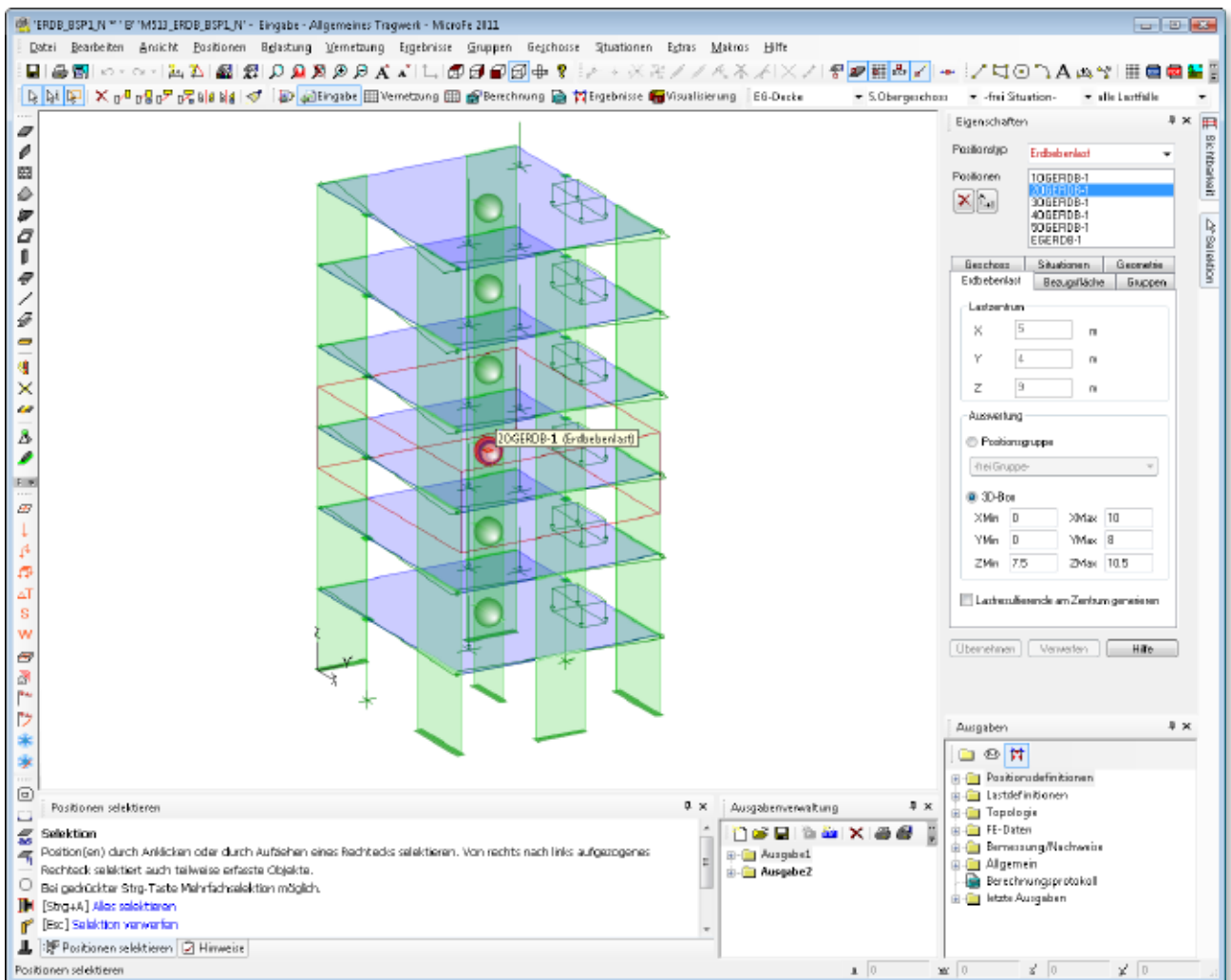


Dr.-Ing. Dorian Lutzkanov und Dipl.-Ing. Sven Hohenstern

Erdbebennachweise in MicroFe

Berechnungsgrundlagen und Berechnungsabläufe in M513 Erdbebenuntersuchung

In MicroFe werden die Schnittgrößen für die Bemessung und der Nachweis der Erdbebensicherheit von Bauwerken mit Hilfe linear-elastischer Verfahren durchgeführt. Das multimodale Antwortspektrenverfahren bildet das Standard-Rechenverfahren, bei dem alle maßgeblich zur Bauwerksreaktion (Bauwerksantwort) beitragenden Modalanteile bei der Berechnung der Kraft- und Verformungsgrößen des Tragwerks berücksichtigt werden.



Das prinzipielle Vorgehen in MicroFe mit den wesentlichen Eingabeschritten und den zugehörigen Berechnungsgrundlagen zur Bearbeitung von Erdbebennachweisen nach DIN 4149 [1] wird vorgestellt. Dazu wird nachfolgend ein sechsgeschossiges Gebäudes untersucht (Bild 1).

Das Gebäude wird zu diesem Zweck als räumliches Modell mit Stab- und Schalenelementen diskretisiert. Möglichst alle tragenden Elemente sollten in dem Modell abgebildet werden, so dass Berechnung und Nachweis am gleichen Modell erfolgen.

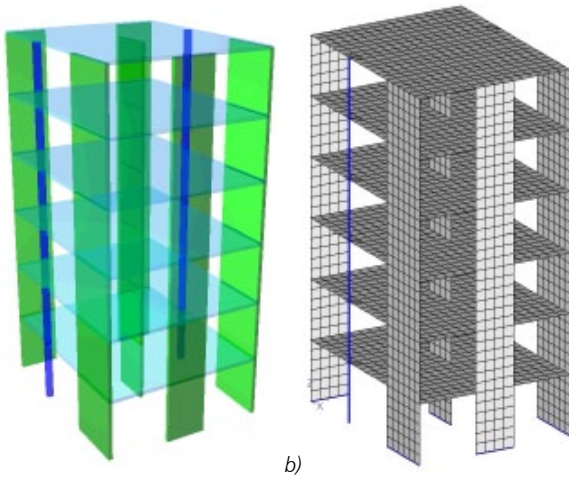


Bild 1. Beispielmodell eines sechsgeschossigen Gebäudes
 a) Visualisierung
 b) Finite-Elemente-Darstellung

Für die Erdbebennachweise nach DIN 4149 [1] werden nachfolgende Eingabeparameter verwendet:

- Erdbebenzone 3 mit dem Bemessungswert der Bodenbeschleunigung $a_g = 0.8 \text{ m/s}^2$
- Baugrundklasse A, Untergrundklasse R → Untergrundverhältnisse A-R
- Bedeutungskategorie III mit dem Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1.2$
- Duktilitätsklasse 1 und dem Verhaltensbeiwert $q = 1.5$

Die Tragwerksberechnung wird mittels des linearen Antwortspektrenverfahren durchgeführt, bei dem der Einfluss des inelastischen Tragverhaltens global durch die Berücksichtigung des q -Faktors (Verhaltensbeiwert) bei der Bestimmung des Bemessungsspektrums erfasst wird.

Dynamische Analyse

Die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Systems werden durch eine dynamische Analyse ermittelt. Deren Berechnung startet über das Menü „Ergebnisse / Dynamische Berechnung“. Zuvor öffnet sich ein Berechnungs-Dialog, um ggf. „statische Lasten als Massen“, zusätzlich zu den Massen aus Eigengewicht, anzusetzen. Dazu wird als Lastfallfaktor der Quotient (ψ_E/g) eingetragen.

(ψ_E/g)
 mit
 ψ_E Kombinationsbeiwert nach [1]
 g Erdbeschleunigung in $[\text{m/s}^2]$
 $\psi_E = \varphi \cdot \psi_2$
 φ nach Tabelle 6 aus [1]
 ψ_2 nach DIN 1055-100 [2], Tabelle A.2

In diesem Beispiel wird mit folgenden Werten gerechnet:

$g = 10 \text{ m/s}^2$ (vereinfacht)
 $\varphi = 1.0$ für das oberste Geschoss
 $\varphi = 0.7$ für die übrigen Geschosse
 $\psi_2 = 0.3$ für Nutzlasten
 $\psi_E = 0.5$ für Schneelasten (gemäß Einführungslass der DIN 4149 für Baden-Württemberg)

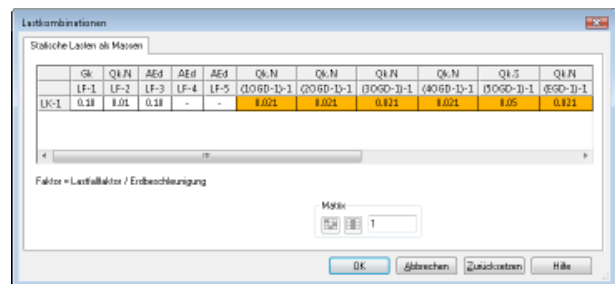


Bild 2. Statische Lasten als Massen berücksichtigt

Als Ergebnis der dynamischen Berechnung stehen die Eigenvektoren und die zugehörigen Eigenformen zur Verfügung, die tabellarisch und/oder grafisch auszugeben sind (Bild 3).

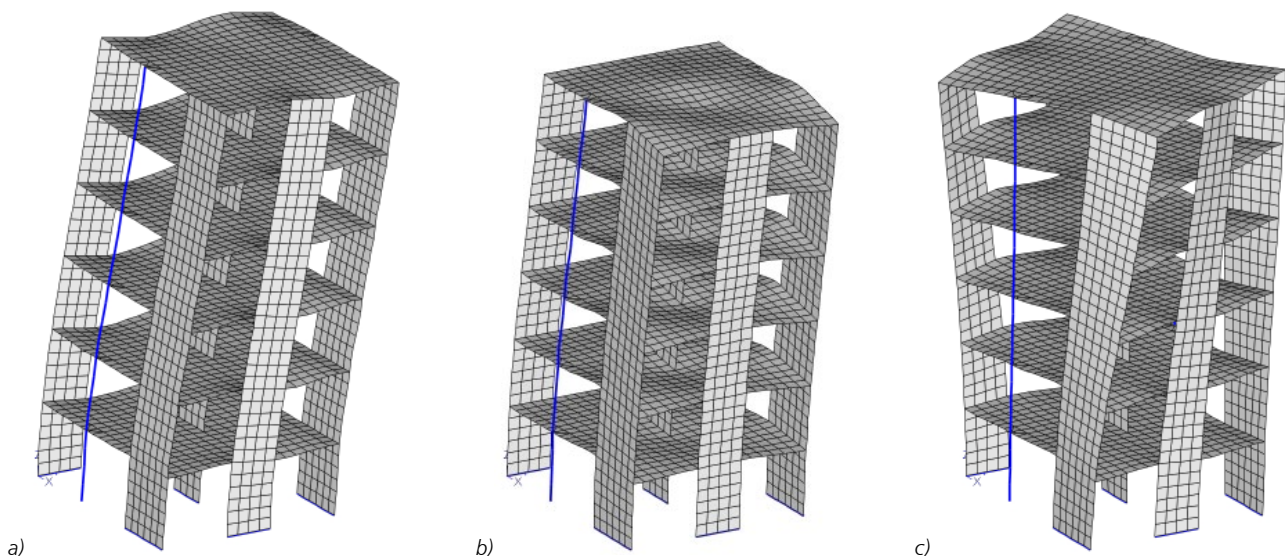


Bild 3. Ergebnisse der dynamischen Berechnung
 a) 1. Eigenform: Translation in y-Richtung
 b) 2. Eigenform: Translation in x-Richtung
 c) 3. Eigenform: Rotationsbewegung

Definition der Erdbebenlasten



Um seismische Lasten erzeugen zu können, ist die Festlegung mindestens eines Auswertungsraumes erforderlich. In diesem Auswertungsraum werden die FE-Knotenmassen und die daraus erzeugten seismischen Ersatzlasten ausgewertet. Durch Setzen einer Erdbebenlast („Belastung / Erdbebenlast / Setzen“) wird in MicroFe ein Auswertungsraum definiert. Hierzu stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Die Definition des Auswertungsraumes kann entweder über eine Positionsgruppe oder über eine 3D-Box erfolgen. Die Koordinaten der zu definierenden 3D-Box sind als globale Koordinaten anzugeben (Bild 4).

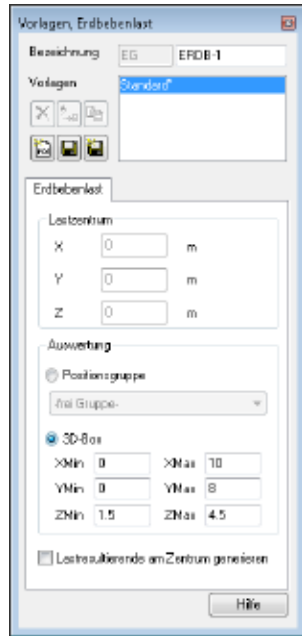


Bild 4. Positionsvorlage einer Erdbebenlast

Definition der seismischen Erregung

Nach der dynamischen Berechnung und der Definition der Erdbebenlasten sind im Eingabemodus unter „Belastung / Erdbebenlast / Ersatzlasten ermitteln“ eine oder mehrere Erregungen zu definieren (Bild 5).

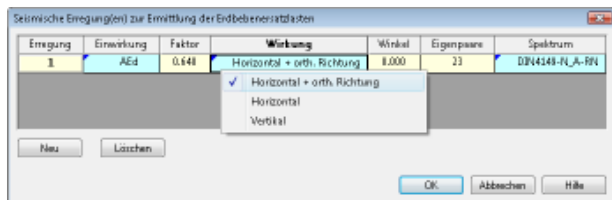


Bild 5. Seismische Erregung(en) definieren

Für die Festlegung der seismischen Erregung sind folgende Parameter zu belegen:

- Es ist eine **Einwirkung** vom Typ „Erdbeben“ zu wählen, zu der alle nachfolgend erzeugten Lasten zugeordnet werden. Standardmäßig ist die Einwirkung A_{Ed} voreingestellt. Über einen rechten Mausklick kann diese auch verändert werden.
- Der **Faktor** dient zur Skalierung der Bemessungs-Antwortspektren nach DIN 4149. Der Wert entspricht $\frac{a_g \cdot \gamma_1}{q}$ (siehe Formeln (7) bis (10) aus [3]). Die Plateauwerte nach Formel (8) ergeben sich damit zu:

$$S_d(T) = \frac{a_g \cdot \gamma_1}{q} \cdot S \cdot \beta_0 = Faktor \cdot S \cdot \beta_0 = Faktor \cdot S'_d(T).$$

Bei den nach DIN 4149 definierten Antwortspektren wird generell die viskose Dämpfung mit 5% berücksichtigt.

- Die **Wirkung** der seismischen Erregung kann dabei *horizontal*, *vertikal* oder als *horizontal + orthogonale Richtung* festgelegt werden.

- Für die definierte Wirkungsrichtung ist der Winkel um die globale z-Achse einzugeben.
- Unter **Eigenpaare** ist die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen festzulegen. Diese Anzahl muss kleiner oder gleich den berechneten Eigenpaaren der vorangegangenen dynamischen Berechnung sein.
- Unter **Spektrum** ist das Bemessungs-Antwortspektrum, das als Grundlage für die Erregung dienen soll, anzugeben. Durch rechten Mausklick auf das farbiger hinterlegte Feld wird der Dialog „Normiertes Antwortspektrum“ aufgerufen, um ein Spektrum zu laden oder ein neues Spektrum zu erstellen und zu speichern. Standardmäßig stehen sechs normierte Antwortspektren (A-R, B-R, C-R, B-T, C-T und C-S) nach DIN 4149 zur Verfügung. Die Wertepaare Eigenperiode $T[s]$ und die normierte Beschleunigung S'_d werden in Tabellenform ausgewiesen und das Antwortspektrum grafisch ausgewertet (Bild 6).

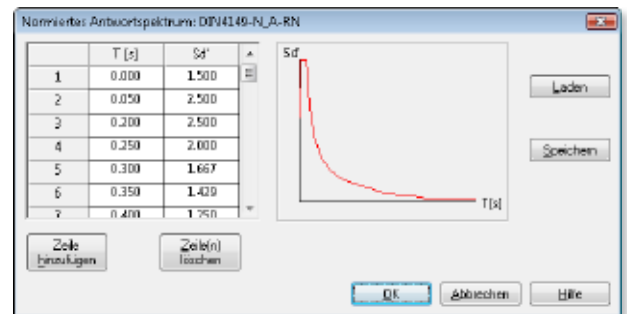


Bild 6. Antwortspektrum angeben

Erstellung von statischen Ersatzlasten

Nach dem Verlassen des Dialogs „Seismische Erregung(en)“ über „OK“ werden die statischen Ersatzlasten für jede eingegebene Erregung und untersuchte Eigenform ermittelt und ein „Protokoll der Berechnung der seismischen Lasten“ erstellt (Bild 7).

Protokoll der Berechnung der seismischen Lasten

Systemwerte
 Anzahl Elemente = 3052
 Anzahl Knoten = 3294
 Lastfälle = 1
 Eigenpaare = 30
 Konsistente Massen : nein

Seismische Erregungen

Einwirkung	Erregung	Eigenpaare	Spektrum	Faktor	Wirkung	Winkel
AE4	2	23	DIN4149-N_A-RN	0.640	Horiz.	0.00

Seismische Ersatzlasten

Lastfall	Periode [s]	Sd'	Faktor	Beteiligungsgrad [%]
ERR-1-1	0.018	0.8099	18.4601	69.33
ERR-1-2	0.069	1.0687	18.4601	**
ERR-1-3	0.182	1.3152	9.5079	**
ERR-1-4	0.151	2.5000	**	**
ERR-1-5	0.206	2.5000	**	**
ERR-1-6	0.086	2.5000	**	**
ERR-1-7	0.071	2.5000	**	**
ERR-1-8	0.067	2.5000	**	**
ERR-1-9	0.052	2.5000	**	**
ERR-1-10	0.057	2.5000	**	**
ERR-1-11	0.055	2.5000	**	**
ERR-1-12	0.053	2.5000	**	**
ERR-1-13	0.052	2.5000	**	**
ERR-1-14	0.052	2.5000	**	**
ERR-1-15	0.052	2.5000	**	**
ERR-1-16	0.051	2.5000	1.0724	0.23
ERR-1-17	0.049	2.4734	**	**
ERR-1-18	0.050	2.5000	**	**
ERR-1-19	0.049	2.4734	**	**
ERR-1-20	0.049	2.4709	**	**
ERR-1-21	0.048	2.4549	**	**
ERR-1-22	0.047	2.4376	1.32	**
ERR-1-23	0.047	2.4330	3.4921	2.48
Summe = 91.75				
ERR-2-1	0.618	0.8099	18.7258	71.34
ERR-2-2	0.469	1.0687	**	**
ERR-2-3	0.182	1.3152	8.9397	16.26
ERR-2-4	0.151	2.5000	**	**
ERR-2-5	0.106	2.5000	**	**
ERR-2-6	0.071	2.5000	**	**
ERR-2-7	0.071	2.5000	**	**
ERR-2-8	0.067	2.5000	-5.5967	6.37
ERR-2-9	0.062	2.5000	**	**
ERR-2-10	0.057	2.5000	**	**
ERR-2-11	0.055	2.5000	**	**
ERR-2-12	0.053	2.5000	**	**

** : Für diesen Lastfall wurden keine Ersatzlasten generiert, da der Beteiligungsgrad sehr klein oder gleich Null ist

Bild 7. Berechnungsprotokoll der seismischen Lasten

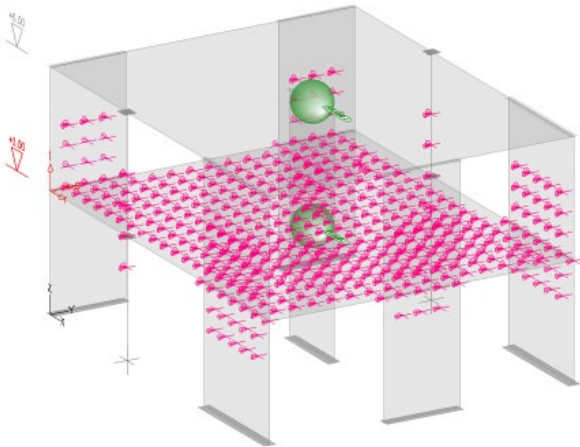


Bild 8. Ersatzlasten im selektierten Auswertungsraum

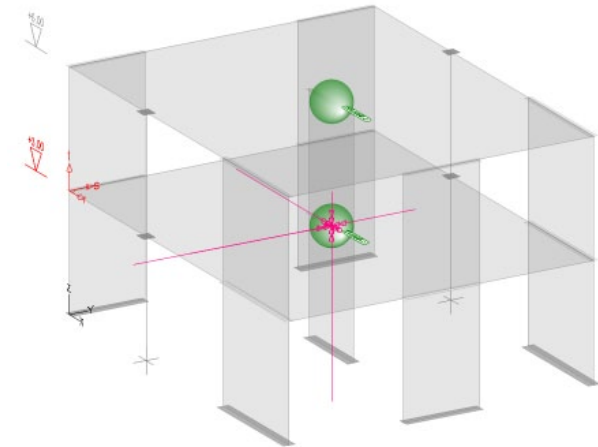


Bild 9. Konzentrierte Lasten im Lastzentrum

Protokoll der Berechnung der seismischen Lasten

Das erstellte Berechnungsprotokoll dient zur Kontrolle der eingegebenen Erregungen und zur Beurteilung des Einflusses der einzelnen Eigenformen (Bild 7). Für jede Erregung werden die generierten Lastfälle protokolliert und die Beteiligung der jeweiligen Eigenform in [%] ausgewiesen. Nach Norm sind so viele Eigenformen zu berücksichtigen, dass die Summe jeweils mindestens 90% beträgt.

Wichtig: Falls diese Forderung (90%) nicht erreicht wird, muss nach erneuter Generierung die dynamische Berechnung mit einer erhöhten Anzahl von Eigenvektoren erneut durchgeführt werden.

Für das betrachtete Beispiel werden bei der Erregung 1 die Lastfälle 2, 5, 16, 22 und 23 und bei Erregung 2 die Lastfälle 1, 4 und 8 generiert.

Erdbebenlast - Info

Die Ersatzlasten werden in jedem Finiten-Elementknoten im Auswertungsraum dargestellt (Bild 8). Diese Ersatzlasten bleiben bei einer nachträglichen statischen Berechnung erhalten. Als weitere Möglichkeit können die Ersatzlasten vereinfachend (gegenüber der genaueren Verteilung in den FE-Knoten) in den Auswertungspunkt transformiert werden. Hierzu steht die Option „Lastresultierende am Zentrum generieren“ in den Positionseigenschaften (vgl. Bild 4 zur Verfügung).

Die im Auswertungszentrum generierten, konzentrierten Lasten sind als Ergebnis in Bild 9 dargestellt. Diese konzentrierten Lasten lassen sich mit der Ausgabe „Erdbebenlast-LastDef“ auch zahlenmäßig dokumentieren.

Lastfallzuordnung

Die erstellten Ersatzlasten werden je Erregung (x- bzw. y-Richtung) automatisch zu einer Erdbebenlastgruppe vom Typ „+/- Wurzel aus Summe der Quadrate“ zugeordnet (Bild 10, gelbe Lastfälle).

Zufällige (nicht planmäßige) Torsionswirkung

Soll darüber hinaus die nicht planmäßige Torsionswirkung erfasst werden, ist dies über die Definition von zusätzlichen Lasten je Erregung oder durch Definition von zusätzlichen Massen möglich. Diese Beanspruchungen sind nach Abschnitt 6.2.2.4.3 der DIN 4149 zu ermitteln und in der Erdbebeneinwirkung als Lastfalltyp „zufällige Torsionswirkung“ (Bild 10, LF-4 und LF-5) oder „nur als Masse zu berücksichtigen“ (Bild 10, LF-3) zu aktivieren.

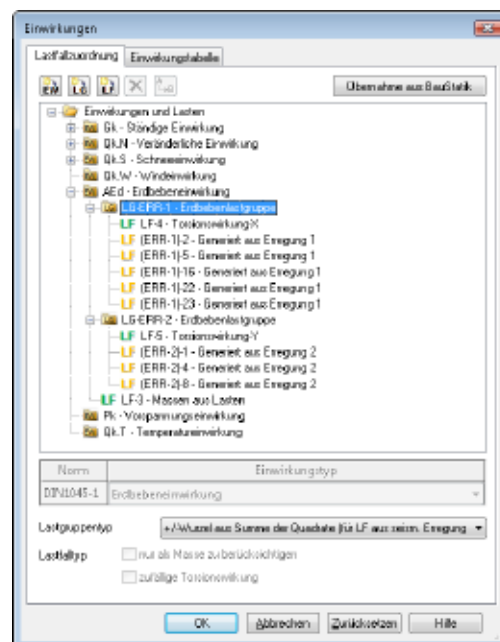


Bild 10. Lastgruppen in Erdbebeneinwirkung

In Bild 11 auf der folgenden Seite sind beispielhaft die Lasten zur Berücksichtigung der nicht planmäßigen Torsionswirkung als Trapezlasten auf der Geschossebene je Erregung angesetzt.

Soll die Berücksichtigung der nicht planmäßigen Torsionswirkung über zusätzliche Massen erfolgen, so kann dies durch die Definition von Punkt-, Linien- oder Flächenlasten erzielt werden.

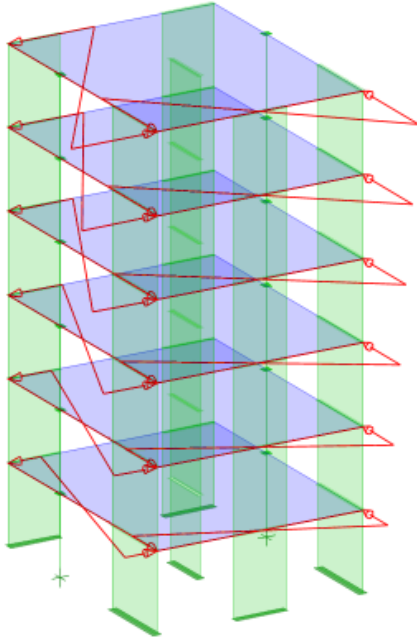


Bild 11. Zusätzliche Lasten zur nicht planmäßigen Torsionswirkung

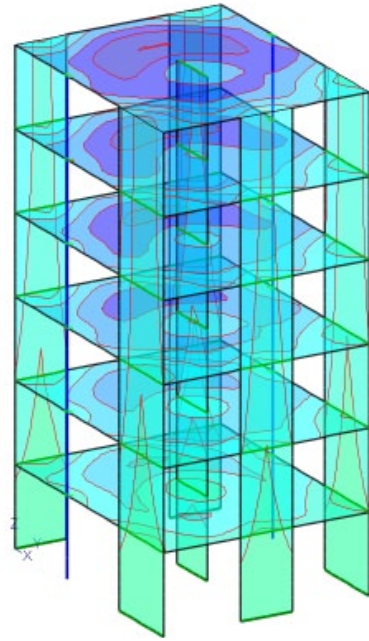


Bild 12. extreme Verformungen

Statische Berechnung und Überlagerung der Ergebnisse

Als nächster Berechnungsschritt ist eine erneute Generierung des Modells sowie eine statische Analyse erforderlich, die sowohl die statischen Lasten als auch die seismischen Lasten berücksichtigt. Die Ergebnisse (modale Verformungen, Schnittgrößen, ...) der Lastfälle einer Lastgruppe vom Typ „+/- Wurzel aus Summe der Quadrate“ werden über die SRSS-Regel (Square Root of the Sum of the Squares) zu jeweils einem Ergebnis zusammengefasst. Hierzu sind die linearen Lastkombinationen vorzugeben und die MIN/MAX-Überlagerung über Lastfälle und Lastkombinationen zu wählen. Dabei ist darauf zu achten, dass alle Lastfälle einer Erregung den gleichen Lastfaktor erhalten.

Im Bild 12 sind beispielhaft die extremalen Verformungen dargestellt.

Bemessung

Sind alle Lasten Einwirkungen zugeordnet – insbesondere die zur Erdbebeneinwirkung (vgl. Bild 10) – kann die Bemessung gestartet werden. Bei automatischer Kombinatorik werden in MicroFe die in einer Erdbebeneinwirkung A_{Ed} definierten, zweier zueinander orthogonal wirkenden Erregungen gemäß DIN 4149 überlagert; siehe Gleichungen (19) und (20) aus [3]:

$$A_{Ed} = \mp E_{Edx} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edy}$$

$$A_{Ed} = \mp 0.30 \cdot E_{Edx} \oplus \mp E_{Edy}$$

Durch die Neuerungen im Modul M513 wird MicroFe Version 2011 zu einem leistungsfähigen System zur Erdbebenenanalyse.

Dr.-Ing. Dorian Lutzkanov
 Dipl.-Ing. Sven Hohenstern
 mb AEC Software GmbH
 mb-news@mbaec.de

Literatur

- [1] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN, Ausgabe April 2005. Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Ausgabe März 2001. Beuth Verlag, Berlin
- [3] Kretz, J.: Erdbebensicherung von Bauwerken. In mb-news 2/2011



M513 Erdbebenuntersuchung Leistungsbeschreibung siehe nebenstehenden Fachartikel Zusatzmodul zu M510 Grundfrequenz, Grundschwingformen	1.290,- EUR
M510 Grundfrequenz, Grundschwingformen	590,- EUR
MicroFe 2011 comfort MicroFe-Paket „Platte + räumliche Systeme“	3.990,- EUR
PlaTo 2011 MicroFe-Paket „Platten“	1.490,- EUR

Es gelten unsere Allg. Geschäftsbedingungen. Änderungen und Irrtümer vorbehalten.
 Alle Preise zzgl. Versandkosten (7,50 EUR) und ges. MwSt. Hardlock für Einzelplatzlizenz, je Arbeitsplatz erforderlich (95,- EUR). Handbücher auf DVD. Betriebssystem Windows XP (32) / Windows Vista (32/64) / Windows 7 (32/64) – Stand: März 2011