



Fassung
Januar 2020

Zusatzmodul

RF-DYNAM PRO

Eigenschwingungsanalyse, Antwort-
spektren, Zeitverlaufsverfahren, äqui-
valente statische Kräfte

Programmbeschreibung

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 2020
Am Zellweg 2
93464 Tiefenbach
Deutschland

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-DYNAM Pro	4
1.2	RF-DYNAM Pro Team	8
1.3	Gebrauch des Handbuchs	9
1.4	RF-DYNAM Pro Modul starten	9
2.	Eingabedaten	11
2.1	Aufbau der Hauptregisterkarten	12
2.2	Massenfälle	13
2.2.1	Massenfalltyp	14
2.2.2	Massen	14
2.2.3	Summe der Massen	14
2.2.4	Globale Einstellungen für den Massenimport in den <i>Details</i>	14
2.2.5	Zusätzliche Knotenmassen	16
2.2.6	Zusätzliche Linien-, Stab- und Flächenmassen	17
2.3	Massenkombinationen	17
2.4	Eigenschwingungsfälle	19
2.4.1	Anzahl der Eigenwerte	20
2.4.2	Skalierung der Eigenformen	20
2.4.3	Einwirkende Massen	21
2.4.4	Typ der Massenmatrix	21
2.4.5	Eigenwertlöser	22
2.4.6	FE-Netz-Einstellungen	23
2.4.7	Steifigkeitsänderungen als Anfangsbedingungen	23
2.5	Antwortspektren	24
2.5.1	Antwortspektren nach Norm	24
2.5.2	Benutzerdefinierte Antwortspektren	26
2.5.3	Aus Akzelerogrammen erzeugte Antwortspektren	26
2.6	Akzelerogramme	27
2.6.1	Bibliothek mit Erdbebenaufzeichnungen	28
2.6.2	Benutzerdefinierte Beschleunigungs-Zeit-Diagramme	29
2.7	Zeitdiagramme	30
2.7.1	Transiente Zeitdiagramme	30
2.7.2	Periodische Erregung	31
2.7.3	Funktionen	31
2.8	Dynamische Lastfälle	32
2.9	Dynamischer Lastfall - Antwortspektrenverfahren	33
2.9.1	Auflager zuweisen	34
2.9.2	Antwortspektrum zuweisen	35
2.9.3	Kombination der Modalantworten	35
2.9.4	Kombination der Richtungskomponenten	36
2.9.5	Export von Ergebniskombinationen	36
2.9.6	Dämpfung für die CQC - Regel	36
2.9.7	Wahl der Eigenform	37
2.10	Dynamischer Lastfall - Zeitverlaufsverfahren	38
2.10.1	Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen	38
2.10.2	Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen	40



2.10.3	Lineare Löser: Modalanalyse versus implizit Newmark	41
2.10.4	Nichtlineare Löser: Implizit Newmark versus Explizit	41
2.10.5	Zeitschritte und maximale Zeitwerte	42
2.10.6	Anfangsverformungen	43
2.10.7	Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen	44
2.10.8	Berechnungsparameter	44
2.10.9	Strukturdämpfung	46
2.11	Dynamische Lastfälle - Verfahren mit statischen Ersatzlasten	48
2.11.1	Antwortspektrum zuweisen	48
2.11.2	Zufällige Torsionswirkungen	48
2.11.3	Kombination der Modalantworten	49
2.11.4	Kombination der Richtungskomponenten	51
2.11.5	Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen	51
2.11.6	Dämpfung für die CQC-Regel	51
2.11.7	Wahl der Eigenform	51
2.12	Globale Einstellungen im Dialog <i>Details</i>	52
2.13	Einheiten und Dezimalstellen	53
3.	Berechnung	54
3.1	Kontrolle	54
3.2	Start der Berechnung	54
3.3	Verfügbarkeit der Ergebnisse	56
4.	Ergebnisse	57
4.1	Eigenschwingungsfälle	58
4.1.1	Eigenfrequenzen	58
4.1.2	Eigenformen	59
4.1.3	Massen in Netzpunkten	60
4.1.4	Effektive Modalmassenfaktoren	60
4.1.5	Export nach Excel / CSV	61
4.2	Dynamische Lastfälle - Antwortspektrenverfahren	62
4.2.1	Lagerkräfte	63
4.2.2	Knotenverformungen	63
4.2.3	Pseudo-Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten	63
4.2.4	Stabschnittgrößen	64
4.2.5	Flächenschnittgrößen	65
4.2.6	Flächengrundspannungen und -dehnungen	65
4.2.7	Exportierte Ergebniskombinationen	65
4.2.8	Export nach Excel / CSV	66
4.3	Dynamische Lastfälle - Zeitverlaufsverfahren	66
4.3.1	Lagerkräfte	67
4.3.2	Knotenverformungen	67
4.3.3	Stabschnittgrößen	68
4.3.4	Flächenergebnisse	68
4.3.5	Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten	69
4.3.6	Zeitverlaufsdiagramm	69
4.3.7	Exportierte Lastfälle	71
4.3.8	Exportierte Ergebniskombinationen	72
4.3.9	Export nach Excel / CSV	73
4.4	Dynamische Lastfälle - Verfahren mit statischen Ersatzlasten	73
4.4.1	Ersatzlasten	74
4.4.2	Torsionsmomente	75
4.4.3	Exportierte Lastfälle	75



4.4.4	Exportierte Ergebniskombinationen	77
4.4.5	Export nach Excel / CSV	79
4.5	Automatische Kombinatorik in RFEM	79
4.6	Ausdruckprotokoll	81
4.7	Einheiten und Dezimalstellen	83
5.	Beispiele	84
5.1	Beispiel: Erdbebenanalyse nach EN 1998-1 CEN	84
5.2	Maschineninduzierte Schwingungen	103
A.	Literatur	113
B.	Index	114

1 Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-DYNAM Pro

Ganz gleich, ob Sie das Programm zum ersten Mal verwenden oder ein erfahrener Anwender der früheren RF-DYNAM Versionen sind, werden Sie sich schnell in das neue Zusatzmodul einarbeiten. All die wertvollen Hinweise unserer Kunden zu ihrer täglichen Praxis haben uns dabei geholfen, dieses Zusatzmodul zu entwickeln und zu verbessern. Es sind viele neue Leistungsmerkmale enthalten, was die Möglichkeiten der dynamischen Analyse verbessert und erweitert.

Das Modul *RF-DYNAM Pro* besteht aus vier Teilen. Das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* ist das Basismodul, das die Eigenschwingungsanalysen für Stab-, Flächen- und Volumenmodelle durchführt. Ein multi-modales und multi-punkt Antwortspektrenverfahren, sowie ein lineares Zeitverlaufsverfahren kann an der vorliegenden Struktur mit dem Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt werden. Eine nichtlineare Zeitverlaufsanalyse ist in dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren* verfügbar. Im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* kann das Verfahren mit statischen Ersatzlasten in Übereinstimmung mit unterschiedlichen Baunormen angewendet werden (unter Verwendung des multi-modalen Antwortspektrenverfahrens).

Wir wünschen viel Erfolg bei der Arbeit mit *RF-DYNAM Pro*.

Ihre DLUBAL SOFTWARE GMBH

Eigenschwingungen

RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen bestimmt die niedrigsten Eigenwerte der Struktur. Die Anzahl der Eigenwerte kann angepasst werden. Massen werden direkt aus Lastfällen oder Lastkombinationen importiert (mit der Option, die Gesamtlast oder nur die Z-Komponente zu berücksichtigen). Zusätzliche Massen können manuell an Knoten, Linien, Stäben oder Flächen definiert werden. Darüber hinaus kann die Steifigkeitsmatrix beeinflusst werden, indem Normalkräfte oder Steifigkeitsänderungen eines Lastfalls oder einer Lastkombination importiert werden. Die Hauptmerkmale sind nachfolgend aufgeführt:

- Automatische Berücksichtigung von Massen aus Eigengewicht
- Direkter Import von Massen aus Lastfällen oder -kombinationen möglich
- Optionale Definition von Zusatzmassen (Knoten-, Linien-, Stab-, Flächenmassen sowie Trägheitsmassen)
- Kombination von Massen in verschiedenen Massenfällen und Massenkombinationen
- Voreingestellte Kombinationsfaktoren gemäß EN 1998-1 CEN
- Massen von beliebigen Teilen des Modells können vernachlässigt werden
- Optionale Berücksichtigung von Normalkräften um die geometrische Steifigkeitsmatrix zu modifizieren (z. B. zur Berücksichtigung von Vorspannung)
- Steifigkeitsmodifizierung (z.B. können deaktivierte Stäbe oder Steifigkeiten aus *RF-BETON* importiert werden)
- Berücksichtigung von ausfallenden Lagern oder Stäben als Anfangsbedingungen möglich
- Definition von mehreren Eigenschwingungsfällen möglich (z.B. um unterschiedliche Massen oder Steifigkeitsänderungen zu untersuchen)
- Ausgabe von Eigenwert, Kreisfrequenz, Eigenfrequenz und -periode
- Ermittlung von Eigenformen und Massen in FE-Netz-Punkten

- Ausgabe von modalen Massen, effektiven Modalmassen und effektiven Modalmassenfaktoren
- Darstellung und Animation von Eigenformen
- Verschiedene Skalierungsoptionen für Eigenformen
- Dokumentation von numerischen und graphischen Ergebnissen im Ausdruckprotokoll

In *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* sind vier leistungsfähige Eigenwertlöser verfügbar:

- Wurzel des charakteristischen Polynoms
- Lanczos-Methode
- Unterraum-Iteration
- ICG-Iterationsmethode (Incomplete Conjugate Gradient)

Die Wahl des Eigenwertlösers hängt in erster Linie von der Größe des Modells ab.

Nach der Berechnung werden die Eigenwerte, Eigenfrequenzen und -perioden aufgelistet. Diese Ergebnismasken sind im Hauptprogramm RFEM integriert. Die Eigenformen der Struktur werden in Tabellenform angezeigt und können grafisch dargestellt sowie animiert werden. Alle Ergebnismasken und Grafiken sind Bestandteil des RFEM-Ausdruckprotokolls. Zudem ist ein Export der Tabellen in Excel möglich.

Erzwungene Schwingungen

RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen ist eine Erweiterung des RFEM-Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*. Mechanische Strukturen, die durch transiente oder harmonische Kraft-Zeit oder Beschleunigungs-Zeit-Diagramme erregt werden, können unter Verwendung der Modalanalyse oder der linearen impliziten Newmark-Analyse untersucht werden. Darüber hinaus können das multi-modale sowie das multi-punkt Antwortspektrenverfahren durchgeführt werden. Die dazu benötigten Spektren können entsprechend den Normen oder benutzerdefiniert erstellt werden. Im Zusatzmodul ist eine umfangreiche Bibliothek von Akzelerogrammen aus Erdbebengebieten enthalten. Diese können zur Generierung von Antwortspektren verwendet werden.

Die Leistungsmerkmale des Zeitverlaufverfahrens sind nachstehend aufgeführt:

- Kombination von benutzerdefinierten Zeitdiagrammen mit Lastfällen oder Lastkombinationen (Knoten-, Stab- und Flächenlasten sowie freie und generierte Lasten sind mit zeitlich veränderbaren Funktionen kombinierbar)
- Kombination von mehreren unabhängigen Erregerfunktionen möglich
- Umfangreiche Bibliothek von Erdbebenaufzeichnungen (Akzelerogramme)
- Modalanalyse, basierend auf der Eigenwertanalyse oder der direkten Integration mit der linearen impliziten Newmark-Analyse im linearen Zeitverlaufverfahren verfügbar
- Modalanalyse:
 - Direkter Import von Anfangsverformungen aus einem Lastfall möglich
 - Steifigkeitsänderungen von ESF wurden berücksichtigt
- Implizite Newmark-Analyse:
 - Unabhängig von der Eigenwertanalyse
 - Der Stabtyp *Dämpfer* ist verfügbar und erlaubt lokale lineare viskose Dämpfungselemente mit parallel verbundenen linearen Federelementen zu modellieren (Kelvin-Voigt-Modell)

- Strukturdämpfung über die Rayleigh-Dämpfungskoeffizienten oder den Lehr'schen Dämpfungswerten
- Grafische Ergebnisdarstellung in einem Zeitverlaufsdiagramm
- Export von Ergebnissen in benutzerdefinierten Zeitschritten oder als Umhüllende

Die Leistungsmerkmale des Antwortspektrenverfahrens sind nachstehend aufgeführt:

- Antwortspektren zahlreicher Normen (EN 1998-1 [1], DIN 4149 [2], IBC 2012 [3] etc.)
- Benutzerdefinierte oder aus Akzelerogrammen generierte Antwortspektren
- Ansatz von richtungsbezogenen Antwortspektren
- Verschiedene Antwortspektren können verschiedenen Lagern zugeordnet werden (Multi-punkt-Option)
- Relevante Eigenformen für das Antwortspektrum können manuell oder automatisch ausgewählt werden (die 5%-Regel aus dem EN 1998-1 [1] kann angewendet werden)
- Die Berechnung wird in *RF-DYNAM Pro* durchgeführt und ist daher linear
- Steifigkeitsmodifikationen, wie sie in den *Eigenschwingungsfällen* definiert wurden, werden auch zur Berechnung von Schnittgrößen und Verformungen verwendet
- Kombination der Modalantworten (*SRSS*-Regel oder *CQC*-Regel) und Kombination der Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen (*SRSS*- oder 100% / 30%-Regel)

Die Ergebnisse aus dem Zeitverlaufsverfahren werden in einem Zeitverlaufsdiagramm angezeigt. Hierbei ist es möglich, die Ergebnisse verschiedener Knoten oder Positionen innerhalb eines Stabes zu überlagern. Alle Ergebnisse werden in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Daten lassen sich nach Excel exportieren. Beim Zeitverlaufsverfahren ist es möglich, die Ergebnisse eines einzelnen Zeitschritts zu exportieren oder die ungünstigsten Ergebnisse von allen Zeitschritten herauszufiltern.

Das Antwortspektrenverfahren basiert auf Eigenwerten und Eigenformen, und auch die Berechnung der Schnittgrößen und Verformungen erfolgt innerhalb *RF-DYNAM Pro*, das heißt das die Berechnung vollständig linear ist, aber auch dass Steifigkeitsmodifikationen aus den *Eigenschwingungsfällen* übernommen werden. Nur die finalen Ergebniskombinationen werden exportiert. Intern erfolgen die Kombination der Modalantworten und die Kombination der Ergebnisse infolge der Richtungskomponenten der Erdbebeneinwirkung.

Die Eingabedaten in *RF-DYNAM Pro* und die exportierten Lastfälle und Ergebniskombinationen sind Teil des Ausdruckprotokolls.

Nichtlinearer Zeitverlauf

RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren ist eine Erweiterung des RFEM Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*. Die Grafische Benutzeroberfläche ist in die Struktur des Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* integriert und wurde durch die beiden nichtlinearen Zeitverlaufsverfahren, der nichtlinearen impliziten Newmark-Analyse und der expliziten Analyse, erweitert. Dieses Zusatzmodul erlaubt eine externe Erregung für nicht-lineare dynamische Analysen, entweder Zeitdiagramme oder Akzelerogramme. Verschiedene Erregerfunktionen können in tabellarischer Form definiert werden, wie harmonische Lasten oder Zeitfunktionen. Eine ausführliche Bibliothek von Akzelerogrammen ist verfügbar. Diese Modulerweiterung schafft die Begrenzung auf lineare Systeme in der Dynamik ab.

Die Hauptbestandteile sind nachstehend aufgelistet:

- Kombination von benutzerdefinierten Zeitdiagrammen mit Lastfällen oder Lastkombinationen (Knoten-, Stab- und Flächenlasten, genauso wie freie und generierte Lasten sind mit zeitlich veränderbaren Funktionen kombinierbar)
- Benutzerdefinierte Zeitdiagramme können in tabellarischer Form eingegeben werden, als periodische Funktion definiert werden oder als Ausdruck einer Funktion beigefügt werden
- Kombination von mehreren unabhängigen Erregerfunktionen möglich
- Umfangreiche Bibliothek von Erdbebenaufzeichnungen (Akzelerogramme)
- Nichtlineare Zeitverlaufsanalyse, wird entweder durch die nichtlineare impliziten Newmark-Analyse oder eine explizite Analyse ausgeführt
- Unterstützte Nichtlinearitäten:
 - Stabtypen wie Zugstäbe, Druckstäbe und Seile
 - Stabnichtlinearitäten bei Versagen, Rissbildung und Fließen unter Zug oder Druck und plastischen Gelenken
 - Auflagernichtlinearitäten wie Ausfall, Reibung, Diagramm und teilweise Wirkung
 - Gelenknichtlinearitäten wie feste Optionen, Reibung, Diagramm und teilweise Wirkung
 - Nichtlineare Materialmodelle
- Der Stabtyp *Dämpfer* ist verfügbar und erlaubt lokale lineare viskose Dämpfungselemente mit parallel verbundenen linearen Federelementen zu modellieren (Kelvin-Voigt-Modell)
- Die Berechnung ist unabhängig von der Eigenwertanalyse
- Dämpfung von Strukturen kann über die Rayleigh-Dämpfungskoeffizienten eingegeben werden
- Grafisches Ergebnis wird in einem Zeitverlaufsfenster angezeigt
- Export von Ergebnissen in benutzerdefinierten Zeitschritten oder als eine Umhüllende

Die Ergebnisse aus dem nichtlinearen Zeitverlaufsverfahren werden in einem Zeitdiagramm dargestellt. Alle Ergebnisse werden als eine Zeitfunktion angezeigt. Ergebnisse von einzelnen Zeitschritten oder dynamischen Umhüllenden von allen Zeitschritten sind verfügbar. Alle Ergebnisse können in Microsoft Excel exportiert werden.

Die Eingabedaten in *RF-DYNAM Pro*, die exportierten Lastfälle und Ergebniskombinationen sind Teil des Ausdruckprotokolls.

Ersatzlasten

RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten ist eine Erweiterung des RFEM Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*. Mithilfe des multi-modalen Antwortspektrenverfahrens werden Erdbebenanalysen durchgeführt. Die dazu benötigten Spektren können gemäß den Normen oder benutzerdefiniert erstellt werden. Daraus werden statische Ersatzlasten generiert.

- Antwortspektren zahlreicher Normen (EN 1998 [1], DIN 4149 [2], IBC 2012 [3] etc.)
- Eingabe benutzerdefinierter Antwortspektren
- Ansatz von richtungsbezogenen Antwortspektren
- Relevante Eigenformen für das Antwortspektrum können manuell oder automatisch ausgewählt werden (die 5%-Regel aus dem EN1998-1 [1] kann angewendet werden)

- Generierte statische Ersatzlasten werden in Lastfälle exportiert, getrennt für jede Form und Richtung
- Die Berechnung dieser Lastfälle erfolgt in RFEM, daher kann eine nichtlineare Berechnung durchgeführt werden.
- Steifigkeitsmodifikationen, wie sie in den *Eigenschwingungsfällen* definiert wurden, werden nicht automatisch in die exportierten *Lastfälle* übernommen.
- Kombination der Modalantworten (*SRSS* oder *CQC*-Regel) und Kombination der Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen (*SRSS*- oder *100% / 30%*-Regel)
- Ergebnisse können als Umhüllende mit maximalen und minimalen Ergebnissen, oder eindeutig mit den Vorzeichen aus der dominanten Eigenform, dargestellt werden.

Statische Ersatzlasten werden getrennt für jeden relevanten Eigenwert und getrennt für jede Erregungsrichtung generiert. Diese werden in statische Lastfälle exportiert und es wird eine statische Analyse in RFEM durchgeführt. Diese Lastfälle werden anschließend in Ergebniskombinationen überlagert. Dabei erfolgt zuerst eine Kombination der modalen Ergebnisse. Danach werden die Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen kombiniert.

Die Eingabedaten in *RF-DYNAM Pro* und die exportierten Lastfälle und Ergebniskombinationen sind Teil des Ausdruckprotokolls.

1.2 RF-DYNAM Pro Team

An der Entwicklung von *RF-DYNAM Pro* waren beteiligt:

Programmkoordinierung

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

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel

Programmierung

Doc. Dr.-Ing. Ivan Němec
Dr.-Ing. Radoslav Rusina
Dr.-Ing. Zbyněk Vlk
Dr.-Ing. Ivan Ševčík
Ing. Jiří Buček

Ing. Hynek Šteckbauer
Dr.-Ing. Josef Martínásek
Ing. Zdeněk Kosáček
Michal Zelenka
RNDr. Jan Gregor

Programmdesign

Dipl.-Ing. Georg Dlubal
MgA. Robert Kolouch

Ing. Zdeněk Kosáček
Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert

Programmkontrolle

M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler
M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier
Ing. Ondřej Šupčík
Ing. Jonáš Bartoň

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert
Dipl.-Ing. Stefan Frenzel
Dipl.-Ing. Thomas Günthel
Stine Gebhardt, M.Sc.

Handbuch, Hilfesystem und Übersetzung

Dr. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Gerlind Schubert
M.A. Melanie Most
Dipl.-Ü. Gundel Miglietta
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

Bc. Michal Ondrejáš
Ing. Ladislav Kábrt
Stine Gebhardt, M.Sc.

1.3 Gebrauch des Handbuchs

Themenbereiche wie Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck sind im Handbuch des Hauptprogramms RFEM ausführlich erläutert. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnis-masken des Moduls. Im Text sind die beschriebenen **Schaltflächen** in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Bearbeiten]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Masken und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut im Handbuch und im Programm nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie dennoch nicht fündig werden, so können Sie unsere Website www.dlubal.de nutzen, um auf den [FAQ-Seiten](#) das Problem nach bestimmten Kriterien einzugrenzen, aufgezeichnete [Webinare](#) anschauen oder die [Verifikationsbeispiele](#) durcharbeiten. Die [Knowledge Base](#) ist ebenfalls außerordentlich hilfreich.

1.4 RF-DYNAM Pro Modul starten

Es bestehen in RFEM folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* zu starten.

Menü

Um das Zusatzmodul zu starten, wählen Sie im RFEM-Menü, wie in [Bild 1.1](#) gezeigt.

Zusatzmodule → **Dynamik** → **RF-DYNAM Pro**

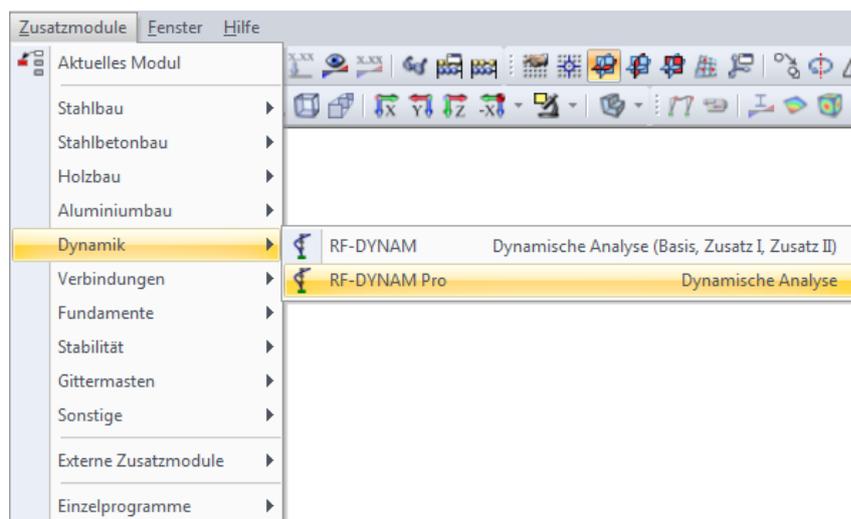


Bild 1.1: Menü **Zusatzmodule** → **Dynamik** → **RF-DYNAM Pro**, um das Modul *RF-DYNAM Pro* zu öffnen.

Wenn *RF-DYNAM Pro* zuvor geöffnet war und Ihr aktuelles Modul ist, können Sie es auch mit folgendem Modul öffnen:

Zusatzmodule → **Aktuelles Modul**

Navigator

Alternativ rufen Sie das Zusatzmodul im *Daten-Navigator* auf:

Zusatzmodule → **RF-DYNAM Pro**

Mit einem Rechtsklick auf das Zusatzmodul können Sie es zu Ihren Favoriten hinzufügen. Der Projekt-Navigator ist in [Bild 1.2](#) dargestellt.

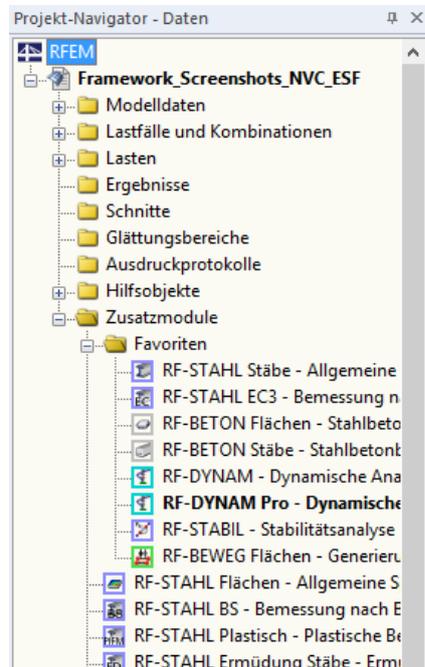


Bild 1.2: Daten-Navigator **Zusatzmodule** → **RF-DYNAM Pro**, um das Modul *RF-DYNAM Pro* zu öffnen

Panel

Wenn schon Ergebnisse von *RF-DYNAM Pro* vorliegen, können Sie das Zusatzmodul auch über das Panel starten.



Um das Panel anzeigen zu lassen, wählen Sie den *RF-DYNAM Pro*-Fall aus dem Drop-Down-Menü im Hauptprogramm RFEM, machen die Ergebnisse sichtbar mit [Ergebnisse anzeigen] und klicken auf die [Panel]-Schaltfläche.

Verwenden Sie die Schaltfläche [RF-DYNAM Pro] im Panel, um das Zusatzmodul wieder zu öffnen.

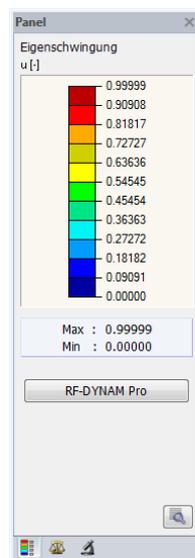


Bild 1.3: Panel mit der Schaltfläche [RF-DYNAM Pro], in [Bild 1.3](#) dargestellt, um das Zusatzmodul wieder zu öffnen.

2 Eingabedaten

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls erscheint ein neues Fenster. Das Fenster ist in verschiedene Register und Unterregister unterteilt. Die erstmalige Dateneingabe sollte daher immer von links nach rechts erfolgen. Nicht alle Register erscheinen gleich zu Beginn. Einige Register sind abhängig von bestimmten Einstellungen und erscheinen, sobald die entsprechenden Kontrollfelder angehakt wurden.

Das erste Fenster, das beim Öffnen des Moduls erscheint, ist in [Bild 2.1](#) dargestellt.

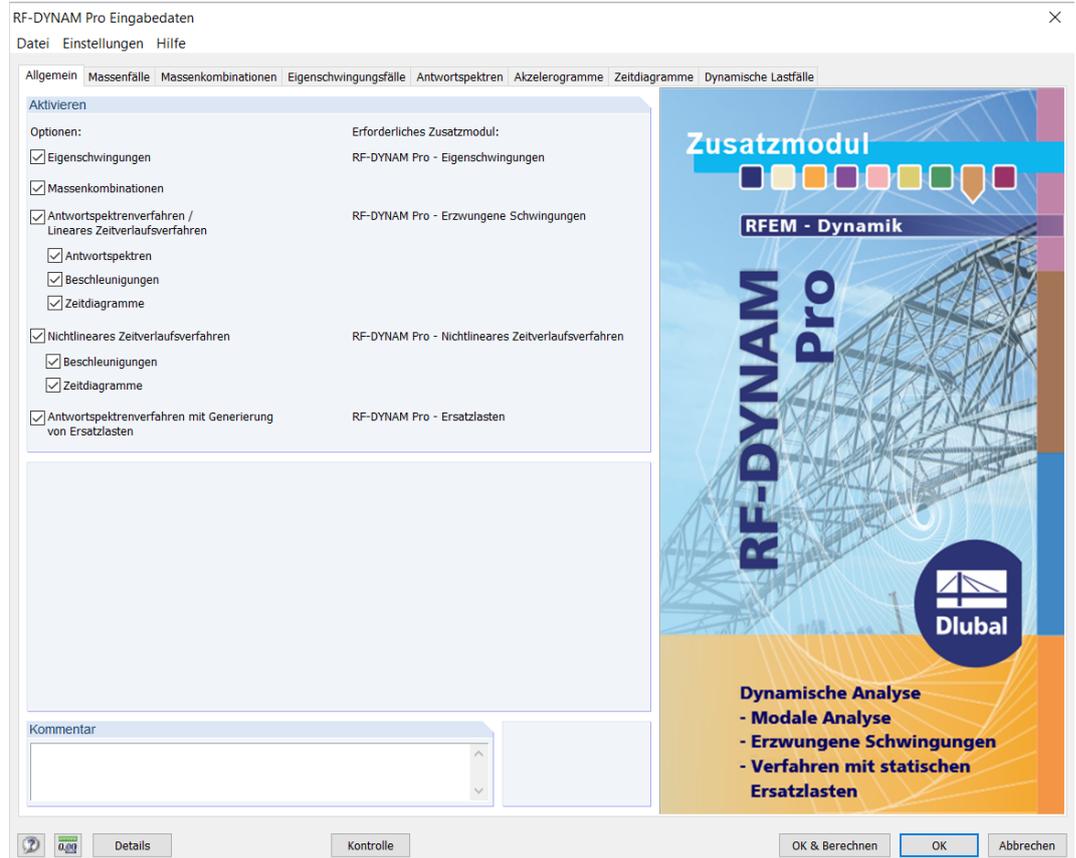


Bild 2.1: Maske *Allgemein*.

Im Register *Allgemein* wird festgelegt, welche der Zusatzmodule von *RF-DYNAM Pro* aktiviert werden sollen. Man kann Eigenschwingungen und Massenfälle des Systems mit *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* analysieren. Mit *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* kann man ein multi-modales Antwortspektrenverfahren oder ein lineares Zeitverlaufsverfahren durchführen. Eine Zeitverlaufsanalyse unter Berücksichtigung von den in der Struktur definierten Nichtlinearitäten ist mit *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren* möglich. Das Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* bietet ein multi-modales Antwortspektrenverfahren mit dem Export von gleichwertigen statischen Lasten an.

Zusatzmodule, die nicht käuflich erworben wurden, können geöffnet werden, aber sind nur als Demoversion verfügbar. Sie können auch eine 30-tägige Testversion dieser Zusatzmodule aktivieren.

Eigenschwingungen

Diese Option ist standardmäßig voreingestellt, da eine Eigenschwingungsanalyse der Struktur in den meisten Fällen erforderlich ist. Die Register *Massenfälle* und *Eigenschwingungsfälle* sind bei dieser Option voreingestellt. Wenn das Kontrollfeld *Massenkombination* angeklickt wird, wird ein weiteres Register, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, angezeigt.

Erzwungene Schwingungen

Mit diesem Modul kann entweder ein multi-modales Antwortspektren- oder ein lineares Zeitverlaufsverfahren durchgeführt werden. Wenn beides ausgewählt wird, Antwortspektren und Beschleunigungen, kann ein Antwortspektrum aus einem Beschleunigungs-Zeit-Diagramm erzeugt werden. Das Register *Antwortspektren* erscheint, wenn *Antwortspektren* ausgewählt sind, das Register *Akzelerogramme* wird angezeigt, wenn *Beschleunigungen* ausgewählt sind und das Register *Zeitdiagramme* erscheint, wenn *Zeitdiagramme* ausgewählt sind. Das Register *Dynamische Lastfälle* steht für alle drei Optionen des Moduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* zur Verfügung.

Nichtlinearer Zeitverlauf

Mit diesem Zusatzmodul kann ein nichtlineares Zeitverlaufsverfahren durchgeführt werden. Die Benutzeroberfläche für das lineare und das nichtlineare Zeitverlaufsverfahren ist identisch. Das Register *Akzelerogramme* erscheint, wenn *Beschleunigungen* ausgewählt sind und das Register *Zeitdiagramme*, wenn *Zeitdiagramme* ausgewählt sind. Das Register *Dynamische Lastfälle* ist in beiden Fällen verfügbar.

Ersatzlasten

Mit dieser Option ist es möglich, statische Ersatzlasten in Übereinstimmung mit verschiedenen Bemessungsnormen (**EN 1998-1** [1], **IBC2012** [3] u.v.m.) zu erzeugen. Die Register *Antwortspektren* und *Dynamische Lastfälle* sind Teil des Moduls *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*.

2.1 Aufbau der Hauptregisterkarten

Das Fenster von *RF-DYNAM Pro* enthält immer die folgenden Schaltflächen:



Die [Hilfe]-Schaltfläche führt direkt zum Handbuch und zur Online-Hilfe. Das Hilfe-System kann auch über **Hilfe** → ... oder durch Drücken der Funktionstaste [F1] aufgerufen werden.



Die Einheiten oder die Anzahl der Dezimalstellen der Eingabedaten oder Ergebnisse können direkt in der Maske *Einheiten und Dezimalstellen* geändert werden, so wie es auch im Hauptprogramm *RFEM* erfolgt. Diese Maske kann auch über das Menü **Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen...** aufgerufen werden. Eine genaue Erläuterung dazu erfolgt in den [Abschnitten 2.13](#) und [4.7](#).

Details

Im Dialog *Details* werden allgemeine Einstellungen festgelegt, die für die gesamte dynamische Berechnung, die in *RF-DYNAM Pro* durchgeführt wird, gelten. Der Dialog kann auch über **Einstellungen** → **Details** aufgerufen werden. Diese Einstellungen werden im [Abschnitt 2.12](#) erklärt.

Kontrolle

Die Eingabedaten werden mit [Kontrolle] geprüft. Daraufhin wird keine Berechnung durchgeführt und die Maske bleibt geöffnet.

OK & Berechnen

Um die Berechnung zu starten und das Modul *RF-DYNAM Pro* zu verlassen, erfolgt ein Klick auf die Schaltfläche [OK & Berechnen].

OK

Mit [OK] werden die Eingabedaten gespeichert und das Modul *RF-DYNAM Pro* wird beendet. Die Berechnung wird nicht durchgeführt.

Abbrechen

Mit [Abbrechen] wird das Zusatzmodul beendet, ohne dass die Daten gespeichert werden.

Wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, sind die verfügbaren Register *Allgemein*, *Massenfälle*, *Massenkombinationen*, *Eigenschwingungsfälle*, *Antwortspektren*, *Akzelerogramme*, *Zeitdiagramme* und *Dynamische Lastfälle*. Außer das Register *Allgemein* sind alle Hauptfenster ähnlich aufgebaut. Das wird in [Bild 2.2](#) anhand des Registers *Massenfälle* erklärt.

Auf der linken Seite eines jeden Fensters gibt es eine Liste bestehender Fälle und die Beschreibung dazu. Dies ist im [Bild 2.2](#) orange eingerahmt. Das können zum Beispiel *Massenfälle*, *Massenkombinationen* oder *Eigenschwingungsfälle* sein.



Am Ende dieser Liste, rot eingerahmt in [Bild 2.2](#), gibt es Schaltflächen, um neue Fälle anzulegen, bestehende Fälle zu kopieren oder diese zu löschen.



Mit diesen Schaltflächen ist es möglich, alle Fälle auszuwählen, die Auswahl aufzuheben oder umzukehren.

Auf der rechten Seite des Hauptfensters befindet sich oben die Nummer des ausgewählten Falls zusammen mit der Fallbezeichnung, in [Bild 2.2](#) blau eingerahmt. In dem Bezeichnungsfeld kann die Fallbezeichnung händisch eingetragen werden oder es kann eine Bezeichnung aus der Drop-Down-Liste ausgewählt werden. Darunter befinden sich die Haupteingabefelder für die Daten. Hier ist zunächst das Unterregister *Allgemein* geöffnet. Möglicherweise werden mehr Unterregister angezeigt. Das hängt jedoch von den ausgewählten Kontrollfeldern ab.

Im Unterregister *Allgemein* gibt es die Möglichkeit Kommentare einzutragen; dieses Feld ist in [Bild 2.2](#) grün eingerahmt.

2.2 Massenfälle

In *RF-DYNAM Pro* können mehrere *Massenfälle* definiert werden. Die Maske *Massenfall* ist in [Bild 2.2](#) dargestellt.

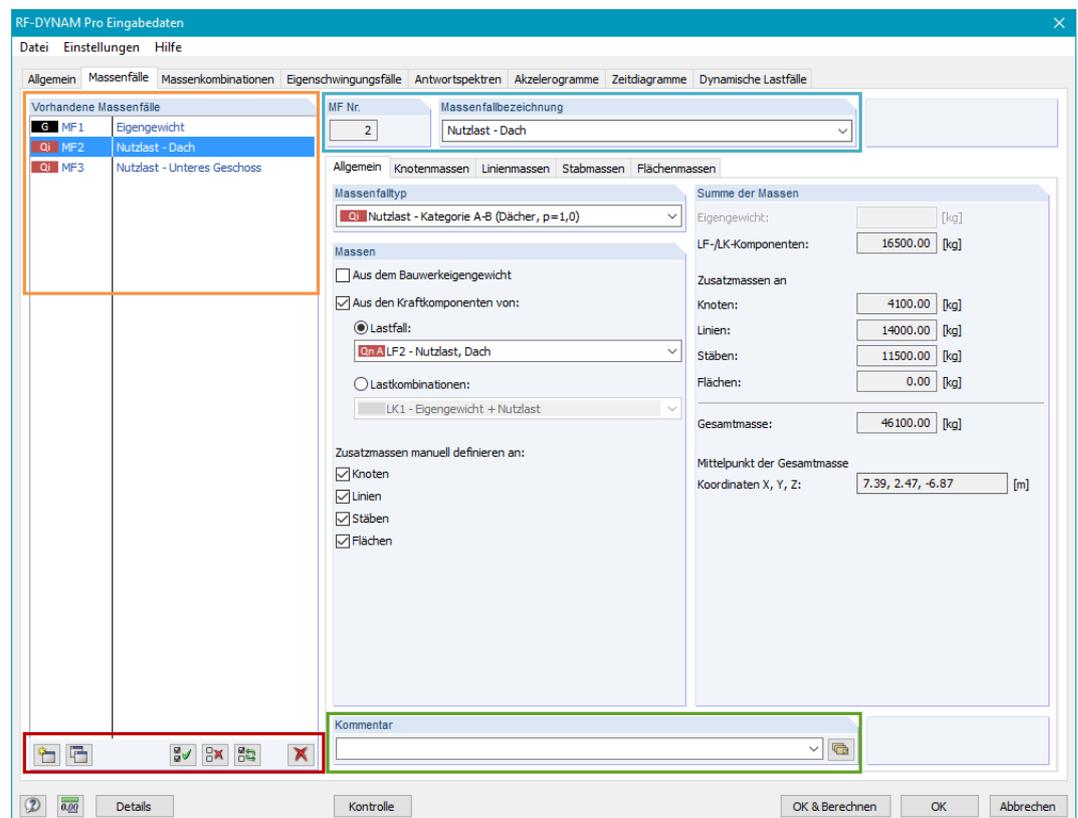
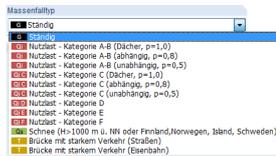


Bild 2.2: Maske *Massenfälle* mit geöffnetem Register *Allgemein*. Der MF2 ist ausgewählt und alle vier Optionen zum Definieren zusätzlicher Massen sind angehakt, um die Unterregister anzuzeigen.

Die Massenfallnummer wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Massenfall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Eine Bezeichnung kann händisch eingetragen oder aus der Drop-Down-Liste ausgewählt werden.

2.2.1 Massenfalltyp

Es wird ein Massenfalltyp aus der Drop-Down-Liste gewählt. Das ist insbesondere von Bedeutung, wenn *Massenkombinationen* verwendet werden (siehe [Abschnitt 2.3](#)). Kombinationsfaktoren sind dann gemäß **EN 1990 CEN** [4] und **EN 1998-1 CEN** [1] voreingestellt.



2.2.2 Massen

Das Kontrollfeld *Aus dem Bauwerkeigengewicht* wird ausgewählt, wenn das Eigengewicht berücksichtigt werden soll, unabhängig von einem in *RFEM* definierten Lastfall. Diese Option ist in [Bild 2.2](#) dargestellt.

Massen aus einem Lastfall oder einer Lastkombination (in *RFEM* definiert) können durch Aktivieren des Kontrollfeldes *Aus den Kraftkomponenten von Lastfall / Lastkombinationen* importiert werden. Für den Import eines Lastfalls oder einer Lastkombination wird der entsprechende Eintrag im Drop-Down-Menü ausgewählt. Lasttypen, wie *Kräfte* und *Momente*, werden importiert und außerdem können *Rohrinhalt - voll* oder *Rohrinhalt - teilweise* in Massen konvertiert werden.

Der Lastfaktor zum Multiplizieren der Belastung in Lastfällen, der in den Berechnungsparametern von *RFEM* (**Bearbeiten** → **Lastfälle und Kombination**) festgelegt werden kann, wird nicht in *RF-DYNAM Pro* übernommen. Um die Massen um einen Faktor zu erhöhen, können *Massenkombinationen* verwendet werden, die in [Abschnitt 2.3](#) beschrieben sind.



Wenn ein Lastfall importiert wird, der das Bauwerkeigengewicht enthält, muss das Kontrollfeld 'Aus dem Bauwerkeigengewicht' in *RF-DYNAM Pro* deaktiviert werden. Anderenfalls wird das Bauwerkeigengewicht verdoppelt.

In [Abschnitt 2.2.4](#) sind die globalen Detailsinstellungen für *RF-DYNAM Pro* beschrieben, die für den Massenimport aus *Lastfällen* von Bedeutung sind.

Zusätzlich oder alternativ zu den bisher beschriebenen Optionen zum Import von Massen ist es möglich, Knoten-, Linien-, Stab- oder Flächenmassen festzulegen. Abhängig von den ausgewählten Kontrollfeldern sind weitere Unterregister verfügbar, die in [Bild 2.2](#) dargestellt sind. Die Einstellungen dazu werden in den [Abschnitten 2.2.5](#) und [2.2.6](#) beschrieben.

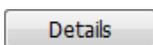
2.2.3 Summe der Massen

Auf der rechten Seite in der Maske wird die Summe der Massen angegeben, um noch einmal die Eingabe von Eigengewicht, importierten Massen aus Lastfällen oder Lastkombinationen und zusätzlichen Massen zu kontrollieren. Die Gesamtmasse und der daraus resultierende Schwerpunkt der Masse werden angezeigt.



Eventuell vernachlässigte Massen (siehe [Abschnitt 2.2.4](#)) sind in den Summen der Massen nicht berücksichtigt, hier werden die vollen Massen zur verwendet.

2.2.4 Globale Einstellungen für den Massenimport in den Details



Im Dialog *Details* können globale Einstellungen vorgenommen werden, die den Massenimport beeinflussen. Das ist der Umwandlungstyp für die Massen und die Option Massen zu vernachlässigen. Diese Einstellung sind global und gelten für alle definierten *Massenfälle* in *RF-DYNAM Pro*. Weitere Information zur Dialogbox *Details* sind in [Abschnitt 2.12](#) beschrieben.

Umwandlungstyp für die Masse

Beim Import der Massen können nur die Z-Komponenten berücksichtigt werden, hierbei kann weiter unterschieden werden, ob nur die Lastkomponenten in die Gravitationsrichtung oder in beide Richtungen der Z-Achse berücksichtigt werden. Die zur Verfügung stehenden Optionen sind in [Bild 2.3](#) dargestellt.

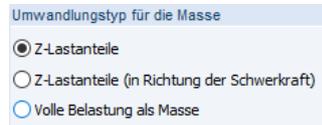


Bild 2.3: Der Umwandlungstyp für die Masse in Dialog *Details*.

Die dritte Option importiert Gesamtlasten ohne deren Richtung zu berücksichtigen. Das ist die einzige Möglichkeit um beispielsweise Massen aus horizontalen Erddruck zu importieren.

Wenn unterschiedliche Lasten in einem FE-Knoten wirken, wird zuerst die Lastresultierende gebildet und das ist wichtig für *RF-DYNAM Pro*



Die Richtung der Schwerkraft wird in Richtung der globalen Z-Achse definiert, wenn die positive Richtung nach unten festgelegt ist. Sie wird entgegen der Richtung der globalen Z-Achse definiert, wenn die positive Richtung der Z-Achse nach oben festgelegt ist. Die Einstellungen, wie links dargestellt, können unter **Bearbeiten** → **Modelldaten** → **Basisangaben** vorgenommen werden.

Massen vernachlässigen

Es ist möglich die Masse von Teilen der Struktur zu vernachlässigen. Dafür muss das Kontrollfeld *Massen vernachlässigen* in den Detailinstellungen, wie im [Bild 2.4](#) dargestellt, aktiviert werden.

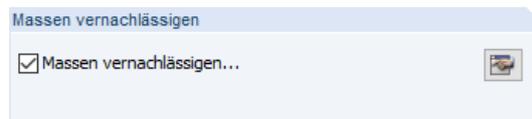


Bild 2.4: Das *Massen vernachlässigen* Feature im Dialog *Details*.

 Mit der [Bearbeiten] Schaltfläche wird das Dialogfenster *Massen vernachlässigen* geöffnet um zu definieren welche Massen von Konten, Stäben, Linien und Flächen vernachlässigt werden sollen. Der Dialog ist in [Bild 2.5](#) gezeigt.

 Sie können die Liste der Knoten (Stäbe, Linien und Flächen) händisch erstellen oder grafisch selektieren bei Verwendung der Schaltfläche [Mehrfachselektion]. Der Filter [Nur Lager selektieren] wird blau wenn er aktiv ist und hilft dabei Auflager zu selektieren. Wenn der Filter aktiv ist, werden trotz grafischer Selektion des gesamten Modells nur die Auflager in die Liste der Knoten (Linien oder Flächen) geschrieben.

Sie entscheiden in welche Richtung die Massen vernachlässigt werden, in dem Sie die Kontrollfelder für die Verschiebungsrichtungen u_x , u_y und u_z und der Rotationen φ_x , φ_y und φ_z entsprechend selektieren.

In der Maske *Summe der Massen* im Register *Massenfall* (siehe [Bild 2.2](#)) sind die vernachlässigten Massen nicht berücksichtigt, dort sind immer die vollen Massen gelistet. Die vernachlässigten Massen an den einzelnen FE-Knoten können in der Ergebnistabelle *5.6 Massen in Netzpunkten* (siehe [Abschnitt 4.1](#)) überprüft werden.



Ein kleines Beispiel zu der *Massen vernachlässigen* Funktion kann in der [Knowledge Base](#) auf unserer Website gefunden werden.

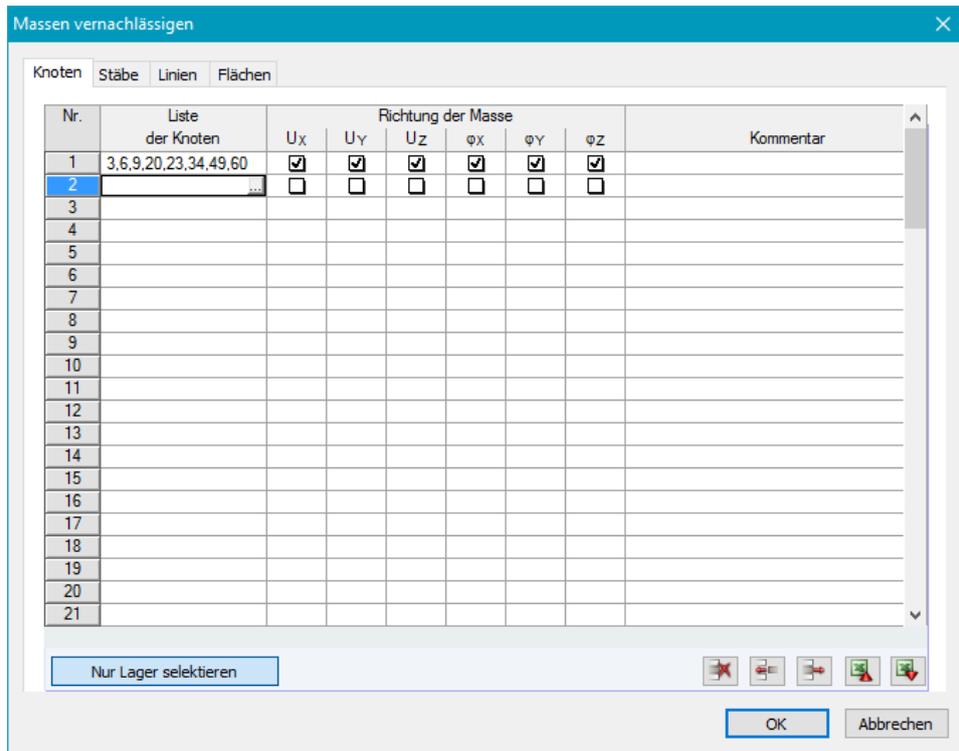


Bild 2.5: Der *Massen vernachlässigen* Dialog um Massen an Knoten, Stäben, Linien und Flächen zu vernachlässigen.

2.2.5 Zusätzliche Knotenmassen

Das Register *Knotenmassen* ist in [Bild 2.6](#) dargestellt.

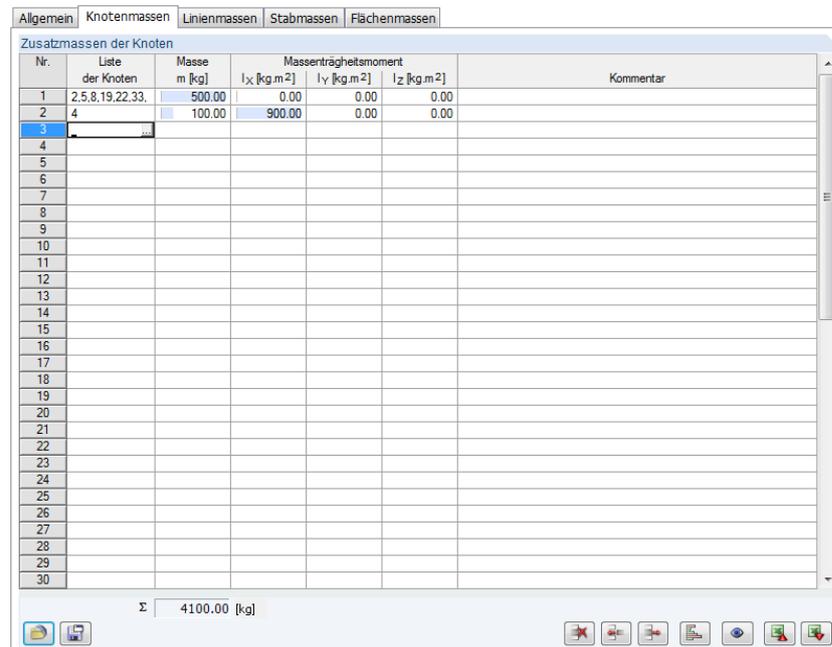


Bild 2.6: Das Register *Knotenmassen*, das angezeigt wird, wenn *Zusatzmassen an Knoten* im Register *Allgemein* selektiert sind.



Sie können eine Liste von Knoten händisch erstellen oder die auf der linken Seite dargestellte Schaltfläche [Mehrfachselektion] verwenden, um Knoten in der Grafik auszuwählen.

Die Massen m in kg werden manuell eingegeben und wirken in die Richtungen, die in den *Eigen-schwingungsfällen* definiert werden (siehe [Abschnitt 2.4.3](#)).

Darüber hinaus können Massenträgheitsmomente I_x , I_y und I_z angegeben werden, um komplexere Massenpunkte zu modellieren (*d.h.*, die Drehbewegungen einer Maschine können annähernd berücksichtigt werden).

Die Schaltflächen am unteren Ende der Tabelle bieten nützliche Funktionen, die im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 11.5** beschrieben sind.



Der Tabelleneintrag kann in einer Bibliothek gespeichert und jederzeit aufgerufen werden. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um einen Dateinamen einzugeben.

2.2.6 Zusätzliche Linien-, Stab- und Flächenmassen

Zusätzlich zu Knotenmassen können Linien- Stab- oder Flächenmassen händisch festgelegt werden. Die entsprechenden Unterregister erscheinen, wenn die Kontrollfelder *Linien*, *Stäbe* oder *Flächen* im Register *Massenfälle* ausgewählt sind, wie in **Bild 2.2** dargestellt. Die Tabelle zum Eintragen der Linienmassen ist in **Bild 2.7** dargestellt.

Nr.	Liste der Linien	Masse [kg/m]	Kommentar
1	2,6,12,42,54,86,98	500,00	
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
		Σ	14000.00 [kg]

Bild 2.7: Das Register *Linienmassen*, das angezeigt wird, wenn *Zusatzmassen an Linien* im Register *Allgemein* selektiert sind.

Die Tabellen zum Eintragen von Stab- und Flächenmassen sind sehr ähnlich aufgebaut und werden hier nicht explizit dargestellt.



Eine Liste von Linien (Stäben oder Flächen) kann händisch erstellt werden oder die auf der linken Seite dargestellte Schaltfläche [Mehrfachselektion] kann verwendet werden, um Linien (Stäbe oder Flächen) grafisch auszuwählen.

Linien- und Stabmassen werden in kg pro Längeneinheit angegeben. Flächenmassen werden in kg pro Flächeneinheit angegeben. Sie werden manuell festgelegt und wirken in den Richtungen, die in den *Eigenschwingungsfällen* definiert wurden (siehe **Abschnitt 2.4**).

2.3 Massenkombinationen

Massenfälle können zu Massenkombinationen kombiniert werden. Das erfolgt analog zu Lastfällen und Lastkombinationen im Hauptprogramm *RFEM*, wie im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 5.5.1** beschrieben. Das Register *Massenkombinationen* ist nur verfügbar, wenn das entsprechende

Kontrollfeld im Register *Allgemein* ausgewählt ist (siehe [Bild 2.1](#)). Wenn das Register *Massenkombinationen* zum ersten Mal geöffnet wird, ist eine Massenkombination voreingestellt und die bestehenden Massenfälle werden aufgeführt.



Mit den Schaltflächen auf der linken Seite lassen sich selektierte oder alle Massenfälle zu einer Massenkombination hinzufügen. Die Massenfällen werden damit von der linken in die rechte Liste übertragen. Kombinationsfaktoren sind in *RF-DYNAM Pro* automatisch voreingestellt, aber können händisch geändert werden.



Genauso ist es möglich, einzelne oder alle Massenfälle von einer Massenkombination zu entfernen, indem die Schaltflächen, wie links gezeigt, verwendet werden.

Die Maske mit der Massenkombination *MK1*, die Massenfälle mit Eigengewicht und Nutzlast enthält, ist in [Bild 2.8](#) dargestellt.

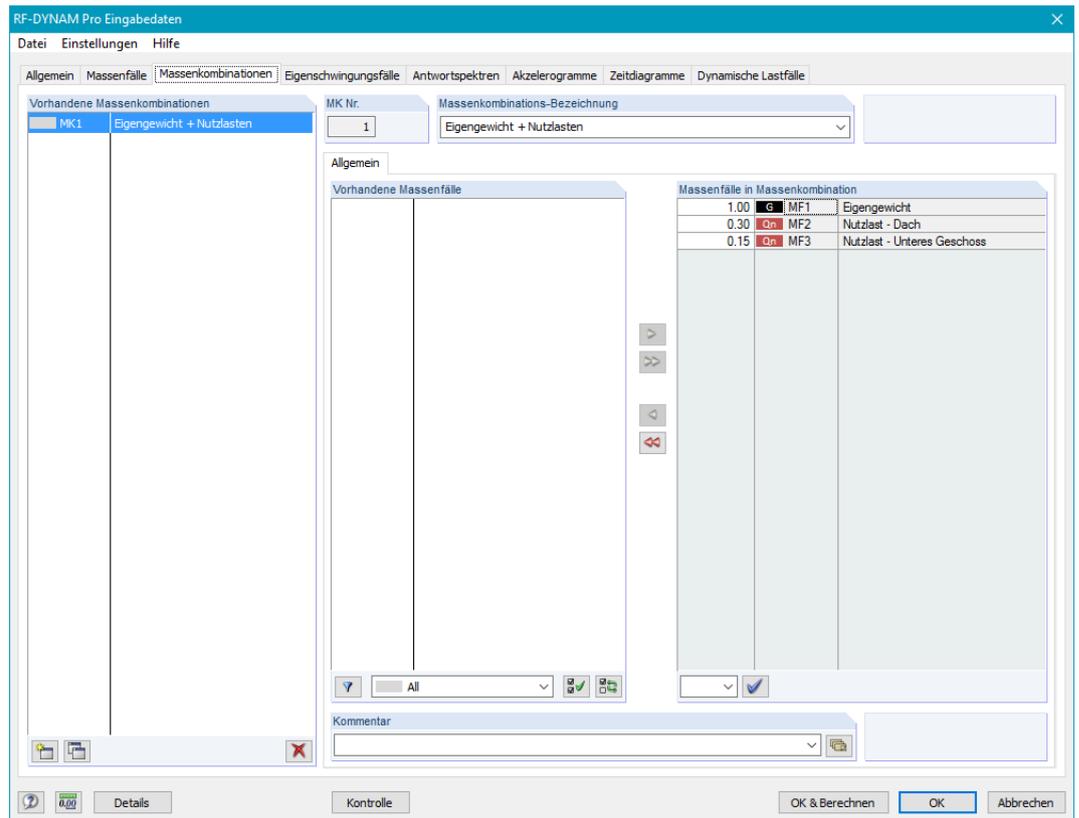


Bild 2.8: Maske *Massenkombinationen* mit allen vorhandenen Massenfällen, die für die Massenkombination ausgewählt wurden. Die Kombinationsfaktoren sind in *RF-DYNAM Pro* voreingestellt.



Kombinationsfaktoren sind gemäß **EN 1990** [4] und **EN 1998-1** [1] voreingestellt. Diese Faktoren können manuell angepasst werden, indem ein Wert eingetragen oder aus der Drop-Down-Liste ausgewählt wird. Wie in **EN 1998-1** in **Abschnitt 3.2.4** [1] festgelegt, müssen Zusatzmassen neben dem Eigengewicht berücksichtigt werden, um Trägheitseffekte zu berechnen.

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.1)$$

wobei $G_{k,j}$ ständigen Lasten und $Q_{k,i}$ Nutzlasten sind. $\psi_{E,i}$ sind die Kombinationsfaktoren für die Nutzlasten, definiert als

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \quad (2.2)$$

wobei $\psi_{2,i}$ in **EN 1990 Tabelle A.1.1** [4] und φ in **EN 1998-1 Abschnitt 4.2.4** [1] festgelegt sind.



Diese Kombinationsfaktoren können in jedem nationalen Anhang des **EN 1998-1** und in anderen internationalen Baunormen unterschiedlich geregelt sein.

2.4 Eigenschwingungsfälle

Das Register *Eigenschwingungsfälle* ist das Kernstück des Moduls *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* und ist eine wichtige Grundlage für das Antwortspektrenverfahren und das Zeitverlaufsverfahren, basierend auf einer modalen Auflösung (Modalanalyse).

Hier wird eingestellt, wieviele Eigenwerte berechnet werden sollen, es wird definiert, welche Massen verwendet werden und in welche Richtung sie wirken. Hier wird auch der Eigenwertlöser und die Art von Massenmatrix festgelegt sowie die Skalierung der Eigenformen vorgenommen. In diesem Register werden Steifigkeitsänderungen definiert oder Normalkräfte als Anfangsbedingung importiert.

Das Register *Allgemein* in der Maske *Eigenschwingungsfall* ist in [Bild 2.9](#) dargestellt.

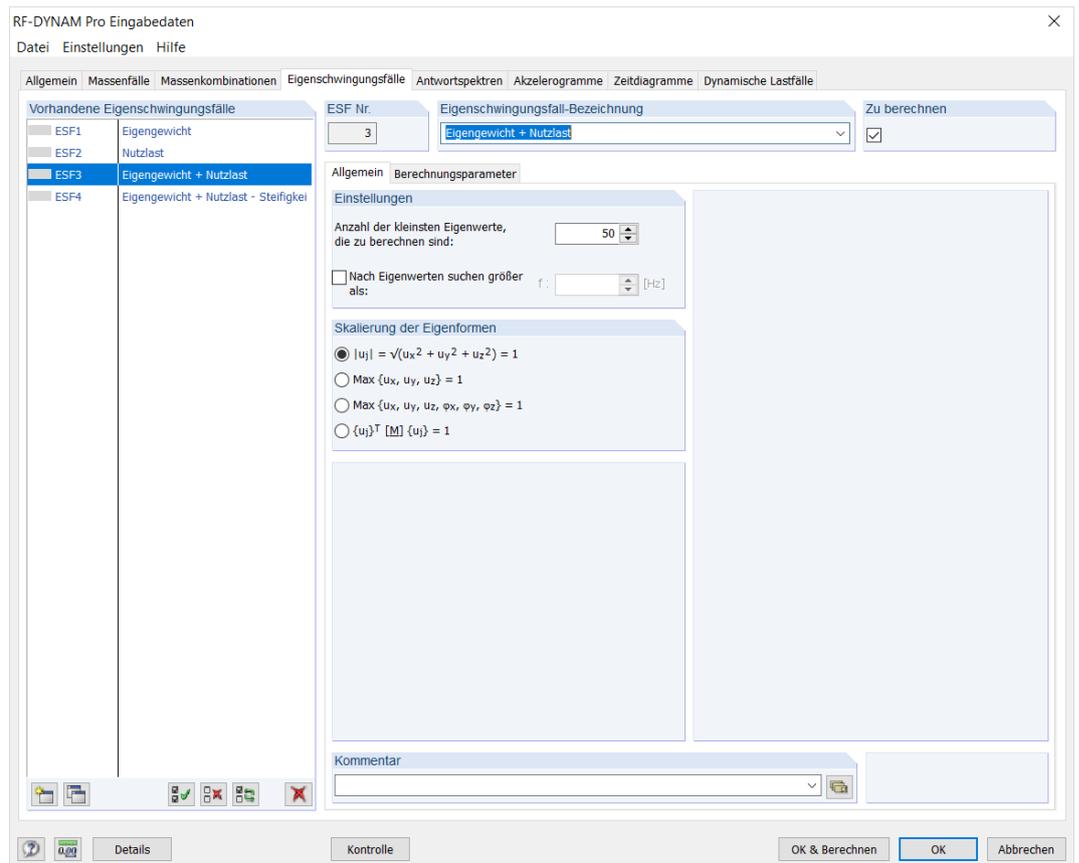


Bild 2.9: Maske *Eigenschwingungsfälle* mit dem geöffneten Register *Allgemein*.

Für jeden *Eigenschwingungsfall* können verschiedene Berechnungsparameter festgelegt werden, wie in [Bild 2.10](#) dargestellt.

Die Nummer des *Eigenschwingungsfalles* wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Fall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Es kann festgelegt werden, ob der spezifische *Eigenschwingungsfall* berechnet wird, dies geschieht durch Auswählen des Kontrollfeldes *Zu berechnen*.

Es kann jeder *Eigenschwingungsfall* separat berechnet werden, indem das Kontextmenü verwendet wird und *Berechnen* ausgewählt wird. Die Farbe eines *ESF* wird grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse dieses *ESF* verfügbar sind und verändert sich zu grün, sobald die Berechnung abgeschlossen ist und Ergebnisse verfügbar sind, mehr Informationen zu diesem Thema finden Sie im [Abschnitt 3.3](#).



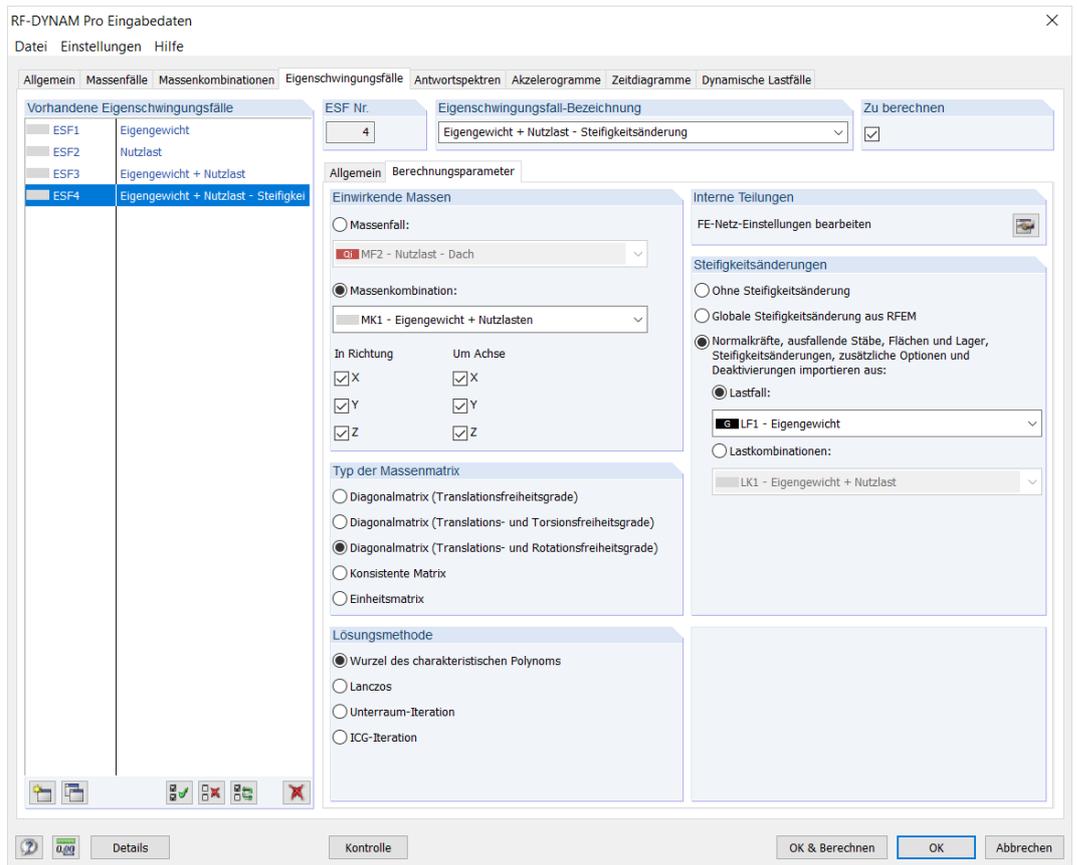


Bild 2.10: Maske *Eigenschwingungsfälle* mit dem geöffneten Register *Berechnungsparameter*.

2.4.1 Anzahl der Eigenwerte

Im Register *Allgemein* werden die Anzahl der kleinsten Eigenwerte festgelegt, die zu berechnen sind. Die maximale Anzahl an Eigenwerten ist auf 9 999 in *RF-DYNAM Pro* beschränkt, aber auch durch das Modell an sich. Die Anzahl der verfügbaren Eigenwerte entspricht den Freiheitsgraden (Anzahl der freien Massenpunkte multipliziert mit der Anzahl der Richtungen, in die die Massen wirken).

Es ist möglich, Eigenwerte nur oberhalb eines bestimmten Wertes der Eigenfrequenz f zu berechnen, um die Anzahl der erzeugten Ergebnisse zu reduzieren.

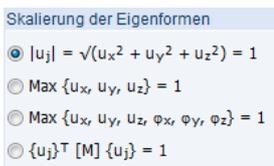


Die Auswahl dieser Option sollte gut überlegt sein und es ist ratsam, erst die kleinsten Eigenwerte der Struktur zu untersuchen. Um die Wichtigkeit von jedem Eigenwert einzuschätzen, sind die *Effektiven Modalmassenfaktoren* hilfreich (siehe [Abschnitt 4.1.4](#)).

2.4.2 Skalierung der Eigenformen

Die Eigenformen können auf jeden beliebigen Wert skaliert werden. Die ersten drei Optionen sind alle eine gute Wahl für eine zufriedenstellende Veranschaulichung der Eigenformen. Die Option $|\mathbf{u}_i| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} = 1$ skaliert den Wert des Eigenformvektors \mathbf{u}_i (nur Translationsanteile) auf 1. Die Option $\max\{u_x, u_y, u_z\} = 1$ wählt den maximalen Translationsanteil des Eigenformvektors aus und setzt diesen auf 1. Die Option $\max\{u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z\} = 1$ berücksichtigt den gesamten Eigenformvektor, einschließlich der Rotationsanteile, wählt das Maximum und setzt dieses auf 1. Bei all diesen drei Optionen wird die Skalierung separat für jeden Eigenwert i durchgeführt.

Die Option $\mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{u}_i = 1$ kg wird intern für das Zeitverlaufs- oder das Antwortspektrenverfahren immer genutzt, unberücksichtigt dessen, was an dieser Stelle ausgewählt wurde. Die modalen Massen m_i sind 1 kg für jeden Eigenwert, wenn diese Option verwendet wird (siehe [Abschnitt 4.1](#)).



Egal welche Skalierungsoption gewählt wird: die Translationseigenformen u_x , u_y und u_z sind dimensionslos und die Rotationseigenformen φ_x , φ_y und φ_z sind in $[1/m]$ angegeben. Die resultierenden Eigenformen werden in [Abschnitt 4.1.2](#) diskutiert.

2.4.3 Einwirkende Massen

Für jeden *Eigenschwingungsfall* können verschiedene *Massenfälle* oder *Massenkombinationen* importiert werden. Die Auswahl wird im Drop-Down-Menü im Register *Berechnungsparameter* vorgenommen.

In Richtung	Um Achse
<input checked="" type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> X
<input checked="" type="checkbox"/> Y	<input checked="" type="checkbox"/> Y
<input checked="" type="checkbox"/> Z	<input checked="" type="checkbox"/> Z

Die Richtungswirkung der Massen muss festgelegt werden. Die Massen können in globale Verschiebungsrichtungen X, Y oder Z wirken, indem die entsprechenden Kontrollfelder angehakt werden. Massen können auch um die globalen X, Y und Z-Achsen rotieren, indem die entsprechenden Kontrollfelder selektiert werden.



Diese Einstellungen ändern die Massenmatrix und führen zu verschiedenen Eigenformen und Eigenfrequenzen. Um eine ebene Analyse der Struktur durchzuführen, aktiviert man nur die Massen in eine der globalen Richtungen. Eine ebene Analyse ist nur bei regelmäßigen Gebäuden im Grund- und Aufriss zulässig. Für eine dreidimensionale Analyse werden Massen in alle globalen Richtungen berücksichtigt.

2.4.4 Typ der Massenmatrix

Typ der Massenmatrix

- Diagonalmatrix (Translationsfreiheitsgrade)
- Diagonalmatrix (Translations- und Torsionsfreiheitsgrade)
- Diagonalmatrix (Translations- und Rotationsfreiheitsgrade)
- Konsistente Matrix
- Einheitsmatrix

Fünf verschiedene Typen von Massenmatrizen sind im Register *Berechnungsparameter* verfügbar, wie in [Bild 2.10](#) dargestellt.

Diagonalmatrix: Wenn der Typ der Massenmatrix **M** als diagonal festgelegt wird, werden die Massen auf die FE-Knoten konzentriert. Die Eingaben in der Matrix sind die konzentrierten Massen in die Translationsrichtungen X, Y und Z. Massen, die um die X, Y oder Z-Achse rotieren, werden abhängig von dem Typ der Diagonalmatrix berücksichtigt. Es sind drei verschiedene Typen der Diagonalmatrizen verfügbar:

Diagonalmatrix (Translationsfreiheitsgrade): Mit dieser Matrix werden nur Massen in die Translationsrichtungen X, Y und Z berücksichtigt. Das Kontrollkästchen *Um Achse* ist nicht verfügbar. Die Diagonalmassenmatrix **M** setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{M} = \text{diag} (M_{1,X}, M_{1,Y}, M_{1,Z}, M_{2,X}, \dots, M_{n,j}, \dots) \quad (2.3)$$

mit $n = 1 \dots$ FE-Knoten und $j = X, Y$ und Z Richtungen.

Diagonalmatrix (Translations- und Torsionsfreiheitsgrade): Neben den Massen in den Translationsrichtungen X, Y und Z, werden auch die Massen, die um die Längsachse eines Stabes oder einer Fläche wirken, berücksichtigt, wenn das Kontrollkästchen *Um Achse* ausgewählt ist. Die Richtung, die berücksichtigt wird, hängt von der lokalen Längsrichtung der Stäbe und Flächen ab. Die Diagonalmatrix **M** an einem bestimmten FE-Punkt mit Masse m setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{M} = m \cdot \text{diag} (1, 1, 1, Y^2 + Z^2, X^2 + Z^2, X^2 + Y^2) \quad (2.4)$$

mit X, Y oder Z als Abstände zum Mittelpunkt der Gesamtmasse, angegeben im Register *Massenfälle* und in [Abschnitt 2.2](#) erläutert. Auch die manuell definierten Massenträgheitsmomente I_x , I_y und I_z , die in der *Knotenmassen*-Tabelle hinzugefügt wurden (siehe [Abschnitt 2.2.5](#)), werden berücksichtigt, wenn sie in der Längsachse wirken.

Diagonalmatrix (Translations- und Rotationsfreiheitsgrade): Dieser Typ der Massenmatrix berücksichtigt alle Freiheitsgrade. Die Massen in der Translationsrichtung X, Y und Z und in der Rotationsrichtung X, Y und Z werden berücksichtigt. Die Diagonalmatrix **M** an einem bestimmten FE-Punkt mit Masse m setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\mathbf{M} = m \cdot \text{diag}(1, 1, 1, (Y^2 + Z^2) + I_x, (X^2 + Z^2) + I_y, (X^2 + Y^2) + I_z) \quad (2.5)$$

mit X , Y oder Z als Abstände zum Mittelpunkt der Gesamtmasse (angegeben im Register *Massenfälle* und in [Abschnitt 2.2](#) erläutert), und I_x , I_y und I_z die Massenträgheitsmomente (die in der *Knotenmassen*-Tabelle definiert wurden, wie in [Abschnitt 2.2.5](#) beschrieben).

Konsistente Massenmatrix: Die konsistente Massenmatrix ist eine vollständige Massenmatrix der finiten Elemente; die Massen sind nicht auf die FE-Knoten konzentriert, sondern Ansatzfunktionen für eine realistischere Verteilung der Massen innerhalb der FE-Elemente, werden verwendet. Mit der konsistenten Massenmatrix werden nichtdiagonale Einträge in der Matrix berücksichtigt, so dass Rotation der Massen allgemein berücksichtigt wird. Die konsistente Massenmatrix ist folgendermaßen aufgebaut (die Ansatzfunktionen werden einfachheitshalber vernachlässigt):

$$\mathbf{M} = m \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y^2 + Z^2 & -XY & -XZ \\ 0 & 0 & 0 & -XY & X^2 + Z^2 & -YZ \\ 0 & 0 & 0 & -XZ & -YZ & X^2 + Y^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

mit der Masse m und den Abständen X , Y oder Z zum Mittelpunkt der Gesamtmasse, angegeben im Register *Massenfälle* und in [Abschnitt 2.2](#) erläutert.

Einheitsmatrix: Die *Einheitsmatrix* überschreibt alle vorher definierten Massen. Eine Einheitsmatrix ist eine konsistente Matrix, bei der alle diagonalen Elemente 1 kg betragen. Bei der Verwendung der *Einheitsmatrix* wird die Masse an jedem FE-Punkt auf 1 gesetzt. Translationen und Rotationen der Massen werden berücksichtigt. Dieser mathematische Ansatz sollte nur für numerische Analysen verwendet werden. Mehr Informationen zu Matrixtypen und vor allem zur Verwendung der Einheitsmatrix werden bei Barth und Rustler [5] angegeben.

2.4.5 Eigenwertlöser

Lösungsmethode

- Wurzel des charakteristischen Polynoms
- Lanczos
- Unterraum-Iteration
- ICG-Iteration

Es sind verschiedene Methoden verfügbar, um das Eigenwertproblem zu lösen. Die Auswahl richtet sich nach der Größe des zu berücksichtigenden Tragsystems und ist mehr eine Frage der Performance als der Genauigkeit. Die Methoden sind alle geeignet zur Bestimmung von genauen Eigenwerten.

Wurzel des charakteristischen Polynoms: Das ist die analytische Lösung eines Eigenwertproblems, siehe zum Beispiel [6] oder [7] und wird mit einer direkten Methode gelöst. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, dass höhere Eigenwerte genauer berechnet werden und dass alle Eigenwerte einer Struktur bestimmt werden können. Für größere Strukturen kann diese Methode recht langsam sein.

Lanczos-Methode: Die Lanczos-Methode ist eine iterative Methode, um die p -niedrigsten Eigenwerte und dazugehörige Eigenformen von größeren Strukturen zu bestimmen. In den meisten Fällen wird durch diesen Algorithmus eine schnelle Konvergenz erreicht. Es können $n - 1$ Eigenwerte ($n =$ Freiheitsgrade der Struktur) berechnet werden. Für weitere Informationen siehe Bathe [6].

Unterraum-Iteration: Die Unterraum-Iteration ist für große FE-Modelle geeignet, bei denen nur einige Eigenwerte berechnet werden sollen. Alle benötigten Eigenwerte werden in einem Schritt bestimmt. Der Computerspeicher schränkt die Anzahl der Eigenwerte ein, die mit dieser Methode berechnet werden können. Für weitere Informationen siehe Bathe [6].

ICG-Iteration: Diese Methode ist auch für große Strukturen geeignet, bei denen nur wenige Eigenwerte benötigt werden. Jedoch werden hier die Eigenwerte nacheinander berechnet. Deswegen ist die Anzahl an benötigten Eigenwerten proportional zur Berechnungszeit. Theoretisch können alle Eigenwerte einer Struktur berechnet werden.

2.4.6 FE-Netz-Einstellungen

Interne Teilungen

FE-Netz-Einstellungen bearbeiten



Mit der auf der linken Seite dargestellten Schaltfläche kommt man direkt zu den FE-Netz-Einstellungen des Hauptprogramms *RFEM*. Die Maske *FE-Netz-Einstellungen* kann auch über **Berechnung** → **FE-Netz-Einstellungen...** im Hauptprogramm *RFEM* aufgerufen werden. Weitere Informationen zum FE-Netz und zu den Parametern, die angepasst werden können, stehen im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 7.2**.

Stäbe, die nicht in Flächen integriert sind werden nicht automatisch mit FE-Knoten geteilt. Wenn eine diagonale Massenmatrix verwendet wird, werden die Massen solcher Stäbe auf die Endknoten konzentriert. Wenn diese Endknoten gelagert sind, kann es passieren, dass keine Eigenwerte berechnet werden können, dann muss die Teilung für Stäbe in den FE-Netz Einstellungen aktiviert werden.

2.4.7 Steifigkeitsänderungen als Anfangsbedingungen

Steifigkeitsmodifikationen können von einem bestimmten *Lastfall* oder einer *Lastkombination* importiert werden. Im Detail bedeutet das folgendes:

- Die geometrische Steifigkeitsmatrix, berechnet aus dem Einfluss von Normalkräften, wird der Steifigkeitsmatrix der Struktur hinzugefügt. Dies kann dazu verwendet werden näherungsweise den $P - \Delta$ Effekt bei der Berechnung von Frequenzen zu berücksichtigen, oder um den Einfluss einer Vorspannung von Seilen zu untersuchen. Informationen zur Theorie und ein Beispiel, wann und wie der $P - \Delta$ Effekt zu berücksichtigen ist, kann in der [FAQ 002316](#) gefunden werden.
- Stäbe, Flächen und Auflager, die aufgrund von, im Hauptprogramm *RFEM*, definierten Nicht-linearitäten ausfallen, werden als Anfangsbedingung importiert. Die ausgefallene Teile der Struktur sind dann nicht vorhanden bei der Berechnung der Eigenwerte. Eine kleines Beispiel, wie diese Option genutzt werden kann um den Einfluss von Zugstäben in *RF-DYNAM Pro* zu untersuchen, finden Sie in der [FAQ 002237](#).
- Aktivierte Steifigkeitsbeiwerte für *Material*, *Querschnitte*, *Stäbe* und *Flächen* werden in die Eigenwertberechnung übernommen, wenn die entsprechenden Kontrollfelder in den *LF / LK* Berechnungsparametern selektiert sind.
- Beiwerte die im Register *Steifigkeiten modifizieren* in den *LF / LK* Berechnungsparametern eingestellt sind werden in *RF-DYNAM Pro* angewendet.
- Die *Zusatzoptionen* in den *LF / LK* Berechnungsparametern können genutzt werden um Steifigkeiten aus dem Modul *RF-BETON* zu importieren.
- Import von deaktivierten Stäben, Flächen oder Volumen möglich. Diese Option verändert das statische System das in *RF-DYNAM Pro* analysiert wird.

Steifigkeitsänderungen

Ohne Steifigkeitsänderung

Globale Steifigkeitsänderung aus RFEM

Normalkräfte, ausfallende Stäbe, Flächen und Lager, Steifigkeitsänderungen, zusätzliche Optionen und Deaktivierungen importieren aus:

• Lastfall:

LF1 - Eigengewicht

Lastkombinationen:

LK1 - Eigengewicht + Nutzlast

Steifigkeitsbeiwerte aktivieren

Materialien (Teilsicherheitsbeiwert γ_M)

Querschnitte (Faktor für $I_T, I_Y, I_Z, A, A_Y, A_Z$)

Stäbe (Definitionstyp)

Flächen (Definitionstyp)

Sondereinstellungen aktivieren im Registerreiter:

Steifigkeiten modifizieren

Zusatzoptionen

Deaktivieren

Steifigkeitsänderungen

Ohne Steifigkeitsänderung

Globale Steifigkeitsänderung aus RFEM

Normalkräfte, ausfallende Stäbe, Flächen und Lager, Steifigkeitsänderungen, zusätzliche Optionen und Deaktivierungen importieren aus:

• Lastfall:

LF1 - Eigengewicht

Lastkombinationen:

LK1 - Eigengewicht + Nutzlast

Die Berechnungsparameter eines *Lastfalles* oder einer *Lastkombination*, die für *RF-DYNAM Pro* relevant sind, sind auf der linken Seite dargestellt. Die Kontrollfelder *Materialien*, *Querschnitte*, *Stäbe* und *Flächen* aktivieren die Steifigkeitsänderungen, die in den Masken *Material bearbeiten*, *Querschnitt bearbeiten*, *Stab bearbeiten* und *Fläche bearbeiten* im Hauptprogramm *RFEM* vorgenommen wurden (siehe **RFEM Handbuch** in den **Abschnitten 4.3, 4.13, 4.17** und **4.4**). Weitere Informationen zu den Berechnungsparametern von *Lastfällen* und *Lastkombinationen* gibt es im **RFEM Handbuch Abschnitt 7.3**.

Die *Globalen Änderung der Steifigkeiten* können unabhängig von einem *LF* oder einer *LK* importiert werden. Diese globalen Änderungen importieren den Material-Teilsicherheitsbeiwert γ_M und die Querschnitts-, Stab- und Flächenmodifikationen, die im Hauptprogramm *RFEM* eingestellt wurden (siehe **RFEM Handbuch** in den **Abschnitten 4.3, 4.13, 4.17** und **4.4**).

In *RF-DYNAM Pro* werden diese Steifigkeitsmodifikationen als Anfangsbedingungen eingelesen, die Berechnung in *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen* ist linear. Die *Anfangsbedingungen* lassen sich, wie [Bild 2.10](#) gezeigt, aktivieren.



Sollen nur Normalkräfte berücksichtigt werden, ist darauf zu achten, dass keine Steifigkeitsänderungen in den Berechnungsparametern des importierten *LF* oder *LK* aktiviert sind.



Wenn nur bestimmte Steifigkeitsänderungen oder deaktivierte Stäbe untersucht werden sollen, ist darauf zu achten, dass ein Lastfall angelegt wird, der keine Lasten, sondern nur relevante Steifigkeitsänderungen enthält.

Eine Abbildung, die dieses komplexe Leistungsmerkmal beschreibt, gibt es in der [Knowledge Base](#).

2.5 Antwortspektren

Ein Antwortspektrum stellt maximale Systemantworten für eine Gruppe von Einmassenschwingern (EMS) auf eine bestimmte Systemanregung, z. B. Mittelwert mehrerer Erdbebenaufzeichnungen, dar. Die *EMS* haben gleiche Dämpfungseigenschaften, aber unterschiedliche Eigenperioden. Die maximalen Systemantworten der einzelnen EMS werden versus der Eigenperiode der EMS dargestellt, diese Grafik ist das sogenannte Antwortspektrum.

Das Antwortspektrenverfahren hat große Vorteile in der Berechnungszeit und ist eine gängige Methode, die in Baunormen beschrieben wird. Es gilt jedoch zu beachten, dass dieses Verfahren ein Näherungsverfahren ist, das die maximalen Schnittkräfte der Struktur berechnet. Für weitere Informationen zum Antwortspektrenverfahren siehe zum Beispiel Wilson [8] und Tedesco [9].

Mit *RF-DYNAM Pro* kann das multi-modale und das multi-punkt Antwortspektrenverfahren (nur mit *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*) durchgeführt werden. Einsatzbereite Antwortspektren sind in Baunormen verfügbar, viele davon stehen auch in *RF-DYNAM Pro* zur Verfügung. Es ist möglich, in *RF-DYNAM Pro* ein Antwortspektrum aus einem bestehenden Akzelerogramm zu erzeugen (nur in Verbindung mit *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar).



Das Register *Antwortspektren* ist nur verfügbar, wenn die *Antwortspektren* oder die *Ersatzlasten* im Register *Allgemein*, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört entweder zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* oder zum Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*.

In *RF-DYNAM Pro* gibt es drei Möglichkeiten Antwortspektren einzugeben: Nach Norm, benutzerdefiniert oder generiert aus Beschleunigung. Das Register *Antwortspektren* ist in [Bild 2.11](#) dargestellt.

2.5.1 Antwortspektren nach Norm

Um ein Antwortspektrum zu erzeugen, können die Parameter entsprechend einer Baunorm eingegeben werden. Die Liste mit den verfügbaren Baunormen ist in [Bild 2.12](#) dargestellt.

Die gewünschte Norm kann aus dem Menü ausgewählt werden. Die *Normparameter* und deren Standardwerte (siehe [Bild 2.11](#)) ändern sich je nach gewählter Norm. Die Parameter werden aus Drop-Down-Listen ausgewählt oder können je nach Parametertyp und je nach gewählter Baunorm händisch eingegeben werden. Viele Standards unterscheiden zwischen einem linearen Bemessungsspektrum unter Verwendung eines Duktilitätsbeiwertes q , und einem elastischen Antwortspektrum unter Verwendung eines Beiwertes für die Dämpfung η . Diese beiden Typen von Spektren können in der Drop-Down Liste ausgewählt werden. Außerdem wird zwischen horizontalen und vertikalen Antwortspektren unterschieden. Die Felder, die nicht veränderbar sind, sind durch bereits festgelegte Parameter bestimmt. Zum Beispiel legen in der **EN 1998-1 CEN** [1] die Bodenklassen A bis E die Parameter T_B , T_C und T_D fest; diese Parameter können nicht verändert werden.

RF-DYNAM Pro Eingabedaten

Antwortspektren-Bezeichnung: EN1998-1 CEN Horizontales Bemessungsspektrum

AS Nr.: 1

Allgemein

Definitionsart: Nach Norm: EN 1998-1:2010, Nationaler Anhang: CEN

Benutzerdefiniert

Generieren aus Beschleunigung: BS2 - Aus Bibliothek - Italien Erdbebei

Normparameter		Tabelle	
<input type="checkbox"/> Spektrum-Art			
Spektrum-Art		Bemessungsspektrum	1
Spektrum-Art		Spektrum-Art	1
Spektrumrichtung		Horizontales	ε
<input type="checkbox"/> Erdbebeneinwirkung			
Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung	a _{gR}	1.5000	[m/s ²]
Bedeutungsbeiwert	γ _I	1.2	
Bemessungs-Bodenbeschleunigung	a _g	1.8000	[m/s ²]
<input type="checkbox"/> Parameter zur Beschreibung des Antwortspektrums			
Baugrundklasse		C	
Bodenparameter	S	1.150	[-]
Die untere Grenze des Bereichs	T _{B-H}	0.2000	[s]
Die obere Grenze des Bereichs	T _{C-H}	0.6000	[s]
Der Wert, der den Beginn des Bereichs	T _{D-H}	2.0000	[s]
<input type="checkbox"/> Beiwerte			

Graph: Sa [m/s²] vs T [s]. Peak values: T: 0.2024 s; Sa: 3.4500 m/s²; T: 3.3965 s; Sa: 0.3600 m/s².

Bild 2.11: Maske *Antwortspektren* mit geöffnetem Register *Allgemein*. Antwortspektren *Nach Norm* ist ausgewählt, die *Normparameter* werden angezeigt.

Definitionsart

Nach Norm: EN 1998-1:2010, Nationaler Anhang: CEN

- AS 1170.4 Australien
- CFE Sismo 08 Mexiko
- CIRSOC 103 Argentinien
- DIN 4149-1:1981-04 Deutschland
- DIN 4149:2005-04 Deutschland
- DTR B C 2-48 Algerien
- DTR RPA99 Algerien
- EN 1998-1:2010 Europäische Union
- GB 50011 - 2001 China
- GB 50011 - 2010 China
- IBC 2000 USA
- IBC 2009 - ASCE/SEI 7-05 USA
- IBC 2012 - ASCE/SEI 7-10 USA
- IS 1893:2002 Indien
- NBC 2005 Kanada
- NCSE-02 Spanien
- NCh 433 1996 Chile
- NSR - 10 Kolumbien
- NTC 2008 Italien
- O.G. 23089 + O.G. 23390 Türkei
- SANS 10160-4 2010 Südafrika
- SBC 301:2007 Saudi Arabien
- SIA 261/1:2003 Schweiz
- SIA 261/1:2014 Schweiz
- ÖNORM B 4015:2007-02 Österreich

Bild 2.12: Liste der implementierten internationalen und europäischen Baunormen, die die Erdbebenbemessung von Strukturen festlegen und Formeln für Antwortspektren enthalten.



Wenn die Baugrundklasse auf *Anderer* gestellt wird, können die Parameter T_B , T_C und T_D für das Spektrum nach **EN 1998-1** [1] manuell angepasst werden.

Das daraus resultierende Antwortspektrum ist in der Grafik in **Bild 2.11** dargestellt. Mit dem Mauszeiger lassen sich Informationen zu den dargestellten Werten anzeigen. Die Werte der erzeugten Antwortspektren sind im Register *Tabelle* aufgeführt, wie in **Bild 2.13** dargestellt.

Nr.	Periode T [s]	Beschleunigung S_a [m/s ²]
1	0.000	1.380
2	0.050	1.897
3	0.100	2.415
4	0.150	2.933
5	0.200	3.450
6	0.250	3.450
7	0.300	3.450
8	0.350	3.450
9	0.400	3.450
10	0.450	3.450
11	0.500	3.450
12	0.550	3.450
13	0.600	3.450
14	0.650	3.185

Schritt: 0.05 [s]

Bild 2.13: Werte in Tabellenform des erzeugten Antwortspektrums.



Die Werte in Tabellenform können in *Excel* exportiert werden. Der Zeitschritt muss angepasst werden, bevor die Daten exportiert werden.

2.5.2 Benutzerdefinierte Antwortspektren

Jedes beliebige Antwortspektrum kann definiert werden, indem die Periode T und dazugehörige Beschleunigungen S_a in m/s² in der Tabelle, wie in [Bild 2.14](#) dargestellt, eingegeben werden.

Allgemein

Definitionstyp

Nach Norm: EN 1998-1:2010 Nationaler Anhang: CEN

Benutzerdefiniert

Generieren aus Beschleunigung: BS1

Nr.	Periode T [s]	Beschleunigung S_a [m/s ²]
1	0.010	0.300
2	0.050	1.000
3	0.100	2.000
4	0.500	2.000
5	10.000	0.300
6	20.000	0.300
7		

Kommentar

Bild 2.14: Benutzerdefinierte Eingabe eines Antwortspektrums. Periode T [s] und Beschleunigung S_a [m/s²] müssen angegeben werden.



Benutzerdefinierte Antwortspektren können in einer Bibliothek gespeichert werden und sind jederzeit verfügbar. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben.



Die benutzerdefinierten Antwortspektren können in *Excel* exportiert oder ein Antwortspektrum kann aus *Excel* importiert werden.

2.5.3 Aus Akzelerogrammen erzeugte Antwortspektren

Die Antwortspektren können automatisch aus einem bestehenden Akzelerogramm erzeugt werden.



Diese Option ist nur verfügbar, wenn *Beschleunigungen* im Register *Allgemein* ausgewählt sind, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt. Diese Option gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*.

Die vorhandenen Optionen, um Antwortspektren aus einer bestehenden Beschleunigung zu erzeugen, sind in [Bild 2.15](#) dargestellt.

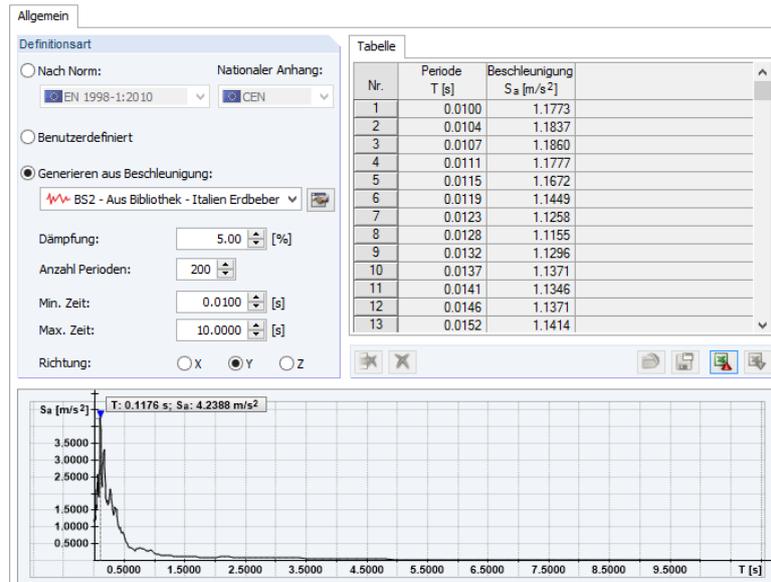


Bild 2.15: Erzeugtes Antwortspektrum aus einer bestehenden Beschleunigung. Das Antwortspektrum wird in der Grafik angezeigt und die Werte sind in der Tabelle angeführt.



Die Schaltfläche [Bearbeiten] öffnet das Register *Akzelerogramme* wie in [Abschnitt 2.6](#) beschrieben, in dem Beschleunigungs-Zeit-Digramme benutzerdefiniert festgelegt oder Akzelerogramme aus einer umfangreichen Bibliothek mit Erdbebenaufzeichnungen geladen werden können. Wenn Akzelerogramme bereits definiert wurden, kann aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt werden.

Sie können die links dargestellten Parameter anpassen. Das erzeugte Antwortspektrum ist in der Grafik unten dargestellt und die Werte der Periode T und der Beschleunigung S_a sind in der Tabelle aufgeführt (siehe [Bild 2.15](#)). Beides wird aktualisiert, sobald einer der Parameter geändert wird.

Die viskose Dämpfung d in % ist die Dämpfung der EMS-Gruppe, für die die maximalen Systemantworten berechnet werden. Die erzeugten Beschleunigungen sind umso kleiner je höher die viskose Dämpfung gesetzt ist.

Die Anzahl der Perioden bestimmt die Anzahl an Schritten zwischen der minimalen und der maximalen Zeit (Periode) und bestimmt damit die Anzahl an erzeugten Datenpunkten.

Die minimale Zeit ist die Periode des ersten EMS, der für die Berechnung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse werden in der ersten Spalte der Tabelle, wie in [Bild 2.15](#) dargestellt, angezeigt.

Die maximale Zeit ist die Periode des letzten EMS-Schwingers, der für die Berechnung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse werden in der letzten Spalte der Tabelle, wie in [Bild 2.15](#) dargestellt, angezeigt.

Die erzeugten Antwortspektren können in jede Richtung unterschiedlich sein, da die Akzelerogramme in jede Richtung verschieden sein können. Die dargestellten Antwortspektren können in der Grafik und in der Tabelle geändert werden, indem die auf der linken Seite gezeigten Optionsschaltflächen verwendet werden.



Die erzeugten Antwortspektren können in *Excel* exportiert werden

2.6 Akzelerogramme

Akzelerogramme sind Beschleunigungs-Zeit-Diagramme, die üblicherweise bei früheren Erdbeben aufgezeichnet wurden. In *RF-DYNAM Pro* können Akzelerogramme verwendet werden, um Antwortspektren zu erzeugen oder ein Zeitverlaufsverfahren durchzuführen. In beiden Fällen kann die Struktur an allen oder nur an einigen Lagern angeregt werden.

Das Register *Akzelerogramme* ist in [Bild 2.16](#) dargestellt.

Dämpfung: [%]

Anzahl Perioden:

Min. Zeit: [s]

Max. Zeit: [s]

Richtung: X Y Z

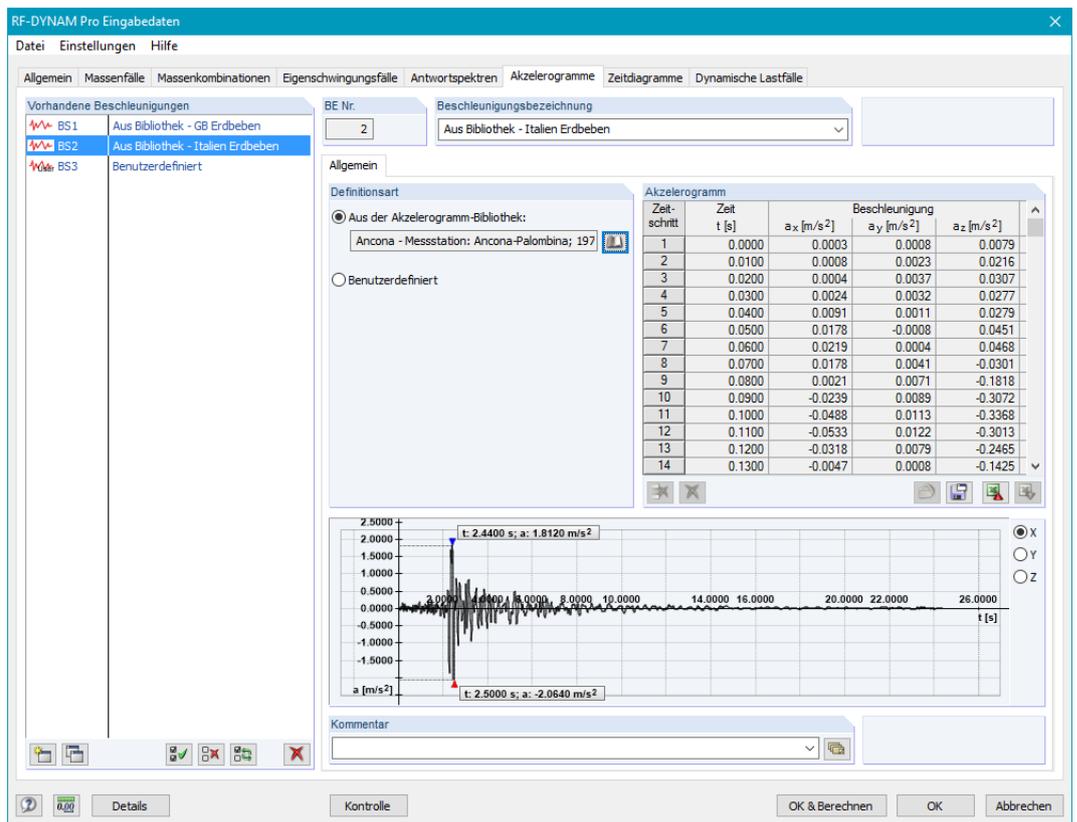


Bild 2.16: Maske Akzelerogramme mit geöffnetem Register *Allgemein*.



Das Register Akzelerogramme ist nur verfügbar, wenn *Beschleunigungen* im Register *Allgemein*, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört zu den Zusatzmodulen *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* und *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufverfahren*.

In *RF-DYNAM Pro* können Akzelerogramme aus einer Bibliothek geladen oder händisch eingegeben werden.

2.6.1 Bibliothek mit Erdbebenaufzeichnungen

In *RF-DYNAM Pro* steht eine Bibliothek zur Verfügung, die eine Vielzahl an vorhandenen und gemessenen Akzelerogrammen bietet. Aktuell gibt es mehr als 1018 Akzelerogramme, die in dieser Bibliothek gesammelt und gespeichert sind. Darüber hinaus können benutzerdefinierte Akzelerogramme dieser Bibliothek hinzugefügt werden.



Die Bibliothek kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden. Die Bibliothek ist in [Bild 2.17](#) dargestellt.

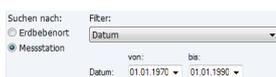
Die Akzelerogramme werden links in einer Baumstruktur dargestellt und können dort ausgewählt werden.

Es besteht die Möglichkeit, Einträge nach *Messstation* oder *Erdbebenort* zu ordnen. Mehr Filterkriterien können aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt werden. Zum Beispiel ist es möglich, die Akzelerogramme auf eine bestimmte Zeitspanne zu begrenzen.

Jedes Akzelerogramm verfügt über Parameter. Es sind zum Beispiel das Land, Längen- und Breitengrade sowie die Entfernung zum Epizentrum ersichtlich. Diese Daten werden auf der rechten Seite der Bibliothek, wie in [Bild 2.17](#) dargestellt, angezeigt.



Das gewählte Akzelerogramm wird in der Grafik am Ende der Maske, wie in [Bild 2.16](#) dargestellt, angezeigt. Die meisten Akzelerogramme unterscheiden sich in den drei Richtungen X, Y und Z. In der Grafik kann zwischen diesen Richtungen hin- und hergewechselt werden.



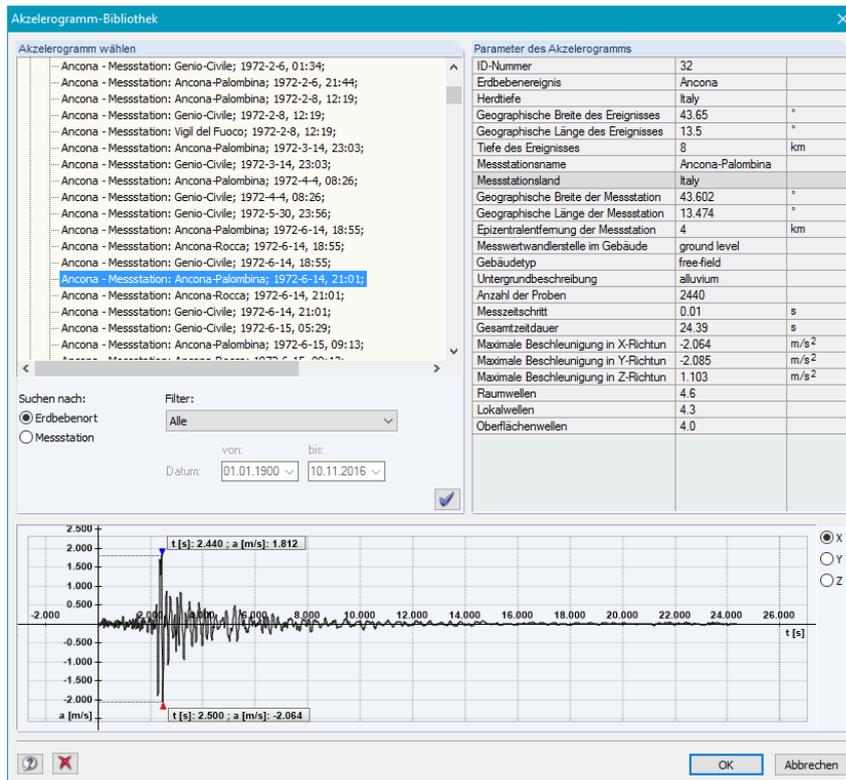


Bild 2.17: Bibliothek mit einer Vielzahl an Erdbebenaufzeichnungen.



Akzelerogramme, die aus der Bibliothek geladen werden, können unter einem anderen Dateinamen abgespeichert werden. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben. Alternativ können diese Akzelerogramme in Excel exportiert werden.

2.6.2 Benutzerdefinierte Beschleunigungs-Zeit-Diagramme

Jede Art von Beschleunigungs-Zeit-Diagramm kann festgelegt werden, indem die benötigten Werte in der Tabelle, dargestellt in **Bild 2.18**, eingetragen werden.

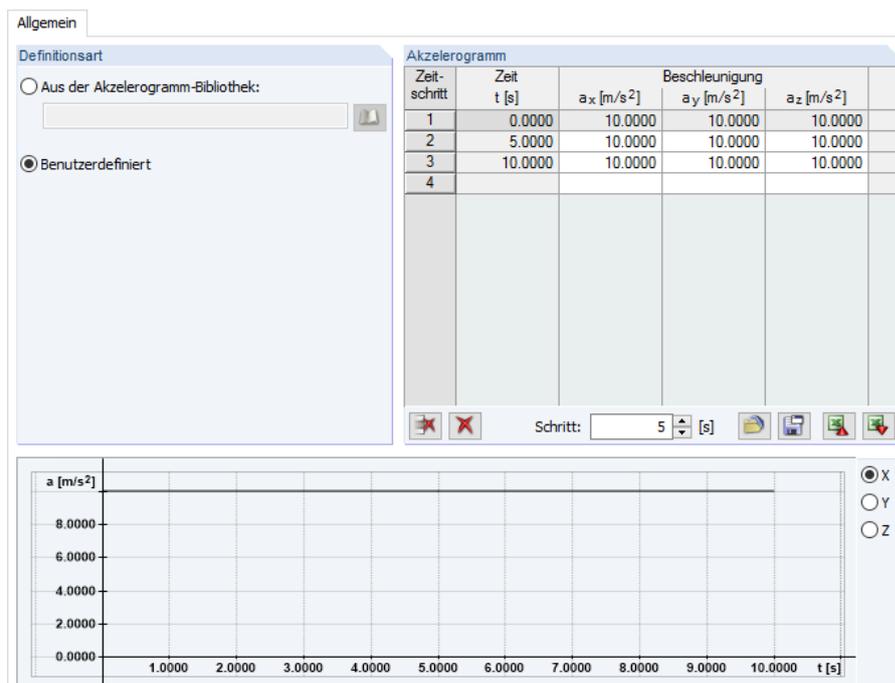


Bild 2.18: Benutzerdefinierte Eingabe eines Beschleunigungs-Zeit-Diagramms.



Benutzerdefinierte Akzelerogramme können in einer Bibliothek gespeichert werden und sind jederzeit verfügbar. Die Schaltfläche [Speichern] öffnet einen Dialog, um den Dateinamen einzugeben.



Die benutzerdefinierten Akzelerogramme können in *Excel* exportiert werden oder ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm kann aus *Excel* importiert werden.



Das definierte Akzelerogramm wird in der Grafik angezeigt (siehe [Bild 2.16](#)). In der Grafik kann zwischen der X, Y und Z-Richtung hin- und hergewechselt werden.

2.7 Zeitdiagramme

Zeitdiagramme können entweder transient, periodisch, oder direkt als Funktion definiert werden. Sie erregen die Struktur an einer bestimmten Position. Die Position der Last wird in statischen Lastfällen (*LFs*) festgelegt, hier kann nahezu jeder Lasttyp eingegeben werden. Die statischen Lastfälle (*LFs*) werden mit den Zeitdiagrammen (*ZDs*) verknüpft, dies geschieht in den *Dynamischen Lastfällen* (siehe [Abschnitt 2.10.2](#)). Der Multiplikator *k* wird verwendet, um die endgültige Größe der Erregerkraft zu bestimmen.



Das Register *Zeitdiagramme* ist nur verfügbar, wenn *Zeitdiagramme* im Register *Allgemein*, wie in [Bild 2.1](#) dargestellt, ausgewählt sind. Dieses Register gehört zu den Zusatzmodulen *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* und *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren*.

2.7.1 Transiente Zeitdiagramme

Das Register *Zeitdiagramme* ist in [Bild 2.19](#) mit einem Beispiel eines transienten Zeitdiagramms dargestellt. Die Werte werden in die Tabelle eingegeben und das daraus resultierende Zeitdiagramm wird in der Grafik am unteren Ende dargestellt. Für jeden Zeitschritt darf nur ein Wert für *k* existieren.

The screenshot shows the 'RF-DYNAM Pro Eingabedaten' dialog box with the 'Zeitdiagramme' tab selected. The 'Vorhandene Zeitdiagramme' list contains:

- ZD1 Dreieckslast
- ZD2 Periodische Last
- ZD3 Zufällige Erregung - Excel-Import
- ZD4 Funktion

The 'Allgemein' section is configured for a transient diagram:

- Typ: Transient
- Zeitdiagramm-Bezeichnung: Dreieckslast
- ZD Nr.: 1
- Zeitschritt: 1 (0.0000 s, k=0.000), 2 (0.5000 s, k=1.000), 3 (1.0000 s, k=0.000), 4
- Funktion: $k(t) = \text{SIN}(8.3204 * t + 1)$
- Schrittgröße: [] [s]
- Max t: [] [s]

The graph at the bottom shows a triangular pulse with a peak at $t = 0.5000$ s and $k = 1.000$. The x-axis is time t [s] from 0 to 1.0, and the y-axis is multiplier k [] from -0.100 to 1.000.

Bild 2.19: Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von transienten Zeitdiagrammen.



Die Tabelleneinträge können in einer Bibliothek gespeichert und jederzeit aufgerufen werden, ein Import und Export aus und in *Excel* ist möglich.

2.7.2 Periodische Erregung

Um periodische Funktionen einzugeben, müssen die Kreisfrequenz ω in rad/s, die Verschiebung φ in rad und der Multiplikator k in Tabellenform vorliegen; dies ist in **Bild 2.20** dargestellt.

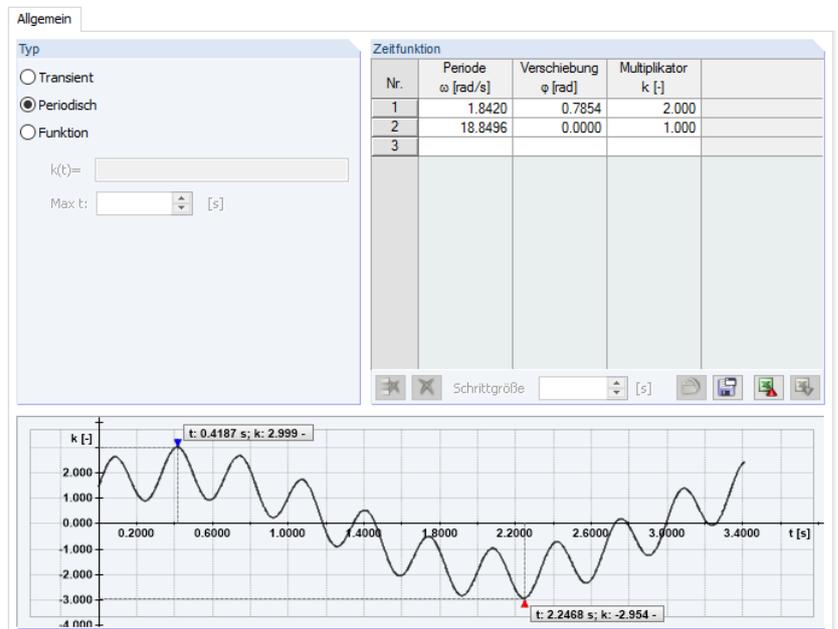


Bild 2.20: Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von periodischen Zeitdiagrammen.

Mehrere harmonische Funktionen können überlagert werden, indem mehrere Reihen in der Tabelle ausgefüllt werden. Die periodischen Funktionen sind folgendermaßen definiert:

$$f(t) = k_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) + k_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi_2) + \dots \quad (2.7)$$



Die bekannten Schaltflächen Öffnen, Speichern, Import und Export sind verfügbar.

2.7.3 Funktionen

Eine Funktion $k(t)$ kann direkt in einem Eingabefeld eingegeben werden, um das Zeitdiagramm zu definieren. Der Parameter t ist der Zeit vorbehalten. Das daraus resultierende Zeitdiagramm ist in der Grafik in **Bild 2.21** dargestellt. Die erzeugten Werte in Tabellenform werden auf der rechten Seite angezeigt.

Die maximale Zeit t_{\max} definiert die maximale Zeit für die Berechnung, das Zeitdiagramm $k(t) = 0$ für alle Zeitschritte $t > t_{\max}$. Die Schrittgröße wird für die Tabellenwerte und für die automatische Ermittlung der Zeitschritte für die Berechnung verwendet (siehe **Abschnitt 2.10.5**).



Alle Operatoren und Funktionen, die in RFEM verfügbar sind, können auch in *RF-DYNAM Pro* verwendet werden. Es können die Parameter verwendet werden, die im Hauptprogramm RFEM festgelegt wurden. Um die Umwandlung von Einheiten zu vermeiden, wird empfohlen dimensionslose Parameter in *RF-DYNAM Pro* zu verwenden. Weitere Informationen zur parametrisierbaren Eingabe stehen im **RFEM-Handbuch** in **Abschnitt 11.6**.



Die Werte in Tabellenform können in der Bibliothek gespeichert oder in *Excel* exportiert werden. Die Zeitschritte müssen angepasst werden, bevor die Daten exportiert werden.



Ein komplexes Beispiel, wie Zeitdiagramm-Funktionen verwendet werden können, wird im Webinar **Zeitverlaufsrechnung mit RF-/DYNAM Pro - Gehen und Laufen über eine Fußgängerbrücke** gezeigt.

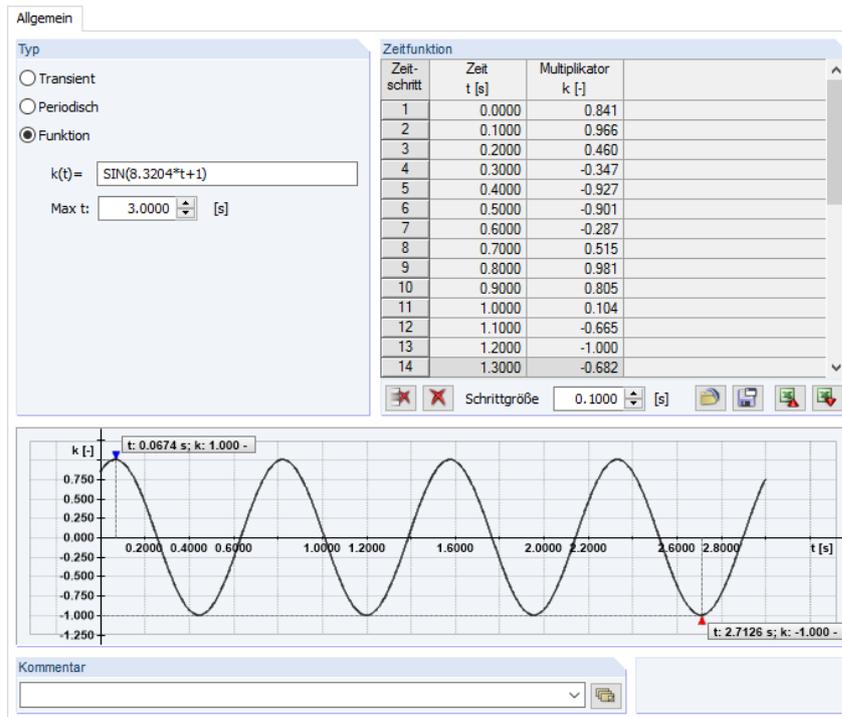


Bild 2.21: Maske *Zeitdiagramme* mit Anzeige der Eingabe von Funktionen als *Zeitdiagramme*. Der Parameter t ist der Zeit vorbehalten.

2.8 Dynamische Lastfälle

Die *Dynamischen Lastfälle* kombinieren die bisher getätigte Eingabe und definieren die Berechnungsparameter. Vier verschiedene Arten von *Dynamischen Lastfällen* sind verfügbar: Antwortspektrenverfahren, lineares und nichtlineares Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen, lineares und nichtlineares Zeitverlaufsverfahren von *Zeitdiagrammen* und das Verfahren mit statischen Ersatzlasten. Das Antwortspektrenverfahren und das lineare Zeitverlaufsverfahren sind Teile des Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*, das nichtlineare Zeitverlaufsverfahren gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren* und das Verfahren mit statischen Ersatzlasten zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Das Register *Allgemein* des Registers *Dynamische Lastfälle* ist in **Bild 2.22** dargestellt.

Die Optionen sind nur verfügbar, wenn das jeweilige Zusatzmodul im Register *Allgemein* von *RF-DYNAM Pro* ausgewählt wurde (siehe **Bild 2.1**).

- Lineare modale Analyse
- Lineare implizite Newmark-Analyse
- Nichtlineare implizite Newmark-Analyse
- Explizite Analyse

Für das lineare Zeitverlaufsverfahren sind zwei Verfahren verfügbar. Die lineare modale Analyse basiert auf einer modalen Zerlegung und setzt die Eigenschwingungsanalyse voraus und die implizite Newmark-Analyse ist ein direktes Verfahren, das keine Eigenwerte benötigt. Für die nichtlineare Zeitverlaufsanalyse sind ebenfalls zwei Verfahren verfügbar. Die implizite Newmark-Analyse und eine explizite Analyse. Mehr Informationen zu den Zeitverlaufsverfahren sind in den **Abschnitten 2.10.3** und **2.10.4** zu finden.

Eigenschwingung zuweisen
Eigenschwingungsfall:
ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten

Ein bestimmter *Eigenschwingungsfall* (in **Abschnitt 2.4** erläutert) muss dem *Dynamischen Lastfall (DLC)* für ein Antwortspektrenverfahren, eine Modalanalyse und ein Verfahren mit statischen Ersatzlasten zugeordnet werden.

Die *Dynamische Lastfallnummer* wird automatisch erzeugt und kann nicht verändert werden. Falls ein Fall später gelöscht wird, ändert sich die Nummerierung nicht. Es kann festgelegt werden, ob der spezifische *Dynamische Lastfall* berechnet wird, dies geschieht durch Auswählen oder Aufheben des Kontrollfeldes *Zu berechnen*. Diese Möglichkeit kann auch im Kontextmenü aufgerufen werden (Rechtsklick auf die bestehenden *DLCs*).

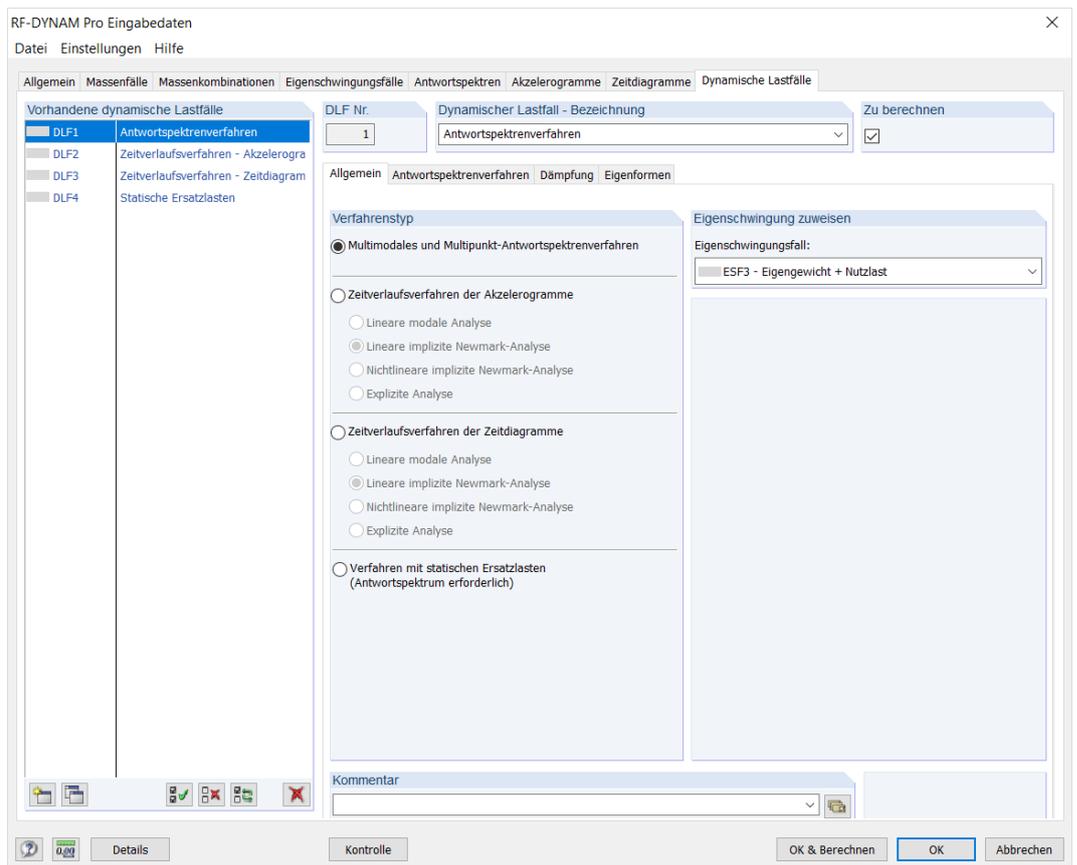
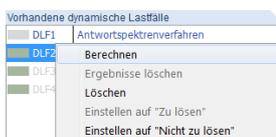


Bild 2.22: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Allgemein*.



Es kann jeder *Dynamische Lastfall* einzeln berechnet werden, indem das Kontextmenü verwendet und *Berechnen* ausgewählt wird. Die Farbe eines *DLF* wird grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse dieses *DLF* verfügbar sind und verändert sich zu grün, sobald die Berechnung abgeschlossen ist und Ergebnisse verfügbar sind, weitere Information finden Sie im [Abschnitt 3.3](#).

Lastfälle (*LFs*) und / oder Ergebniskombinationen (*EKs*) werden in jedem der *Dynamischen Lastfälle* generiert, wenn die Kontrollfelder im Abschnitt *Zu generieren* ausgewählt sind (im Register *Antwortspektrenverfahren* in [Bild 2.23](#), im Register *Zeitverlaufsverfahren* in [Bild 2.26](#) und [2.27](#) und im Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften* in [Bild 2.32](#)). Diese *LFs* und *EKs* werden automatisch generiert und überschrieben, wenn die Berechnung in *RF-DYNAM Pro* erneut durchgeführt wird. Die Bezeichnungen der *LFs* und *EKs* beziehen sich eindeutig auf die ursprünglichen *DLFs*. Die Nummer des ersten erzeugten *LF* / der ersten erzeugten *EK* kann eingegeben werden. In *RF-DYNAM Pro* werden keine bestehenden *LFs* oder *EKs* (statische oder aus anderen Modulen erzeugte) überschrieben, es wird die erste verfügbare, noch nicht verwendete *LF* / *EK*-Nummer ausgewählt. Lastfälle und Ergebniskombinationen aus *RF-DYNAM Pro* werden gelöscht, wenn die Ergebnisse aus den entsprechenden *Dynamischen Lastfällen* gelöscht werden. Es ist möglich den Export des *DLFs* zu aktivieren, wenn die Berechnung abgeschlossen ist, eine Neuberechnung ist hierdurch nicht notwendig.

In den folgenden Abschnitten wird das Antwortspektrenverfahren, das Zeitverlaufsverfahren und das Verfahren mit statischen Ersatzlasten genauer beschrieben.

2.9 Dynamischer Lastfall - Antwortspektrenverfahren

Ein multi-modales und multi-punkt Antwortspektrenverfahren wird durchgeführt, wenn die entsprechende Optionsschaltfläche in [Bild 2.22](#) ausgewählt ist; diese Option ist nur in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* verfügbar. Die Definition von Antwortspektren wurde in [Abschnitt 2.5](#) diskutiert. Eigenformen aus dem zugewiesenen *Eigenschwingungsfall*, können für die Berechnung

ausgewählt werden. Die *SRSS* und die *CQC-Regel* sind für Modalkombinationen verfügbar. Die Berechnung wird im Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt und ist komplett linear. Steifigkeitsänderungen, die in den *ESF* definiert wurden ([Abschnitt 2.4.7](#)), werden für die Analyse verwendet. Die endgültigen Ergebnisse des Antwortspektrenverfahrens werden zu den *Ergebniskombinationen* exportiert.

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Antwortspektrenverfahren durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Antwortspektrenverfahren*, *Dämpfung* und *Eigenformen*. Das Register *Antwortspektrenverfahren* ist in [Bild 2.23](#) dargestellt.

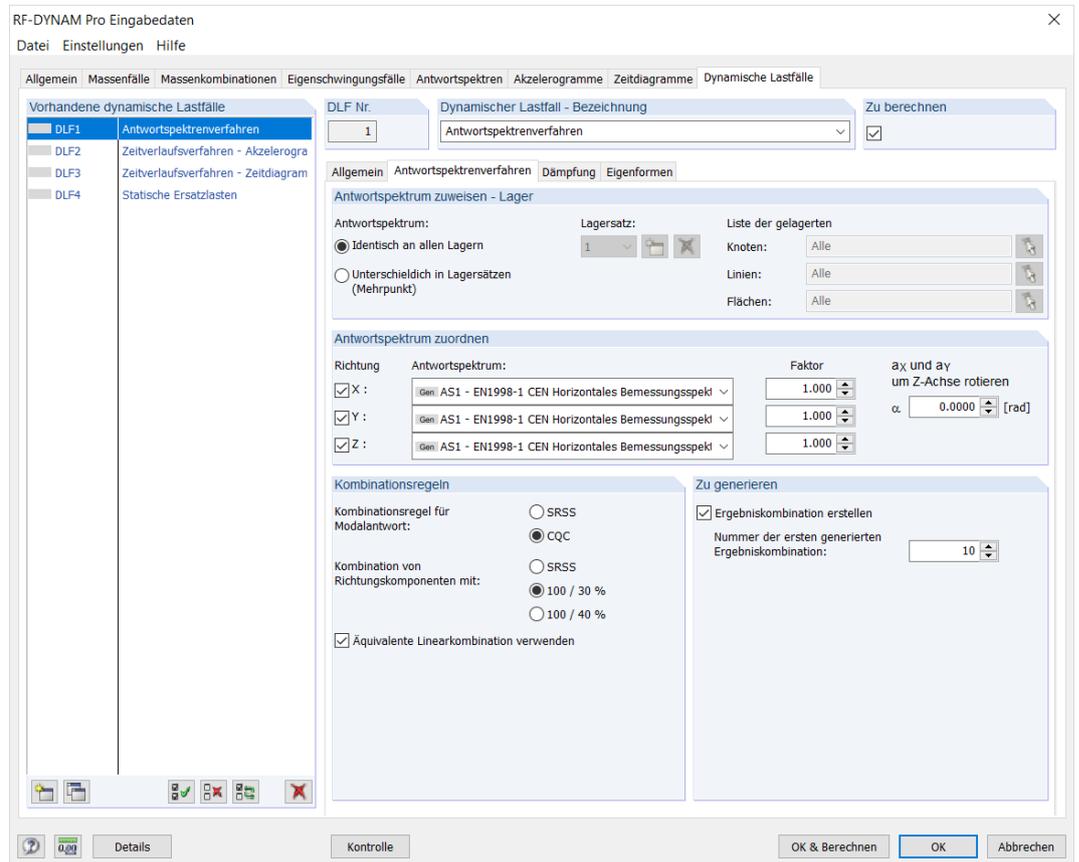


Bild 2.23: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Antwortspektrenverfahren*.

2.9.1 Auflager zuweisen

- Identisch an allen Lagern
- Unterschiedlich in Lagersätzen (Mehrpunkt)

Lagersatz:

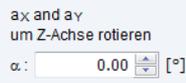
Die Auflager, die durch das Antwortspektrum in Erregung versetzt werden, müssen im *DLF* definiert werden. Entweder werden alle Lager mit den gleichen Antwortspektren angeregt, oder es werden mehrere Sets von Auflagern definiert, die dann unterschiedlich angeregt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Multi-Punkt Option.

Über die Schaltfläche [Neu] können mehrere Lagersätze angelegt werden. Mit Hilfe des Drop-Down-Menüs wird zwischen den einzelnen Lagersätzen hin- und hergeschaltet. Um einen bestimmten Lagersatz zu löschen, wird die Schaltfläche [Löschen] verwendet. Für jeden Auflagersatz muss eine Liste von gelagerten Knoten, Linien, oder Flächen definiert werden. Eine manuelle Eingabe ist möglich oder die Auswahl kann in der Grafik über die Schaltfläche erfolgen.

Zum Hintergrund der Multi-Punkt-Erregung sei der Leser auf die Literatur [\[8 und 10\]](#) hingewiesen.

2.9.2 Antwortspektrum zuweisen

In den einzelnen Anregungsrichtungen können unterschiedliche Antwortspektren wirken. Es muss mindestens eine Richtung ausgewählt sein. Die vorhandenen Antwortspektren werden aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt. Der Multiplikationsfaktor kann für jede Richtung frei gewählt werden.



Die Erregungsrichtung kann in der X-Y-Ebene um die Z-Achse rotieren. Wenn das Antwortspektrum beispielsweise die Struktur in der X-Y-Ebene in einem Winkel von 45 ° angreifen soll, wird nur die X-Richtung aktiviert und $\alpha = 45^\circ$ eingegeben.



Für jeden Lagersatz müssen die Antwortspektren in jede bestimmte Richtung einzeln aktiviert werden. Damit sind verschiedene Antwortspektren für jeden Lagersatz möglich.

2.9.3 Kombination der Modalantworten

In den Einstellungen wird festgelegt, wie Ergebnisse aus verschiedenen Eigenformen der Struktur kombiniert werden. Die Modalkombination ist der erste Schritt der dynamischen Kombinationen.



Die Modalantworten können mit der *Quadratsummenwurzel-Regel (SRSS)* oder der *Vollständigen quadratischen Kombinationsregel (CQC)* kombiniert werden. Beider dieser quadratischen Kombinationen können in der Standardform oder modifiziert als äquivalente Linearkombination angewendet werden.

Die Standardform der SRSS-Regel kombiniert maximale Ergebnisse und die Vorzeichen gehen verloren, die Kombinationsregel lautet wie folgt:

$$E_{SRSS} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_p^2} \quad (2.8)$$

Die kombinierten Ergebnisse E_{SRSS} resultieren von den modalen Antworten E_p aus p Eigenwerten der Struktur.

In *RF-DYNAM Pro* ist eine modifizierte Form der SRSS-Regel verfügbar, um zugehörige Ergebnisse wie zum Beispiel zugehörige Schnittgrößen zu ermitteln. Verglichen zur Standardform der SRSS-Regel, sind für gewöhnlich zugehörige Schnittgrößen deutlich kleiner und die zugehörigen Vorzeichen sind korrekt im Bezug auf die maßgebende Schnittgröße. Die SRSS-Regel wird als äquivalente Linearkombination [11] angewendet:

$$E_{SRSS} = \sum_{i=1}^p f_i \cdot E_i \quad \text{with} \quad f_i = \frac{E_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^p E_j^2}} \quad (2.9)$$

Wenn diese Formel angewendet wird, sind die Ergebnisse in sich konsistent.

Die SRSS-Regel ist nur für Strukturen erlaubt, bei denen benachbarte Eigenfrequenzen $T_i < T_j$ mehr als 10% abweichen, also wenn die folgende Aussage zutreffend ist:

$$\frac{T_i}{T_j} < 0,9 \quad (2.10)$$

In allen anderen Fällen muss die CQC-Regel angewendet werden. Die CQC-Regel ist folgendermaßen definiert:

$$E_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p E_i \varepsilon_{ij} E_j} \quad (2.11)$$

mit dem Korrelations-Koeffizienten ε

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot \sqrt{D_i D_j} (D_i + r D_j) r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 D_i D_j r (1 + r^2) + 4 (D_i^2 + D_j^2) r^2} \quad \text{mit} \quad r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (2.12)$$

Der Korrelations-Koeffizient ε vereinfacht sich, wenn der viskose Dämpfungswert D für alle Eigenformen gleich gewählt wird:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot D^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4D^2r(1+r)^2} \quad (2.13)$$

Die Dämpfungswerte D_i , die zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten ε_{ij} notwendig sind, werden im Register *Dämpfung* definiert. Diese Register erscheint sobald die CQC-Regel selektiert wird. Die notwendigen Einstellung für die Dämpfung wird weiter unten erläutert.

In Analogie zur SRSS-Regel kann auch die CQC-Regel als äquivalente Linearkombination ausgeführt werden [11]. Die Formel der modifizierten CQC-Regel unter Verwendung von ε_{ij} (Gleichung 2.12) lautet wie folgt:

$$E_{CQC} = \sum_{i=1}^p f_i \cdot E_i \quad \text{with} \quad f_i = \frac{\sum_{j=1}^p \varepsilon_{ij} E_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p E_i \varepsilon_{ij} E_j}} \quad (2.14)$$

Weitere Informationen und mathematische Herleitungen der Kombinationsregeln sind in [12–14] beigefügt.

2.9.4 Kombination der Richtungskomponenten

In den Einstellungen wird auch definiert, wie die Ergebnisse aus den verschiedenen Anregungsrichtungen kombiniert werden. Die Kombination der Richtungskomponenten ist der zweite Schritt der dynamischen Kombinationen.

- SRSS
- 100 / 30 %
- 100 / 40 %

Die Schnittgrößen aus verschiedenen Erregungsrichtungen können quadratisch mit der SRSS-Regel kombiniert werden oder mit Hilfe der 100% / 30% (40%)-Regel bekannt aus **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.5** [1]. Die SRSS-Regel, wie in Gleichung 2.8 definiert, wird angewendet mit $i = 1..p$ als die Erregungsrichtungen X, Y und Z. Die SRSS-Regel für die Kombination der Richtungen kann ebenso als äquivalente Linearkombination realisiert werden, dies ist in Gleichung 2.9 definiert.

2.9.5 Export von Ergebniskombinationen

Wenn *Ergebniskombinationen erstellen* ausgewählt wird, erzeugt *RF-DYNAM Pro* automatisch Ergebniskombinationen und überschreibt diese bei erneuter Berechnung. Die EKs sind eng mit dem Ergebnis verbunden, das heißt, dass sie gelöscht werden, sobald die Ergebnisse der DLFs gelöscht werden (siehe Abschnitt 3.3).



Eine EK wird für die SRSS-Regel erzeugt, und maximal drei EKs werden erzeugt, wenn die 100% / 30% (40%)-Regel ausgewählt wird.

Mehr Informationen über die exportierten *Ergebniskombinationen* finden Sie im Abschnitt 4.2.

2.9.6 Dämpfung für die CQC - Regel



Das Register *Dämpfung* ist nur verfügbar, wenn die CQC-Regel für die Kombination von Eigenformen (definiert in Gleichungen 2.11 und 2.12) ausgewählt ist.

Für die CQC-Regel werden die Lehrschen Dämpfungswerte D_i benötigt, die gleich oder unterschiedlich für jede Form der Struktur definiert sein können. Auch die Rayleigh-Dämpfung mit den Koeffizienten α und β steht zur Verfügung und wird intern zur Lehrschen Dämpfung konvertiert. Das Register *Dämpfung* ist in Bild 2.24 dargestellt.

Bild 2.24: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Dämpfung*.



Für die Umrechnung von Rayleigh Koeffizienten α und β in Lehr'sche Dämpfungswerte D_i wird auf [Abschnitt 2.10.9](#) verwiesen.

2.9.7 Wahl der Eigenform

Im Register *Eigenformen*, dargestellt in [Bild 2.25](#), sind die Eigenfrequenzen ω und f sowie die Perioden T zusammen mit den entsprechenden Beschleunigungen S_a des Antwortspektrums und den effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} in die einzelnen Richtungen aufgelistet. Das zugewiesene Antwortspektrum ist in der Grafik dargestellt. Die zugehörigen Werte werden in Rot dargestellt, wenn eine Zeile in der Tabelle ausgewählt wird, so wie in [Bild 2.25](#) dargestellt.

Form Nr.	Zu generieren	Frequenz ω [rad/s]	Frequenz f [Hz]	Periode T [s]	Beschleunigung S_a [m/s ²]	Effektiver Modalmassenfaktor f_{meX} [kg]	f_{meY} [kg]	f_{meZ} [kg]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	6.986	1.112	0.899	2.3014	0.000	0.265	0.000
2	<input checked="" type="checkbox"/>	7.241	1.152	0.868	2.3855	0.000	0.645	0.000
3	<input checked="" type="checkbox"/>	9.546	1.519	0.658	3.1449	0.000	0.056	0.000
4	<input type="checkbox"/>	14.258	2.269	0.441	3.4500	0.000	0.019	0.000
5	<input type="checkbox"/>	18.278	2.909	0.344	3.4500	0.000	0.001	0.000
6	<input checked="" type="checkbox"/>	30.571	4.866	0.206	3.4500	0.919	0.000	0.000
7	<input type="checkbox"/>	30.853	4.910	0.204	3.4500	0.001	0.007	0.000
8	<input type="checkbox"/>	35.485	5.648	0.177	3.2126	0.000	0.004	0.000
9	<input type="checkbox"/>	39.974	6.362	0.157	3.0068	0.000	0.000	0.000
10	<input checked="" type="checkbox"/>	42.393	6.747	0.148	2.9140	0.001	0.000	0.064
11	<input type="checkbox"/>	42.888	6.826	0.147	2.8963	0.000	0.001	0.001
12	<input type="checkbox"/>	48.969	7.794	0.128	2.7080	0.000	0.002	0.000
13	<input type="checkbox"/>	52.065	8.286	0.121	2.6290	0.000	0.000	0.000
14	<input type="checkbox"/>	59.649	9.493	0.105	2.4702	0.000	0.000	0.026

Meff, i / ΣM : 0.992 0.966 0.820

Meff, i / ΣM < 0.030

Bild 2.25: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Eigenformen*. Die dritte Eigenform ist in der Tabelle ausgewählt und in der Grafik rot dargestellt.

Eigenformen berechnen

Wenn die Ergebnisse des zugewiesenen *Eigenschwingungsfall*es noch nicht vorhanden sind, kann die Schaltfläche [Eigenformen berechnen] verwendet werden um intern die Frequenzen zu berechnen, ohne das Modul zu schließen.

In der Tabelle können Formen ausgewählt werden, die für das Antwortspektrumverfahren verwendet werden sollen.

Alle selektieren
 Auswahl der Formen aufheben mit
 Meff, i / $\Sigma M <$

Alle Formen werden ausgewählt, wenn das Kontrollfeld *Alle selektieren* aktiviert ist. In der Tabelle sind alle Formen ausgewählt. Eine manuelle Änderung ist nicht möglich. Mit dem Kontrollfeld *Auswahl der Formen aufheben mit* ist es möglich, die Eigenwerte mit einem effektiven Modalmassenfaktor unterhalb eines gewissen Wertes zu deaktivieren. Wenn beide Kontrollfelder deaktiviert sind, können die Eigenwerte manuell ausgewählt werden.



Die Summe der effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} wird am unteren Ende der Tabelle angezeigt. In Übereinstimmung mit **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.3 [1]** müssen die effektiven Modalmassenfaktoren aller Eigenformen, die berücksichtigt werden, mindestens 90% betragen. Wenn das nicht erreicht werden kann, sind alle Eigenformen mit einem Faktor über 5% zu berücksichtigen. Weitere Informationen zu den effektiven Modalmassenfaktoren und wie diese berechnet werden finden Sie in [Abschnitt 4.1](#).

X
 Y
 Z



Die verschiedenen Erregungsrichtungen X, Y und Z können in der Grafik aktiviert werden. Auch die Werte S_a in der Tabelle werden aufgrund dieser Auswahl aktualisiert.

Die Werte S_a in der Tabelle und der Grafik berücksichtigen die Faktoren, die auf die einzelnen Anregungsrichtung angewendet wurden (siehe Register *Antwortspektrenverfahren* in [Bild 2.23](#)). Zu berücksichtigen ist, dass wenn das zugewiesene Antwortspektrum um einen Winkel α rotiert ist, dann sind die Richtungen X und Y, hier im Register *Eigenformen*, lokale Richtungen.



Wenn die Multi-Punkt Option verwendet wird und mehrere Lagersätze im Register *Antwortspektrenverfahren* (siehe [Bild 2.23](#)) definiert wurden, ändern sich die Werte S_a in der Tabelle und der Grafik im Register *Eigenformen*, je nach Auswahl des Lagersatzes im Drop-Down Menü.

2.10 Dynamischer Lastfall - Zeitverlaufsverfahren

Das Zeitverlaufsverfahren wird durchgeführt, wenn entweder *Zeitverlaufsverfahren der Akzelerogramme* oder *Zeitverlaufsverfahren der Zeitdiagramme* in [Bild 2.22](#) ausgewählt wurde. Die Erregungen und die Ergebnisse des Zeitverlaufsverfahren sind beides Daten getrennt für jeden Zeitschritt.

Die zugehörigen Unterregister für das Zeitverlaufsverfahren sind *Allgemein*, *Zeitverlaufsverfahren*, *Berechnungsparameter* und *Dämpfung*. Das *Zeitverlaufsverfahren*-Register wird in den [Bildern 2.26](#) und [2.27](#) dargestellt. Erkennbar sind Unterschiede in der Benutzeroberfläche abhängig von der gewählten Erregung. Akzelerogramme erregen die Struktur an den Auflagern. Das Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen wird in [Abschnitt 2.10.1](#) diskutiert. Zeitdiagramme können die Struktur überall anregen, der Lasttyp und der Ort der Erregung wird in *Lastfälle* in *RFEM* definiert. Das Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen wird in [Abschnitt 2.10.2](#) erläutert.

Das Zeitverlaufsverfahren kann mit dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* linear durchgeführt werden, dabei werden geometrische und konstruktive Nichtlinearitäten nicht berücksichtigt. Es sind zwei lineare Löser verfügbar, zum einen die *lineare modale Analyse* und zum anderen die *lineare implizite Newmark-Analyse*, diese werden in [Abschnitt 2.10.3](#) beschrieben.

Das nichtlineare Zeitverlaufsverfahren ist mit dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren* erhältlich. Eine große Dehnungsverformungsanalyse wird unter Berücksichtigung von den definierten Nichtlinearitäten durchgeführt. Es sind zwei nichtlineare Löser verfügbar, zum einen die *nichtlineare implizite Newmark-Analyse* und zum anderen die *explizite Analyse*, beschrieben in [Abschnitt 2.10.4](#).

Die Zeitschritte für die Analyse werden in [Abschnitt 2.10.5](#) diskutiert. Die Einstellungen der Massenmatrix werden im [Abschnitt 2.10.8](#) beschrieben und die Optionen der strukturellen Dämpfung in [Abschnitt 2.10.9](#).

2.10.1 Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen

Das Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen wird genutzt um die Struktur für das Ereignis eines Erdbebens zu planen. Akzelerogramme erregen die Struktur an ihren Auflagern.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (2.15)$$

in der \mathbf{M} die Massenmatrix, \mathbf{D} die Dämpfungsmatrix und \mathbf{K} die statische Steifigkeitsmatrix ist. Die zeitabhängigen Vektoren \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$ und $\ddot{\mathbf{u}}$ sind absolute Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. $\ddot{\mathbf{u}}_g$ ist die Grundbeschleunigung, die in den unterschiedlichen Richtungen anders sein kann.

Die Definition von Akzelerogrammen wurde bereits in [Abschnitt 2.6](#) diskutiert. In *RF-DYNAM Pro* können alle Lager mit dem gleichen Akzelerogramm gleichzeitig erregt werden. Die Mehrpunkt-Option erlaubt einzelne Lagersätze mit unterschiedlichen Akzelerogrammen zu erregen (nur verfügbar für lineare Analysen). Das *Zeitverlaufsverfahren*-Register ist in [Bild 2.26](#) dargestellt.

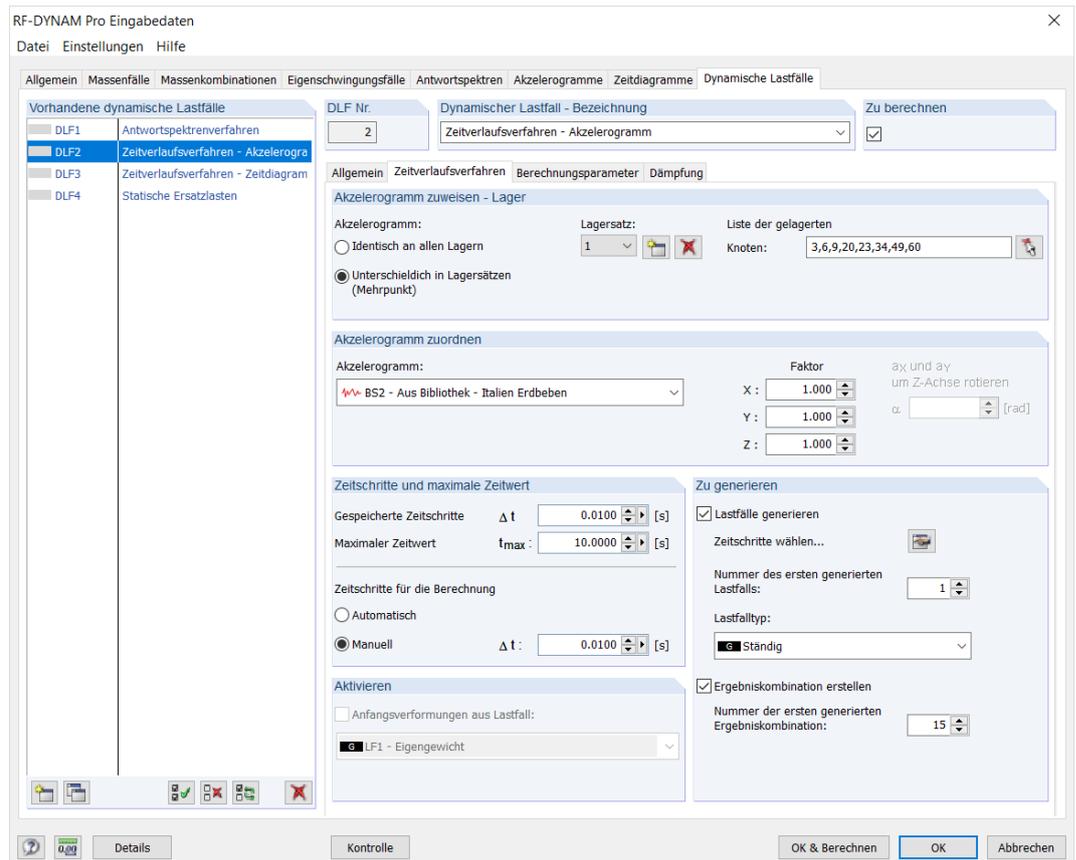


Bild 2.26: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Zeitverlaufsverfahren (Akzelerogramme)*.

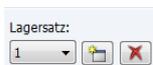


Wenn Nichtlinearitäten eine Rolle im Modell spielen, sollte das Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen im Vergleich zu einem Antwortspektrenverfahren favorisiert werden.

Auflager zuweisen

- Identisch an allen Lagern
- Unterschiedlich in Lagersätzen (Mehrpunkt)

Die Auflager, die durch das Akzelerogramm angeregt werden, müssen definiert werden. Wenn alle Lager identisch angeregt werden sollen, können diese Lager Knoten-, Linien- oder Flächenlager sein. Die Multi-Punkt-Option steht im Moment nur für Knotenlager zur Verfügung. Auflager mit einer elastischen Federkonstante können bei einem Zeitverlaufsverfahren von Akzelerogrammen im Moment nicht berücksichtigt werden. Die Multi-Punkt-Option ist nur für ein lineares Zeitverlaufsverfahren verfügbar.

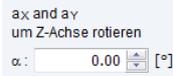


Über die Schaltfläche [Neu] können mehrere Lagersätze angelegt werden. Unter Verwendung des Drop-Down-Menüs kann zwischen den vorhandenen Sätzen hin- und hergewechselt werden. Um einen bestimmten Lagersatz zu löschen, wird die Schaltfläche [Löschen] verwendet. Für jeden Lagersatz muss eine Liste an gelagerten Knoten vorhanden sein. Die Eingabe kann manuell erfolgen oder grafisch über die Pick-Funktion erfolgen.

Zum Hintergrund der Multi-Punkt-Erregung sei der Leser auf die Literatur [8 und 10] hingewiesen.

Akzelerogramm zuweisen

Die verfügbaren Akzelerogramme werden aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt. Es können verschiedene Multiplikationsfaktoren in jede Richtung angewendet werden.



Die Erregungsrichtung kann in der X-Y-Ebene um die Z-Achse rotieren. Wenn das Akzelerogramm beispielsweise in der X-Y-Ebene in einem Winkel von 45° wirken soll, wird nur die X-Richtung und $\alpha = 45^\circ$ eingegeben.



Für jeden Lagersatz kann ein anderes Akzelerogramm zugewiesen werden.

2.10.2 Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen

Mit einem Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen kann jeder Punkt des Systems in jede Richtung erregt werden.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2.16)$$

in der \mathbf{M} die Massenmatrix, \mathbf{D} die Dämpfungsmatrix und \mathbf{K} die statische Steifigkeitsmatrix ist. Die zeitabhängigen Vektoren \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$ und $\ddot{\mathbf{u}}$ sind absolute Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. $\mathbf{p}(t)$ ist die externe Erregung. Die Definition von Zeitdiagrammen wurde bereits in [Abschnitt 2.7](#) diskutiert. In den *Dynamischen Lastfällen* werden diese Zeitdiagramme mit den *Lastfällen* kombiniert, um den Typ, den Ort und die Richtung der Erregung zu bestimmen. Das *Zeitverlaufsverfahren*-Register ist in [Bild 2.27](#) dargestellt.

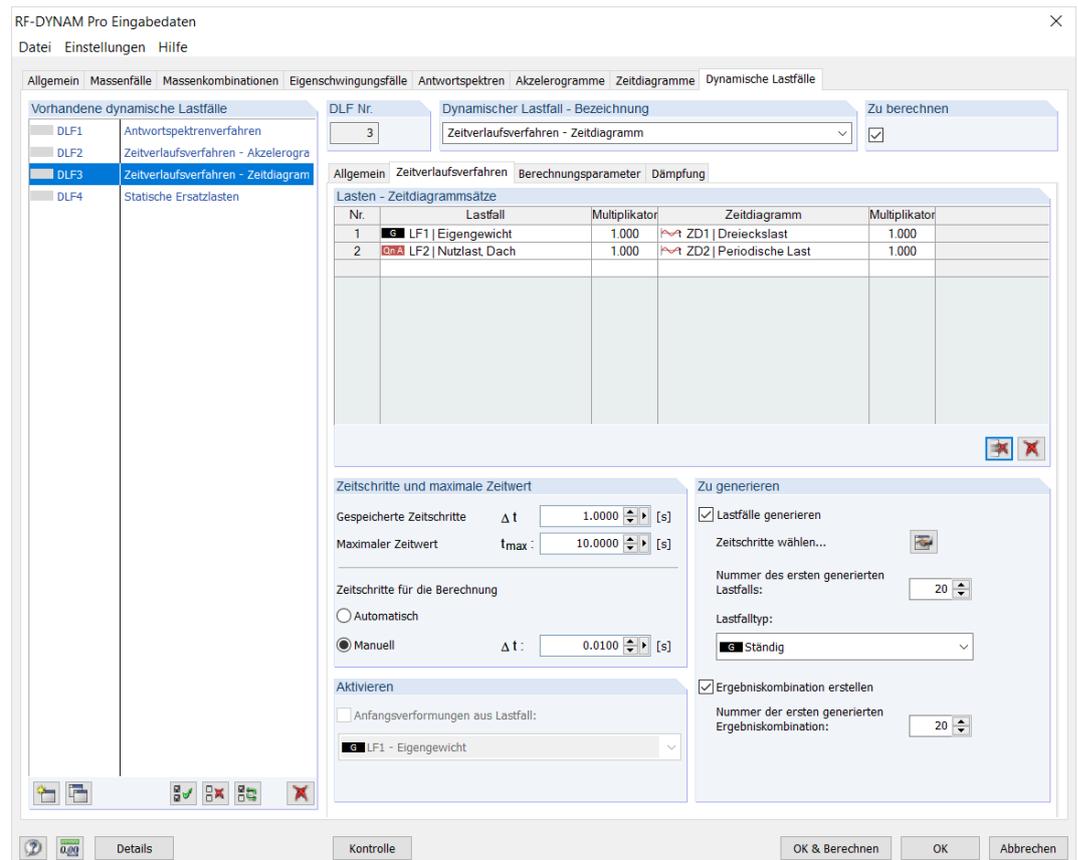


Bild 2.27: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Zeitverlaufsverfahren (Zeitdiagramme)*.

Lasten - Zeitdiagrammsätze

Lastfälle, welche im Hauptprogramm *RFEM* definiert wurden, werden mit *Zeitdiagrammen* (siehe [Abschnitt 2.7](#)) zu *Lasten - Zeitdiagrammsätze* kombiniert. In der Tabelle wird ein Lastfall und ein Zeitdiagramm gewählt, um die Erregung der Struktur zu definieren. Man kann Faktoren für den Lastfall und das Zeitdiagramm festlegen.



Statische Lastfälle sind zwingend erforderlich, wenn ein Zeitverlaufsverfahren von Zeitdiagrammen durchgeführt werden soll. Die statischen Lastfälle definieren die Größe, die Richtung und die Position der Erregung. Knoten-, Linien-, Flächen-, freie oder generierte Lasten können mit zeitveränderlichen Funktionen kombiniert werden.

Man kann viele von diesen *Lasten - Zeitdiagrammsätzen* kombinieren, indem man mehrere Reihen in der Tabelle ausfüllt, wie in [Bild 2.27](#) gezeigt. Dies ist wichtig um eine zeitveränderliche Erregung zu simulieren, welche ebenfalls ihre Position verändert, z. B. das Laufen von Fußgängern über eine Brücke, wie es im Webinar [Zeitverlaufsrechnung mit RF-/DYNAM Pro - Gehen und Laufen über eine Fußgängerbrücke](#) demonstriert wurde.

2.10.3 Lineare Löser: Modalanalyse versus implizit Newmark

- Lineare modale Analyse
- Lineare implizite Newmark-Analyse

Im Register *Allgemein* (siehe [Bild 2.22](#)) kann zwischen zwei linearen Zeitverlaufsverfahren gewählt werden, der *linearen Modalanalyse* und der *linearen impliziter Newmark-Analyse*. Die lineare Analyse ist geometrisch linear (kleine Verformungen) und ignoriert oder ersetzt alle definierten Nichtlinearitäten im Modell, z. B. werden Seile durch Fachwerkträger ersetzt und der Ausfall eines Lagers wird ignoriert. Die linearen Analysen gehören zu dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*.

Die **Modalanalyse** verwendet ein entkoppeltes System, das auf den Eigenwerten und Eigenformen der Struktur basiert und im zugewiesenen *Eigenschwingungsfall* bestimmt wird. Das Mehrfreiheitsgradsystem (MDOF) wird in viele Einfreiheitsgradsysteme (SDOF) zerlegt (diagonalisierte Massen- und Steifigkeitsmatrix). Eine gewisse Anzahl an Eigenwerten wird benötigt, um Genauigkeit zu gewährleisten. Die Lösung des entkoppelten Systems wird mit einem impliziten (*Newmark*) Solver gefunden. Die Einstellungen der Massenmatrix und die Steifigkeitsänderungen werden vom zugewiesenen *ESF* übernommen. Anfangsverformungen können hinzugefügt werden. Sobald die Eigenwerte bestimmt sind, ist die *Modalanalyse*, die in *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* zur Verfügung steht, etwas schneller als die *lineare implizite Newmark-Analyse*.

Die **lineare implizite Newmark-Analyse** ist ein direktes Zeitintegrationsschema, welches genügend kleine Zeitschritte benötigt, um exakte Ergebnisse zu erzielen. Es ist keine Eigenschwingungsanalyse erforderlich. Einstellungen für die Massenmatrix werden in den *Berechnungsparametern* der *DLF* definiert. Steifigkeitsänderungen und Anfangsverformungen sind bei diesem Verfahren nicht verfügbar. Für mehr theoretischen Hintergrund wird zum Beispiel [10] empfohlen. Die Wahl der Zeitschritte wird in [Abschnitt 2.10.5](#) diskutiert.

Für das direkte Zeitverlaufsverfahren ist ein Dämpfungselement verfügbar. Dieser Stabtyp ist in *RFEM* erhältlich, man kann einen Koeffizient der viskosen Dämpfung c sowie eine axiale Steifigkeitskonstante (Federelement) definieren, welches sich dann parallel verhält (Kelvin-Voigt-Modell).

2.10.4 Nichtlineare Löser: Implizit Newmark versus Explizit

- Nichtlineare implizite Newmark-Analyse
- Explizite Analyse

Im Register *Allgemein* (siehe [Bild 2.22](#)) kann zwischen zwei nichtlinearen Zeitverlaufsverfahren gewählt werden, der *nichtlinearen impliziten Newmark-Analyse* und der *expliziten Analyse*. Beide nichtlinearen Verfahren führen eine große Dehnungsverformungsanalyse aus und berücksichtigen alle Nichtlinearitäten, die im Hauptprogramm *RFEM* verfügbar sind. Die nichtlinearen Verfahren gehören zu dem Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren*.

Das *explizite Verfahren* nutzt die Methode der zentralen Differenzen und eignet sich für kurze Erregungsdauern und sich schnell ändernde Nichtlinearitäten in der Struktur. Die Methode ist

eindeutig, weil unbekannte Werte nur auf der Zeit i basieren und nicht auf der unbekanntem Antwort zu der Zeit $i + 1$. Die explizite Integrationsregel arbeitet gut in Kombination mit einer diagonalen Massenmatrix und mit der Beschränkung der Dämpfungsmatrix $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M}$. Die Methode ist bedingt stabil, eine begrenzte Lösung wird nur erreicht, wenn das Zeitinkrement Δt weniger ist als das stabile Zeitinkrement Δt_{stable} . Das Stabilitätslimit kann in Form von dem höchsten Eigenwert im Modell ω_{max} definiert werden und der Anteil der kritischen Dämpfung D in der höchsten Form.

$$\Delta t_{stable} \leq \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1 + D^2} - D) \quad (2.17)$$

In Wirklichkeit wird das stabile Zeitinkrement abgeschätzt durch

$$\Delta t_{stable} = \frac{L^e}{c_d} \quad (2.18)$$

mit der Finite-Elemente-Länge L^e und der Dehnungswellengeschwindigkeit c_d , die für das linear elastische Material (mit dem Poisson-Verhältnis gleich null) gleich

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.19)$$

ist, mit E als Elastizitätsmodul und ρ als Materialdichte. Diese Schätzung erlaubt kleinere Zeitschritte als das Stabilitätslimit in [Gleichung 2.17](#). Es sei ebenfalls zu beachten, dass viele Effekte nicht in der Zeitschrittschätzung einbegriffen sind und aufgrund der Genauigkeit ein kleinerer Zeitschritt Δt erforderlich sein kann. *RFEM* nutzt eine festgelegte Zeitschrittweite, wobei die festgelegten Zeitschritte die anfänglichen stabilen Zeitinkremente oder ein benutzerdefinierter Wert sein können.

Implizite Schemen lösen unbekannte Werte zu der Zeit $i + 1$ bezogen auf die Werte der Zeit i und $i + 1$, demnach müssen nichtlineare Gleichungen gelöst werden und Iterations- und Konvergenzkontrollen sind erforderlich. Die *implizite Newmark-Analyse* ist bedingungslos stabil, es gibt keine obere Stabilitätsgrenze im Zeitschritt Δt . Dennoch ist ein angemessen kleines Zeitinkrement erforderlich um exakte Ergebnisse zu erzielen. Der Zeitschritt ist von der Erregung, der Frequenz der Struktur und der Komplexität der Nichtlinearitäten der Struktur abhängig. Das implizite Verfahren benötigt Zeitschritte, welche üblicherweise eine oder zwei Ordnungen größer sind als das Stabilitätslimit von einfachen expliziten Schemen' [15]. Es gibt keine Einschränkungen bezüglich der Massenmatrix und der Rayleigh-Dämpfung, wenn die *implizite Newmark-Analyse* genutzt wird.

Die Wahl zwischen den beiden nichtlinearen Verfahren hängt hauptsächlich von den geforderten Zeitschritten ab, aber auch vom Typ der Erregung. Für beide Verfahren muss eine Zeitschritt-Konvergenzstudie durchgeführt werden. Für mehr theoretischen Hintergrund siehe [10 und 15–17].

Für beide nichtlinearen Verfahren ist ein Dämpfungselement vorhanden. Dieser Stabtyp ist in *RFEM* verfügbar, man kann einen Koeffizient der viskosen Dämpfung c sowie eine axiale Steifigkeitskonstante (Federelement) definieren, welches sich dann parallel verhält (Kelvin-Voigt-Modell). Die Feder kann mit Schlupf definiert werden und / oder als Diagramm, diese nichtlinearen Elemente des *Dämpfers* sind nur mit den nichtlinearen Verfahren verfügbar.

2.10.5 Zeitschritte und maximale Zeitwerte



Es müssen solche Zeitschritte definiert werden, die gespeichert werden und solche, die die maximale Zeit des Zeitverlaufsverfahrens bestimmen. Ergebnisse sind nur für die Zeitschritte, die gespeichert werden verfügbar und ebenfalls die dynamische Umhüllende wird durch diese gespeicherten Zeitschritte gebildet.

Das Speichern von weniger Zeitschritten reduziert die Dateigröße, reduziert die Berechnungszeit und verbessert die Leistung der Nachbearbeitung. Dennoch wird eine gewisse Menge der Ergebniswerte benötigt um zu vermeiden, dass das Maximum übersprungen wird, und um sicherzustellen, dass eine gleichmäßige Kurve im *Zeitverlaufsdiagramm* entsteht (siehe [Abschnitt 4.3](#)).



Unabhängig von den Zeitschritten, welche letztlich gespeichert werden, müssen zusätzlich Zeitschritte definiert werden, die für die Berechnungen genutzt werden. Eine angemessene Wahl der Zeitschritte ist essenziell für ein erfolgreiches Zeitverlaufsverfahren. Es ist ein Kompromiss zwischen Berechnungszeit und Genauigkeit. Eine höchst nichtlineare Berechnung benötigt deutlich kleinere Zeitschritte als eine lineare Analyse. Für das explizite Verfahren existiert ein stabiles Zeitinkrement um eine Lösung zu erhalten.

Für das lineare Zeitverlaufsverfahren kann folgender Ratschlag gegeben werden [18]:

- Unter Berücksichtigung des Akzelerogramms (siehe [Abschnitt 2.6](#)) und der transienten Zeitdiagramme (siehe [Abschnitt 2.7](#)), sollte die kürzeste Länge des verwendeten diskreten Akzelerogramms mindestens in 7 Zeitschritte unterteilt werden.
- Die größte Frequenz f der Struktur (siehe [Abschnitt 4.1](#)), die für die Systemantwort von Bedeutung ist, sollte für die Berechnung des Zeitschritts verwendet werden, $\Delta t \leq 1 / (20f)$. Analog dazu sollte die höchste Frequenz der Erregung (siehe [Abschnitt 2.7](#)) mit $\Delta t \leq \pi / (10\omega)$ korrigiert werden.

Die Zeitschritte für die Berechnung können manuell definiert werden oder *RF-DYNAM Pro* bestimmt diese automatisch.

Für die *modale Analyse* und die lineare und nichtlineare *implizite Newmark-Analyse*, wählt *RF-DYNAM Pro* die Zeitschritte automatisch entsprechend der zugewiesenen Erregung. Für Akzelerogramme, transiente und Funktionen-Zeitdiagramme wird der automatische Zeitschritt bestimmt, indem der Zeitschritt zwischen den Datenpunkten genutzt wird, $\Delta t = \text{Min}\{t_{i+1} - t_i\} / 7$. Für periodische Zeitdiagramme werden die automatischen Zeitschritte mit $\Delta t = \pi / (10 \cdot \omega)$ bestimmt und die größten Erregungsfrequenzen genutzt. Erwähnenswert ist, dass die automatisch bestimmten Zeitschritte nur in Übereinstimmung mit der Erregung sind. Andere Werte, wie die Frequenz der Struktur und Nichtlinearitäten werden nicht mit einbezogen, beeinflussen jedoch den geforderten Zeitschritt. Im Falle einer impliziten Analyse wird empfohlen die Zeitschritte für die Berechnung manuell zu definieren.

Die *explizite Analyse* bestimmt das automatische Zeitinkrement in Übereinstimmung mit dem Stabilitätslimit, wie es in den [Gleichungen 2.17](#) und [2.18](#) diskutiert wurde. Normalerweise ist dieser Zeitschritt ausreichend, auch in Fragen der Genauigkeit. Trotzdem sind Effekte wie z. B. eine schnelle Änderungen der Steifigkeit nicht berücksichtigt in der Zeitschrittschätzung. Für höchst nichtlineare Systeme könnte hinsichtlich der Genauigkeit ein deutlich kleinerer Zeitschritt Δt erforderlich sein



Eine Zeitschritt-Konvergenzstudie sollte in jedem Fall durchgeführt werden und ist unabkömmlich für ein nichtlineares Zeitverlaufsverfahren.

2.10.6 Anfangsverformungen



Wenn die *Anfangsverformungen aus Lastfall* ausgewählt werden, ist es möglich, Anfangsverformungen direkt aus einem Lastfall zu importieren. Diese Bedingungen gelten beim Zeitschritt $t = 0$ s und werden sofort danach gelöst.

In *RF-DYNAM Pro* ist die Funktion *Anfangsverformungen aus Lastfall* nur verfügbar, wenn die *modale Analyse* ausgewählt wurde. Für die direkten Analysen stehen im Register *Berechnungsparameter* die Funktionen *Anfangsbedingung* und *Stationärer Zustand* zur Auswahl. Dies wird in [Abschnitt 2.10.8](#) erläutert.

2.10.7 Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen

Es können Lastfälle für einzelne Zeitschritte durch aktivieren des Kontrollfeldes *Lastfälle generieren* exportiert werden. Der Lastfalltyp wird aus der Drop-Down-Liste darunter ausgewählt. Diese exportierten *Lastfälle* enthalten keine Lasten, sondern die Ergebnisse des spezifischen Zeitschrittes.



In der in [Bild 2.28](#) dargestellten Liste können Zeitschritte ausgewählt werden, die exportiert werden sollen.

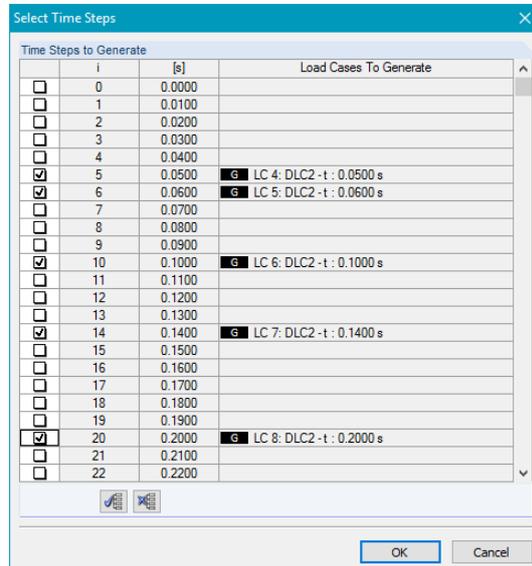


Bild 2.28: Maske zum Auswählen von Zeitschritten für den Lastfallexport im Zeitverlaufsverfahren.

Eine Ergebniskombination (*EK*) wird als Ergebnisumhüllende mit Maximal- und Minimalwerten von allen Zeitschritten generiert, wenn *Ergebniskombination erstellen* ausgewählt wird.

Mehr Informationen über die exportierten *Lastfälle* und *Ergebniskombinationen* finden Sie im [Abschnitt 4.3](#).

2.10.8 Berechnungsparameter

Die Berechnungsparameter von Zeitverlaufsverfahren für *DLF* sind nur für direkte Analysen verfügbar, wie der *linearen* und *nichtlinearen impliziten Newmark Analyse* oder der *expliziten Analyse*. An dieser Stelle werden die Massenmatrix und die Richtungen der einwirkenden Massen bestimmt. Das *Berechnungsparameter*-Register wird in [Bild 2.29](#) gezeigt.

Im Falle einer *modalen Analyse* werden die Einstellungen der einwirkenden Massen, der Massenmatrix und des FE-Netzes von dem zugewiesenen *ESF* übernommen.

Einwirkende Massen

Es können unterschiedliche *Massenfälle* oder *Massenkombinationen* in die *DLF* importiert werden. Diese wurden in den [Abschnitten 2.2](#) und [2.3](#) definiert. Diese sollten aus dem Drop-Down-Menü im *Berechnungsparameter*-Register gewählt werden.



Es muss die Richtung gewählt werden, in der die Massen wirken. Die Massen können in die globalen Translationsrichtungen X, Y oder Z wirken, indem das zugehörige Kontrollfeld aktiviert wird. Außerdem können Massen um die X, Y oder Z-Achsen rotieren, indem das zugehörige Kontrollfeld aktiviert wird. Diese Einstellungen verändern die Massenmatrix.

Wenn die explizite Analyse genutzt wird, müssen die Massen an allen FE-Knoten und in alle Richtungen wirken.

Bild 2.29: Maske *Dynamische Lastfälle* mit dem geöffneten *Berechnungsparameter*-Register. Dieses Register ist nur für direkte Analysen verfügbar (implizite und explizite Analysen).

Typ der Massenmatrix

Verschiedene Typen von Massenmatrizen sind im *Berechnungsparameter*-Register verfügbar, abgebildet in [Bild 2.29](#). Die unterschiedlichen Typen von Massenmatrizen wurden in [Abschnitt 2.4.4](#) diskutiert.

Die explizite Analyse ist auf die *Diagonalmatrix (Translations- und Rotationsfreiheitsgrade)* beschränkt.

FE-Netz-Einstellungen

Die gezeigte Schaltfläche auf der linken Seite führt direkt in die FE-Netz-Einstellungen des Hauptprogrammes *RFEM*. Die *FE-Netz-Einstellungen* Dialogbox ist ebenfalls unter **Berechnung** → **FE-Netz-Einstellungen...** im Hauptprogramm *RFEM* verfügbar. Mehr Informationen über das FE-Netz und die Parameter, welche angepasst werden können, sind im *RFEM-Handbuch* in [Abschnitt 7.2](#) zu finden.



Stäbe, welchenicht in Flächen integriert sind, werden standardgemäß nicht in FE-Knoten unterteilt. Wenn eine diagonale Massenmatrix genutzt wird, wird die Masse eines Stabes auf die zwei Endknoten des Stabes konzentriert. Wenn eine feinere Aufteilung der Masse gewünscht wird, muss die Stabteilung in den *FE-Netz-Einstellungen* aktiviert werden.

Anfangsbedingungen und stationäre Zustände

Es stehen die Funktionen *Anfangsbedingung* und *Stationärer Zustand* zur Verfügung. Mithilfe der Funktion *Anfangsbedingung* werden alle Bedingungen aus dem gewählten Lastfall oder der gewählten Lastkombination für den Zeitschritt $t = 0$ s importiert und anschließend wieder gelöst. Die Funktion *Stationärer Zustand* berücksichtigt alle Bedingungen über die gesamte Zeit.

Zusätzlich zu den importierten Verformungen und Lasten, mit welchen zu Beginn der Berechnung ein Gleichgewichtszustand hergestellt wird, werden alle Steifigkeitsänderungen berücksichtigt, die in den Einstellungen der Lastfälle und Lastkombinationen getätigt wurden. Diese wurden

bereits in [Abschnitt 2.4.7](#) erläutert. Außerdem werden bei den beiden nichtlinearen Analysen die Zustände der Nichtlinearitäten importiert.



Es kann zwischen Lastfällen und Lastkombinationen ausgewählt werden. Für die lineare Analyse können nur Lastfälle oder Lastkombinationen eingelesen werden, welche nach Theorie I. Ordnung (geometrisch linear) berechnet wurden. Lastfälle und Lastkombinationen, welche nach Theorie III. Ordnung (große Verformungen) oder mittels dem Durchschlagproblem berechnet wurden, können nur für eine der beiden nichtlinearen Analysen verwendet werden.

2.10.9 Strukturdämpfung

In *RF-DYNAM Pro* ist die viskose Strukturdämpfung verfügbar. Eine Eingabe kann mit den Rayleigh-Koeffizienten α und β oder durch die Lehrschen Dämpfungswerte D_i erfolgen. Der Lehrsche Dämpfungswert kann für jede Eigenform der Struktur gleich oder unterschiedlich definiert werden. Das Register *Dämpfung* ist in [Bild 2.30](#) dargestellt.

The screenshot shows the 'Dämpfung' (Damping) register in the software. At the top, there are fields for 'DLF Nr.' (value: 2), 'Dynamischer Lastfall - Bezeichnung' (value: Zeitverlaufsverfahren - Akzelerogramm), and 'Zu berechnen' (checked). Below this are tabs for 'Allgemein', 'Zeitverlaufsverfahren', and 'Dämpfung'. The 'Dämpfung' tab is active and contains the following options:

- Rayleigh-Dämpfung
 - α : 0.200000 [-]
 - β : 0.001000 [-]
- Lehrsche Dämpfung
 - D: [] [-]
- Lehrsche Dämpfung unterschiedlich für jede Form...

On the right side, there is a table titled 'Lehrsches Dämpfungsmaß' (Modal Damping Measure) with the following structure:

Form Nr.	Dämpfung D [-]	Kommentar

At the bottom of the register, there is a graph showing the damping ratio $D [-]$ versus the angular frequency Ω [rad/s]. The y-axis ranges from 0.000000 to 0.080000, and the x-axis ranges from 2.00 to 36.00. The curve shows a sharp initial drop from approximately 0.08 at $\Omega = 2.00$ to about 0.02 at $\Omega = 4.00$, followed by a gradual decrease and then a slight increase towards the end of the range.

Bild 2.30: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Dämpfung*.

Mit den Rayleigh-Koeffizienten ist die Dämpfungsmatrix \mathbf{C} definiert als

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (2.20)$$

unter Verwendung der Faktoren α und β . Die Rayleigh-Dämpfungskoeffizienten werden für die lineare und nichtlineare *implizite Newmark-Analyse* und die *explizite Analyse* verwendet. Die Dämpfungsmatrix \mathbf{C} muss für die direkten Zeitverlaufsverfahren nicht zwingend eine Diagonalmatrix sein. Für weitere Informationen über die Rayleigh-Dämpfung siehe beispielsweise [18].

Die Lehrschen Dämpfungswerte D_i werden für die *modale Analyse* verwendet. Die Dämpfungsmatrix \mathbf{C} muss eine Diagonalmatrix sein. Die Lehrschen Dämpfungswerte sind für jede einzelne Form i als Faktor zwischen der bestehenden und der kritischen Dämpfung folgendermaßen definiert:

$$D_i = \frac{c_i}{2 \cdot m_i \cdot \omega_i} \quad (2.21)$$

wobei c_i für die Einträge in der diagonalen Dämpfungsmatrix, m_i für die Modalmassen und ω_i für die Kreisfrequenzen des Systems stehen.

Die Rayleigh-Koeffizienten und die Lehrsche Dämpfung sind verbunden:

$$D_r = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_r} + \beta \omega_r \right) \quad (2.22)$$

Diese Gleichung ist in **Bild 2.31** grafisch dargestellt unter Verwendung von $\alpha = 0,2$ und $\beta = 1 \times 10^{-3}$. Es wird deutlich, dass für ein Paar von Rayleigh-Koeffizienten verschiedene Lehrsche Dämpfungswerte für jede Eigenfrequenz der Struktur resultieren.

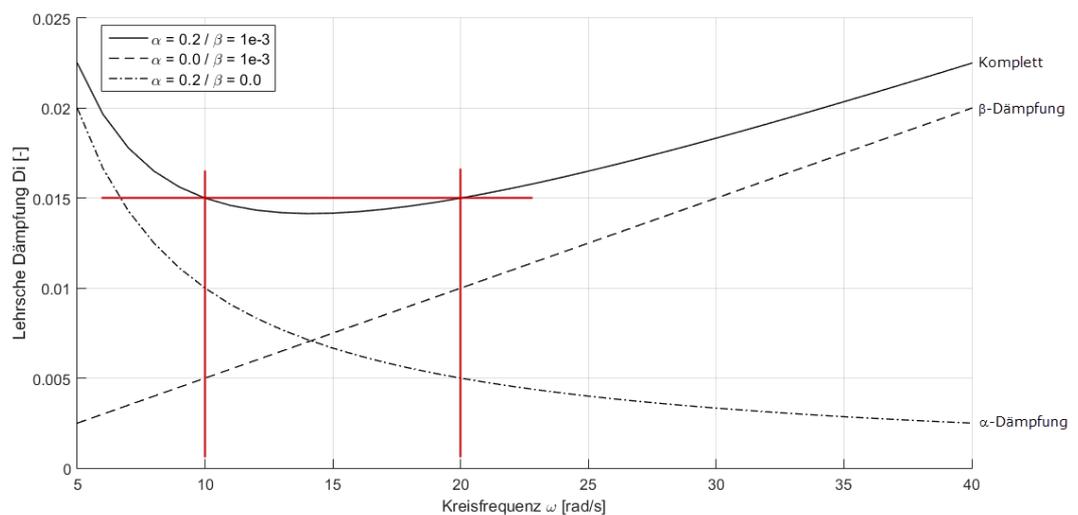


Bild 2.31: Beziehung zwischen den Rayleigh-Koeffizienten α und β und der Lehrschen Dämpfung D , dargestellt mit Hilfe dieser Beispiele: (1 - Komplett) $\alpha = 0,2$ und $\beta = 1 \times 10^{-3}$, (2 - β -Dämpfung) $\alpha = 0,0$ und $\beta = 1 \times 10^{-3}$, und (3 - α -Dämpfung) $\alpha = 0,2$ und $\beta = 0,0$. Dargestellt sind die Lehrschen Dämpfungswerte die für jede Kreisfrequenz der Struktur ω resultieren.

RF-DYNAM Pro konvertiert im Falle der *modalen Analyse* die Rayleigh-Dämpfungs-Koeffizienten α und β intern in Lehrsche Dämpfungswerte D_i . In diesem Falle ist die Lösung eindeutig.



Für die *implizite* und die *explizite Analyse* müssen die Rayleigh-Koeffizienten eingegeben werden. Die Umrechnung von den Lehrschen Dämpfungswert D_i in die Rayleigh-Koeffizienten α und β kann durch Öffnen der Schaltfläche *Aus der Lehrschen Dämpfung berechnen...* erfolgen. Im sich öffnenden Dialog müssen die beiden dominantesten Frequenzen der Struktur in Kombination mit den benötigten Lehrschen Dämpfungswerten eingegeben werden.

Die Umrechnung des Lehrschen Dämpfungswertes in die Rayleigh-Koeffizienten wird im Beispiel in **Abschnitt 5.2** gezeigt.

2.11 Dynamische Lastfälle - Verfahren mit statischen Ersatzlasten

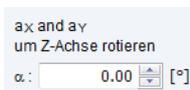
Das Verfahren mit statischen Ersatzlasten wird durchgeführt, wenn die entsprechende Schaltfläche in [Bild 2.22](#) ausgewählt ist; diese Option gehört zum Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Dieses Verfahren mit statischen Ersatzlasten in *RF-DYNAM Pro* erfolgt auf Grundlage des multi-modalen Antwortspektrenverfahrens. Die wesentlichen Unterschiede zum *Antwortspektrenverfahren* im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* (in [Abschnitt 2.9](#) beschrieben) sind im Folgenden aufgeführt:

- Lastfälle mit Ersatzlasten werden nach *RFEM* exportiert, getrennt für jede Form und jede Erregungsrichtung.
- Die Berechnung von Lastfällen erfolgt im Hauptprogramm *RFEM*. Daher werden Nichtlinearitäten standardmäßig betrachtet, jedoch werden Steifigkeitsänderungen, die in den *ESF* definiert wurden, nicht übernommen.
- Zufällige Torsionswirkungen können automatisch berücksichtigt werden.
- Gesamterdbebenkräfte können sehr einfach für jede Eigenform berechnet werden.
- Ergebniskombinationen werden einzeln für jede Erregungsrichtung (kombinierte Modalantworten mit *SRSS* oder *CQC*) und für die Kombination von Ergebnissen aus verschiedenen Erregungsrichtungen (*SRSS*, 100% / 30% (40%)) erzeugt.
- Vorzeichengerechte Ergebnisse auf Basis der dominanten Eigenform stehen zur Verfügung, das liefert eindeutige *EKs*.
- Die Ergebnisse sind Schritt für Schritt reproduzierbar.
- Alle Lager werden identisch angeregt (keine Multi-Punkt Erregung).

Die entsprechenden Unterregister, wenn ein Verfahren mit statischen Ersatzlasten durchgeführt wird, sind *Allgemein*, *Verfahren mit äquivalenten Kräften* und *Eigenformen*. Das Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften* ist in [Bild 2.32](#) dargestellt.

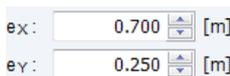
2.11.1 Antwortspektrum zuweisen

In jede Richtung kann ein anderes Antwortspektrum wirken. Es muss zumindest eine der Richtungen ausgewählt sein. Die vorhandenen Antwortspektren werden aus dem Drop-Down-Menü ausgewählt. Der Multiplikationsfaktor kann für jede Richtung frei gewählt werden.



Die Erregungsrichtung kann in der X-Y-Ebene um die Z-Achse rotieren. Wenn das Antwortspektrum beispielsweise die Struktur in der X-Y-Ebene in einem Winkel von 45 ° angreifen soll, wird nur die X-Richtung aktiviert und $\alpha = 45^\circ$ eingegeben.

2.11.2 Zufällige Torsionswirkungen



RF-DYNAM Pro berücksichtigt zufällige Torsionswirkungen automatisch, wenn das Kontrollfeld ausgewählt wird und die Exzentrizitäten e_x und e_y eingegeben werden. Dies ist in **EN 1998-1** in **Abschnitt 4.3.2** und **4.3.3.3.3 [1]** geregelt. Die Exzentrizitäten e_x und e_y definieren die Verschiebung des Massenschwerpunktes, um Unsicherheiten in der Anordnung der Massen zu berücksichtigen. Für die Berechnung von Ersatzlasten und Torsionsmomenten siehe [Abschnitte 4.4.1](#) und [4.4.2](#).



Wenn Lastfälle mit generierten Ersatzlasten exportiert werden, werden zwei *LFs* für jede Form und jede Richtung generiert. Einer mit positiven Torsionsmomenten und der andere mit negativen Torsionsmomenten. *RF-DYNAM Pro* erzeugt eine Alternativkombination dieser zwei *LFs*. Mehr Informationen über die modale Kombination der Ergebnisse, wenn zufällige Torsionswirkungen

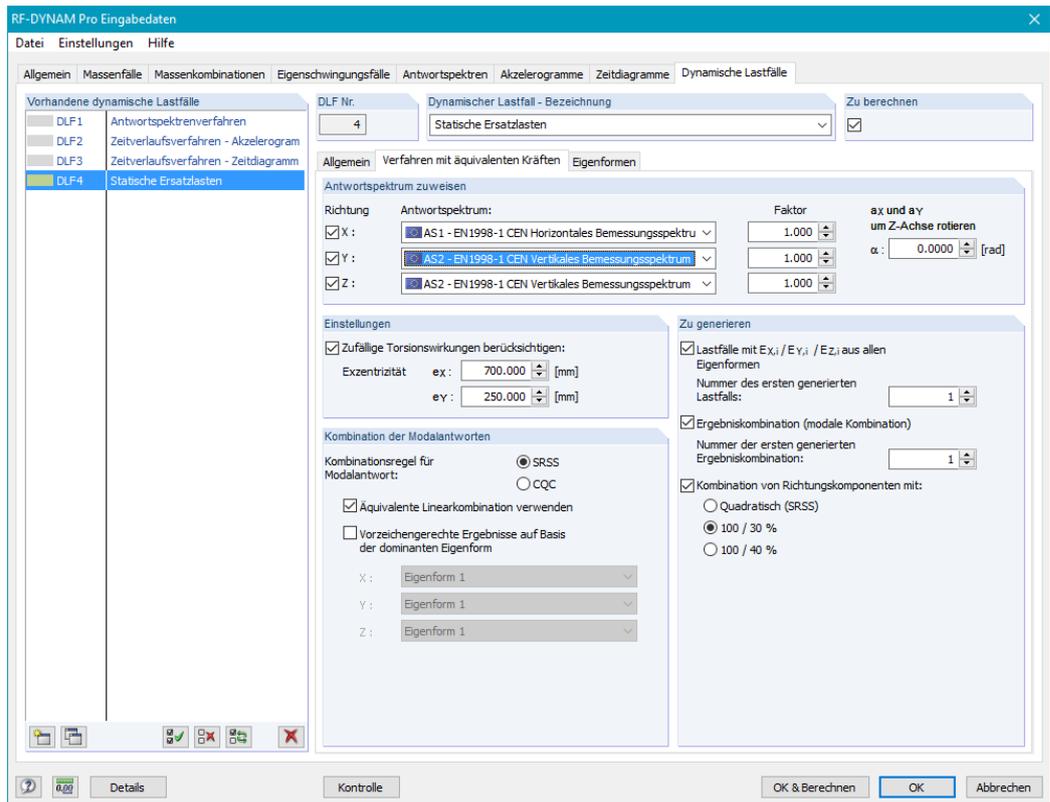


Bild 2.32: Maske *Dynamische Lastfälle* mit geöffnetem Register *Verfahren mit äquivalenten Kräften*.

aktiviert sind, finden Sie in der [Knowledge Base - Kombinationsregeln bei Berücksichtigung zufälliger Torsion](#).

2.11.3 Kombination der Modalantworten

Im Bereich *Kombination der Modalantworten* wird festgelegt, wie Ergebnisse aus verschiedenen Eigenformen der Struktur kombiniert werden. Die Modalkombination ist der erste Schritt der dynamischen Kombinationen.

Die Modalantworten können mit der *Quadratsummenwurzel-Regel (SRSS)* oder der *Vollständigen quadratischen Kombinationsregel (CQC)* kombiniert werden. Beider dieser quadratischen Kombinationen können in der Standardform oder modifiziert als äquivalente Linearkombination angewendet werden. Die Option *Vorzeichengerechte Ergebnisse* ermittelt Modalkombinationen mit eindeutigen Vorzeichen auf Basis der dominanten Eigenform der Struktur.

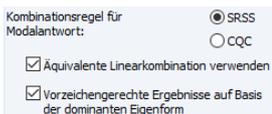
Die Standardform der SRSS-Regel kombiniert maximale Ergebnisse und die Vorzeichen gehen verloren, die Kombinationsregel lautet wie folgt:

$$E_{SRSS} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_p^2} \quad (2.23)$$

Die kombinierten Ergebnisse E_{SRSS} resultieren von den modalen Antworten E_p aus p Eigenwerten der Struktur.

In *RF-DYNAM Pro* ist eine modifizierte Form der SRSS-Regel verfügbar, um zugehörige Ergebnisse wie zum Beispiel zugehörige Schnittgrößen zu ermitteln. Verglichen zur Standardform der SRSS-Regel, sind für gewöhnlich zugehörige Schnittgrößen deutlich kleiner und die zugehörigen Vorzeichen sind korrekt im Bezug auf die maßgebende Schnittgröße. Die SRSS-Regel wird als äquivalente Linearkombination [11] angewendet:

$$E_{SRSS} = \sum_{i=1}^p f_i \cdot E_i \quad \text{with} \quad f_i = \frac{E_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^p E_j^2}} \quad (2.24)$$



Wenn diese Formel angewendet wird, sind die Ergebnisse in sich konsistent.

Die SRSS-Regel ist nur für Strukturen erlaubt, bei denen benachbarte Eigenfrequenzen $T_i < T_j$ mehr als 10% abweichen, also wenn die folgende Aussage zutreffend ist:

$$\frac{T_i}{T_j} < 0,9 \quad (2.25)$$

In allen anderen Fällen muss die CQC-Regel angewendet werden. Die CQC-Regel ist folgendermaßen definiert:

$$E_{CQC} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p E_i \varepsilon_{ij} E_j} \quad (2.26)$$

mit dem Korrelations-Koeffizienten ε

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot \sqrt{D_i D_j} (D_i + r D_j) r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 D_i D_j r (1 + r^2) + 4 (D_i^2 + D_j^2) r^2} \quad \text{mit } r = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (2.27)$$

Der Korrelations-Koeffizient ε vereinfacht sich, wenn der viskose Dämpfungswert D für alle Eigenformen gleich gewählt wird:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \cdot D^2 (1 + r) r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 D^2 r (1 + r)^2} \quad (2.28)$$

Die Dämpfungswerte D_i , die zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten ε_{ij} notwendig sind, werden im Register *Dämpfung* definiert. Diese Register erscheint sobald die CQC-Regel selektiert wird. Die notwendigen Einstellungen für die Dämpfung werden weiter unten erläutert.

In Analogie zur SRSS-Regel kann auch die CQC-Regel als äquivalente Linearkombination ausgeführt werden [11]. Die Formel der modifizierten CQC-Regel unter Verwendung von ε_{ij} (Gleichung 2.27) lautet wie folgt:

$$E_{CQC} = \sum_{i=1}^p f_i \cdot E_i \quad \text{with } f_i = \frac{\sum_{j=1}^p \varepsilon_{ij} E_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p E_i \varepsilon_{ij} E_j}} \quad (2.29)$$

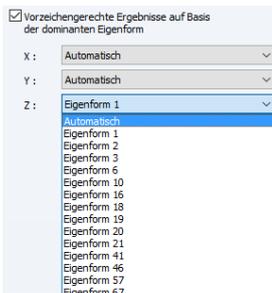
Mehr Informationen zu der Option *äquivalente Linearkombination verwenden* und ein kleines Beispiel sind in der [Knowledge Base - Quadratische Kombinationen SRSS und CQC als "äquivalente Linearkombination"](#) bereitgestellt.



Wenn die CQC-Regel ausgewählt wurde, enthalten die exportierten *Lastfälle* Information über zugehörige Kreisfrequenz ω und die Dämpfung D_i .

Mehr Information über die CQC-Regel und ein kleines Beispiel gibt es im [Knowledge Base - Quadratische Kombination mittels CQC-Regel](#). Unabhängig von *RF-DYNAM Pro* steht die CQC-Regel im Hauptprogramm *RFEM* zur Verfügung; dies wird in der [Knowledge Base - Quadratische Kombination mit Hilfe der CQC-Regel](#) beschrieben.

Mit der gewöhnlichen quadratischen Kombination, wie der SRSS- oder der CQC-Regel werden, in der Ergebnismhüllenden alle Maximalwerte positiv und alle Minimalwerte negativ ausgegeben. Die Vorzeichen gehen verloren und die Ergebniskombinationen sind nicht eindeutig. Um dieses Effekt der quadratischen Kombination zu umgehen und um ein realistischeres Bild der Schnittgrößen zu erhalten, steht die sogenannte Option *Vorzeichengerechte Ergebnisse auf Basis der dominanten Eigenform* in *RF-DYNAM Pro* zur Verfügung. Wenn das statische Modell eine dominante Eigenform aufweist, können die Vorzeichen des dazugehörigen *Lastfalles* auf die Ergebnisse in der *Ergebniskombination* angewendet werden. Dies führt zu eindeutigen *Ergebniskombinationen*. *RF-DYNAM Pro* kann die dominante Eigenform automatisch, anhand des größten effektiven Modalmassenfaktors auswählen, wenn die Option *Automatisch* im Drop-Down Menü gewählt wird. Es kann aber auch jede beliebige andere Eigenform manuell ausgewählt werden.



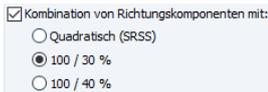
Mehr Information über die Option *Vorzeichengerechte Ergebnisse* und ein kleines Beispiel wird in der [Knowledge Base - Vorzeichengerechte Ergebnisse auf Basis der dominanten Eigenform](#) bereitgestellt.

Weitere Informationen und mathematische Herleitungen der Kombinationsregeln sind z. B. in [12–14] zu finden.

2.11.4 Kombination der Richtungskomponenten

Im Bereich *Zu generieren* wird definiert, wie die Ergebnisse aus den verschiedenen Anregungsrichtungen kombiniert werden. Die Kombination der Richtungskomponenten ist der zweite Schritt der dynamischen Kombinationen.

Die Schnittgrößen aus verschiedenen Erregungsrichtungen können quadratisch mit der SRSS-Regel kombiniert werden oder mit Hilfe der 100% / 30% (40%)-Regel. Die SRSS-Regel, wie in [Gleichung 2.23](#) definiert, wird angewendet mit $i = 1..p$ als die Erregungsrichtungen X, Y und Z. Die SRSS-Regel für die Kombination der Richtungen kann ebenso als äquivalente Linearkombination realisiert werden, dies ist in [Gleichung 2.24](#) definiert.



2.11.5 Export von Lastfällen und Ergebniskombinationen

Wenn das Kontrollfeld *Lastfälle* ausgewählt wird, werden Lastfälle in RFEM einzeln für jede Form und jede Erregungsrichtung exportiert. Die Ersatzlasten wurden gemäß den [Gleichungen 4.9, 4.10](#) und [4.11](#) berechnet.

Wenn *Ergebniskombinationen (modale Kombination)* und *Kombination von Richtungskomponenten* ausgewählt wird, werden mehrere Ergebniskombinationen automatisch erzeugt.

- EKs, die die Kombination der Modalantworten (SRSS oder CQC) einzeln für jede Richtung enthalten.
- EKs, die die Ergebnisse aus den verschiedenen Erregungsrichtungen kombinieren. Eine EK wird für die SRSS-Regel erzeugt, maximal drei EKs werden für die 100% / 30% (40%)-Regel erzeugt.

Mehr Informationen über die exportierten *Lastfälle* und *Ergebniskombinationen* finden Sie im [Abschnitt 4.4](#).

2.11.6 Dämpfung für die CQC-Regel



Das Register *Dämpfung* ist nur verfügbar, wenn die CQC-Regel für die Kombination von Eigenformen (definiert in [Gleichungen 2.26](#) und [2.27](#)) ausgewählt ist.

Für die CQC-Regel werden die Lehrschen Dämpfungswerte D_i benötigt, die gleich oder unterschiedlich für jede Form der Struktur definiert sein können. Auch die Rayleigh-Dämpfung mit den Koeffizienten α und β steht zur Verfügung und wird intern zur Lehrschen Dämpfung konvertiert. Das Register *Dämpfung* ist das Gleiche wie für das *Antwortspektrenverfahren* und ist in [Bild 2.24](#) in [Abschnitt 2.9.6](#) dargestellt.



Für die Umrechnung von Rayleigh Koeffizienten α und β in Lehr'sche Dämpfungswerte D_i wird auf [Abschnitt 2.10.9](#) verwiesen.

2.11.7 Wahl der Eigenform

In *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* steht ein multi-modales Antwortspektrenverfahren zur Verfügung; es können so viele Formen ausgewählt werden, wie für die Bemessung erforderlich sind. Das Register *Eigenform* und die Einstellungen darin wurden in [Abschnitt 2.9.7](#) beschrieben und sind für das Ersatzlastverfahren identisch.

2.12 Globale Einstellungen im Dialog *Details*

Details

Der Dialog *Details* kann über die Schaltfläche [Details] aufgerufen werden. Der Dialog ist auch über **Einstellungen** → **Details** erreichbar. In diesem Dialog können allgemeine Parameter gesetzt werden, die für die gesamte dynamische Berechnung gültig sind, unabhängig von definierten Fällen innerhalb des Moduls. Der Dialog ist in [Bild 2.33](#) dargestellt.

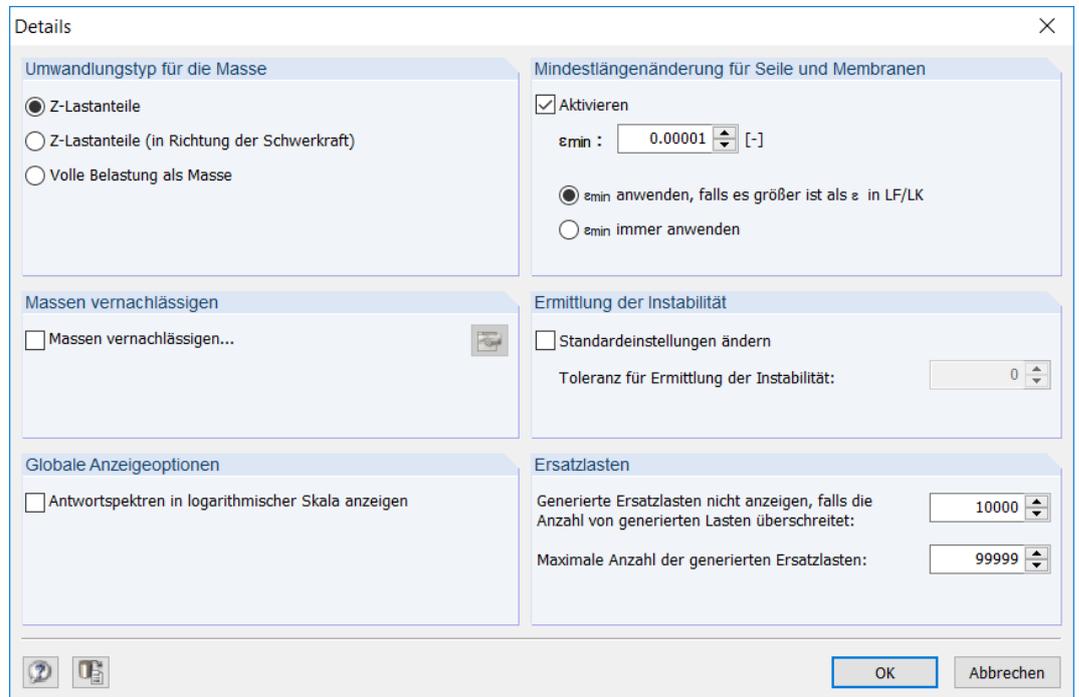


Bild 2.33: Dialog *Details* zur Anpassung der allgemeinen Parameter für das Modul *RF-DYNAM Pro*.

Umwandlungstyp für die Masse

Im [Kapitel 2.2](#) wurde der Massenimport aus *Lastfällen* erläutert und im [Abschnitt 2.2.4](#) die unterschiedlichen Typen der Umwandlung erläutert.

Massen vernachlässigen

Massen an Knoten, Linien, Stäben und Flächen können vernachlässigt werden in der dynamischen Analyse. In [Abschnitt 2.2.4](#) wird die Option *Massen vernachlässigen* genauer erläutert.

Anzeige der Antwortspektren

Die Anzeige der Antwortspektren kann geändert werden, dargestellt in [Bild 2.11](#) und [2.25](#). Die Standarddarstellung verwendet eine lineare x-Achse, aber die Änderung zu einer logarithmischen Skala ist durch Aktivieren des Kontrollfeldes möglich.

Mindestlängenänderung für Seile und Membranen

Für diesen speziellen Stabtyp ist eine Mindestlängenänderung erforderlich. Wenn diese Grenze zu niedrig angesetzt wird, sind die erreichten Eigenwerte nicht realistisch und es werden nur lokale Eigenformen bestimmt. Der Standardwert eignet sich in den meisten Fällen. Weitere Informationen zu Seilen gibt es im **RFEM-Handbuch in Abschnitt 4.17**.

Ermittlung der Instabilität

Die Stabilität einer Struktur kann analysiert werden, der Standardwert in *RF-DYNAM Pro* beträgt 0,01, was zu einer sehr sensiblen Ermittlung von Instabilität und einer frühen Abbruchschranke führt. Weitere Informationen dazu im **RFEM-Handbuch in Abschnitt 7.3.3**.

Ersatzlasten

Wie in [Abschnitt 2.11](#) beschrieben werden Lastfälle mit den erzeugten Ersatzlasten exportiert. Lasten werden nur graphisch dargestellt, wenn weniger als 5 000 Lasten generiert werden. Dieser Wert kann in der Maske *Details* geändert werden. Es ist zu beachten, dass die graphische Anzeige von mehr als 5 000 Lasten langsam ist. Die maximale Anzahl an Lasten, die RFEM erzeugen und in *LFs* exportieren kann, beträgt 99 999. Da Ersatzlasten an jedem FE-Knoten erzeugt werden, wird nur ein vollständiger Satz an Ersatzlasten ausgegeben, wenn die Struktur weniger als 99 999 FE-Knoten hat. Wenn die Struktur mehr FE-Knoten hat, werden die kleinsten Ersatzlasten vernachlässigt und es werden nur 99 999 Lasten erzeugt. Im Dialog *Details* kann die maximale Anzahl der generierten Ersatzlasten geändert werden.

2.13 Einheiten und Dezimalstellen



Die Maske *Einheiten und Dezimalstellen* kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden; die Maske ist in [Bild 2.34](#) dargestellt.

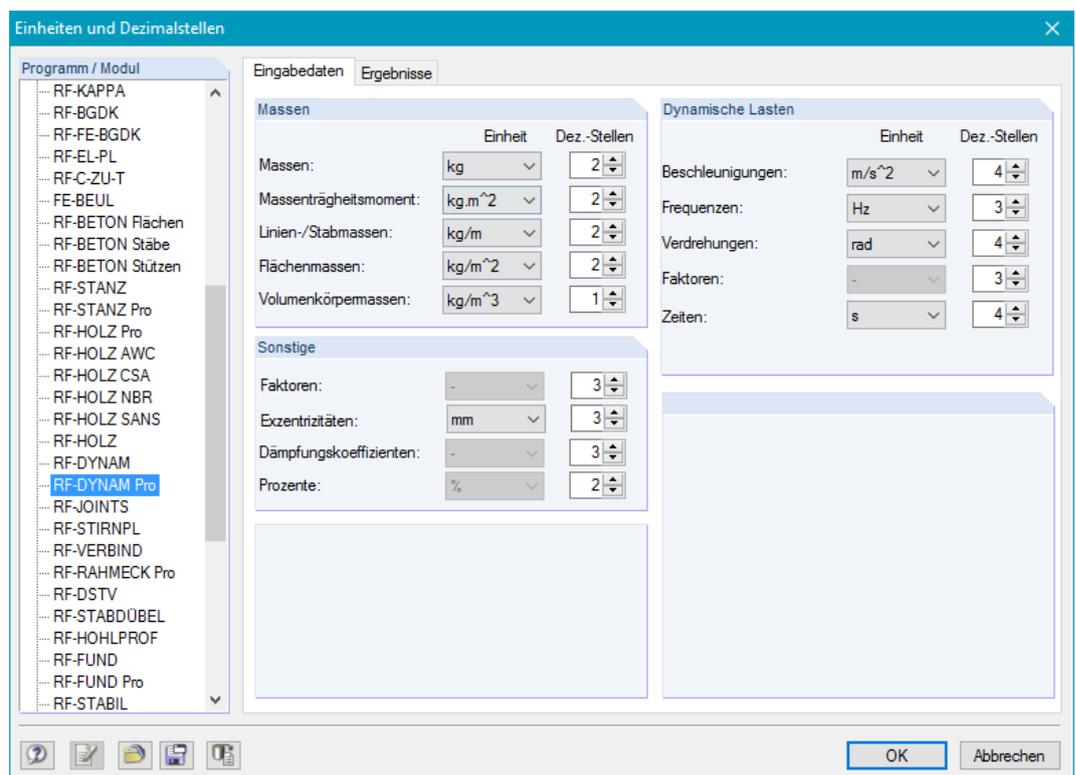


Bild 2.34: Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen*, in dem die Einheiten und Dezimalstellen der Ergebnisdaten aus *RF-DYNAM Pro* angepasst werden können.

Das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro* wird in der Liste der Module ausgewählt. Das Register *Eingabedaten* ist geöffnet und Einheiten können aus den Drop-Down-Menüs ausgewählt und Dezimalstellen können angepasst werden.

3 Berechnung

3.1 Kontrolle

Kontrolle

Bevor die Berechnung gestartet wird, können die Eingabedaten überprüft werden, ohne das Zusatzmodul zu beenden. Dazu wird [Kontrolle] im unteren Bereich des Moduls aufgerufen.

Im Modul wird die Maske *Überprüfung der Eingabedaten* angezeigt, in der die Warn- und Fehlermeldungen erscheinen. Wenn keine Fehler gefunden wurden, erscheint die Meldung *Es wurden keine Konsistenzfehler gefunden*.

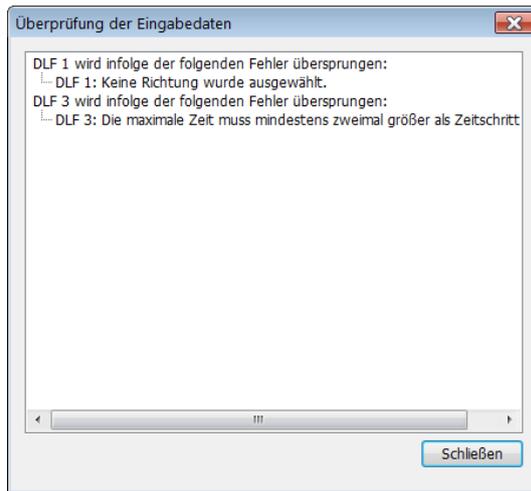


Bild 3.1: Maske *Überprüfung der Eingabedaten* mit Warn- und Fehlermeldungen.



Mit einem Klick auf [OK & Berechnen] wird die Kontrolle ebenfalls durchgeführt. Wenn Fehler auftreten, wird die Maske *Überprüfung der Eingabedaten* angezeigt und man kann entscheiden, ob die Berechnung durchgeführt oder abgebrochen werden soll.

3.2 Start der Berechnung

OK & Berechnen

Die Berechnung wird mit einem Klick auf die Schaltfläche [OK & Berechnen] gestartet. Es werden nur die Fälle (*ESFs* und *DLF*) berechnet, für die keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*). Das Zusatzmodul wird beendet, sobald die Berechnung abgeschlossen ist.



Um die Berechnung eines einzelnen Eigenschwingungsfalles (*ESFs*) oder eines dynamischen Lastfalls (*DLFs*) zu starten, kann mit Rechtsklick auf den spezifischen Fall *Berechnen* ausgewählt werden. Es wird nur der ausgewählte Fall in *RF-DYNAM Pro* berechnet. Sobald die Berechnung abgeschlossen ist, bleibt das Modul offen, die Farbe des ausgewählten Falls ändert sich von Grau auf Grün. Wenn ein *DLF* zur Berechnung ausgewählt wird, wird auch der zugewiesene *ESF* berechnet.



Die Berechnung kann auch in der RFEM-Oberfläche gestartet werden. Um den *RF-DYNAM Pro*-Fall direkt zu berechnen, wählen Sie diesen aus der RFEM-Symbolleiste aus, wie in [Bild 3.2](#) dargestellt. Mit einem Klick auf die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] wird die Berechnung gestartet. Es werden nur die Fälle (*ESFs* und *DLF*) berechnet, für die keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*).



Bild 3.2: Direkte Berechnung eines *RF-DYNAM Pro*-Falls in RFEM

In der Maske *Zu berechnen* (**Berechnung** → **Zu berechnen**) sind sowohl die Fälle des Zusatzmoduls als auch die Lastfälle und Lastkombinationen aufgelistet. Dies ist in [Bild 3.3](#) dargestellt.

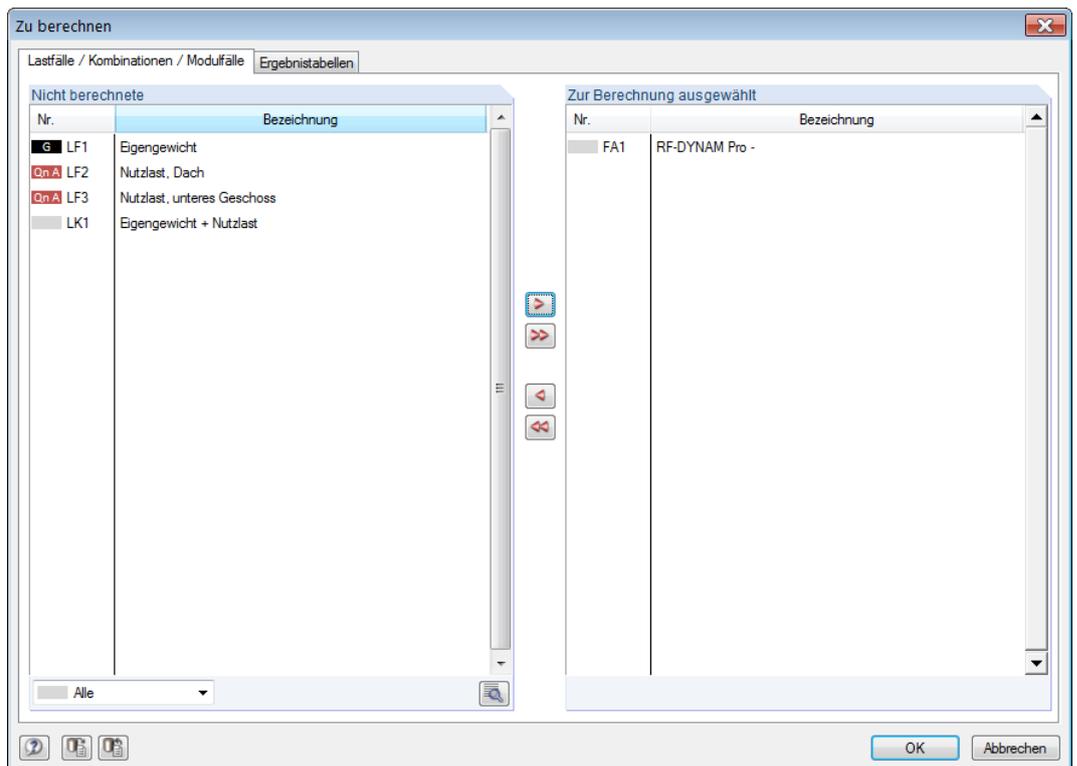
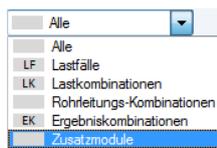


Bild 3.3: Dialog *Zu berechnen*



Die verfügbaren Fälle können mit dem Drop-Down-Menü, dargestellt auf der linken Seite, gefiltert werden.

Mit der Schaltfläche oder werden die selektierten *RF-DYNAM Pro*-Fälle in die rechte Liste übergeben. [OK] startet dann die Berechnung. Es werden alle Fälle (*ESFs* und *DLFs*) berechnet, für die noch keine Ergebnisse verfügbar sind und die als zu berechnen ausgewählt sind (Kontrollfeld *Zu Berechnen*).

Wenn die Berechnung gestartet wurde, kann der Berechnungsvorgang in einem separaten Dialog, dargestellt in [Bild 3.4](#), verfolgt werden.

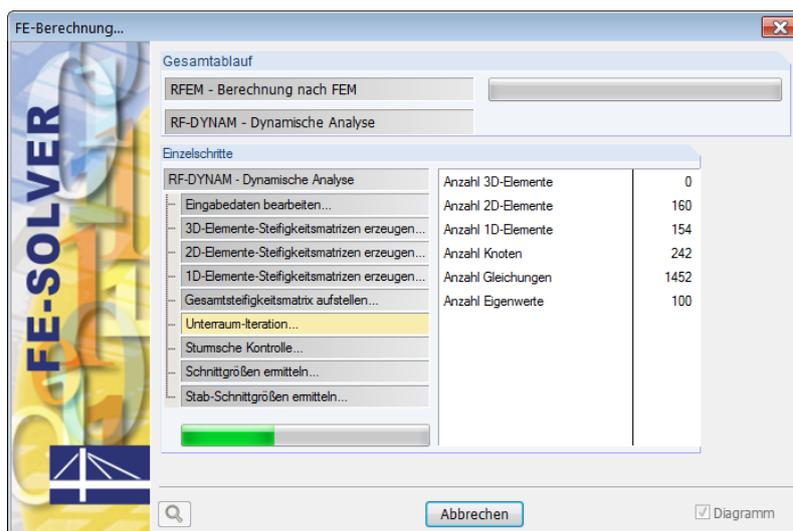


Bild 3.4: Berechnungsvorgang in *RF-DYNAM Pro*.

3.3 Verfügbarkeit der Ergebnisse

Der Lösch- und Berechnungsvorgang in *RF-DYNAM Pro* ist sehr differenziert. Fälle wie Eigenschwingungsfälle (*ESFs*) und dynamische Lastfälle (*DLFs*) können einzeln berechnet werden; ebenso können die Ergebnisse einzeln gelöscht werden, indem das Kontextmenü verwendet wird (Rechtsklick auf den spezifischen Fall). Das Kontextmenü bietet auch die Möglichkeit, den Fall zu löschen, den Fall auf *Zu Berechnen* oder auf *Nicht zu lösen* einzustellen.

Ein Fall wird in Grau dargestellt, wenn keine Ergebnisse verfügbar sind. Ein Fall wird in Grün dargestellt, wenn Ergebnisse verfügbar sind, dann sind auch die exportierten *LFs* und *EKs* vorhanden. Die exportierten *EKs* und *LKs* sind eng mit den Ergebnissen verbunden und werden gelöscht, sobald die Ergebnisse des Falls gelöscht werden.

Ergebnisse eines spezifischen Falls werden gelöscht, wenn

- das Kontextmenü verwendet wird, um die Ergebnisse zu löschen
- etwas in den *ESFs* oder in den *DLFs* in *RF-DYNAM Pro* geändert wird
- sich zugewiesene Massenfälle (*MFs*), Massenkombinationen (*MKs*), Eigenschwingungsfälle (*ESFs*), Antwortspektren (*ASs*), Akzelerogramme (*BSs*) oder Zeitdiagramme (*ZDs*) ändern
- sich zugewiesene Lastfälle *LFs*, Lastkombinationen *LKs* ändern

Ergebnisse eines spezifischen Falls werden nicht gelöscht, wenn

- sich nur die Bezeichnung eines Falls ändert
- Kommentare im Register *Allgemein* gemacht wurden
- sich in den *ESFs* die Skalierung der Eigenformen ändert
- sich in den *DLFs* die Exporteinstellungen ändern (*OK & Berechnen* aktualisiert nur die exportierten *LKs* und *EKs*)

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus *RF-DYNAM Pro* sind im Hauptprogramm RFEM integriert. Die allgemeine Interpretation der Ergebnisse ist in **Kapitel 8** und in **Kapitel 9** des **RFEM-Handbuchs** beschrieben.

In **Bild 4.1** ist das Hauptprogramm RFEM dargestellt. Die Ergebnisse eines *Eigenschwingungsfalls* werden dargestellt, die erste Eigenform wird angezeigt und die Eigenfrequenzen werden in der Tabelle aufgelistet.

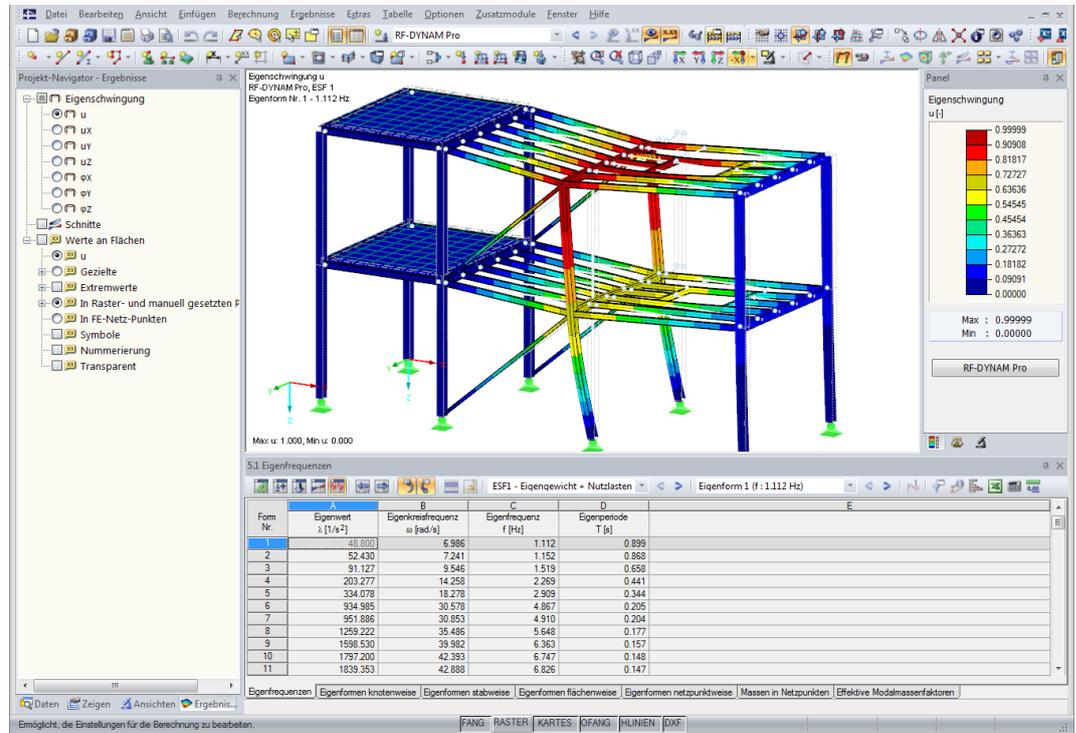


Bild 4.1: Ergebnisse eines *Eigenschwingungsfalls* im Hauptprogramm RFEM.

Der *Zeigen-Navigator* und der *Ergebnisse-Navigator* werden in **Abschnitt 3.4.3**, die *Tabellen* in **Abschnitt 3.4.4** und das *Steuerpanel* in **Abschnitt 3.4.6** des **RFEM-Handbuch** erläutert. Hier im *RF-DYNAM Pro-Handbuch* werden nur die neu verfügbaren Ergebnisse erläutert.

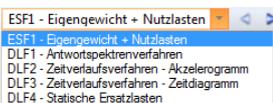


Alle relevanten Ergebnistabellen der dynamischen Analyse können mit der Schaltfläche [Dynamische Analyse] aufgerufen werden.



Jede Ergebnistabelle, die in diesem Kapitel dargestellt ist, kann in *Excel* exportiert werden. Die Werte innerhalb der Tabellen werden als Zeichenketten gespeichert. Somit wird nur die Anzahl der angezeigten Dezimalstellen exportiert. Falls eine höhere Genauigkeit notwendig ist, können die Dezimalstellen in der Maske *Einheiten und Dezimalstellen* angepasst werden, die mit der Schaltfläche aufgerufen wird.

Alle Ergebnistabellen der Dynamik können auch über **Datei** → **Export** exportiert werden. Es können alle oder nur ausgewählte Tabellen exportiert werden, wie im Bild **Bild 4.2** gezeigt. Die Ergebnisse der einzelnen *Dynamischen Lastfälle* werden in den nächsten Abschnitten detailliert erläutert. Analog können die Ergebnisdaten auch im *CSV* Dateiformat gespeichert werden.



Mit dem Drop-Down-Menü kann zwischen den vorhandenen *Eigenschwingungsfällen* und den *Dynamischen Lastfällen* hin- und hergewechselt werden. Es können dazu auch die Schaltflächen und verwendet werden. Die angezeigten Ergebnistabellen hängen von dieser Auswahl ab. Dies wird im Folgenden näher erläutert.



Die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM wird auch entsprechend dieser Auswahl aktualisiert. Alle Ergebnisse, die üblicherweise in RFEM verfügbar sind, sind auch in gleicher Weise für die

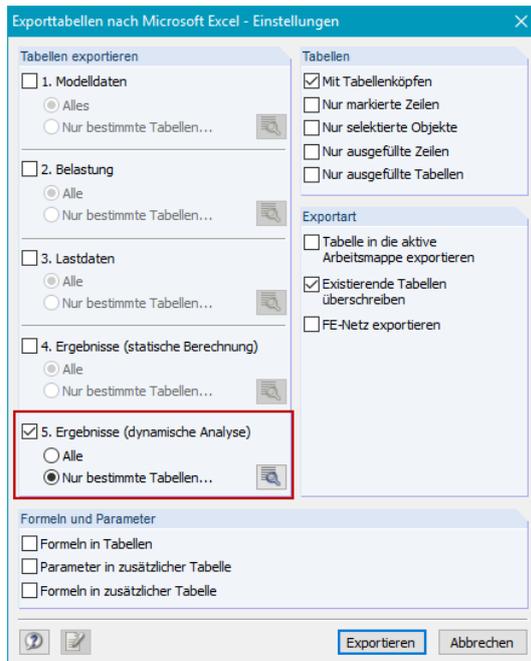
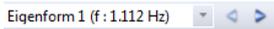


Bild 4.2: Dialog zum Export von Tabellen nach *Microsoft Excel*. Alle dynamischen Tabellen (*ESFs* und *DLFs*) können exportiert werden.

Ergebnisse in *RF-DYNAM Pro* vorhanden. Die Interaktion zwischen Tabellen und Grafik funktioniert wie gewohnt in *RFEM*.

4.1 Eigenschwingungsfälle

Die Ergebnistabellen, die zu *Eigenschwingungsfällen* gehören, werden angezeigt, wenn ein *ESF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt wird. Die Ergebnistabellen 5.1 bis 5.7 gehören zu den *Eigenschwingungsfällen*. Diese Ergebnisse sind immer verfügbar. Sie gehören zum Modul *RF-DYNAM Pro - Eigenschwingungen*. Die für die *Eigenschwingungsfälle* benötigten Eingabedaten wurden in [Abschnitt 2.4](#) erläutert.



Mit dem Drop-down-Menü, dargestellt auf der linken Seite, oder den Schaltflächen und kann zwischen den verfügbaren Eigenformen in der Grafik hin- und hergewechselt werden. Die maximale Verformung, die in der Grafik angezeigt wird, hängt von der Skalierungsoption ab. Dies wurde in [Abschnitt 2.4.2](#) erläutert.

Die Animation der Eigenformen kann mit Hilfe des Buttons, in der Symbolleiste am oberen Rand des Programms, aktiviert werden (siehe [Bild 4.1](#)).

4.1.1 Eigenfrequenzen

Tabelle 5.1 enthält die Eigenfrequenzen des ungedämpften Systems, die Ergebnistabelle ist in [Bild 4.3](#) dargestellt.

Die Bewegungsgleichung eines Mehrfreiheitsgradsystems ohne Dämpfung wird mit den vier verfügbaren Eigenwertlösern berechnet, die in [Abschnitt 2.4.5](#) erläutert wurden. Weitere theoretische Details finden sich zum Beispiel bei Bathe [6] oder Tedesco [9]. Die Bewegungsgleichung ist definiert mit

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{4.1}$$

wobei \mathbf{M} die Massenmatrix darstellt, die in [Abschnitt 2.4.4](#) erläutert wurde, \mathbf{K} die Steifigkeitsmatrix und \mathbf{u} die Eigenformen, die Translations- und Rotationsanteile enthalten

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)^T \tag{4.2}$$

5.1 Eigenfrequenzen

ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)

Form Nr.	A Eigenwert λ [1/s ²]	B Eigenkreisfrequenz ω [rad/s]	C Eigenfrequenz f [Hz]	D Eigenperiode T [s]
1	48.800	6.986	1.112	0.899
2	52.430	7.241	1.152	0.868
3	91.127	9.546	1.519	0.658
4	203.277	14.258	2.269	0.441
5	334.078	18.278	2.909	0.344
6	934.985	30.578	4.867	0.205
7	951.886	30.853	4.910	0.204
8	1259.222	35.486	5.648	0.177
9	1598.530	39.982	6.363	0.157
10	1797.200	42.393	6.747	0.148
11	1839.353	42.888	6.826	0.147
12	2397.951	48.969	7.794	0.128
13	2710.808	52.065	8.286	0.121
14	3558.001	59.649	9.493	0.105
15	3648.944	60.406	9.614	0.104
16	4486.852	66.984	10.661	0.094

Eigenfrequenzen Eigenformen knotenweise Eigenformen stabweise Eigenformen flächenweise Eigenformen netzpunktweise Massen in Netzpunkten Effektive Modalmassenfaktoren

Bild 4.3: Ergebnistabelle 5.1: Eigenwerte λ [1/s²], Kreisfrequenzen ω [rad/s], Eigenfrequenzen f [Hz] und Eigenperiode T in [s].

Der Eigenwert λ [1/s²] ist mit der Kreisfrequenz ω [rad/s] mit $\lambda_i = \omega_i^2$ verbunden. Die Eigenfrequenz f [Hz] wird dann mit $f = \omega/2\pi$ abgeleitet, und die Eigenperiode T [s] ist der Kehrwert der Frequenz, die mit $T = 1/f$ errechnet wird.

Für ein Mehrfreiheitsgradsystem (MDOF) gibt es mehrere Eigenwerte λ_i und zugehörige Eigenformen u_i .

4.1.2 Eigenformen

Jede Frequenz des Systems hat eine entsprechende Eigenform. Diese Eigenformen sind graphisch in der Arbeitsebene von RFEM dargestellt. Das Drop-Down-Menü kann verwendet werden, um zwischen den Eigenformen hin- und herzuwechseln. Dies wurde oben erläutert.

Alle Eigenformen sind in den Tabellen 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 enthalten. Der Unterschied in diesen Tabellen besteht allein in der Sortierung der Werte. In Tabelle 5.2 sind die normierten Verschiebungen u_x , u_y und u_z und die Verdrehungen φ_x , φ_y und φ_z nach Knoten geordnet. Diese Tabelle ist in **Bild 4.4** dargestellt.

5.2 Eigenformen knotenweise

ESF1 - Eigengewicht + Nutzlasten Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)

Knoten Nr.	Form Nr.	Normierte Verschiebungen			Normierte Verdrehungen		
		u_x []	u_y []	u_z []	φ_x [1/m]	φ_y [1/m]	φ_z [1/m]
1	1	-0.00287	-0.00155	0.00001	0.00004	0.00009	-0.00117
2	2	-0.00641	-0.98782	0.00304	-0.01141	-0.00059	0.00059
3	3	-0.00061	0.00064	0.00000	0.00002	0.00002	-0.00025
4	4	-0.00009	0.00009	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00004
5	5	-0.00042	0.00038	0.00000	0.00001	0.00001	-0.00017
6	6	-0.93222	0.00922	0.00230	-0.00199	0.00374	0.00290
7	7	-0.12315	-0.64377	0.01549	-0.12026	-0.01293	-0.00622
8	8	0.03905	-0.04234	0.00013	-0.00211	-0.00059	0.01624
9	9	0.70424	-0.70996	0.00066	-0.02643	-0.00393	0.28905
10	10	0.00897	-0.00343	-0.00001	-0.00005	0.00019	0.00141
11	11	0.00768	-0.00679	0.00000	-0.00021	0.00003	0.00280
12	12	-0.00186	0.00199	0.00000	0.00004	-0.00002	-0.00083
13	13	-0.00251	0.00257	0.00001	0.00003	-0.00006	-0.00108
14	14	-0.00146	0.00037	0.00002	0.00001	-0.00010	-0.00015
15	15	0.00016	-0.00014	0.00000	0.00000	0.00001	0.00006
16	16	0.00085	-0.00095	-0.00007	-0.00003	-0.00097	0.00044

Eigenfrequenzen Eigenformen knotenweise Eigenformen stabweise Eigenformen flächenweise Eigenformen netzpunktweise Massen in Netzpunkten Effektive Modalmassenfaktoren

Bild 4.4: Ergebnistabelle 5.2: Eigenformen nach Knoten geordnet. Die normierten Verschiebungen u_x , u_y und u_z und die normierten Verdrehungen φ_x , φ_y und φ_z werden dargestellt.

Tabelle 5.3 listet die Werte geordnet nach Stäben auf, Tabelle 5.4 geordnet nach Flächen und Tabelle 5.5 geordnet nach Netzpunkten. Wenn keine Flächen im Modell vorhanden sind, ist die Tabelle 5.4 nicht verfügbar.

Der Maximalwert von u und φ hängt von der gewählten Skalierungsoption ab, die in **Abschnitt 2.4.2** erläutert wurde. Die normierten Verschiebungen u sind dimensionslos und die normierten Verdrehungen φ werden in 1/m angegeben. Diese Einheiten resultieren aus dem Skalierungsprozess.

4.1.3 Massen in Netzpunkten

Abhängig von den importierten Massen (siehe [Abschnitt 2.2](#)), von den Einstellungen in der Maske *Details* (siehe [Abschnitt 2.12](#)) und vom endgültig zugewiesenen *Massenfall* oder von der zugewiesenen *Massenkombination* (siehe [Abschnitt 2.4.3](#)) werden die Massen in Netzpunkten berechnet. Es werden hier nur die Massen in den translatorischen Richtungen m_x , m_y und m_z angegeben. Die Summe der Massen wird am Ende der Tabelle angezeigt. Die Tabelle ist in [Bild 4.5](#) dargestellt. Darüber hinaus sind die Positionen der Netzpunkte im globalen Koordinatensystem aufgelistet.

5.6 Massen in Netzpunkten

ESF1 - Eigengewicht Eigenform 1 (f : 1.302 Hz)

Netzpunkt Nr.	Objekt		Stelle			Masse		
	Typ	Nr.	X [m]	Y [m]	Z [m]	m_x [kg]	m_y [kg]	m_z [kg]
34	Stab	54	9.000	5.000	0.000	100.95	100.95	100.95
35	Stab	55	10.500	1.000	-8.000	95.33	95.33	95.33
36	Stab	56	10.500	1.000	-4.000	95.33	95.33	95.33
37	Stab	57	10.500	2.000	-8.000	18.76	18.76	18.76
38	Stab	58	10.500	2.000	-4.000	18.76	18.76	18.76
39	Stab	59	10.500	3.000	-8.000	95.33	95.33	95.33
40	Stab	60	10.500	3.000	-4.000	95.33	95.33	95.33
41	Stab	67	12.500	1.000	-8.000	95.33	95.33	95.33
42	Stab	68	12.500	1.000	-4.000	95.33	95.33	95.33
43	Stab	75	12.500	2.000	-8.000	18.76	18.76	18.76
44	Stab	76	12.500	2.000	-4.000	18.76	18.76	18.76
45	Stab	69	12.500	3.000	-8.000	95.33	95.33	95.33
46	Stab	70	12.500	3.000	-4.000	95.33	95.33	95.33

Eigenfrequenzen Eigenformen knotenweise Eigenformen stabweise Eigenformen flächenweise Eigenformen netzpunktweise Massen in Netzpunkten Effektive Modalmassenfaktoren

Bild 4.5: Ergebnistabelle 5.6: Die Massen in die translatorischen Richtungen m_x , m_y und m_z , die für jeden Netzpunkt bestimmt wurden, sind aufgelistet.

4.1.4 Effektive Modalmassenfaktoren

Die Tabelle 5.7 gibt die Modalmassen M_i , die effektiven Modalmassen m_e und die effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} an; die Tabelle ist in [Bild 4.6](#) dargestellt. Die effektiven Modalmassen beschreiben, wie viel Masse durch jede Eigenform des Systems in jede Richtung aktiviert wird.

5.7 Effektive Modalmassenfaktoren

ESF1 - Eigengewicht Eigenform 7 (f : 5.988 Hz)

Form Nr.	Modale Masse M_i [kg]	Effektive Modalmasse			Effektiver Modalmassenfaktor					
		m_{ex} [kg]	m_{ey} [kg]	m_{ez} [kg]	$m_{\varphi x}$ [kg.m ²]	$m_{\varphi y}$ [kg.m ²]	$m_{\varphi z}$ [kg.m ²]	$f_{me x}$ [-]	$f_{me y}$ [-]	$f_{me z}$ [-]
7	18145.80	27854.02	0.00	1.19	0.00	11845.76	2.19	0.929	0.000	0.000
8	7896.70	0.45	11.71	0.00	1895.19	0.61	108684.75	0.000	0.000	0.000
9	4030.57	0.07	77.08	0.00	11065.27	0.99	6549.99	0.000	0.003	0.000
10	2000.78	0.01	51.86	0.94	7497.43	34.39	4015.20	0.000	0.002	0.000
11	415.17	6.55	0.04	391.51	55.44	18140.58	0.72	0.000	0.000	0.013
12	405.42	8.38	0.00	1613.91	200.30	74445.11	2.07	0.000	0.000	0.054
13	1023.37	0.00	0.04	0.18	0.24	8.50	8.73	0.000	0.000	0.000
14	1714.53	0.01	10.92	1.82	1567.77	101.88	1259.49	0.000	0.000	0.000
15	345.39	0.11	0.41	0.07	162.69	5.16	13.39	0.000	0.000	0.000
16	360.86	0.08	0.00	0.16	1682.89	0.52	6.24	0.000	0.000	0.000
17	4870.12	274.22	0.00	8674.31	0.13	90666.57	0.00	0.009	0.000	0.289
18	4293.08	32.72	0.00	9865.09	0.15	23083.54	0.01	0.001	0.000	0.329
19	15250.81	1648.62	0.00	129.47	0.36	84147.82	0.19	0.055	0.000	0.004

Eigenfrequenzen Eigenformen knotenweise Eigenformen stabweise Eigenformen flächenweise Eigenformen netzpunktweise Massen in Netzpunkten Effektive Modalmassenfaktoren

Bild 4.6: Ergebnistabelle 5.7: Modalmassen M_i , effektive Modalmassen in die translatorischen Richtungen m_{ex} , m_{ey} und m_{ez} und um die globale Achsen $m_{\varphi x}$, $m_{\varphi y}$ und $m_{\varphi z}$ sind aufgelistet. Es sind zudem die effektiven Modalmassenfaktoren $f_{me x}$, $f_{me y}$ und $f_{me z}$ angegeben.

Die Modalmasse wird definiert mit

$$M_i = \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u}_i \tag{4.3}$$

wobei \mathbf{u}_i der Eigenvektor einer Eigenform i ist, wie in der [Gleichung 4.2](#) definiert, und \mathbf{M} die Massenmatrix, die in [Abschnitt 2.4.4](#) erläutert wurde. Die Modalmasse M_i ist unabhängig von der Richtung. Die Modalmasse ändert sich je nach gewählter Skalierungsoption für die Eigenformen (siehe [Abschnitt 2.4.2](#)); wenn die Option $\mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{u}_i = 1$ kg ausgewählt ist, gilt für alle Modalmassen $M_i = 1$ kg.

Die effektiven Modalmassen m_{ij}^{eff} beschreiben die Massen, die in j -Richtung beschleunigt werden, wobei $j = 1, 2, 3$ für Translationen und $j = 4, 5, 6$ für Rotationen gilt, getrennt für jede Form i . Diese Massen sind unabhängig von der Skalierungsoption für Eigenformen und stehen in direktem Zusammenhang mit den Beteiligungsfaktoren $\Gamma_{i,j}$.

$$\Gamma_{i,j} = \frac{1}{M_i} \mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{T}_j \quad (4.4)$$

wobei \mathbf{T}_j die j^{te} -Spalte in Matrix \mathbf{T} ist,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (Z - Z_0) & -(Y - Y_0) \\ 0 & 1 & 0 & -(Z - Z_0) & 0 & (X - X_0) \\ 0 & 0 & 1 & (Y - Y_0) & -(X - X_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

mit X, Y und Z als globale Koordinaten des betrachteten FE-Knotens, dargestellt in Tabelle 5.6 (siehe Bild 4.5), und X_0, Y_0 und Z_0 als Massenschwerpunkt, angegeben im Register **Massenfälle** → **Allgemein** in *RF-DYNAM Pro* (siehe Abschnitt 2.2). Diese Matrix \mathbf{T} gibt es für jeden FE-Knoten. Die Definition der Beteiligungsfaktoren, die auch die Rotationsfreiheitsgrade definieren, ist genauer in [19] in Abschnitt 15.7.5 beschrieben. Der Beteiligungsfaktor Γ_{ij} ist dimensionslos für Translationen und hat die Einheit [m] für Verdrehungen.

Die effektiven Modalmassen werden definiert mit

$$m_{ij}^{\text{eff}} = M_i \cdot \Gamma_{ij}^2 \quad (4.6)$$

wobei die effektiven Massen für Verschiebungen m_{eX}, m_{eY} und m_{eZ} in kg und für Verdrehungen $m_{\varphi X}, m_{\varphi Y}$ und $m_{\varphi Z}$ in kgm^2 angegeben werden.



Die Summe der effektiven Modalmassen $\sum m_e$ ist in Tabelle 5.7 (siehe Bild 4.6) angegeben. In translatorischen Richtungen sind diese Summen gleich der Gesamtmasse der Struktur M_{total} (siehe Tabelle 5.6 in Bild 4.5), ausgenommen sind Massen die nicht aktiviert werden, *d.h.* Massen in festen Lagern. Die vollständige Masse wird nur erreicht, wenn alle Eigenwerte der Struktur berechnet werden.

Die effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} werden benötigt, um zu entscheiden, ob eine spezifische Form für das Antwortspektrenverfahren oder das Ersatzlastverfahren in Betracht gezogen werden muss. In **EN 1998-1** in **Abschnitt 4.3.3.3** ist festgelegt, dass „die Summe der effektiven Modalmassen der zu berücksichtigenden Modalbeiträge mindestens 90% der Gesamtmasse des Bauwerks“ erreicht und dass „alle Modalbeiträge berücksichtigt werden, deren effektive Modalmassen mehr als 5% der Gesamtmasse betragen“ [1]. Die effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} werden definiert mit:

$$f_{me} = \frac{m_e}{\sum m_e} \quad (4.7)$$

Weitere Informationen zur Modalanalyse gibt es zum Beispiel in den Büchern von Meskouris *et al.* [20] und Tedesco *et al.* [9].

4.1.5 Export nach Excel / CSV

Alle Ergebnistabellen, die in diesem Kapitel diskutiert wurden, lassen sich nach *Excel* exportieren oder als *CSV*-Datei speichern. Diese Option befindet sich unter **Datei** → **Export**. Eine Liste der Ergebnistabellen ist in Bild 4.7 gezeigt.

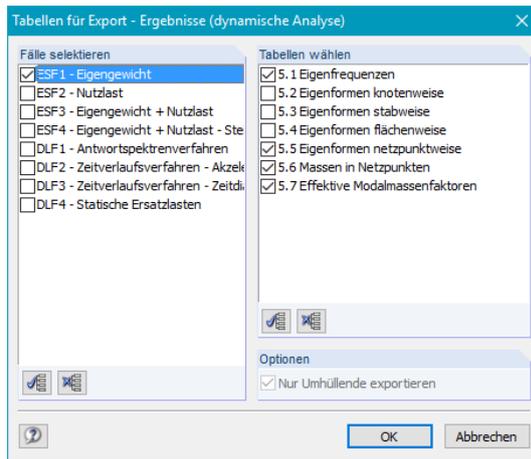


Bild 4.7: Ergebnistabellen eines *Eigenschwingungsfalles* zum exportieren.

4.2 Dynamische Lastfälle - Antwortspektrenverfahren

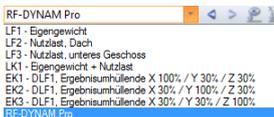
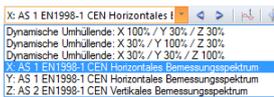
Die Ergebnistabellen, die zum *Antwortspektrenverfahren* gehören, sind verfügbar, wenn der entsprechende *DLF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.11 bis 5.16 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *Antwortspektrenverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Antwortspektrenverfahren wurden in den [Abschnitten 2.5](#) und [2.9](#) beschrieben.

Es ist möglich zwischen Ergebnissen aus den einzelnen Erregungsrichtungen X, Y und Z und den überlagerten Ergebnissen (SRSS- oder 100% / 30%-Regel) mit Hilfe des Drop-Down-Menüs hin- und herzuwechseln. Die tabellierte Ergebnisse und auch die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM aktualisieren sich entsprechend der getroffenen Auswahl.



Nur in den dynamischen Ergebnistabellen 5.11 bis 5.16 sind die Ergebnisse separat für die einzelnen Anregungsrichtungen verfügbar. Die exportierten *EKs* enthalten nur die endgültigen Ergebnisse, nach Kombination der Richtungen.

Wenn der Export von Ergebniskombinationen wie in [Abschnitt 2.9.5](#) beschrieben ausgewählt wird, sind die *EKs* in der Drop-Down-Liste in der *Symbolleiste* in RFEM ersichtlich. Die *EKs* können auch angezeigt werden über **Projekt-Navigators-Daten** → **Lastfälle und Kombinationen** → **Ergebniskombinationen** oder über den Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, der über die Schaltfläche aufgerufen werden kann.



4.2.1 Lagerkräfte

Die Knotenlagerkräfte werden in Tabelle 5.11 angezeigt, dargestellt in Bild 4.8. In ähnlicher Weise werden die Linienlagerkräfte in Tabelle 5.12 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte und die dazugehörigen Lagerkräfte angegeben.

Knoten Nr.		Lagerkräfte			Lagermomente		
		Px [N]	Py [N]	Pz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
3	max Px	259.46	5.48	-1844.80	0.00	0.00	0.02
	min Px	-259.46	-5.48	1844.80	0.00	0.00	-0.02
	max Py	56.89	25.00	-271.01	0.00	0.00	0.01
	min Py	-56.89	-25.00	271.01	0.00	0.00	-0.01
	max Pz	-239.53	-3.39	1998.26	0.00	0.00	-0.02
	min Pz	239.53	3.39	-1998.26	0.00	0.00	0.02
	max Mx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	min Mx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	max My	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	min My	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	max Mz	256.07	6.38	-1773.83	0.00	0.00	0.02
	min Mz	-256.07	-6.38	1773.83	0.00	0.00	-0.02
6	max Px	262.21	-0.21	-1842.34	0.00	0.00	0.07
	min Px	-262.21	0.21	1842.34	0.00	0.00	-0.07
	max Py	-2.21	24.58	-121.86	0.00	0.00	0.00
	min Py	2.21	-24.58	121.86	0.00	0.00	0.00

Bild 4.8: Ergebnistabelle 5.11: Maximale und minimale Knotenlagerkräfte und -momente in die drei Richtungen X, Y und Z zusammen mit den zugehörigen Lagerkräften werden angegeben.

4.2.2 Knotenverformungen

Die Knotenverformungen werden in Tabelle 5.13, wie in Bild 4.9 dargestellt, angegeben. Es werden Maximal- und Minimalwerte angegeben.

Knoten Nr.		Verschiebungen			Verdrehungen		
		ux [mm]	uy [mm]	uz [mm]	φx [mrad]	φy [mrad]	φz [mrad]
1	max	2.60	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
	min	-2.60	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	0.00
2	max	1.54	0.01	0.01	0.01	0.05	0.00
	min	-1.54	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	0.00
3	max	0.00	0.00	0.00	0.01	0.55	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.55	0.00
4	max	2.63	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
	min	-2.63	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01
5	max	1.56	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
	min	-1.56	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	-0.01
6	max	0.00	0.00	0.00	0.01	0.56	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.56	0.00
7	max	2.56	0.01	0.06	0.05	0.15	0.05
	min	-2.56	-0.01	-0.06	-0.05	-0.15	-0.05
8	max	1.52	0.01	0.06	0.01	0.13	0.02
	min	-1.52	-0.01	-0.06	-0.01	-0.13	-0.02

Bild 4.9: Ergebnistabelle 5.13: Maximale und minimale Knotenverschiebungen u_x , u_y , u_z und Verdrehungen φ_x , φ_y und φ_z werden angegeben.

4.2.3 Pseudo-Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten

Zusätzlich zu den Standardergebnissen werden Pseudo-Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten in Tabelle 5.14, in Bild 4.10 dargestellt, und in Tabelle 5.15, dargestellt in Bild 4.11, angegeben. Es werden Maximal- und Minimalwerte angegeben.



Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten sind nicht in den Lastfällen oder Ergebniskombinationen enthalten, die in das Hauptprogramm RFEM exportiert werden.

5.14 Knoten - Pseudo-Geschwindigkeiten

DLF1 - Antwortspektrenverfahren X: AS 1 EN1998-1 CEN Horizontales I

Knoten Nr.		Geschwindigkeiten			Winkelgeschwindigkeiten		
		u'x [mm/s]	u'y [mm/s]	u'z [mm/s]	φ'x [mrad/s]	φ'y [mrad/s]	φ'z [mrad/s]
1	max	97.96	0.53	0.52	2.05	1.69	0.20
	min	-97.96	-0.53	-0.52	-2.05	-1.69	-0.20
2	max	58.29	0.26	0.29	1.12	1.86	0.17
	min	-58.29	-0.26	-0.29	-1.12	-1.86	-0.17
3	max	0.00	0.00	0.00	0.58	20.94	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-0.58	-20.94	0.00
4	max	99.04	0.59	0.52	2.04	1.69	0.28
	min	-99.04	-0.59	-0.52	-2.04	-1.69	-0.28
5	max	58.95	0.36	0.29	1.13	1.89	0.44
	min	-58.95	-0.36	-0.29	-1.13	-1.89	-0.44
6	max	0.00	0.00	0.00	0.59	21.17	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-0.59	-21.17	0.00
7	max	96.47	0.49	2.24	2.38	5.81	1.78
	min	-96.47	-0.49	-2.24	-2.38	-5.81	-1.78
8	max	57.40	0.30	2.24	0.75	4.86	1.03
	min	-57.40	-0.30	-2.24	-0.75	-4.86	-1.03
9	max	0.00	0.00	0.00	0.34	19.10	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-0.34	-19.10	0.00
10	max	98.04	0.43	4.77	2.24	2.02	0.98
	min	-98.04	-0.43	-4.77	-2.24	-2.02	-0.98

Knoten - Lagerkräfte | Knoten - Verformungen | Knoten - Pseudo-Geschwindigkeiten | Knoten - Pseudo-Beschleunigungen | Stäbe - Schnittgrößen | Flächen - Schnittgrößen | Flächen - Grundspannungen | Flächen - Grunddehnungen

Bild 4.10: Ergebnistabelle 5.14: Maximale und minimale Pseudo-Geschwindigkeiten u'_x , u'_y , u'_z und Winkelgeschwindigkeiten φ'_x , φ'_y und φ'_z werden angegeben.

5.15 Knoten - Pseudo-Beschleunigungen

DLF1 - Antwortspektrenverfahren X: AS 1 EN1998-1 CEN Horizontales I

Knoten Nr.		Beschleunigungen			Winkelbeschleunigungen		
		u''x [mm/s²]	u''y [mm/s²]	u''z [mm/s²]	φ''x [mrad/s²]	φ''y [mrad/s²]	φ''z [mrad/s²]
1	max	3697.28	31.43	43.47	190.79	157.85	11.78
	min	-3697.28	-31.43	-43.47	-190.79	-157.85	-11.78
2	max	2249.99	14.31	22.01	110.89	85.27	8.13
	min	-2249.99	-14.31	-22.01	-110.89	-85.27	-8.13
3	max	0.00	0.00	0.00	56.24	811.63	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-56.24	-811.63	0.00
4	max	3738.29	34.68	43.42	190.21	157.95	14.40
	min	-3738.29	-34.68	-43.42	-190.21	-157.95	-14.40
5	max	2275.61	20.03	21.97	111.31	86.19	17.38
	min	-2275.61	-20.03	-21.97	-111.31	-86.19	-17.38
6	max	0.00	0.00	0.00	58.22	820.74	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-58.22	-820.74	0.00
7	max	3640.86	30.93	98.04	169.95	255.25	79.73
	min	-3640.86	-30.93	-98.04	-169.95	-255.25	-79.73
8	max	2209.26	19.53	96.91	58.65	208.55	81.49
	min	-2209.26	-19.53	-96.91	-58.65	-208.55	-81.49
9	max	0.00	0.00	0.00	30.37	730.56	0.00
	min	0.00	0.00	0.00	-30.37	-730.56	0.00
10	max	3702.89	26.83	262.04	160.40	187.17	42.30
	min	-3702.89	-26.83	-262.04	-160.40	-187.17	-42.30

Knoten - Lagerkräfte | Knoten - Verformungen | Knoten - Pseudo-Geschwindigkeiten | Knoten - Pseudo-Beschleunigungen | Stäbe - Schnittgrößen | Flächen - Schnittgrößen | Flächen - Grundspannungen | Flächen - Grunddehnungen

Bild 4.11: Ergebnistabelle 5.15: Maximale und minimale Pseudo-Beschleunigungen u''_x , u''_y , u''_z und Winkelbeschleunigungen φ''_x , φ''_y und φ''_z werden angegeben.

4.2.4 Stabschnittgrößen

Die Stabschnittgrößen werden in Tabelle 5.16 gelistet, wie in Bild 4.12 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte zusammen mit den zugehörigen Schnittgrößen angegeben.

5.16 Stäbe - Schnittgrößen

DLF1 - Antwortspektrenverfahren X: AS 1 EN1998-1 CEN Horizontales I

Stab Nr.	Knoten Nr.	Stelle	Im Punkt von	Normalkraft N [N]	Querkraft		Momente		
					Vy [N]	Vz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
1	2	0.000	max N	1147.98	461.43	-25.64	0.04	12.69	875.89
			min N	-1147.98	-461.43	25.64	-0.04	-12.69	-875.89
			max Vy	718.79	736.95	31.17	0.05	-20.63	1425.32
			min Vy	-718.79	-736.95	-31.17	-0.05	20.63	-1425.32
			max Vz	-424.49	331.21	69.35	0.02	-58.76	657.63
			min Vz	424.49	-331.21	-69.35	-0.02	58.76	-657.63
			max Mx	793.45	732.70	27.16	0.05	-21.62	1414.99
			min Mx	-793.45	-732.70	-27.16	-0.05	21.62	-1414.99
			max My	182.66	190.69	-51.10	-0.01	79.75	-375.84
			min My	-182.66	-190.69	51.10	0.01	-79.75	375.84
1	1	4.000	max Mz	705.38	736.86	31.99	0.05	-21.03	1425.49
			min Mz	-705.38	-736.86	-31.99	-0.05	21.03	-1425.49
			max N	1147.98	461.43	-25.64	0.04	12.69	875.89
			min N	-1147.98	-461.43	25.64	-0.04	-12.69	-875.89
			max Vy	718.79	736.95	31.17	0.05	-20.63	1425.32
			min Vy	-718.79	-736.95	-31.17	-0.05	20.63	-1425.32
			max Mx	793.45	732.70	27.16	0.05	-21.62	1414.99
			min Mx	-793.45	-732.70	-27.16	-0.05	21.62	-1414.99
			max My	182.66	190.69	-51.10	-0.01	79.75	-375.84
			min My	-182.66	-190.69	51.10	0.01	-79.75	375.84

Knoten - Lagerkräfte | Knoten - Verformungen | Knoten - Pseudo-Geschwindigkeiten | Knoten - Pseudo-Beschleunigungen | Stäbe - Schnittgrößen | Flächen - Schnittgrößen | Flächen - Grundspannungen | Flächen - Grunddehnungen

Bild 4.12: Ergebnistabelle 5.16: Maximale und minimale Normalkräfte N, Querkräfte V_y und V_z sowie Momente M_x , M_y und M_z , zusammen mit deren zugehörigen Schnittgrößen, werden angegeben.

4.2.5 Flächenschnittgrößen

Tabelle 5.17 enthält die Flächenschnittgrößen wie in Bild 4.13 dargestellt. Es werden Maximal- und Minimalwerte zusammen mit den Koordinaten der FE-Knoten angegeben.

Fläche Nr.	FE-Netzknoten	B	Knotenkoordinaten			Momente			Querkräfte		Normalkräfte		
			X [m]	Y [m]	Z [m]	m_x [Nm/m]	m_y [Nm/m]	m_{xy} [Nm/m]	v_x [N/m]	v_y [N/m]	n_x [N/m]	n_y [N/m]	n_z [N/m]
1	1	max	0.000	0.000	-8.000	2176.103	438.208	960.760	13462.67	3703.28	31271.13	3036.78	9937.45
		min	0.000	0.000	-8.000	-2176.103	-438.208	-960.760	-13462.67	-3703.28	-31271.13	-3036.78	-9937.45
	4	max	0.000	5.000	-8.000	2208.785	433.150	959.259	13653.48	3770.96	31614.85	2847.28	9888.65
		min	0.000	5.000	-8.000	-2208.785	-433.150	-959.259	-13653.48	-3770.96	-31614.85	-2847.28	-9888.65
	7	max	4.000	0.000	-8.000	3419.461	645.325	2169.898	22569.25	6842.98	9254.97	9231.93	5633.38
		min	4.000	0.000	-8.000	-3419.461	-645.325	-2169.898	-22569.25	-6842.98	-9254.97	-9231.93	-5633.38
	10	max	4.000	1.000	-8.000	140.375	125.123	478.214	507.70	5178.47	1622.98	14969.45	5041.36
		min	4.000	1.000	-8.000	-140.375	-125.123	-478.214	-507.70	-5178.47	-1622.98	-14969.45	-5041.36
	12	max	4.000	2.000	-8.000	935.106	218.171	306.933	3779.42	2054.84	6858.52	22192.58	1777.55
		min	4.000	2.000	-8.000	-935.106	-218.171	-306.933	-3779.42	-2054.84	-6858.52	-22192.58	-1777.55
	14	max	4.000	3.000	-8.000	1251.131	227.006	329.783	5023.83	1959.18	8900.17	23349.91	1654.82
		min	4.000	3.000	-8.000	-1251.131	-227.006	-329.783	-5023.83	-1959.18	-8900.17	-23349.91	-1654.82
	16	max	4.000	4.000	-8.000	110.038	129.158	499.118	300.34	5313.55	1326.15	14995.51	5232.06
		min	4.000	4.000	-8.000	-110.038	-129.158	-499.118	-300.34	-5313.55	-1326.15	-14995.51	-5232.06
	18	max	4.000	5.000	-8.000	3469.194	646.261	2195.934	22941.19	6943.69	9201.41	9504.59	5954.92
		min	4.000	5.000	-8.000	-3469.194	-646.261	-2195.934	-22941.19	-6943.69	-9201.41	-9504.59	-5954.92
	126	max	1.000	0.500	-8.000	147.793	56.436	83.129	1641.71	212.64	4473.31	1596.45	3467.03
		min	1.000	0.500	-8.000	-147.793	-56.436	-83.129	-1641.71	-212.64	-4473.31	-1596.45	-3467.03

Bild 4.13: Ergebnistabelle 5.17: Maximale und minimale Normalkräfte n_x , n_y und n_z , Querkräfte v_x und v_y sowie Momente m_x , m_y und m_{xy} werden angegeben.

4.2.6 Flächengrundspannungen und -dehnungen

Flächengrundspannungen und -dehnungen werden in den Tabellen 5.18 und 5.19 aufgelistet. Die Spannungen sind in Bild 4.14 dargestellt.

Fläche Nr.	FE-Netzknoten	B	Knotenkoordinaten			Normal- und Schubspannungen							
			X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [kN/cm ²]	σ_y [kN/cm ²]	σ_{xy} [kN/cm ²]	σ_x [kN/cm ²]	σ_y [kN/cm ²]	σ_{xy} [kN/cm ²]	τ_x [kN/cm ²]	τ_y [kN/cm ²]
1	1	max	0.000	0.000	-8.000	0.032	0.008	0.017	0.070	0.012	0.028	0.039	0.001
		min	0.000	0.000	-8.000	-0.032	-0.008	-0.017	-0.070	-0.012	-0.028	-0.039	-0.001
	4	max	0.000	5.000	-8.000	0.032	0.008	0.017	0.071	0.012	0.028	0.040	0.001
		min	0.000	5.000	-8.000	-0.032	-0.008	-0.017	-0.071	-0.012	-0.028	-0.040	-0.001
	7	max	4.000	0.000	-8.000	0.086	0.018	0.054	0.075	0.012	0.047	0.116	-0.008
		min	4.000	0.000	-8.000	-0.086	-0.018	-0.054	-0.075	-0.012	-0.047	-0.116	0.008
	10	max	4.000	1.000	-8.000	0.004	0.009	0.009	0.002	0.011	0.014	0.015	0.000
		min	4.000	1.000	-8.000	-0.004	-0.009	-0.009	-0.002	-0.011	-0.014	-0.015	0.000
	12	max	4.000	2.000	-8.000	0.026	0.011	0.006	0.018	0.018	0.008	0.028	0.009
		min	4.000	2.000	-8.000	-0.026	-0.011	-0.006	-0.018	-0.018	-0.008	-0.028	-0.009
	14	max	4.000	3.000	-8.000	0.035	0.011	0.007	0.024	0.019	0.009	0.037	0.009
		min	4.000	3.000	-8.000	-0.035	-0.011	-0.007	-0.024	-0.019	-0.009	-0.037	-0.009
	16	max	4.000	4.000	-8.000	0.003	0.009	0.009	0.002	0.011	0.015	0.015	0.001
		min	4.000	4.000	-8.000	-0.003	-0.009	-0.009	-0.002	-0.011	-0.015	-0.015	-0.001
	18	max	4.000	5.000	-8.000	0.087	0.018	0.055	0.076	0.012	0.048	0.117	-0.008
		min	4.000	5.000	-8.000	-0.087	-0.018	-0.055	-0.076	-0.012	-0.048	-0.117	0.008
	126	max	1.000	0.500	-8.000	0.004	0.001	0.001	0.004	0.002	0.004	0.004	0.001
		min	1.000	0.500	-8.000	-0.004	-0.001	-0.001	-0.004	-0.002	-0.004	-0.004	-0.001

Bild 4.14: Ergebnistabelle 5.18: Es werden maximale und minimale Normal- und Schubspannungen angegeben.

4.2.7 Exportierte Ergebniskombinationen

Wenn ein Antwortspektrenverfahren im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt wird, werden nur Ergebniskombinationen von den endgültigen Ergebnissen generiert. Intern in *RF-DYNAM Pro* werden zwei Schritte der Ergebniskombination durchgeführt: (1) Die modalen Antworten werden mit der *SRSS* oder *CQC*-Regel kombiniert, und (2) die Ergebnisse aus unterschiedlichen Anregungsrichtungen werden mit der *SRSS* oder der 100% / 30% (40%)-Regel kombiniert. Diese endgültigen Ergebnisse werden in *EKs* exportiert.

Eine Liste der exportierten Ergebniskombinationen wird im *Lastfälle und Kombination bearbeiten* Dialog gezeigt, dieser ist in Bild 4.15 dargestellt.

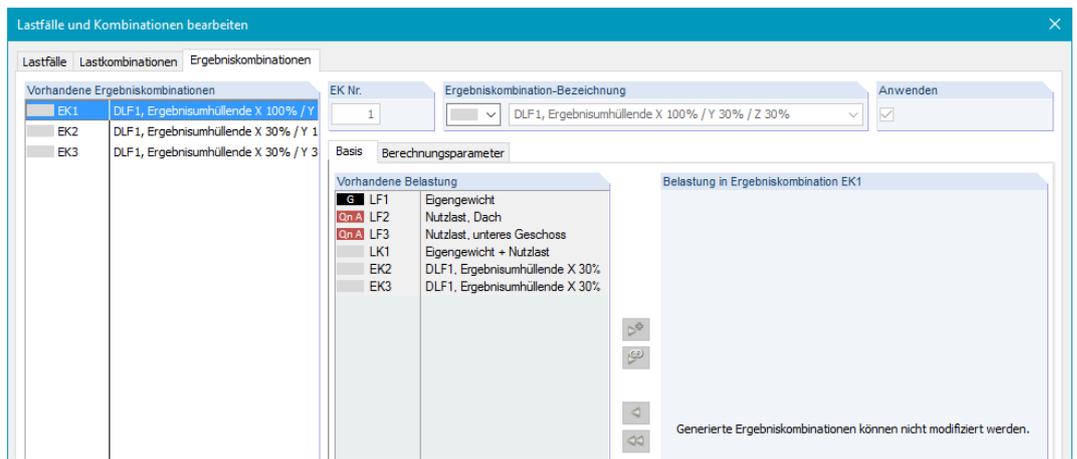


Bild 4.15: Exportierte Ergebniskombinationen aus dem Antwortspektrenverfahren, angezeigt im *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* Dialog. Nur die EKs der Richtungsüberlagerung werden exportiert.

Die exportierten EKs und deren Berechnungsparameter können nicht verändert werden.

4.2.8 Export nach Excel / CSV

Alle Ergebnistabellen, die in diesem Kapitel diskutiert wurden, lassen sich nach *Excel* exportieren oder als *CSV*-Datei speichern. Diese Option befindet sich unter **Datei** → **Export**. Eine Liste der Ergebnistabellen ist in **Bild 4.16** gezeigt. Das Kontrollkästchen *Nur Umhüllende exportieren* ist standardmäßig selektiert, damit werden nur Ergebnistabellen die zu den dynamischen Umhüllenden gehören (wie zum Beispiel *Dynamische Umhüllende: X100% / Y30% / Z30%*) exportiert. Wenn diese Selektion aufgehoben wird, werden auch die Tabellen der einzelnen Richtungen exportiert.

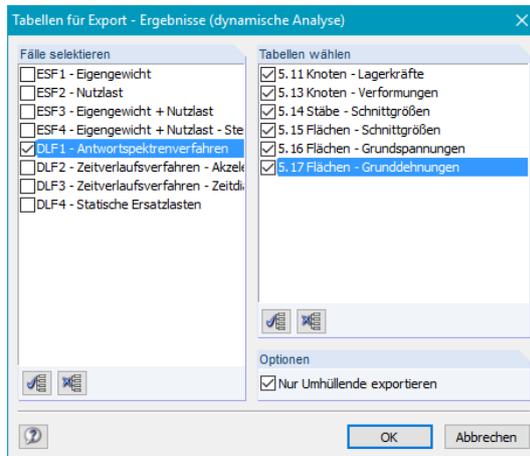
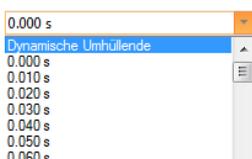


Bild 4.16: Export von Ergebnistabellen eines *Dynamischen Lastfalles* mit dem ein *Antwortspektrenverfahren* durchgeführt wurde.

4.3 Dynamische Lastfälle - Zeitverlaufsverfahren

Die Ergebnistabellen, die zum *Zeitverlaufsverfahren* gehören, werden angezeigt, wenn der entsprechende *DLF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.18 bis 5.26 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *lineare Zeitverlaufsverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* und das *nichtlineare Zeitverlaufsverfahren* zu dem Modul *RF-DYNAM Pro - Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Zeitverlaufsverfahren wurden in **Abschnitt 2.10** erläutert. Die Definition von Akzelerogrammen wurde in **Abschnitt 2.6** und von Zeitdiagrammen in **Abschnitt 2.7** beschrieben.

Ergebnisse sind getrennt für jeden Zeitschritt verfügbar. Die *Dynamische Umhüllende* ist eine Ergebnisumhüllende, welche die maximalen und minimalen Ergebnisse über alle Zeitschritte

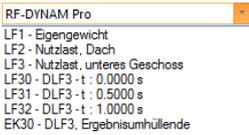


ausgibt. Es ist möglich zwischen den Ergebnissen unter Verwendung des Drop-Down-Menüs hin- und herzuwechseln. Die tabellierte Ergebnisse und auch die Grafik in der Arbeitsebene von RFEM aktualisieren sich entsprechend der getroffenen Auswahl.

Die Ergebnisse können auch als Funktion der Zeit im *Zeitverlaufdiagramm* angezeigt werden, das über die Schaltfläche aufgerufen werden kann. Diese Schaltfläche ist im Tabellenmenü oder im *Panel* verfügbar.

Die Animation der Zeitverlaufsergebnisse in der Grafik kann über die Schaltfläche aktiviert werden, diese ist in der Symbolleiste am oberen Rand des Programms oder im *Panel* zu finden. Wenn das *Zeitverlaufdiagramm* gleichzeitig geöffnet ist, läuft der Positionsanzeiger durch den Plot während die Animation läuft.

Wenn der Export von Lastfällen und / oder Ergebniskombinationen wie in [Abschnitt 2.10.7](#) beschrieben, ausgewählt wird, sind die *LKs* und die *EKs* in der Drop-Down-Liste in der *Symbolleiste* in RFEM ersichtlich. Die *LKs* können auch angezeigt werden über **Projekt-Navigator-Daten** → **Lastfälle und Kombinationen** → **Lastfälle** oder gleichermaßen für *EKs* über **Ergebniskombinationen**. Lastfälle und Ergebniskombinationen können über den Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* aufgerufen werden. Die exportierten Lastfälle von einem Zeitverlaufsverfahren enthalten keine Lasten, sondern nur die Ergebnisse zu dem exportieren Zeitschritt.



4.3.1 Lagerkräfte

Die Knotenlagerkräfte werden in Tabelle 5.18 angezeigt, dargestellt in [Bild 4.17](#). In ähnlicher Weise werden die Lagerkräfte von Linien in Tabelle 5.19 dargestellt. Wenn die *Dynamische Umhüllende* gewählt ist, werden Maximalwerte angegeben. Wenn ein spezifischer Zeitschritt ausgewählt ist, wird das Ergebnis zu diesem Zeitpunkt aufgelistet.

Knoten Nr.	Lagerkräfte			Lagermomente		
	Px [N]	Py [N]	Pz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
3	115.638	406.680	3687.770	0.000	0.000	0.148
6	113.055	462.447	4903.150	0.000	0.000	0.149
9	7121.110	423.768	8271.750	0.000	0.000	0.138
20	6785.320	488.667	9437.550	0.000	0.000	0.103
23	14.964	394.549	7309.540	0.000	0.000	0.392
34	14.094	454.354	7398.870	0.000	0.000	0.418
49	16.232	257.665	656.729	0.000	0.000	0.336
60	15.390	195.305	1208.630	0.000	0.000	0.363

Bild 4.17: Ergebnistabelle 5.18: Knotenlagerkräfte und Lagermomente in die drei Richtungen X, Y und Z sind aufgelistet.

4.3.2 Knotenverformungen

Die Knotenverformungen werden in Tabelle 5.20, wie in [Bild 4.18](#) dargestellt, angegeben. Wenn die *Dynamische Umhüllende* gewählt ist, werden Maximalwerte angegeben. Wenn ein spezifischer Zeitschritt ausgewählt ist, wird das Ergebnis zu diesem Zeitpunkt aufgelistet.

Knoten Nr.	Verschiebungen			Verdrehungen		
	ux [mm]	uy [mm]	uz [mm]	φx [rad]	φy [rad]	φz [rad]
1	-0.1	1.0	0.0	0.00	0.00	0.00
2	0.0	0.8	0.0	0.00	0.00	0.00
3	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
4	-0.1	1.0	0.0	0.00	0.00	0.00
5	0.0	0.8	0.0	0.00	0.00	0.00
6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
7	-0.1	1.0	0.0	0.00	0.00	0.00
8	-0.1	0.8	0.0	0.00	0.00	0.00
9	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
10	-0.1	1.0	0.0	0.00	0.00	0.00
11	-0.1	0.8	0.0	0.00	0.00	0.00
12	-0.1	1.0	0.0	0.00	0.00	0.00
13	-0.1	0.8	-0.1	0.00	0.00	0.00

Bild 4.18: Ergebnistabelle 5.20: Knotenverschiebungen u_x , u_y , u_z und Verdrehungen φ_x , φ_y und φ_z sind aufgelistet.

4.3.3 Stabschnittgrößen

Die Stabschnittgrößen werden in Tabelle 5.21 angezeigt, wie in Bild 4.19 dargestellt. Maximalwerte werden im Fall einer *Dynamischen Umhüllenden* angegeben. Ergebnisse werden an mehreren Stabpositionen ausgegeben, die X-Koordinaten sind angegeben.

Stab Nr.	Knoten	X [m]	Normalkraft N [N]	Querkraft Vy [N]	Vz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
1	2	0.000	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	382.204	27.717
		0.333	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	318.509	30.096
		0.667	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	254.815	32.475
		1.000	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	191.120	34.854
		1.333	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	127.426	37.232
		1.667	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	63.731	39.611
		2.000	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	0.039	41.990
		2.000	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	0.035	41.990
		2.333	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	-63.658	44.369
		2.667	43.121	-7.136	-191.083	-0.078	-127.352	46.748
2	3	0.000	2095.218	19.771	-406.680	0.086	0.000	0.000
		0.333	2095.218	19.771	-406.680	0.086	-135.560	-6.590
		0.667	2095.218	19.771	-406.680	0.086	-271.120	-13.181
		1.000	2095.218	19.771	-406.680	0.086	-406.680	-19.771
		1.333	2095.218	19.771	-406.680	0.086	-542.241	-26.362

Bild 4.19: Ergebnistabelle 5.21: Normalkräfte N, Querkräfte V_y und V_z sowie Momente M_x , M_y und M_z sind aufgelistet.

4.3.4 Flächenergebnisse

Tabelle 5.22 gibt die Flächenschnittgrößen an. Dies ist in Bild 4.20 dargestellt.

Fläche Nr.	FE-Netz Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]	m_x [Nm/m]	m_y [Nm/m]	m_{xy} [Nm/m]	v_x [Nm]	v_y [Nm]	n_x [Nm]	n_y [Nm]	n_{zy} [Nm]	
1	1	0.000	0.000	-8.000	-22.116	140.900	105.412	511.499	-669.212	-294.359	-5705.106	-2708.255	
		4.000	5.000	-8.000	-5.648	-328.339	167.066	-330.665	-1906.169	-271.414	6268.618	-2002.250	
		7.000	0.000	-8.000	-155.954	205.086	-68.962	-1152.414	-1087.845	30.174	-6280.771	2676.235	
		10.000	1.000	-8.000	43.106	59.506	14.762	80.573	-607.844	55.382	-1883.736	-280.259	
		12.000	2.000	-8.000	40.633	33.536	-4.032	90.726	-588.256	245.299	-347.283	-446.058	
		14.000	3.000	-8.000	24.790	31.520	-6.581	122.475	-706.774	294.443	406.269	-597.330	
		16.000	4.000	-8.000	21.138	-61.285	-33.018	-31.642	-918.832	158.641	2037.894	-631.362	
		18.000	5.000	-8.000	-64.199	-287.760	-195.672	65.279	-1603.295	-240.206	6349.775	2207.059	
		126.000	1.000	0.500	-8.000	14.239	36.034	14.579	-15.946	35.214	-319.086	-124.037	220.058
		144.000	1.500	0.000	-8.000	22.577	2.120	10.172	-37.265	19.016	380.015	22.142	134.476
2	1	0.000	0.000	-8.000	17.496	22.901	6.407	6.649	36.333	-127.824	-12.121	212.898	
		4.000	0.000	-8.000	18.843	-0.142	8.007	-105.054	18.632	183.419	-1.943	122.322	
		7.000	0.000	-8.000	9.447	58.964	10.393	-152.481	205.725	-489.593	-181.367	-49.505	

Bild 4.20: Ergebnistabelle 5.22: Normalkräfte n_x , n_y und n_z , Querkräfte v_x und v_y sowie Momente m_x , m_y und m_{xy} sind aufgelistet.

Flächenspannungen werden in Tabelle 5.23 aufgelistet, dargestellt in Bild 4.21.

Fläche Nr.	FE-Netz Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [kN/cm ²]	σ_y [kN/cm ²]	σ_{xy} [kN/cm ²]	τ_x [kN/cm ²]	τ_y [kN/cm ²]
1	1	0.000	0.000	-8.000	-0.001	0.000	0.001	0.000	-0.007
		4.000	5.000	-8.000	0.000	-0.004	0.003	0.000	0.012
		7.000	0.000	-8.000	-0.004	0.001	0.000	0.004	-0.009
		10.000	1.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.003
		12.000	2.000	-8.000	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001
		14.000	3.000	-8.000	0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000
		16.000	4.000	-8.000	0.001	0.000	-0.001	0.000	0.003
		18.000	5.000	-8.000	-0.002	-0.003	-0.003	0.001	0.011
		126.000	1.000	0.500	-8.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
		144.000	1.500	0.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000
2	1	0.000	0.000	-8.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
		4.000	0.000	-8.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.001
		7.000	0.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		10.000	1.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		12.000	2.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		14.000	3.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		16.000	4.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		18.000	5.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
		126.000	1.000	0.500	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000
		144.000	1.500	0.000	-8.000	0.001	0.000	0.000	0.000

Bild 4.21: Ergebnistabelle 5.23: Normal- und Schubspannungen sind aufgelistet.

4.3.5 Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten

Zusätzlich zu den Standardergebnissen werden Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten in Tabelle 5.25, in Bild 4.22 dargestellt, und in Tabelle 5.26, dargestellt in Bild 4.23 angegeben. Diese Ergebnisse sind für jeden Zeitschritt verfügbar und auch die *Dynamische Umhüllende* kann angezeigt werden.

5.25 Knoten - Beschleunigungen

Knoten Nr.	Beschleunigungen			Winkelbeschleunigungen		
	u _x [mm/s ²]	u _y [mm/s ²]	u _z [mm/s ²]	φ _x [mrad/s ²]	φ _y [mrad/s ²]	φ _z [mrad/s ²]
1	455.11	273.22	149.49	274.28	385.90	28.66
2	829.46	281.37	116.41	490.48	476.13	78.03
3	0.00	0.00	0.00	186.53	737.41	0.00
4	446.66	254.84	150.19	385.40	390.62	21.62
5	867.51	259.58	116.78	367.76	482.06	52.84
6	0.00	0.00	0.00	216.11	720.94	0.00
7	446.67	277.49	227.17	385.16	248.44	48.54
8	639.36	287.85	168.32	767.76	778.13	102.52
9	0.00	0.00	0.00	223.69	331.11	0.00
10	454.86	276.72	647.66	366.04	275.69	22.61
11	705.42	286.83	966.64	775.07	725.23	30.22
12	450.65	269.37	938.27	145.51	272.79	6.16
13	727.07	277.87	1550.40	311.47	684.92	10.56

Bild 4.22: Ergebnistabelle 5.25: Knotenbeschleunigung $\ddot{u}_x, \ddot{u}_y, \ddot{u}_z$ und Verdrehungen $\ddot{\phi}_x, \ddot{\phi}_y$ und $\ddot{\phi}_z$ sind aufgelistet.

5.26 Knoten - Geschwindigkeiten

Knoten Nr.	Geschwindigkeiten			Winkelgeschwindigkeiten		
	u _x [mm/s]	u _y [mm/s]	u _z [mm/s]	φ _x [mrad/s]	φ _y [mrad/s]	φ _z [mrad/s]
1	19.38	10.17	1.75	4.29	4.74	0.30
2	11.19	8.65	1.23	4.78	6.64	0.71
3	0.00	0.00	0.00	5.03	5.06	0.00
4	18.70	11.37	1.76	4.96	4.71	0.32
5	11.50	9.90	1.25	5.25	6.67	0.61
6	0.00	0.00	0.00	5.24	5.06	0.00
7	17.80	10.53	2.68	4.99	3.72	0.82
8	8.79	8.53	1.88	7.04	7.21	1.35
9	0.00	0.00	0.00	4.98	3.56	0.00
10	18.36	10.66	8.64	5.12	3.51	0.34
11	9.34	8.45	8.41	7.00	7.31	0.38
12	18.66	11.05	12.69	2.05	4.26	0.13
13	9.55	8.68	13.49	2.84	7.40	0.15

Bild 4.23: Ergebnistabelle 5.26: Knotengeschwindigkeiten $\dot{u}_x, \dot{u}_y, \dot{u}_z$ und Verdrehungen $\dot{\phi}_x, \dot{\phi}_y$ und $\dot{\phi}_z$ sind aufgelistet.



Knotenbeschleunigungen und -geschwindigkeiten sind nicht in den Lastfällen oder Ergebniskombinationen enthalten, die in das Hauptprogramm RFEM exportiert werden.

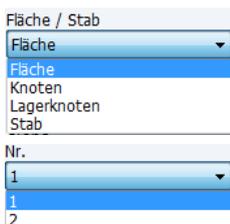
4.3.6 Zeitverlaufsdiagramm

Alle Ergebnisse, die in den oben genannten Tabellen aufgelistet werden (außer den Flächenspannungen) können als Funktion der Zeit mit dem *Zeitverlaufsdiagramm* angezeigt werden. Das ist das wichtigste Werkzeug für die Ergebnisauswertung eines Zeitverlaufsverfahrens.



Diese Grafik kann über die Schaltfläche [Zeitverlaufsdiagramm] angezeigt werden. Die Schaltfläche befindet sich im Tabellenbereich und im Panel im Register *Anzeigefaktoren*.

Das *Zeitverlaufsdiagramm* ist in Bild 4.24 dargestellt.



Es ist möglich zwischen Knoten, Stäben, Flächen und Lagerknoten im Drop-Down-Menü, links dargestellt, auszuwählen. Abhängig von der getroffenen Auswahl sind verschiedene Ergebnisse verfügbar, wie in Figure 4.25 dargestellt.

Im Fall von Stäben und Flächen ist die Stab- oder Flächennummer aus der Drop-Down-Liste auszuwählen.

Je nach der oben getroffenen Auswahl ist entweder eine Liste an FE-Netzpunkten (siehe Bild 4.24) oder eine Liste mit Abständen an Stäben (siehe Bild 4.26) verfügbar. Eine Mehrfachauswahl der angezeigten Punkte oder Positionen ist mit gedrückter [Strg] oder [Umschalt]-Taste möglich.

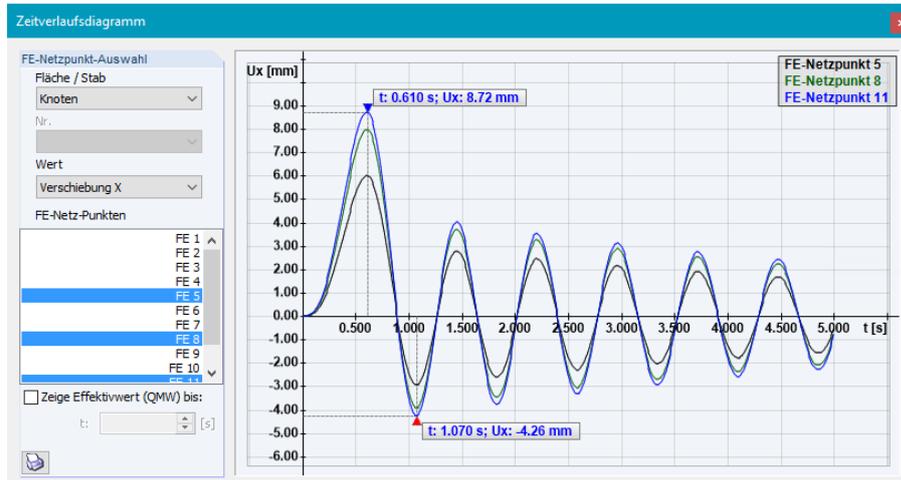


Bild 4.24: Zeitverlaufsdiagramm zum Anzeigen von Ergebnissen als Funktion der Zeit. Hier wird die Verschiebung u_x von drei Knoten dargestellt. Es werden die Maximal- und Minimalwerte angegeben.

Größe

- Beschleunigung X
- Beschleunigung Y
- Beschleunigung Z
- Geschwindigkeit X
- Geschwindigkeit Y
- Geschwindigkeit Z
- Verdrehung X
- Verdrehung Y
- Verdrehung Z
- Verschiebung X
- Verschiebung Y
- Verschiebung Z
- Winkelbeschleunigung X
- Winkelbeschleunigung Y
- Winkelbeschleunigung Z
- Winkelgeschwindigkeit X
- Winkelgeschwindigkeit Y
- Winkelgeschwindigkeit Z

Größe

- Moment MX
- Moment MY
- Moment MZ
- Normalkraft N
- Querkraft Vr
- Querkraft Vy
- Querkraft Vz
- Verdrehung X
- Verdrehung Y
- Verdrehung Z
- Verschiebung X
- Verschiebung Y
- Verschiebung Z

Größe

- Moment mx
- Moment mxy
- Moment my
- Normalkraft nx
- Normalkraft nxy
- Normalkraft ny
- Querkraft vx
- Querkraft vy
- Verdrehung X
- Verdrehung Y
- Verdrehung Z
- Verschiebung X
- Verschiebung Y
- Verschiebung Z

Größe

- Lagerkraft PX
- Lagerkraft PY
- Lagerkraft PZ
- Lagermoment MX
- Lagermoment MY
- Lagermoment MZ

a) Ergebnisse für Knoten b) Ergebnisse für Stäbe c) Ergebnisse für Flächen d) Ergebnisse für Auflager

Bild 4.25: Vorhandene Ergebnisse für (a) Knoten, (b) Stäbe, (c) Flächen und (d) Auflager.

Die Legende in der Grafik wird automatisch gesetzt und auch die Achsenbeschriftungen und -skalierungen werden je nach getroffener Auswahl angepasst. Minimal- und Maximalwerte werden zusammen mit den entsprechenden Zeitschritten angegeben. Mithilfe des Mauseisers ist es möglich die Grafik zu vergrößern. Werte werden an der Spitze des Mauseisers angezeigt, wenn man die Maus entlang des Kurvenbildes bewegt.



Die Arbeitsebene von RFEM, die Tabellen und der *Zeitverlaufsdiagramm* stehen in Interaktion. Wenn eine Reihe mit einem bestimmten Stab in der Tabelle ausgewählt wird oder wenn ein Knoten in der Grafik markiert wird, werden die Einstellungen im *Zeitverlaufsdiagramm* angepasst. Es muss nur das Ergebnis ausgewählt werden, das angezeigt werden soll (Bild 4.25).

Zeige Effektivwert (QMW) bis:

t: [s]

Der *Quadratische Mittelwert* (QMW) kann optional angezeigt werden, wenn das Kontrollfeld, dargestellt auf der linken Seite, ausgewählt und eine Zeit angegeben ist. Der QMW berechnet sich wie folgt:

$$E_{QMW} = \sqrt{\frac{1}{n}(E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2)} \quad (4.8)$$

E_n sind die Ergebnisse zu jedem Zeitschritt. Dabei werden Datenpunkte bis zur angegebenen Zeit für die Berechnung verwendet. Der QMW wird im *Zeitverlaufsdiagramm* angezeigt. Dies ist in Bild 4.26 dargestellt.

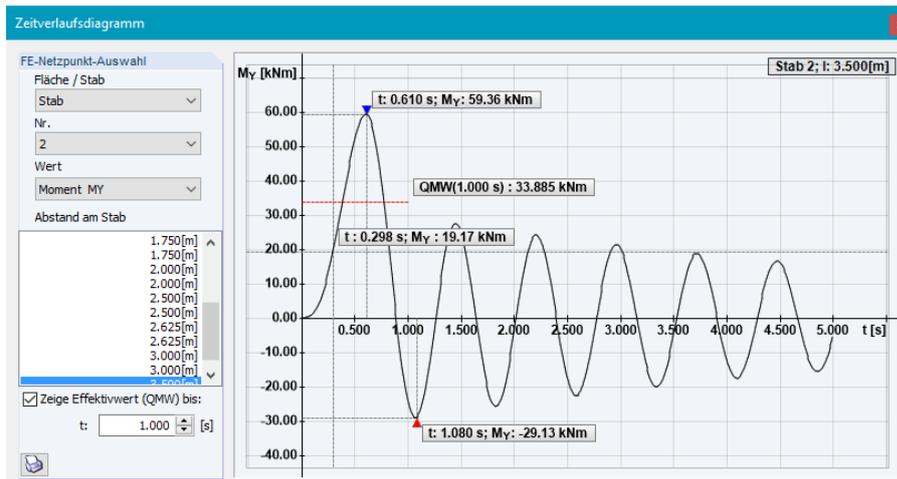


Bild 4.26: Zeitverlaufsdiagramm mit dem *Quadratischen Mittelwert* (QMW). Hier ist das Moment M_Y als Funktion der Zeit dargestellt, der QMW ist bis 1,0 s angegeben.



Der *Quadratische Mittelwert* ist nur verfügbar, wenn eine einzelne Kurve dargestellt wird. Wenn Ergebnisse mehrerer Knoten überlagert werden, ist das Kontrollfeld QMW nicht verfügbar.



Mit der Schaltfläche [Drucken] kann das *Zeitverlaufsdiagramm* direkt in das Ausdruckprotokoll gedruckt werden. In der Maske, die sich öffnet, kann eine Überschrift für diese Grafik festgelegt werden, die im Protokoll verwendet werden soll.

Zahlwerte
Als Grafik speichern
Einstellungen

Mit einem Rechtsklick auf das *Zeitverlaufsdiagramm* stehen drei Optionen zur Auswahl: (1) Auf die Diagrammdatei kann tabellarisch zugegriffen werden. Die Zeitschritte sind zusammen mit allen Ergebnissen, die in der Grafik dargestellt werden, aufgeführt. Ein Beispiel ist in [Bild 4.27](#) angegeben, die Werte in tabellarischer Form können in *Excel* über die Schaltfläche  exportiert werden. (2) Das *Zeitverlaufsdiagramm* kann als Bild gespeichert werden und (3) die Einstellungen der Kurve können aufgerufen werden. Der Einstellungsdialog des *Zeitverlaufsdiagramms* ist in [Bild 4.28](#) dargestellt.

t [s]	Ux [mm]		
	FE-Netzpunkt 5	FE-Netzpunkt 8	FE-Netzpunkt 11
0.270	1.52	2.02	2.24
0.280	1.67	2.21	2.44
0.290	1.81	2.40	2.66
0.300	1.97	2.61	2.88
0.310	2.12	2.81	3.11
0.320	2.28	3.03	3.34
0.330	2.44	3.25	3.58
0.340	2.61	3.47	3.82
0.350	2.78	3.69	4.06
0.360	2.95	3.91	4.31
0.370	3.12	4.14	4.56
0.380	3.29	4.37	4.80
0.390	3.46	4.60	5.05
0.400	3.63	4.82	5.30
0.410	3.80	5.05	5.55

Bild 4.27: Numerische Werte der im *Zeitverlaufsdiagramm* dargestellten Grafik.

4.3.7 Exportierte Lastfälle

Wenn ein Zeitverlaufsverfahren im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt wird, können die Ergebnisse einzelner Zeitschritte in *Lastfälle* exportiert werden. Die exportierten *Lastfälle* von einzelnen Zeitschritten sind in dem Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* aufgelistet, siehe dazu [Bild 4.29](#).

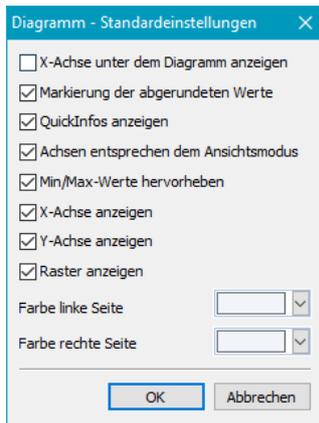


Bild 4.28: Einstellungen des Zeitverlaufsdiagramm.

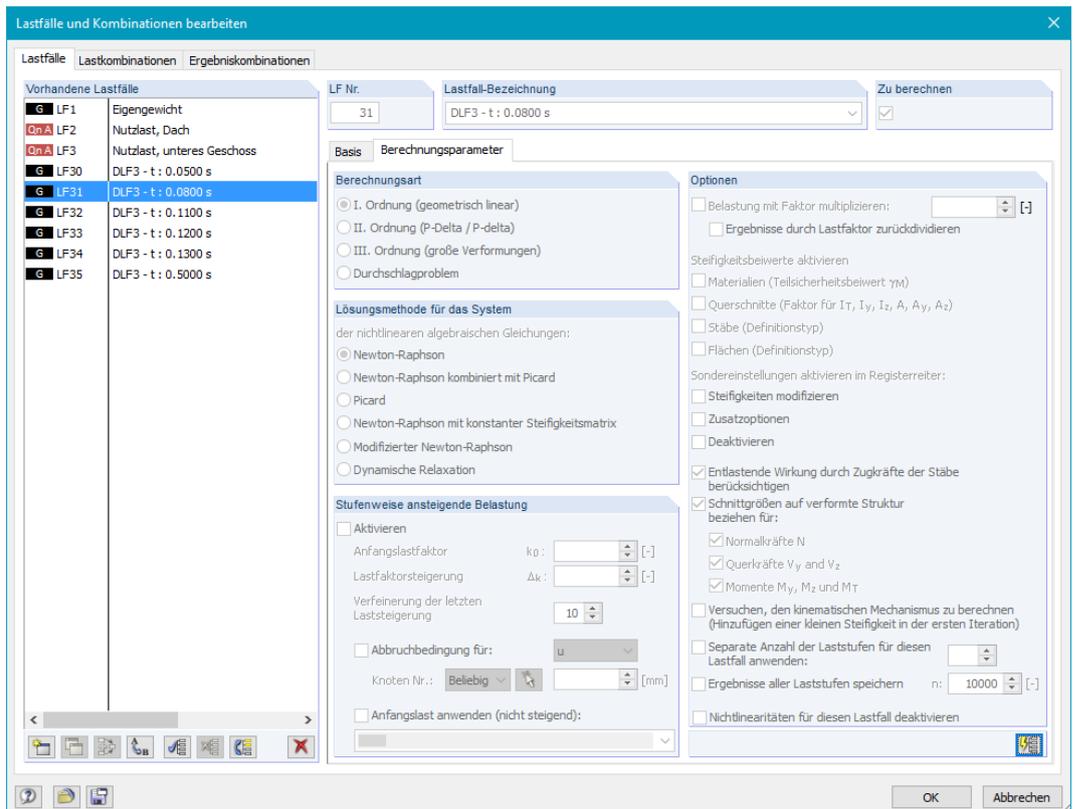


Bild 4.29: Exportierte Lastfälle aus dem Zeitverlaufsverfahren enthalten die Ergebnisse einzelner Zeitschritte. Diese sind in dem Dialog *Lastfälle und Kombination bearbeiten* aufgelistet. Die *Lastfälle* beinhalten keine Lasten und können in *Lastkombinationen* nicht verwendet werden.

Die exportierten *LFs* können nicht modifiziert werden, die Berechnungsparameter sind nicht veränderbar. Die *Lastfälle* enthalten keine Lasten, sondern Ergebnisse des spezifischen Zeitschrittes. Die *Lastfälle* können nicht in *Lastkombinationen* verwendet werden, sondern nur in *Ergebniskombinationen*.

4.3.8 Exportierte Ergebniskombinationen

Wenn ein Zeitverlaufsverfahren im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* durchgeführt wird, kann die Ergebnismülle in eine *Ergebniskombinationen* exportiert werden. Der *Lastfälle und Kombination bearbeiten* Dialog ist in [Bild 4.30](#) dargestellt.

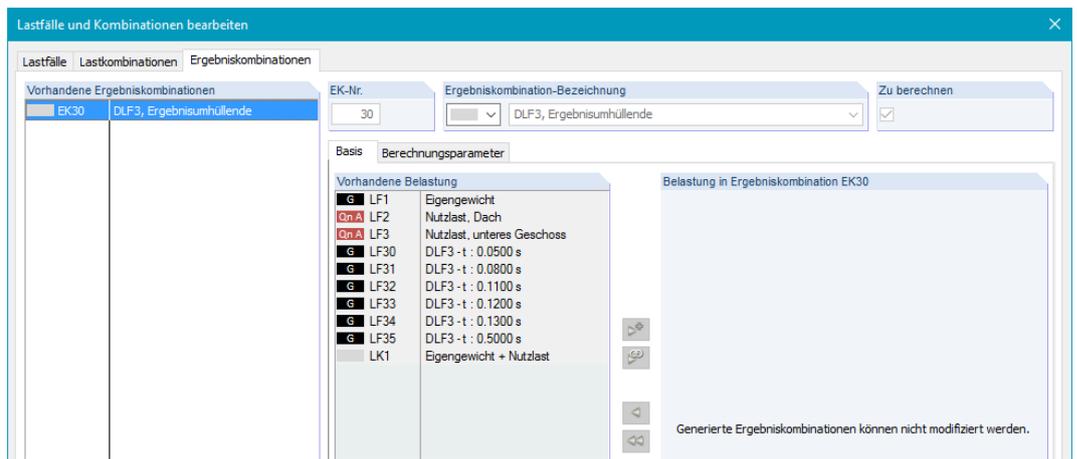


Bild 4.30: Exportierte *Ergebniskombinationen* aus dem Zeitverlaufsverfahren enthalten die Ergebnisumhüllende aller Zeitschritte, angezeigt im *Lastfälle und Kombination bearbeiten* Dialog. Diese *EKs* können nicht modifiziert werden.

Die exportierten *EKs* und deren Berechnungsparameter können nicht verändert werden.

4.3.9 Export nach Excel / CSV

Alle Ergebnistabellen, die in diesem Kapitel diskutiert wurden, lassen sich nach *Excel* exportieren oder als *CSV*-Datei speichern. Diese Option befindet sich unter **Datei** → **Export**. Eine Liste der Ergebnistabellen ist in [Bild 4.31](#) gezeigt. Das Kontrollkästchen *Nur Umhüllende exportieren* ist standardmäßig selektiert, damit werden nur Ergebnistabellen die zur *Dynamischen Umhüllenden* gehören, exportiert. Wenn diese Selektion aufgehoben wird, werden die Tabellen eines jeden Zeitschrittes exportiert. Bitte beachten Sie, dass der Export von Ergebnistabellen von allen Zeitschritten einige Zeit dauern kann.

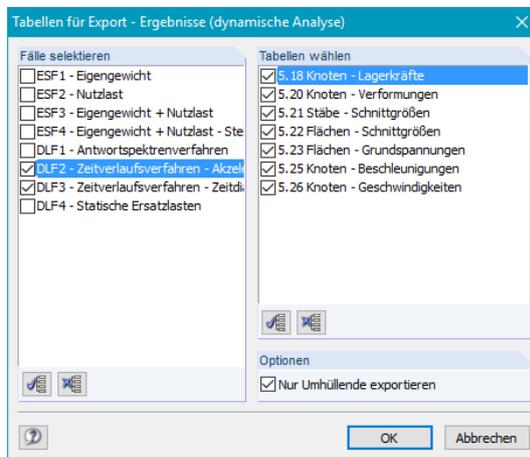


Bild 4.31: Export von Ergebnistabellen eines *Dynamischen Lastfalles* mit dem ein *Zeitverlaufsverfahren* durchgeführt wurde.

4.4 Dynamische Lastfälle - Verfahren mit statischen Ersatzlasten

Die Ergebnistabellen, die zum *Ersatzlastverfahren* gehören, werden angezeigt, wenn der entsprechende *DLF*-Fall im Drop-Down-Menü ausgewählt ist. Die Ergebnistabellen 5.8 bis 5.10 gehören zu dieser Art von *Dynamischen Lastfällen*. Das *Ersatzlastverfahren* gehört zum Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten*. Die erforderlichen Eingabedaten für ein Ersatzlastverfahren wurden in den [Abschnitten 2.5](#) und [2.11](#) beschrieben.

Alle Eigenformen

- Alle Eigenformen
- Eigenform 1 (f: 1.112 Hz)
- Eigenform 2 (f: 1.152 Hz)
- Eigenform 3 (f: 1.519 Hz)
- Eigenform 6 (f: 4.867 Hz)
- Eigenform 10 (f: 6.747 Hz)
- Eigenform 16 (f: 10.661 Hz)
- Eigenform 18 (f: 12.358 Hz)
- Eigenform 19 (f: 13.465 Hz)
- Eigenform 20 (f: 14.272 Hz)
- Eigenform 21 (f: 16.501 Hz)

Die Ergebnistabellen zeigen die Ersatzlasten aller Eigenwerte des Systems, oder getrennt für jeden Eigenwert.

4.4.1 Ersatzlasten

Wenn ein Ersatzlastverfahren durchgeführt wird, werden nur die Ersatzlasten in *RF-DYNAM Pro* berechnet, die restliche Berechnung erfolgt dann im Hauptprogramm RFEM.

Die Ersatzlasten F_x , F_y und F_z werden separat für jede Erregungsrichtung der Antwortspektren und separat für jede Eigenform des Systems folgendermaßen berechnet:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \Gamma_x \cdot \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{s}_{a,x}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \Gamma_y \cdot \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{s}_{a,y}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \Gamma_z \cdot \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{s}_{a,z}(T) \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

mit

- Γ Beteiligungsfaktoren in X, Y und Z-Richtung wie in [Gleichung 4.4](#) definiert, unter Verwendung einer modalen Masse von $M_i = 1 \text{ kg}$.
- u Verschiebungswerte in X, Y und Z-Richtung der skalierten Eigenform, sodass $M_i = \mathbf{u}_i^T \mathbf{M} \mathbf{u}_i = 1 \text{ kg}$
- $\mathbf{s}_a(T)$ Beschleunigung aus dem Antwortspektrum unter Verwendung der Eigenperiode T des betrachteten Eigenwertes
- M Masse in die Richtung X, Y und Z am betrachteten FE-Knoten

Mit den Formeln, die in der [Gleichung 4.9](#) angegeben sind, werden die Ersatzlasten aus einem Antwortspektrum in X-Richtung, in der [Gleichung 4.10](#) die Lasten aus einem Antwortspektrum in Y-Richtung und in der [Gleichung 4.11](#) die Lasten aus einem Antwortspektrum in Z-Richtung berechnet.

Diese statischen Ersatzlasten gibt es an jedem FE-Knoten innerhalb der Struktur, solange die Masse M und die Eigenform u an diesem Punkt nicht 0 betragen.

Die Ergebnistabellen für das Ersatzlastverfahren werden in die drei Erregungsrichtungen aufgeteilt: In Tabelle 5.8 sind die resultierenden Ersatzlasten für Antwortspektren aufgeführt, die in X-Richtung wirken, in Tabelle 5.9 befinden sich jene für Antwortspektren in Y-Richtung und in Tabelle 5.10 jene für Antwortspektren in Z-Richtung.

Wenn die Ersatzlasten nur für einen Eigenwert gelistet sind, dann ergeben sich die Summen der Ersatzlasten die am unteren Ende der Ergebnistabellen 5.8, 5.9 und 5.10 gelistet sind, mit folgenden Formeln

$$\sum F_{x,i} = \left| \sum (F_{x,i}) \right| \quad (4.12)$$

$$\sum F_{y,i} = \left| \sum (F_{y,i}) \right| \quad (4.13)$$

$$\sum F_{z,i} = \left| \sum (F_{z,i}) \right| \quad (4.14)$$

worin i die Nummer des betrachteten Eigenwertes ist. Die Summe der Ersatzlasten ist die Gesamterdbebenkraft.

Wenn die Ersatzlasten für alle Eigenwerte des Systems gelistet sind, dann wird die Gesamtsumme aller Summen der einzelnen Eigenwerte gebildet. Diese Summen sind am unteren Ende der Tabellen 5.8, 5.9 and 5.10 aufgeführt.

Die Tabelle 5.9 ist in Bild 4.32 dargestellt. Im Bild dargestellt sind die Ersatzlasten resultierend aus dem *Eigenwert 1* und der Anregungsrichtung Y. Die Nummer des *Lastfalles* in den diese Lasten exportiert werden ist ebenfalls gelistet.

FE-Netz Punkt	Eigenform Nr.	LF Nr.	Objekt Typ	Stelle			Ersatzlast			
				X [m]	Y [m]	Z [m]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	M _z [Nm]
296	1	5	Fläche	3.000	0.500	-4.000	-0.01	-52.60	-0.18	-36.82
297	1	4	Fläche	3.500	0.000	-4.000	-0.07	-30.64	0.09	21.47
	1	5	Fläche	3.500	0.000	-4.000	-0.07	-30.64	0.09	-21.47
298	1	4	Fläche	3.500	0.500	-4.000	0.04	-52.60	-0.32	36.83
	1	5	Fläche	3.500	0.500	-4.000	0.04	-52.60	-0.32	-36.83
299	1	4	Fläche	4.000	0.500	-4.000	0.06	-38.11	-0.43	26.69
	1	5	Fläche	4.000	0.500	-4.000	0.06	-38.11	-0.43	-26.69
300	1	4	Fläche	0.500	1.000	-4.000	-0.14	-52.62	-0.53	36.87
	1	5	Fläche	0.500	1.000	-4.000	-0.14	-52.62	-0.53	-36.87
301	1	4	Fläche	0.000	1.000	-4.000	-0.12	-38.09	-0.58	26.70
	1	5	Fläche	0.000	1.000	-4.000	-0.12	-38.09	-0.58	-26.70
302	1	4	Fläche	1.000	1.000	-4.000	-0.11	-52.61	-0.35	36.86
	1	5	Fläche	1.000	1.000	-4.000	-0.11	-52.61	-0.35	-36.86
sum							0.03	23433.96	0.00	

Bild 4.32: Ergebnistabelle 5.9: Generierte Ersatzlasten resultierend aus dem *Eigenwert 1* und der Anregungsrichtung Y. Die Gesamterdbebenkraft des *Eigenwertes 1* ist am unteren Ende der Tabelle aufgeführt.

4.4.2 Torsionsmomente

Zufällige Torsionswirkungen können wie in Abschnitt 2.11.2 beschrieben berücksichtigt werden, um Unsicherheiten in der Anordnung der Massen in Betracht zu ziehen. Der Massenmittelpunkt wird als verschoben durch die zufälligen Exzentrizitäten e_x und e_y betrachtet. Die Torsionsmomente werden folgendermaßen berechnet:

$$M_z = |F_x \cdot e_y| + |F_y \cdot e_x| \tag{4.15}$$

M_z ist das Torsionsmoment und F_x und F_y sind die Ersatzlasten an jedem FE-Knoten, wie in den Gleichungen 4.9, 4.10 und 4.11 definiert. Die Torsionsmomente M_z werden sowohl in positive als auch in negative Richtungen berücksichtigt.

4.4.3 Exportierte Lastfälle

Die Ersatzlasten, wie sie in den dynamischen Ergebnistabellen 5.8, 5.9 und 5.10 aufgeführt sind, werden als Lastfälle in das Hauptprogramm RFEM exportiert. Dies wird getrennt für jeden Eigenwert und jede Erregungsrichtung vorgenommen. Die Liste der generierten Lastfälle wird in der Maske *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* angezeigt, wie in Bild 4.33 dargestellt. Es wird die zufällige Torsionwirkung aktiviert und zwei Lastfälle für jeden Eigenwert und jede Richtung gebildet (beschrieben in Abschnitt 2.11.2). Die Torsionsmomente werden in positive und negative Richtungen berücksichtigt.

Die Kreisfrequenz ω und die Lehr'schen Dämpfungswerte D werden als Lastfalleigenschaften mit aus *RF-DYNAM Pro* exportiert, um die CQC-Regel für die Modalkombination zu ermöglichen. Wenn die SRSS-Regel in *RF-DYNAM Pro* ausgewählt ist, werden Dämpfungswerte von $D = 0$ exportiert.

Die Berechnungsparameter der exportierten Lastfälle können angepasst werden, die Parameter werden in Bild 4.34 gezeigt.

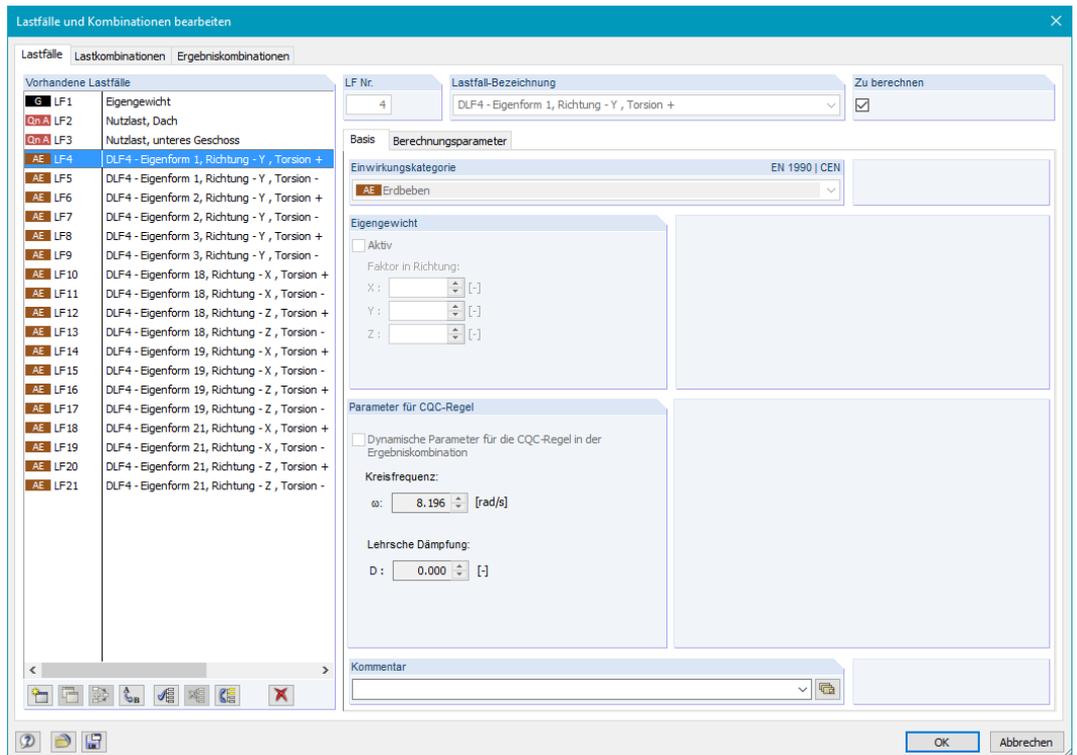


Bild 4.33: Exportierte *Lastfälle* aus dem *Ersatzlastverfahren* gelistet im *Lastfälle und Kombination bearbeiten* Dialog. Die Kreisfrequenzen ω und die Lehr'sche Dämpfungswerte D werden auch von *RF-DYNAM* exportiert, um die *CQC* Überlagerung der modalen Ergebnisse zu ermöglichen. Zufällige Torsionswirkungen sind aktiviert und aus diesem Grund sind zwei Lastfälle pro Eigenwert und Richtung exportiert.

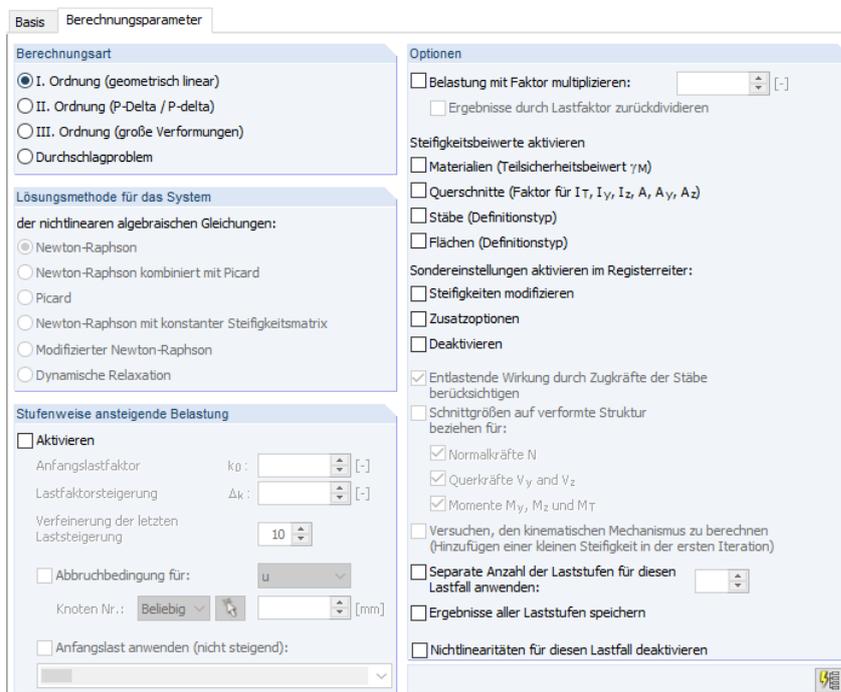


Bild 4.34: Die Berechnungsparameter der exportierten *Lastfälle* aus einem *Ersatzlastverfahren*. Die Parameters können angepasst werden.

Eine Änderung der Berechnungsparameter kann gefordert werden, wenn

- die Struktur eine dominante Eigenform hat und die Analyse den $P - \Delta$ Effekt berücksichtigen soll

- Steifigkeitsänderungen in den *Eigenschwingungsfällen* angewendet wurden (siehe [Abschnitt 2.4.7](#)) und der *LF* die gleichen Modifikationen aus Konsistenzgründen nutzen soll ([FAQ 002237](#) stellt ein Beispiel bereit)
- Nichtlinearitäten in den *LFs* deaktiviert werden sollen (Ersatzlasten beruhen auf linear berechneten Eigenwerten und Eigenformen, folglich sollten *LFs* keine Nichtlinearitäten berücksichtigen).



Es ist möglich, dass es zu einem Konflikt zwischen nichtlinear berechneten *Lastfällen* und den aus *RF-DYNAM Pro* exportierten *Ergebniskombinationen* kommt. Konsultieren Sie das **RFEM Handbuch Abschnitt 5.5** um den wichtigen Unterschied zwischen einer *Lastkombination* und einer *Ergebniskombination* zu verstehen. Aufgrund der quadratischen Kombinationsregeln resultieren aus einer dynamischen Analyse nur *Ergebniskombinationen*.



Die generierten Ersatzlasten können mit der Schaltfläche [Lasten anzeigen] sichtbar gemacht werden. Wenn mehr als 5 000 Lasten generiert werden, wird die Anzeige standardmäßig deaktiviert. Jedoch kann im Dialog *Details* die Anzahl der angezeigten Ersatzlasten geändert werden. Dies wurde in [Abschnitt 2.12](#) erläutert.

4.4.4 Exportierte Ergebniskombinationen

Wenn ein Ersatzlastverfahren im Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* durchgeführt wird, werden Ergebniskombinationen in zwei Schritten erzeugt: (1) Die Modalantworten werden mit der *SRSS*-Regel oder der *CQC*-Regel kombiniert und die Ergebnisse werden in *EKs*, getrennt für jede Erregungsrichtung, exportiert, und (2) die richtungsabhängigen Ergebnisse werden entweder mit der *SRSS*-Regel oder mit der 100% / 30%-Regel kombiniert und die endgültigen *EKs* werden exportiert. Eine Liste der generierten Ergebniskombinationen kann im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, dargestellt in [Bild 4.35](#), aufgerufen werden.

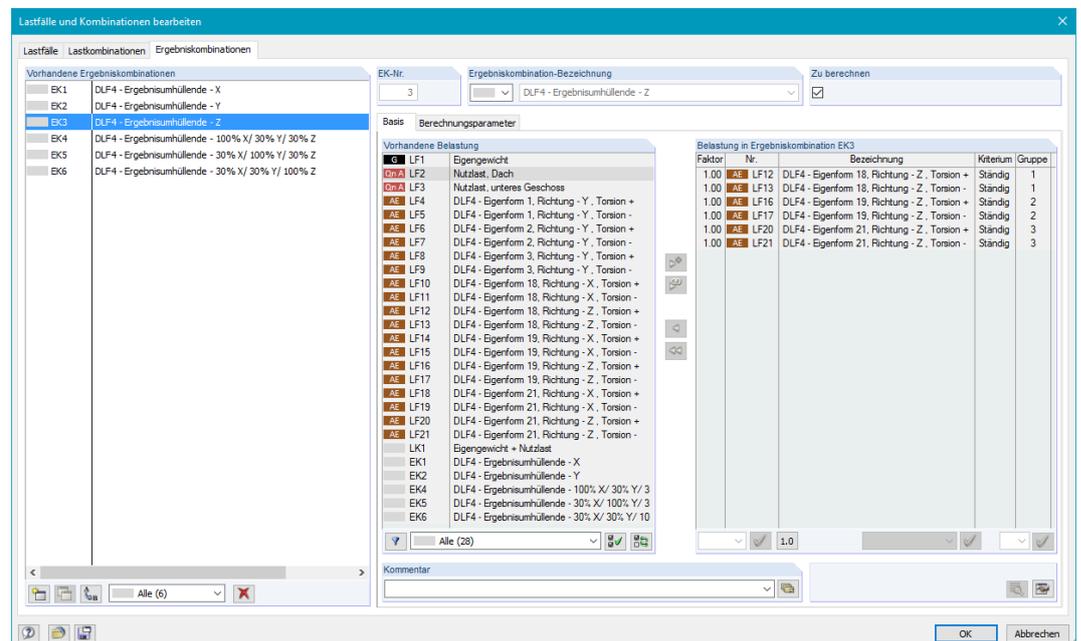


Bild 4.35: Exportierte Ergebniskombinationen aus dem Ersatzlastverfahren, dargestellt im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*. Hier ist die *EK* mit den kombinierten Modalantworten in Z-Richtung ausgewählt.

In [Bild 4.35](#) wird unter *Belastung in Ergebniskombination EK* eine Liste von *LFs* angegeben, die Ersatzlasten in die betrachtete Anregungsrichtung enthalten. Im Bild sind die *Zufälligen Torsionswirkungen* aktiviert (beschrieben in [Abschnitt 2.11.2](#)) und aus diesem Grund existieren zwei Lastfälle pro Eigenform und Richtung, diese zwei Lastfälle werden mit *ODER* kombiniert bevor die *SRSS*- oder *CQC*-Regel angewendet wird.

Die im [Bild 4.35](#) gezeigten *LFs* werden mit der *CQC*-Regel kombiniert, ausgeführt als *äquivalente Linearkombination*. Für die Option *Vorzeichengerechten Ergebnisse* ist der *LF* der dominanten Eigenform im Drop-down Menü ausgewählt. Diese Berechnungsparameter sind automatisch eingestellt, abhängig von den Einstellungen die in *RF-DYNAM Pro* vorgenommen wurden. Die Berechnungsparameter der *EK* sind in [Bild 4.36](#) dargestellt.

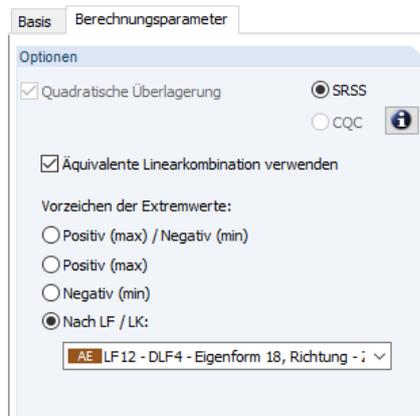


Bild 4.36: Berechnungsparameter der exportierten *EKs* aus der modalen Kombination der Ergebnisse. Die *CQC*-Regel in Form der *äquivalenten Linearkombination* wird angewendet. Für die Option der *Vorzeichengerechten Ergebnisse* ist der *LF*, der zur dominanten Eigenform gehört, automatisch ausgewählt.

Die Berechnungsparameter der *EKs* können in *RFEM* angepasst werden unabhängig von den Einstellungen in *RF-DYNAM Pro*.

Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse aus verschiedenen Erregungsrichtungen kombiniert; eine der finalen *EKs* ist in [Bild 4.37](#) ausgewählt. Die Faktoren 1 und 0,3 werden verwendet, um die 100% / 30%-Regel anzuwenden.

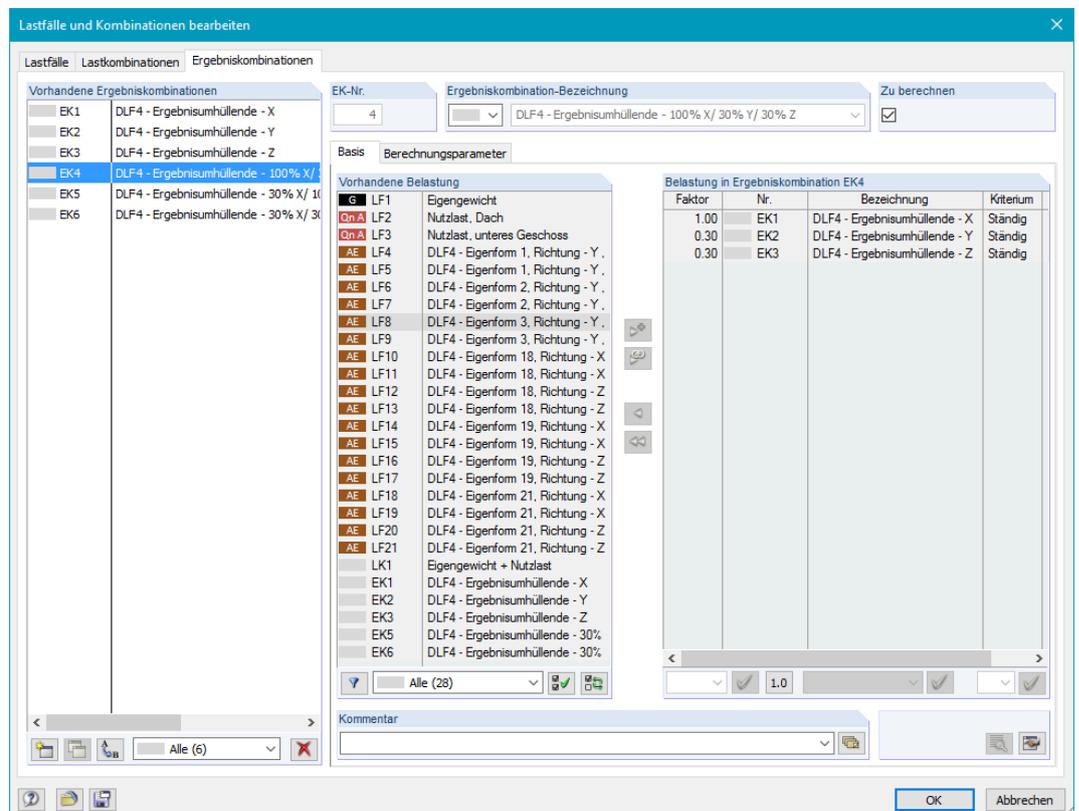


Bild 4.37: Exportierte Ergebniskombinationen aus dem Ersatzlastverfahren, dargestellt im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*. Hier ist eine *EK* ausgewählt die aus der Richtungsüberlagerung resultiert, verwendet wird die 100% / 30%-Regel.

4.4.5 Export nach Excel / CSV

Alle Ergebnistabellen, die in diesem Kapitel diskutiert wurden, lassen sich nach *Excel* exportieren oder als *CSV*-Datei speichern. Diese Option befindet sich unter **Datei** → **Export**. Eine Liste der Ergebnistabellen ist in **Bild 4.38** gezeigt. Das Kontrollkästchen *Nur Umhüllende exportieren* ist standardmäßig selektiert, damit werden nur Ergebnistabellen mit Ersatzlasten aller Eigenformen exportiert. Wenn diese Selektion aufgehoben wird, werden auch Tabellen die zu den einzelnen Eigenformen gehören, exportiert.

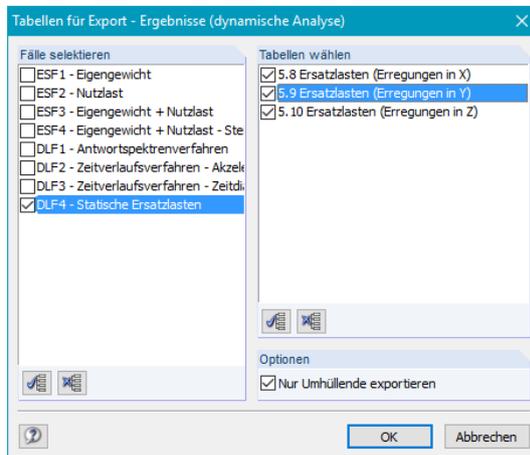


Bild 4.38: Export von Ergebnistabellen eines *Dynamischen Lastfalles* mit dem ein *Ersatzlastverfahren* durchgeführt wurde.

4.5 Automatische Kombinatorik in RFEM

In *RFEM* besteht die Option *Lastkombinationen* und *Ergebniskombinationen* automatisch erzeugen zu lassen. Im **RFEM Handbuch** im **Kapitel 5** finden Sie dazu detaillierte Informationen.



Lastfälle und *Ergebniskombination*, die aus dem *RF-DYNAM Pro* Modul exportiert werden, werden in dieser automatischen Kombinatorik nicht berücksichtigt. Die Option der automatischen Kombinatorik kann trotzdem für alle anderen *Lastfälle*, die Sie kombinieren möchten, verwendet werden (z.B. die Einwirkungen Eigengewicht oder Verkehrslast).

In *RFEM* wird die Option der automatischen Kombinatorik in den *Basisangaben* des Modelles aktiviert, dies ist im **Bild 4.39** gezeigt.

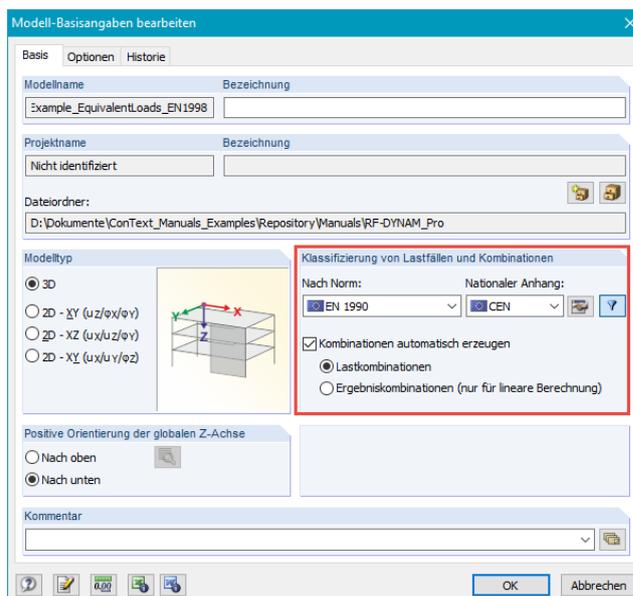


Bild 4.39: Aktivierung der automatischen Kombinatorik in den *RFEM Basisangaben*.

Wenn die automatische Kombinatorik aktiviert wird, bevor die *RF-DYNAM Pro* Fälle berechnet sind, dann werden die *LFs* und *EKs* die später aus *RF-DYNAM Pro* exportiert werden nicht in den *Einwirkungen* gelistet und eine *Einwirkung* vom Typ *Erdbeben* existiert nicht. Folglich haben die *LFs* und *EKs* aus *RF-DYNAM Pro* keinerlei Einfluss auf die automatisch erzeugten *Last-* und *Ergebniskombinationen*. Im **Bild 4.40** ist der Reiter *Einwirkungen* im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* dargestellt. Die *LFs*, die aus *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* exportiert wurden, sind nicht in der *Einwirkung Ständig* enthalten, auch wenn diese der *Einwirkungskategorie Ständig* zugewiesen sind.

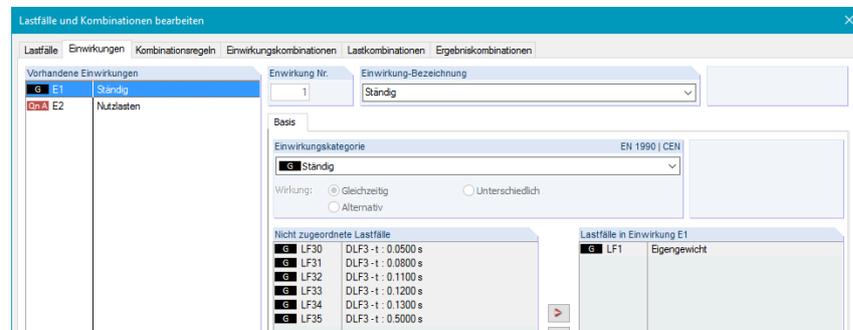


Bild 4.40: Der Reiter *Einwirkungen* im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* ist dargestellt. Die automatische Kombinatorik wurde bereits vor Berechnung von *RF-DYNAM Pro* aktiviert. Nun sind *RF-DYNAM Pro* Ergebnisse vorhanden, aber die exportierten *LFs* sind nicht in den *Einwirkungen* enthalten und eine *Einwirkung Erdbeben* wurde nicht erzeugt.

Wenn die automatische Kombinatorik aktiviert wird, nachdem die *RF-DYNAM Pro* Fälle berechnet sind und *LFs* und *EKs* bereits existieren, ist es wichtig die benutzerdefinierten *Ergebniskombination* zu behalten wie im **Bild 4.41** gezeigt.

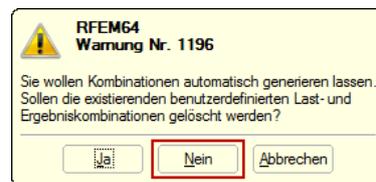


Bild 4.41: Aktivierung der automatischen Kombinatorik in den *RFEM Basisangaben*. Benutzerdefinierte, bereits existierende *EKs* sollten nicht gelöscht werden, wenn *RF-DYNAM Pro* Ergebnisse bereits vorhanden sind.

Wenn die Aktivierung in dieser Reihenfolge erfolgt, werden die *LFs* aus *RF-DYNAM Pro* in den *Einwirkungen* berücksichtigt und eine *Einwirkung Erdbeben* wird generiert, dies ist in **Bild 4.42** gezeigt.

Dies beeinflusst trotzdem nicht die automatisch gebildeten *Kombinationen*. *Einwirkungskombinationen*, *Lastkombinationen* und *Ergebniskombinationen* für die Bemessungssituation *Erdbeben* werden nicht generiert. *Lastfälle* die von einer *Zeitverlaufsanalyse* exportiert sind, sind in den *Lastkombinationen* enthalten, aber diese *Lastfälle* enthalten keine Lasten (diese enthalten nur Ergebnisse des spezifischen Zeitschrittes, siehe **Abschnitt 4.3**) und haben somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse.



Die *Ergebniskombination* für die Bemessungssituation *Erdbeben* muss manuell definiert werden. *Lastkombinationen* können aufgrund der quadratischen Kombinationsregeln, die bei einem Antwortspektrenverfahren gefordert sind, nicht verwendet werden. Auch bei einem Zeitverlaufsverfahren sind *Lastkombinationen* nicht geeignet, da die exportierten *Lastfälle* für einzelne Zeitschritte keine Lasten enthalten.

In **EN 1990 Abschnitt 6.4.3.4** in **Gleichung (6.12)** [4] wird die Kombinationsregel für die Bemessungssituation *Erdbeben* wie folgt angegeben:

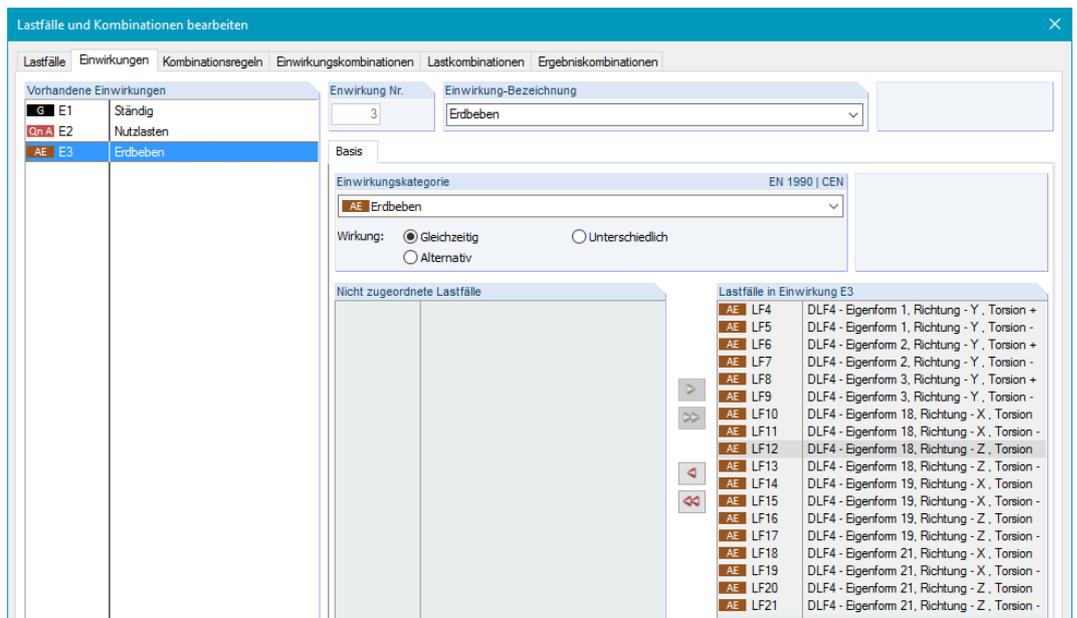


Bild 4.42: Der Reiter *Einwirkungen* im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten* ist dargestellt. Die automatische Kombinatorik wurde nach Berechnung der *RF-DYNAM Pro* aktiviert. Die *Einwirkung Erdbeben* existiert und die *LFs* aus *RF-DYNAM Pro* sind in dieser Liste aufgeführt.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum \Psi_{2,i} Q_{k,i} \tag{4.16}$$

Darin sind A_{Ed} die *EKs* die von *RF-DYNAM Pro* exportiert wurden. Die Kombinationsfaktoren Ψ_2 sind in **EN1990 Tabelle A.1.1** [4] aufgelistet.

Ein Beispiel wie diese Kombination in *RFEM* ausgeführt werden kann finden Sie in [Abschnitt 5.1](#).

4.6 Ausdruckprotokoll

Es ist möglich ein Ausdruckprotokoll mit den dynamischen Ergebnissen zu erzeugen. Detaillierte Informationen zum Ausdruckprotokoll finden Sie im **Kapitel 10** des **RFEM-Handbuchs**.

Wenn dynamische Ergebnisse vorhanden sind, besteht die Möglichkeit auszuwählen, ob *Eingabedaten* und Ergebnisse der *Eigenschwingungsfälle* in der *Ausdruckprotokoll-Selektion* enthalten sein sollen, wie in den [Bildern 4.43](#) und [4.44](#) dargestellt ist.

Die Tabelle *Eigenformen*, die die Auswahl der Eigenformen und zugehörige Werte des Antwortspektrums enthält, kann in das Ausdruckprotokoll ([Abschnitt 1.8.2.2](#) und / oder [1.8.5.2](#)) gedruckt werden. Diese Tabelle wurde in [Abschnitt 2.9.7](#) diskutiert und ist relevant für das *Antwortspektrenverfahren* und das *Ersatzlastverfahren*.

Jeder Eintrag in der Selektion kann für alle Fälle (*ESFs* oder *DLFs*) ausgewählt werden oder wenn das Kontrollfeld *Alle* deaktiviert wird, nur für einzelne Fälle (*ESF* oder *DLF*).



Alle anderen *RF-DYNAM Pro*-Ergebnisse sind in den exportierten Lastfällen oder Ergebniskombinationen verfügbar. Das Ausdruckprotokoll für diese Ergebnisse kann angepasst werden, wie in **Kapitel 10** des **RFEM-Handbuchs** erläutert.

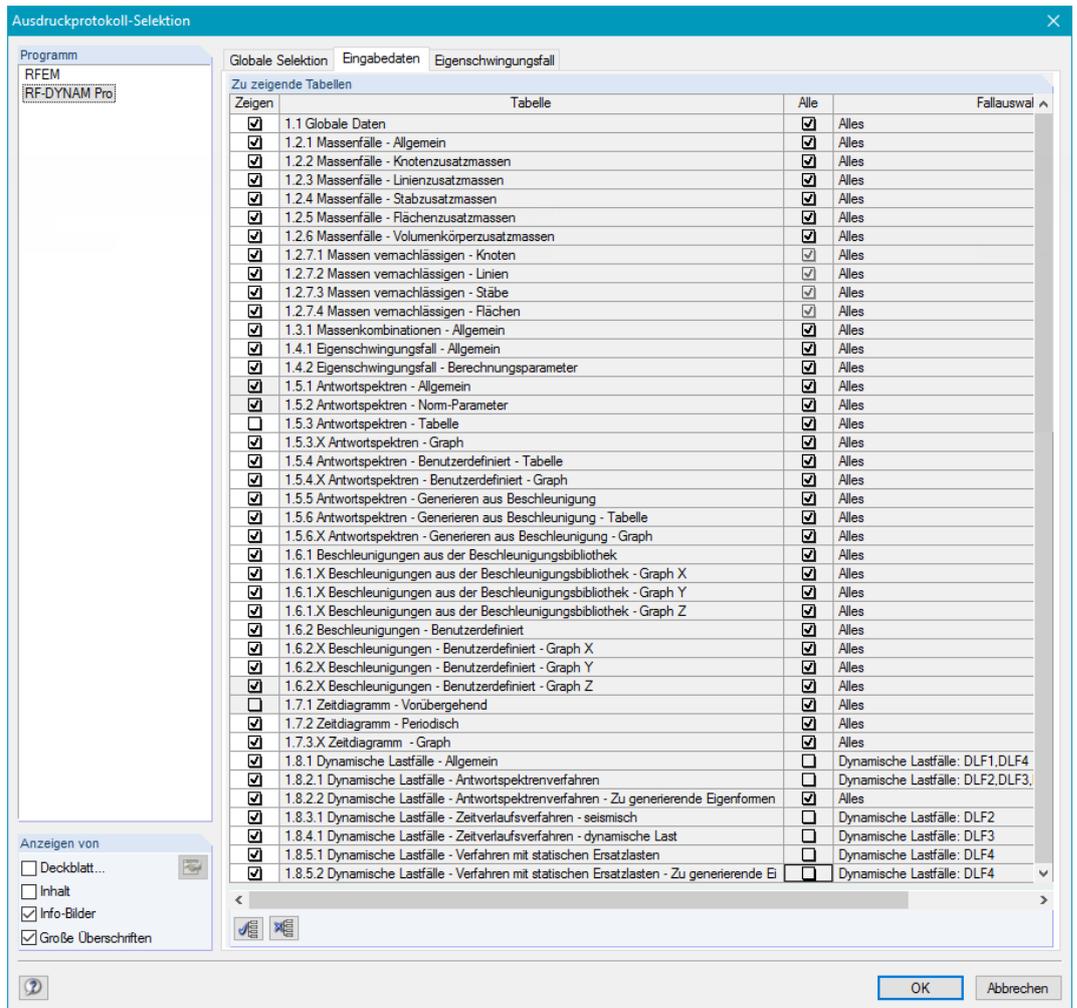


Bild 4.43: Ausdruckprotokoll-Selektion mit den für *RF-DYNAM Pro*-Fall verfügbaren Eingabedaten.



Bild 4.44: Ausdruckprotokoll-Selektion mit den verfügbaren Eigenschwingungsfall (*ESF*)-Daten.

4.7 Einheiten und Dezimalstellen



Der Dialog *Einheiten und Dezimalstellen* kann mit der links dargestellten Schaltfläche aufgerufen werden. Der Dialog mit dem geöffneten Register *Ergebnisse* des Zusatzmoduls *RF-DYNAM Pro* ist in [Bild 4.45](#) dargestellt.

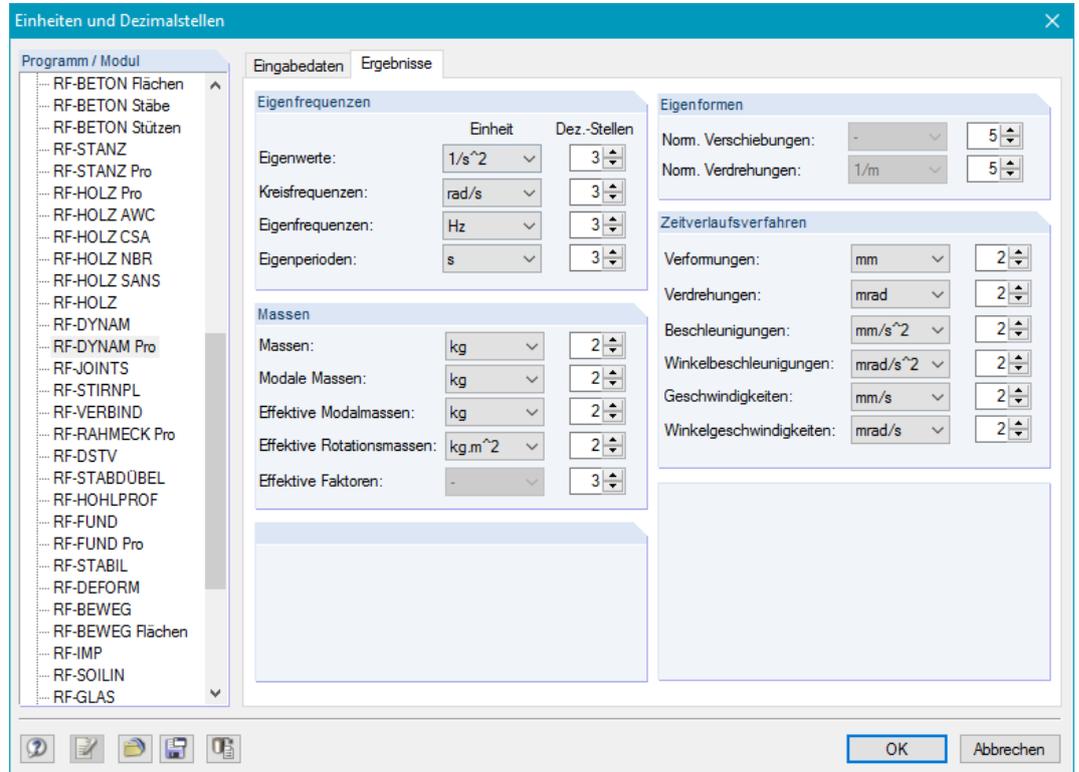


Bild 4.45: Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen*, in dem die Einheiten und Dezimalstellen der Ergebnisdaten aus *RF-DYNAM Pro* angepasst werden können.

Einheiten können aus den Drop-Down-Menüs ausgewählt und Dezimalstellen können angepasst werden.



Da die Ergebnisse aus *RF-DYNAM Pro* im Hauptprogramm RFEM integriert sind, können die meisten Ergebniswerte in der RFEM-Liste der Einheiten und Dezimalstellen angepasst werden, wie in [Bild 4.46](#) dargestellt.



Bild 4.46: Darstellung des Dialogs *Einheiten und Dezimalstellen* mit dem geöffneten Register *Ergebnisse* von RFEM.

5 Beispiele

Ein Beispiel, wie eine Eigenwertanalyse und ein Multi-modales Antwortspektrenverfahren mit dem Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* durchgeführt werden kann, wird im Webinar [Ermittlung von Eigenschwingungen und Erdbebenbemessung mit RF-DYNAM Pro](#) gezeigt.

Das Laufen und Rennen über eine Fußgängerbrücke, ein komplexes Beispiel einer Zeitverlaufsanalyse, wird im Webinar [Zeitverlaufsrechnung mit RF-/DYNAM Pro - Gehen und Laufen über eine Fußgängerbrücke](#) simuliert. Es wird gezeigt wie Zeitdiagramme als Funktionen definiert werden können, unter der Verwendung von in *RFEM* definierten Parametern. Außerdem werden mehrere Last-Zeitdiagramm-Sets verwendet.

Eine Maschineninduzierte Schwingung auf eine Konstruktion mit nichtlinearen Zugstäben wurde mit dem nichtlinearen Zeitverlaufsverfahren analysiert und im Webinar [Nichtlineare Zeitverlaufsrechnung - Maschineninduzierte Schwingungen](#) demonstriert.

Verifikationsbeispiele sind auf unserer Webseite verfügbar um die Genauigkeit von *RF-DYNAM Pro* zu demonstrieren. Die Ergebnisse einer Zeitverlaufsrechnung eines Einmassenschwinger, angeregt durch eine harmonische Schwingung, werden mit der analytischen Lösung verglichen ([Cantilever Beam \(SDOF\) with Periodic Excitation](#)). In einem weiteren Verifikationsbeispiel wird die Berechnung der Ersatzlasten seitens *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* mit der analytischen Lösung verglichen ([Equivalent Loads](#)).

Im [Kapitel 5.1](#) finden Sie ein Beispiel zur Erdbebenanalyse, es wird das Modul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* verwendet. Die Gesamterdbebenkraft für jedes Geschoss und die Schiefstellung des Gebäudes werden ermittelt. Hinweise zur Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung werden gegeben. Im [Kapitel 5.2](#) wird eine Maschinenanregung mit dem Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* analysiert. Der Fall der Resonanz wird untersucht und das System wird abgeändert, um Resonanz zu vermeiden.

5.1 Beispiel: Erdbebenanalyse nach EN 1998-1 CEN

Dieses Beispiel stellt die Erdbebenanalyse nach **EN 1998-1 CEN** [1] mit dem Multi-modalen Antwortspektrenverfahren vor. Das Zusatzmodul *RF-DYNAM Pro - Ersatzlasten* wird verwendet.

Struktur und Lastfälle

Das statische System zusammen mit den verwendeten Materialien und Querschnitten ist in [Bild 5.1](#) dargestellt.

Drei Lastfälle mit Eigengewicht und Verkehrslasten sind definiert, diese Lasten werden in *RF-DYNAM Pro* als Massen importiert. *LF1* beinhaltet das Eigengewicht in +Z-Richtung und eine zusätzliche Flächenlast von 0,5 kN/m². *LF2* und *LF3* enthalten Verkehrslasten von 2,5 kN/m² getrennt für das untere und obere Geschoss des Gebäudes.

In den allgemeinen Angaben in *RF-DYNAM Pro* wird das Modul *Ersatzlasten* aktiviert.

Definition der Massen

Neben dem Eigengewicht sind auch Anteile der Verkehrslasten als Massen zu berücksichtigen, dies ist in **EN1998-1** im **Abschnitt 3.2.4** [1] geregelt,

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5.1)$$

hierbei sind $G_{k,j}$ die ständigen Lasten und $Q_{k,i}$ die veränderlichen Lasten. Die Kombinationsfaktoren $\psi_{E,i}$ für die veränderlichen Lasten sind wie folgt definiert,

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \quad (5.2)$$

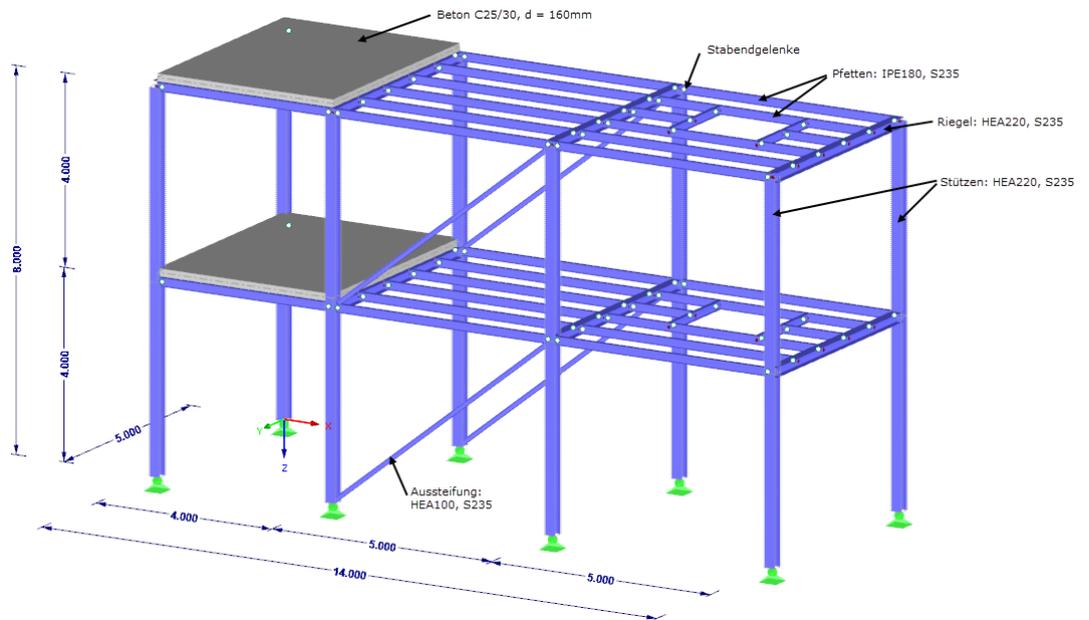


Bild 5.1: Statisches System mit Dimensionen, verwendeten Materialien und Querschnitten.

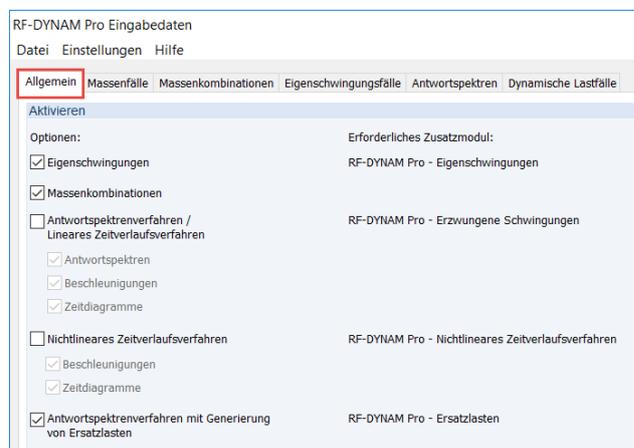


Bild 5.2: Allgemeine Angaben in *RF-DYNAM Pro* um das Modul *Ersatzlasten* zu aktivieren.

wobei $\psi_{2,i}$ die Kombinationsfaktoren aus **EN1990 Tabelle A.1.1** [4] sind. Das Gebäude in diesem Beispiel wird der Kategorie B (Bürogebäude) zugeordnet, somit ist $\psi_2 = 0,3$. Die Werte für φ sind in **EN1998-1 CEN** [1] mit $\varphi = 1,0$ für Dachgeschosse und $\varphi = 0,5$ für alle anderen Geschosse empfohlen. Die verschiedenen Werte für φ sind der Grund für die Trennung der Verkehrslasten in *LF2* und *LF3*.

In *RF-DYNAM Pro* werden *Massenfälle* angelegt. Die Massen werden von den in *RFEM* definierten Lastfällen importiert. Die definierten *MFs* sind in den **Bilder 5.3** und **5.4** gezeigt.

Der *MF3* ist analog zum *MF2* definiert.

Die *Massenfälle* werden in einer *Massenkombination* vereint, wie im **Bild 5.5** gezeigt. Die Kombinationsfaktoren $\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i}$ sind wie im **EN 1998-1 CEN** definiert.

Eigenschwingungsanalyse

In diesem Beispiel wird eine räumliche Eigenschwingungsanalyse durchgeführt, die Massen wirken gleichzeitig in X und Y-Richtung. Die Vereinfachung zu einem ebenen Modell ist nur für reguläre Bauwerke nach **EN 1998-1 Abschnitt 4.2.3** [1] zulässig. In einer ebenen Analyse dürften die Massen getrennt in X und Y Richtung angesetzt werden.

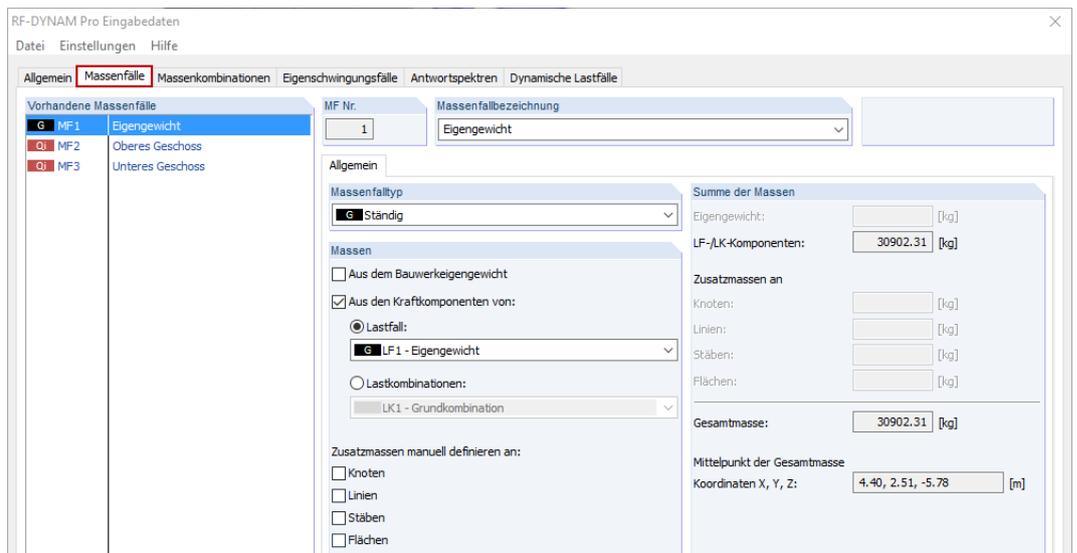


Bild 5.3: Massenfälle 1: Eigengewicht importiert aus LF1. Das Kontrollfeld *aus dem Bauwerkseigengewicht* ist nicht selektiert da das Eigengewicht bereits im LF1 aktiviert ist.

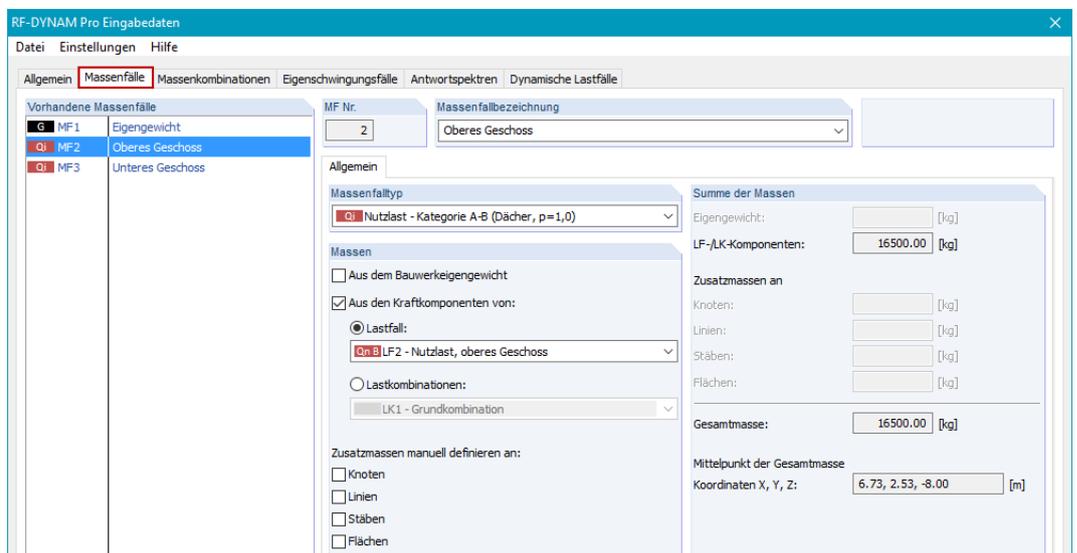


Bild 5.4: Massenfälle 2: Verkehrslasten des oberen Geschosses aus LF2.

Die Z-Richtung darf in diesem Beispiel vernachlässigt werden, da das vertikale Bemessungsspektrum kleiner als $2,5 \text{ m/s}^2$ ist (siehe **Abschnitt 4.3.3.5.2** in **EN 1998-1 [1]**).

Die Diagonalmatrix (Translationsfreiheitsgrade) konzentriert alle Massen auf FE-Knoten und vernachlässigt die Rotationsmassen. Diese Matrix ist mit ausreichender Genauigkeit für dieses Beispiel.

Die Diagonalmatrix (Translations- und Rotationsfreiheitsgrade) würde die rotierenden Massen berücksichtigen. Die konsistente Matrix würde die Massen anhand von Finite-Elemente-Form-Funktionen verteilen und dafür die Genauigkeit verbessern. Jedoch ist dies in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung nicht immer erwünscht, da deutlich mehr lokale Eigenformen identifiziert werden, die nicht von Bedeutung für das globale Schwingungsverhalten der Struktur sind.

Die Lanczos-Methode wird für die Berechnung der Eigenwerte verwendet. Dieser Eigenwertlöser ist für die meisten Strukturen zu empfehlen. Die Eigenformen werden auf einen Maximalwert von 1 skaliert. Steifigkeitsmodifikationen werden nicht berücksichtigt.

Die Einstellungen des *Eigenschwingungsfalles* sind in **Bild 5.6** dargestellt.

Die Eigenfrequenzen f , die Eigenperioden T , und die dazugehörigen effektiven Modalmassenfaktoren f_{me} sind in **Bild 5.7** aufgelistet. Laut **EN 1998-1 Abschnitt 4.3.3.3 [1]** muss die Summe der

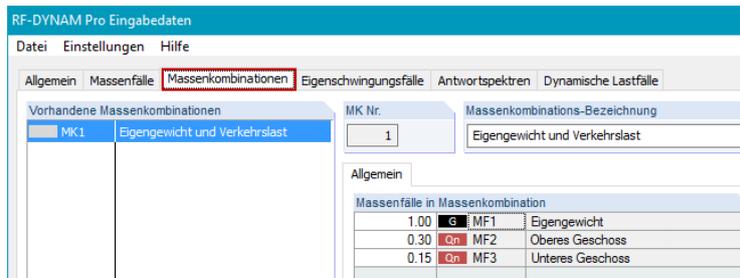


Bild 5.5: Massenkombination mit kombinierten Massen nach EN 1998-1 CEN.

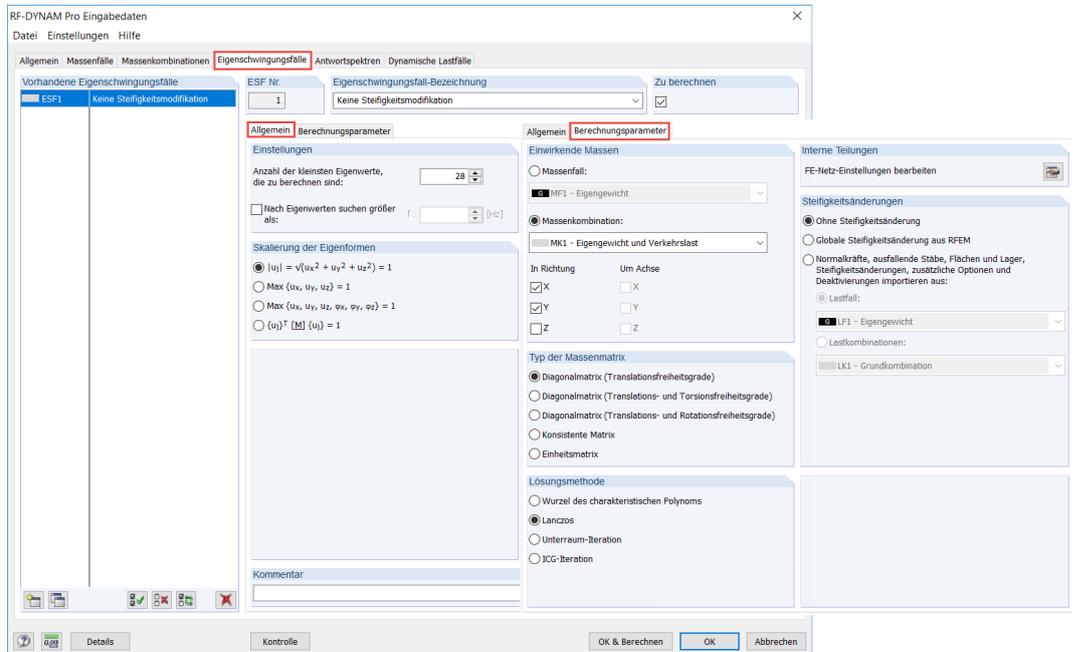


Bild 5.6: Eigenschwingungsfall um die Massenmatrix, die Anzahl der Eigenwerte, die Lösungsmethode, und die Skalierung der Eigenformen zu definieren.

effektiven Modalmassen größer als 90% der Gesamtstrukturmasse betragen. Die ersten drei Eigenwerte sind für die Y-Richtung relevant, und nur Eigenwert 28 wird für die X-Richtung benötigt.

Die aufgeführten Eigenwerte werden für das Multi-modale Antwortspektrenverfahren verwendet.

Die dominante Eigenform in Y-Richtung ist in Bild 5.8 und die dominante Eigenform in X-Richtung in Bild 5.9 dargestellt.

Antwortspektrum nach EN 1998-1 CEN

Das horizontale Bemessungsspektrum nach EN 1998-1 Abschnitt 3.2.2.5 ist wie folgt definiert:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (5.3)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (5.4)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5.5)$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C T_D}{T^2} \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5.6)$$

with

Form Nr.	Frequenz f [Hz]	Periode T [s]	Effektiver Modalmassenfaktor [-]		
			f _{meX} [kg]	f _{meY} [kg]	f _{meZ} [kg]
1	1.201	0.833	0.000	0.893	0.000
2	1.394	0.718	0.000	0.035	0.000
3	1.945	0.514	0.000	0.031	0.000
28	5.280	0.189	0.917	0.000	0.000

Bild 5.7: Relevante Eigenfrequenzen f [Hz], Eigenperioden T [s] und zugehörige effektive Modalmassenfaktoren f_{me} [-] der Struktur.

Eigenschwingung u [-]
RF-DYNAM Pro, ESF 1
Eigenform Nr. 1 - 1.201 Hz

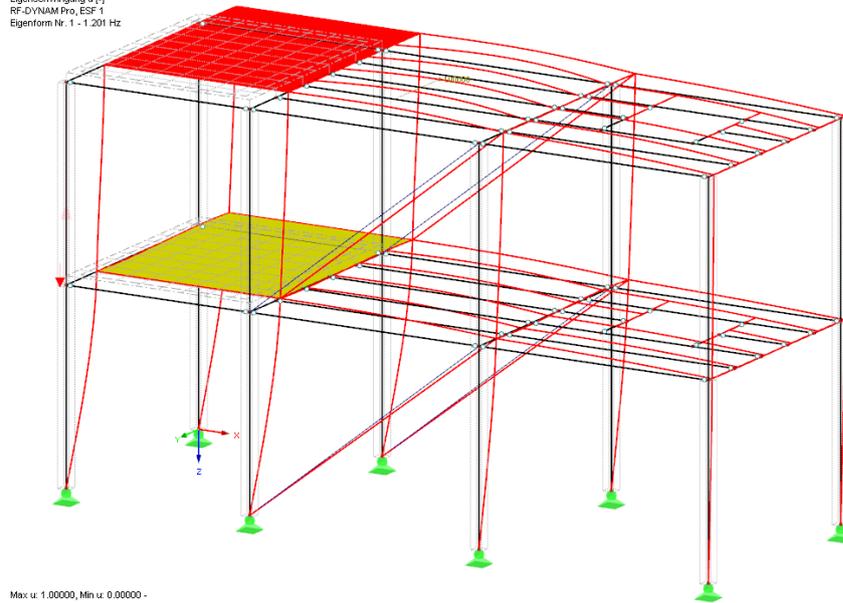


Bild 5.8: Dominante Eigenform in Y-Richtung mit einer Frequenz von 1,20 Hz.

- T : Schwingungsdauer [s]
- a_g : Bemessungs-Bodenbeschleunigung, $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$ [m/s²]
- a_{gR} : Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung [m/s²]
- γ₁ : Bedeutungsbeiwert
- T_B : Untere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung [s]
- T_C : Obere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung [s]
- T_D : Wert, der den Beginn des Bereichs konstanter Verschiebungen des Spektrums definiert [s]
- S : Bodenparameter
- S_d(T) : Ordinate des Bemessungsspektrums [m/s²]
- q : Verhaltensbeiwert der die Duktilität beschreibt
- β : Beiwert für den unteren Grenzwert für das horizontale Bemessungsspektrum

In diesem Beispiel wird eine Bodenbeschleunigung von a_{gR} = 1,0 m/s² und einem Bedeutungsbeiwert von γ₁ = 1,0 (Bedeutungskategorie II) angenommen. Die Parameter S, T_B, T_C, T_D werden anhand der Bodenklasse C und einem Spektrumstyp I definiert. Der Verhaltensbeiwert q ist auf der sicheren Seite mit 1 angenommen und die untere Schranke mit β = 0,2 festgelegt. Die Einstellungen in RF-DYNAM Pro und das resultierende horizontale und vertikale Bemessungsspektrum sind in den Bildern 5.10 und 5.11 gezeigt.

Antwortspektrenverfahren mit Ersatzlasten

Im Zusatzmodul *Ersatzlasten* wird ein Multi-modales Antwortspektrenverfahren durchgeführt. Ersatzlasten werden ermittelt und in Lastfälle in das Hauptprogramm RFEM exportiert, dies geschieht getrennt für jede Eigenform und Anregungsrichtung. Die Einstellungen für den *Dynamischen Lastfall* sind im Bild 5.12 dargestellt.

Eigenschwingung u [-]
RF-DYNAM Pro, ESF 1
Eigenform Nr. 26 - 5,280 Hz

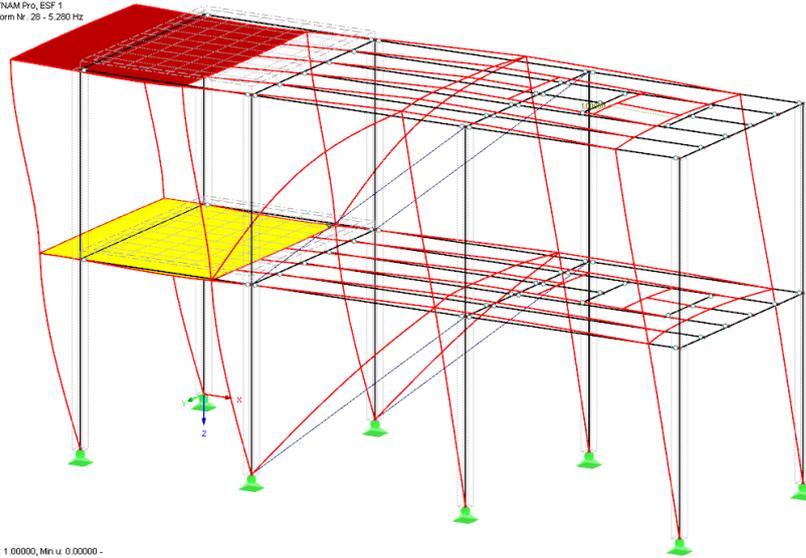


Bild 5.9: Dominante Eigenform in X-Richtung mit einer Frequenz von 5,28 Hz.

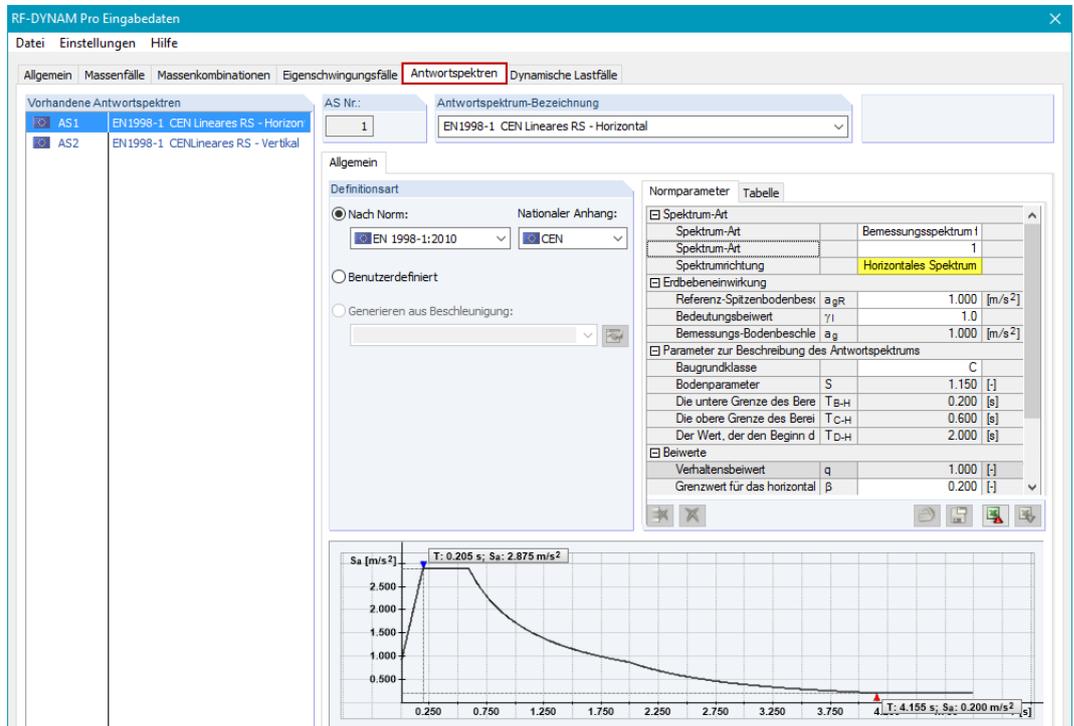


Bild 5.10: Horizontales Bemessungsspektrum nach EN 1998-1 Abschnitt 3.2.2.5.

Das horizontale Bemessungsspektrum wirkt in die Richtungen X und Y. Die Z-Richtung braucht nicht berücksichtigt zu werden, da das vertikale Spektrum kleiner als $2,5 \text{ m/s}^2$ ist (siehe Abschnitt 4.3.3.5.2 in EN 1998-1 [1]).

Zufällige Torsionswirkungen sind berücksichtigt um Unsicherheiten in der Lage der Massen abzudecken, das wird in Abschnitt 4.3.2 in EN 1998-1 [1] behandelt. Die Exzentrizitäten sind dabei mit $e_{ai} = 0,05 \cdot L_i$ definiert, wobei L_i die Gebäudelänge darstellt.

Die ermittelten Ersatzlasten inklusive der Torsionsmomente werden in *Lastfälle* exportiert, die erste Lastfallnummer ist mit 4 festgelegt.

In diesem Beispiel wird die Überlagerung der modalen Ergebnisse mit der SRSS Regel durchgeführt. Die SRSS Regel darf angewendet werden, wenn benachbarte Eigenwerte als unabhängig voneinander gelten, das ist der Fall wenn die Bedingung $T_j \leq 0,9 \cdot T_i$ mit $T_j \leq T_i$ erfüllt ist (EN

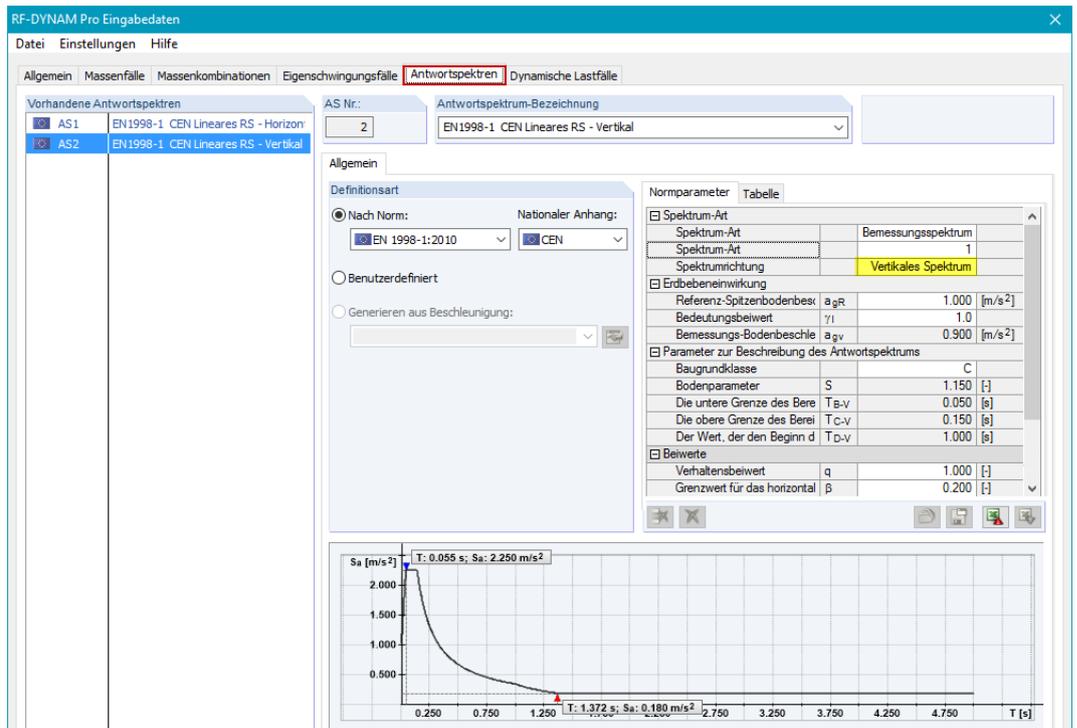


Bild 5.11: Vertikales Bemessungsspektrum nach EN 1998-1 Abschnitt 3.2.2.5. Der Maximalwert $S_d(T) \leq 2,5 \text{ m/s}^2$, somit darf die vertikale Richtung vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 4.3.3.5.2 in EN 1998-1 [1]).

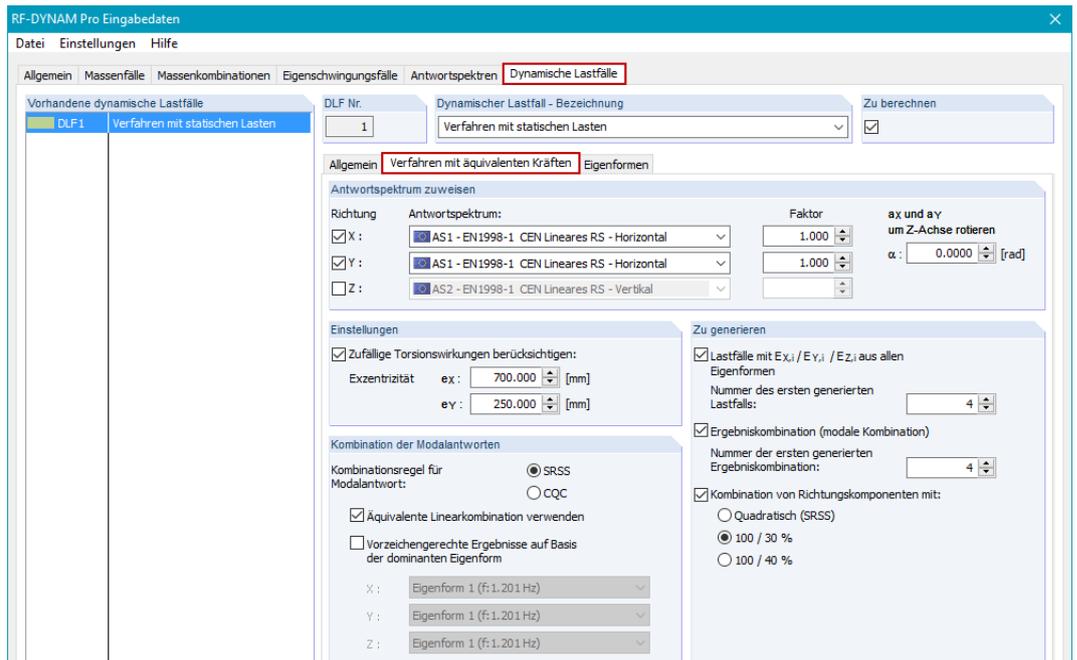


Bild 5.12: Einstellung für das Ersatzlastverfahren.

1998-1 Abschnitt 4.3.3.3.2 [1]). In diesem Beispiel können alle benachbarten Eigenperioden T_i als unabhängig voneinander betrachtet werden:

$$0,718 \leq 0,9 \cdot 0,833 = 0,750 \quad (5.7)$$

$$0,514 \leq 0,9 \cdot 0,718 = 0,646 \quad (5.8)$$

Die SRSS-Regel wird in Form einer *äquivalenten Linearkombination* ausgeführt. Die Formel für diese Kombinationsregel finden Sie im [Abschnitt 2.11.3](#) in [Gleichung 2.24](#).

Die Kombination der Ergebnisse aus den einzelnen Anregungsrichtungen erfolgt mit der 100% / 30% Regel. Die Richtungsüberlagerung ist in **Abschnitt 4.3.3.5.1 in EN 1998-1 [1]** geregelt.

Im Register *Eigenformen* sind einzelne Eigenwerte selektiert, die für das Multi-modale Antwortspektrenverfahren verwendet werden. In der Grafik ist das Antwortspektrum gezeigt und die zu jeder Eigenperiode zugehörigen Beschleunigungswerte sind rot markiert und in der Tabelle gelistet, siehe [Bild 5.13](#).

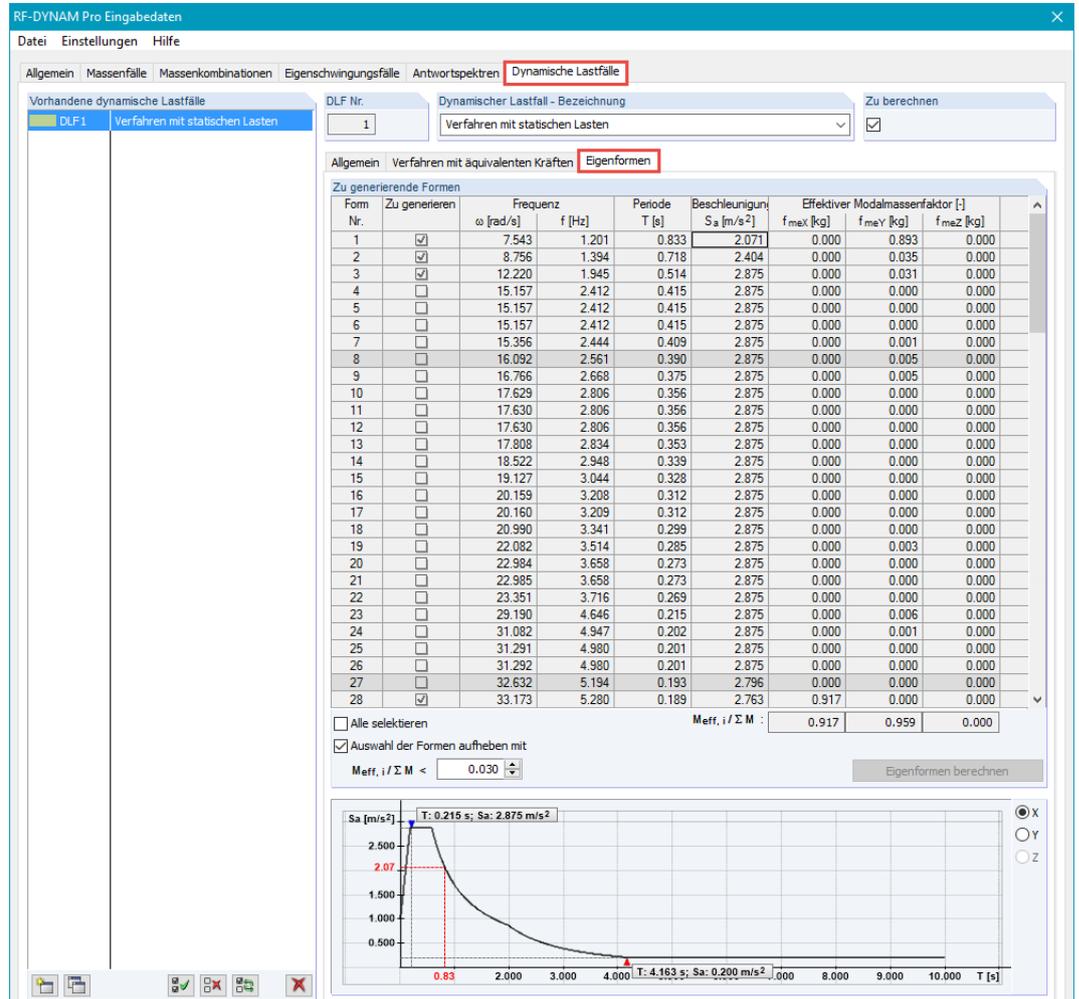


Bild 5.13: Selektion der Eigenwerte, die für das Multi-modale Antwortspektrenverfahren verwendet werden.

Die *Lastfälle* und die *Ergebniskombinationen* werden automatisch exportiert. Aufgrund der zufälligen Torsionswirkungen werden zwei *Lastfälle* für jede Eigenform und Anregungsrichtung erstellt, einer mit positiven Torsionsmomenten, der andere mit negativen Torsionsmomenten. Die Liste der exportierten *Lastfälle* ist in [Bild 5.14](#) gezeigt.

Die Liste der exportierten *Ergebniskombinationen* ist in [Bild 5.15](#) gezeigt.

Lastfälle und Kombinationen bearbeiten

Lastfälle | Lastkombinationen | Ergebniskombinationen

Vorhandene Lastfälle

G	LF1	Eigengewicht
Qn B	LF2	Nutzlast, oberes Geschoss
Qn B	LF3	Nutzlast, oberes Geschoss
AE	LF4	DLF1 - Eigenform 1, Richtung - Y, Torsion +
AE	LF5	DLF1 - Eigenform 1, Richtung - Y, Torsion -
AE	LF6	DLF1 - Eigenform 2, Richtung - Y, Torsion +
AE	LF7	DLF1 - Eigenform 2, Richtung - Y, Torsion -
AE	LF8	DLF1 - Eigenform 3, Richtung - Y, Torsion +
AE	LF9	DLF1 - Eigenform 3, Richtung - Y, Torsion -
AE	LF10	DLF1 - Eigenform 28, Richtung - X, Torsion +
AE	LF11	DLF1 - Eigenform 28, Richtung - X, Torsion -

Bild 5.14: Liste der exportierten *Lastfälle* mit Ersatzlasten, getrennt für jeden Eigenwert und Anregungsrichtung. Aufgrund der zufälligen Torsionswirkung gibt es zwei Lastfälle pro Eigenwert.

Lastfälle und Kombinationen bearbeiten

Lastfälle | Lastkombinationen | Ergebniskombinationen

Vorhandene Ergebniskombinationen

EK1	$1,35 \cdot LF1/s + 1,5 \cdot LF2 + 1,5 \cdot LF3$
EK4	DLF1 - Ergebnismhüllende - X
EK5	DLF1 - Ergebnismhüllende - Y
EK6	DLF1 - Ergebnismhüllende - 100% X/ 30% Y
EK7	DLF1 - Ergebnismhüllende - 30% X/ 100% Y
EK10	Bemessungssituation Erdbeben

Bild 5.15: Liste der exportierten *Ergebniskombinationen* aus modaler Kombination und Richtungsüberlagerung.

Für die modale Kombination werden *LFs* von verschiedenen Eigenformen aber resultierend aus der gleichen Anregungsrichtung mit der *SRSS* Regel überlagert. Die zwei *LFs* mit negativen und positiven Torsionsmomenten sind einer Gruppe zugeordnet und werden alternativ überlagert. Das Kombinationsschema ist in [Bild 5.16](#) gezeigt. Mehr Informationen über die Kombinatorik, wenn zufällige Torsionen angesetzt werden, finden Sie in der [Knowledge Base](#).

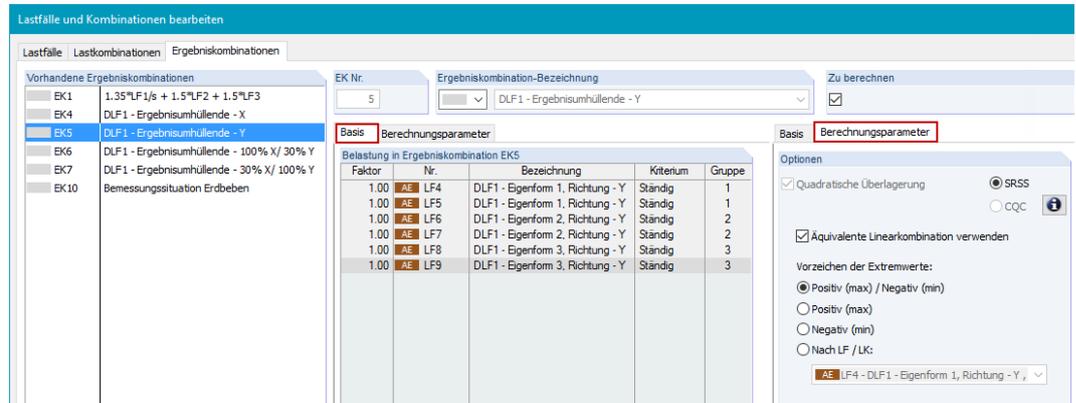


Bild 5.16: Kombinationsschema für die modale Überlagerung der Ergebnisse aller Eigenformen in Y-Richtung.

Für die Überlagerung der Ergebnisse aus den einzelnen Anregungsrichtungen wird die 100% / 30% Regel angewendet. Das Kombinationsschema ist in [Bild 5.17](#) gezeigt.



Bild 5.17: Kombinationsschema für die Überlagerung der Ergebnisse aus den einzelnen Anregungsrichtungen, hier wird die 100% / 30% Regel angewendet.

In diesem Beispiel exportiert *RF-DYNAM Pro* zwei *EKs*, weil zwei Anregungsrichtungen betrachtet werden. Die *EK* welche die ungünstigsten Ergebnisse liefert ist für die *Bemessungssituationen Erdbeben* zu verwenden.

Gesamterdbebenkraft

Um die Erdbebenkräfte zu ermitteln, gibt es verschiedene Optionen in *RF-DYNAM Pro* und *RFEM*.

- **Liste der Ersatzlasten in den Ergebnistabellen 5.8 und 5.9**

Die Ersatzlasten sind in den Ergebnistabellen 5.8, 5.9 und 5.10 zusammen mit der Summe der Ersatzlasten aufgelistet. Wenn die *Eigenform 1* selektiert ist, sind die Ersatzlasten F_Y in Tabelle 5.9 gelistet. Die Summe wird mit 141,29 kN angegeben, wie in [Bild 5.18](#) dargestellt. Zu beachten ist, dass die Ersatzlasten doppelt gelistet werden, weil die zufälligen Torsionswirkungen aktiviert sind und somit Lasten für die Fälle *Torsion +* und *Torsion -* aufgeführt werden. Die reale Gesamterdbebenkraft resultierend aus der *Eigenform 1* ist $F_Y = 70,65$ kN.

Die Summe der Ersatzlasten resultierend aus der *Eigenform 28* wird in Ergebnistabelle 5.8 aufgeführt, wie bereits erläutert werden die Ersatzlasten doppelt aufgelistet und die reale Gesamterdbebenkraft ist $F_X = 96,83$ kN, siehe dazu [Bild 5.19](#).

5.9 Ersatzlasten (Erregungen in Y)

DLF1 - Verfahren mit statischen Last

Eigenform 1 (f: 1.201 Hz)

FE-Netz Punkt	Eigenform Nr.	LF Nr.	Objekt Typ	X [m]	Stelle Y [m]	Z [m]	Ersatzlast			
							F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _z [kNm]
799	1	4	Fläche	0.000	1.000	-4.000	0.00	-0.17	0.00	0.12
	1	5	Fläche	0.000	1.000	-4.000	0.00	-0.17	0.00	-0.12
800	1	4	Fläche	1.000	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	0.16
	1	5	Fläche	1.000	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	-0.16
801	1	4	Fläche	1.500	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	0.16
	1	5	Fläche	1.500	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	-0.16
802	1	4	Fläche	2.000	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	0.16
	1	5	Fläche	2.000	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	-0.16
803	1	4	Fläche	2.500	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	0.16
	1	5	Fläche	2.500	1.000	-4.000	0.00	-0.23	0.00	-0.16
sum							0.00	141.29	0.00	

Ersatzlasten (Erregungen in X) Ersatzlasten (Erregungen in Y)

Bild 5.18: Summe der Ersatzlasten $\sum F_y$ resultierend aus *Eigenform 1*, dominant in die Y-Richtung. Zu beachten ist, dass hier die Ersatzlasten doppelt gelistet sind für den *Torsion +* und *Torsion -* Fall.

5.8 Ersatzlasten (Erregungen in X)

DLF1 - Verfahren mit statischen Last

Eigenform 28 (f: 5.280 Hz)

FE-Netz Punkt	Eigenform Nr.	LF Nr.	Objekt Typ	X [m]	Stelle Y [m]	Z [m]	Ersatzlast			
							F _x [kN]	F _y [kN]	F _z [kN]	M _z [kNm]
799	28	10	Fläche	0.000	1.000	-4.000	-0.16	0.00	0.00	0.04
	28	11	Fläche	0.000	1.000	-4.000	-0.16	0.00	0.00	-0.04
800	28	10	Fläche	1.000	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	0.06
	28	11	Fläche	1.000	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	-0.06
801	28	10	Fläche	1.500	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	0.06
	28	11	Fläche	1.500	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	-0.06
802	28	10	Fläche	2.000	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	0.06
	28	11	Fläche	2.000	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	-0.06
803	28	10	Fläche	2.500	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	0.06
	28	11	Fläche	2.500	1.000	-4.000	-0.23	0.00	0.00	-0.06
sum							193.66	0.01	0.00	

Ersatzlasten (Erregungen in X) Ersatzlasten (Erregungen in Y)

Bild 5.19: Summe der Ersatzlasten $\sum F_x$ resultierend aus der *Eigenform 28*, dominant in die X-Richtung. Zu beachten ist, dass hier die Ersatzlasten doppelt gelistet sind für den *Torsion +* und *Torsion -* Fall.

- Information aus den exportierten Lastfällen**

In der Tabelle 4.0 *Ergebnisse - Zusammenfassung* wird die Summe der Lasten und die Summe der Lagerkräfte angegeben. Für die dominante Eigenform in Y-Richtung sind die Ersatzlasten in die Lastfälle *LF4* beziehungsweise *LF5* exportiert, die Gesamterdbebenkraft ist $\sum F_y = 70,65$ kN (siehe Bild 5.20).

4.0 Ergebnisse - Zusammenfassung

LF4 - DLF1 - Eigenform

A	B	C
Bezeichnung	Wert	Einheit
LF4 - DLF1 - Eigenform 1, Richtung - Y, Torsion +		
Summe Belastung in Richtung X	0.00	kN
Summe Lagerkräfte in Richtung X	0.00	kN
Summe Belastung in Richtung Y	-70.65	kN
Summe Lagerkräfte in Richtung Y	-70.65	kN

Bild 5.20: Summe der Lasten $\sum F_y$ in *LF4* resultierend aus der *Eigenform 1*, dominant in die Y-Richtung.

Für die dominante Eigenform in X-Richtung sind die Ersatzlasten in *LF10* beziehungsweise *LF11* exportiert, die Gesamterdbebenkraft ist $\sum F_x = 96,83$ kN (siehe Bild 5.21).

4.0 Ergebnisse - Zusammenfassung

LF10 - DLF1 - Eigenform

A	B	C
Bezeichnung	Wert	Einheit
LF10 - DLF1 - Eigenform 28, Richtung - X, Torsion +		
Summe Belastung in Richtung X	-96.83	kN
Summe Lagerkräfte in Richtung X	-96.83	kN
Summe Belastung in Richtung Y	0.01	kN
Summe Lagerkräfte in Richtung Y	0.01	kN

Bild 5.21: Summe der Lasten $\sum F_x$ in *LF10* resultierend aus der *Eigenform 28*, dominant in die X-Richtung.

- Auswertung mit dem Ergebnisstab**

Ein Ergebnisstab kann an beliebiger Stelle im Modell platziert werden. Es ist ein virtueller Stab, der Ergebnisse von definierten Objekten integriert. Für detaillierte Informationen konsultieren Sie bitte das **RFEM Handbuch Abschnitt 4.17** und die [Knowledge Base](#). Der Ergebnisstab ist

sehr nützlich, um die Erdbebenkräfte getrennt für Geschosse eines Gebäudes auszuwerten. In diesem Beispiel wird der Ergebnisstab außerhalb der Struktur platziert und alle Objekte des Gebäudes sind bei der Definition des Ergebnisstabes berücksichtigt, dies wird in [Bild 5.22](#) dargestellt.

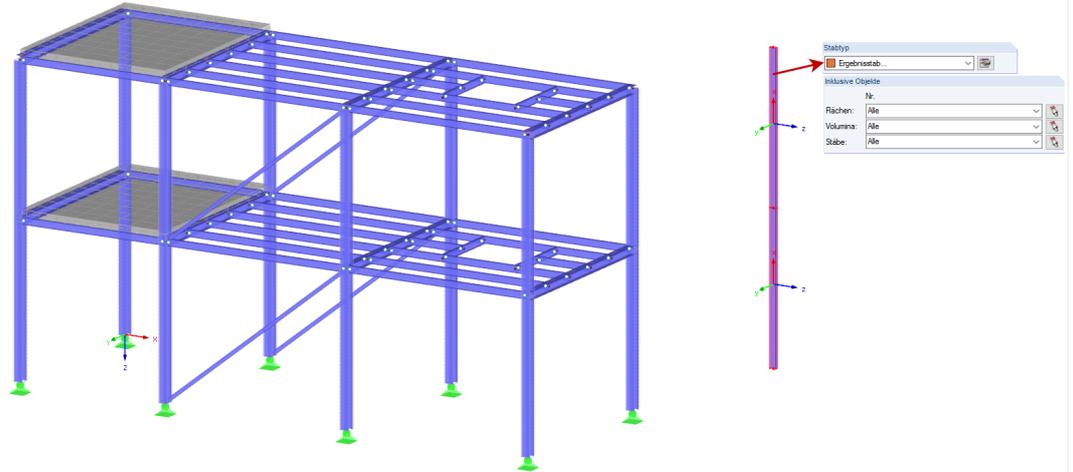


Bild 5.22: Statisches System mit dem Ergebnisstab außerhalb des Modells. Alle Objekte des Systems werden im Ergebnisstab berücksichtigt.

Die Querkräfte V_y des Ergebnisstabes im *LF4* liefern die Erdbebenkräfte resultierend aus der *Eigenform 1* in Y-Richtung. Die Querkräfte V_z des Ergebnisstabes im *LF10* liefern die Erdbebenkräfte resultierend aus der *Eigenform 28* in X-Richtung. Beide Ergebnisse sind in [Bild 5.23](#) dargestellt und die Ergebnisse sind in [Tabelle 5.1](#) zusammengefasst.

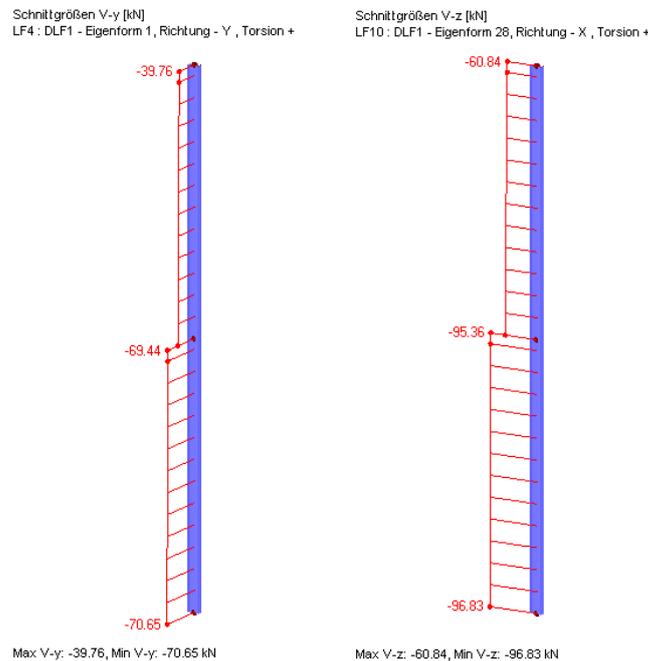
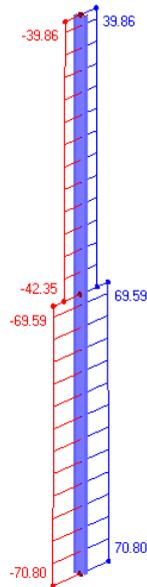


Bild 5.23: Gesamterdbebenkräfte resultierend aus *Eigenform 1* und *Eigenform 28*. Dargestellt im Ergebnisstab sind in *LF4* (*Eigenform 1* - Y-Richtung) die Querkräfte V_y und in *LF10* (*Eigenform 28* - X-Richtung) die Querkräfte V_z .

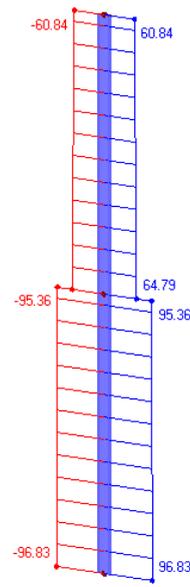
Die Erdbebenkräfte der *Ergebniskombinationen* können analog ausgewertet werden, was den Vorteil hat das bereits überlagerte Ergebnisse betrachtet werden. Die *EK5* beinhaltet die Ergebnisse der *SRSS*-Überlagerung in die Y-Richtung, und die *EK4* die Ergebnisse aus der X-Richtung. Die Querkräfte des Ergebnisstabes in diesen beiden *EKs* sind in [Bild 5.24](#) dargestellt.

Schnittgrößen V-y [kN]
EK5: DLF1 - Ergebnismühllende - Y



Max V-y: 70.80, Min V-y: -70.80 kN

Schnittgrößen V-z [kN]
EK4: DLF1 - Ergebnismühllende - X



Max V-z: 96.83, Min V-z: -96.83 kN

Bild 5.24: Gesamterdbebenkräfte resultierend aus den kombinierten dynamischen Ergebnissen in Y- und X-Richtung. Dargestellt im Ergebnisstab sind in EK5 (Y-Richtung) die Querkräfte V_y und in EK4 (X-Richtung) die Querkräfte V_z .

Die Gesamterdbebenkräfte, getrennt nach Geschossen des Gebäudes, sind in [Tabelle 5.1](#) zusammengefasst.

	Ebene Z = -8 m	Ebene Z = -4 m	ΣF
LF4: Mode 1 - Y-Richtung	39,76 kN	30,89 kN	70,65 kN
LF10: Mode 28 - X-Richtung	60,84 kN	35,99 kN	96,83 kN
EK5: SRSS - Y-Richtung	39,86 kN	30,94 kN	70,80 kN
EK4: SRSS - X-Richtung	60,84 kN	35,99 kN	96,83 kN

Tabelle 5.1: Gesamterdbebenkräfte für die einzelnen Geschosse resultierend aus den dominanten Eigenwerten, und aus überlagerten Ergebnissen nach der Modalkombination.

Stockwerksverschiebung

Maximale Verformungen können zur Ermittlung der Schiefstellung herangezogen werden. Laut **EN 1998-1 Abschnitt 4.4.2.2** [1] können die Einflüsse aus Theorie II.Ordnung (P- Δ Effekt) vernachlässigt werden wenn der Empfindlichkeitsbeiwert für die gegenseitige Stockwerksverschiebung θ klein genug ist. Dieser Beiwert wird wie folgt definiert:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,1 \quad (5.9)$$

with

- θ : Empfindlichkeitsbeiwert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung
- P_{tot} : Gesamtgewichtskraft im und oberhalb des betrachteten Geschosses
- d_r : Bemessungswert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung = Differenz der horizontalen Verschiebung d_s oben und unten im betrachteten Geschoss
- V_{tot} : Gesamterdbebenkraft des Geschosses
- h : Geschosshöhe

Um die Gesamtgewichtskraft im und oberhalb des betrachteten Geschosses zu ermitteln, müssen die Massen analysiert werden. Die Massen an jedem FE-Knoten, zusammen mit den Koordinaten eines jeden FE-Knoten werden in *Ergebnistabelle 5.6* ausgegeben. Diese Tabelle kann nach *Excel*



exportiert werden und die Filteroptionen helfen die Massen für jedes Geschoss zusammenzufassen. Für das Dachgeschoss $Z = -8 \text{ m}$ beträgt die zu berücksichtigende Masse $m_{Z=-8 \text{ m}} = 19\,588,21 \text{ kg}$. Die Masse in der Ebene $Z = -4 \text{ m}$ setzt sich aus der Masse des Untergeschosses, $m_{\text{bottom}} = 17\,927,17 \text{ kg}$, und der Masse des Dachgeschosses zusammen. Es ergibt sich eine zu berücksichtigende Masse für die Ebene $Z = -4 \text{ m}$ von $m_{Z=-4 \text{ m}} = 37\,515,38 \text{ kg}$. Für die Ebene $Z = 0 \text{ m}$ beträgt die Summe der Massen $m_{Z=0 \text{ m}} = 813,32 \text{ kg}$, diese werden nicht berücksichtigt, da dies die Ebene der Auflager ist.

Die Erdbebenkräfte wurden im vorangegangenen Abschnitt behandelt, die Kräfte für jedes Geschoss sind in [Tabelle 5.1](#) zusammengefasst. Die Höhe der Geschosse beträgt jeweils $h = 4 \text{ m}$.

Die globalen Verformungen u_y in *EK5* (Erdbeben in Y-Richtung) sind in [Bild 5.25](#) dargestellt.

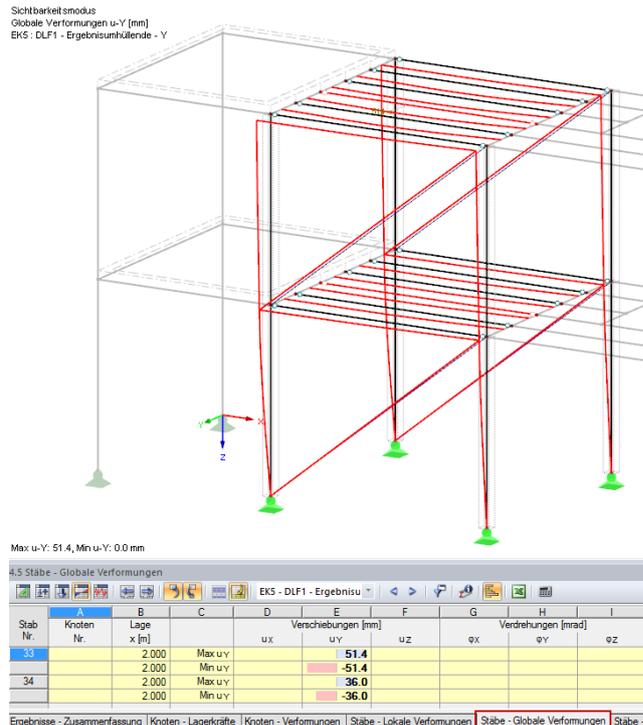


Bild 5.25: Globale Verformungen u_y resultierend aus der Erdbebenanregung in Y-Richtung (*EK5*).

Der Bemessungswert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung für das obere Geschoss beträgt $d_{r,top} = 51,4 - 36,0 = 15,4 \text{ mm}$ und für das untere Geschoss $d_{r,bottom} = 36,0 \text{ mm}$. Der Empfindlichkeitsbeiwert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung für das obere Geschoss ergibt sich mit

$$\theta_{top} = \frac{19\,588,21/100 \cdot 15,4/1\,000}{39,86 \cdot 4} = 0,02 \quad (5.10)$$

und für das untere Geschoss mit

$$\theta_{bottom} = \frac{37\,515,38/100 \cdot 36,0/1\,000}{30,94 \cdot 4} = 0,11. \quad (5.11)$$

Der Grenzwert von 0,1 ist im unteren Geschoss überschritten.

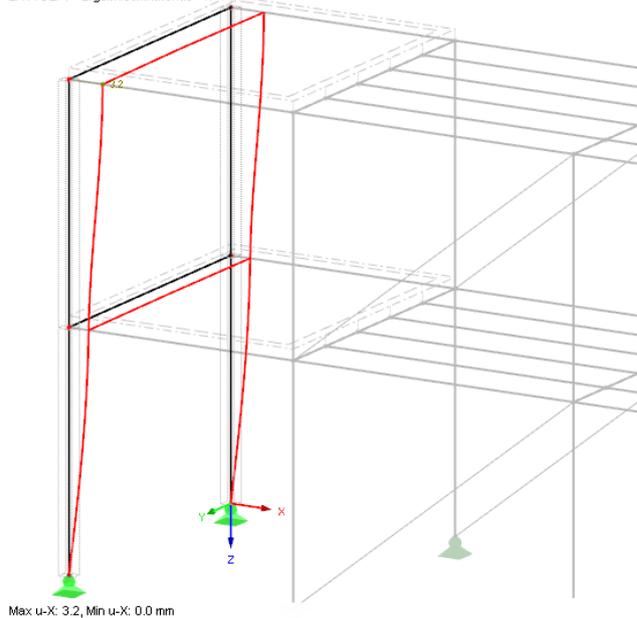
Die globalen Verformungen u_x in *EK4* (Erdbeben in X-Richtung) sind in [Bild 5.26](#) dargestellt.

Der Bemessungswert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung für das obere Geschoss beträgt $d_{r,top} = 3,2 - 1,8 = 1,4 \text{ mm}$ und für das untere Geschoss $d_{r,bottom} = 1,8 \text{ mm}$. Der Empfindlichkeitsbeiwert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung für das obere Geschoss ergibt sich mit

$$\theta_{top} = \frac{19\,588,21/100 \cdot 1,4/1\,000}{60,84 \cdot 4} = 1,13 \times 10^{-3} \quad (5.12)$$

und für das untere Geschoss mit

Sichtbarkeit smodus
 Globale Verformungen u-X [mm]
 EK4 - DLF1 - Ergebnishülle - X



Max u-X: 3.2, Min u-X: 0.0 mm

Knoten Nr.		Verschiebungen [mm]			Verdrehungen [mrad]		
		u _X	u _Y	u _Z	φ _X	φ _Y	φ _Z
4	Max	3.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.1
	Min	-3.2	-0.8	0.0	0.0	0.0	-0.1
5	Max	1.8	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1
	Min	-1.8	-0.6	0.0	0.0	-0.1	-0.1

Bild 5.26: Globale Verformungen u_x resultierend aus der Erdbebenanregung in X-Richtung (EK4).

$$\theta_{bottom} = \frac{37\,515,38/100 \cdot 1,8/1\,000}{35,99 \cdot 4} = 4,69 \times 10^{-3}. \quad (5.13)$$

In die X-Richtung des Gebäudes wird der Grenzwert von 0,1 eingehalten.

In diesem Beispiel wird der Empfindlichkeitsbeiwert der gegenseitigen Stockwerksverschiebung nach Gleichung 5.9 im unteren Geschoss in Y-Richtung leicht überschritten. In Übereinstimmung mit dem EN 1998-1 Abschnitt 4.4.2.2 (3) [1] darf der Einfluss der Theorie II.Ordnung näherungsweise berücksichtigt werden, indem die seismischen Beanspruchungsgrößen mit einem Faktor $1/(1 - \theta)$ multipliziert werden. Dies ist zulässig solange der Empfindlichkeitsbeiwert θ kleiner als 0,2 ist.

Einflüsse aus Theorie II.Ordnung

- **Näherungsweise Berücksichtigung der Theorie II.Ordnung mit dem Faktor $1/(1 - \theta)$**

Um die Theorie II.Ordnung näherungsweise zu berücksichtigen, können die dynamischen Ergebnisse entsprechend um den Faktor $1/(1 - 0,11) = 1,124$ erhöht werden. In *RF-DYNAM Pro* in den *Dynamischen Lastfällen* kann dieser Faktor berücksichtigt werden, notwendig ist dies nur in die Y-Richtung. Die Einstellungen sind in Bild 5.27 dargestellt.

- **Geometrische Steifigkeitsmatrix zur Berücksichtigung der Theorie II.Ordnung**

Wenn die gegenseitigen Stockwerksverschiebungen größer sind und der Einfluss der Theorie II.Ordnung genauer berücksichtigt werden muss, kann der Einfluss der Normalkräfte in *RF-DYNAM Pro* aktiviert und somit die geometrische Steifigkeitsmatrix importiert werden. Frequenzen und Ersatzlasten werden dann mit einer modifizierten Steifigkeitsmatrix ermittelt. Der Einfluss der Normalkräfte wird in den *Eigenschwingungsfällen* in *RF-DYNAM Pro* aktiviert, wie im Bild 5.28 gezeigt.



Bild 5.27: Faktor $1/(1 - \theta)$ um näherungsweise die Theorie II.Ordnung zu berücksichtigen.

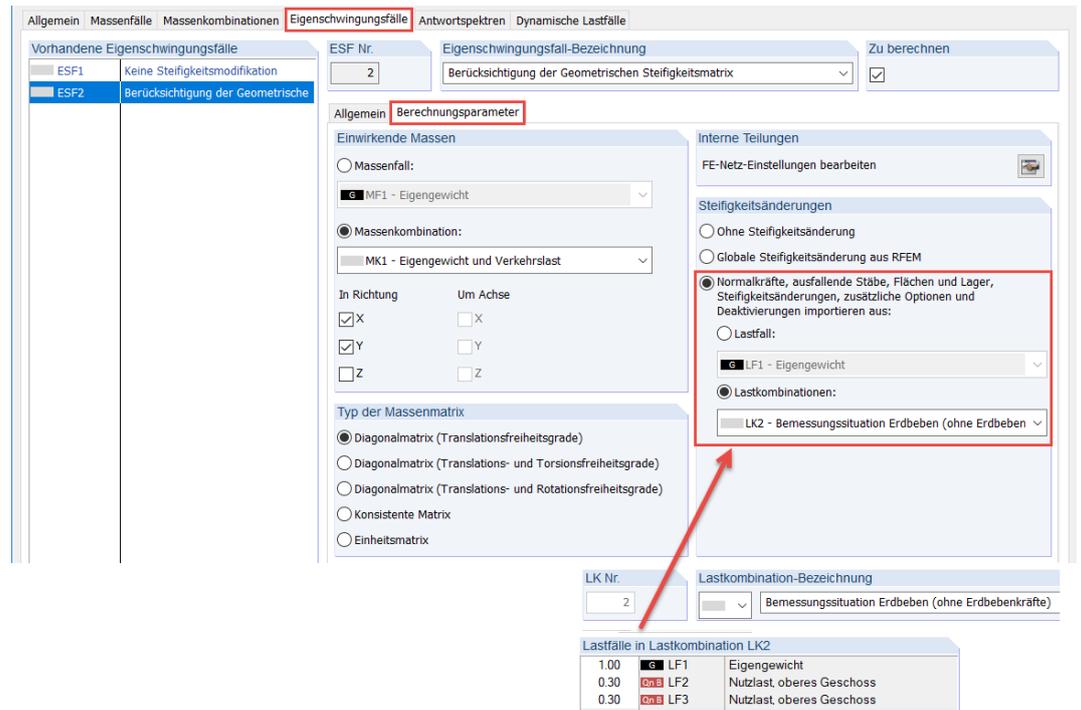


Bild 5.28: Berücksichtigung der Normalkräfte in den *Eigenschwingungsfällen* um die Steifigkeitsmatrix um die geometrische Steifigkeitsmatrix zu erweitern. Die Normalkräfte der *LK2* werden für die Modifikation verwendet.

Die *Lastkombination LK2* wird verwendet um die Steifigkeitsmatrix zu modifizieren und Effekte aus Theorie II.Ordnung zu berücksichtigen, in der *LK2* sind die *Lastfälle* Eigengewicht und Verkehrslasten nach der *Erdbebenbemessungssituation* kombiniert, die Kombinationsfaktoren ψ_2 sind dem **EN 1990 Tabelle A.1.1** [4] entnommen.

Die Einstellungen in den *Eigenschwingungsfällen* beeinflussen die Frequenzen der Struktur. Der *ESF* muss einem *Dynamischen Lastfall* zugewiesen werden, so dass die modifizierten Frequenzen für die Berechnung der Ersatzlasten verwendet werden. Die Einstellungen des *DLF3* sind in **Bild 5.29** dargestellt.

Die Ersatzlasten werden mit diesen modifizierten Frequenzen ermittelt und dann in das Hauptprogramm *RFEM* exportiert. Die Steifigkeitsmodifikationen werden nicht automatisch in die *LFs* übernommen. Die geometrische Steifigkeitsmatrix muss auch berücksichtigt werden, um die endgültigen Ergebnisse wie Verformungen und Schnittgrößen zu ermitteln. Die notwendigen Einstellungen sind in **Bild 5.30** dargestellt und müssen manuell eingestellt werden.

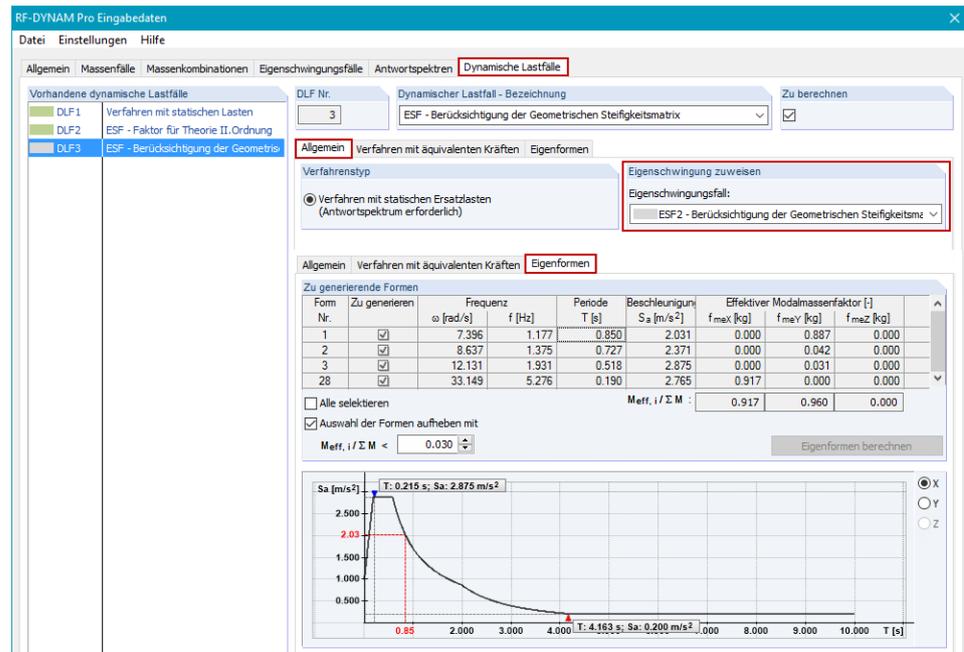


Bild 5.29: Die modifizierte Steifigkeitsmatrix wird dem *DLF* zugewiesen. Die Frequenzen, sowie auch die Beschleunigungswerte S_a aus dem Antwortspektrum sind leicht verändert, vergleiche mit Bild 5.13.

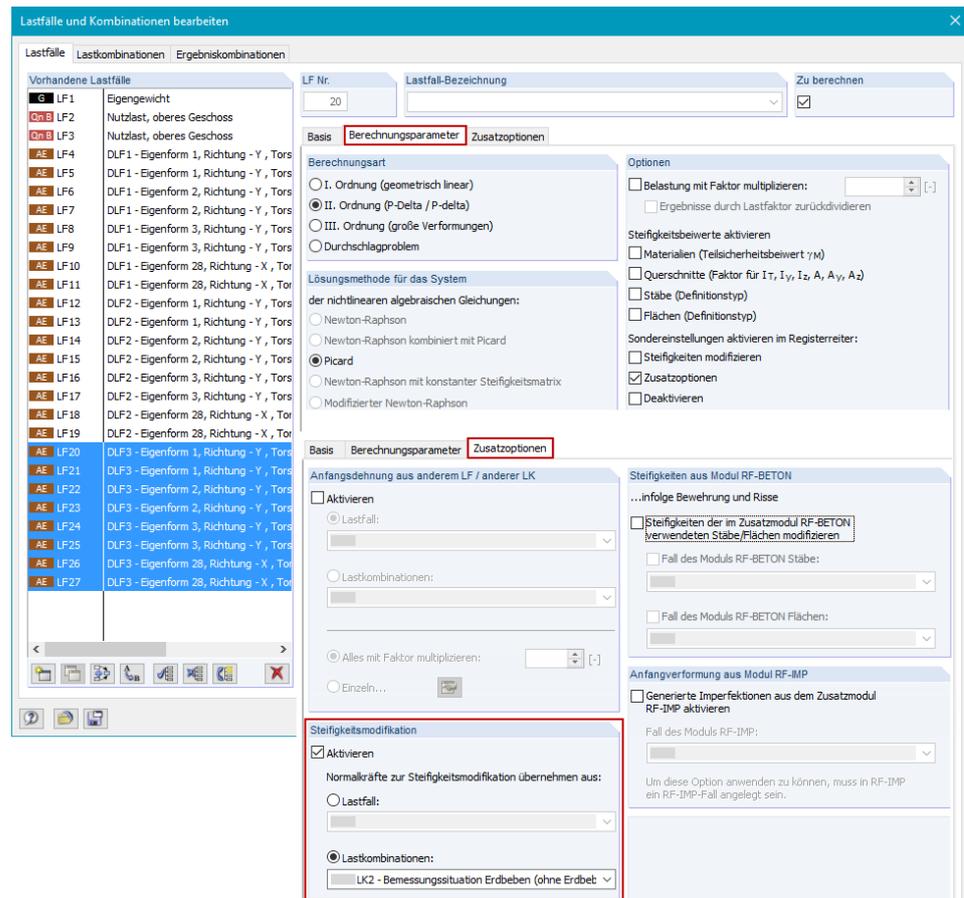


Bild 5.30: Steifigkeitsmodifikationen in den *LFs* exportiert vom *DLF3*. Die geometrische Steifigkeitsmatrix muss auch bei der Berechnung dieser Lastfälle berücksichtigt werden.

Ergebniskombination für die Bemessungssituation Erdbeben

Die zwei exportierten EKs aus *RF-DYNAM Pro* (EK6: 100% X and 30% Y / EK7: 30% X and 100% Y) werden mit *ODER* kombiniert. Die ungünstigere von beiden wird als A_{Ed} bei der *Bemessungssituation Erdbeben* verwendet. Diese ist in **EN1990 Abschnitt 6.4.3.4** in **Gleichung (6.12)** definiert [4].

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.14)$$

Die Kombinationsfaktoren Ψ_2 sind in der **EN1990 Tabelle A.1.1** [4] gelistet. Diese Kombinationsbeiwerte wurden bereits bei der Massenkombination verwendet.

Die Kombination für die *Bemessungssituation Erdbeben* muss in *RFEM* manuell definiert werden. Dies kann gemacht werden indem *Lastfälle* genutzt werden oder mit der vorrangig definierten Lastkombination *LK2*, beides wird in **Bild 5.31** gezeigt.

EK Nr.	Ergebniskombination-Bezeichnung
10	Bemessungssituation Erdbeben (mit LF)

Belastung in Ergebniskombination EK10				
Faktor	Nr.	Bezeichnung	Kriterium	Gruppe
1.00	LF1	Eigengewicht	Ständig	-
0.30	LF2	Nutzlast oberes	Veränderlich	-
0.30	LF3	Nutzlast oberes	Veränderlich	-
1.00	EK6		Veränderlich	1
1.00	EK7		Veränderlich	1

EK Nr.	Ergebniskombination-Bezeichnung
11	Bemessungssituation Erdbeben (mit LK)

Belastung in Ergebniskombination EK11				
Faktor	Nr.	Bezeichnung	Kriterium	Gruppe
1.00	LK2	Bemessungssitu	Ständig	-
1.00	EK6		Veränderlich	1
1.00	EK7		Veränderlich	1

Bild 5.31: Ergebniskombination für die *Bemessungssituation Erdbeben* nach **EN1990** mit den Kombinationsbeiwerten Ψ_2 . (a) Kombination mit Lastfällen und (b) Kombination mit der Anfangs definierten Lastkombination *LK2*, mit den gleichen Kombinationsbeiwerten Ψ_2 .

Die Nutzung von *Lastkombinationen* wird empfohlen, wenn Nichtlinearitäten in der Konstruktion vorhanden sind oder, wenn Effekte aus zweiter Ordnung berücksichtigt werden sollen.

Das resultierende Moment M_y und die Lagerkräfte an ausgewählten Stäben der Struktur sind in **Bild 5.32** dargestellt.

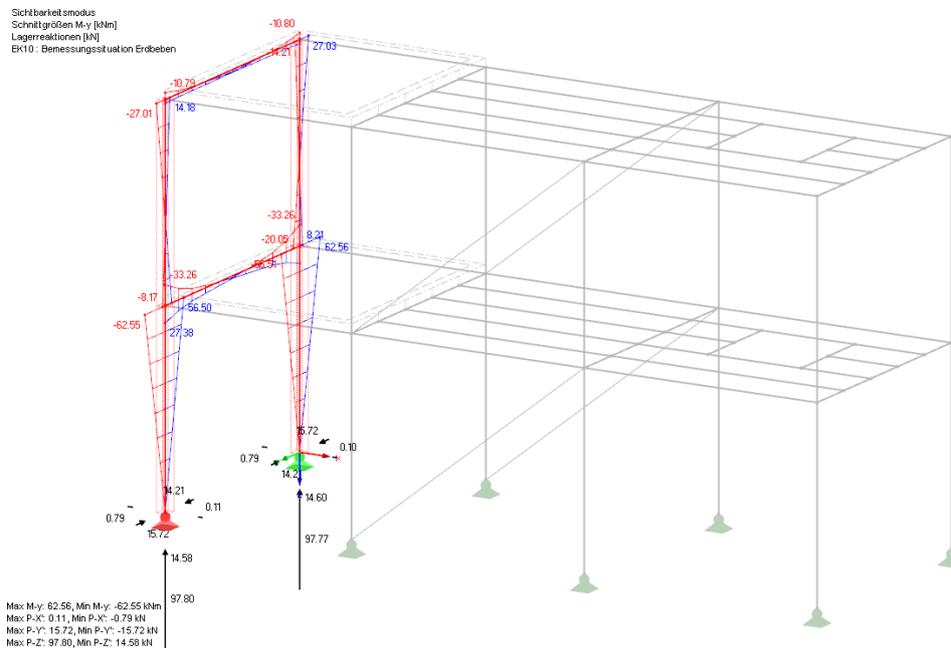


Bild 5.32: Moment M_y und Auflagerkräfte an ausgewählten Stäben der Struktur. Ergebnisse der *EK10* für die *Bemessungssituation Erdbeben*.

Die internen Schnittgrößen sind in *Ergebnistabelle 4.6* angegeben, dies wird für den Stab 6 am Knoten 5 im **Bild 5.33** gezeigt.

4,6 Stäbe - Schnittgrößen

EK10 - Bemessungssitu.

Stab Nr.	A Knoten Nr.	B Lage x [m]	C	D		E		F	G	H		I
				N	Kräfte [kN]	V _y	M _T			M _y	M _z	
6	5	4,000	max N	-12.56	-0.14	13.97	0.09	56.40	0.42	LF 1,4,7,8,11		
			min N	-95.78	-0.54	-15.49	-0.09	-62.45	2.32	LF 1-4,7,8,11		
			max V _y	-19.35	-0.06	12.73	-0.10	51.42	0.07	LF 1,2,5,6,9,10		
			min V _y	-88.99	-0.63	-14.24	0.10	-57.47	2.67	LF 1,3,5,6,9,10		
			max V _z	-17.42	-0.21	14.00	0.09	56.50	1.00	LF 1,2,4,7,8,10		
			min V _z	-90.92	-0.47	-15.51	-0.09	-62.55	1.74	LF 1,3,4,7,8,10		
			max M _T	-91.61	-0.54	-14.21	0.10	-57.34	2.03	LF 1-3,5,6,9,11		
			min M _T	-16.73	-0.14	12.70	-0.10	51.29	0.71	LF 1,5,6,9,11		
			max M _y	-17.42	-0.21	14.00	0.09	56.50	1.00	LF 1,2,4,7,8,10		
			min M _y	-90.92	-0.47	-15.51	-0.09	-62.55	1.74	LF 1,3,4,7,8,10		
max M _z	-65.70	-0.58	-4.62	0.06	-18.63	2.83	LF 1,3,5,6,9,10					
min M _z	-42.64	-0.11	3.11	-0.06	12.58	-0.09	LF 1,2,5,6,9,10					

Ergebnisse - Zusammenfassung | Knoten - Lagerkräfte | Knoten - Verformungen | Stäbe - Lokale Verformungen | Stäbe - Globale Verformungen | **Stäbe - Schnittgrößen** | St

Bild 5.33: Ergebnisse der EK10 für die Bemessungssituation Erdbeben. Die Schnittgrößen in Ergebnistabelle 4.6 sind am Stab 6 am Knoten 5 aufgelistet.

Die Modalkombination wurde in Form der äquivalenten Linearkombination ausgeführt, der Effekt dieser Regel wird an den zugehörigen Schnittgrößen deutlich, diese sind kleiner als die Maximalwerte (fettgedruckte Werte auf der Hauptdiagonalen) und haben unterschiedliche Vorzeichen.

Der Einfluss der Theorie II.Ordnung wurde (1) mit Hilfe eines Faktors $1/(1 - \theta)$ (DLF2 in RF-DYNAM Pro) und (2) mit dem Import der geometrischen Steifigkeitsmatrix (DLF3 in RF-DYNAM Pro) berücksichtigt. Für beide Methoden wurde die Kombination für die Bemessungssituation Erdbeben, wie oben beschrieben, angelegt und die Schnittgrößen sind in Bild 5.34 verglichen.

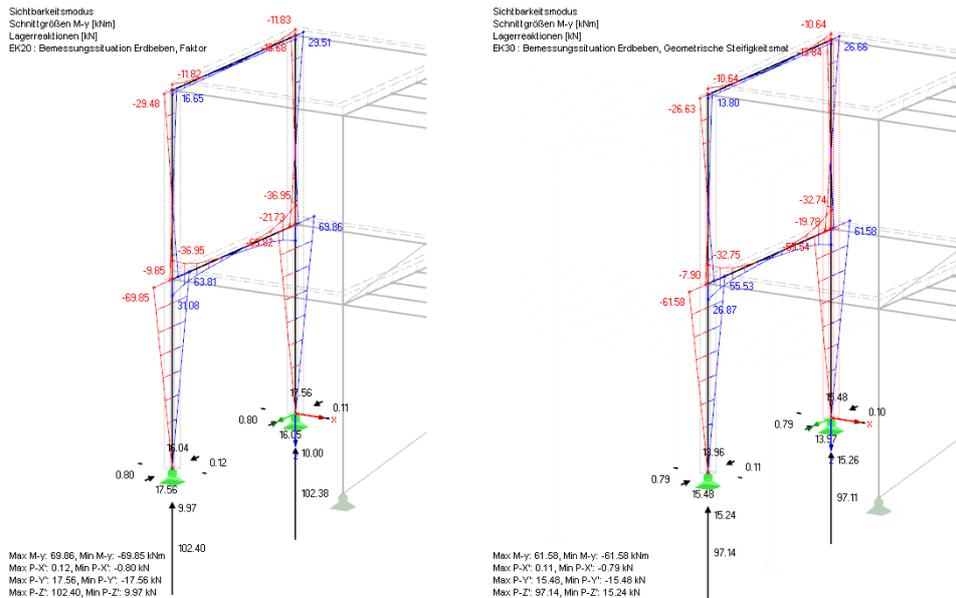


Bild 5.34: Ergebnisse der Bemessungssituation Erdbeben wenn die Einflüsse aus Theorie II.Ordnung, (links) mit einem Faktor (EK20) und (rechts) mit der geometrischen Steifigkeitsmatrix, berücksichtigt werden. Moment M_y and Lagerkräfte an ausgewählten Stäben und Knoten der Struktur sind dargestellt.

Die Näherungsmethode mit dem Faktor $1/(1 - \theta)$ führt zu Ergebnissen auf der sicheren Seite liegend.

Mit diesen Ergebniskombinationen für die Bemessungssituation Erdbeben kann nun die weitere Bemessung der Bauteile stattfinden, zum Beispiel in den Modulen STAHL, STAHL EC3 oder BETON.

5.2 Maschineninduzierte Schwingungen

Im folgendem Beispiel wird die dynamische Anregung zweier rotierender Maschinen untersucht. Ein lineares Zeitverlaufsverfahren im Modul *RF-DYNAM Pro - Erzwungene Schwingungen* wird durchgeführt. Das Stahltragwerk, in dem sich diese beiden Maschinen befinden, wird in Resonanz ange-regt, das heißt die Frequenz der Anregung ist gleich der Eigenfrequenz der Struktur, daraus folgen unzumutbare große Verformungen und Beschleunigungen. Eine Änderung der Querschnitte und damit Änderung der Eigenfrequenzen des Stahltragwerkes ist zwingend notwendig.

Struktur, Maschine und Lastfälle

Das statische System zusammen mit den verwendeten Materialien und Querschnitten ist in [Bild 5.35](#) dargestellt.

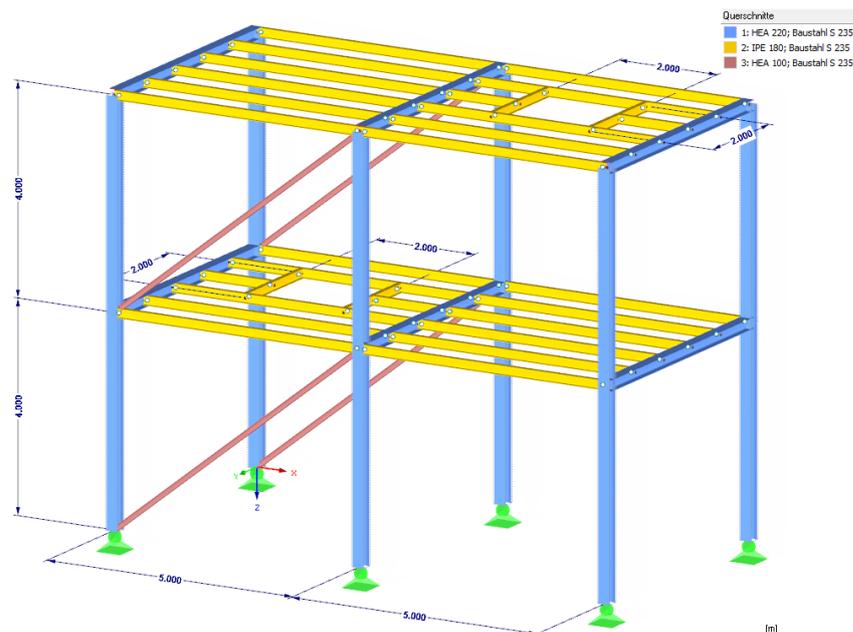


Bild 5.35: Statisches System mit farbig dargestellten Materialien und Querschnitten. In den beiden Öffnungen sind die Maschinen eingehängt.

In den beiden Öffnungen im Ober- und Untergeschoss ist jeweils eine Maschine eingehängt.

Das Eigengewicht des Stahltragwerkes in +Z-Richtung und eine zusätzliche Flächenlast von $0,5 \text{ kN/m}^2$ sind im *LF1* definiert, dieser Lastfall wird als Masse in *RF-DYNAM Pro* importiert.

Die Maschinen haben jeweils ein Eigengewicht von $m = 1,84 \text{ t}$. Das Maschineneigengewicht wirkt als Linienlast auf die angrenzenden Stäbe, dies wird in *LF2* definiert und ist in [Bild 5.36](#) dargestellt.

Die Rotormasse von $m_R = 0,5 \text{ t}$ rotiert mit 310 rpm mit einer Exzentrizität von $e = 19 \text{ mm}$. Diese Bewegung ist in [Bild 5.37](#) illustriert, die Radialkraft F_r wirkt senkrecht zur Drehbewegung.

Die Erregerfrequenz durch die Maschine ergibt sich zu:

$$\omega_e = 2\pi \cdot 310 \text{ rpm} / 60 \text{ s} = 32,463 \text{ rad/s} \quad (5.15)$$

In *RF-DYNAM Pro* werden später periodische Anregungen definiert mit der Erregerfrequenz ω_e .

Die Radialkraft ergibt sich wie folgt:

$$F_r = \omega_e^2 \cdot e \cdot m_R = 10,01 \text{ kN} \quad (5.16)$$

In *RFEM* werden vereinfacht nur Vertikal- und Horizontallasten definiert, die Horizontalkomponente wird dabei als zeitlich verzögert, mit einer Phasenverschiebung in der harmonischen Anregung definiert. Dies wird in der Definition der Zeitdiagramme in *RF-DYNAM Pro* berücksichtigt.

LF2: Eigengewicht Maschinen
Belastung (kNm)

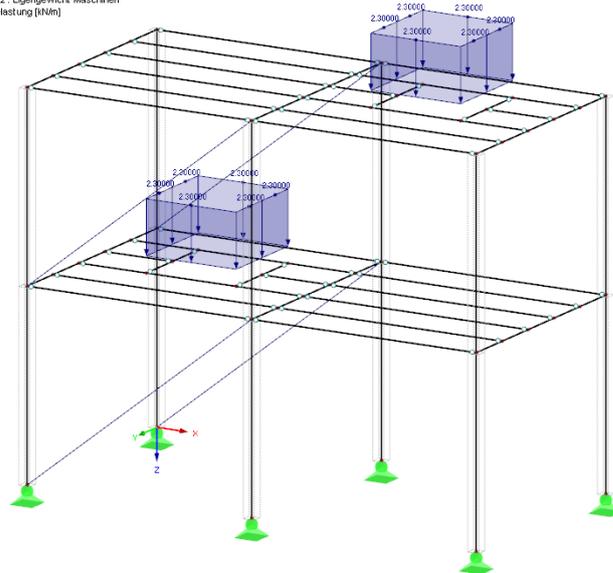


Bild 5.36: Das Maschineneigengewicht definiert als Linienlasten entlang der Öffnungen.

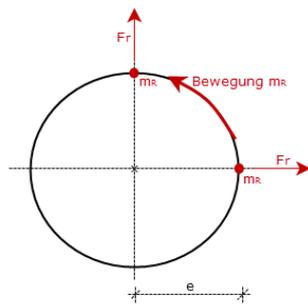
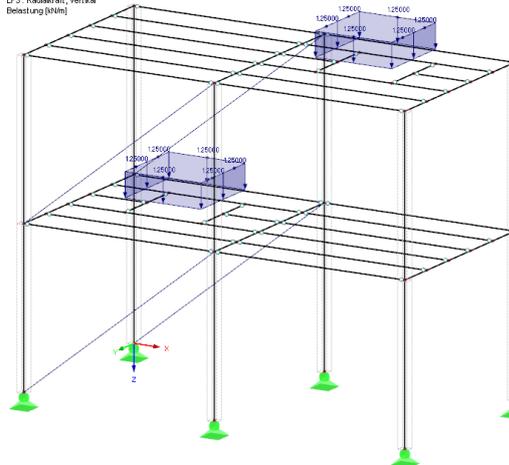


Bild 5.37: Rotationsbewegung der Rotormasse m_R innerhalb der Maschine und resultierende Radialkraft F_r .

Auch die Radialkräfte werden als Linienlasten entlang der Öffnungen in *RFEM* definiert, dabei werden Vertikal- und Horizontalkräfte in verschiedene Lastfälle gespeichert. Die Definition der Lasten in *LF3* und *LF4* bestimmen Größe und Position der zeitlich veränderlichen Anregung. Die Lastfälle sind in [Bild 5.38](#) illustriert.

LF3: Radialkraft, vertikal
Belastung (kNm)



LF4: Radialkraft, horizontal
Belastung (kNm)

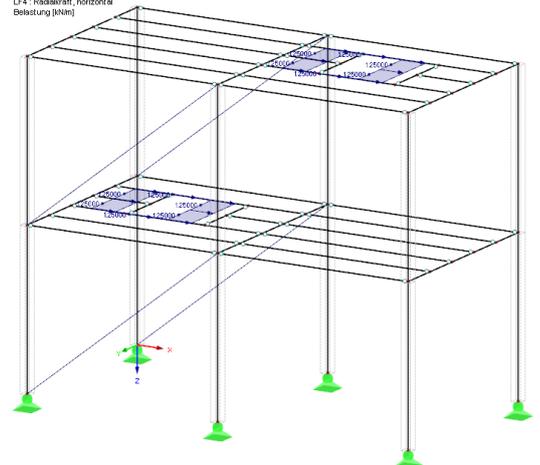


Bild 5.38: Die sich aus der Rotation ergebende Radialkraft F_r angesetzt als vertikale und horizontale Linielasten entlang der Öffnungen, definiert in zwei verschiedenen Lastfällen.

In den allgemeinen Angaben in *RF-DYNAM Pro* wird das Modul *Erzwungene Schwingung* und die *Zeitdiagramme* aktiviert (siehe [Bild 5.39](#)).



Bild 5.39: Allgemeine Angaben in *RF-DYNAM Pro* um das Modul *Erzwungene Schwingungen* zu aktivieren.

Definition von Massen

In diesem Beispiel ist nur das Eigengewicht der Struktur und der Maschinen von Bedeutung, die Lastfälle *LF1* und *LF2* werden als Massen in das Modul *RF-DYNAM Pro* importiert. Zwei Massenfälle werden definiert, *MF1* ist in [Bild 5.40](#) dargestellt. Der *MF2* wird analog definiert mit dem Import von *LF2*.

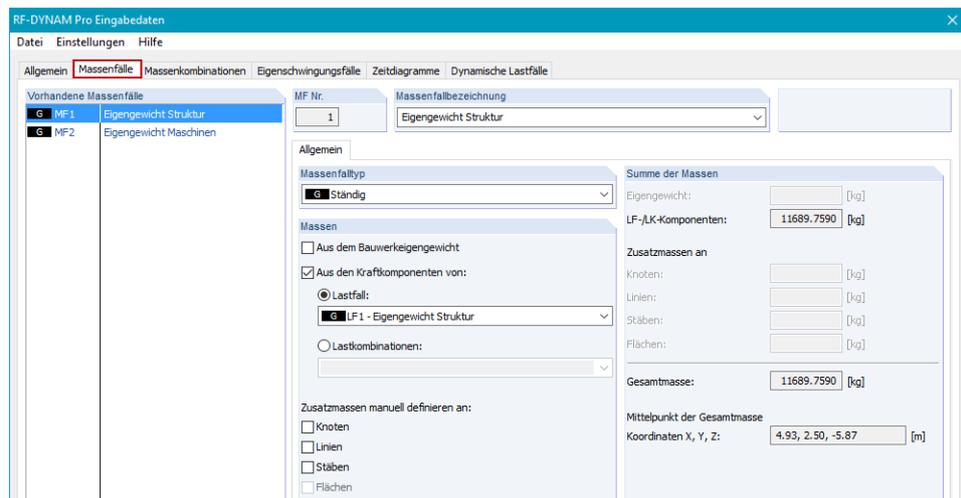


Bild 5.40: *Massenfall 1:* Eigengewicht importiert aus *LF1*. Das Kontrollfeld *aus dem Bauwerkseigengewicht* ist nicht selektiert da das Eigengewicht bereits im *LF1* aktiviert ist.

Die beiden Eigengewichts-Massenfälle werden in einer *Massenkombination* zu jeweils 100% überlagert, dies in [Bild 5.41](#) gezeigt.



Bild 5.41: *Massenkombination* mit kombinierten Massen.

Eigenschwingungsanalyse

Für eine Zeitverlaufsanalyse mittels der *linear impliziten Newmark-Analyse* sind Eigenwerte und Eigenformen nicht erforderlich. Die Lösung erfolgt über ein Zeitschrittintegrationschema. Wichtig für eine genaue Lösung ist die Wahl des Zeitschrittes (siehe nächster Abschnitt). Trotzdem ist es wichtig das Verhalten des Gesamtsystems zu verstehen, dafür sollten die Eigenwerte des Systems untersucht werden um eventuelle Resonanzfälle besser zu verstehen.

Wenn die *Modalanalyse* verwendet werden soll muss eine bestimmte Anzahl von Eigenwerten und Eigenformen berücksichtigt werden um eine genügend genaue Lösung zu erhalten. Die *Modalanalyse* in *RF-DYNAM Pro* basiert auf der analytischen Lösung von Einmassenschwingern. Daher ist es ein sehr schnelles und exaktes Verfahren sofern genügend Eigenwerte berücksichtigt werden.

In diesem Beispiel wird später die *direkte Integration* verwendet, aber zum besseren Verständnis des Systems werden 10 Eigenwerte ermittelt. In den *Eigenschwingungsfällen* wird zunächst eine diagonale Massenmatrix angenommen, die Massen wirken in die drei Verschiebungsrichtungen X, Y und Z und auch die Rotationsfreiheitsgrade werden berücksichtigt. Die Einstellungen des *ESF1* sind in [Bild 5.42](#) gezeigt.

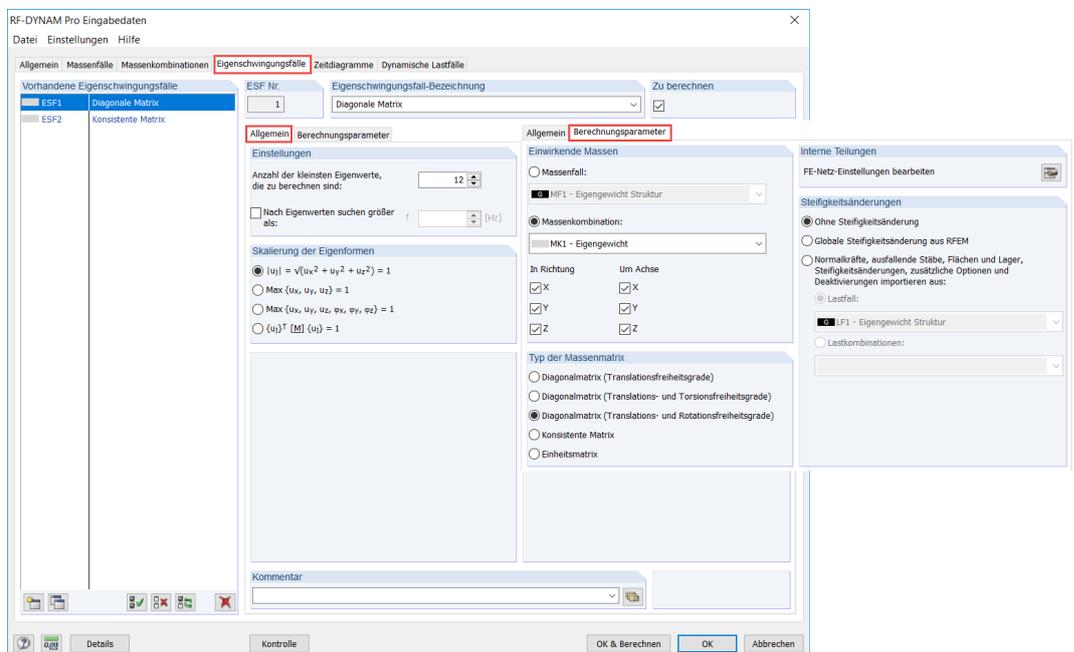


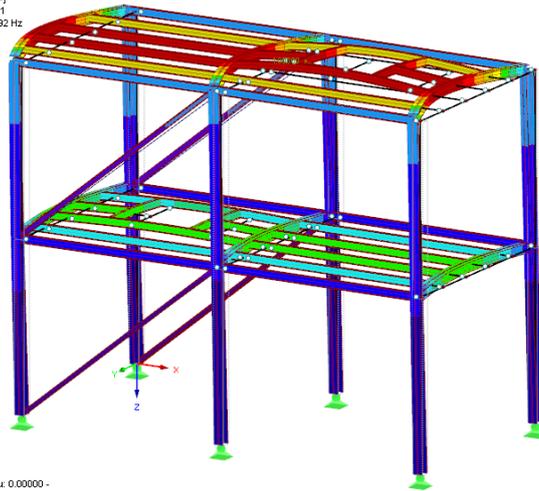
Bild 5.42: Definition des *Eigenschwingungsfalles* mit einer diagonalen Massenmatrix und Wirkung der Massen in alle Richtungen und um alle Achsen. 10 Eigenwerte werden ermittelt.

Die relevante Eigenform in X-Richtung mit einer Frequenz von $f = 5,193$ Hz ist in [Bild 5.43](#) dargestellt. Weiterhin sind alle 10 Eigenwerte tabellarisch aufgelistet zusammen mit den effektiven Modalmassenfaktoren, die dominanten Eigenwerte sind gelb markiert.

Die dargestellte Eigenform mit einer Frequenz von $f = 5,193$ Hz ist der Erregerfrequenz der Maschinen sehr nahe, diese liegt bei $f_e = 5,167$ Hz.

Bei einem Zeitverlaufsverfahren sollte auch die Verwendung der konsistenten Massenmatrix in Betracht gezogen werden. Diese verteilt die Massen besser über die einzelnen Stäbe und es werden mehr lokale Eigenschwingungen ermittelt. Die Zeitverlaufsanalyse wurde mit einer konsistenten Matrix zum Vergleich ermittelt und in diesem Beispiel ist die diagonale Matrix vollkommen ausreichend.

Eigenschwingung u [-]
RF-DYNAM Pro, ESF 1
Eigenform Nr. 6 - 5.192 Hz



Max u: 1.00000, Min u: 0.00000 -

5.1 Eigenfrequenzen

ESF1 - Diagonale Matrix Eigenform 6 (f: 5.192 Hz)

Form Nr.	A Eigenwert λ	B Eigenkreisfrequenz ω [rad/s]	C Eigenfrequenz f [Hz]	D Eigenperiode T [s]	Effektiver Modalmassenfaktor		
					f_{max} [-]	f_{maxy} [-]	f_{maxz} [-]
1	58.108	7.623	1.213	0.824	0.000	0.718	0.000
2	80.411	8.967	1.427	0.701	0.000	0.027	0.000
3	139.345	11.804	1.879	0.532	0.000	0.011	0.000
4	211.851	14.555	2.317	0.432	0.000	0.057	0.000
5	269.696	16.422	2.614	0.383	0.000	0.171	0.000
6	1064.046	32.620	5.192	0.193	0.729	0.000	0.008
7	1074.937	32.786	5.219	0.192	0.000	0.000	0.000
8	1122.929	33.510	5.333	0.188	0.001	0.000	0.015
9	1137.046	33.720	5.367	0.186	0.015	0.000	0.365
10	1208.129	34.758	5.532	0.181	0.000	0.000	0.000
Summe					0.745	0.984	0.389

Eigenfrequenzen | Eigenformen knotenweise | Eigenformen stabweise | Eigenformen netzpunktweise | Massen in Netzpunkten | Effektive Modalmassenfaktoren

Bild 5.43: Die dominante Eigenform in X-Richtung ist grafisch dargestellt. Alle 10 Eigenwerte sind tabellarisch gelistet zusammen mit den effektiven Modalmassenfaktoren.

Zeitdiagramme

Die in *LF3* und *LF4* definierten Radialkräfte F_r sollen als harmonische Anregung über die Zeit wirken. Dafür ist die Definition von Zeitdiagrammen erforderlich. Die Erregerfrequenz wurde mit $\omega = 32,463 \text{ rad/s}$ ermittelt. Für die vertikale Komponente wird keine Phasenversatz angesetzt, die horizontale Komponente wird um eine viertel Periodenlänge verschoben, somit wird $\varphi = \pi/2$ verwendet. Der Multiplikator k ist mit 1 festgelegt, weil die Größe der Last in den Lastfällen *LF3* und *LF4* definiert ist. Die Definition der Zeitdiagramme ist in den [Bildern 5.44](#) und [5.45](#) illustriert.

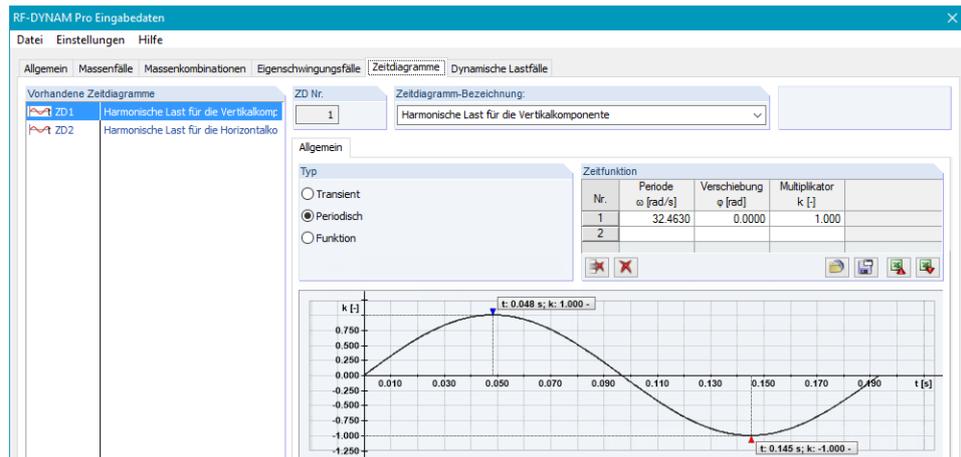


Bild 5.44: Definition des periodischen Zeitdiagrammes für die vertikale Komponente der Maschinenanregung.

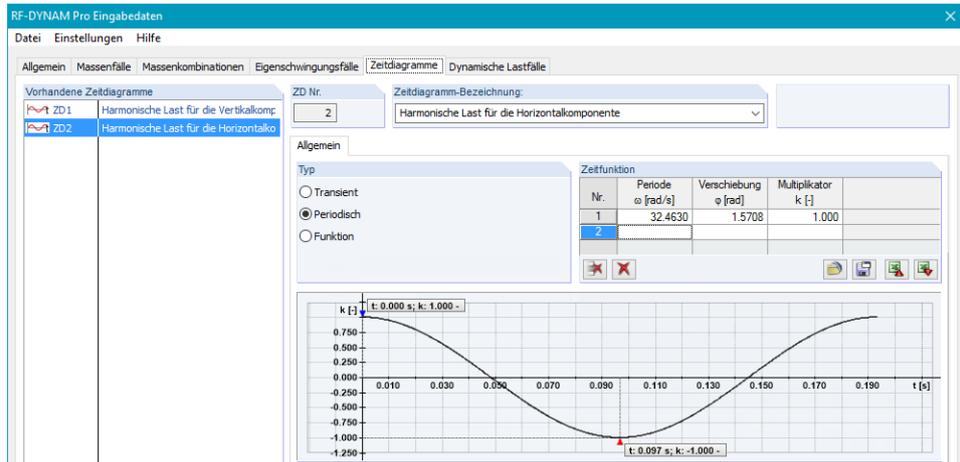


Bild 5.45: Definition des periodischen Zeitdiagrammes für die horizontale Komponente der Maschinenanregung.

Zeitverlaufsverfahren

In den *Dynamischen Lastfällen* werden die in *RFEM* definierten Lastfälle mit den in *RF-DYNAM Pro* definierten Zeitdiagrammen verknüpft. Die *lineare implizite Newmark-Analyse* wird als Lösungsalgorithmus ausgewählt. In dem Register *Zeitverlaufsverfahren* sind die Zeitschritte, die maximale Zeit für die Berechnung und die Exportoptionen definiert, die Einstellungen sind in **Bild 5.46** gezeigt.

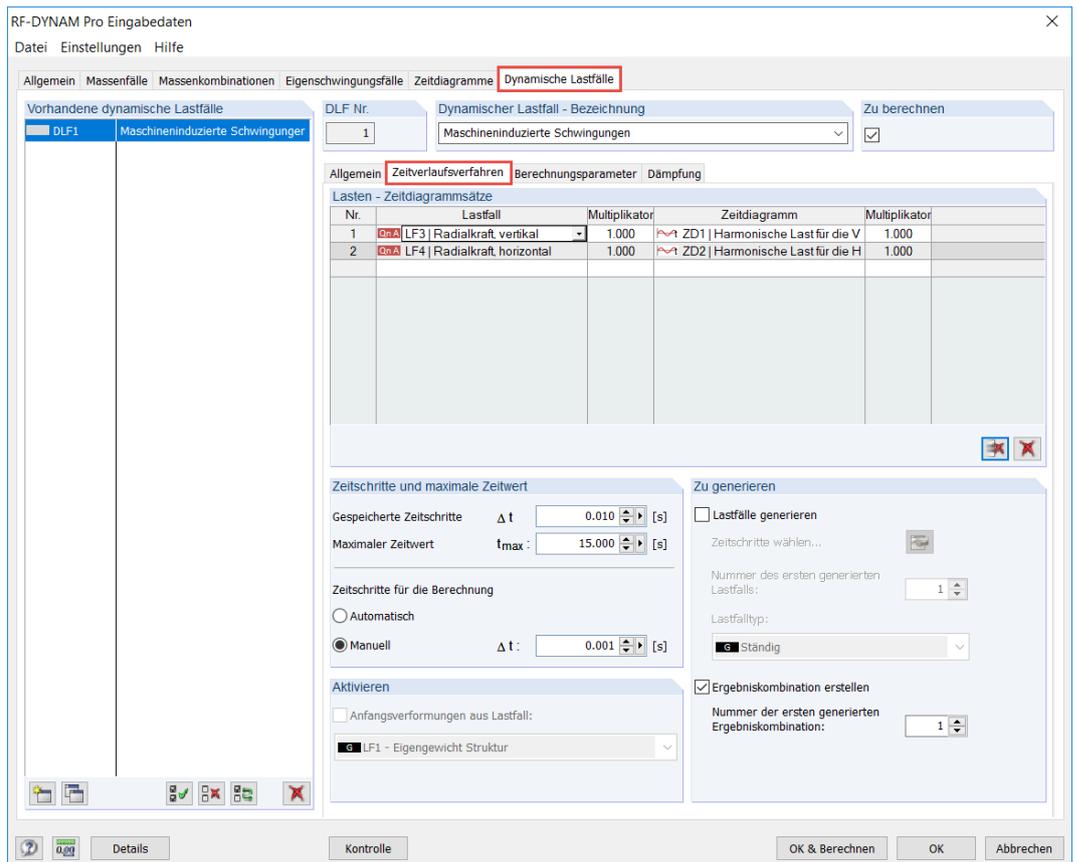


Bild 5.46: Einstellungen für das lineare Zeitverlaufsverfahren in den *Dynamischen Lastfällen*. In dem Register *Zeitverlaufsverfahren* werden die Lastfälle und die Zeitdiagramme verbunden, Zeitschritte und Exporteinstellungen werden definiert.

Der Zeitschritt wird mit $\Delta t = 1$ ms festgelegt um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Die relevante Eigenfrequenz und die Erregerfrequenz liegen bei 5,2 Hz. Der notwendige Zeitschritt kann dann mit folgender Formel abgeschätzt werden.

$$\Delta t = 1/(20f) = 9,6 \text{ ms} \tag{5.17}$$

Um auch Geschwindigkeiten und Beschleunigungen genügend genau zu ermitteln wird der Zeitschritt etwas kleiner gewählt als diese Abschätzung ergibt.

In den *Berechnungsparametern* werden die einwirkenden Massen und die Massenmatrix-Optionen eingestellt, das wird in **Bild 5.47** dargestellt. Die Diagonalmatrix, welche alle Freiheitsgrade berücksichtigt, ist ausgewählt.

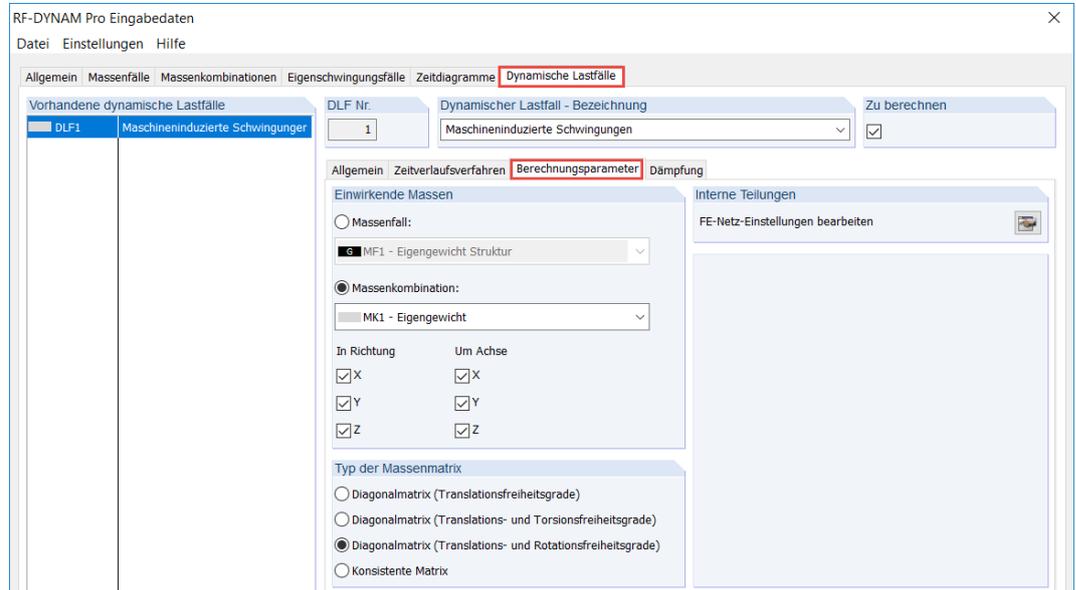


Bild 5.47: Einstellungen für das lineare Zeitverlaufsverfahren in den *Dynamischen Lastfällen*. In dem Register *Berechnungsparameter* wurden die einwirkenden Massen und der Typ der Massenmatrix gewählt.

Im Register *Dämpfung* wird die Strukturdämpfung definiert, die Einstellungen für die Dämpfung, die in diesem Beispiel verwendet werden sind in **Bild 5.48** veranschaulicht.

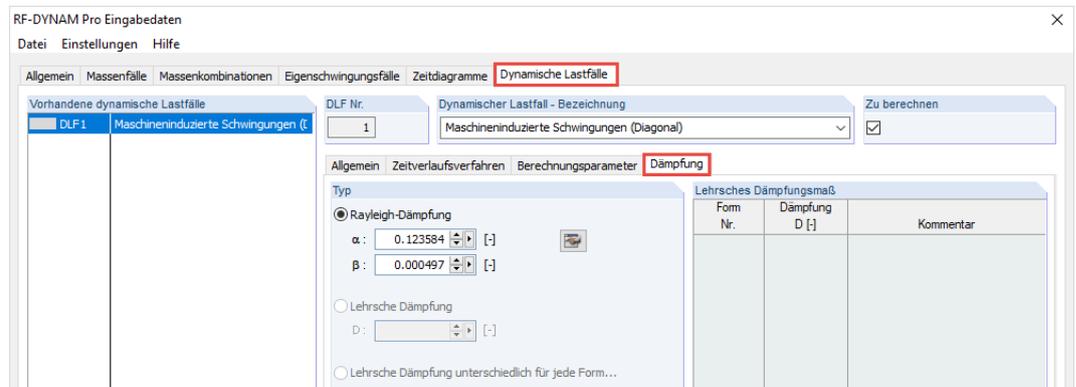


Bild 5.48: Einstellungen für das lineare Zeitverlaufsverfahren in den *Dynamischen Lastfällen*. In dem Register *Dämpfung* werden die Rayleigh-Koeffizienten α und β definiert.

Für die Lösung mittels der *linearen impliziten Newmark-Analyse* werden die Rayleigh Dämpfungskoeffizienten benötigt. Um die Lehr'schen Dämpfungswerte in die Rayleigh-Koeffizienten umzuwandeln wird die folgende Formel genutzt:

$$D_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \tag{5.18}$$

In diesem Beispiel sollen die beiden wichtigsten Eigenwerte in die X- und Y-Richtung mit $D = 0,01$ gedämpft werden. Die interessanten Eigenwerte haben eine Kreisfrequenz von $\omega_1 = 7,632 \text{ rad/s}$ und $\omega_6 = 32,620 \text{ rad/s}$. In dem Dialog *Umrechnung der Lehrschen Dämpfung in Rayleigh-Koeffizienten* werden die Kreisfrequenzen und die Dämpfungswerte eingetragen. Die Eingabe dazu

ist in Bild 5.49 dargestellt. Nach Bestätigung sind die zugehörigen Rayleigh-Koeffizienten $\alpha = 1,235839E - 01$ und $\beta = 4,9692E - 04$ ergänzt.

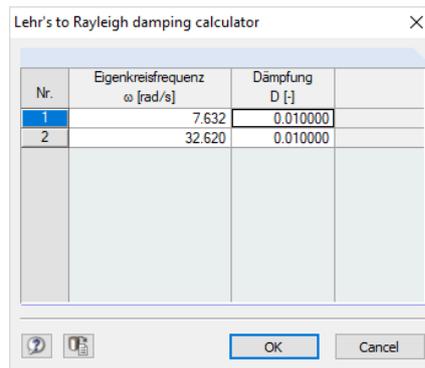


Bild 5.49: Einstellungen für das lineare Zeitverlaufsverfahren in dem Dialog *Umrechnung der Lehrschen Dämpfung in Rayleigh-Koeffizienten*.

Ergebnisse im Resonanzfall

Wie bereits erwähnt liegt die Eigenfrequenz in X-Richtung nahe der Erregerfrequenz. Es ergibt sich eine Resonanz, und damit sind sehr große Ergebnisse zu erwarten. Die Verformungen des Tragwerkes sind in Bild 5.50 illustriert. Im Zeitverlaufsdiagramm werden die Verformungen am Knoten 73 gegenüber der Zeit dargestellt, hier ist die Resonanz deutlich zu erkennen. Die maximalen Verformungen liegen bei $u = 145,1$ mm.

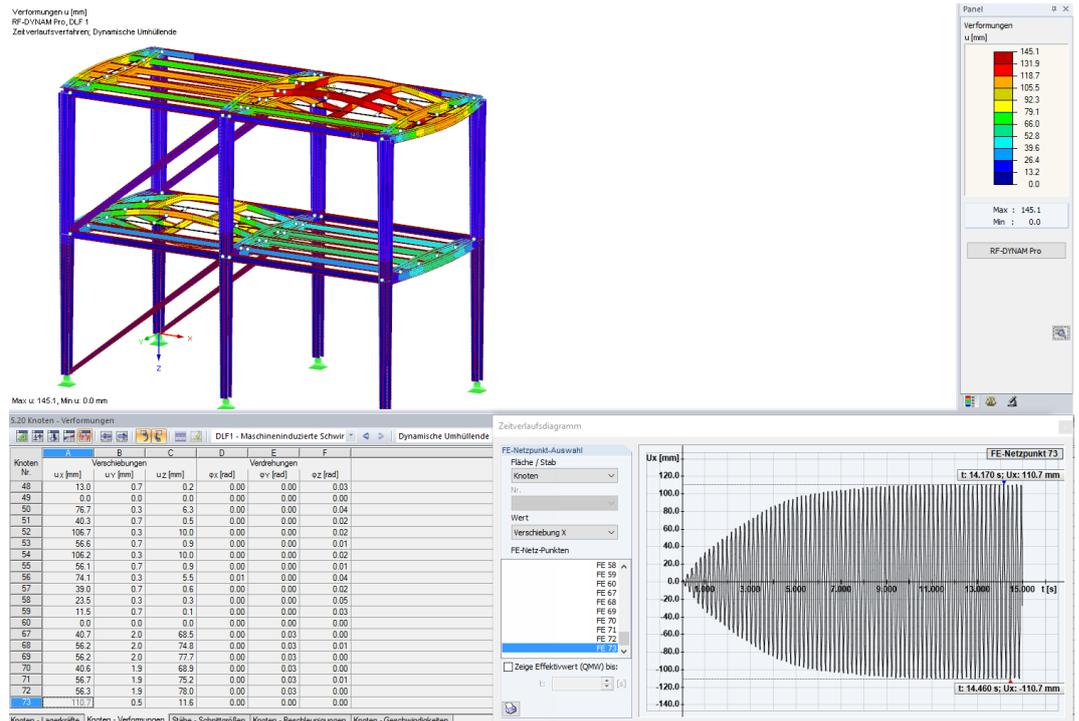


Bild 5.50: Verformungen u resultierend aus dem Zeitverlaufsverfahren. In der Grafik wird die *Dynamische Umhüllende* der Verformung u gezeigt. Im Zeitverlaufsdiagramm wird der zeitliche Verlauf der Verformung u_x am Knoten 73 dargestellt. Die Struktur befindet sich in Resonanz.

Anpassung der Struktur

Solch ein Resonanzfall wie oben dargestellt muss vermieden werden. In diesem Beispiel werden die Querschnitte der Balken- und Stützelemente wie in Bild 5.51 verändert um eine deutliche Verschiebung der maßgebenden Eigenfrequenz zu erwirken.

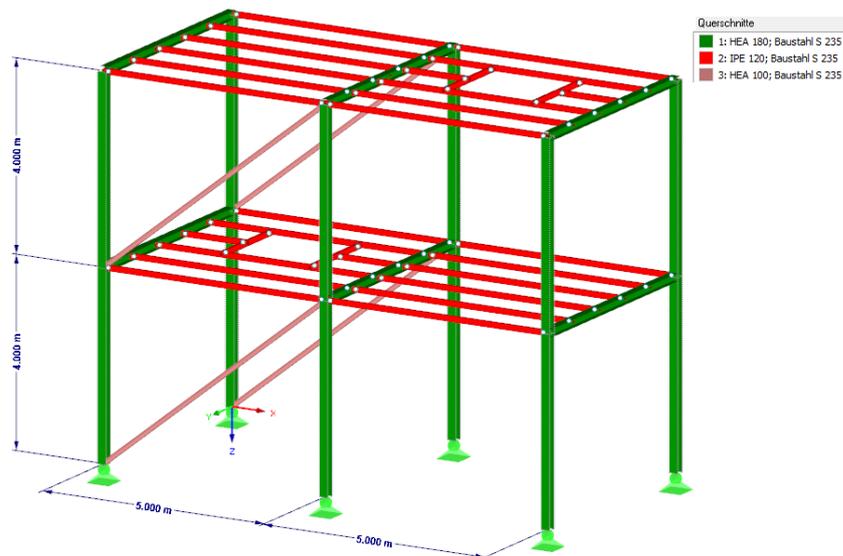


Bild 5.51: Statisches System mit farbig dargestellten Materialien und Querschnitten. Hier wurden die Querschnitte der Balken und Stützen verändert um Resonanz zu vermeiden.

Die veränderten Eigenfrequenzen des Systems sind in [Bild 5.52](#) aufgelistet. Die dominanten Eigenwerte sind gelb markiert.

Form Nr.	Eigenwert $\lambda_i [1/s^2]$	Eigenkreisfrequenz $\omega_i [rad/s]$	Eigenfrequenz $f_i [Hz]$	Eigenperiode $T_i [s]$	f_{max} [1]	f_{max}^2 [1]	f_{max}^3 [1]
1	21.400	4.626	0.736	1.358	0.000	0.620	0.000
2	25.444	5.044	0.803	1.246	0.000	0.020	0.000
3	71.362	8.448	1.344	0.744	0.000	0.020	0.000
4	111.051	10.538	1.677	0.596	0.000	0.106	0.000
5	132.464	11.509	1.832	0.546	0.000	0.219	0.000
6	299.071	17.294	2.752	0.363	0.000	0.000	0.140
7	304.556	17.452	2.777	0.360	0.000	0.000	0.268
8	322.441	17.957	2.858	0.350	0.000	0.000	0.000
9	364.591	19.094	3.039	0.329	0.000	0.001	0.000
10	405.248	20.131	3.204	0.312	0.000	0.000	0.000
11	421.940	20.541	3.269	0.306	0.000	0.000	0.000
12	633.773	25.175	4.007	0.250	0.701	0.000	0.000
Summe					0.701	0.985	0.408

Bild 5.52: Die Eigenfrequenzen nach Änderung der Querschnitte in der Struktur. Die dominante Eigenform in X-Richtung beträgt $f_{12} = 4,00$ Hz.

Damit ist der zuvor in der Erregerfrequenz liegende Eigenwert um 1,2 Hz verschoben. Die dominante Eigenform in X-Richtung liegt nun bei $f = 4,00$ Hz.

Auch die Rayleigh Dämpfungskoeffizienten müssen angepasst werden um weiterhin die dominanten Frequenzen mit $D = 0,01$ zu dämpfen. Mit den geänderten Frequenzen ergeben sich $\alpha = 0,0782$ und $\beta = 6,71 \times 10^{-04}$.

Die restlichen Einstellungen bleiben wie bisher und die Zeitverlaufsanalyse wird durchgeführt.

Die zuvor aufgezeigten Verformungen haben sich nun entsprechend verkleinert und im Zeitverlaufdiagramm sieht man nun einen gedämpften Verlauf anstatt wie zuvor einen stetig ansteigenden Verlauf. Im Zeitverlaufdiagramm ist der quadratische Mittelwert angegeben, ermittelt mit Werten von $t = 0$ s bis $t = 10$ s.

Dieses Beispiel zeigt deutlich wie wichtig eine Untersuchung der Frequenzen der statischen Struktur ist. Resonanzfälle müssen in jedem Fall vermieden werden.

Verformungen u [mm]
RF-DYNAM Pro, DLF 1
Zeitverlaufverfahren, Dynamische Umhüllende

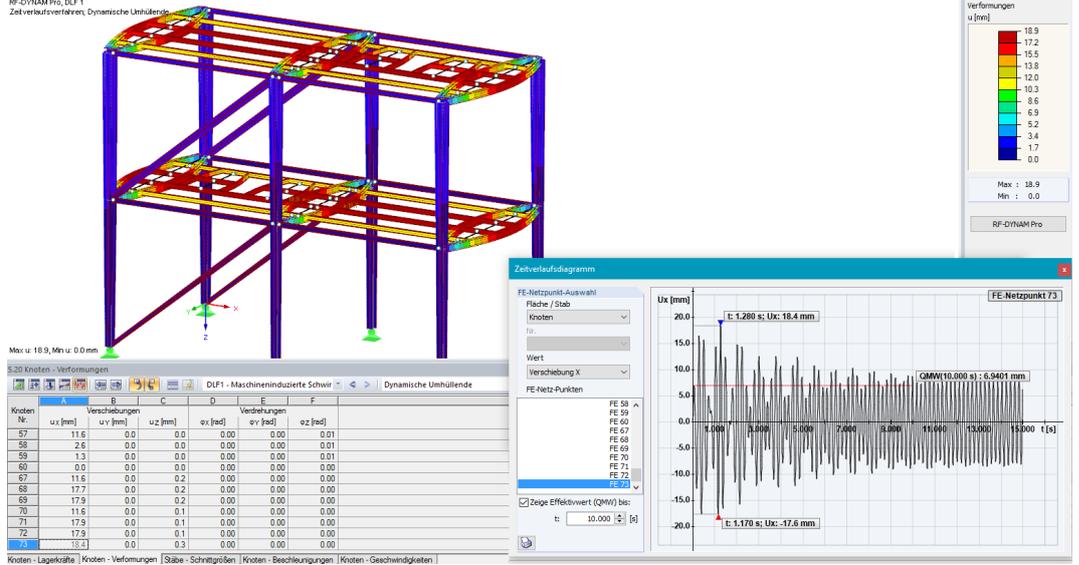


Bild 5.53: Verformungen u resultierend aus dem Zeitverlaufverfahren. In der Grafik wird die *Dynamische Umhüllende* der Verformung u gezeigt. Im Zeitverlaufsdiagramm wird der zeitliche Verlauf der Verformung u_x am Knoten 73 dargestellt. Nach Änderung der Struktur tritt keine Resonanz mehr auf.

Literatur

- [1] EN 1998-1: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [2] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- [3] IBC2012: International Building Code. International Code Council, 2011.
- [4] EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [5] Christian Barth und Walter Rustler. *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis*. Beuth, Berlin, 2. Auflage, 2013.
- [6] Klaus-Jürgen Bathe. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [7] Hans-Günter Natke. *Baudynamik*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1989.
- [8] Edward L. Wilson. *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Computer and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 3rd Auflage, 2002.
- [9] Joseph W. Tedesco, William G. McDougal und C. Allen Ross. *Structural Dynamics : Theory and Applications*. Addison-Wesley, 1st Auflage, 1999.
- [10] A.K. Chopra. *Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 2001.
- [11] C. Katz. *Anmerkung zur Überlagerung von Antwortspektren*. D-A-CH Mitteilungsblatt, 2009.
- [12] A.K. Gupta. *Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*. CRC Press, 1992.
- [13] E.L. Wilson, A. Der Kiureghian und E.P. Bayo. *A replacement for the SRSS method in seismic analysis*, 1981.
- [14] A. Der Kiureghian. *A response spectrum method for random vibration analysis of MDF system*, 1981.
- [15] Abaqus. *Abaqus 6.14 - Theory Guide*. Simulia., 2014.
- [16] Abaqus. *Lecture 1 - Overview of ABAQUS/Explicit*. Abaqus Inc., 2001.
- [17] Ivan Němec und Vladimír Kolář. *Finite Element Analysis of Structures - Principles and Praxis*. Shaker Verlag, Aachen, 2010.
- [18] U.Stelzmann, C.Groth und G.Müller. *FEM für Praktiker - Band 2: Strukturdynamik*. Expert Verlag, 2008.
- [19] ANSYS Inc.. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, Release 15.0.*, 2013.
- [20] K. Meskouris, K.-G. Hinzen, C. Butenweg und M.Mistler. *Bauwerke und Erdbeben*. Vieweg und Teubner, Berlin, 3. Auflage, 2011.
- [21] *Programmbeschreibung RSTAB/RFEM*. DLUBAL GmbH, 2016.
- [22] C. Petersen. *Dynamik der Baukonstruktionen*. Vieweg & Sohn, 1996.
- [23] Manual SAP2000. *CSI Analysis Reference Manual - For SAP2000, ETABS, and SAFE2007.*, 2007.
- [24] V. Červenka, L. Jendele und J. Červenka. *ATENA Program Documentation Part 1 - Theory*. Červenka Consulting s.r.o., 2014.
- [25] SIA 261:2014: *Einwirkungen auf Tragwerke*. Schweizerische Normen-Vereinigung, 2014.
- [26] OENORM B4015:2007: *Belastungsannahmen im Bauwesen - Außergewöhnliche Einwirkungen: Erdbebeneinwirkung*. ON Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [27] NBC2010: *National Building Code of Canada*. Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council of Canada, Thirteenth Auflage, 2010.

Index

- A**
- Abbrechen 12
 - Äquivalente Linearkombination . 35, 36, 49, 51
 - Akzelerogramm 26, 27, 38
 - Akzelerogramm zuweisen 40
 - Anfangsbedingung 23, 45
 - Anfangsverformungen 43
 - Antwortspektrenverfahren 12, 33, 48, 62, 73, 88
 - Antwortspektrum 12, 24, 26, 52, 62, 87
 - Antwortspektrum zuweisen 35, 48
 - Ausdruckprotokoll 71, 81
 - Ausfallender Stab 23
 - Ausfallendes Lager 23
- B**
- Beispiel 84, 103
 - Berechnung 12, 54
 - Berechnungsparameter 19, 44
 - Beschleunigung 27, 38, 63, 69
 - Beschleunigung von Antwortspektren 37
 - Beschleunigungsrichtung 52
 - Bibliothek 28
- D**
- Dämpfer 41, 42
 - Dämpfung 36, 46, 51
 - Deaktivierte Stäbe 23
 - Demoversion 11
 - Details 12, 14, 52
 - Dezimalstellen 12, 53, 83
 - Diagonale Massenmatrix 21, 45
 - Dynamischer Lastfall 12, 32
- E**
- Effektive Modalmasse 60
 - Effektiver Modalmassenfaktor . 20, 37, 60, 106
 - Eigenformen 12, 20, 34, 37, 48, 51, 58, 59
 - Eigenfrequenz 20, 37, 58
 - Eigengewicht 14
 - Eigenperiode 37, 58
 - Eigenschwingungsanalyse 4, 12, 19, 58, 85, 106
 - Eigenschwingungsfall 12, 19, 21, 32, 58
 - Eigenwert 20, 42, 58
 - Eigenwertlöser 22
 - Eingabedaten 11
 - Einheiten 12, 53, 83
 - Einheitsmatrix 22
 - Einmassenschwinger 24, 27
 - Einwirkende Massen 21, 44, 109
 - EN 1990 17, 84
 - EN 1998-1 17, 37, 48, 84, 87
 - Erdbebenanalyse 84
 - Erdbebenaufzeichnungen 27, 28
 - Erdbeschleunigung 14
 - Ergebniskombination 36, 44, 51, 65, 72, 77, 101
 - Ergebnisse 57
 - Ergebnisstab 94
 - Ermittlung der Instabilität 53
 - Erregungsrichtung 35, 40, 48
 - Ersatzlasten 7, 12, 48, 53, 74
 - Erzwungene Schwingungen . 5, 12, 27, 30, 33, 41, 62, 103
 - Explizite Analyse 32, 41
 - Export 33, 36, 44, 51, 65, 71, 72, 75, 77
- F**
- FE-Netz 23, 44, 45
 - Flächengrunddehnungen 65
 - Flächengrundspannungen 65, 68
 - Flächenmasse 14, 17
 - Flächenschnittgrößen 65, 68
 - Frequenz 12, 20, 42, 43, 58, 106
 - Funktionen 31
- G**
- Gesamterdbebenkraft 93
 - Geschwindigkeiten 63, 69
 - Globale Parametereinstellungen 52
 - Globale Steifigkeitsänderung 23
- H**
- Hilfe 12
- I**
- ICG-Iteration 22
 - Implizite Newmark Analyse 32, 41, 108
- K**
- Knotenbeschleunigungen 63, 69
 - Knotengeschwindigkeiten 63, 69
 - Knotenmasse 14, 16
 - Knotenverformung 63, 67
 - Kombinationsfaktoren 14, 17, 18, 84, 101
 - Kombinationsregeln 35, 36, 49, 51
 - Konsistente Massenmatrix 22, 45
 - Kontrolle 12, 54
 - Kreisfrequenz 31, 42, 43, 58

L		R	
Längenänderung für Seile und Membrane	52	Rayleigh-Koeffizienten	46, 109
Lagerkraft	63, 67	Resonanz	103, 110
Lagersätze	34, 39	RF-DYNAM Pro öffnen	9
Lanczos	22	RF-DYNAM Pro starten	9
Lasten - Zeitdiagrammsätze	41	Richtungskombination	36, 51
Lastfall	14, 33, 41, 44, 51, 71, 75	Rotation	21, 35, 40, 44, 48, 59, 60
Lehrsche Dämpfung	36, 46, 51		
Lineare Analyse	41	S	
Lineares Zeitverlaufsverfahren	12	Schwerpunkt der Masse	13, 14
Linienmasse	14, 17	Skalierung der Eigenformen	20
		Stabmasse	14, 17
M		Stabschnittgröße	64, 68
Maschineninduzierte Schwingungen	103	Standardisierte Rotation	59
Masse	13, 14, 15, 60, 84, 105	Standardisierte Verschiebung	59
Massen in Netzpunkten	60	Start der Berechnung	54
Massen vernachlässigen	14, 15, 52	Stationärer Zustand	45
Massenfall	12, 13, 17, 21, 44, 84, 105	Steifigkeit RF-BETON	23
Massenfalltyp	14	Steifigkeitsänderung	23, 98
Massenimport	13, 14	Stockwerksverschiebung	96
Massenkombination	17, 21, 44, 84	Strukturdämpfung	36, 46, 51, 109
Massenmatrix	16, 21, 44, 45, 109	Summe der Massen	14
Massenrichtung	21, 44		
Massenträgheitsmoment	16	T	
Massenumwandlungstyp	14, 52	Testversion	11
Maximale Zeit	42	Theorie II. Ordnung	23, 98
Modalanalyse	32, 41	Torsion	48, 75
Modalantworten	35, 49	Torsionsmoment	48, 75, 77
Modale Dämpfung	36, 51	Transiente Erregung	30
Modale Masse	20, 60		
Modalkombination	35, 49	U	
Multi-Modales Antwortspektrenverfahren	24, 37, 48, 88	Umwandlungstyp für die Masse	15, 52
Multi-Punkt-Erregung	24, 34, 39	Unterraum-Iteration	22
N		V	
Navigator	10	Verfahren mit statischen Ersatzlasten	12, 24, 48, 73, 84, 88
Nichtlineare Löser	41	Viskose Dämpfung	41, 42
Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren	6, 12, 41	Vollständige quadratische Kombination (CQC)	35, 49
Norm	24, 87	Vorzeichengerechte Ergebnisse	49
Normalkräfte	23, 98		
		W	
P		Wahl der Eigenform	37, 51
P-Delta Effekt	23, 98	Wurzel des charakteristischen Polynoms	22
Panel	10		
Periodische Erregung	31, 107	Z	
Programmstart	9	Zeitdiagramm	30, 40, 107
Projekt-Navigator	10	Zeitschritte	42, 108
		Zeitverlaufsdiagramm	69
Q		Zeitverlaufsverfahren	30, 32, 38, 66, 103, 108
Quadratischer Mittelwert	70	Zufällige Torsionswirkungen	48, 75, 77
Quadratsummenwurzel-Regel (SRSS)	35, 49, 51		