z. B. einen Riegel.

Die einzelnen Spalten sind im vorherigen Kapitel erläutert. Bei unterschiedlichen Querschnitten im Stabsatz werden Oberfläche, Volumen und Einheitsgewicht gemittelt.

6. Ergebnisauswertung

Nach der Bemessung bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Ergebnisse auszuwerten.

6.1 Zwischenergebnisse

Die Ergebnismasken 2.1 bis 2.4 sind zweigeteilt. Der obere Abschnitt enthält eine tabellarische Übersicht der Nachweise, die nach Querschnitten, Stäben oder x-Stellen geordnet ist. Im unteren Abschnitt werden die Zwischenergebnisse des aktuellen (d. h. des oben aktiven) Stabes mit allen nachweisrelevanten Parametern detailliert ausgewiesen.

Die Kapitel in dieser Baumstruktur können mit [+] aufgeklappt und mit [-] geschlossen werden:

- Querschnittsmaße
- Querschnittswerte
- Schnittgrößen
- Plastische Schnittgrößen
- Überprüfung von $\gamma_{c/t}$
- Nachweis

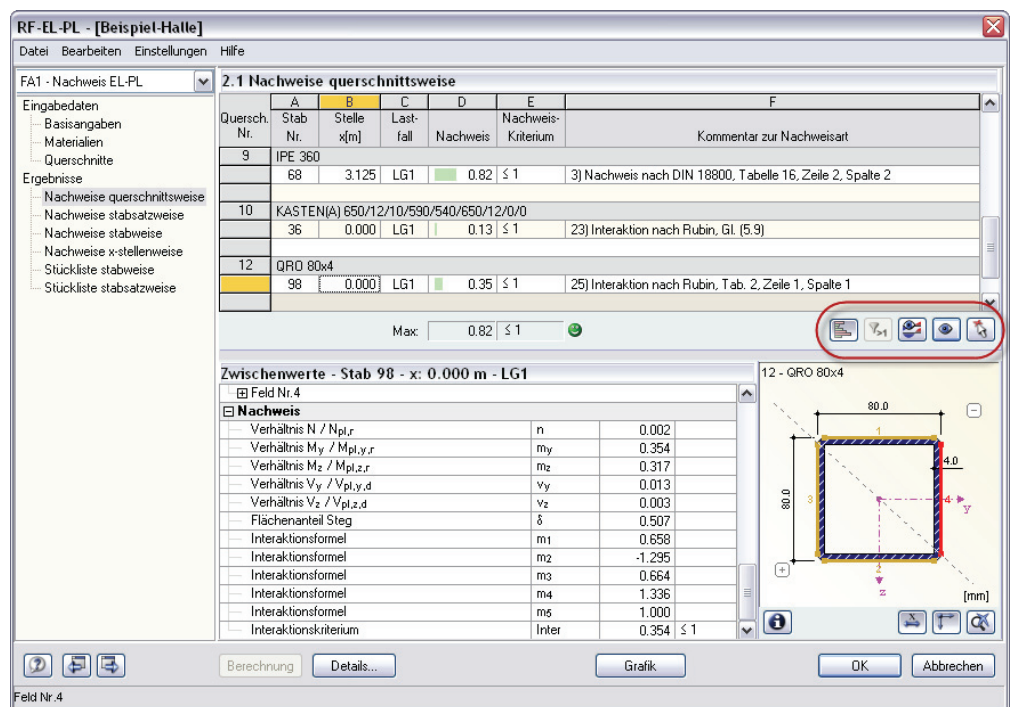


Bild 6.1: Nachweise mit Zwischenwerten, Schaltflächen zur Ergebnisauswertung

Hilfreich für die Auswertung erweisen sich auch die Schaltflächen, die unterhalb der Tabellen angeboten werden (Erläuterung auf folgender Seite).

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:






Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Relationsbalken	Blendet in den Ergebnismasken die farbigen Bezugsskalen ein und aus
	Überschreitung	Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzung größer als 1 und damit der Nachweis nicht erfüllt ist
	Ergebnisverläufe	Öffnet das Diagramm <i>Ergebnisverläufe im Stab</i> → Kapitel 6.3, Seite 40
	Sichtmodus	Ermöglicht den Sprung in das RFEM-Arbeitsfenster, um dort eine andere Ansicht einzustellen
	Stabauswahl	Ermöglicht die Auswahl eines Stabs im RFEM-Fenster, um dessen Nachweis in der Tabelle anzuzeigen

Tabelle 6.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5

6.2 Ergebnisse am RFEM-Modell

Zur Auswertung der Nachweise kann auch das RFEM-Arbeitsfenster genutzt werden.

RFEM-Hintergrundgrafik

Die RFEM-Grafik im Hintergrund kann hilfreich sein, um die Lage eines bestimmten Stabes im Modell zu kontrollieren. Der in der RF-EL-PL-Ergebnismaske selektierte Stab wird in der RFEM-Hintergrundgrafik farbig hervorgehoben. Ein Pfeil kennzeichnet zusätzlich die x-Stelle am Stab, die in der aktuellen Tabellenzeile von RF-EL-PL als maßgebend ausgewiesen ist.

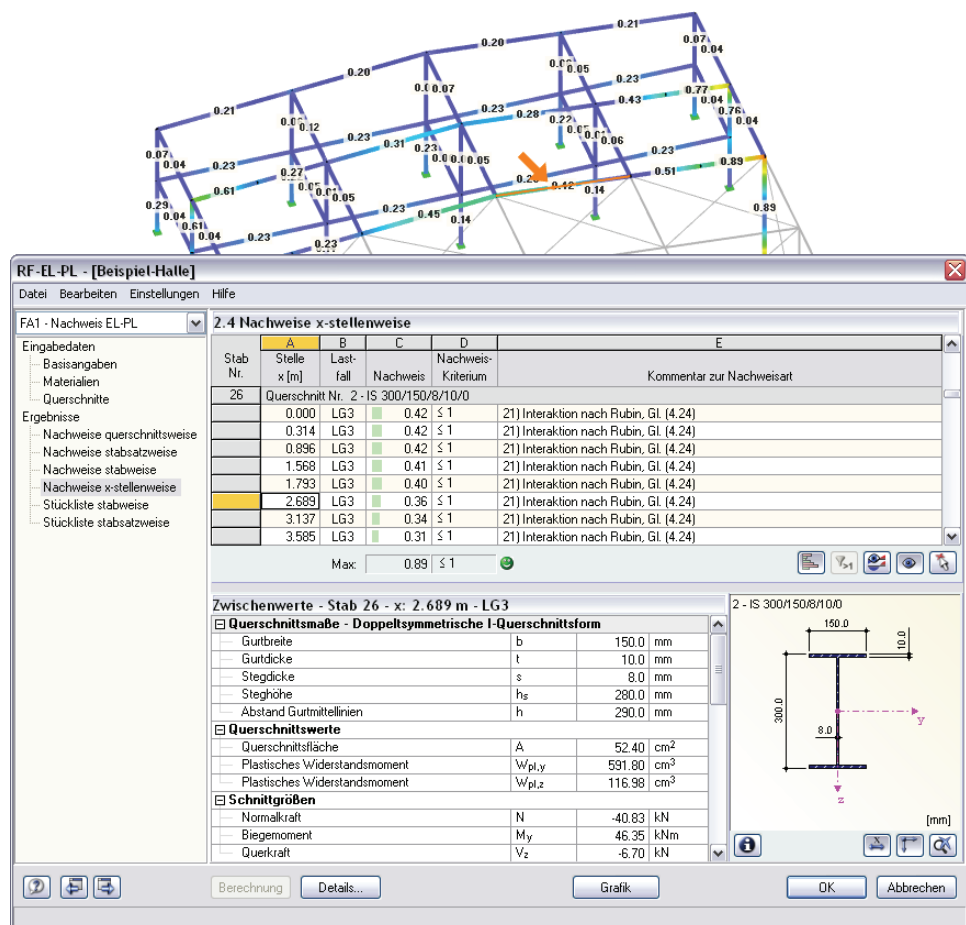


Bild 6.2: Kennzeichnung des Stabes und der aktuellen Stelle x im RFEM-Modell



Falls sich eine ungünstige Ansicht durch das Verschieben des RF-EL-PL-Fensters nicht verbessern lässt, kann über die Schaltfläche [Ansicht ändern] der so genannte *Sichtmodus* aktiviert werden: Das RF-EL-PL-Fenster wird ausgeblendet und in der RFEM-Oberfläche kann nun die Ansicht angepasst werden. Im Sichtmodus stehen die Funktionen des Menüs *Ansicht* zur Verfügung, z. B. Zoomen, Verschieben oder Drehen der Ansicht.

RFEM-Arbeitsfenster

Die Nachweisquotienten und Verhältnisse von Schnittgrößen zu plastischen Schnittgrößen lassen sich auch direkt am Strukturmodell visualisieren: Klicken Sie die Schaltfläche [Grafik] an, um das Modul RF-EL-PL zu verlassen. Im RFEM-Arbeitsfenster werden nun die einzelnen Nachweisgrößen grafisch wie die Schnittgrößen oder Verformungen eines RFEM-Lastfalls dargestellt.

Der *Ergebnisse*-Navigator ist an die Nachweise des Moduls RF-EL-PL angepasst. Dort stehen die Ausnutzungen bezogen auf das Nachweiskriterium sowie die Schnittgrößen- und (c/t)-Verhältnisse zur Wahl.

Grafik

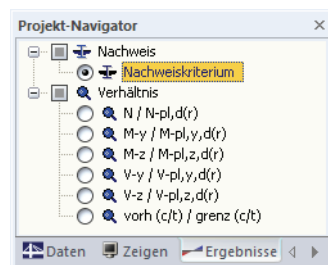


Bild 6.3: *Ergebnisse*-Navigator von RF-EL-PL

Wie bei den RFEM-Schnittgrößen blendet die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] die Darstellung der Bemessungsergebnisse ein oder aus. Die rechts davon angeordnete Schaltfläche [Ergebnisse mit Werten anzeigen] steuert die Anzeige der Ergebnismerte in der Grafik.

Da die RFEM-Tabellen für die Auswertung der Ergebnisse von RF-EL-PL keine Funktion haben, können sie ggf. deaktiviert werden.

Die Bemessungsfälle lassen sich wie gewohnt in der Liste der RFEM-Menüleiste einstellen.

Die Darstellung der Ergebnisse wird im *Zeigen*-Navigator über den Eintrag *Ergebnisse* → *Stäbe* gesteuert. Als Standard werden die Nachweise und Quotienten *zweifarb* angezeigt.

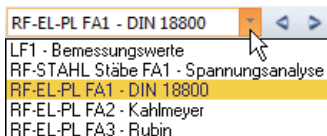


Bild 6.4: *Zeigen*-Navigator: Ergebnisse → Stäbe



Bei einer mehrfarbigen Darstellung (Optionen *Querschnitte farbig* oder *Mehrfarbig*) steht das Farbpanel mit den üblichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Funktionen sind im RFEM-Handbuch, Kapitel 4.4.6 ab Seite 77 ausführlich beschrieben.

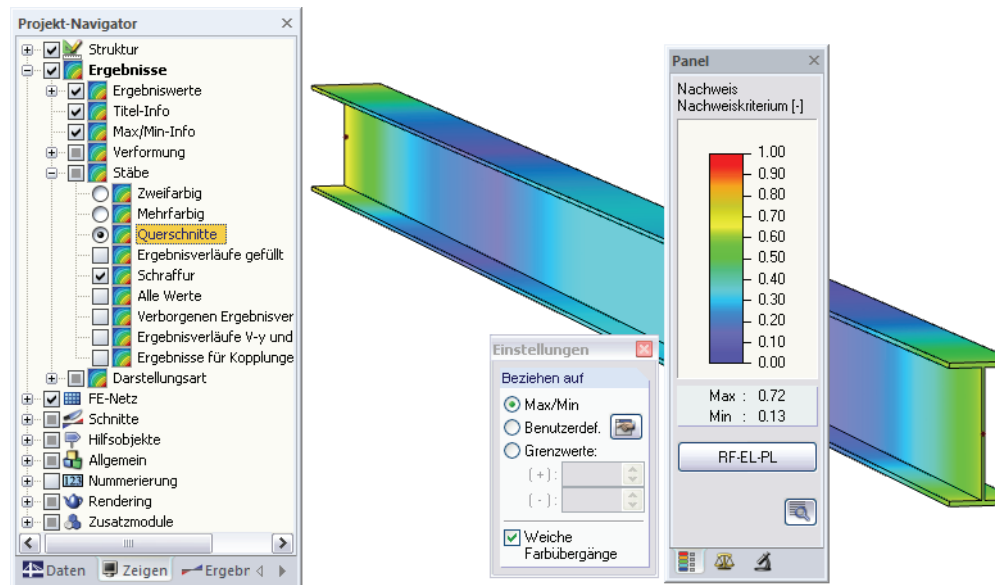


Bild 6.5: Nachweis mit Darstellungsoption *Querschnitte*

Wie bei den Stabschnittgrößen kann im Register *Faktoren* eine Skalierung der Bemessungsergebnisse vorgenommen werden. Gibt man dort im Eingabefeld *Stabverläufe* den Faktor 0 vor, erfolgt die Darstellung der Nachweise ohne Überhöhung in einer stärkeren Liniendicke.

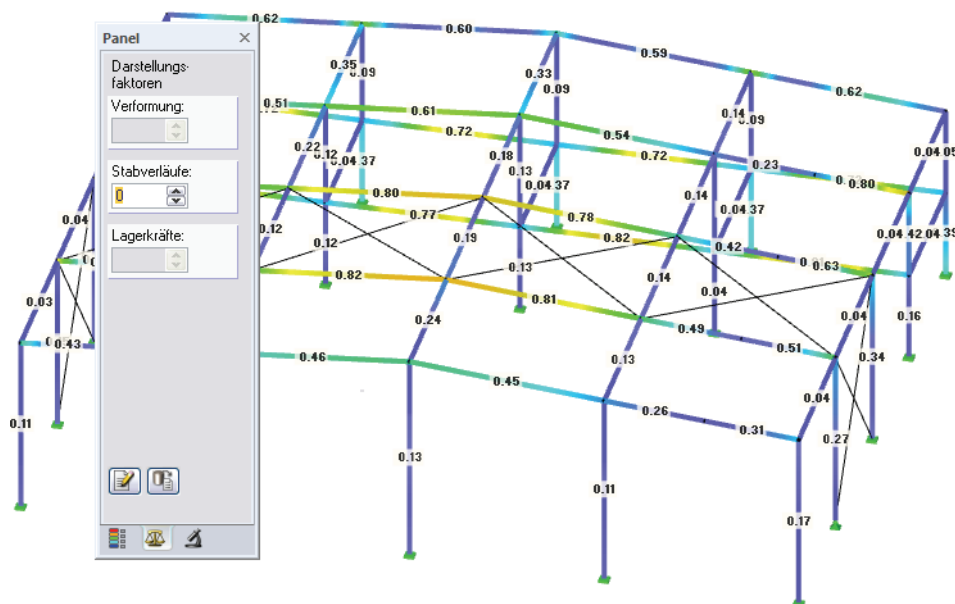


Bild 6.6: Panel-Register *Faktoren*

Die Grafiken lassen sich wie RFEM-Grafiken in das zentrale Ausdruckprotokoll übertragen (siehe Kapitel 7.2, Seite 44).

RF-EL-PL

Die Rückkehr in das Modul RF-EL-PL erfolgt über die Schaltfläche [RF-EL-PL] im Panel.

6.3 Ergebnisverläufe



Das Ergebnisdiagramm ist nützlich, um für einen Stab den Ergebnisverlauf grafisch abzulesen. Selektieren Sie den Stab in der Ergebnismaske von RF-EL-PL, indem Sie den Cursor in die Tabellenzeile des Stabes setzen und rufen das Ergebnisdiagramm über die links gezeigte Schaltfläche auf. Sie befindet sich unterhalb der Querschnittsgrafik (siehe Bild 6.1, Seite 36).

In der RFEM-Grafik sind die Ergebnisverläufe zugänglich über Menü



Ergebnisse → Ergebnisverläufe an selektierten Stäben

oder die entsprechende Schaltfläche in der RFEM-Symbolleiste.

Es öffnet sich ein Fenster, das den Verlauf der Nachweise am gewählten Stab anzeigt.

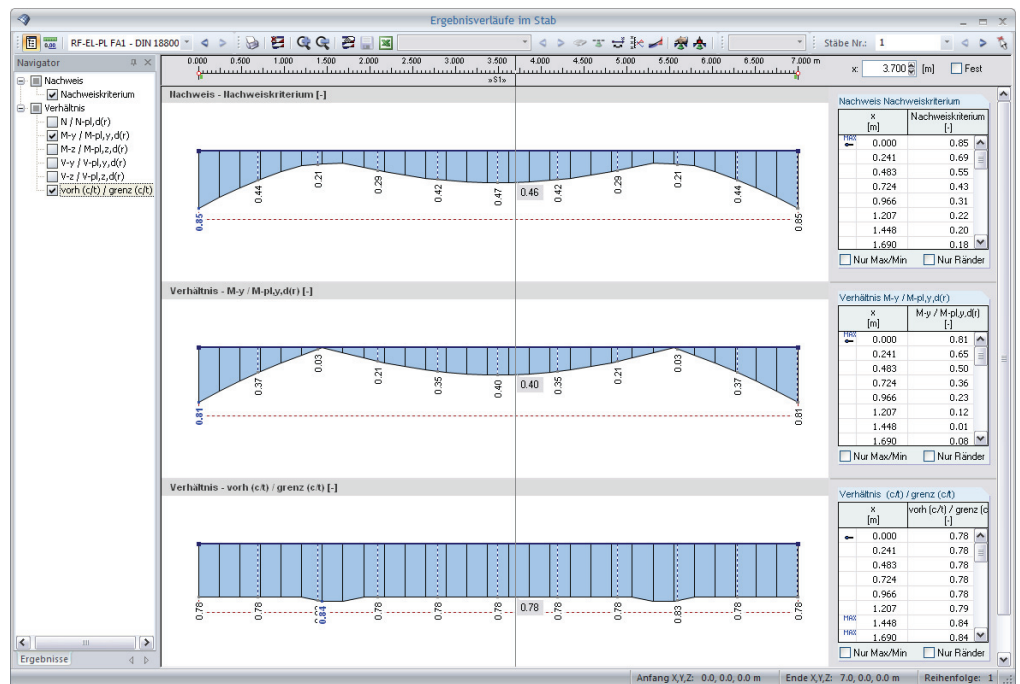


Bild 6.7: Dialog *Ergebnisverläufe im Stab*

RF-EL-PL FA1 - DIN 18800	<	>
LF1 - Bemessungswerte		
RF-STAHl Stäbe FA1 - Spannungsanalyse		
RF-EL-PL FA1 - DIN 18800		
RF-EL-PL FA2 - Kahlmeyer		
RF-EL-PL FA3 - Rubin		

Im Navigator links lassen sich die Nachweis- und Schnittgrößenverhältnisse auswählen, die im Ergebnisdiagramm angezeigt werden sollen. Über die Listen in der Symbolleiste kann zwischen den RF-EL-PL-Bemessungsfällen gewechselt werden.

Eine ausführliche Beschreibung des Dialogs *Ergebnisverläufe* finden Sie im Kapitel 10.5 des RFEM-Handbuchs ab Seite 312.

6.4 Filter für Ergebnisse

Neben den Ergebnismasken, die durch ihre Struktur bereits eine Auswahl nach bestimmten Kriterien erlauben, stehen die im RFEM-Handbuch beschriebenen Filtermöglichkeiten zur Verfügung, um die RF-EL-PL-Nachweise grafisch auszuwerten.

Generell können bereits definierte Ausschnitte genutzt werden (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 10.9 ab Seite 322), die die Objekte in geeigneter Weise gruppieren.

Filtern von Nachweisen

Die Nachweisverhältnisse selbst lassen sich gut als Filterkriterien im RFEM-Arbeitsfenster nutzen. Hierzu muss das Panel angezeigt werden. Sollte es nicht aktiv sein, kann es einblenden werden über das RFEM-Menü

Ansicht → Steuerpanel

oder die entsprechende Schaltfläche in der *Ergebnisse*-Symbolleiste.

Das Panel ist im Kapitel 4.4.6 des RFEM-Handbuchs ab Seite 77 beschrieben. Die Filtereinstellungen für die Ergebnisse sind im Panel-Register *Farbskala* vorzunehmen. Da dieses Register bei der zweifarbigen Schnittgrößenanzeige nicht angeboten wird, muss im *Zeigen*-Navigator auf die Darstellungsarten *Mehrfarbig* oder *Querschnitte* umgeschaltet werden.

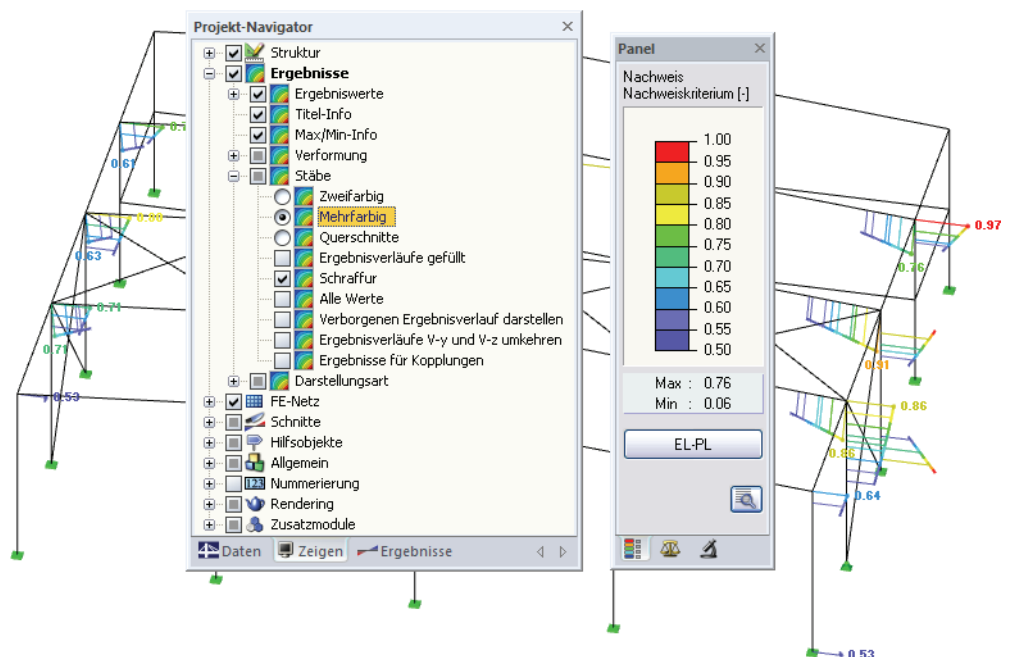


Bild 6.8: Filtern der Spannungsausnutzungen mit angepasster Farbskala

Bei einer mehrfarbigen Ergebnisanzeige kann im Panel beispielsweise eingestellt werden, dass nur Ausnutzungen größer als 50 % angezeigt werden. Die Farbskala lässt sich zudem z. B. so anpassen, dass ein Farbbereich jeweils 5 % abdeckt.

Über die Option *Verborgenen Ergebnisverlauf darstellen* (im *Zeigen*-Navigator unter dem Eintrag *Ergebnisse* → *Stäbe*) lassen sich auch alle Ergebnisse einblenden, die diese Bedingungen nicht erfüllen. Diese Verläufe werden dann strichlinienhaft dargestellt.



Filtern von Stäben

Im Register *Filter* des Steuerpanels können die Nummern der Stäbe festgelegt werden, deren Ergebnisse exklusiv angezeigt werden sollen. Diese Funktion ist im Kapitel 4.4.6 des RFEM-Handbuchs auf Seite 80 beschrieben.

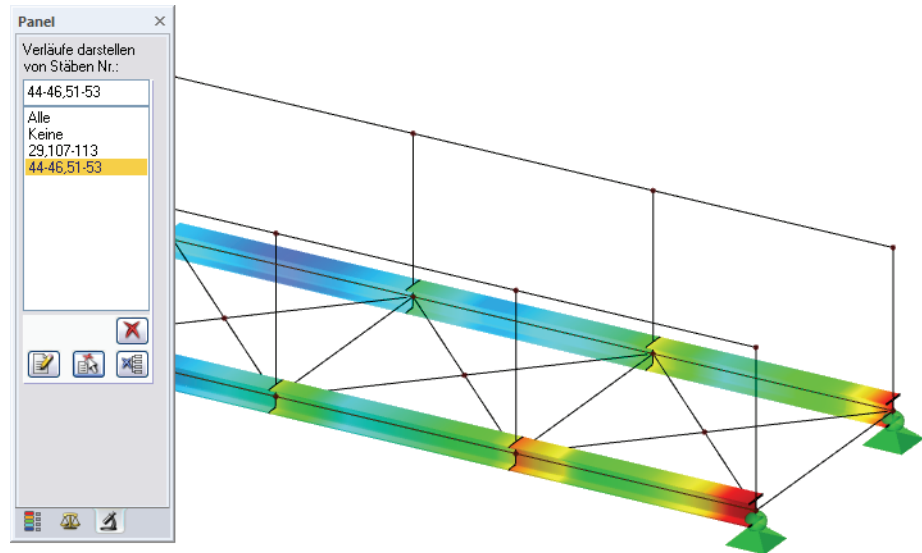


Bild 6.9: Filtern von Stäben im Panel

Im Unterschied zur Ausschnittfunktion wird die Struktur vollständig mit angezeigt. Das Bild oben zeigt die Ausnutzungen im Untergurt einer Fußgängerbrücke. Die übrigen Stäbe werden im Modell dargestellt, sind in der Anzeige jedoch ohne Ausnutzungsgrade.

7. Ausdruck

7.1 Ausdruckprotokoll

Für die RF-EL-PL-Nachweise wird wie in RFEM zunächst ein Ausdruckprotokoll generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Dort wird auch festgelegt, welche Ergebnisse letztendlich im Ausdruck erscheinen.

Das Ausdruckprotokoll ist im RFEM-Handbuch ausführlich beschrieben. Insbesondere das Kapitel 11.1.3.4 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* auf Seite 339 behandelt die Auswahl der Ein- und Ausgabedaten in den Zusatzmodulen.



Bei großen Systemen mit vielen Bemessungsfällen erhöht die Aufteilung in mehrere Ausdruckprotokolle die Übersichtlichkeit und ermöglicht ein schnelleres Arbeiten.

Es bestehen die üblichen Selektionsmöglichkeiten zur Auswahl der Bemessungsfälle sowie der Eingabe- und Ergebnisdaten von RF-EL-PL.

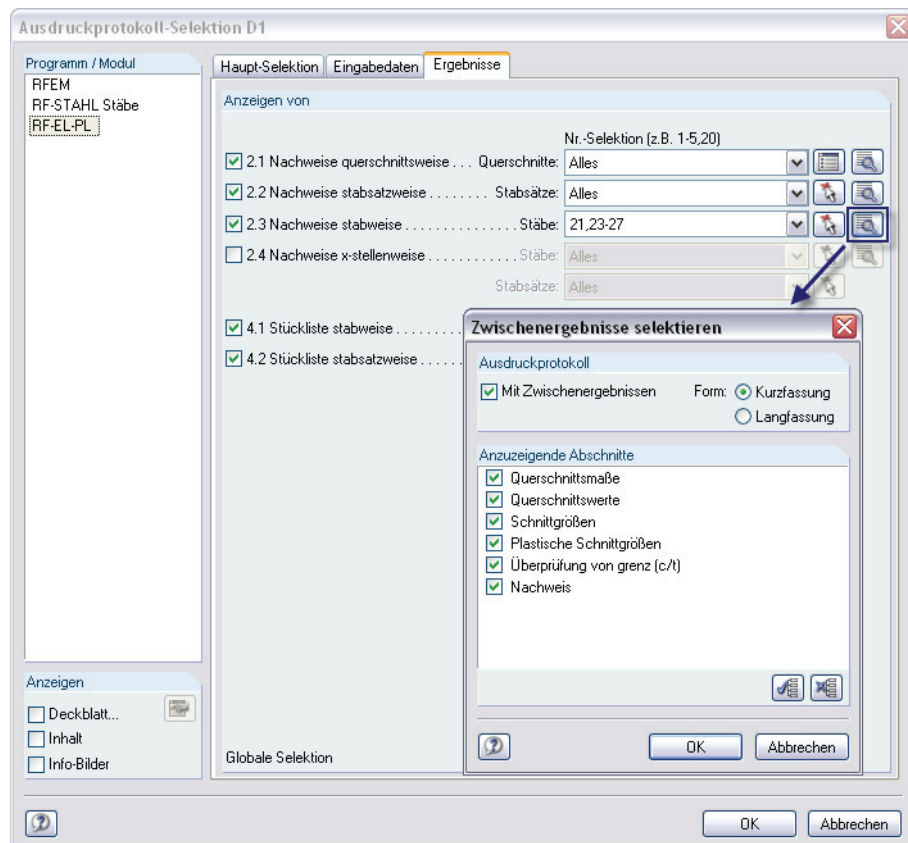


Bild 7.1: Ausdruckprotokoll-Selektion der Ergebnisse von RF-EL-PL mit Zwischenergebnissen

7.2 Grafikausdruck

In RFEM kann jedes Bild, das im Grafikfenster des Hauptprogramms angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übernommen werden. Damit können auch die am RFEM-Modell gezeigten Nachweise für den Ausdruck aufbereitet werden. Die Grafiken lassen sich in das globale Ausdruckprotokoll einbinden oder direkt auf den Drucker leiten. Im Kapitel 11.2 des RFEM-Handbuchs ist das Drucken von Grafiken ausführlich erläutert.

Nachweise am RFEM-Modell

Die aktuelle RF-EL-PL-Grafik im RFEM-Arbeitsfenster kann gedruckt werden über Menü

Datei → Drucken

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

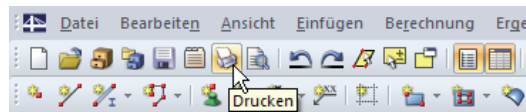


Bild 7.2: Schaltfläche *Drucken* in der Symbolleiste des Hauptfensters

Ergebnisverläufe

In gleicher Weise lassen sich auch die Stab-Ergebnisverläufe mit der [Drucken]-Schaltfläche in das Protokoll übergeben oder direkt ausdrucken.

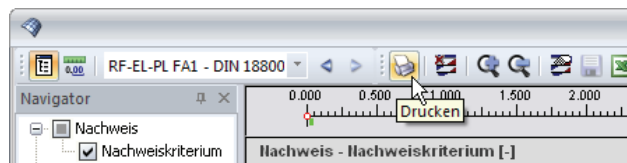


Bild 7.3: Schaltfläche *Drucken* in der Symbolleiste des Ergebnisverläufe-Fensters

Es wird folgender Dialog angezeigt.

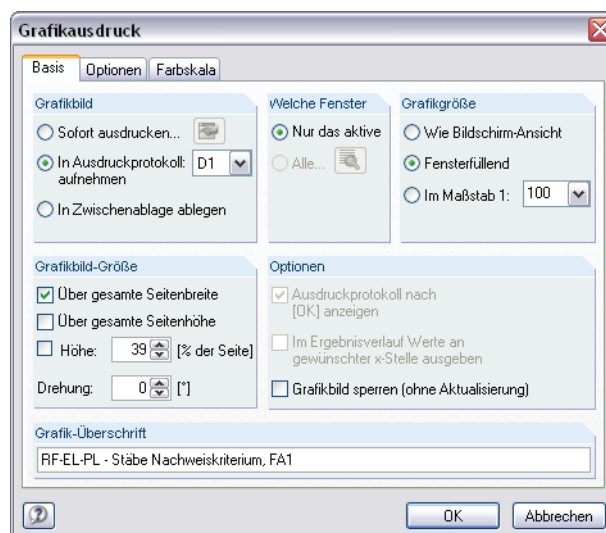
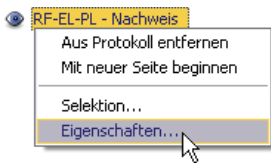


Bild 7.4: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 11.2 des RFEM-Handbuchs ab Seite 356 ausführlich beschrieben. Dort sind auch die übrigen Register *Optionen* und *Farbskala* erläutert.



Eine RF-EL-PL-Grafik kann im Ausdruckprotokoll wie gewohnt per Drag & Drop an eine andere Stelle verschoben werden. Zudem besteht die Möglichkeit, eingefügte Grafiken nachträglich anzupassen: Klicken Sie den entsprechenden Eintrag im Protokoll-Navigator mit der rechten Maustaste an und wählen im Kontextmenü die Option *Eigenschaften*. Es erscheint erneut der Dialog *Grafikausdruck* mit verschiedenen Anpassungsmöglichkeiten.

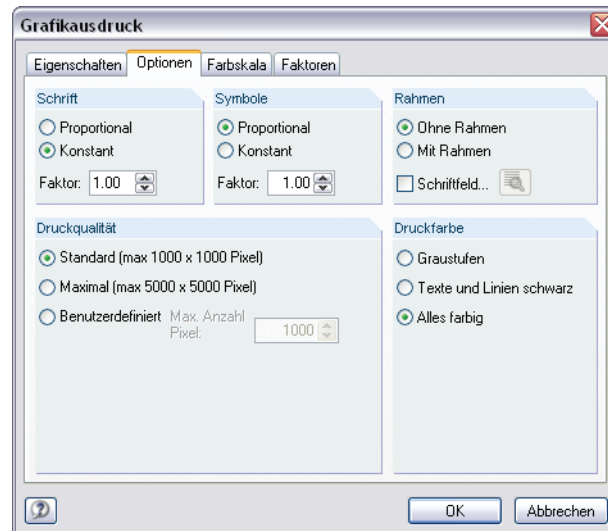


Bild 7.5: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*

8. Allgemeine Funktionen

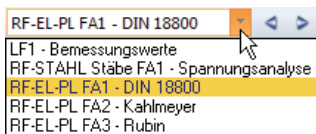
Dieses Kapitel stellt einige Menüfunktionen sowie Exportmöglichkeiten der Bemessungsergebnisse vor.

8.1 RF-EL-PL-Bemessungsfälle

Es besteht die Möglichkeit, Stäbe in separaten Bemessungsfällen zu gruppieren. Damit können z. B. Bauteilgruppen zusammengefasst oder mit spezifischen Bemessungsvorgaben (Materialien, Teilsicherheitsbeiwerte, Optimierung etc.) beaufschlagt werden.

Es bereitet kein Problem, einen Stab oder Stabsatz in unterschiedlichen Bemessungsfällen zu untersuchen.

Die RF-EL-PL-Fälle sind im RFEM-Arbeitsfenster wie ein Lastfall oder eine Lastfallgruppe in der Liste der Symbolleiste zugänglich.



Neuen RF-EL-PL-Fall anlegen

Ein neuer Bemessungsfall wird angelegt über das RF-EL-PL-Menü

Datei → Neuer Fall.

Es erscheint der folgende Dialog.

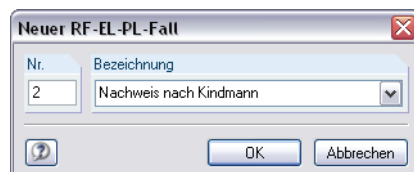


Bild 8.1: Dialog *Neuer RF-EL-PL-Fall*

In diesem Dialog sind eine (noch nicht belegte) *Nummer* sowie eine *Bezeichnung* für den neuen Bemessungsfall anzugeben. Nach [OK] erscheint die RF-EL-PL-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der neuen Bemessungsdaten.

RF-EL-PL-Fall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalls kann geändert werden über das RF-EL-PL-Menü

Datei → Fall umbenennen.

Es erscheint der Dialog RF-EL-PL-*Fall umbenennen*.

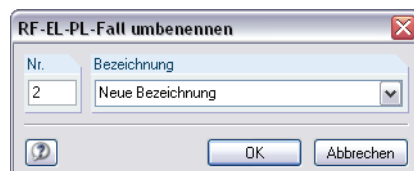


Bild 8.2: Dialog RF-EL-PL-*Fall umbenennen*

RF-EL-PL-Fall kopieren

Die Eingabedaten des aktuellen Bemessungsfalls werden kopiert über das RF-EL-PL-Menü

Datei → Fall kopieren.

Es erscheint der Dialog RF-EL-PL-*Fall kopieren*, in dem die Nummer und Bezeichnung des neuen Falls festzulegen sind.



Bild 8.3: Dialog RF-EL-PL-*Fall kopieren*

RF-EL-PL-Fall löschen

Bemessungsfälle lassen sich wieder löschen über das RF-EL-PL-Menü

Datei → Fall löschen.

Im Dialog RF-EL-PL-*Fall löschen* kann der Bemessungsfall in der Liste *Vorhandene Fälle* ausgewählt werden. Der Löschvorgang erfolgt mit [OK].



Bild 8.4: Dialog *Fall löschen*

8.2 Querschnittsoptimierung

Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, bietet RF-EL-PL die Möglichkeit einer querschnittsweisen Optimierung an. Hierzu ist in der Spalte C bzw. D der Maske 1.3 *Querschnitte* das betreffende Profil durch Ankreuzen auszuwählen, was am einfachsten über einen Klick in das Kästchen erfolgt (siehe Bild 3.4, Seite 25).

Auch in den Ergebnismasken kann die Querschnittsoptimierung über das Kontextmenü eingeleitet werden.

Im Zuge der Optimierung untersucht RF-EL-PL, welches Profil aus der gleichen Querschnittsreihe den Nachweis „optimal“ erfüllt, d. h. der maximal möglichen Ausnutzung am nächsten kommt, die im Dialog *Details* festgelegt ist (siehe Bild 4.1, Seite 28). Die Interaktionsanalyse erfolgt dabei mit den RFEM-Schnittgrößen. Erweist sich ein anderer Querschnitt als günstiger, so werden in Maske 1.3 wie im Bild 8.6 gezeigt rechts zwei Profile dargestellt – das ursprüngliche Profil aus RFEM und der optimierte Querschnitt.

Bei den parametrisierten Profilen der Querschnittsbibliothek erscheint beim Ankreuzen des Optimierungskästchens ein Dialog für detaillierte Vorgaben.

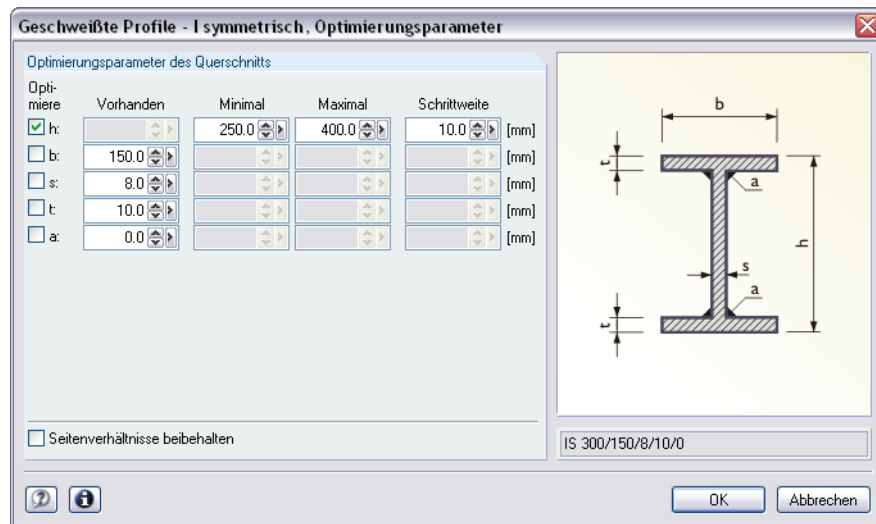
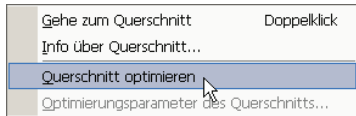


Bild 8.5: Dialog *Geschweißte Profile - I unsymmetrisch, Optimierungsparameter*

In der Spalte *Optimiere* ist zunächst durch Anhaken festzulegen, welcher (oder welche) Parameter geändert werden soll. Damit werden die Spalten *Minimal* und *Maximal* zugänglich, in der die Unter- und Obergrenzen des Parameters anzugeben sind. Die Spalte *Schrittweite* steuert das Intervall, in dem die Abmessungen dieses Parameters beim Optimierungsprozess variieren.

Sollen die *Seitenverhältnisse beibehalten* werden, ist das entsprechende Kontrollfeld zu aktivieren. Zusätzlich müssen sämtliche Parameter für die Optimierung angehakt werden.

Für aus Walzprofilen zusammengesetzte Querschnitte ist keine Optimierungsmöglichkeit vorgesehen.



Bei der Optimierung ist zu beachten, dass die Schnittgrößen nicht automatisch neu mit den geänderten Querschnitten berechnet werden. Der Anwender kann frei entscheiden, welche Profile für eine Neuberechnung nach RFEM übergeben werden sollen. Wegen der geänderten Steifigkeiten im System können die Schnittgrößen, die sich mit den optimierten Querschnitten ergeben, erheblich differieren. Es empfiehlt sich, nach einer ersten Optimierung die Schnittgrößen neu zu berechnen und anschließend die Profile nochmals zu optimieren.

Die Übergabe der geänderten Profile nach RFEM braucht nicht manuell erfolgen. Stellen Sie die Maske 1.3 *Querschnitte* zur Anzeige und wählen dann das Menü

Bearbeiten → Alle Querschnitte in RFEM übernehmen.

Das Kontextmenü der Maske 1.3 enthält ebenfalls Möglichkeiten zum Export optimierter Querschnitte nach RFEM.

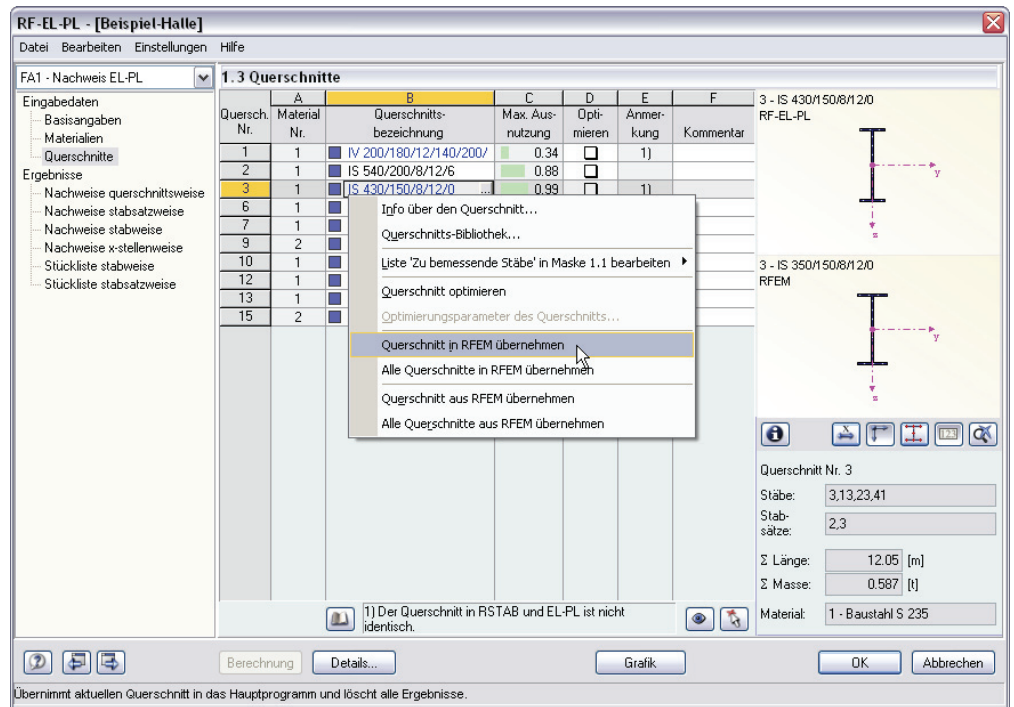


Bild 8.6: Kontextmenü der Maske 1.3 *Querschnitte*

Berechnung

Vor der Übergabe erfolgt eine Sicherheitsabfrage, da diese Maßnahme mit dem Löschen der Ergebnisse verbunden ist. Wird in RF-EL-PL dann die [Berechnung] gestartet, vollzieht sich die Ermittlung der RFEM-Schnittgrößen und der Nachweise in einem Berechnungsablauf.

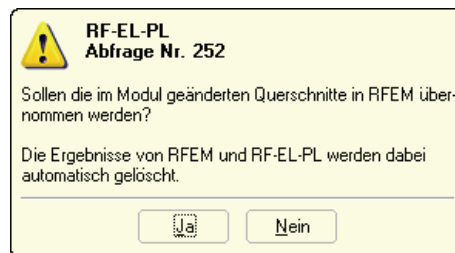


Bild 8.7: Abfrage vor der Übergabe der geänderten Querschnitte nach RFEM

Analog können über die oben beschriebenen Menüfunktionen wieder die RFEM-Originalquerschnitte in RF-EL-PL eingelesen werden. Bitte beachten Sie, dass auch diese Möglichkeit nur in der Maske 1.3 *Querschnitte* besteht.



Liegt ein Voutenstab zur Optimierung vor, werden die Anfangs- und Endstellen optimiert. Danach werden die Flächenträgheitsmomente an den Zwischenstellen linear interpoliert. Da diese mit der vierten Potenz eingehen, kann der Nachweis bei großen Unterschieden der Anfangs- und Endprofilhöhen ungenau werden. In diesem Fall empfiehlt es sich, die Route in einzelne Stäbe zu unterteilen, deren Anfangs- und Endquerschnitte geringere Profilunterschiede aufweisen.

8.3 Materialexport nach RFEM

Werden in Maske 1.2 von RF-EL-PL die Materialien geändert, können – wie bei den Querschnitten – die geänderten Materialien nach RFEM exportiert oder auch die ursprünglich verwendeten Materialien wieder aus RFEM eingelesen werden. Die im Modul geänderten Materialien werden blau dargestellt.

Es ist nicht erforderlich, die geänderten Materialien manuell nach RFEM zu übergeben. Stellen Sie die Maske 1.2 *Materialien* ein und wählen dann das Menü

Bearbeiten → Alle Materialien in RFEM exportieren.

Das Kontextmenü der Maske 1.2 enthält ebenfalls Möglichkeiten zur Übergabe modifizierter Materialien nach RFEM.

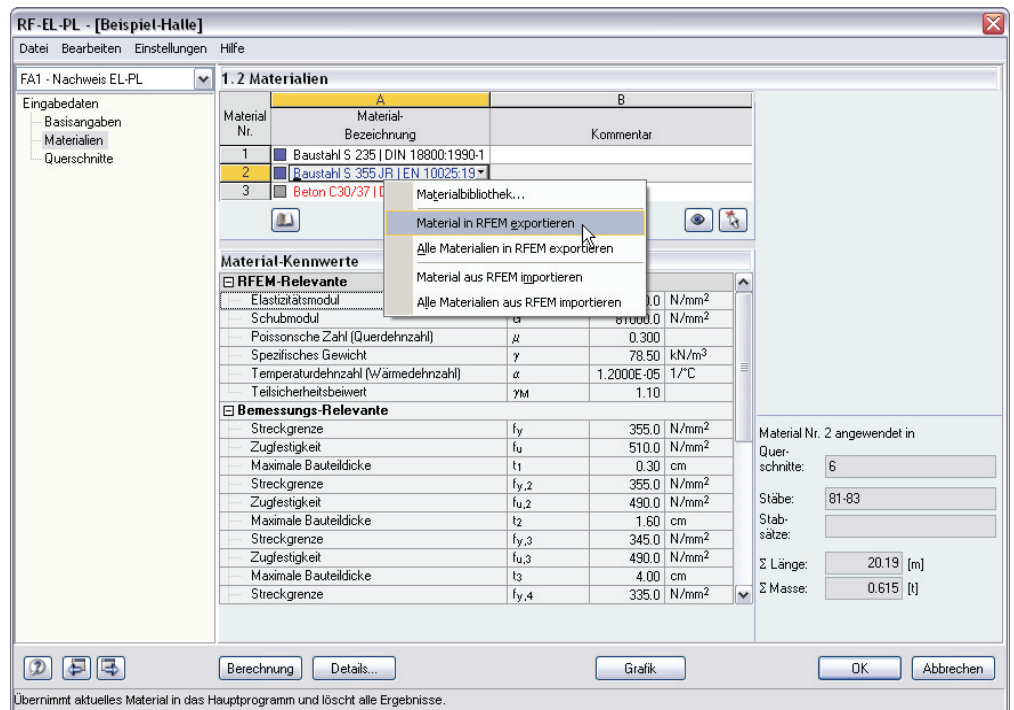


Bild 8.8: Kontextmenü der Maske 1.2 *Materialien*

Berechnung

Vor der Übergabe erfolgt eine Sicherheitsabfrage, da diese Maßnahme mit dem Löschen der Ergebnisse verbunden ist. Wird in RF-EL-PL dann die [Berechnung] gestartet, vollzieht sich die Ermittlung von RFEM-Schnittgrößen und der Nachweise in einem einzigen Berechnungsablauf.

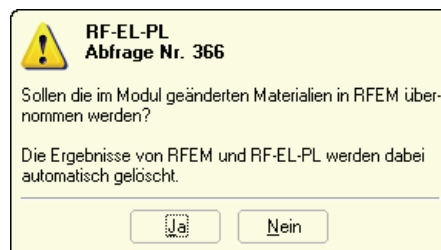


Bild 8.9: Abfrage vor Übergabe geänderter Materialien nach RFEM

8.4 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RFEM sowie für sämtliche Zusatzmodule zentral verwaltet. In RF-EL-PL ist der Dialog zum Einstellen der Einheiten zugänglich über Menü

Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.

Es wird der aus RFEM bekannte Dialog aufgerufen. Das Modul RF-EL-PL ist voreingestellt.

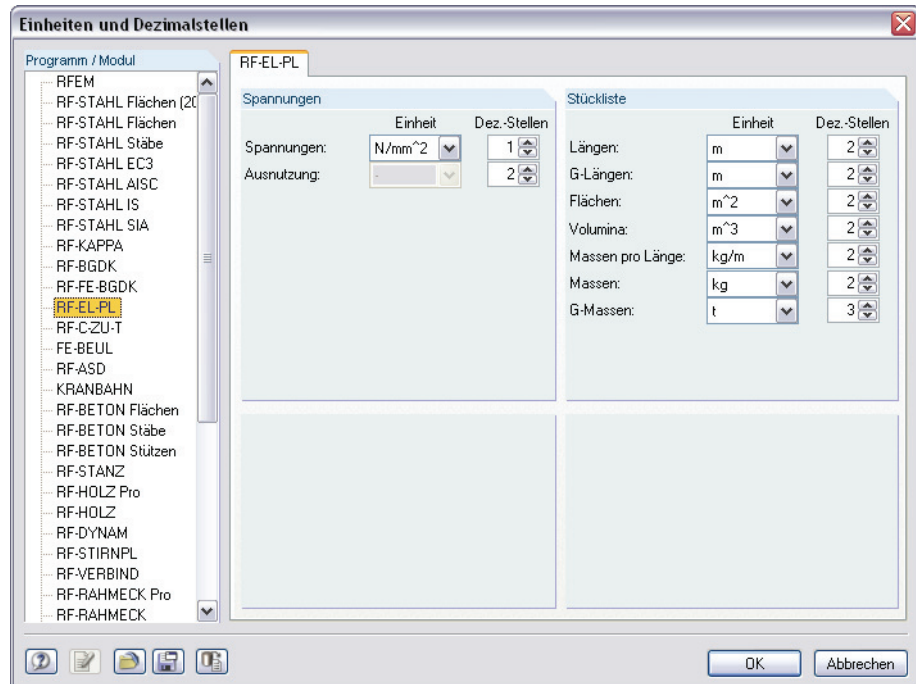


Bild 8.10: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Positionen wieder verwendet werden. Die Beschreibung dieser Funktionen finden Sie im Kapitel 12.6.2 des RFEM-Handbuchs auf Seite 457.

8.5 Export der Ergebnisse

Die Nachweise können anderen Programmen auf verschiedene Weise bereitgestellt werden.

Zwischenablage

Markierte Zellen der RF-EL-PL-Ergebnismasken können mit [Strg]+[C] in die Zwischenablage kopiert und mit [Strg]+[V] z. B. in ein Textverarbeitungsprogramm eingefügt werden. Die Überschriften der Tabellenspalten bleiben dabei unberücksichtigt.

Ausdruckprotokoll

Die Daten des Moduls RF-EL-PL lassen sich in das zentrale Ausdruckprotokoll drucken (siehe Kapitel 7.1, Seite 43) und können dort exportiert werden über Menü

Datei → Export in RTF-Datei bzw. BauText.

Diese Funktion ist im Kapitel 11.1.11 des RFEM-Handbuchs auf Seite 351 beschrieben.

Excel / OpenOffice

RF-EL-PL ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel, OpenOffice.org Calc oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über Menü

Datei → Tabellen exportieren.

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

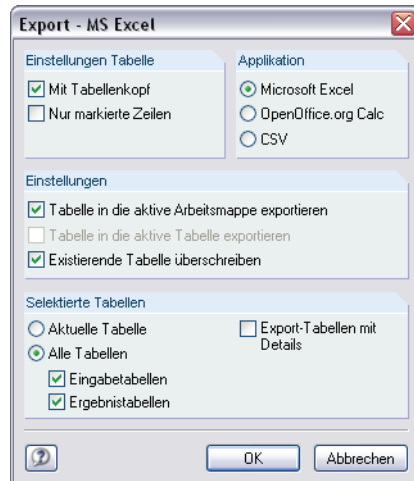
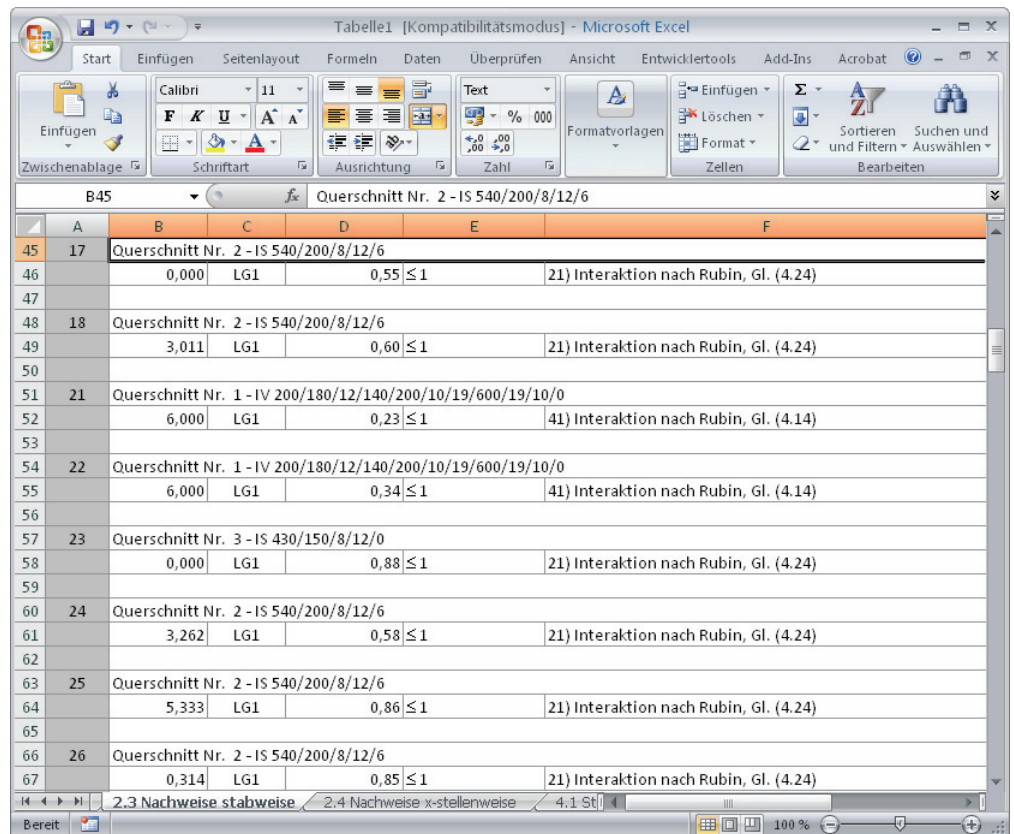


Bild 8.11: Dialog *Export - MS Excel*

Sind die gewünschten Parameter ausgewählt, kann der Export mit [OK] gestartet werden. Excel bzw. OpenOffice werden automatisch aufgerufen. Die Programme brauchen nicht im Hintergrund geöffnet sein.



	A	B	C	D	E	F
45	17	Querschnitt Nr. 2 - IS 540/200/8/12/6				
46		0,000	LG1	0,55 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)
47						
48	18	Querschnitt Nr. 2 - IS 540/200/8/12/6				
49		3,011	LG1	0,60 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)
50						
51	21	Querschnitt Nr. 1 - IV 200/180/12/140/200/10/19/600/19/10/0				
52		6,000	LG1	0,23 ≤ 1	41)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.14)
53						
54	22	Querschnitt Nr. 1 - IV 200/180/12/140/200/10/19/600/19/10/0				
55		6,000	LG1	0,34 ≤ 1	41)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.14)
56						
57	23	Querschnitt Nr. 3 - IS 430/150/8/12/0				
58		0,000	LG1	0,88 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)
59						
60	24	Querschnitt Nr. 2 - IS 540/200/8/12/6				
61		3,262	LG1	0,58 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)
62						
63	25	Querschnitt Nr. 2 - IS 540/200/8/12/6				
64		5,333	LG1	0,86 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)
65						
66	26	Querschnitt Nr. 2 - IS 540/200/8/12/6				
67		0,314	LG1	0,85 ≤ 1	21)	Interaktion nach Rubin, Gl. (4.24)

Bild 8.12: Ergebnis in Excel

9. Beispiel

Ein Rahmenriegel mit geschweißtem einfachsymmetrischen I-Profil IS 270/180/8/10/10 aus Stahl S 235 wird für eine Bemessungslast berechnet und nach verschiedenen Verfahren nachgewiesen.

9.1 Bemessungswerte

System und Belastung (γ -fach)

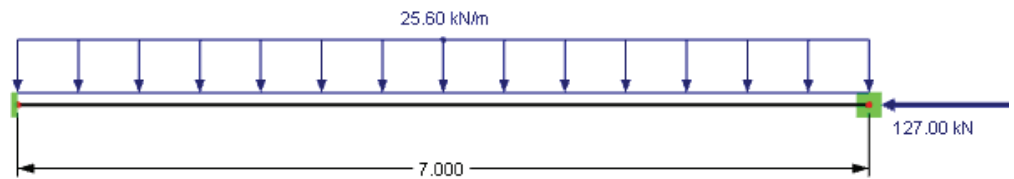


Bild 9.1: System und Belastung

Schnittgrößen

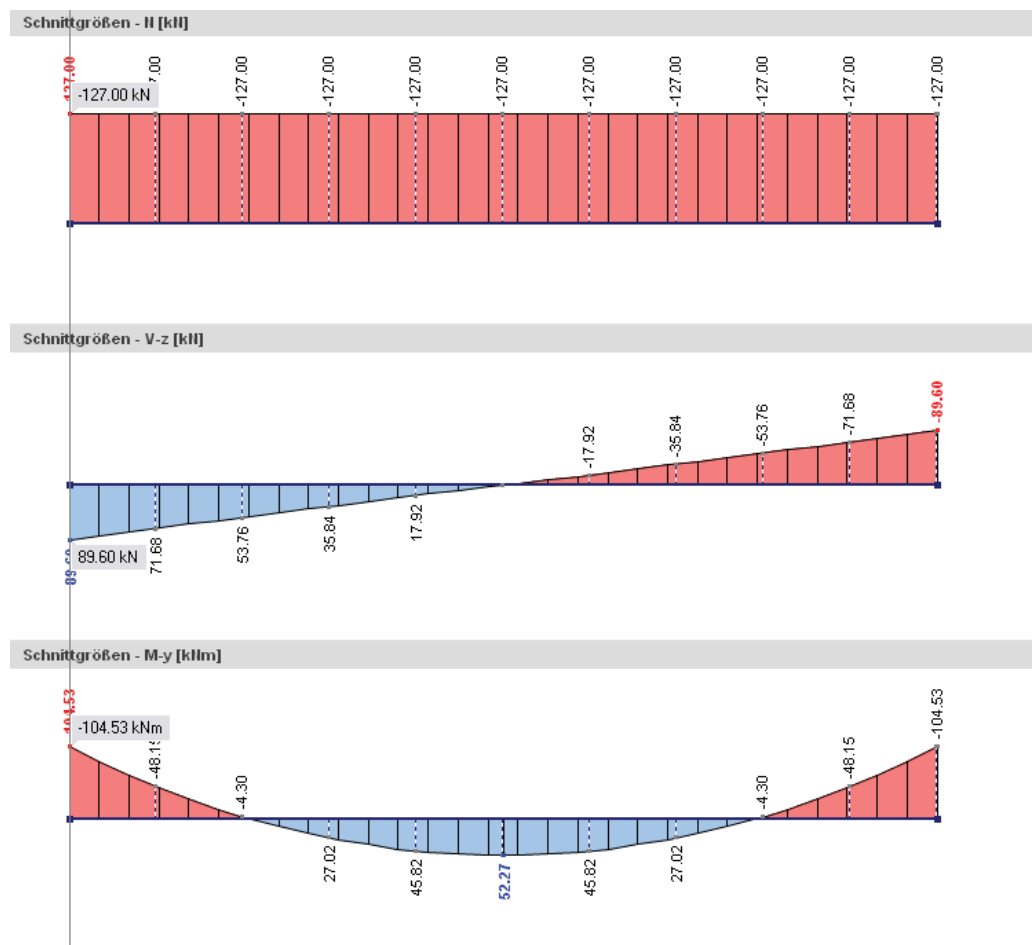


Bild 9.2: Verlauf von Normalkraft, Querkraft und Biegemoment mit Bemessungsstelle am linken Stabende

Querschnitt IS 270/180/8/10/0

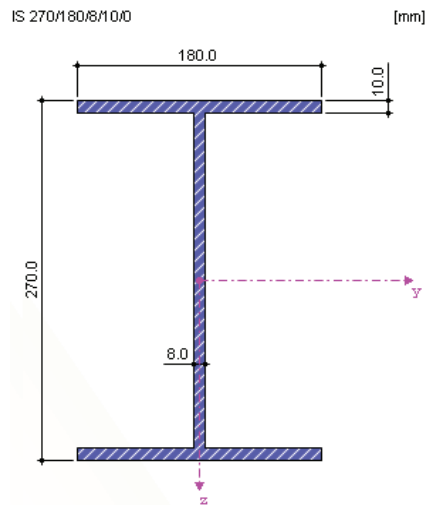


Bild 9.3: Querschnittsabmessungen

Querschnittswerte

Querschnittsfläche	A	56,00	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	$y_{s,0}$	0,00	cm	bezogen auf Nullpunkt
	$z_{s,0}$	0,00	cm	
Trägheitsmomente	I_y	7128,67	cm ⁴	bezogen auf Schwerachsen y, z
	I_z	973,07	cm ⁴	
Hauptachseneckwinkel	α	0,00	°	positiv im Uhrzeigersinn
Polare Trägheitsmomente	I_p	8101,73	cm ⁴	
	$I_{p,M}$	8101,73	cm ⁴	bezogen auf Schubmittelpunkt M
Querschnittsgewicht	G	43,96	kg/m	
Querschnittsumfang	U	124,40	cm	
Torsionsträgheitsmoment	I_t	16,02	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	$y_{M,0}$	0,00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	$z_{M,0}$	0,00	cm	
Widerstandsmomente	$W_{y,max}$	528,05	cm ³	im Abstand 135.0 mm
	$W_{y,min}$	-528,05	cm ³	im Abstand -135.0 mm
	$W_{z,max}$	108,12	cm ³	im Abstand 90.0 mm
	$W_{z,min}$	-108,12	cm ³	im Abstand -90.0 mm
Torsionswiderstandsmoment	W_t	16,02	cm ³	
Plastische Biegemomente	$M_{pl,y,d}$	129,38	kNm	
	$M_{pl,z,d}$	36,22	kNm	
Plastische Widerstandsmomente	$W_{pl,y}$	593,00	cm ³	$\alpha_{pl,y}$: 1,12
	$W_{pl,z}$	166,00	cm ³	$\alpha_{pl,z}$: 1,54
Plastische Schubflächen	$A_{pl,y}$	36,00	cm ²	
	$A_{pl,z}$	20,80	cm ²	
Lage der Flächenhalbierenden	$f_{y,0}$	0,00	cm	bezogen auf Nullpunkt
	$f_{z,0}$	0,00	cm	
Plastische Querkkräfte	$V_{pl,y,d}$	453,48	kN	
	$V_{pl,z,d}$	262,01	kN	
Plastische Normalkraft	$N_{pl,d}$	1221,82	kN	

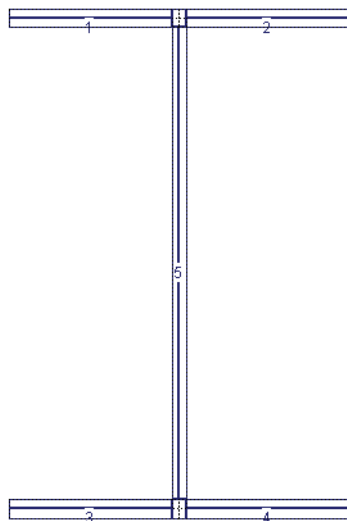
(c/t)-Querschnittsteile

Bild 9.4: (c/t)-Querschnittsteile

(c/t)- Teil Nr.	Gelagert Form	c [mm]	t [mm]	c/t [-]	Koordinaten Anfang		Koordinaten Ende		Mittlere statische Momente	
					y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	S _y [cm ³]	S _z [cm ³]
1	Einseitig	86,0	10,0	8,60	-4,0	-135,0	-90,0	-135,0	55,59	26,37
2	Einseitig	86,0	10,0	8,60	4,0	-135,0	90,0	-135,0	55,59	26,37
3	Einseitig	86,0	10,0	8,60	-4,0	135,0	-90,0	135,0	55,59	26,37
4	Einseitig	86,0	10,0	8,60	4,0	135,0	90,0	135,0	55,59	26,37
5	Beidseitig	250,0	8,0	31,25	0,0	-125,0	0,0	125,0	276,19	0,00

Überprüfung von grenz (c/t)

Der Grenzwert grenz (c/t) nach DIN 18800 Teil 1, Tabelle 15 beträgt

- für einseitig gelagerte Plattenstreifen (mit $\alpha = 1,00$):

$$\text{grenz } (c/t) = \frac{11}{1,00} \cdot \sqrt{\frac{240}{240}} = 11 > \text{vorh } (c/t) = 8,60$$

- für beidseitig gelagerte Plattenstreifen (mit $\alpha = 1,00$):

$$\text{grenz } (c/t) = \frac{37}{1,00} \cdot \sqrt{\frac{240}{240}} = 37 > \text{vorh } (c/t) = 31,25$$

RF-EL-PL berücksichtigt beim (c/t)-Nachweis die tatsächlichen Druckzonenverhältnisse mit den entsprechenden α -Werten.

9.2 Allgemeine Spannungsanalyse

Zunächst wird ein allgemeiner Spannungsnachweis mit dem Modul RF-STAHl Stäbe geführt. An der Stabstelle $x = 0.00$ m ergeben sich folgende Normalspannungen σ :

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{-127,00}{56,00} = -2,27 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{M_y} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{-104,53 \cdot 100}{528,05} = -19,80 \text{ kN/cm}^2$$

Damit ergibt sich diese Normalspannung am unteren Flansch:

$$\sigma_{\text{ges}} = -2,27 + (-19,80) = -22,06 \text{ kN/cm}^2$$

Die Schubspannung τ am Anschluss des Steges an den Flansch beträgt:

$$\tau = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{89,60 \cdot 117,00}{7128,67 \cdot 1,00} = 1,47 \text{ kN/cm}^2$$

Es ergibt sich folgende Vergleichsspannung σ_v :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\text{ges}}^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{(-22,06)^2 + 3 \cdot 1,47^2} = 22,21 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis: $\frac{\sigma_{\text{vorh}}}{\sigma_{\text{zul}}} = \frac{22,21}{21,82} = 1,02 > 1$

Die Grenz-Vergleichsspannung von Stahl S 235 beträgt $21,82 \text{ kN/cm}^2$. Mit der allgemeinen Spannungsanalyse ist der Querschnitt geringfügig überbeansprucht.

Diesen Ausnutzungsgrad ermittelt auch das Modul RF-STAHl Stäbe.

Querschnitt Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	S-Punkt Nr.	Lastfall	Spannungstyp	Spannung [kN/cm²]		Ausnutzung
						vorh	grenz	
1	IS 270/180/8/10/0							
	1	0,000	6	LF1	Sigma gesamt	-22,06	21,82	1,01
	1	0,000	1	LF1	Sigma N	-2,27	21,82	0,10
	1	0,000	5	LF1	Sigma M-y	19,80	21,82	0,91
	1	0,000	13	LF1	Tau V-z	4,66	12,60	0,37
	1	0,000	8	LF1	Sigma-v	22,21	21,82	1,02

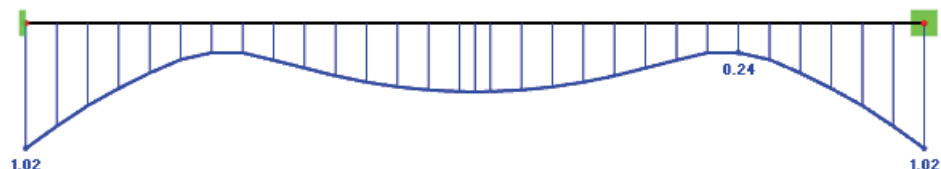


Bild 9.5: Ausnutzung im Modul RF-STAHl Stäbe

9.3 Nachweis RF-EL-PL nach DIN 18800

Für den vereinfachten Tragsicherheitsnachweis nach Tabelle 16 wird zunächst der Gültigkeitsbereich untersucht. An der Stabstelle $x = 0,00$ m liegen folgende Beziehungen zwischen vorhandenen Schnittgrößen und plastischen Schnittgrößen vor:

$$\frac{N \cdot \gamma_M}{N_{pl}} = \frac{127,00 \cdot 1,1}{1344,00} = 0,104 > 0,1$$

$$\frac{V \cdot \gamma_M}{V_{pl}} = \frac{89,60 \cdot 1,1}{288,21} = 0,342 > 0,33$$

Damit muss der Einfluss von Normalkraft und Querkraft berücksichtigt werden. Die Interaktionsbedingung gemäß Tabelle 16, Zeile 2, Spalte 3 lautet:

$$0,8 \cdot \frac{M}{M_{pl,d}} + 0,89 \cdot \frac{N}{N_{pl,d}} + 0,33 \cdot \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 1$$

$$0,8 \cdot \frac{104,53 \cdot 1,1}{142,32} + 0,89 \cdot \frac{127,00 \cdot 1,1}{1344,00} + 0,33 \cdot \frac{89,60 \cdot 1,1}{288,21} =$$

$$0,646 \quad + \quad 0,093 \quad + \quad 0,113 \quad = \quad 0,852 \leq 1$$

Die Berechnung in RF-EL-PL nach DIN 18 800 führt zu folgendem Nachweisverlauf.

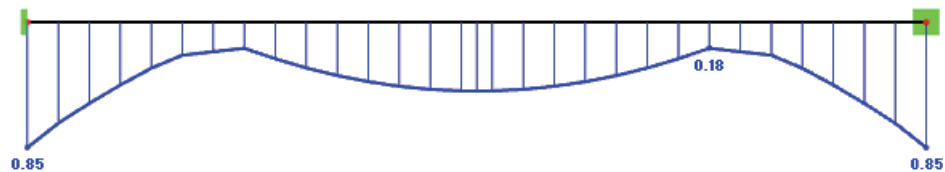


Bild 9.6: Nachweis nach DIN 18800

9.4 Nachweis RF-EL-PL nach KAHLMEYER

Bei diesem Verfahren werden für die Stabstelle $x = 0,00$ m folgende Schritte durchlaufen.

Reduzierung der Stegdicke

$$t_{s,r} = t_s \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_z}{V_{pl,z,d}} \right)^2} = 0,8 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{89,60 \cdot 1,1}{288,21} \right)^2} = 0,752 \text{ cm}$$

$$A_{s,r} = 0,752 \cdot 25,00 = 18,8 \text{ cm}^2$$

Bestimmung der Flächenhalbierenden

Bei dem doppelsymmetrischen Profil ist die Lage der Flächenhalbierenden auch ohne Berechnung bekannt. Die Ermittlung wird der Vollständigkeit halber durchgeführt.

$$A_{f,o} = A_{f,u} = b_o \cdot t_{f,o} = 18,0 \cdot 1,0 = 18,0 \text{ cm}^2$$

$$A = 18,8 + 2 \cdot (18,0 \cdot 1,0) = 54,8 \text{ cm}^2$$

$$z_o = z_u = t_{f,o} + \frac{0,5 \cdot A - A_{f,o}}{t_{s,r}} = 1,0 + \frac{0,5 \cdot 54,8 - 18,0}{0,752} = 13,5 \text{ cm}$$

Ermittlung des Normalkraftanteils im Spannungskörper

Der N -Anteil erstreckt sich beidseits der Flächenhalbierenden. Die zur Aufnahme der halben Längskraft im Steg erforderliche Länge z_N beträgt:

$$z_N = \frac{|N|}{2 \cdot t_{s,r} \cdot f_{y,d}} = \frac{127,00}{2 \cdot 0,752 \cdot 21,8} = 3,87 \text{ cm}$$

Damit liegt Fall 1 vor: $z_N \leq (z_o - t_{f,o})$

$$3,87 \leq (13,5 - 1,0) = 12,5$$

Der Normalkraftanteil liegt mit der Länge $2 \cdot z_N$ ausschließlich im Steg.

Berechnung des Grenzmoments im plastischen Zustand

Die Grenzspannungen ergeben sich aus dem Bemessungswert der Streckgrenze: $\sigma_{R,d} = f_{y,d}$

$$D_1 = A_{f,o} \cdot \sigma_{R,d} = 18,0 \cdot 21,8 = 392,4 \text{ kN}$$

$$\text{mit } e = z_N + z_o - t_{f,o}/2 = 3,87 + 13,5 - 1,0/2 = 16,87 \text{ cm}$$

$$D_2 = t_{s,r} \cdot (z_o - t_{f,o} - z_N) \cdot \sigma_{R,d} = 0,752 \cdot (13,5 - 1,0 - 3,87) \cdot 21,8 = 141,5 \text{ kN}$$

$$\text{mit } e = 2 \cdot z_N + (z_o - t_{f,o} - z_N)/2 = 2 \cdot 3,87 + 8,63/2 = 12,06 \text{ cm}$$

$$Z_1 = A_{f,u} \cdot \sigma_{R,d} = 18,0 \cdot 21,8 = 392,4 \text{ kN}$$

$$\text{mit } e = z_u - z_N - t_{f,u}/2 = 13,5 - 3,87 - 1,0/2 = 9,13 \text{ cm}$$

$$Z_2 = t_{s,r} \cdot (z_u - t_{f,u} - z_N) \cdot \sigma_{R,d} = 0,752 \cdot (13,5 - 1,0 - 3,87) \cdot 21,8 = 141,5 \text{ kN}$$

$$\text{mit } e = z_u - z_N - t_{f,u} - (z_u - t_{f,u} - z_N)/2 = 13,5 - 3,87 - 1,0 - 8,63/2 = 4,32 \text{ cm}$$

$$\text{red } M_{pl,y,d} = \frac{392,4 \cdot 16,87 + 141,5 \cdot 12,06 + 392,4 \cdot 9,13 + 141,5 \cdot 4,32}{100} = 125,20 \text{ kNm}$$

Nachweis

Der Nachweis bei einachsiger Biegung um die y -Achse lautet dann:

$$\frac{M_y}{\text{red } M_{pl,y,d}} = \frac{104,53}{125,20} = 0,835 \leq 1$$

Die Bemessung mit RF-EL-PL nach KAHLMEYER bestätigt diese Ausnutzung des Querschnitts.

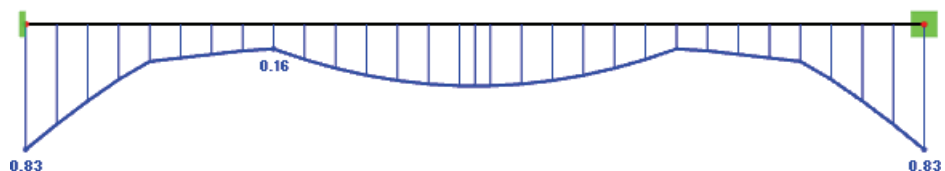


Bild 9.7: Nachweis nach KAHLMEYER

9.5 Nachweis RF-EL-PL nach RUBIN

Die Querkraft wird durch Einführung eines reduzierten Querschnitts berücksichtigt.

$$V_{pl,z,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \cdot h_m \cdot s = \frac{24,0}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 26,0 \cdot 0,8 = 262,0 \text{ kN}$$

Damit kann für die Stelle $x = 0,00 \text{ m}$ der Reduktionsfaktor des Steges bestimmt werden.

$$\eta_z = \sqrt{1 - \left(\frac{V_z}{V_{pl,z,d}} \right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{89,6}{262,0} \right)^2} = 0,94$$

Die reduzierte Querschnittsfläche ist somit:

$$A_r = 2 \cdot A_f + \eta_z \cdot h_m \cdot s = 2 \cdot 18,0 \cdot 1,0 + 0,94 \cdot 26,0 \cdot 0,8 = 55,6 \text{ cm}^2$$

$$\delta = \eta_z \cdot \frac{h_m \cdot s}{A_r} = 0,94 \cdot \frac{26,0 \cdot 0,8}{55,6} = 0,352$$

Die reduzierte vollplastische Normalkraft ermittelt sich wie folgt:

$$N_{pl,r} = A_r \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 55,6 \cdot \frac{24,0}{1,1} = 1213 \text{ kN}$$

Nun kann die Lage der Nulllinie bestimmt werden. Sie befindet sich im Steg.

$$\frac{N}{N_{pl,r}} = \frac{127,0}{1213} = 0,104 \leq \delta = 0,352$$

Das reduzierte vollplastische Moment beträgt:

$$M_{pl,r} = \frac{2 - \delta}{4} \cdot h_m \cdot N_{pl,r} = \frac{2 - 0,352}{4 \cdot 100} \cdot 26,0 \cdot 1213 = 129,94 \text{ kNm}$$

Mit diesen Vorwerten wird schließlich der Nachweis gemäß Gl. (4.24) geführt.

$$\frac{M}{M_{pl,r}} + \frac{1}{1 - (1 - \delta)^2} \cdot \left(\frac{N}{N_{pl,r}} \right)^2 = \frac{104,53}{129,94} + \frac{1}{1 - (1 - 0,352)^2} \cdot \left(\frac{127,0}{1213} \right)^2 = 0,823$$

Die Bemessung mit RF-EL-PL nach RUBIN führt zu folgendem Nachweisverlauf.

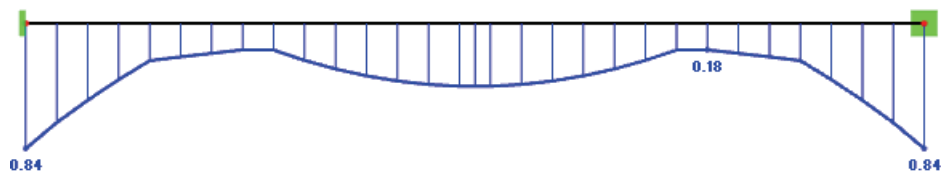


Bild 9.8: Nachweis nach RUBIN

A Literatur

- [1] DIN 18 800 Teil 1: Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion, 1990
- [2] DIN 4420-1, Arbeits- und Schutzgerüste, 1990
- [3] PETERSEN, C.: Stahlbau, Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 3. Auflage 1993
- [4] RUBIN, H.: Interaktionsbeziehungen zwischen Biegemoment, Querkraft und Normalkraft für einfachsymmetrische I- und Kastenquerschnitte bei Biegung um die starke und für doppeltsymmetrische I-Querschnitte bei Biegung um die schwache Achse. Stahlbau 3/78, 76-85
- [5] RUBIN, H.: Interaktionsbeziehungen für doppeltsymmetrische I- und Kastenquerschnitte bei zweiachsiger Biegung und Normalkraft. Stahlbau 5/78, 145-151 und Stahlbau 6/78, 174-181
- [6] KAHLMEYER, E.: Stahlbau nach DIN 18 800 (11.90), Werner, Düsseldorf, 1998
- [7] HÜNERSEN, G.: Stahlbau in Beispielen, Werner, Düsseldorf, 2001
- [8] KINDMANN, R., FRICKEL, J.: Grenztragfähigkeit von häufig verwendeten Stabquerschnitten für beliebige Schnittgrößen. Stahlbau 10/99, 817-828
- [9] KINDMANN, R., FRICKEL, J.: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit, Ernst & Sohn, Berlin, 2002

B Index

A

Allgemeine Profile.....	29
Anmerkung.....	27
Ausdruckprotokoll	43
Ausnutzung	26, 38
Ausschnitt.....	41

B

Basisangaben.....	21
Beenden von RF-EL-PL.....	21
Bemessungsfall	38, 46, 47
Benutzerprofil	51
Berechnung	28
Berechnung starten	30
Berechnungsdetails.....	28
Blättern in Masken.....	21

C

CSV-Export.....	52
-----------------	----

D

Dezimalstellen	23, 51
DIN 18800	14, 28, 29
Drehbettung	17
Drucken	44

E

E-Gewicht	35
Einfachsymmetrisches Profil	9
Einheiten	23, 51
EL-PL-Fall.....	30
Ergebnisauswertung	36
Ergebnisdiagramm	40
Ergebnismasken.....	28, 31
Ergebnisse mehrfarbig.....	41
Ergebnisse Rendering	41
<i>Ergebnisse</i> -Navigator.....	38
Ergebnisverläufe	40
Ergebniswerte.....	38
Excel	52
Export Ergebnisse	51
Export Material	50
Export Querschnitt.....	49

F

Farbskala	41
Filter	41
Filtern von Stäben	42

G

Gewicht.....	35
Grafik	38
Grafik drucken.....	44
grenz (c/t).....	8, 36
Grenzbiegemomente.....	28

H

Hintergrundgrafik	37
-------------------------	----

I

Installation	6
Interaktion	14
Interaktionsbeziehungen.....	29

K

Kahlmeyer	12, 29
Kastenquerschnitt	11, 12
Kindmann.....	16, 29
Kommentar	22

L

Länge	34
Lastfall.....	22
Lastfallgruppe	22

M

Masken.....	21
Material.....	23, 50
Materialbezeichnung.....	23
Materialbibliothek	24
Materialkennwerte	23

N

Nachweis.....	22
Nachweise	31, 33
Nachweiskriterium	32
Navigator	21
Nichtrostender Stahl	24

O

Oberfläche.....	34
-----------------	----

OpenOffice	52	Schnittgrößen	48
Optimierung	26, 28, 48	Selektion Ausdruck.....	43
P		Sichtmodus	38
Panel.....	7, 39, 41	Skalierung	39
Parametrisiertes Profil.....	48	Spannungspunkt.....	26
Plastische Schnittgrößen.....	36	Stabsatz	22, 32, 35
Position.....	34	Stabverläufe	39
Programmaufruf.....	6	Starten von RF-EL-PL	6
Q		Stelle x.....	32
Querschnitte	25	Steuerpanel	41
Querschnittsbezeichnung	25	Stückliste.....	34, 35
Querschnittsbibliothek.....	25, 26	Summe.....	35
Querschnittsgrafik	27	V	
Querschnittsoptimierung.....	48	Visualisierung	38
R		Volumen.....	34
RF-DYNAM	22	Voute	26, 49
RF-EL-PL-Fall.....	46	X	
RFEM-Arbeitsfenster	37	x-Stelle	32, 33
Rohr	11	Z	
Rubin	9, 29	Zeigen-Navigator.....	38, 41
S		Zwischenergebnisse	36
Schaltflächen	37		