

**Fassung
Januar 2020**

Zusatzmodul

RF-STABIL

**Verzweigungslastfaktoren,
Knicklängen und Eigenformen**

Programm- Beschreibung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

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

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

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

Inhalt

	Inhalt	Seite
1.	Einleitung	4
1.1	Zusatzmodul RF-STABIL	4
1.2	Gebrauch des Handbuchs	5
1.3	Aufruf des RF-STABIL-Moduls	5
2.	Eingabedaten	7
2.1	Basisangaben	7
3.	Berechnung	14
3.1	Kontrolle	14
3.2	Start der Berechnung	14
4.	Ergebnisse	16
4.1	Verzweigungslastfaktoren	16
4.2	Knicklängen und Verzweigungslasten	18
4.3	Eigenformen knotenweise	19
4.4	Eigenformen stabweise	21
4.5	Eigenformen flächenweise	22
5.	Ergebnisauswertung	23
5.1	Ergebnismasken	23
5.2	Ergebnisse am RFEM-Modell	24
5.3	Filter für Ergebnisse	27
6.	Ausdruck	28
6.1	Ausdruckprotokoll	28
6.2	Grafikausdruck	28
7.	Allgemeine Funktionen	30
7.1	RF-STABIL-Analysefälle	30
7.2	Einheiten und Dezimalstellen	32
7.3	Export der Ergebnisse	33
8.	Beispiele	35
8.1	Rechteckplatte	35
8.2	Kreisplatte	38
8.3	Gevouteter Kragträger	40
A	Literatur	43
B	Index	44

1. Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-STABIL

Das RFEM-Zusatzmodul RF-STABIL führt eine Eigenwertanalyse für Stab- und Flächentragwerke durch, um die kritischen Lastfaktoren einschließlich Eigenformen zu bestimmen. Anhand des kritischen Lastfaktors (Verzweigungslastfaktor des Gesamtsystems) kann das Stabilitätsverhalten des Systems bewertet werden. Die zugehörige Eigenform gibt Auskunft über den stabilitäts- oder beulgefährdeten Bereich im statischen Modell. Bei dieser Analyse werden auch Volumenelemente berücksichtigt.

Mit RF-STABIL lassen sich mehrere Knick- oder Beulfiguren gleichzeitig analysieren. Nach der Berechnung werden – nach dem kritischen Lastfaktor sortiert – die maßgebenden Versagensformen des RFEM-Modells aufgelistet. Die zugehörigen Knicklängen und Knicklasten werden für weitere Stabilitätsberechnungen benötigt, die für druckbeanspruchte Stäbe zu führen sind.

In der Grafik der Knickfiguren sind die stabilitätsgefährdeten Bereiche im Modell sofort zu erkennen. Damit lassen sich konstruktive Maßnahmen ableiten, um den Versagensformen zu begegnen.

RF-STABIL ist ein nützliches Werkzeug für die Analyse knick- oder beulgefährdeter Systeme wie z. B. schlanker Träger oder dünnwandiger Schalen: Zum einen kann anhand des kritischen Lastfaktors beurteilt werden, ob das System generell stabilitätsgefährdet ist (Knicken, Biegedrillknicken, Beulen). Zum anderen können im Zusatzmodul RF-IMP die Eigenformen verwendet werden, Imperfektionen anzusetzen und für die Berechnung in RFEM zu nutzen.

RF-STABIL zeichnet sich durch folgende Leistungsmerkmale aus:

- Ermittlung mehrerer Stabilitätsfiguren in einem Rechenlauf
- Übernahme der Normalkräfte von RFEM-Lastfällen oder -kombinationen
- Wahlweise Berücksichtigung von entlastenden Zugkräften
- Optionale Berücksichtigung der Steifigkeitsanpassungen von RFEM
- Eigenwertanalyse unter Vorgabe eines benutzerdefinierbaren Laststeigerungsfaktors
- Ermittlung der Knickfiguren instabiler Modelle für Problemlösungen
- Leistungsfähige Gleichungslöser nach verschiedenen Eigenwertmethoden mit benutzerdefinierbaren Parametern
- Normierungsmöglichkeit für Eigenformen
- Tabellarische Darstellung der Verzweigungslastfaktoren und zugehörigen Eigenformen
- Visualisierung der Knick- und Beulfiguren mit Animationsmöglichkeit in der Grafikoberfläche von RFEM
- Druckausgabe im RFEM-Ausdruckprotokoll mit automatischer Aktualisierung bei Änderungen
- Aufbereitung der Knickfiguren für die Zusatzmodule RF-IMP, RF-KAPPA, RF-STAHl EC3, RF-STAHl AISC/AS/BS/CS/GB/IS/NTC-DF/SANS/SIA/SP, RF-ALUMINIUM und RF-HOLZ Pro
- Datenexport zu MS Excel oder als CSV-Datei

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Erfolg mit RF-STABIL.

Ihr Team von DLUBAL SOFTWARE GMBH

1.2 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-STABIL 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. [Bearbeiten]. Sie sind auch am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Tabellen und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, damit die Erläuterungen nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie im Handbuch nicht fündig werden, können Sie die Suchfunktion für die [Knowledge Base](#) auf unserer Website nutzen, um in den Beiträgen zum Programm RF-STABIL eine Lösung zu finden. Auch unsere [FAQs](#) bieten eine Reihe an Hilfestellungen.

1.3 Aufruf des RF-STABIL-Moduls

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

Menü

Sie können das Zusatzmodul aufrufen mit dem RFEM-Menü

Zusatzmodule → Stabilität → RF-STABIL.

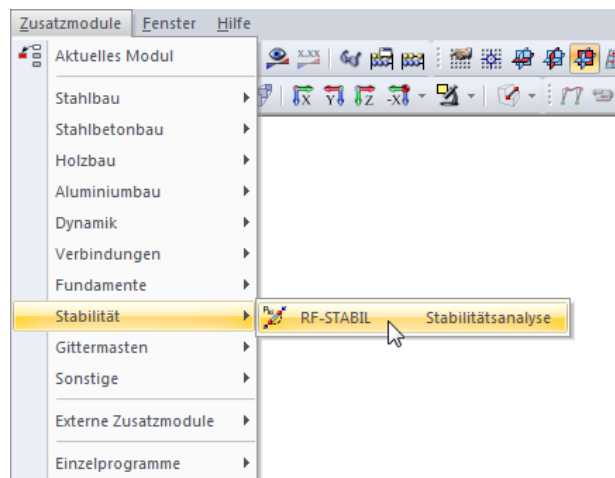


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stabilität* → *RF-STABIL*

Navigator

Alternativ rufen Sie das Zusatzmodul im *Daten-Navigator* auf durch Anklicken des Eintrags

Zusatzmodule → RF-STABIL.

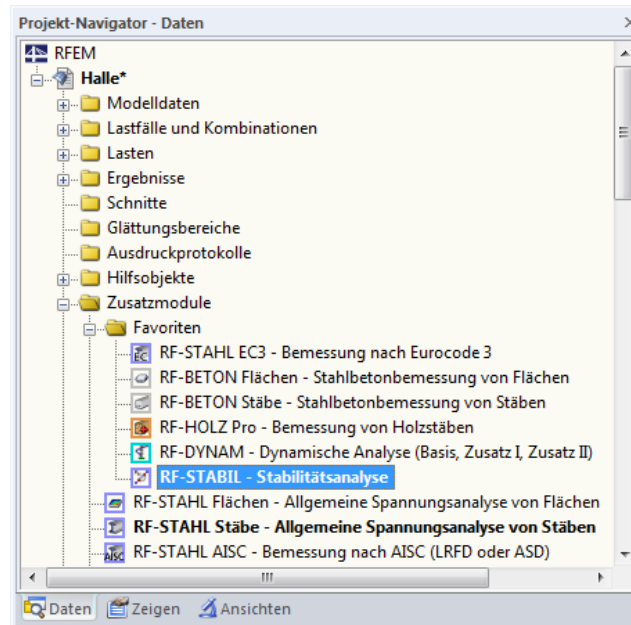


Bild 1.2: Daten-Navigator *Zusatzmodule* → *RF-STABIL*

Panel

Wenn im RFEM-Modell schon Ergebnisse von RF-STABIL vorliegen, können Sie das Zusatzmodul auch über das Panel starten:

Stellen Sie den relevanten RF-STABIL-Fall in der Lastfallliste der Menüleiste ein. Lassen Sie über die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] die Knickfigur grafisch darstellen.

Im Panel können Sie nun die Schaltfläche [RF-STABIL] zum Aufruf des Moduls benutzen.

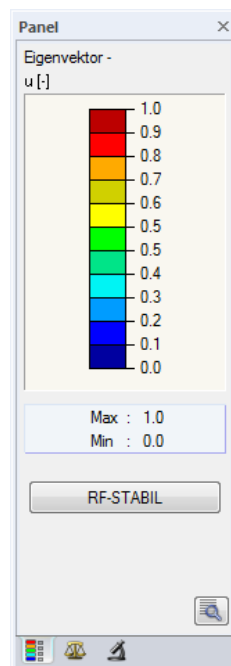
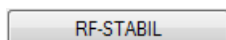
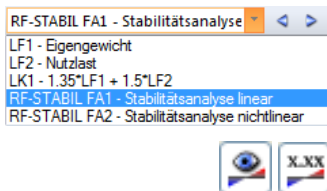


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [RF-STABIL]

2. Eingabedaten

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls erscheint ein neues Fenster. Links wird ein Navigator angezeigt, der die verfügbaren Masken verwaltet. Darüber befindet sich eine Pulldownliste mit den Stabilitätsfällen (siehe Kapitel 7.1, Seite 30).

Beim ersten Aufruf von RF-STABIL werden die angelegten Lastfälle und Kombinationen automatisch eingelesen.

Eine Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator aufrufen. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] (vorwärts) und [F3] (rückwärts) möglich.

[OK] sichert die Eingaben. RF-STABIL wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm. [Abbrechen] beendet das Zusatzmodul, ohne die Daten zu speichern.



2.1 Basisangaben

In Maske 1.1 *Basisangaben* sind die Parameter für die Stabilitätsuntersuchung festzulegen. Sie ist die einzige Eingabemaske des Moduls.

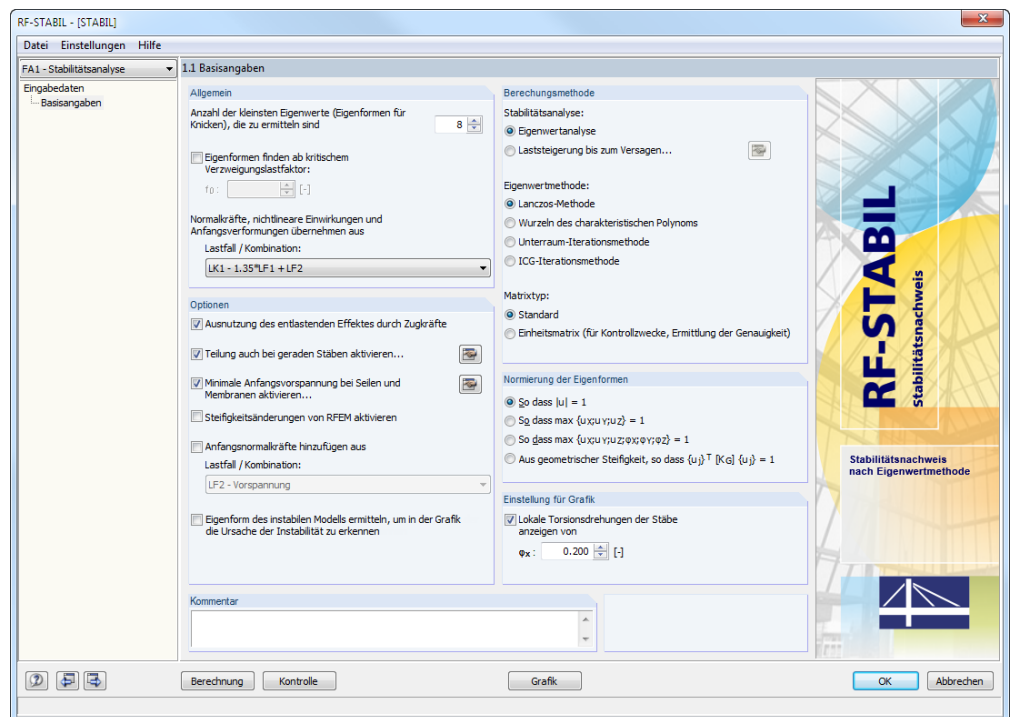


Bild 2.1: Maske 1.1 Basisangaben

Allgemein

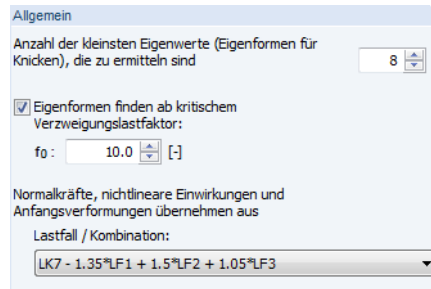


Bild 2.2: Vorgabe der Stabilitätsfiguren und Normalkräfte

Anzahl der kleinsten Eigenwerte (Eigenformen für Knicken), die zu ermitteln sind

RF-STABIL ermittelt die ungünstigsten Eigenwerte des Modells, deren Anzahl in diesem Eingabefeld festzulegen ist. Die Obergrenze liegt bei 1 000 Knick- bzw. Beulfiguren, sofern es die Anzahl der Freiheitsgrade und der RAM-Speicher erlauben.



Falls nach der Analyse negative Verzweigungslastfaktoren ausgewiesen werden, sollte die Anzahl der zu ermittelnden Eigenwerte erhöht werden. Bei einer zu geringen Anzahl ist es nicht möglich, die negativen Eigenwerte auszublenden, um nur die positiven, realistischen Ergebnisse darzustellen. Alternativ kann die ICG-Eigenwertlösermethode verwendet werden (siehe unten), um negative Verzweigungslastfaktoren auszuschließen.

Eigenformen finden ab kritischem Verzweigungslastfaktor

RF-STABIL kann auch nur die Eigenwerte ausgeben, die einen bestimmten Lastfaktor überschreiten. Haken Sie hierzu das Kontrollfeld an und legen dann im Eingabefeld den Mindest-Verzweigungslastfaktor f_0 fest. Ein Beispiel hierzu finden Sie in unserer Knowledge Base:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000827>

Normalkräfte, nichtlineare Einwirkungen und Anfangsverformungen übernehmen aus Lastfall / Kombination

Die Liste enthält alle Lastfälle und Lastkombinationen des Modells. Es ist ein Eintrag auszuwählen. Die Normalkräfte und ggf. Steifigkeiten dieser Einwirkung werden dann bei der Ermittlung der Stabilitätsfigur berücksichtigt. Dieser Lastfall oder diese Kombination sollte in RFEM nach Theorie I. Ordnung und ohne Steifigkeitsabminderungen (Material, Querschnitt, Stab, Fläche) berechnet werden.

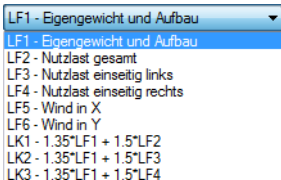
Ergebniskombinationen fehlen in der Liste, da sie wegen der max/min-Extremwerte keine eindeutigen Normalkraftverläufe aufweisen.

Neben den Normalkräften werden auch die Steifigkeitsbedingungen aus RFEM übernommen. Das bedeutet: Es wird das statische System übernommen, das am Ende der Berechnung des Lastfalls oder der Lastkombination vorlag. Dieses System ist Ausgangspunkt der Eigenwertanalyse. Damit lassen sich nichtlineare Effekte wie z. B. ausfallende Stäbe, Lager und Gelenke oder Stabnichtlinearitäten näherungsweise bei der linearen Eigenwertanalyse in RF-STABIL erfassen.

Wenn noch keine Ergebnisse für den Lastfall oder die Lastkombination vorliegen, werden die Schnittgrößen vor der RF-STABIL-Analyse automatisch berechnet.



Bei der Berechnung der Knickfigur eines Stabwerks und der Knicklängen spielt die Belastung eine entscheidende Rolle, denn die Knickwerte hängen nicht nur vom statischen Modell, sondern auch vom Verhältnis der Normalkräfte zur Gesamtverzweigungslast N_{cr} ab. Es ist daher empfehlenswert, einen Lastfall mit voller vertikaler Belastung (ohne Wind) vorzugeben, damit die meisten Stäbe Druckkräfte erhalten.



Optionen

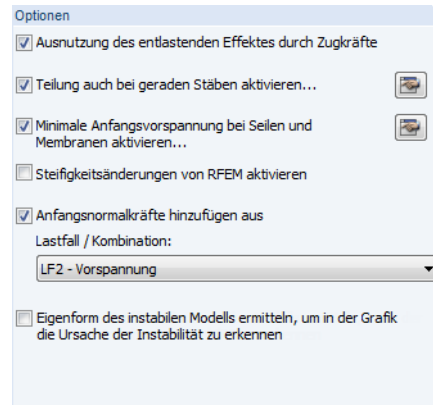


Bild 2.3: Optionen

Ausnutzung des entlastenden Effektes durch Zugkräfte

Ist das Kontrollfeld angehakt, werden die im Modell wirkenden Zugnormalkräfte bei der Ermittlung der Eigenwerte berücksichtigt. Sie führen in der Regel zu einer Stabilisierung des Modells.

Teilung auch bei geraden Stäben aktivieren

Für bessere Näherungslösungen kann es erforderlich sein, die Stabteilungen zu verfeinern – insbesondere für Fachwerkstäbe, Vouten und gebettete Stäbe. Ein Beispiel hierzu finden Sie in unserer Knowledge Base:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000804>

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] kann die Stabteilung angepasst werden. Es öffnet sich der RFEM-Dialog *FE-Netz-Einstellungen*.

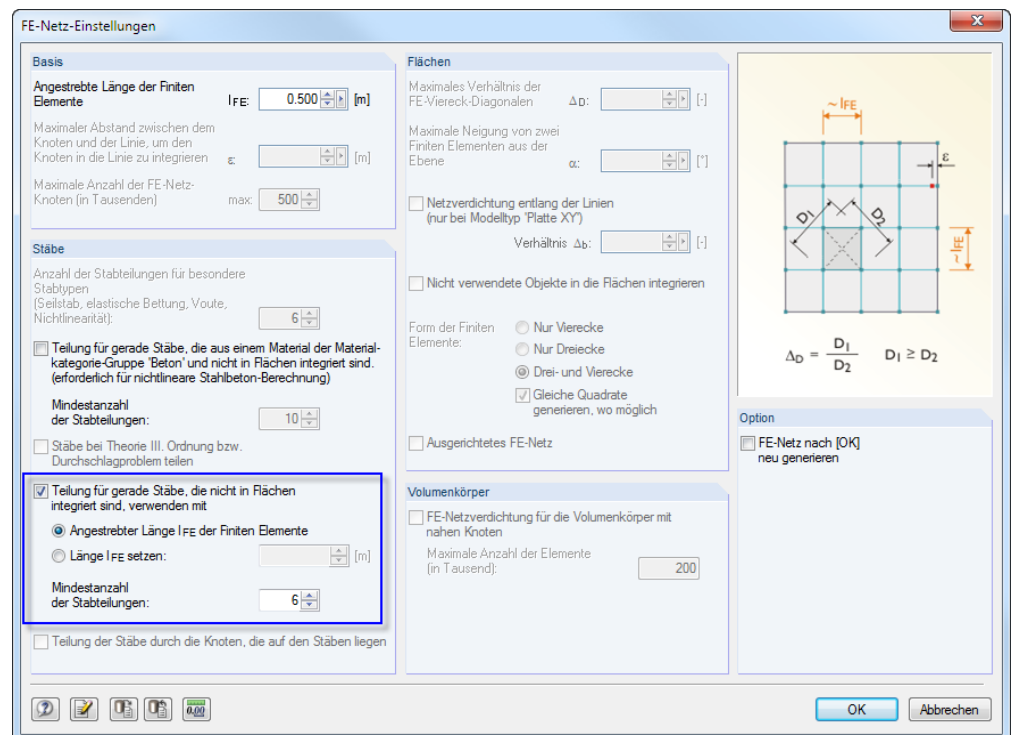



Bild 2.4: Dialog *FE-Netz-Einstellungen*

Minimale Anfangsvorspannung bei Seilen und Membranen aktivieren

Ist dieses Kontrollfeld aktiviert, so werden Seilstäbe und Membranflächen mit einer äußerst kleinen Vorspannung versehen, die den Ausfall dieser Elemente schon zu Beginn der Berechnung verhindert. Damit lässt sich das Modell ebenfalls stabilisieren.



Über die Schaltfläche [Bearbeiten] können Größe und Art die Anfangsvorspannung im Detail festgelegt werden.

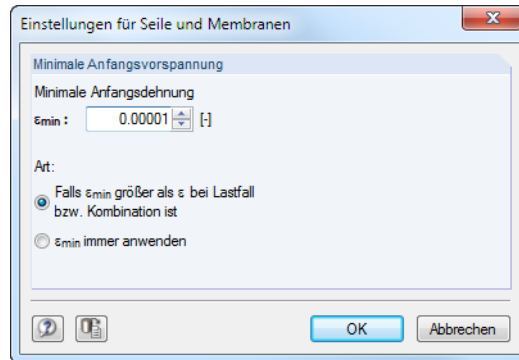


Bild 2.5: Dialog *Einstellung für Seile und Membranen*

Steifigkeitsänderungen von RFEM aktivieren

Dieses Kontrollfeld steuert, ob die in RFEM definierten Anpassungsfaktoren für die Material-, Stab-, Lager-, Gelenk- und Querschnittsteifigkeiten bei der Eigenwertanalyse berücksichtigt werden. Diese Faktoren sind in den entsprechenden Kapiteln des RFEM-Handbuchs beschrieben. Ist das Häkchen gesetzt, werden bei der Berechnung in RF-STABIL alle Steifigkeitsfaktoren des Lastfalls bzw. der Lastkombination unter Berücksichtigung von Ausfallkriterien angesetzt.

In RF-STABIL besteht somit eine Steuerungsmöglichkeit, die Steifigkeitsänderungen unabhängig von den Einstellungen in RFEM anzusetzen. Damit lassen sich z. B. die Normalkräfte einer Lastkombination in RFEM ohne Abminderung berechnen und dann die Verzweigungslasten in RF-STABIL mit den reduzierten Material-, Stab- und Querschnittsteifigkeiten bestimmen.

Falls jedoch in RFEM die Steifigkeitsänderung für den Lastfall oder die Lastkombination aktiviert ist, so ist dieses Kontrollfeld gesperrt: Damit wird sichergestellt, dass die Eigenwerte mit den Modellannahmen übereinstimmen.

Wenn die Eigenwerte als „charakteristische“ Eigenschaft des Modells ermittelt werden sollen, brauchen die Steifigkeitsänderungen nicht berücksichtigt werden.

Anfangsnormalkräfte hinzufügen aus Lastfall / Kombination

Nach dem Aktivieren des Kontrollfeldes kann ein Lastfall oder eine Lastkombination ausgewählt werden, dessen bzw. deren Normalkräfte für eine Anfangsverformung verwendet werden sollen. Mit dieser Option kann z. B. die stabilisierende Wirkung eines anderen Lastfalls (als oben im Abschnitt *Allgemein* vorgegeben) bei der Eigenwertermittlung berücksichtigt werden.

Ergebniskombinationen fehlen in der Liste, da sie keine eindeutigen Normalkraftverläufe aufweisen.

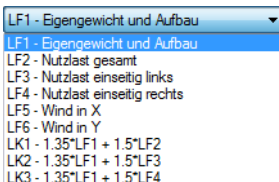
Eigenform des instabilen Modells ermitteln, um in der Grafik die Ursache der Instabilität zu erkennen

Mit dieser Funktion lassen sich Modellierungsfehler im System aufdecken. Modelle, die als instabil bewertet werden, werden einer lastunabhängigen Eigenwertanalyse unterzogen. Bei der grafischen Auswertung des Ergebnisses sind Problembereiche wie z. B. nicht angeschlossene Stäbe oder Stäbe mit zu vielen offenen Freiheitsgraden gut zu erkennen.

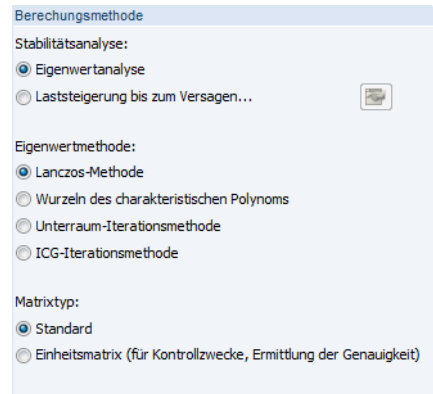
Berechnungsabbrüche aufgrund Überlastungen lassen sich mit der Funktion nicht lokalisieren.

Ein Beispiel zu dieser Funktion finden Sie in folgendem Beitrag unserer Knowledge Base:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000573>



Berechnungsmethode



Berechnungsmethode

Stabilitätsanalyse:

- ☒ Eigenwertanalyse
- ☐ Laststeigerung bis zum Versagen...

Eigenwertmethode:

- ☒ Lanczos-Methode
- ☐ Wurzeln des charakteristischen Polynoms
- ☐ Unterraum-Iterationsmethode
- ☐ ICG-Iterationsmethode

Matrixtyp:

- ☒ Standard
- ☐ Einheitsmatrix (für Kontrollzwecke, Ermittlung der Genauigkeit)

Bild 2.6: Berechnungsmethode

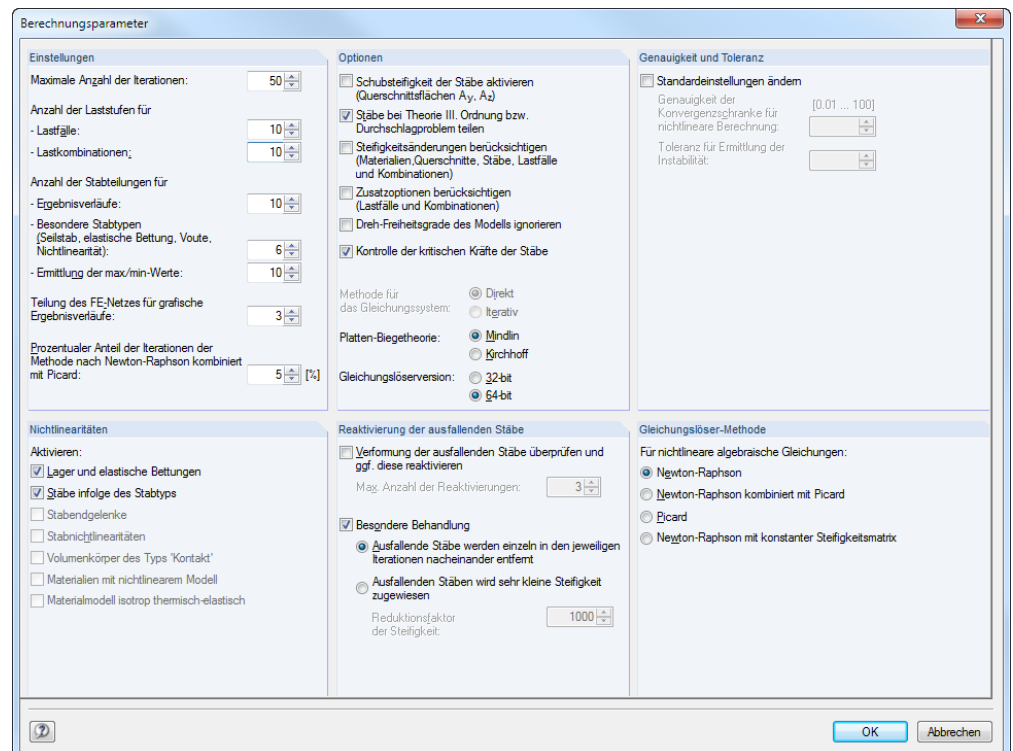
Stabilitätsanalyse

Mit der Standardeinstellung *Eigenwertanalyse* werden die Stabilitätsfiguren rein linear bestimmt. Die Eigenschaften nichtlinear wirkender Elemente wie z. B. Zugstäbe oder Lager mit Ausfallkriterien werden hier nicht erfasst. Die Steifigkeiten solcher Elemente werden in der Matrix als ständig wirkend angesetzt.

Die Option *Laststeigerung bis zum Versagen* ermöglicht es, sämtliche Nichtlinearitäten bei der Ermittlung der Eigenwerte zu berücksichtigen. Im Zuge einer schrittweisen Erhöhung der Last werden Ausfallkriterien und nichtlineare Wirkungen von Stäben, Lagern, Gelenken, Materialien etc. erfasst. Die Berechnung erfolgt iterativ und benötigt daher entsprechend Zeit. Prinzipbedingt lässt sich mit diesem Verfahren nur der niedrigste Eigenwert verlässlich bestimmen.



Über die Schaltfläche [Bearbeiten] können die Iterationsparameter vorgegeben werden.



Berechnungsparameter

Einstellungen

Maximale Anzahl der Iterationen: 50

Anzahl der Laststufen für:

- Lastfälle: 10
- Lastkombinationen: 10

Anzahl der Stabteilungen für:

- Ergebnisverläufe: 10
- Besondere Stabtypen (Selbstab, elastische Bettung, Voute, Nichtlinearität): 6
- Ermittlung der max/min-Werte: 10

Teilung des FE-Netzes für grafische Ergebnisverläufe: 3

Prozentualer Anteil der Iterationen der Methode nach Newton-Raphson kombiniert mit Picard: 5 [%]

Optionen

- ☐ Schubsteifigkeit der Stäbe aktivieren (Querschnittsflächen A_y, A_z)
- ☒ Stäbe bei Theorie III. Ordnung bzw. Durchschlagproblem teilen
- ☐ Steifigkeitsänderungen berücksichtigen (Materialien, Querschnitte, Stäbe, Lastfälle und Kombinationen)
- ☐ Zusatzoptionen berücksichtigen (Lastfälle und Kombinationen)
- ☐ Dreh-Freiheitsgrade des Modells ignorieren
- ☒ Kontrolle der kritischen Kräfte der Stäbe

Methode für das Gleichungssystem: ☒ Direkt ☐ Iterativ

Platten-Biegetheorie: ☒ Mindlin ☐ Kirchhoff

Gleichungslöserversion: ☐ 32-bit ☒ 64-bit

Genauigkeit und Toleranz

- ☒ Standardeinstellungen ändern
- Genauigkeit der Konvergenzschranke für nichtlineare Berechnung: [0.01 ... 100]
- Toleranz für Ermittlung der Instabilität: []

Nichtlinearitäten

Aktivieren:

- ☒ Lager und elastische Bettungen
- ☒ Stäbe infolge des Stabtyps
- ☐ Stabendgelenke
- ☐ Stabnichtlinearitäten
- ☐ Volumenkörper des Typs "Kontakt"
- ☐ Materialien mit nichtlinearem Modell
- ☐ Materialmodell isotrop thermisch-elastisch

Reaktivierung der ausfallenden Stäbe

- ☐ Verformung der ausfallenden Stäbe überprüfen und ggf. diese reaktivieren
- Max. Anzahl der Reaktivierungen: 3
- ☒ Besondere Behandlung
- ☒ Ausfallende Stäbe werden einzeln in den jeweiligen Iterationen nacheinander entfernt
- ☐ Ausfallenden Stäben wird sehr kleine Steifigkeit zugewiesen
- Reduktionsfaktor der Steifigkeit: 1000

Gleichungslöser-Methode

Für nichtlineare algebraische Gleichungen:

- ☒ Newton-Raphson
- ☐ Newton-Raphson kombiniert mit Picard
- ☐ Picard
- ☐ Newton-Raphson mit konstanter Steifigkeitsmatrix

OK Abbrechen

Bild 2.7: Dialog *Berechnungsparameter*

Der Dialog *Berechnungsparameter* ist im Kapitel 7.3.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Die Berechnung erfolgt automatisch nach der direkten Gleichungslösermethode.

Wenn wie im Bild 2.7 dargestellt 10 Laststufen eingestellt sind, werden erst 10%, dann 20% dann 30% ... 100%, 110% ... 480% etc. der Last aufgebracht: Die Last wird in 10%-Stufen so lange gesteigert, bis das System instabil wird. Damit ist der kritische Lastfaktor gefunden.



Die Berechnungsdauer lässt sich durch folgende *Berechnungsparameter*-Einstellungen reduzieren (Vorschläge in Klammern):

- Maximale Anzahl der Iteration nicht zu groß (50)
- Anzahl der Laststufen nicht zu fein (5)
- Reaktivierung ausfallender Stäbe aus

Eigenwertmethode

In RF-STABIL stehen verschiedene Berechnungsverfahren zur Verfügung:

- **Lanczos-Methode**

Die Eigenwerte werden nach einer direkten Methode ermittelt. Mit diesem Algorithmus lässt sich meist eine rasche Konvergenz erreichen. Da die Lanczos-Methode schneller ist als die Unterraum-Methode (siehe unten), ist sie in RF-STABIL voreingestellt.

Weitere Informationen: de.wikipedia.org/wiki/Lanczos-Verfahren

- **Wurzeln des charakteristischen Polynoms**

Auch diese Methode basiert auf einem direkten Verfahren. Bei größeren Systemen kann diese Methode schneller sein als die Lanczos-Methode. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist die Genauigkeit der Berechnung von höheren Eigenwerten.

Weitere Informationen: de.wikipedia.org/wiki/Charakteristisches_Polynom

- **Unterraum-Iterationsmethode**

Bei dieser Methode werden alle Eigenwerte in einem Schritt ermittelt. Die Bandbreite der Steifigkeitsmatrix hat bei dieser Methode einen großen Einfluss auf die Berechnungsdauer.

Die Steifigkeitsmatrix wird im Arbeitsspeicher abgelegt. Sobald dieser Speicher nicht mehr ausreicht, muss Windows Dateien auf die Festplatte auslagern. Dadurch wird der Rechner spürbar gebremst. Die Unterraum-Methode eignet sich somit nicht für komplexe Systeme.

Bei der Unterraum-Methode sind negative Verzweigungslastfaktoren nicht auszuschließen.

Weitere Informationen: de.wikipedia.org/wiki/Krylow-Unterraum-Verfahren

- **ICG-Iterationsmethode**

Die ICG (*Incomplete Conjugate Gradient*) Iterationsmethode benötigt wenig Arbeitsspeicher. Es werden nur die Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix gespeichert, die ungleich null sind. Ein Nachteil ist, dass die Eigenwerte nacheinander ermittelt werden. Die Bandbreite hat jedoch keinen Einfluss auf die Berechnungsdauer.

Die ICG-Methode ist geeignet, um sehr große Systeme mit wenigen Eigenwerten zu analysieren. Diese Methode liefert auch keine negativen Verzweigungslastfaktoren: Es wird so lange iteriert, bis die vorgegebene Anzahl positiver Eigenwerte erreicht ist.

Bei der ICG-Methode werden manchmal nicht alle niedrigsten Eigenwerte gefunden.

Weitere Informationen: de.wikipedia.org/wiki/CG-Verfahren



Matrixtyp

Mit der Voreinstellung *Standard* benutzt RF-STABIL die geometrische Steifigkeitsmatrix des linearen Gleichungssystems.

Die *Einheitsmatrix* stellt eine quadratische Matrix mit dem Wert eins auf der Hauptdiagonalen dar. Dieser „mathematische“ Ansatz sollte nur für numerische und kinematische Untersuchungen benutzt werden. Lasten und Normalkräfte spielen bei der Lösung des allgemeinen Eigenwertproblems keine Rolle.

Die Matrixtypen für Eigenwertlösungen sind in [3], Kapitel 7 näher vorgestellt.

Normierung der Eigenformen

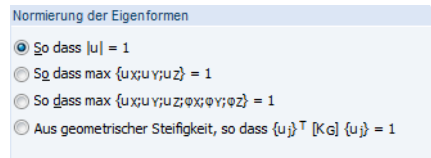


Bild 2.8: Normierung der Eigenformen

Die Eigenformen können auf verschiedene Weise normiert („Norm eins“) werden:

- Maximale Verschiebung $|u| = 1$
- Maximale globale Verschiebung (max aus u_x, u_y, u_z) = 1
- Maximale globale Verformung (max aus $u_x, u_y, u_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$) = 1
- Maximalwert des Produkts $\{u_j\}^T \cdot [K_G] \cdot \{u_j\} = 1$
mit $\{u_j\}^T$ Transponierter Eigenformvektor
 $[K_G]$ Geometrische Steifigkeit
 $\{u_j\}$ Eigenformvektor

Je nach Vorgabe stellt die größte Verschiebung bzw. Verformung den Referenzwert eins dar, auf den die übrigen Ergebnisse skaliert werden.

Einstellungen für Grafik

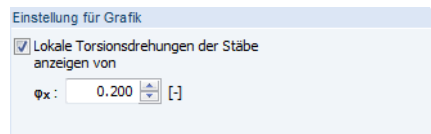
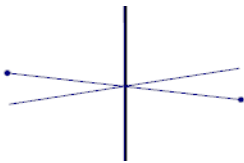


Bild 2.9: Einstellungen für Grafik



Das Kontrollfeld steuert, ob in der Ergebnisgrafik der Eigenformen die *Torsionsverdrehungen der Stäbe* dargestellt werden (siehe Bild links).

Als Standard werden nur Torsionsverdrehungen ϕ_x mit normierten Werten größer als 0,2 dargestellt. Damit wird die Übersichtlichkeit der Grafik sichergestellt.

Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung, die z. B. den aktuellen Stabilitätsfall beschreibt.

3. Berechnung

3.1 Kontrolle

Kontrolle

Vor der Berechnung sollten die Eingabedaten kurz auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden. Die [Kontrolle] lässt sich über einen Klick auf die gleichnamige Schaltfläche ausführen.

Falls eine Unstimmigkeit entdeckt wird, erscheint eine entsprechende Meldung.



Bild 3.1: Ergebnis der Kontrolle

3.2 Start der Berechnung

Berechnung

Die [Berechnung] kann über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

RF-STABIL sucht nach den Normalkräften, die bei der Stabilitätsuntersuchung berücksichtigt werden müssen. Falls keine Ergebnisse des Lastfalls bzw. der Lastkombination vorliegen, startet zunächst die RFEM-Berechnung zur Ermittlung der Schnittgrößen.

Die Berechnung kann auch in der RFEM-Oberfläche gestartet werden: Im Dialog *Zu berechnen* (Menü *Berechnung* → *Zu berechnen*) sind die Zusatzmodul-Fälle wie Lastfälle oder Kombinationen aufgelistet.

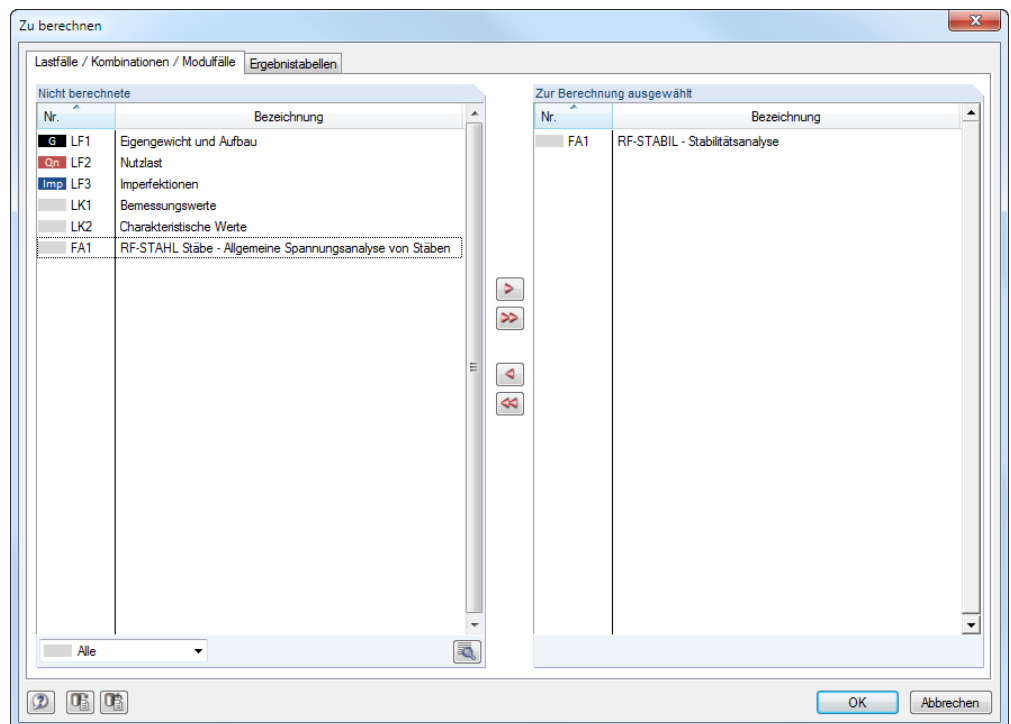
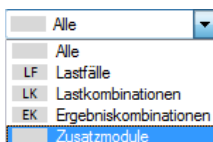


Bild 3.2: Dialog *Zu berechnen*

Falls die RF-STABIL-Fälle in der Liste *Nicht berechnete* fehlen, ist die Selektion am Ende der Liste auf *Alle* oder *Zusatzmodule* zu ändern.





Mit der Schaltfläche [▶] werden die selektierten RF-STABIL-Fälle in die rechte Liste übergeben. [OK] startet dann die Berechnung.



Ein Stabilitätsfall kann auch über die Liste der Symbolleiste direkt berechnet werden: Stellen Sie den RF-STABIL-Fall ein und klicken dann die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] an.



Bild 3.3: Direkte Berechnung eines RF-STABIL-Stabilitätsfalls in RFEM

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

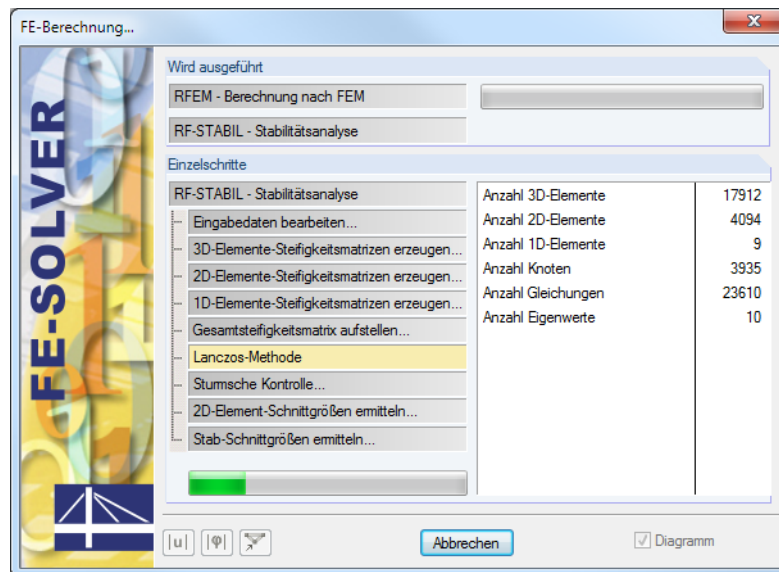


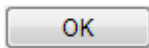
Bild 3.4: RF-STABIL-Berechnung

Bei der Eigenwertanalyse nach einem der direkten Berechnungsverfahren wird, wie im obigen Bild erkennbar, die so genannte *Sturmsche Kontrolle* durchlaufen. Diese prüft, ob in einem bestimmten Intervall alle Eigenwerte gefunden wurden. Dabei wird die Diagonalmatrix aus der GAUß-Zerlegung genutzt, deren Anzahl an negativen Diagonalelementen der Anzahl der Eigenwerte unterhalb der jeweiligen Intervallgrenze entspricht. Man wendet also den Sturmschen Test für die betrachteten Intervallgrenzen an und bildet daraus die Differenz.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5 tabellarisch ausgegeben.

Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske 2.1 *Verzweigungslastfaktoren*. Die Masken 2.2 bis 2.5 geben die Knicklängen und -lasten sowie die Eigenformen nach bestimmten Kriterien geordnet aus.



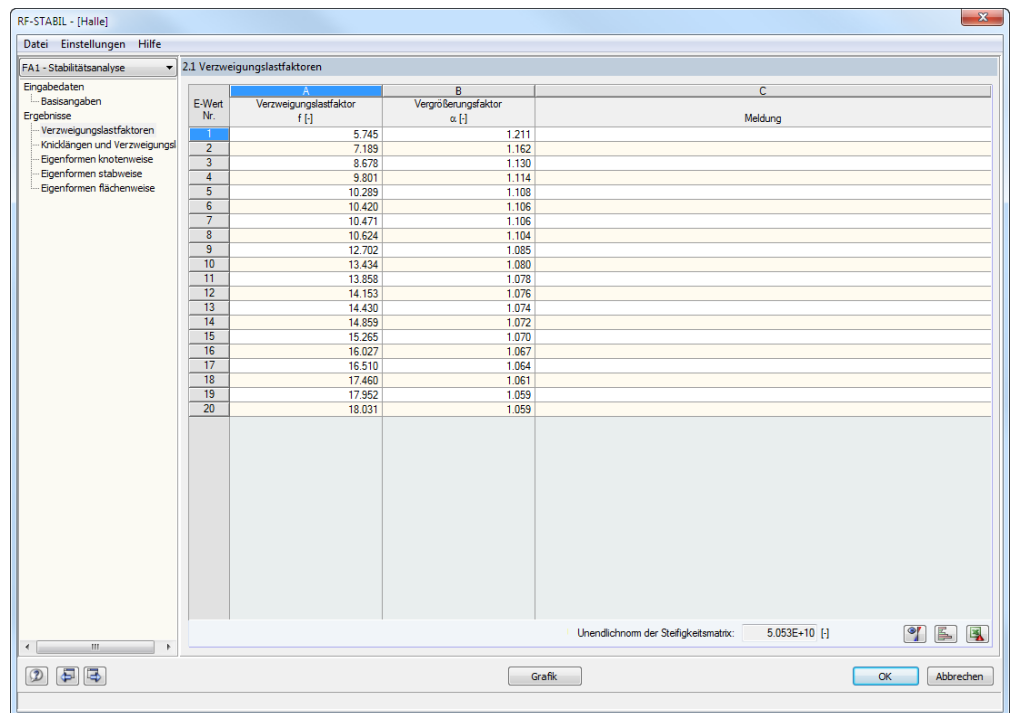
Jede Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator direkt ansteuern. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] und [F3] möglich.

[OK] sichert die Ergebnisse. RF-STABIL wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm.

Das Kapitel 4 *Ergebnisse* stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Überprüfung der Resultate ist im Kapitel 5 *Ergebnisauswertung* ab Seite 23 beschrieben.

4.1 Verzweigungslastfaktoren

Die erste Ergebnismaske gibt Aufschluss über die Verzweigungslastfaktoren des Modells.



E-Wert Nr.	A Verzweigungslastfaktor f [-]	B Vergrößerungsfaktor α [-]	C Meldung
1	5.745	1.211	
2	7.189	1.162	
3	8.678	1.130	
4	9.801	1.114	
5	10.289	1.108	
6	10.420	1.106	
7	10.471	1.106	
8	10.624	1.104	
9	12.702	1.085	
10	13.434	1.080	
11	13.858	1.078	
12	14.153	1.076	
13	14.430	1.074	
14	14.859	1.072	
15	15.265	1.070	
16	16.027	1.067	
17	16.510	1.064	
18	17.460	1.061	
19	17.952	1.059	
20	18.031	1.059	

Unendlichnom der Steifigkeitsmatrix: 5.053E+10 [-]

Bild 4.1: Maske 2.1 *Verzweigungslastfaktoren*

E-Wert Nr.

Für jeden Eigenwert werden die Verzweigungslast- und Vergrößerungsfaktoren ausgewiesen. Die Ergebniszeilen sind nach Eigenwert-Nummern geordnet.

Verzweigungslastfaktor f

Für jeden Eigenwert wird der Lastverzweigungsfaktor angegeben. Bei Faktoren kleiner 1,00 ist das System instabil. Ein Verzweigungsfaktor größer 1,00 bedeutet, dass die Belastung aus den vorgegebenen Normalkräften multipliziert mit diesem Faktor zum Knick- oder Beulversagen des Systems führt.



Gemäß EN 1993-1-1, Abs. 5.2.1(3) erfordern Verzweigungslastfaktoren kleiner 10 für elastische Berechnungen eine Untersuchung nach Theorie II. Ordnung.

Bei einem negativen Verzweigungslastfaktor tritt wegen der Zugkräfte im Modell kein Stabilitätsversagen auf. Es ist keine Aussage über das zu erwartende Knickverhalten möglich.

Vergrößerungsfaktor α

Der Vergrößerungsfaktor ermittelt sich wie folgt:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{1}{f}}$$

Gleichung 4.1: Vergrößerungsfaktor

Der Vergrößerungsfaktor beschreibt die Beziehung zwischen den Momenten nach Theorie I. und II. Ordnung.

$$M^{II} = \alpha \cdot M^I$$

mit M^I Moment nach Theorie I. Ordnung, jedoch unter Berücksichtigung der Ersatzbelastung für die Verformung

M^{II} Moment nach Theorie II. Ordnung

Gleichung 4.2: Momentenbeziehung

Gleichung 4.2 gilt jedoch nur, wenn die Biegelinie infolge der Belastung der Knickfigur ähnlich und der Verzweigungslastfaktor f größer 1,00 ist.

Meldung

In Spalte C kann der Hinweis auf einen negativen Verzweigungslastfaktor erscheinen. Dies bedeutet: Mit der umgekehrten Wirkrichtung der gegebenen Belastung (inverse Vorzeichen) würde sich ein Beul- oder Knickversagen einstellen.



Negative Verzweigungslastfaktoren lassen sich durch eine Erhöhung der zu ermittelnden Stabilitätsfiguren oder die Anwendung der ICG-Iterationsmethode vermeiden.

Am unteren Ende der Tabelle wird die *Unendlichnorm der Steifigkeitsmatrix* angegeben. Mit dieser mathematischen Norm lässt sich die Größenordnung des höchsten Eigenwerts abschätzen. Dieser Wert ist z. B. für die Lösungsgenauigkeit von Bedeutung (siehe [3], Kapitel 3, 2.2.3 und Kapitel 7).

Unendlichnorm der Steifigkeitsmatrix: 5.053E+10 [-]

4.2 Knicklängen und Verzweigungslasten

2.2 Knicklängen und Verzweigungslasten

Stab Nr.	A Knoten Nr.		C Stablänge L [m]	D E-Form Nr.	E Knicklänge [m]		G Knicklängenbeiwert [-]		I Verzweigungslast N or [kN]
	Anfang	Ende			L _{cr,y}	L _{cr,z}	k _{cr,y}	k _{cr,z}	
110	47	65	5.000	1	11.077	11.077	2.215	2.215	19.425
				2	9.904	9.904	1.981	1.981	24.299
				3	9.035	9.035	1.807	1.807	29.198
				4	8.567	8.567	1.713	1.713	32.472
112	36	56	5.000	1	9.703	9.703	1.941	1.941	25.317
				2	8.675	8.675	1.735	1.735	31.669
				3	7.914	7.914	1.583	1.583	38.054
				4	7.505	7.505	1.501	1.501	42.321
113	37	57	5.000	1	122.414	30.949	24.483	6.190	22.503
				2	109.451	27.672	21.890	5.534	28.150
				3	99.848	25.244	19.970	5.049	33.824
				4	94.680	23.938	18.936	4.788	37.617
114	38	58	5.000	1	116.385	29.425	23.277	5.885	24.895
				2	104.060	26.309	20.812	5.262	31.142
				3	94.930	24.001	18.986	4.800	37.420
				4	90.017	22.759	18.003	4.552	41.616
115	39	59	5.000	1	121.853	30.808	24.371	6.162	22.711
				2	108.949	27.545	21.790	5.509	28.409
				3	99.390	25.128	19.878	5.026	34.137
				4	94.246	23.828	18.849	4.766	37.965
116	40	60	5.000	1	9.690	9.690	1.938	1.938	25.383
				2	8.664	8.664	1.733	1.733	31.752
				3	7.904	7.904	1.581	1.581	38.153
				4	7.495	7.495	1.499	1.499	42.431
121	19	22	7.810	1			Ausfall -> keine Ermittlung		
				2			Ausfall -> keine Ermittlung		
				3			Ausfall -> keine Ermittlung		
				4			Ausfall -> keine Ermittlung		
122	29	12	7.810	1			Zug im Stab -> keine Ermittlung		
				2			Zug im Stab -> keine Ermittlung		
				3			Zug im Stab -> keine Ermittlung		
				4			Zug im Stab -> keine Ermittlung		
123	11	23	7.810	1			Ausfall -> keine Ermittlung		
				2			Ausfall -> keine Ermittlung		

Sortieren nach: ☒ Stäben ☐ Eigenformen

Bild 4.2: Maske 2.2 Knicklängen und Verzweigungslasten

Sortieren nach: ☒ Stäben ☐ Eigenformen

Diese Ergebnismaske wird angezeigt, wenn Stäbe im Modell existieren. Die Auflistung der Knicklängen und -lasten kann nach *Stäben* oder *Eigenformen* geordnet erfolgen.

Stab Nr.

Es werden für alle Stäbe des Modells die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchung ausgewiesen. Stäbe mit Zugkräften und ausgefallene Stäbe sind entsprechend gekennzeichnet.

Knoten Nr. Anfang / Ende

Jeder Stab ist durch einen Anfangs- und einen Endknoten definiert. Die Nummern werden jeweils in diesen beiden Spalten angezeigt.

Stablänge L

In dieser Spalte wird die geometrische Länge eines jeden Stabes angezeigt.

E-Figur Nr.

Bei der stabweisen Auflistung sind in dieser Spalte die Nummern der Knickfiguren angegeben.

Knicklänge $L_{cr,y}$ / $L_{cr,z}$

Die Knicklänge $L_{cr,y}$ (bzw. $L_{cr,u}$) beschreibt das Knickverhalten rechtwinklig zur „starken“ Stabachse y (bzw. u bei unsymmetrischen Querschnitten), $L_{cr,z}$ bzw. $L_{cr,v}$ entsprechend das Ausweichen rechtwinklig zur „schwachen“ Stabachse z (bzw. v).

Die Knicklängen L_{cr} basieren auf den in Spalte I ausgewiesenen stabspezifischen Knicklasten, die wiederum auf die Verzweigungslast des Gesamtmodells bezogen sind. Die Knicklängen sind somit im Kontext des Verhältnisses der Stabnormalkräfte zur Gesamtverzweigungslast zu bewerten. Für einfache Fälle sind die Knicklängen als EULER-Fälle 1 bis 4 bekannt.

Manchmal kann die ungünstigste System-Verzweigungslast die kritische Last eines entkoppelten, d. h. gelenkig angeschlossenen Einzelstabs sein. Dies ist in der Grafik der Eigenformen erkennbar, da nur an diesem Stab ein sinusförmiger Ausschlag vorliegt. Es handelt sich dann um eine so genannte lokale Instabilität. Da die Knicklängen aller anderen Stäbe für diesen Versagensfall unbrauchbar sind, müssen sie einer „höheren“ Knickfigur entnommen werden. Erst dort versagt das Gesamtsystem. Beispiele hierzu finden Sie in unseren FAQs:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/faq/000299>

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/faq/000300>

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/faq/003007>

Knicklängenbeiwert $k_{cr,y}$ / $k_{cr,z}$

Die auf die lokalen Stabachsen y und z (bzw. u und v) bezogenen Knicklängenbeiwerte beschreiben das Verhältnis zwischen Knick- und Stablänge.

$$k_{cr} = \frac{L_{cr}}{L}$$

Gleichung 4.3: Knicklängenbeiwert k_{cr}

Verzweigungslast N_{cr}

In dieser Spalte wird für jeden Stab die kritische Normalkraft N_{cr} ausgewiesen, die in Bezug auf die jeweilige Eigenform vorliegt. Die einzelnen Knicklasten und zugehörigen Knicklängen sind daher stets im Kontext der jeweiligen Gesamtsystem-Verzweigungslast zu sehen.

4.3 Eigenformen knotenweise

2.3 Eigenformen knotenweise

Knoten Nr.	E-Form Nr.	B Normierte Verschiebungen [-]			E Normierte Verdrehungen [-]		
		ux	uy	uz	ϕx	ϕy	ϕz
1	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	1	-0.00022	0.00076	0.00000	0.00019	0.00006	-0.00146
	2	0.00053	-0.00104	0.00000	-0.00026	-0.00011	0.00259
	3	-0.00367	0.00043	0.00000	0.00030	0.00063	-0.07864
	4	0.00119	-0.00029	-0.00001	-0.00012	0.00003	0.02675
4	1	-0.00023	-0.00194	-0.00016	0.00085	0.00005	-0.00038
	2	0.00055	0.00528	0.00022	-0.00596	-0.00002	0.00238
	3	-0.00371	-0.13699	-0.00062	0.00518	-0.00027	-0.00304
	4	0.00106	0.04669	-0.00149	0.00392	0.00098	0.00012
5	1	-0.00024	-0.00113	-0.00030	0.00145	0.00003	0.00046
	2	0.00054	0.01247	0.00006	-0.01182	0.00012	0.00387
	3	-0.00347	0.00184	0.00174	0.00399	-0.00106	0.06835
	4	0.00068	-0.00307	-0.00586	0.01050	0.00153	-0.02453
6	1	-0.00024	-0.00179	-0.00027	0.00142	-0.00004	-0.00078
	2	0.00046	0.03508	-0.00089	0.01140	0.00008	0.00053
	3	-0.00297	-0.00409	0.00789	-0.07040	-0.00042	-0.04690
	4	0.00015	-0.00997	-0.01216	0.08446	-0.00003	0.00711
7	1	-0.00027	-0.00025	0.00002	-0.00005	-0.00004	0.00098
	2	0.00044	0.01287	-0.00064	-0.00616	-0.00010	-0.00375
	3	-0.00275	0.00017	0.00557	-0.00355	0.00091	0.02950
	4	-0.00040	-0.00387	-0.00570	0.00265	-0.00150	0.00739
8	1	-0.00027	0.00151	0.00009	-0.00016	0.00001	-0.00012
	2	0.00041	0.00396	-0.00030	-0.00303	-0.00010	-0.00235
	3	-0.00248	0.05004	0.00244	-0.00220	0.00094	-0.00383
	4	-0.00076	0.01358	-0.00149	0.00092	-0.00094	0.00097
9	1	-0.00026	-0.00069	0.00000	-0.00017	0.00005	-0.00129
	2	0.00038	-0.00057	0.00000	-0.00014	-0.00010	-0.00108

Sortieren nach: ☒ Knoten ☐ Eigenformen

Bild 4.3: Maske 2.3 Eigenformen knotenweise

Sortieren nach: ☒ Knoten ☐ Eigenformen

Für jede Eigenform werden die normierten Verschiebungen und Verdrehungen der Modellknoten ausgegeben. Die Maske lässt sich nach *Knoten* oder *Eigenformen* sortieren.

Knoten Nr.

Die Eigenformen werden für die in der RFEM-Tabelle 1.1 *Knoten* definierten Objekte aufgelistet. Ergebnisse in FE-Knoten oder in Stabteilungspunkten liegen tabellarisch nicht vor.

E-Form Nr.

Die Verformungen werden für jede berechnete Eigenform aufgelistet.

Normierte Verschiebungen $u_x / u_y / u_z$

Die in den Spalten B bis D aufgelisteten Verschiebungen sind auf die Achsen des globalen Koordinatensystems bezogen. Sie sind auf das Extremum 1 der Gesamtverschiebung bzw. das in Maske 1.1 *Basisangaben* vorgegebene Maximum normiert (siehe Bild 2.8, Seite 13).

Normierte Verdrehungen $\varphi_x / \varphi_y / \varphi_z$

In den Spalten E bis G sind die Werte der normierten Knotenrotationen aufgelistet.



Werden ausschließlich Null-Werte bei den normierten Verschiebungen eines Stabmodells ausgewiesen, ist dies meist auf große Verdrillungen der Stäbe zurückzuführen (siehe folgendes Bild). Diese Effekte wirken sich nicht auf die Verschiebungen der Stabenden aus. Daher sind die ausgewiesenen Knicklängen und Verzweigungslasten dieser Stäbe wenig aussagekräftig.

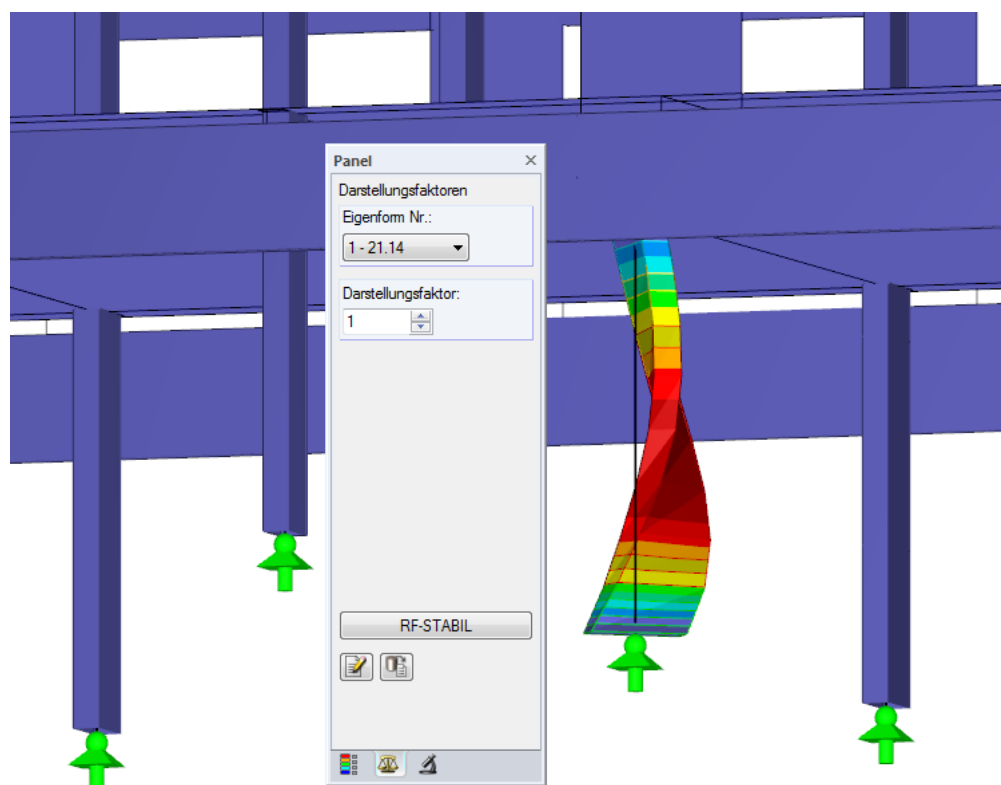


Bild 4.4: Verdrillung einer dünnwandigen Rechteckstütze

4.4 Eigenformen stabweise

Diese Ergebnismaske erscheint nur, wenn Stäbe im Modell verwendet werden.

2.4 Eigenformen stabweise

Stab Nr.	Knoten Nr.	Stelle x [m]	E-Form Nr.	Normierte Verschiebungen [-]			Normierte Verdrehungen [-]		
				u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
43	43	0.000	1	0.00628	0.00036	0.00470	-0.00197	0.00019	-0.46035
			2	-0.00059	0.00664	0.00020	-0.01377	-0.00031	0.36635
			3	-0.00164	0.00200	0.00065	0.00044	-0.00056	0.00794
			4	0.00498	0.00267	0.01103	-0.00140	-0.00178	-0.00175
44	44	6.274	1	0.00628	-0.00235	0.00019	-0.03844	0.00096	0.42710
			2	-0.00056	0.03448	0.00219	-0.23650	-0.00008	-0.02278
			3	-0.00166	-0.00273	0.00394	0.01699	-0.00022	-0.00442
			4	0.00496	0.01001	0.01464	0.04081	0.00108	0.01579
44	44	0.000	1	0.00622	-0.00235	-0.00091	0.03647	0.00096	0.42728
			2	-0.00017	0.03448	0.00226	-0.23686	-0.00008	0.01872
			3	-0.00095	-0.00273	0.00417	0.01596	-0.00022	-0.00731
			4	0.00743	0.01001	0.01356	0.04293	0.00108	0.00845
45	45	6.274	1	0.00622	-0.00210	-0.00495	0.00384	0.00010	-0.46135
			2	-0.00014	0.00713	0.00095	-0.01106	0.00030	-0.36192
			3	-0.00097	0.00009	0.00280	0.00043	0.00051	0.00676
			4	0.00735	0.00075	0.00069	-0.00070	0.00198	-0.03679
45	45	0.000	1	0.00622	-0.00210	-0.00495	0.00383	0.00010	-0.46135
			2	-0.00014	0.00713	0.00095	-0.01106	0.00030	-0.36192
			3	-0.00097	0.00009	0.00280	0.00043	0.00051	0.00676
			4	0.00735	0.00075	0.00069	-0.00070	0.00198	-0.03679
46	46	3.262	1	0.00622	-0.99616	-0.00388	0.04298	-0.00078	0.05280
			2	-0.00012	-0.98754	0.00019	0.03800	0.00014	0.01692
			3	-0.00098	0.01593	0.00112	-0.00037	0.00046	-0.00146
			4	0.00736	-0.11522	-0.00308	0.00409	0.00011	0.00567
46	46	0.000	1	0.00622	-0.99616	-0.00388	0.04295	-0.00078	0.05283
			2	-0.00012	-0.98754	0.00019	0.03799	0.00014	0.01695
			3	-0.00098	0.01593	0.00112	-0.00037	0.00046	-0.00146
			4	0.00737	-0.11522	-0.00308	0.00409	0.00011	0.00568
47	47	3.011	1	0.00622	-0.00087	-0.00054	0.03689	-0.00137	0.43949
			2	-0.00011	0.00030	0.00001	0.03866	-0.00001	0.45910
			3	-0.00099	0.00000	0.00009	-0.00034	0.00023	-0.00490
			4	0.00737	-0.00068	-0.00064	0.00258	-0.00160	0.03798
51	51	0.000	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Sortieren nach: ☒ Stäben ☐ Eigenformen

Bild 4.5: Maske 2.4 Eigenformen stabweise

Die einzelnen Spalten sind im Kapitel 4.3 erläutert. Zusätzlich wird die *Stelle x* am Stab angegeben, an der sich der jeweilige Anfangs- oder Endknoten befindet.

Die Maske lässt sich nach *Stäben* oder *Eigenformen* sortieren.

Sortieren nach: ☒ Stäben ☐ Eigenformen

4.5 Eigenformen flächenweise

Diese Maske wird angezeigt, wenn das Modell Flächen enthält.

2.5 Eigenformen flächenweise

Fläche Nr.	Punkt Nr.	X	Y	Z	E-Form Nr.	Normierte Verschiebungen [-]			Normierte Verdrehungen [-]		
						u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
	10	12.981	-17.000	-3.000	1	0.00227	-0.00004	0.00000	0.00001	-0.00001	0.00005
					2	-0.00012	0.00125	0.00012	-0.00019	0.00001	0.00000
					3	-0.00049	0.00011	0.00000	0.00001	0.00000	-0.00001
					4	0.00222	0.00038	0.00004	-0.00005	-0.00001	0.00001
	20	12.981	-19.500	-3.000	1	0.00239	-0.00004	0.00005	-0.00002	0.00002	0.00005
					2	-0.00011	0.00125	0.00019	0.00031	0.00009	0.00000
					3	-0.00052	0.00011	-0.00002	-0.00002	-0.00001	-0.00001
					4	0.00224	0.00038	0.00011	0.00009	0.00005	0.00001
	30	13.462	-18.500	-3.000	1	0.00234	-0.00001	0.00002	-0.00003	-0.00001	0.00005
					2	-0.00012	0.00125	0.00028	0.00000	0.00010	0.00000
					3	-0.00051	0.00010	-0.00002	0.00001	-0.00001	-0.00001
					4	0.00223	0.00038	0.00012	-0.00004	0.00002	0.00001
	38	12.500	-15.000	-3.000	1	0.00218	-0.00006	0.00000	-0.00001	-0.00005	0.00006
					2	-0.00013	0.00125	0.00003	0.00022	0.00006	0.00000
					3	-0.00046	0.00011	0.00000	-0.00002	0.00022	-0.00001
					4	0.00220	0.00038	0.00001	0.00007	-0.00110	0.00001
	39	18.750	-15.000	-3.000	1	0.00218	0.00023	0.00000	-0.00002	-0.00107	0.00003
					2	-0.00012	0.00126	0.00001	0.00006	0.00004	-0.00001
					3	-0.00045	0.00002	0.00000	0.00000	0.00022	-0.00002
					4	0.00223	0.00040	0.00000	0.00001	-0.00136	0.00000
	48	14.423	-16.500	-3.000	1	0.00225	0.00003	0.00001	0.00001	0.00001	0.00005
					2	-0.00012	0.00126	0.00006	-0.00009	-0.00001	0.00000
					3	-0.00048	0.00009	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00001
					4	0.00222	0.00039	0.00002	-0.00002	0.00000	0.00001
	49	14.423	-17.000	-3.000	1	0.00227	0.00003	0.00001	0.00000	0.00000	0.00005
					2	-0.00012	0.00126	0.00011	-0.00010	0.00001	0.00000
					3	-0.00049	0.00009	0.00000	0.00001	0.00000	-0.00001
					4	0.00222	0.00039	0.00003	-0.00003	0.00001	0.00001
	50	14.423	-17.500	-3.000	1	0.00230	0.00003	0.00001	-0.00001	0.00001	0.00005
					2	-0.00012	0.00126	0.00015	-0.00009	0.00004	0.00000
					3	-0.00049	0.00009	-0.00001	0.00001	0.00000	-0.00001
					4	0.00222	0.00039	0.00005	-0.00004	0.00002	0.00001
	58	12.500	-20.000	-3.000	1	0.00241	-0.00006	0.00000	-0.00004	-0.00119	0.00004
					2	-0.00011	0.00125	0.00000	0.00056	0.00006	0.00000

Sortieren nach: ☒ Flächen ☐ Eigenformen:







Bild 4.6: Maske 2.5 Eigenformen flächenweise

Sortieren nach: ☒ Flächen ☐ Eigenformen

Die Auflistung lässt sich nach *Flächen* oder *Eigenformen* sortieren.

Punkt Nr.

Die Ausgabe erfolgt für jeden Rasterpunkt der Fläche.

Die Rasterpunkte lassen sich in RFEM steuern, denn für Flächen sind benutzerdefinierte Ergebnistraster möglich. Diese Funktion ist im Kapitel 8.12 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Es ist ein Ergebnistraster mit einer Maschenweite von 50 cm voreingestellt.

Stelle X / Y / Z

In den Spalten B bis D (bzw. C bis E) wird die Lage der Rasterpunkte im globalen Koordinatensystem beschrieben.

Normierte Verschiebungen u_x / u_y / u_z

Die in den Spalten F bis H aufgelisteten Verschiebungen sind auf die Achsen des globalen Koordinatensystems bezogen. Sie sind auf das Maximum normiert, das in Maske 1.1 Basisangaben vorgegeben ist (siehe Bild 2.8, Seite 13).

Normierte Verdrehungen φ_x / φ_y / φ_z

In den Spalten I bis K sind die Werte der normierten Punktrotationen aufgelistet.

5. Ergebnisauswertung

Die Ergebnisse der Eigenwertanalyse lassen sich auf verschiedene Weise auswerten. Für die grafische Evaluation steht das RFEM-Arbeitsfenster zur Verfügung.

5.1 Ergebnismasken

Zunächst sollten die in Maske 2.1 ausgewiesenen *Verzweigungslastfaktoren* überprüft werden.

Verzweigungslastfaktor negativ

Sollte ein negativer Verzweigungslastfaktor ausgegeben werden, so konnte infolge der Zugnormalkräfte kein Knick- oder Beulversagen festgestellt werden. Dies kann man sich so vorstellen: Bei einer umgekehrten Wirkrichtung der Belastung (inverse Vorzeichen) würde das Modell knicken oder beulen. Negative Verzweigungslastfaktoren lassen sich oft durch eine Erhöhung der zu ermittelnden Stabilitätsfiguren oder Anwendung der ICG-Iterationsmethode vermeiden.

Verzweigungslastfaktor < 1

Verzweigungslastfaktoren kleiner 1,00 bedeuten, dass das System instabil ist!



2.1 Verzweigungslastfaktoren		
E-Wert Nr.	A	B
	Verzweigungslastfaktor f [-]	Vergrößerungsfaktor α [-]
1	0.822	
2	1.510	2.961
3	1.510	2.961
4	1.979	2.022

Bild 5.1: Instabiles System

Nur ein positiver Verzweigungsfaktor größer 1,00 lässt die Aussage zu, dass die Belastung infolge der vorgegebenen Normalkräfte multipliziert mit diesem Faktor zum Knick- bzw. Beulversagen des stabilen Systems führt.

Knicklängen

Bei Stäben werden in Maske 2.2 die Knicklängenbeiwerte k_{cr} für jede Knickfigur angegeben. Sie beschreiben das Knickverhalten rechtwinklig zu den jeweiligen Achsen.

2.2 Knicklängen und Verzweigungslasten										
Stab Nr.	A	B	C	D	E		F	G	H	I
	Knoten Nr. Anfang	Knoten Nr. Ende	Stablänge L [m]	E-Figur Nr.	Knicklänge [m] L _{er,y} L _{er,z}			Knicklängenbeiwert [-] k _{er,y} k _{er,z}		Verzweigungslast N _{er} [kN]
1	1	3	6.000	1	43.129	18.796		7.188	3.133	502.195
				2	38.462	16.762		6.410	2.794	631.454
				3	34.624	15.089		5.771	2.515	779.192
				4	34.610	15.083		5.768	2.514	779.836

Bild 5.2: Knicklängenbeiwerte k_{cr} von Stäben

Bei der Analyse werden die Normalkräfte iterativ so lange erhöht, bis der Verzweigungslastfall eintritt. Aus diesem kritischen Lastfaktor wird die Knicklast ermittelt, die dann wiederum den Rückschluss auf die Knicklängen und Knicklängenbeiwerte ermöglicht.

Möchte man beispielsweise für das Ausweichen rechtwinklig zur ‚starken‘ Stabachse y den maßgebenden Knicklängenbeiwert $k_{cr,y}$ ablesen, so müssen in der Regel mehrere Knickfiguren berechnet werden. Bei quadratischen Querschnitten ergeben sich gleiche Knicklängen und Knicklängenbeiwerte in beide Achsenrichtungen.



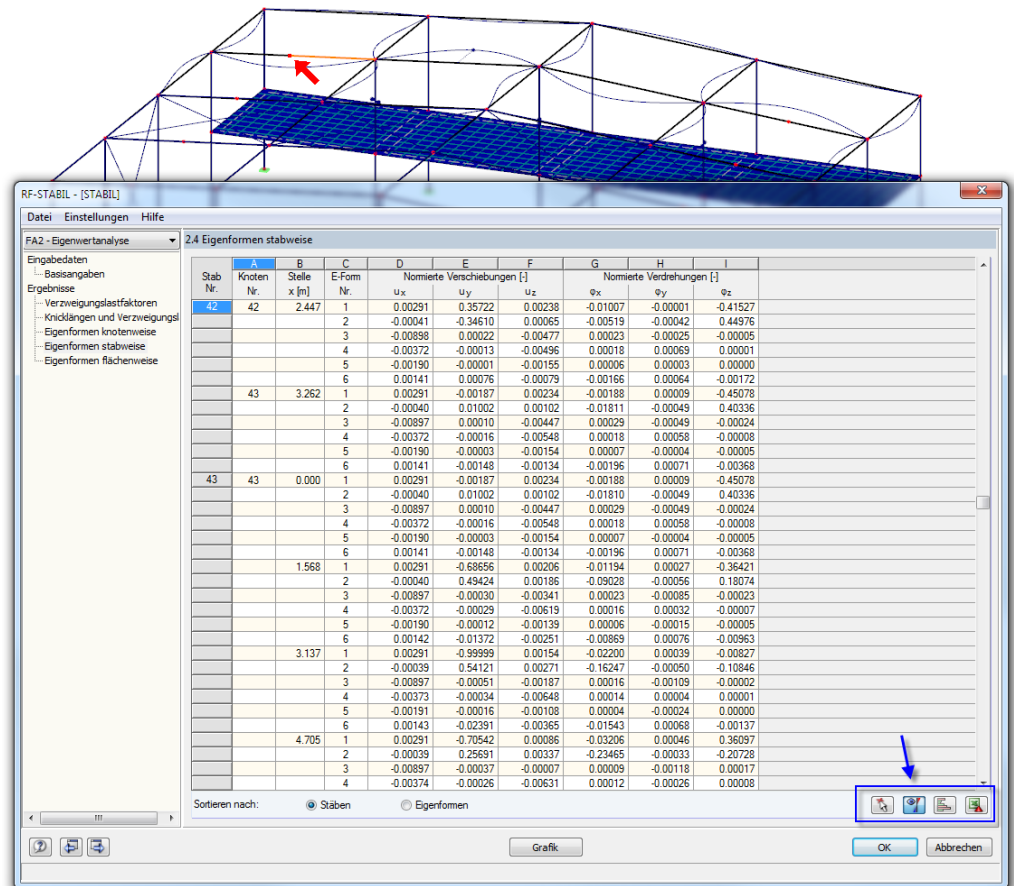
Die Knicklängenbeiwerte für Stabzüge lassen sich mit RF-STABIL nicht direkt ermitteln. Hier besteht nur die Möglichkeit, die Ergebnisse der Einzelstäbe zu bewerten. Als maßgebend für den Stabzug kann dabei der Stab angesehen werden, bei dem die kleinste Knicklast N_{cr} ausgegeben wird. Die k_{cr} -Werte können dann aus der Knicklänge dieses Stabes und der Gesamtlänge des Stabzugs ermittelt werden.

5.2 Ergebnisse am RFEM-Modell

Für die Auswertung kann auch das RFEM-Arbeitsfenster genutzt werden.

RFEM-Hintergrundgrafik

Das RFEM-Arbeitsfenster im Hintergrund ist hilfreich, um die Position einer Fläche oder eines Stabes im Modell ausfindig zu machen: Das in der Ergebnismaske von RF-STABIL selektierte Objekt ist in der Hintergrundgrafik mit der Selektionsfarbe markiert. Ein Pfeil kennzeichnet auch die x-Stelle des Stabes, um die es sich in der aktuellen Tabellenzeile handelt. Durch Verschieben des RF-STABIL-Fensters lässt sich die Fläche oder der Stab lokalisieren.



Die Schaltflächen in den Ergebnismasken sind mit folgenden Funktionen belegt:





Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Objektauswahl in RFEM-Grafik	Ermöglicht die grafische Auswahl eines Objekts (Stab, Knoten, Fläche), um dessen Ergebnisse in der Tabelle anzuzeigen
	Grafik der aktuellen Eigenform	Blendet die Eigenform der aktuellen Tabellenzeile in der RFEM-Grafik ein und aus
	Relationsbalken	Blendet die farbigen Bezugsskalen in den Ergebnismasken ein und aus
	Excel-Export	Exportiert die Tabelle nach MS Excel oder als CSV-Datei → Kapitel 7.3, Seite 33

Tabelle 5.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5

RFEM-Arbeitsfenster

Durch die grafische Auswertung der einzelnen Eigenformen lässt sich das Stabilitätsverhalten des Modells gut einschätzen: Klicken Sie die Schaltfläche [Grafik] an, um das Modul RF-STABIL zu verlassen. Im Arbeitsfenster von RFEM werden dann die Stabilitätsfiguren ähnlich wie Verformungen eines Lastfalls am Modell dargestellt.

Der aktuelle RF-STABIL-Stabilitätsfall ist voreingestellt. Der *Ergebnisse*-Navigator steuert, welche Verschiebungen oder Verdrehungen der *Eigenform* grafisch angezeigt werden.

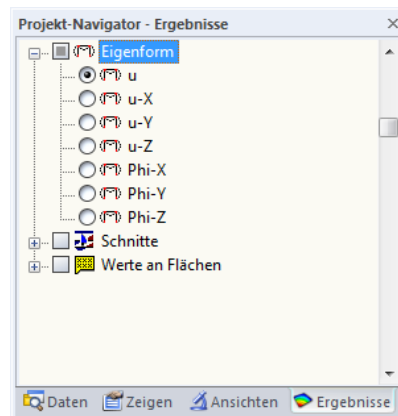
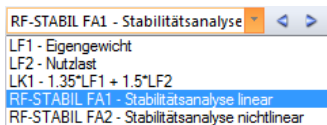
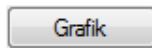


Bild 5.4: Ergebnisse-Navigator für RF-STABIL

Neben dem Gesamtvektor u lassen sich die Verschiebungs- und Verdrehungsanteile gezielt in jede der globalen Richtungen darstellen.

Die Optionen *Schnitte* und *Werte an Flächen* lassen sich auch zur grafischen Auswertung der Eigenformen nutzen. Diese Funktionen sind in den Kapiteln 9.6 und 9.4 des RFEM-Handbuchs beschrieben.



Analog zur Verformungsanzeige blendet die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] die Darstellung der Eigenformen ein oder aus. Die Schaltfläche [Ergebnisse mit Werten anzeigen] rechts davon steuert die Anzeige der Ergebniswerte in der Grafik.



Da die RFEM-Tabellen für die Auswertung der Stabilitätsanalyse keine Funktion haben, können sie ausgeblendet werden.



Das Panel ist an das Modul RF-STABIL angepasst. Die Standardfunktionen sind im Kapitel 3.4.6 des RFEM-Handbuchs ausführlich beschrieben.



Im Panel-Register *Faktoren* können die Eigenformen ausgewählt werden.

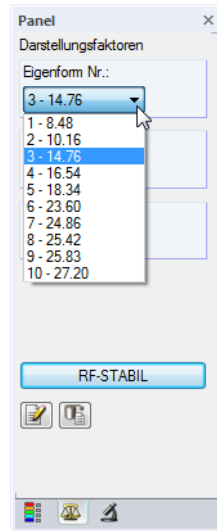


Bild 5.5: Auswahl der Eigenform im Register *Faktoren*



Wenn die knickenden Stäbe oder beulenden Flächen im Modell schwer zu finden sind, sollte der *Faktor* der Überhöhung im Panel-Register *Faktoren* vergrößert werden. Hilfreich ist auch die Animation der Verformungen, die sich über die links dargestellte Schaltfläche aktivieren lässt.

Die Darstellung der Stabergebnisse kann im *Zeigen-Navigator* über den Eintrag *Ergebnisse* → *Verformung* → *Stäbe* gesteuert werden. Standardmäßig werden die Eigenformen als *Linien* angezeigt. Die beiden übrigen Optionen helfen zur Veranschaulichung des Knickverhaltens.

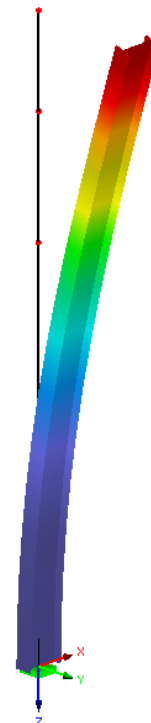
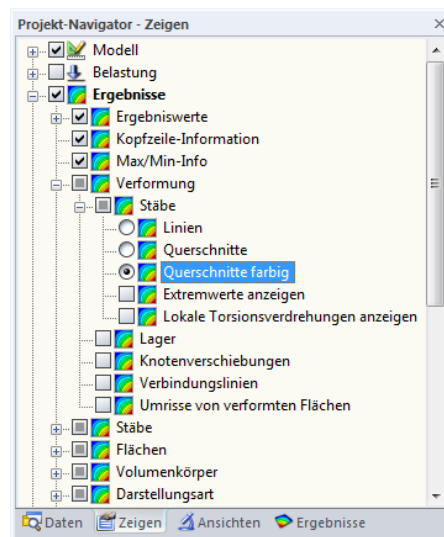


Bild 5.6: *Zeigen-Navigator*: *Ergebnisse* → *Verformung* → *Stäbe* → *Querschnitte farbig*

Die Grafiken der Eigenformen können in das Ausdruckprotokoll übergeben werden (siehe Kapitel 6.2, Seite 28).

Die Rückkehr zum Zusatzmodul ist über die Panel-Schaltfläche [RF-STABIL] möglich.

RF-STABIL

5.3 Filter für Ergebnisse

Die RF-STABIL-Ergebnismasken ermöglichen eine Auswahl nach verschiedenen Kriterien. Zusätzlich stehen die im Kapitel 9.9 des RFEM-Handbuchs beschriebenen Filtermöglichkeiten zur Verfügung, mit denen sich die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse grafisch auswerten lassen.

Auch für RF-STABIL können die Möglichkeiten der *Sichtbarkeiten* genutzt werden (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 9.9.1), um die Stäbe für die Auswertung zu filtern.

Filtern von Eigenformen

Die normierten Verformungen lassen sich als Filterkriterium im RFEM-Arbeitsfenster nutzen, das über die Schaltfläche [Grafik] zugänglich ist. Hierfür muss das Panel angezeigt werden. Sollte es nicht aktiv sein, kann es eingeblendet werden über das RFEM-Menü

Ansicht → Steuerpanel

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

Das Panel ist im Kapitel 3.4.6 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Die Filtereinstellungen für die Ergebnisse sind im ersten Panel-Register (Farbskala) vorzunehmen. Bei der Linien- oder Querschnittsdarstellung von Stab-Knickfiguren muss hierzu im *Zeigen-Navigator* auf die Darstellungsart *Querschnitte farbig* umgeschaltet werden (siehe Bild 5.6).

Im Panel kann beispielsweise eingestellt werden, dass nur normierte Verformungen größer als 0,5 angezeigt werden. Damit lassen sich die knick- oder beulgefährdeten Bereiche leichter lokalisieren.

Filtern von Flächen und Stäben

Im Register *Filter* des Steuerpanels können die Nummern ausgewählter Stäbe oder Flächen angegeben werden, um deren Knick- oder Beulfiguren gefiltert anzuzeigen. Diese Funktion ist im Kapitel 9.9.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Im Gegensatz zur Ausschnittfunktion wird das Modell mit angezeigt.

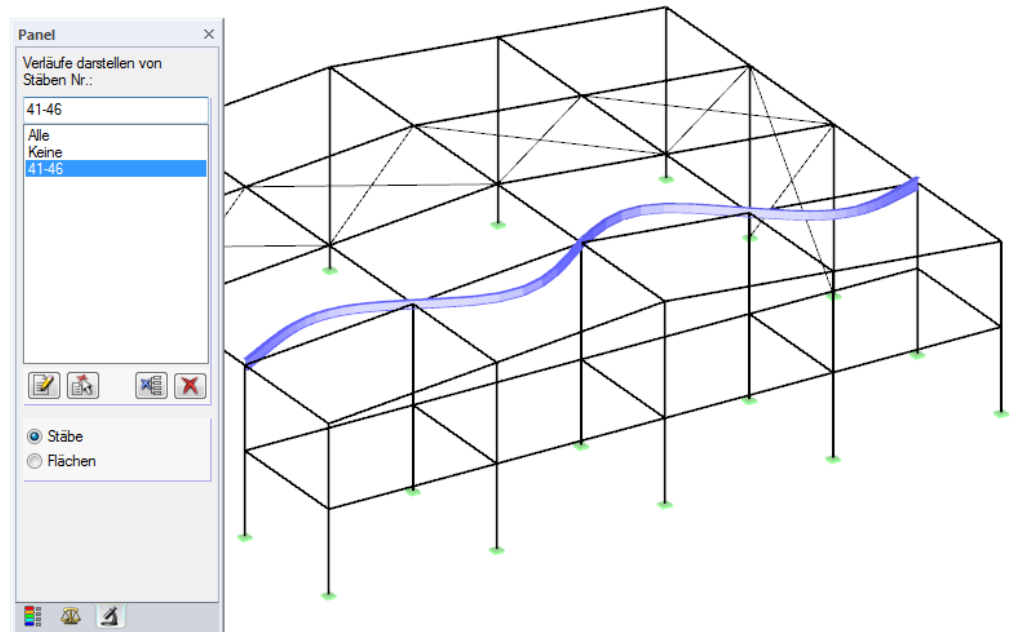


Bild 5.7: Stabfilter für Knickfigur eines Hallenriegels

6. Ausdruck

6.1 Ausdruckprotokoll

Für die Daten des Moduls RF-STABIL wird – wie in RFEM – ein Ausdruckprotokoll generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Die Selektion im Ausdruckprotokoll steuert, welche Daten der Stabilitätsanalyse im Ausdruck erscheinen.



Das Ausdruckprotokoll ist im RFEM-Handbuch beschrieben. Das Kapitel 10.1.3.4 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* erläutert, wie die Ein- und Ausgabedaten von Zusatzmodulen für den Ausdruck aufbereitet werden können.

6.2 Grafikausdruck

In RFEM kann jedes Bild, das im Arbeitsfenster angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übergeben oder direkt zum Drucker geleitet werden. Somit lassen sich auch die am RFEM-Modell gezeigten Eigenvektoren für den Ausdruck aufbereiten.



Das Drucken von Grafiken ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Die aktuelle Knick- oder Beulfigur kann gedruckt werden über Menü



Datei → Drucken

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

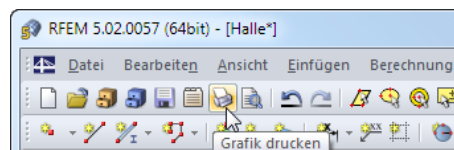


Bild 6.1: Schaltfläche *Drucken* in RFEM-Symbolleiste



Die Ergebnisverläufe von Schnitten oder Stäben lassen sich ebenfalls mit der [Drucken]-Schaltfläche in das Protokoll übergeben oder direkt ausdrucken.

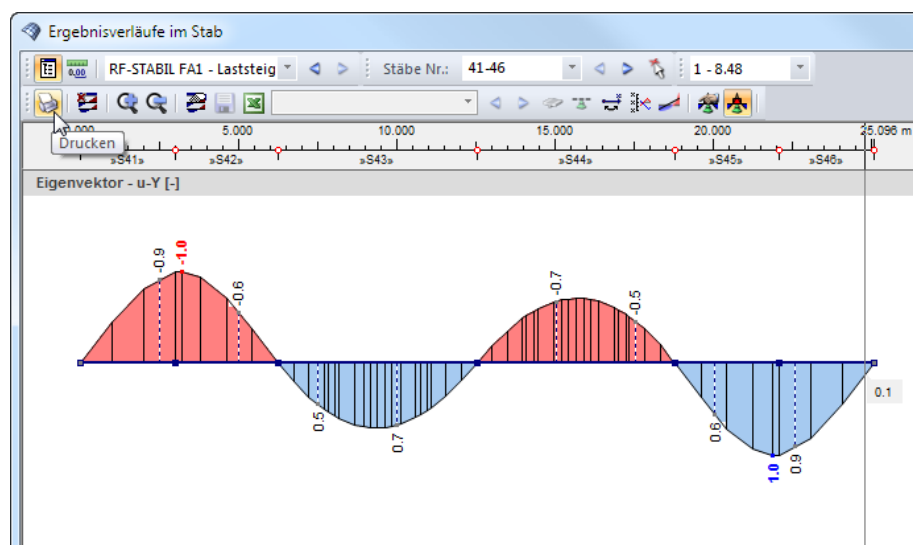
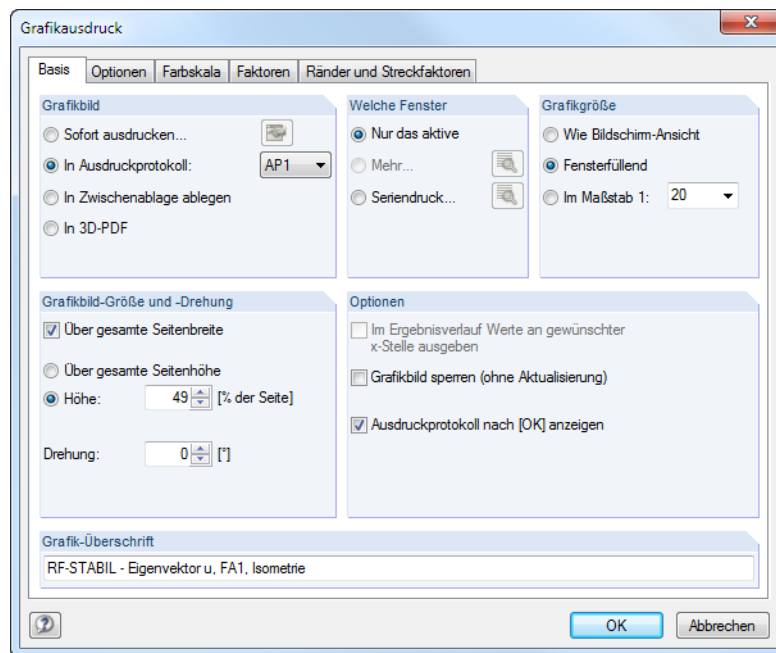


Bild 6.2: Schaltfläche *Drucken* in Symbolleiste des Ergebnisverläufe-Fensters

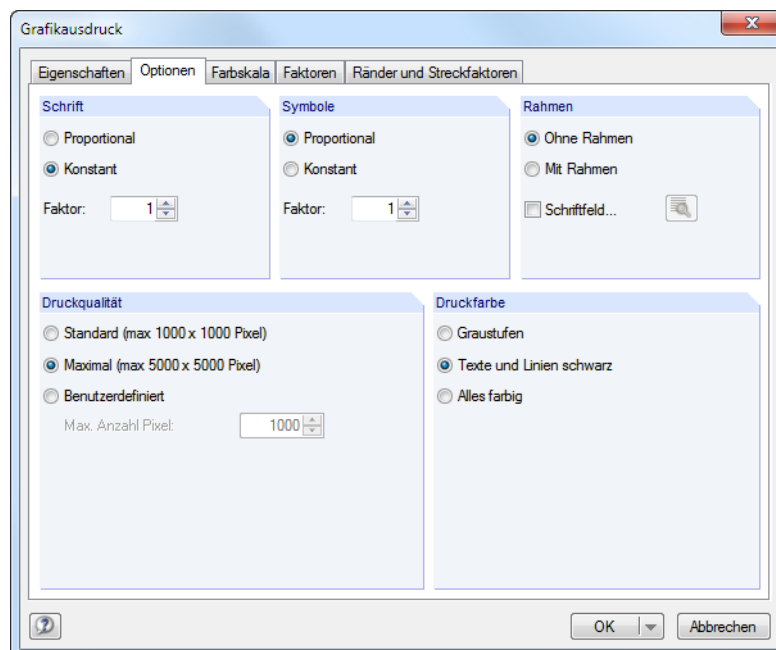
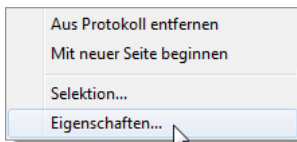
Es erscheint der Dialog *Grafikausdruck* (siehe folgendes Bild).

Bild 6.3: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Dort sind auch die übrigen Register *Optionen* und *Farbskala* erläutert.

Eine Grafik kann im Ausdruckprotokoll wie gewohnt per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.

Um eine Grafik nachträglich im Ausdruckprotokoll anzupassen, führen Sie einen Rechtsklick auf den entsprechenden Eintrag im Protokoll-Navigator aus. Die Option *Eigenschaften* im Kontextmenü ruft wieder den Dialog *Grafikausdruck* auf, in dem Sie die Anpassungen vornehmen können.

Bild 6.4: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*

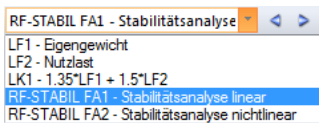
7. Allgemeine Funktionen

Dieses Kapitel beschreibt nützliche Menüfunktionen und stellt Exportmöglichkeiten für die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse vor.

7.1 RF-STABIL-Analysefälle

Analysefälle ermöglichen es, verschiedene Stabilitätsaspekte zu betrachten. So kann z. B. der Normalkrafteinfluss aus unterschiedlichen Lastfällen oder Lastkombinationen mit oder ohne Berücksichtigung von Zugkräften untersucht werden.

Die Analysefälle von RF-STABIL sind auch in RFEM über die Lastfall-Liste der Symbolleiste zugänglich.



Neuen Analysefall anlegen

Ein Analysefall wird angelegt über das RF-STABIL-Menü

Datei → Neuer Fall.

Es erscheint folgender Dialog.

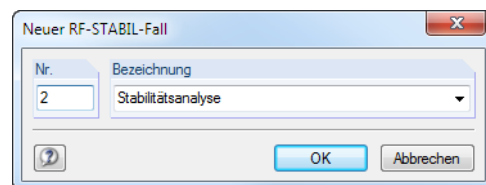


Bild 7.1: Dialog Neuer RF-STABIL-Fall

In diesem Dialog ist eine (noch freie) *Nummer* für den neuen RF-STABIL-Analysefall anzugeben. Die *Bezeichnung* erleichtert die Auswahl in der Lastfall-Liste.

Nach [OK] erscheint die RF-STABIL-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der Berechnungsparameter.

Analysefall umbenennen

Die Bezeichnung eines Analysefalls wird geändert über das RF-STABIL-Menü

Datei → Fall umbenennen.

Es erscheint folgender Dialog.

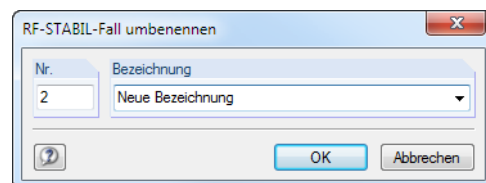


Bild 7.2: Dialog RF-STABIL-Fall umbenennen

Hier kann nicht nur eine andere *Bezeichnung*, sondern auch eine andere *Nummer* für den Analysefall festgelegt werden.

Analysefall kopieren

Die Eingabedaten des aktuellen Analysefalls werden kopiert über das RF-STABIL-Menü

Datei → Fall kopieren.

Es erscheint folgender Dialog.

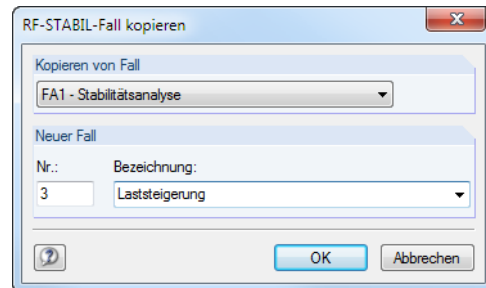


Bild 7.3: Dialog RF-STABIL-Fall kopieren

Es ist die *Nummer* und ggf. eine *Bezeichnung* für den neuen Fall festzulegen.

Analysefall löschen

Analysefälle lassen sich wieder löschen über das RF-STABIL-Menü

Datei → Fall löschen.

Es erscheint folgender Dialog.

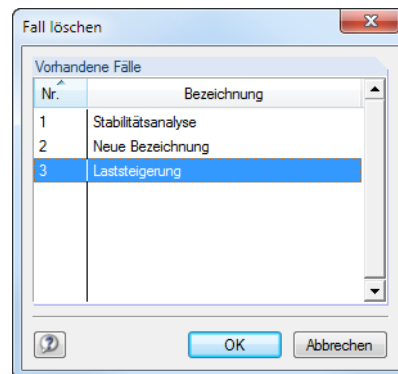


Bild 7.4: Dialog Fall löschen

Der Analysefall kann in der Liste *Vorhandene Fälle* ausgewählt werden. Mit [OK] erfolgt der Löschvorgang.

7.2 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RFEM und für die Zusatzmodule gemeinsam verwaltet. In RF-STABIL ist der Dialog zum Anpassen der Einheiten zugänglich über Menü

Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.

Es erscheint der aus RFEM bekannte Dialog. In der Liste *Programm / Modul* ist RF-STABIL vor-eingestellt.

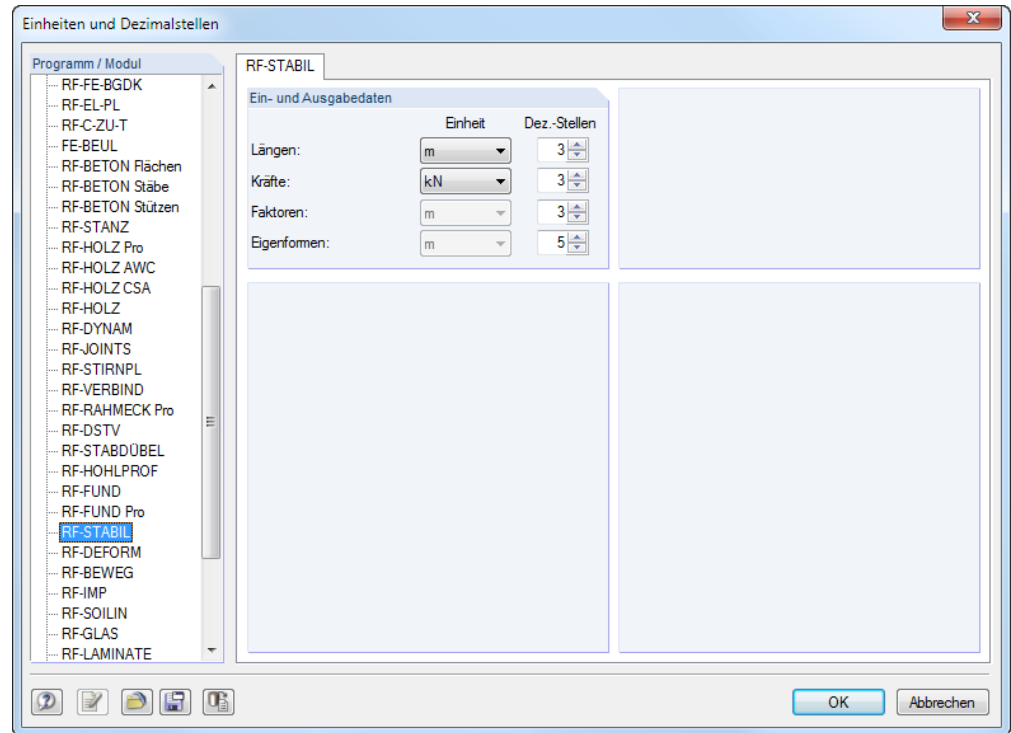


Bild 7.5: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Diese Funktionen sind im Kapitel 11.1.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

7.3 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von RF-STABIL lassen sich auch in anderen Programmen verwenden.

Zwischenablage

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

Ausdruckprotokoll

Die Daten von RF-STABIL können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe Kapitel 6.1, Seite 28) und dort exportiert werden über Menü

Datei → Export in RTF.

Diese Funktion ist im Kapitel 10.1.11 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

MS Excel

RF-STABIL ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel, oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über das Menü

Datei → Tabellen exportieren.

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

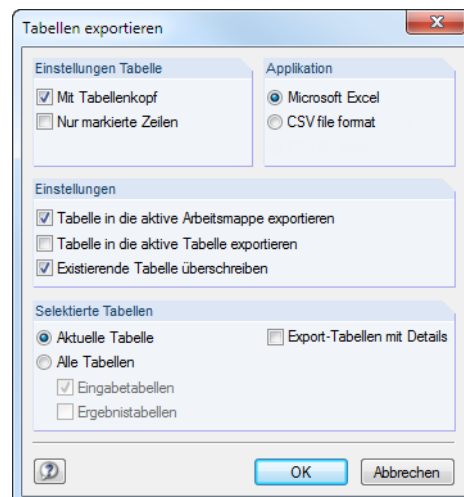
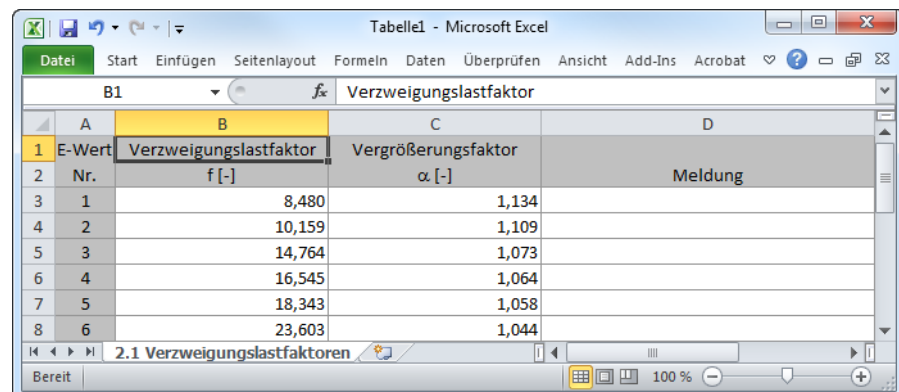


Bild 7.6: Dialog *Tabellen exportieren*

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden. MS Excel wird automatisch aufgerufen, d. h. das Programm muss nicht vorher geöffnet werden.



	A	B	C	D
	E-Wert	Verzweigungslastfaktor	Vergrößerungsfaktor	Meldung
1	Nr.	f [-]	α [-]	
3	1	8,480	1,134	
4	2	10,159	1,109	
5	3	14,764	1,073	
6	4	16,545	1,064	
7	5	18,343	1,058	
8	6	23,603	1,044	

Bild 7.7: Ergebnis in MS Excel

RF-IMP

Soll eine Stabilitätsfigur im Zusatzmodul RF-IMP zur Generierung von Ersatzimperfectionen oder eines vorverformten Ersatzmodells Verwendung finden, so ist kein Export erforderlich. Im Modul RF-IMP können die gewünschte Eigenform-Nr. sowie der RF-STABIL-Fall direkt über die entsprechenden Listen ausgewählt werden.

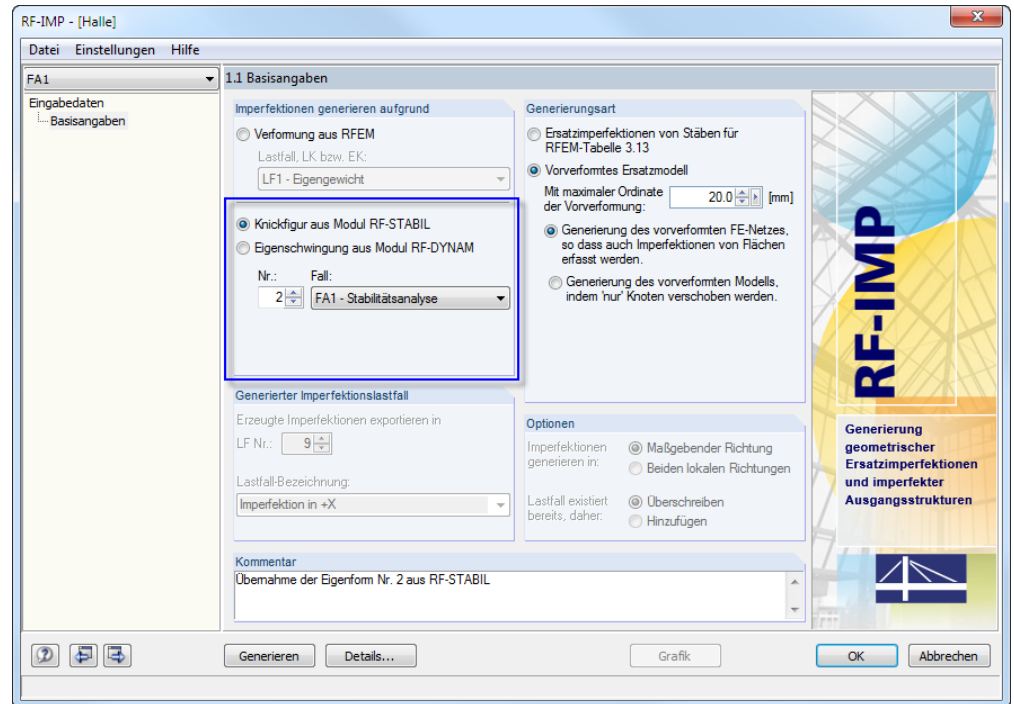


Bild 7.8: Übernahme der Eigenform im Modul RF-IMP

RF-STAHl EC3 / RF-ALUMINIUM / RF-KAPPA / RF-HOLZ Pro

In den Modulen RF-STAHl AISC/AS/BS/CS/EC3/GB/IS/NTC-DF/SANS/SIA/SP, RF-ALUMINIUM, RF-KAPPA und RF-HOLZ Pro lassen sich die Knicklängenbeiwerte von RF-STABIL für die nachzuweisenden Stäbe direkt nutzen.

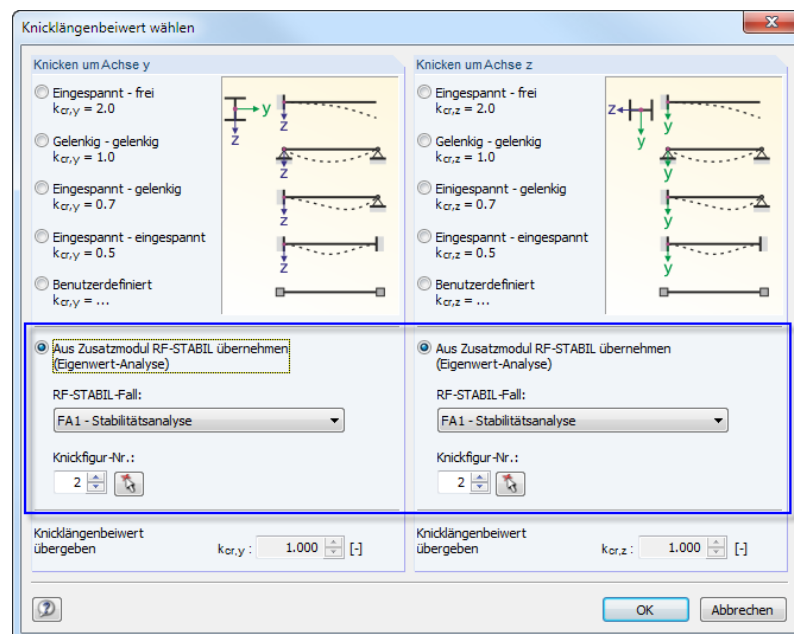


Bild 7.9: Auswahl der Knicklängenbeiwerte im Modul RF-STAHl EC3

8. Beispiele

8.1 Rechteckplatte

Es ist die kritische Beullast einer quadratischen Platte mit 1 m Seitenlänge zu ermitteln.

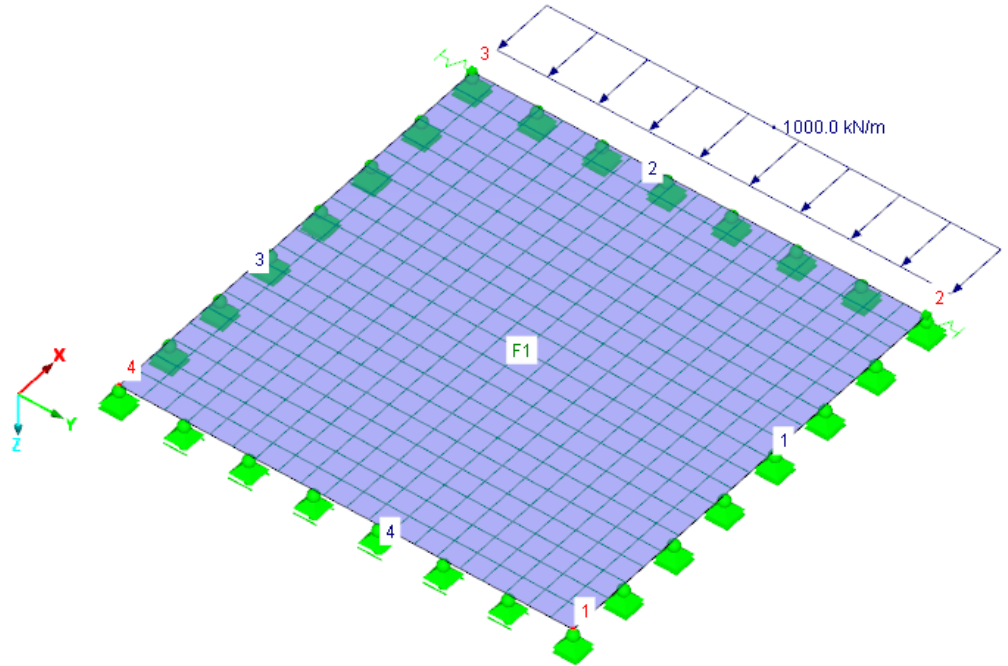


Bild 8.1: FE-Modell und Belastung

Analytische Lösung

Diese Fläche ist an allen Rändern gelenkig gelagert. Die kritische Last N_{cr} kann analytisch nach folgender Formel bestimmt werden:

$$N_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2}$$

Gleichung 8.1

Die Platte ist quadratisch und hat eine Seitenlänge von 100 cm, daraus ergibt sich:

$$k = 4$$

$$a = 100 \text{ cm}$$

Als Werkstoff wird Stahl S 235 verwendet:

$$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu = 0,30$$

Die Fläche ist 2 cm dick:

$$h = 2 \text{ cm}$$

Für die kritische Beullast ergibt sich damit:

$$N_{cr} = 4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2^3}{12 \cdot (1 - 0,30^2) \cdot 100^2} = 60,736 \text{ kN/cm} = 6073,6 \text{ kN/m}$$

Lösung mit RFEM

Die Platte wird in RFEM mit folgenden Lagerungsbedingungen versehen.

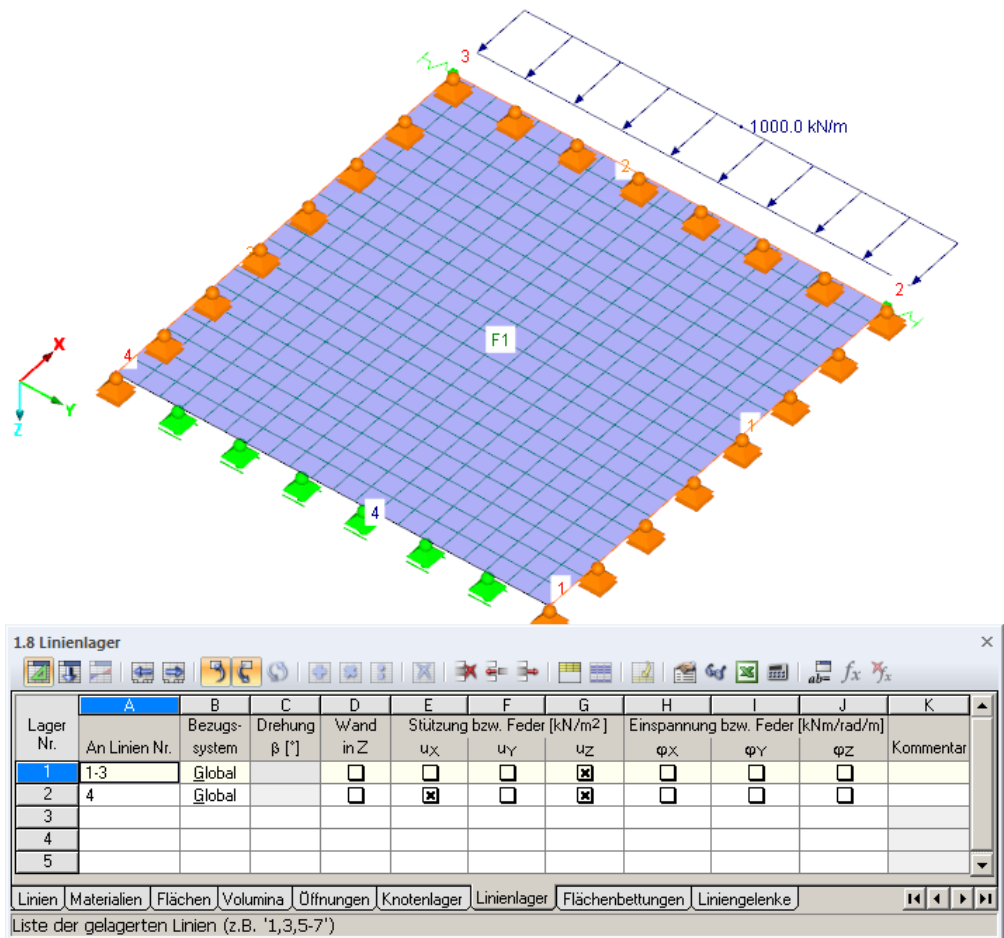


Bild 8.2: Linienlager

Zusätzlich wird in den Knoten 2 und 3 jeweils ein Punktlager mit einer kleinen Federsteifigkeit definiert, um das System in Y-Richtung zu halten.

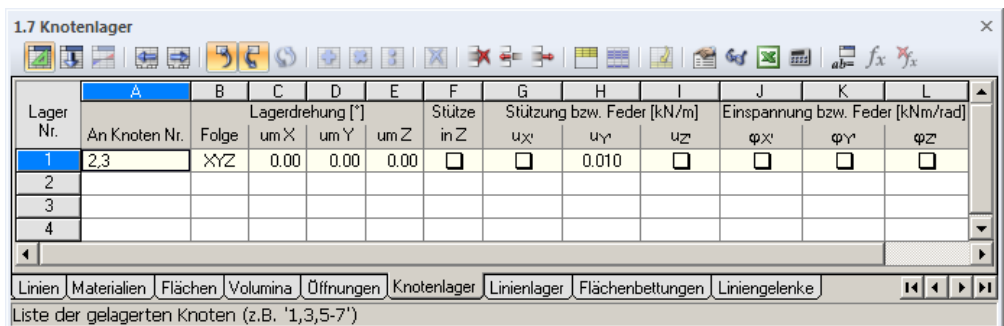


Bild 8.3: Knotenlager

Das FE-Netz hat eine Maschenweite von 5 cm.

Als Belastung wird eine Rechtecklast von 1000 kN/m entsprechend Bild 8.1 angesetzt.

Die Eingabemaske von RF-STABIL ist wie folgt auszufüllen:



Bild 8.4: RF-STABIL Maske 1.1 Basisangaben

Als Ergebnis liefert RF-STABIL einen Verzweigungslastfaktor von **6,0453**.

2.1 Verzweigungslastfaktoren		
E-Wert Nr.	A	B
	Verzweigungslastfaktor f [-]	Vergrößerungsfaktor α [-]
1	6.0453	1.1982

Bild 8.5: Verzweigungslastfaktor

Aus dem Verzweigungslastfaktor und der angesetzten Belastung ergibt sich:

$$N_{cr} = 6,0453 \cdot 1000 \text{ kN/m} = 6045,3 \text{ kN/m}$$

Die Abweichung zur analytischen Lösung beträgt damit ca. 0,5 %.

RF-STABIL ermittelt folgende Beulfigur:

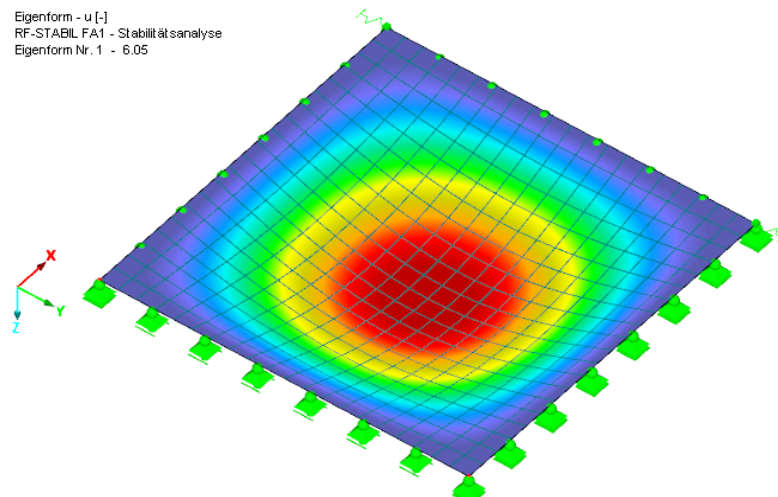


Bild 8.6: RF-STABIL Beulfigur

8.2 Kreisplatte

Es ist die kritische Beullast einer kreisrunden Platte mit 3 m Durchmesser zu bestimmen.

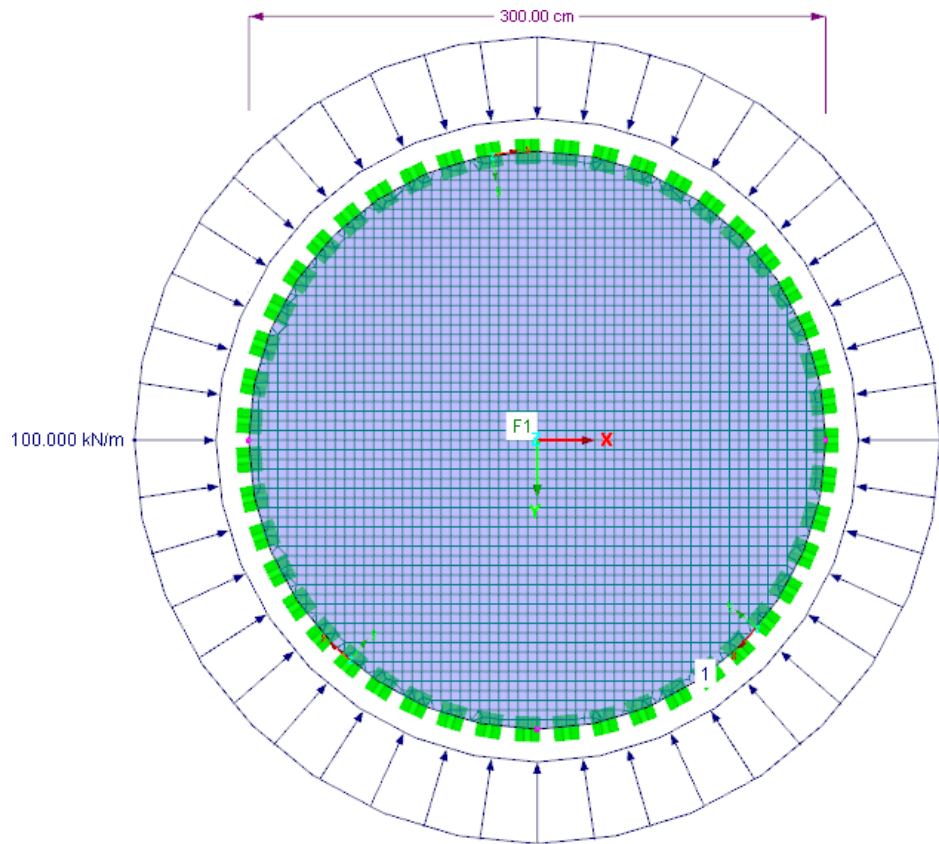


Bild 8.7: FE-Modell und Belastung

Analytische Lösung

Die Fläche ist an allen Rändern gelenkig gelagert. Die kritische Last N_{cr} kann analytisch nach folgender Formel bestimmt werden (siehe [4], S. 559):

$$N_{cr} = 14,68 \cdot \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2}$$

Gleichung 8.2

Die Platte hat einen Radius von 150 cm, daraus ergibt sich:

$$a = 150 \text{ cm}$$

Als Werkstoff wird Stahl S 235 verwendet:

$$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu = 0,30$$

Die Fläche ist 2 cm dick.

$$h = 2 \text{ cm}$$

Für die kritische Beullast ergibt sich damit:

$$N_{cr} = 14,68 \cdot \frac{21000 \cdot 2^3}{12 \cdot (1 - 0,30^2) \cdot 150^2} = 10,038 \text{ kN/cm} = 1003,8 \text{ kN/m}$$

Lösung mit RFEM

Die Platte wird in RFEM mit einem lokal definierten Linienlager versehen.

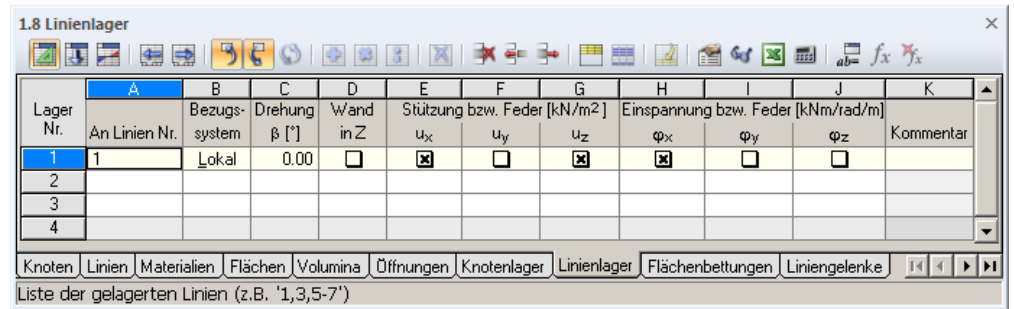


Bild 8.8: Linienlager

Die Verdrehung am Rand wird also verhindert. Außerdem wird die Platte in senkrechter Richtung gehalten. Die Stützung in der Linienrichtung x verhindert die Verdrehung der Platte um die globale Z-Achse.

Für das FE-Netz wird eine Maschenweite von 5 cm vorgegeben.

Als Belastung wird eine Linienlast von 100 kN/m entsprechend Bild 8.7 angesetzt.

Die Eingabemaske von RF-STABIL ist wie folgt auszufüllen:



Bild 8.9: RF-STABIL Maske 1.1 Basisangaben

Als Ergebnis liefert RF-STABIL einen Verzweigungslastfaktor von **10,050**.

2.1 Verzweigungslastfaktoren		
E-Wert Nr.	A Verzweigungslastfaktor f [-]	B Vergrößerungsfaktor α [-]
1	10.050	1.110

Bild 8.10: Verzweigungslastfaktor

Aus dem Verzweigungslastfaktor und der angesetzten Belastung ergibt sich:

$$N_{cr} = 10,050 \cdot 100 \text{ kN/m} = 1005,0 \text{ kN/m}$$

Die Abweichung zur analytischen Lösung beträgt damit ca. 0,1 %.

Die folgende Beulfigur wird von RF-STABIL ermittelt:

Eigenform - u [-]
Eigenform Nr. 1 - 10.05

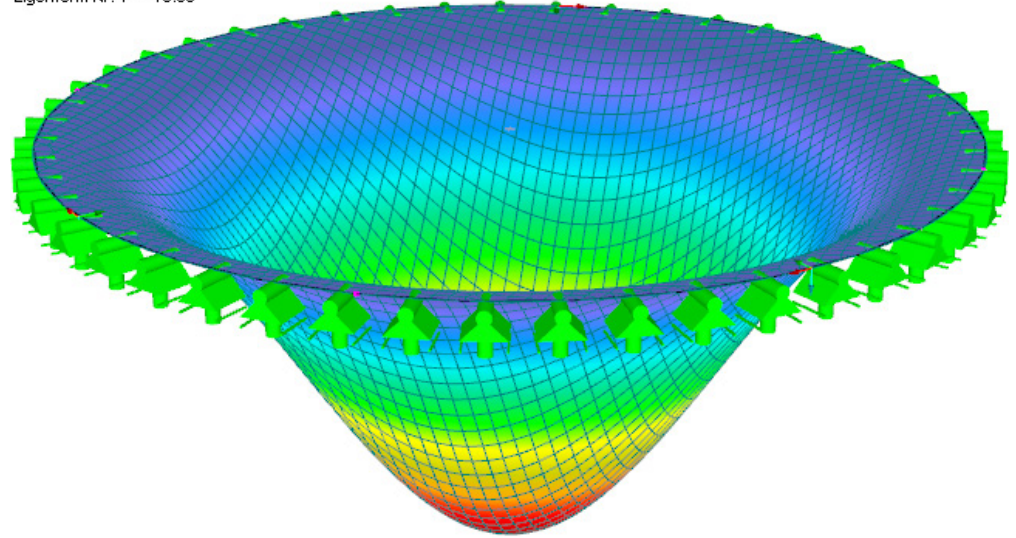


Bild 8.11: RF-STABIL Beulfigur

8.3 Gevouteter Kragträger

Dieses Beispiel ist [5] entnommen. In diesem Aufsatz werden die Versagensformen und die Traglasten von gevouteten T-Kragträgern experimentell und mittels FEM-Berechnung untersucht.

Hier handelt es sich um den Träger 1 aus der Tabelle 4.

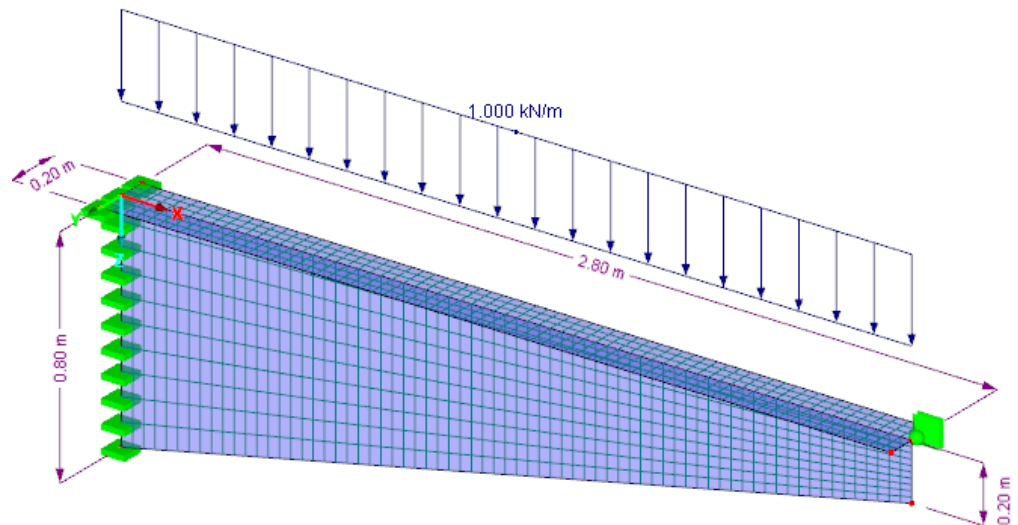


Bild 8.12: FE-Modell und Belastung

Der Träger hat folgende Abmessungen:

Länge l	2800	mm
Steghöhe h_{w0}	800	mm
Steghöhe h_{w1}	200	mm
Flanschbreite b	200	mm
Stegdick t_w	10	mm
Flanschdicke t_f	20	mm

Tabelle 8.1: Trägergeometrie

Der Voutenträger ist mit einer Linienlast von 1,0 kN/m am Flansch belastet.

In [5] wird als ideale kritische Last $q_{cr} = 43,6 \text{ kN/m}$ ermittelt.

Lösung mit RFEM

Für den Träger werden folgende Lagerungsbedingungen an der Einspannstelle festgelegt:

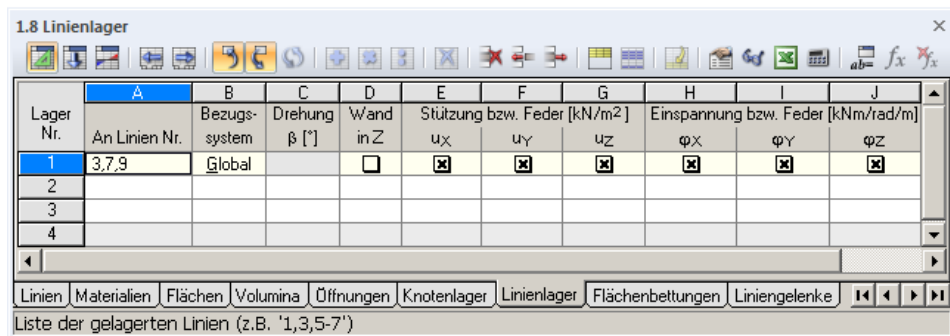
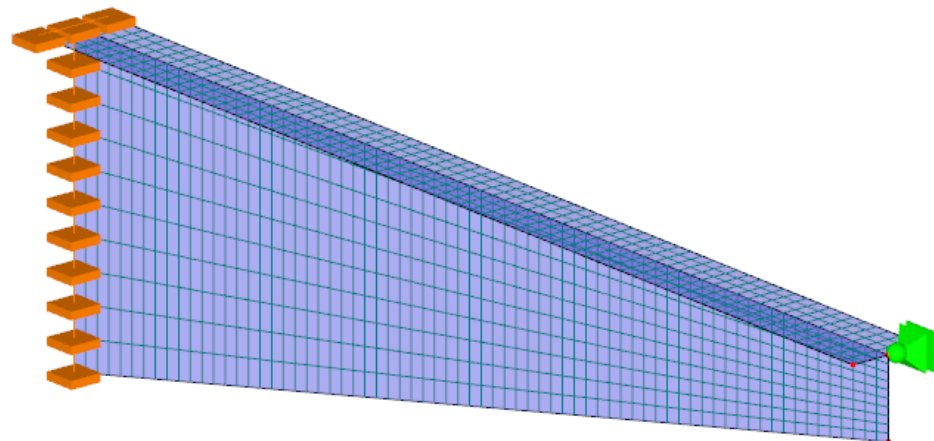



Bild 8.13: Einspannung des Trägers

Zusätzlich wird die Spitze des Trägers seitlich gehalten.

Das FE-Netz hat eine angestrebte Länge der finiten Elemente von 4 cm.

Als Belastung wird eine Linienlast von 1 kN/m entsprechend Bild 8.12 angesetzt.

Die Eingabemaske von RF-STABIL ist wie folgt auszufüllen:



1.1 Basisangaben

Allgemein

Anzahl der kleinsten Eigenwerte (Eigenformen für Knicken), die zu ermitteln sind:

☐ Eigenformen finden ab kritischem Verzweigungslastfaktor:

f_0 : [-]

Normalkräfte, nichtlineare Einwirkungen und Anfangsverformungen übernehmen aus:

Lastfall / Kombination:

Optionen

☐ Ausnutzung des entlastenden Effektes durch Zugkräfte

☐ Teilung auch bei geraden Stäben aktivieren...

☐ Minimale Anfangsvorspannung bei Seilen und Membranen aktivieren...

☐ Steifigkeitsänderungen von RFEM aktivieren

☐ Anfangsnormalkräfte hinzufügen aus:

Lastfall / Kombination:

☐ Knick- bzw. Beulfigur des instabilen Modells ermitteln, um in der Grafik die Ursache der Instabilität zu erkennen

Berechnungsmethode

Stabilitätsanalyse:

☒ Eigenwertanalyse

☐ Laststeigerung bis zum Versagen...

Eigenwertmethode:

☒ Lanczos-Methode

☐ Wurzeln des charakteristischen Polynoms

☐ Unterraum-Iterationsmethode

☐ ICG-Iterationsmethode

Matrixtyp:

☒ Standard

☐ Einheitsmatrix (für Kontrollzwecke, Ermittlung der Genauigkeit)

Normierung der Eigenformen

☒ So dass $|u| = 1$

☐ So dass $\max \{u_x; u_y; u_z\} = 1$

☐ So dass $\max \{u_x; u_y; u_z; \varphi_x; \varphi_y; \varphi_z\} = 1$

☐ Aus geometrischer Steifigkeit, so dass $\{u\}^T [K_G] \{u\} = 1$

Einstellung für Grafik

☒ Lokale Torsionsdrehungen der Stäbe anzeigen von:

φ_x : [-]

Bild 8.14: RF-STABIL Maske 1.1 Basisangaben

Als Ergebnis liefert RF-STABIL einen Verzweigungslastfaktor von 41,710.

2.1 Verzweigungslastfaktoren

E-Wert Nr.	A	B
	Verzweigungslastfaktor f [-]	Vergrößerungsfaktor α [-]
1	41.710	1.025

Bild 8.15: Verzweigungslastfaktor

Aus dem Verzweigungslastfaktor und der angesetzten Belastung ergibt sich:

$$q_{cr} = 41,710 \cdot 1,0 = 41,7 \text{ kN/m}$$

Die Abweichung zum Ergebnis in [5] beträgt damit ca. 4 %.

Als maßgebende Versagensfigur wird von RF-STABIL das Stegbeulen ermittelt:

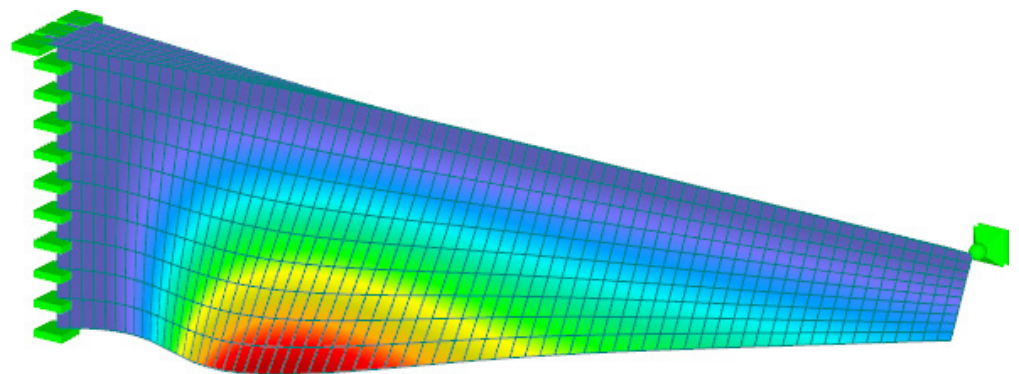


Bild 8.16: RF-STABIL Beulfigur

Dieses Ergebnis stimmt mit der Beulfigur in [5] überein.

A Literatur

- [1] PETERSEN, Chr.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2. Auflage 1982
- [2] PETERSEN, Chr.: Stahlbau, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1988
- [3] BARTH, C.; RUSTLER, W.: Finite Elemente in der Baustatik-Praxis, Beuth, Berlin/Wien/Zürich, 2. Auflage 2013
- [4] BAREŠ, R.: Tabulky pro výpočet desek a stěn, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1989
- [5] FISCHER, M; SMIDA, M: Dimensionierung und Nachweis von gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt, in Stahlbau 70. Jahrgang (2001) Heft 12, S. 927-938, Ernst & Sohn, Berlin
- [6] WERKLE, H.: Finite Elemente in der Baustatik, Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 3. Auflage 2008

B Index

A

Analysefall	31
Anfangsnormalkräfte	10
Anfangsverformungen	8
Anfangsvorspannung	10
Anzahl Eigenwerte	8
Ausdruckprotokoll	28, 29

B

Basisangaben	7
Beenden von RF-STABIL	7
Benutzerprofil	32
Berechnung	14
Berechnung starten	14
Berechnungsmethode	11
Beulversagen	16, 23
Blättern in Masken	7

C

Charakteristisches Polynom	12
----------------------------------	----

D

Dezimalstellen	32
Drucken	28

E

Eigenform	18, 19, 20, 22, 25, 26
Eigenwertanalyse	11
Eigenwertmethode	12
Einheiten	32
Einheitsmatrix	13
Ergebnisauswertung	23
Ergebnismasken	16
Ergebnisse-Navigator	25
Ergebniswerte	25
Euler-Fall	18
Excel	33

F

Farbskala	27
Filter	27
Filtern von Flächen	27

G

Grafik	25
Grafikausdruck	28

H

Hintergrundgrafik	24
-------------------------	----

I

ICG-Methode	12
Instabiles Modell	10
Instabilität	23
Installation	5

K

Knickfigur	28
Knicklänge L_{cr}	18, 19
Knicklängenbeiwert k_{cr}	19, 23
Knicklast	19
Knickversagen	16, 23
Kommentar	13
Kontrolle	14
Kritische Last N_{cr}	35, 38

L

Lanczos	12
Laststeigerung bis zum Versagen	11

M

Matrixtyp	13
Meldung	17
Membran	10

N

Nachweis farbig	27
Navigator	7
Nichtlinearität	11
Normalkräfte	8
Normierte Verschiebungen	20, 22
Normierung	13

O

Optionen	9
----------------	---

P

Panel	6, 25, 27
Programmaufruf	5

R

Rasterpunkt	22
Relationsbalken	25
Rendering	27
RFEM-Arbeitsfenster	24, 28
RF-HOLZ Pro	34

RF-IMP	34
RF-STABIL-Fall.....	30
RF-STAHl EC3	34

S

Schaltflächen	25
Schnitt.....	25, 28
Seil	10
Sichtbarkeiten	27
Stab	18
Stabergebnisse	26
Stabilitätsanalyse	11
Stablänge.....	18
Stabteilung.....	9
Stabzug.....	23
Starten von RF-STABIL	5
Steifigkeitsänderung.....	10
Steuerpanel	27
Sturmsche Kontrolle.....	15

T

Teilung.....	9
Theorie II. Ordnung	17
Torsionsverdrehung	13
Tragfähigkeit	25
Traglast.....	40

U

Unendlichnorm der Steifigkeitsmatrix.....	17
Unterraum-Methode	12

V

Vergrößerungsfaktor	17
Verzweigungslast N_{cr}	19
Verzweigungslastfaktor.....	8, 16, 23, 37, 40
Voute.....	9

Z

Zeigen-Navigator.....	26, 27
Zugkräfte	9, 17
Zwischenablage	33