

Masterarbeit

Vergleich von Berechnungsmethoden für die Erdbebenbemessung anhand des Skytowers in Bukarest

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

unter der Leitung von

O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Werner Theiler

Institut für Betonbau

eingereicht an der Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

von

Leber Günter, Dipl.-Ing.

Graz, 18.12.2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

Statuary Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,
.....
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Ing. habil. Nguyen Viet Tue und Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Theiler Werner.

Für die Betreuung von außeruniversitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Dr. Dipl.-Ing. Roman Geier und allen Mitarbeitern von Schimetta Consult Ziviltechniker Ges.m.b.H.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie und Freunden, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützt haben.

Graz, am 20.12.2013

(Unterschrift des Studenten)

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Vergleich der Berechnungsmethoden für Erdbeben nach Eurocode 8. Als Vergleichsobjekt wird der Skytower in Bukarest, ein 37-stöckiges Hochhaus, herangezogen.

Zuerst wird das Bauwerk näher beschrieben und die Eigenschaften des Bauwerks werden ermittelt. Das geschieht anhand der originalen Konstruktionsübersichtspläne des Bauwerks.

Danach werden allgemeine Grundlagen der Erdbebenberechnung nach Eurocode 8 erläutert. Damit sind neben der Ermittlung des Bemessungsspektrums auch die Beurteilung der Regelmäßigkeit im Grund- und Aufriss sowie eine kurze Darstellung der für diese Arbeit relevanten Berechnungsmethoden gemeint.

Nachdem die Grundlagen geklärt sind, wird das Bauwerk nach dem vereinfachten Antwortspektrumverfahren berechnet. Um einen Vergleich aufzustellen, wird es anschließend mit dem multimodalen Antwortspektrumverfahren anhand eines 2D-Systems und mit dem multimodalen Antwortspektrumverfahren anhand eines 3D-Systems berechnet.

Zusätzlich wird die händisch ermittelte Steifigkeit des Kerns mit der Steifigkeit des 3D-Systems verglichen und unterschiedliche 3D-Modellierungen werden in Bezug auf die Steifigkeit des Kerns untersucht.

Abschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen und analysiert.

Abstract

This paper deals with the comparison of methods for calculating seismic design of the Eurocode 8. The Skytower in Bucharest, a 37-story high-rise building, has been used as object of comparison.

First, the structure will be described in detail and the properties of the structure will be determined. This is done based on the original design layout plans of the building.

After that, general principles of earthquake calculation according to Eurocode 8 are explained. These are, next to determining the design spectrum, the assessment of the regularity in plan and elevation, as well as a summary of the relevant calculation methods relevant for this work.

Once the basics are explained, the structure is calculated according to the simplified response spectrum method. To draw a comparison, the multi-modal response spectrum method based on a 2D-system and the multi-modal response spectrum method based on a 3D-system will be calculated.

In addition, the manually determined stiffness of the core will be compared with the stiffness of the 3D-system and the stiffness of different 3D models will be analyzed.

Finally, the obtained results are being compared and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Bauwerk.....	3
2.1	Tragwerksbeschreibung.....	3
2.2	Pläne	4
2.3	Lastaufstellung.....	5
2.3.1	Ständige Einwirkungen.....	5
2.3.2	Veränderliche Einwirkung	6
3	Eigenschaften des Bauwerks	7
3.1	Schwerpunkt.....	8
3.2	Trägheitsmomente der tragenden Bauteile	11
3.3	Schubmittelpunkt	14
3.4	Torsionssteifigkeit.....	16
4	Rechenmodelle und Berechnungsmethoden.....	17
4.1	Kriterien für Regelmäßigkeit im Grundriss	18
4.2	Kriterien für Regelmäßigkeit im Aufriss.....	22
5	Grundlagen zur Erdbebenbemessung	23
5.1	Allgemeines, Standort und Funktion	23
5.2	Baugrundbeschaffenheit	24
5.3	Erdbebeneinwirkung.....	25
5.3.1	Bemessungsbodenbeschleunigung	25
5.3.2	Überprüfen geringer Seismizität	25
5.3.3	Darstellung der Erdbebeneinwirkung	25
5.3.4	Bemessungsspektrum für lineare Berechnung	27
5.4	Berechnungsverfahren	32
5.4.1	Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren.....	32
5.4.2	Modales Antwortspektrumverfahren	33
5.5	Einflüsse nach Theorie 2. Ordnung.....	35
5.6	Torsion	37
5.6.1	Tatsächliche Ausmittigkeit	38
5.6.2	Zusatzausmitte	38
5.6.3	Zufällige Ausmittigkeit.....	38

5.7	Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung.....	40
5.8	Ablaufschema einer Erdbebenerrechnung und Untersuchungsbereich der Masterarbeit.....	41
6	Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren.....	42
6.1	Bestimmung der Gebäudemasse.....	43
6.1.1	Punktmassen aus ständigen Einwirkungen.....	43
6.1.2	Punktmassen aus veränderliche Einwirkung.....	44
6.1.3	Punktmassen gesamt	44
6.1.4	Gesamte Gewichtskraft des Bauwerks.....	45
6.2	Bestimmung der Eigenfrequenzen	45
6.2.1	System	46
6.2.2	Querschnitts- und Materialkennwerte und Vorgaben für die dynamische Berechnung	47
6.2.3	Punktmassen	48
6.2.4	Ergebnisse der dynamischen Berechnung	49
6.2.5	Die ersten Eigenfrequenzen in y- und z-Richtung.....	52
6.3	Bestimmung der Gesamterdbebenkraft.....	56
6.3.1	Bestimmung der Gesamterdbebenkraft in y-Richtung bzw. in z-Richtung.....	57
6.3.2	Bestimmung der Gesamterdbebenkraft in y-Richtung bzw. in z-Richtung.....	57
6.4	Verteilung der horizontalen Erdbebenkkräfte	57
6.5	Ermittlung der Schnittkräfte.....	60
6.5.1	Systemeingaben	60
6.5.2	Lastfälle	61
6.6	Schnittkräfte	63
6.6.1	Schnittkräfte aus Lastfall 1 Erdbebenkkräfte in y-Richtung.....	63
6.6.2	Schnittkräfte aus Lastfall 2 Erdbebenkkräfte in z-Richtung.....	65
6.7	Zusammenfassung.....	67
7	Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab.....	68
7.1	Bestimmung der Spektralwerte $S_d(T)$ der einzelnen Eigenformen.....	69

7.2	Bestimmung der modalen Massen der einzelnen Eigenformen	80
7.3	Bestimmung und Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte der einzelnen Eigenformen	89
7.4	Ermittlung der Schnittkräfte der einzelnen Eigenformen	98
7.4.1	Lastfälle	98
7.4.2	Schnittkräfte	106
7.5	Kombination der Schnittkräfte infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung	122
7.6	Kontrolle mit Schnittkräfte aus Computerberechnung	124
7.7	Zusammenfassung	128
8	Multimodales Antwortspektrumverfahren anhand eines 3D Modells	129
8.1	System	129
8.2	Querschnittswerte	130
8.3	Materialkennwerte	133
8.4	Lastfälle	134
8.4.1	Eigengewicht	134
8.4.2	Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 KN/m ²	135
8.4.3	Eigengewicht Dachaufbau 4,0 KN/m ²	136
8.4.4	Nutzlast Geschoss 3,8 KN/m ²	137
8.4.5	Nutzlast Dach 3,0 KN/m ²	138
8.5	Berechnungsvorgaben für die dynamische Berechnung	139
8.6	Ergebnisse aus der dynamischen Berechnung	140
8.6.1	Summe der aufgebrauchten Massen	140
8.6.2	Eigenfrequenzen	140
8.6.3	Effektive modale Massen	141
8.6.4	1.Eigenform (Grundswingform in y-Richtung)	142
8.6.5	1.Eigenform (Grundswingform in z-Richtung)	143
8.7	Schnittkräfte aus den Grundswingformen	144
8.8	Überlagerte Schnittkräfte aus der Erdbebenberechnung	148
8.9	Zusammenfassung	152
9	Vergleich der Steifigkeiten der Systeme	153
9.1	Ermittlung der Steifigkeit am 3D-System mit Berücksichtigung der Riegel	153

9.2	Ermittlung der Steifigkeit am 2D System mit Berücksichtigung der Riegel	158
9.3	Ermittlung der Steifigkeit am 3D-System ohne Berücksichtigung der Riegel	159
9.4	Ermittlung der Steifigkeit am 2D System ohne Berücksichtigung der Riegel	164
9.5	Zusammenfassung	165
10	Auswertung und Ergebnisse	166
	Literaturverzeichnis.....	168
	Abbildungsverzeichnis.....	169
	Tabellenverzeichnis.....	169
	Anhang	172
A1.	Konstruktionsübersichtspläne	172

1 Einleitung

Diese Masterarbeit handelt vom Vergleich bestimmter Berechnungsmethoden aus dem Eurocode 8 anhand des Beispiels Skytower Bukarest.

Obwohl Erdbeben in Österreich aufgrund der geografischen Lage nur eine untergeordnete Rolle spielen, ist der Erdbebennachweis dennoch in manchen Fällen maßgebend. Ganz anders ist das in anderen Ländern Europas, wo Erdbeben für die Bemessung von Gebäuden einen hohen Stellenwert haben. Jedoch ist es nach Einführung des Eurocodes und der zunehmend grenzübergreifenden Auftragsbearbeitung der Ziviltechnikerbüros für jeden Bauingenieur wichtig, ein gewisses Verständnis für das Thema Erdbebenbemessung zu besitzen.

Oft ist es schwierig die Normen durchzulesen und sie ohne Beispiele zu verstehen bzw. deren Hintergrund zu begreifen. Deshalb sollen in dieser Arbeit die für die Praxis wichtigsten Berechnungsmethoden miteinander verglichen und deren Vorgangsweise schrittweise erklärt werden.

Da bei Projekten oft nicht die Zeit für aufwändige Analysen vorhanden ist, wird in dieser Arbeit mehr Wert auf die praxisorientierten Verfahren wie das vereinfachte und das multimodale Antwortspektrumverfahren gelegt.

Um diese Verfahren zu vergleichen und schrittweise zu erklären, wird als Beispielobjekt der Skytower in Bukarest herangezogen. Um die Berechnungsverfahren anwenden zu können, müssen zuerst Grundlagen ermittelt werden. Das beinhaltet nicht nur die Verfahren selbst, sondern auch die Tragwerksbeschreibung, Lastaufstellungen, die Eigenschaften des Bauwerks und Rechenmodelle.

Als Vergleichsbasis werden die Schnittkraftberechnung und die Ermittlung der Eigenformen angenommen, weil dadurch ein Unterschied der Belastungen und der Steifigkeiten gut ersichtlich wird.

Zusätzlich werden noch 3D-Modellierungen in Bezug auf ihre Steifigkeit analysiert und die händisch ermittelten Werte mit den Werten aus der FE-Berechnung verglichen.

Das dabei verwendete Datenmaterial entstammt einem Projekt, welches von Schimetta Consult Ziviltechniker Ges.m.b.H. zu Verfügung gestellt wurde. Darüber hinaus wurden Normen und Fachliteratur zu diesem Thema verwendet.

2 Das Bauwerk

2.1 Tragwerksbeschreibung

Es handelt sich um ein neu errichtetes Bürogebäude in Bukarest, welches aus 36 Obergeschossen und einem Dachgeschoss besteht. Das Erdgeschoss ist mit 4,09 m um 0,59 m höher als die restlichen Obergeschosse, welche eine Höhe von 3,5 m aufweisen. Das Bauwerk besitzt 5 Untergeschosse. Da diese relativ steif miteinander verbunden und durch Tiefgründungen gegründet sind, können die Obergeschosse in der Ebene des Erdgeschosses als starr eingespannt betrachtet werden. Das Gebäude besteht aus einem Kern und Stützen. Während der Kern für horizontale und vertikale Lastabtragung zuständig ist, sind die Stützen nur für die vertikale Lastabtragung zuständig und gelten als oben und unten gelenkig gelagert. Der Stützenquerschnitt nimmt in 3 Stufen von unten nach oben zu, was jedoch für die Bemessung auf Erdbeben nur gering von Bedeutung ist, da die Stützen keinen Anteil zur horizontalen Steifigkeit liefern. Da der Querschnitt des Kerns sich nicht ändert, können die Eigenschaften des Bauwerks anhand eines Regelgeschosses (OG 12) bestimmt werden. Die Deckenstärke wird als konstant über die gesamte Fläche angenommen und beträgt 22 cm.

Da es sich um einen Vergleich der Berechnungsmethoden des Eurocodes 8 handelt und diese Arbeit keine Nachberechnung des bestehenden Gebäudes darstellt, werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- alle Stahlbetonbauteile bestehen aus Beton C35/45 und Betonstahl B550
- zur Berechnung des Eigengewichts wird von einem einheitlichen Deckenaufbau in jedem Geschoss ausgegangen. Vereinfacht wird von einer ständigen Last, resultierend aus dem Deckenaufbau von $1,7 \text{ KN/m}^2$ und von einer ständigen Last, resultierend aus dem Dachaufbau von $4,0 \text{ KN/m}^2$, ausgegangen.
- als Nutzlast auf den Decken wird vereinfacht in jedem Geschoss eine verteilte Flächenlast von 3 KN/m^2 (lt. ÖNORM B 1991-1-1:2011 TAB 1 Kategorie B1) angenommen. Als Zuschlag für Trennwände wird eine verteilte Flächenlast von $0,8 \text{ KN/m}^2$ (lt. ÖNORM EN 1991-1-1 für versetzbare Trennwände mit einer Linienlast zwischen 1,0 und $2,0 \text{ KN/m}$) addiert.

- als Nutzlast am Flachdach ist lt. ÖNORM EN 1991-1-1:2011, Kategorie I (zugängliche Dächer mit Nutzungskategorien A bis G) anzusetzen. Es wird wieder 3 KN/m^3 gewählt.
- Es wird davon ausgegangen, dass das Gebäude ausreichende Duktilität besitzt um die Duktilitätsklasse DMH (hohe Duktilität) anzuwenden.

2.2 Pläne

Die Berechnungen werden anhand der originalen Konstruktionsübersichtspläne für das Bauwerk durchgeführt. Der Anhang A1 beinhaltet die maßgebenden Konstruktionsübersichtspläne (ohne Maßstab).

2.3 Lastaufstellung

2.3.1 Ständige Einwirkungen

Kern: 57,88 m²
 Wände: 17,63 m²
 Stützen: 22,66 m²
 Decke: 1287,69 m²

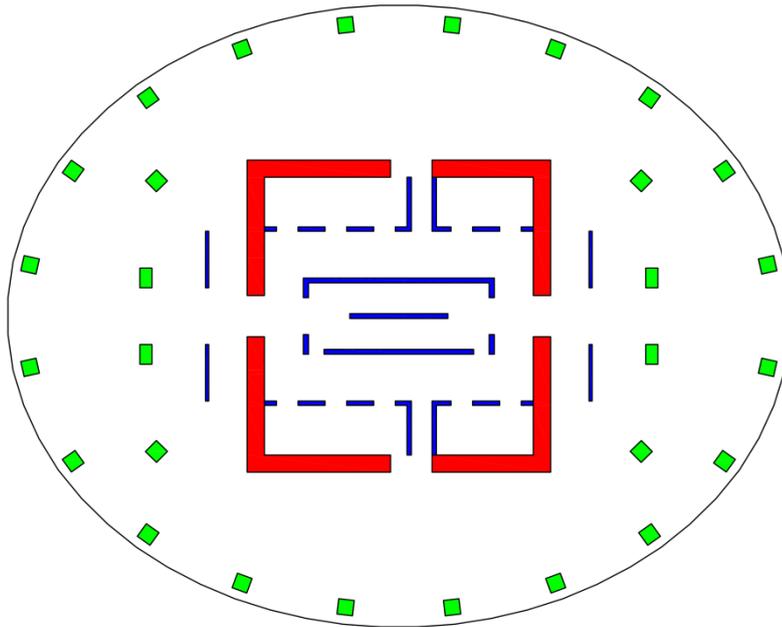


Abbildung 2-1 Regelgeschossflächen zur Ermittlung des ständigen Lasten

Wichte Beton: $\gamma_B = 25 \text{ KN}/\text{m}^3$

Höhe Kern, Wände und Stützen Regelgeschoss: $h = 3,50\text{m}$

Höhe Kern, Wände und Stützen Erdgeschoss: $h = 4,09\text{m}$

Deckendicke $d = 0,22\text{m}$

Eigengewicht Decke:

$$G_{\text{Decke}} = 1287,69\text{m}^2 * 0,22\text{m} * 25 \text{ KN}/\text{m}^3 = 7082,30 \text{ KN}$$

Eigengewicht aus Kern, Wänden und Stützen Regelgeschoss:

$$\begin{aligned} G_{\text{Wände, Stützen, Kern RG}} &= (17,63\text{m}^2 + 22,66\text{m}^2 + 57,88\text{m}^2) * 3,50\text{m} * 25 \text{ KN}/\text{m}^3 \\ &= 8589,88 \text{ KN} \end{aligned}$$

Eigengewicht aus Kern, Wänden und Stützen Erdgeschoss:

$$\begin{aligned} G_{\text{Wände, Stützen, Kern EG}} &= (17,63\text{m}^2 + 22,66\text{m}^2 + 57,88\text{m}^2) * 4,09\text{m} * 25 \text{KN}/\text{m}^3 \\ &= 10037,88 \text{KN} \end{aligned}$$

Eigengewicht aus Fußbodenaufbau

$$G_{\text{Fußbodenaufbau}} = 1,7 \text{KN}/\text{m}^2 * 1287,69\text{m}^2 = 2189,07 \text{KN}$$

Eigengewicht aus Dachaufbau

$$G_{\text{Dach}} = 4,0 \text{KN}/\text{m}^2 * 1287,69\text{m}^2 = 5150,76 \text{KN}$$

2.3.2 Veränderliche Einwirkung

Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, wird als veränderliche Gewichtseinwirkung vereinfachend angenommen:

$$Q_{\text{Geschoß}} = 1287,69\text{m}^2 * \left(3,0 \text{KN}/\text{m}^2 + 0,8 \text{KN}/\text{m}^2 \right) = 4893,22 \text{KN}$$

$$Q_{\text{Dach}} = 1287,69\text{m}^2 * 3,0 \text{KN}/\text{m}^2 = 3863,07 \text{KN}$$

3 Eigenschaften des Bauwerks

Das Gebäude wird ab dem starren Kellergeschoss betrachtet. Da sich die Geschosse nur sehr gering voneinander unterscheiden, werden die Eigenschaften des Bauwerks anhand eines Regelgeschosses (OG 12) berechnet.

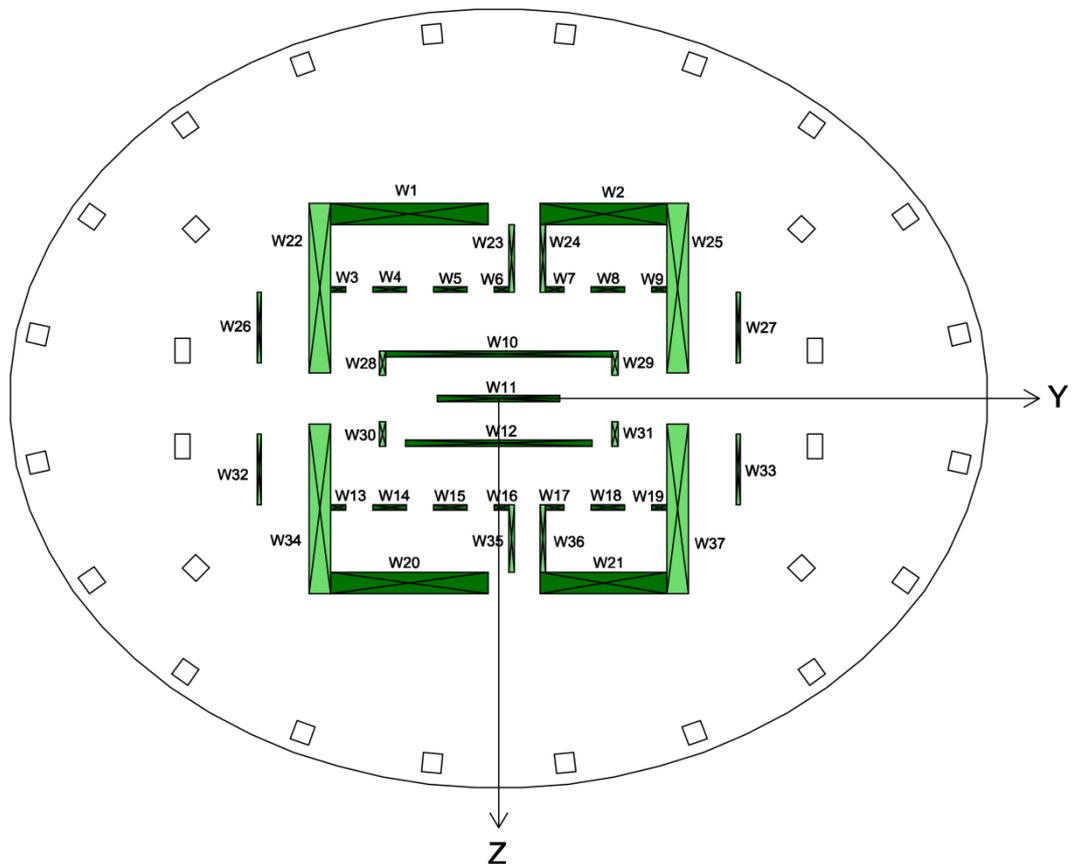


Abbildung 3-1 Regelgeschoss (OG 12) zur Berechnung der Eigenschaften des Bauwerks

3.1 Schwerpunkt

Der Schwerpunkt der Decke liegt in der Deckenmitte (Ursprungskordinatensystem aus Abbildung 3-1). Um den Schwerpunkt der Wände zu berechnen, werden die Wände in einzelne Rechtecke zerlegt (siehe Abbildung 3-1). Die Berechnung wird dann anhand der nachfolgenden Formeln durchgeführt.

$$z_{SP} = \frac{\sum A_i * Z_i}{\sum A} \text{ bzw. } y_{SP} = \frac{\sum A_i * Y_i}{\sum A}$$

mit

Z z-Abstand zum Ausgangskordinatensystem (aus Abbildung 3-1)

Y y-Abstand zum Ausgangskordinatensystem (aus Abbildung 3-1)

Dabei wird der Kern in einen äußeren Kern (Teilquerschnitt 1), einen inneren Kern (Teilquerschnitt 2) und einzelne Wände zerlegt (siehe Abbildung 3-2). Diese Vorgangsweise wird gewählt, da später die Schwerpunkte der einzelnen Teilquerschnitte benötigt werden.

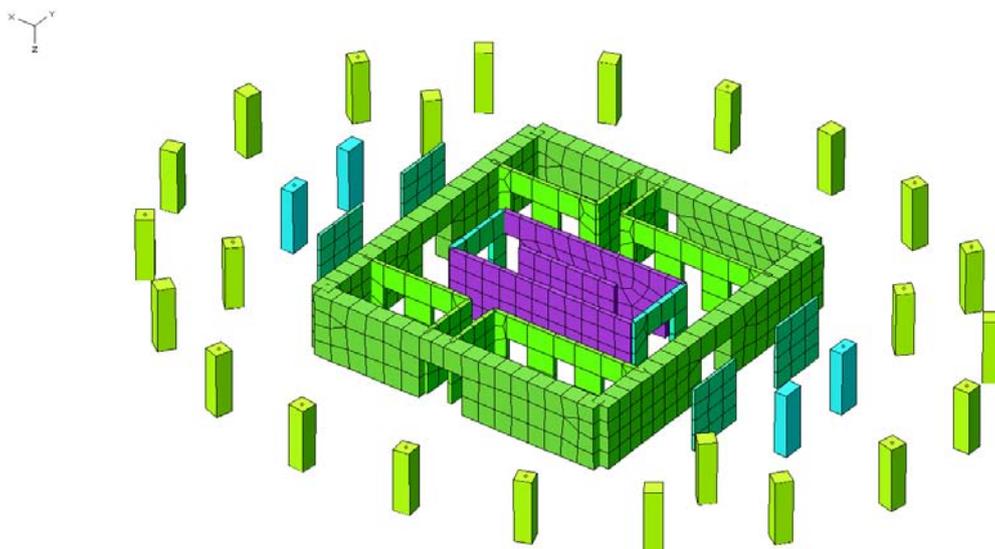


Abbildung 3-2 Teilquerschnitte

Schwerpunkt Teilquerschnitt 1							
i	Ly [m]	Lz[m]	Y [m]	Z [m]	A [m ²]	Y*A [m ³]	Z*A [m ³]
1	7,290	1,000	-4,125	-8,600	7,29	-30,07	-62,69
2	5,850	1,000	4,845	-8,600	5,85	28,34	-50,31
3	0,695	0,250	-7,423	-5,075	0,17	-1,29	-0,88
4	1,560	0,250	-5,045	-5,075	0,39	-1,97	-1,98
5	1,560	0,250	-2,235	-5,075	0,39	-0,87	-1,98
6	0,675	0,250	0,133	-5,075	0,17	0,02	-0,86
7	0,845	0,250	2,593	-5,075	0,21	0,55	-1,07
8	1,560	0,250	5,045	-5,075	0,39	1,97	-1,98
9	0,695	0,250	7,423	-5,075	0,17	1,29	-0,88
13	0,695	0,250	-7,423	5,075	0,17	-1,29	0,88
14	1,560	0,250	-5,045	5,075	0,39	-1,97	1,98
15	1,560	0,250	-2,235	5,075	0,39	-0,87	1,98
16	0,675	0,250	0,133	5,075	0,17	0,02	0,86
17	0,845	0,250	2,593	5,075	0,21	0,55	1,07
18	1,560	0,250	5,045	5,075	0,39	1,97	1,98
19	0,695	0,250	7,423	5,075	0,17	1,29	0,88
20	7,290	1,000	-4,125	8,600	7,29	-30,07	62,69
21	5,850	1,000	4,845	8,600	5,85	28,34	50,31
22	1,000	7,900	-8,270	-5,150	7,90	-65,33	-40,69
23	0,250	3,150	0,595	-6,525	0,79	0,47	-5,14
24	0,250	3,150	2,045	-6,525	0,79	1,61	-5,14
25	1,000	7,900	8,270	-5,150	7,90	65,33	-40,69
34	1,000	7,900	-8,270	5,150	7,90	-65,33	40,69
35	0,250	3,150	0,595	6,525	0,79	0,47	5,14
36	0,250	3,150	2,045	6,525	0,79	1,61	5,14
37	1,000	7,900	8,270	5,150	7,90	65,33	40,69
Σ					64,83	0,10	0,00

Schwerpunkt Teilquerschnitt 1	
Y _{SP}	0,002 m
Z _{SP}	0,000 m

Tabelle 3-1 Berechnung des Schwerpunkts vom Teilquerschnitt 1

Schwerpunkt Teilquerschnitt 2							
i	Ly [m]	Lz[m]	Y [m]	Z [m]	A [m ²]	Y*A [m ³]	Z*A [m ³]
10	10,440	0,280	0,000	-2,080	2,92	0,00	-6,08
12	8,640	0,280	0,000	2,080	2,42	0,00	5,03
28	0,300	1,145	-5,370	-1,648	0,34	-1,84	-0,57
29	0,300	1,145	5,370	-1,648	0,34	1,84	-0,57
30	0,300	1,145	-5,370	1,648	0,34	-1,84	0,57
31	0,300	1,145	5,370	1,648	0,34	1,84	0,57
Σ					6,72	0,00	-1,05

Schwerpunkt Teilquerschnitt 2	
Y _{SP}	0,000 m
Z _{SP}	-0,156 m

Tabelle 3-2 Berechnung des Schwerpunkts vom Teilquerschnitt 2

Schwerpunkt gesamter Kern							
i	Ly [m]	Lz[m]	Y [m]	Z [m]	A [m ²]	Y*A [m ³]	Z*A [m ³]
Teilquerschnitt 1			0,002	0,000	64,83	0,10	0,00
Teilquerschnitt 2			0,000	-0,156	6,72	0,00	-1,05
11	5,670	0,280	0,000	0,000	1,59	0,00	0,00
26	0,180	3,300	-11,080	-3,303	0,59	-6,58	-1,96
27	0,180	3,300	11,080	-3,303	0,59	6,58	-1,96
32	0,180	3,300	-11,080	3,303	0,59	-6,58	1,96
33	0,180	3,300	11,080	3,303	0,59	6,58	1,96
Σ					75,51	0,10	-1,05

Schwerpunkt gesamter Kern	
y _{SP}	0,001 m
z _{SP}	-0,014 m

Tabelle 3-3 Berechnung des Schwerpunkts vom gesamten Kern

3.2 Trägheitsmomente der tragenden Bauteile

Für die Ermittlung der Trägheitsmomente der tragenden Bauteile wurden neben den Wänden mit rechteckigem Grundriss Wandgruppen gebildet und deren Querschnittswerte mit dem Programm InfoCAD berechnet (siehe Abbildung 3-3). Diese Vorgangsweise wurde gewählt, um die Steifigkeit des Systems ohne Berücksichtigung der Riegel zwischen den Wänden und den Wandgruppen (siehe Tabelle 9.1) leichter berechnen zu können.

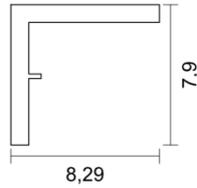
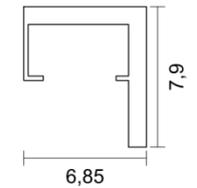
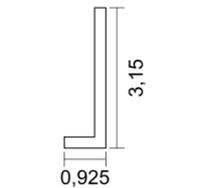
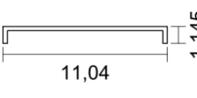
1	Polygon 	Wandgruppe A: Wand 1/3/22 bzw. Wand 13/20/34 Schwerpunkt [m] $y_s = 2,476$ $z_s = 2,314$ Fläche [m ²] $A = 1,5364e+01$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 4,9646e+00$ $I_{yz} = -5,4557e+0$ $I_y = 8,7336e+01$ $I_1 = 3,7993e+01$ $I_z = 9,8314e+01$ $I_2 = 1,4766e+02$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = -42,127$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite
2	Polygon 	Wandgruppe B: Wand 2/7/9/24/25 bzw. Wand 17/18/19/21/36/37 Schwerpunkt [m] $y_s = 4,589$ $z_s = 2,527$ Fläche [m ²] $A = 1,4923e+01$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 4,5064e+00$ $I_{yz} = 3,8358e+01$ $I_y = 8,3126e+01$ $I_1 = 1,1861e+02$ $I_z = 7,7140e+01$ $I_2 = 4,1659e+01$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = -42,769$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite
3	Polygon 	Wandgruppe C: Wand 6/23 bzw. Wand 16/35 Schwerpunkt [m] $y_s = 0,043$ $z_s = 1,831$ Fläche [m ²] $A = 9,5625e-01$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 1,9584e-02$ $I_{yz} = -9,3197e-0$ $I_y = 9,4423e-01$ $I_1 = 9,5374e-01$ $I_z = 4,0235e-02$ $I_2 = 3,0727e-02$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = 5,825$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite
4	Polygon 	Wandgruppe D: Wand 10/28/29 Schwerpunkt [m] $y_s = 5,520$ $z_s = 0,222$ Fläche [m ²] $A = 3,6102e+00$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 9,9167e-02$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_y = 1,9821e-01$ $I_1 = 1,9821e-01$ $I_z = 4,6367e+01$ $I_2 = 4,6367e+01$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = 0,000$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite

Abbildung 3-3 Steifigkeiten der Wandgruppen

Da die Wände bzw. Wandgruppen durch steife Riegel miteinander verbunden sind, gibt es auch hier wieder Teilquerschnitte, die einzeln berechnet und anschließend aufsummiert werden. Deshalb muss bei der Berechnung der Teilquerschnitte der „Steineranteil“ der Wände bzw. Wandgruppen berücksichtigt werden.

Trägheitsmomente Teilquerschnitt 1									
i	Ly [m]	Lz [m]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	A [m ²]	y _{SP,TQS1} [m]	z _{SP,TQS1} [m]	y _{SP,TQS1} ^{2*} A	z _{SP,TQS1} ^{2*} A
4	1,560	0,250		0,08	0,390	-5,047	-5,075	9,932	10,045
5	1,560	0,250		0,08	0,390	-2,237	-5,075	1,951	10,045
8	1,560	0,250		0,08	0,390	5,043	-5,075	9,920	10,045
14	1,560	0,250		0,08	0,390	-5,047	5,075	9,932	10,045
15	1,560	0,250		0,08	0,390	-2,237	5,075	1,951	10,045
18	1,560	0,250		0,08	0,390	5,043	5,075	9,920	10,045
1/3/22 (WG A)			87,34	98,31	15,360	-6,296	-6,786	608,772	707,325
13/20/34 (WG A)			87,34	98,31	15,360	-6,296	6,786	608,772	707,325
2/7/9/24/25 (WG B)			83,13	77,14	14,920	6,507	-6,573	631,821	644,609
17/19/21/36/37 (WG B)			83,13	77,14	14,920	6,507	6,573	631,821	644,609
6/23 (WG C)			0,94	0,04	0,960	0,511	-6,269	0,251	37,728
16/35 (WG C)			0,94	0,04	0,960	0,511	6,269	0,251	37,728
Σ			342,82	351,46				2525,30	2839,59

Trägheitsmomente TQS 1	
ly	3182,41 m ⁴
lz	2876,76 m ⁴

Tabelle 3-4 Berechnung der Trägheitsmomente vom Teilquerschnitt 1

Trägheitsmomente Teilquerschnitt 2									
i	Ly [m]	Lz [m]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]	A [m ²]	y _{SP,TQS2} [m]	z _{SP,TQS2} [m]	y _{SP,TQS2} ^{2*} A	z _{SP,TQS2} ^{2*} A
12	8,640	0,280		15,05	2,42	0,00	2,24	0,00	12,10
30	0,300	1,145	0,04		0,34	-5,37	1,80	9,91	1,12
31	0,300	1,145	0,04		0,34	5,37	1,80	9,91	1,12
10/28/29 (WG D)			0,20	46,37	3,61	0,00	-1,84	0,00	12,25
Σ			0,27	61,42				19,81	26,58

Trägheitsmomente TQS 2	
ly	26,85 m ⁴
lz	81,23 m ⁴

Tabelle 3-5 Berechnung der Trägheitsmomente vom Teilquerschnitt 2

Trägheitsmomente gesamter Kern				
i	Ly [m]	Lz [m]	ly [m ⁴]	lz [m ⁴]
Trägheits-momente TQS 1			3182,41	2876,76
Trägheits-momente TQS 2			26,85	81,23
11	5,670	0,280		4,25
26	0,180	3,300	0,54	
27	0,180	3,300	0,54	
32	0,180	3,300	0,54	
33	0,180	3,300	0,54	
Σ			3211,42	2962,24

Trägheitsmomente gesamter Kern	
ly	3211,42 m ⁴
lz	2962,24 m ⁴

Tabelle 3-6 Berechnung der Trägheitsmomente vom gesamten Kern

3.3 Schubmittelpunkt

Bei der Berechnung des Schubmittelpunkts wird der Kern in einzelne Wände zerlegt.

Die Berechnung darf vereinfachend anhand folgender Formeln durchgeführt werden, wenn alle Systeme, die zur Abtragung der horizontalen Lasten dienen, ohne Unterbrechung von der Gründung bis zur Gebäudeoberkante durchlaufen und deren Biegelinien sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. [1]

$$z_{SMP} = \frac{\sum Z * I_z}{\sum I_z} \text{ bzw. } y_{SMP} = \frac{\sum Y * I_y}{\sum I_y}$$

i	Ly [m]	Lz[m]	Y [m]	Z [m]	ly [m ⁴]	Y*ly [m ⁵]	lz [m ⁴]	Z ² lz [m ⁵]
1	7,290	1,000		-8,600	0,00	0,00	32,29	-277,65
2	5,850	1,000		-8,600	0,00	0,00	16,68	-143,48
3	0,695	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,01	-0,04
4	1,560	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,08	-0,40
5	1,560	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,08	-0,40
6	0,675	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,01	-0,03
7	0,845	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,01	-0,06
8	1,560	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,08	-0,40
9	0,695	0,250		-5,075	0,00	0,00	0,01	-0,04
10	10,440	0,280		-2,080	0,00	0,00	26,55	-55,23
11	5,670	0,280		0,000	0,00	0,00	4,25	0,00
12	8,640	0,280		2,080	0,00	0,00	15,05	31,30
13	0,695	0,250		5,075	0,00	0,00	0,01	0,04
14	1,560	0,250		5,075	0,00	0,00	0,08	0,40
15	1,560	0,250		5,075	0,00	0,00	0,08	0,40
16	0,675	0,250		5,075	0,00	0,00	0,01	0,03
17	0,845	0,250		5,075	0,00	0,00	0,01	0,06
18	1,560	0,250		5,075	0,00	0,00	0,08	0,40
19	0,695	0,250		5,075	0,00	0,00	0,01	0,04
20	7,290	1,000		8,600	0,00	0,00	32,29	277,65
21	5,850	1,000		8,600	0,00	0,00	16,68	143,48
22	1,000	7,900	-8,270		41,09	-339,79	0,00	0,00
23	0,250	3,150	0,595		0,65	0,39	0,00	0,00
24	0,250	3,150	2,045		0,65	1,33	0,00	0,00
25	1,000	7,900	8,270		41,09	339,79	0,00	0,00
26	0,180	3,300	-11,080		0,54	-5,97	0,00	0,00
27	0,180	3,300	11,080		0,54	5,97	0,00	0,00
28	0,300	1,145	-5,370		0,04	-0,20	0,00	0,00
29	0,300	1,145	5,370		0,04	0,20	0,00	0,00
30	0,300	1,145	-5,370		0,04	-0,20	0,00	0,00
31	0,300	1,145	5,370		0,04	0,20	0,00	0,00
32	0,180	3,300	-11,080		0,54	-5,97	0,00	0,00
33	0,180	3,300	11,080		0,54	5,97	0,00	0,00
34	1,000	7,900	-8,270		41,09	-339,79	0,00	0,00
35	0,250	3,150	0,595		0,65	0,39	0,00	0,00
36	0,250	3,150	2,045		0,65	1,33	0,00	0,00
37	1,000	7,900	8,270		41,09	339,79	0,00	0,00
Σ					169,26	3,44	144,33	-23,92

Schubmittelpunkt		Trägheitsmomente für I ₀	
y _{Schub}	0,020 m	I _{y, für I₀}	169,26 m ⁴
z _{Schub}	-0,166 m	I _{z, für I₀}	144,33 m ⁴

Tabelle 3-7 Berechnung des Schubmittelpunkts

3.4 Torsionssteifigkeit

Die Berechnung der Torsionssteifigkeit kann anhand folgender Formeln durchgeführt werden, wenn die gleichen zwei Bedingungen wie zuvor bei der Ermittlung des Schubmittelpunkts erfüllt sind:

$$I_T = \sum z_{SMP}^2 * I_z + \sum y_{SMP}^2 * I_y$$

i	Iy [m ⁴]	Iz [m ⁴]	y _{SMP} [m]	z _{SMP} [m]	y _{SMP} ² ·Iy	z _{SMP} ² ·Iz
1	0,00	32,29	0,00	-8,43	0,00	2296,65
2	0,00	16,68	0,00	-8,43	0,00	1186,80
3	0,00	0,01	0,00	-4,91	0,00	0,17
4	0,00	0,08	0,00	-4,91	0,00	1,91
5	0,00	0,08	0,00	-4,91	0,00	1,91
6	0,00	0,01	0,00	-4,91	0,00	0,15
7	0,00	0,01	0,00	-4,91	0,00	0,30
8	0,00	0,08	0,00	-4,91	0,00	1,91
9	0,00	0,01	0,00	-4,91	0,00	0,17
10	0,00	26,55	0,00	-1,91	0,00	97,29
11	0,00	4,25	0,00	0,17	0,00	0,12
12	0,00	15,05	0,00	2,25	0,00	75,90
13	0,00	0,01	0,00	5,24	0,00	0,19
14	0,00	0,08	0,00	5,24	0,00	2,17
15	0,00	0,08	0,00	5,24	0,00	2,17
16	0,00	0,01	0,00	5,24	0,00	0,18
17	0,00	0,01	0,00	5,24	0,00	0,35
18	0,00	0,08	0,00	5,24	0,00	2,17
19	0,00	0,01	0,00	5,24	0,00	0,19
20	0,00	32,29	0,00	8,77	0,00	2480,73
21	0,00	16,68	0,00	8,77	0,00	1281,93
22	41,09	0,00	-8,29	0,00	2823,85	0,00
23	0,65	0,00	0,57	0,00	0,22	0,00
24	0,65	0,00	2,02	0,00	2,67	0,00
25	41,09	0,00	8,25	0,00	2796,24	0,00
26	0,54	0,00	-11,10	0,00	66,42	0,00
27	0,54	0,00	11,06	0,00	65,94	0,00
28	0,04	0,00	-5,39	0,00	1,09	0,00
29	0,04	0,00	5,35	0,00	1,07	0,00
30	0,04	0,00	-5,39	0,00	1,09	0,00
31	0,04	0,00	5,35	0,00	1,07	0,00
32	0,54	0,00	-11,10	0,00	66,42	0,00
33	0,54	0,00	11,06	0,00	65,94	0,00
34	41,09	0,00	-8,29	0,00	2823,85	0,00
35	0,65	0,00	0,57	0,00	0,22	0,00
36	0,65	0,00	2,02	0,00	2,67	0,00
37	41,09	0,00	8,25	0,00	2796,24	0,00
Σ					11515,00	7433,36

Torsionssteifigkeit	
I _ω	18948,36 m ⁶

Tabelle 3-8 Berechnung der Torsionssteifigkeit

4 Rechenmodelle und Berechnungsmethoden

Die Klassifizierung und dadurch auch die möglichen Rechenmodelle, die Berechnungsmethoden und der Verhaltensbeiwert q (in Kapitel 5 berechnet) hängen von den Kriterien der konstruktiven Regelmäßigkeit des Bauwerks ab. Hierbei wird in der ÖNORM EN 1998-1:2013 zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Bauwerken unterschieden. Bei einem unregelmäßigen Aufriss muss der Verhaltensbeiwert q durch Multiplikation mit 0,8, abgemindert werden.

Das Rechenmodell kann entweder

- eben oder
- räumlich sein.

Bei der Berechnungsmethode gibt es eine Unterscheidung zwischen einem

- vereinfachten Antwortspektrumverfahren (horizontale Ersatzlasten) und einem
- modalen Verfahren.[1]

Regelmäßig		Zulässige Vereinfachung		Verhaltensbeiwert
Grundriss	Aufriss	Modell	Linear-elastische Berechnung	(Für lineare Berechnung)
Ja	Ja	Eben	Vereinfacht	Referenzwert
Ja	Nein	Eben	Modal	Abgemindert
Nein	Ja	Räumlich	Vereinfacht	Referenzwert
Nein	Nein	Räumlich	Modal	Abgemindert

Tabelle 4-1 Auswirkung der konstruktiven Regelmäßigkeit auf die Erdbebenberechnung und Erdbebenauslegung [1]

Das vereinfachte Verfahren darf jedoch nur angewendet werden, wenn die Eigenschwingdauer T_1 in den beiden Hauptrichtungen kleiner als $4 * T_C$ bzw. 2,0 s ist.

Ist der Aufriss regelmäßig, aber der Grundriss nicht, darf ein eigenes ebenes Modell in jeder der beiden Horizontalrichtungen verwendet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt werden: [1]

- „Das Bauwerk muss gut verteilte und relativ starre Fassadenteile haben.
- Die Höhe des Bauwerks darf 10 m nicht überschreiten.
- Die Steifigkeit der Decken in ihrer Ebene muss im Vergleich zur horizontalen Steifigkeit der vertikalen Bauteile ausreichend groß sein, so dass eine starre Deckenwirkung angenommen werden kann.
- Die Mittelpunkte der horizontalen Steifigkeiten und Masse müssen jeweils näherungsweise auf einer vertikalen Geraden liegen und es werden in den beiden horizontalen Berechnungsrichtungen die Bedingungen $r_x^2 > l_s^2 + e_{ax}^2$, $r_x^2 > l_s^2 + e_{ax}^2$ erfüllt.“ [1 S. 50]

mit

l_s	Trägheitsradius
r_x, r_y	Torsionsradien
e_{ax}, e_{ay}	planmäßige Ausmittigkeit

4.1 Kriterien für Regelmäßigkeit im Grundriss

Ein Gebäude kann im Grundriss als regelmäßig gelten, wenn die folgenden Anforderungen erfüllt sind:

- **„Hinsichtlich der Verteilung der horizontalen Steifigkeit und der Masse muss das Bauwerk im Grundriss ungefähr symmetrisch bezüglich zweier rechtwinklig zueinander stehender Achsen sein“**[1 S. 43]

Man erkennt aus Kapitel 3.1, dass der Schwerpunkt des Geschosses ungefähr mit der Mitte (Ausgangskordinatensystem aus Abbildung 3-1) des Geschosses zusammenfällt. Auch der Schubmittelpunkt liegt direkt auf dieser Mitte. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die horizontalen Massen und Steifigkeiten ziemlich symmetrisch sind.

→ Kriterium erfüllt

- **kompakte Grundrissform (von konvexem Polygon umrissen)**[1]

In den Konstruktionsübersichtsplänen sieht man, dass der Grundriss des Regelgeschosses eine Ellipse ist und keine Rücksprünge oder dergleichen aufweist.

→ Kriterium erfüllt

- Die Steifigkeit der Decke muss im Vergleich zu der horizontalen Steifigkeit der vertikal tragenden Bauteile so groß sein, dass sich die Verformung der Decke nicht auf die horizontale Lastverteilung auswirkt. [1]

Horizontale Steifigkeit der Decke

$$I_y = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{L_z}{2}\right)^3 * \frac{L_y}{2} = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{37}{2}\right)^3 * \frac{46}{2} = 114375,5 \text{ m}^4$$

$$I_z = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{L_y}{2}\right)^3 * \frac{L_z}{2} = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{46}{2}\right)^3 * \frac{17}{2} = 176784,9 \text{ m}^4$$

Horizontale Steifigkeit Wände+Kern

$$I_y = 3211,42 \text{ m}^4$$

$$I_z = 2962,24 \text{ m}^4$$

Vergleicht man die horizontale Steifigkeit der Decke mit der horizontalen Steifigkeit der Wände und dem Kern erkennt man, dass die Decke sehr viel steifer ist.

→ Kriterium erfüllt

- Die Schlankheit des Gebäudes im Grundriss darf nicht größer als 4 sein. [1]

$$\lambda = L_{max}/L_{min}$$

λ Schlankheit des Gebäudes

L_{max}, L_{min} größte bzw. kleinste Gebäudeabmessungen senkrecht zueinander

$$\lambda = L_{max}/L_{min} = 46,0 \text{ m}/37,0 \text{ m} = 1,24 < 4,0$$

→ Kriterium erfüllt

- In jeder Berechnungsrichtung und in jedem Geschoss müssen die tatsächliche Ausmittigkeit e_0 und der Torsionsradius r die folgenden zwei Bedingungen erfüllen:

Formeln gelten für die Berechnungsrichtung y:

$$e_{z0} \leq 0,30 * r_z$$

$$r_z \geq l_s$$

mit

e_{z0} als Abstand zwischen dem Steifigkeitsmittelpunkt und dem Massenmittelpunkt, gemessen in z-Richtung

r_z als Quadratwurzel des Verhältnisses zwischen der Torsionssteifigkeit und der Horizontalsteifigkeit in y-Richtung („Torsionsradius“)

l_s als Trägheitsradius der Geschossmasse im Grundriss (Quadratwurzel des Verhältnisses von (a) dem polaren Trägheitsmoment der Geschossmasse im Grundriss bezüglich des Massenmittelpunkts des Geschosses zu (b) der Masse des Geschosses).

Berechnung des Trägheitsradius l_s :

$$I_{pm} = \int r^2 dm = \rho \int r^2 dV = \rho * h \int r^2 dA = \rho * h * I_p$$

$$\begin{aligned} l_s^2 &= \frac{I_{pm,W\ddot{a}nde} + I_{pm,Decke}}{m_{W\ddot{a}nde} + m_{St\ddot{u}tzen} + m_{Decke}} \\ &= \frac{\rho * h_{W\ddot{a}nde} * I_{p,W\ddot{a}nde} + \rho * h_{Decke} * I_{p,Decke}}{\rho * h_{W\ddot{a}nde/St\ddot{u}tzen} * (A_{W\ddot{a}nde} + A_{St\ddot{u}tzen}) + \rho * h_{Decke} * A_{Decke}} \\ &= \frac{h_{W\ddot{a}nde} * (I_{y,W\ddot{a}nde} + I_{z,W\ddot{a}nde}) + h_{Decke} * (I_{y,Decke} + I_{z,Decke})}{h_{W\ddot{a}nde/St\ddot{u}tzen} * (A_{W\ddot{a}nde} + A_{St\ddot{u}tzen}) + h_{Decke} * A_{Decke}} \end{aligned}$$

I_{pm} polares Massenträgheitsmoment des gesamten Geschosses

$I_{pm,W\ddot{a}nde}$ polares Massenträgheitsmoment der Wände

$I_{pm,Decke}$ polares Massenträgheitsmoment der Decke

$I_{p,W\ddot{a}nde}$ polares Flächenträgheitsmoment der Wände

$I_{p,Decke}$ polares Flächenträgheitsmoment der Decke

$I_{y,W\ddot{a}nde}$ Flächenträgheitsmoment um y-Achse der Wände

$I_{z,W\ddot{a}nde}$ Flächenträgheitsmoment um z-Achse der Wände

$I_{y,Decke}$ Flächenträgheitsmoment um y-Achse der Decke

$I_{z,Decke}$ Flächenträgheitsmoment um z-Achse der Decke

$A_{W\ddot{a}nde}$ Fläche der Wände

$A_{St\ddot{u}tzen}$ Fläche der Stützen

A_{Decke} Fläche der Decke

$h_{\text{Wände/Stützen}}$ Höhe der Wände bzw. Stützen

h_{Decke} Deckenstärke

$$l_s = \sqrt{\frac{3,5 * (169,3 + 144,3) + 0,22 * (114375,7 + 176784,9)}{3,5 * (75,5 + 22,66) + 0,22 * 1287,7}} = 10,20 \text{ m}$$

Bei der Berechnung des Trägheitsradius wird das polare Massenträgheitsmoment der Stützen vernachlässigt, da es nur einen sehr geringen Beitrag liefern würde, jedoch muss die Masse der Stützen berücksichtigt werden.

Berechnungsrichtung y

$$e_{z0} = 0,166 - 0,014 = 0,152 \text{ m}$$

$$r_z = \sqrt{\frac{18948,36}{144,33}} = 11,46 \text{ m}$$

$$\rightarrow e_{z0} = 0,152 \text{ m} \leq 3,44 \text{ m} = 0,30 * r_z$$

$$\rightarrow r_z = 11,46 \text{ m} \geq 10,20 \text{ m} = l_s$$

Berechnungsrichtung z

$$e_{y0} = 0,020 - 0,001 = 0,019 \text{ m}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{18948,36}{169,26}} = 10,58 \text{ m}$$

$$\rightarrow e_{y0} = 0,07 \text{ m} \leq 3,17 \text{ m} = 0,30 * r_y$$

$$\rightarrow r_y = 10,58 \text{ m} \geq 10,20 \text{ m} = l_s$$

→ Kriterium erfüllt

4.2 Kriterien für Regelmäßigkeit im Aufriss

Ein Gebäude kann im Grundriss als regelmäßig gelten, wenn die folgenden Punkte als erfüllt gelten.

- **Alle horizontalen Aussteifungssysteme müssen von der Gründung bis zur Oberkante des Gebäudes ohne Unterbrechung durchgehen [1]**

Siehe Konstruktionsübersichtspläne im Anhang.

→ Kriterium erfüllt

- **Sowohl die Massen als auch die Horizontalsteifigkeiten der einzelnen Geschosse müssen konstant sein bzw. dürfen allmählich vom Fundament bis zur Oberkante des Gebäudes abnehmen[1]**

Da der Kern in jedem Geschoss gleich ist, ist auch die horizontale Steifigkeit jedes Geschosses gleich. Die Massen nehmen in Richtung der Oberkante des Gebäudes geringfügig ab, da der Querschnitt der Stützen in 3 Stufen nach oben abnimmt.

Siehe Konstruktionsübersichtspläne im Anhang

→ Kriterium erfüllt

5 Grundlagen zur Erdbebenbemessung

5.1 Allgemeines, Standort und Funktion

Die ÖNORM EN 1998-1:2013 definiert die Anforderung an die Standsicherheit folgendermaßen:

„Das Tragwerk muss so bemessen und konstruiert sein, dass es ohne örtliches oder globales Versagen dem Bemessungserdbeben (...) widersteht, ohne dabei seinen inneren Zusammenhalt und eine Resttragfähigkeit nach dem Erdbeben zu verlieren.“[1 S. 26]

Die Anforderungen an die Schadensbegrenzung werden wie folgt festgelegt:

„Das Bauwerk muss so bemessen und ausgebildet sein, dass es einer Erdbebeneinwirkung widersteht, die eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit hat als das Bemessungserdbeben, ohne dass Schäden oder damit verbundene Nutzungsbeschränkungen auftreten, deren Kosten im Vergleich zu den Baukosten selbst unverhältnismäßig hoch wären.“[1 S. 26]

Als Standort für das Bauwerk wird ein Ort in Österreich gewählt, welcher in der Zonengruppe 4 liegt. Deshalb wird angenommen, dass das Bauwerk in Murau situiert ist.

Die ÖNORM B 1998-1 gibt als Referenzbodenbeschleunigung a_{gR} für Murau folgenden Wert an:

→ Murau: Zonengruppe 4 und $a_{gR} = 1,17 \text{ m/s}^2$ [2]

Die Differenzierung der Zuverlässigkeit hinsichtlich Standsicherheit und Schadensbegrenzung erfolgt durch den Beiwert γ_I . Dieser Beiwert wird nach Schadenfolgen der jeweiligen Bauwerkskategorie bestimmt.[1 S. 26]

Im Hochbau gibt es 4 Bedeutungskategorien, welche von der Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, den Schutz der Bevölkerung und von den Folgen eines Einsturzes für menschliches Leben abhängig sind.

- **Bedeutungskategorie I:**

„Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z.B. landwirtschaftliche Bauten usw.“[1 S. 47]

- **Bedeutungskategorie II:**

„Gewöhnliche Bauwerke, die nicht unter andere Kategorien fallen“[1 S. 47]

- **Bedeutungskategorie III:**

„Bauwerke, deren Widerstand gegen Erdbeben wichtig ist im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen, z.B. Schulen, Versammlungsräume, kulturelle Einrichtungen usw.“[1 S. 47]

- **Bedeutungskategorie IV:**

„Bauwerke, deren Unversehrtheit während Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung ist, z.B. Krankenhäuser, Feuerwachen, Kraftwerke usw.“[1 S. 47]

Da es sich um ein Hochhaus handelt, das hauptsächlich als Büro genutzt werden soll, ist es ein gewöhnliches Gebäude und fällt in die Bedeutungskategorie II.

Zonengruppe	Bedeutungskategorien			
	I	II	III	IV
0	0,8	1,0	1,0	1,0
1	0,8	1,0	1,0	1,0
2	0,8	1,0	1,1	1,2
3	0,8	1,0	1,2	1,4
4	0,8	1,0	1,4	1,4

Tabelle 5-1 Festlegung der γ_I -Werte[2]

→ $\gamma_I = 1,0$.

5.2 Baugrundbeschaffenheit

Da Murau als Standort angenommen wird und von dort keine genauen Untersuchungen des Baugrunds vorliegen und da das Thema dieser Arbeit ein Vergleich zwischen den einzelnen Verfahren zur Berechnung der Erdbebeneinwirkung ist, wird vereinfacht von Baugrundklasse B ausgegangen.

Baugrundklasse B umfasst Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton mit einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern. Sie ist gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe.[1]

5.3 Erdbebeneinwirkung

5.3.1 Bemessungsbodenbeschleunigung

Die Bemessungsbodenbeschleunigung ergibt sich lt. ÖNORM EN 1998-1:2013 Pkt. 3.2.1 (3) zu:

$$\rightarrow a_g = \gamma_I * a_{gR} = 1,0 * 1,17 = 1,17 \text{ m/s}^2 \text{ [1]}$$

5.3.2 Überprüfen geringer Seismizität

Falls nur geringe Seismizität auftritt, dürfen vereinfachte und reduzierte Auslegungsverfahren verwendet werden.

$$\gamma_I * a_{gR} * S \leq 0,10 * g = 0,98 \text{ m/s}^2$$

$$1,0 * 1,17 * 1,2 = 1,404 \text{ m/s}^2 \leq 0,98 \text{ m/s}^2$$

mit

S als Bodenparameter (siehe Kapitel 5.3.4)

→ Keine geringe Seismizität

5.3.3 Darstellung der Erdbebeneinwirkung

In der ÖNORM EN 1998 wird die Erdbebenbewegung an einem bestimmten Punkt durch das elastische Beschleunigungs-Antwortspektrum (= elastisches Antwortspektrum) wiedergegeben. Es gilt sowohl für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Dabei wird die horizontale Erdbebeneinwirkung durch zwei orthogonale, voneinander unabhängige Komponenten desselben Antwortspektrums beschrieben. [1]

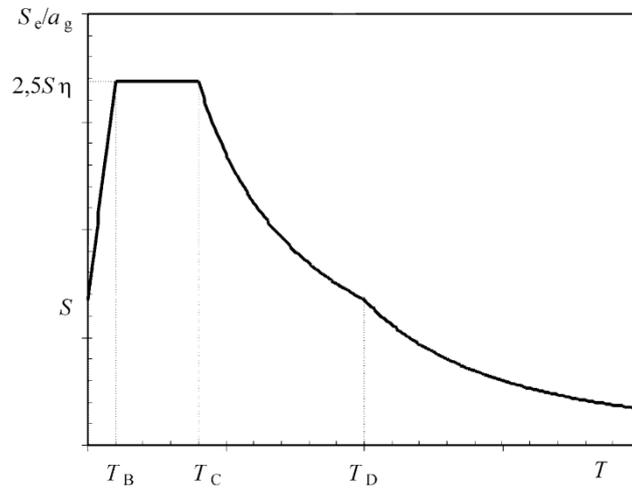
Horizontal elastisches Antwortspektrum:

Abbildung 5-1 Form des elastischen Antwortspektrum [1 S. 33]

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g * S * \left[1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5 * \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5 * \left[\frac{T_C * T_D}{T^2} \right]$$

mit

$S_e(T)$ als Ordinate des elastischen Antwortspektrums

T als Schwingungsdauer eines linearen Einmassenschwingers

a_g als Bemessungs-Bodenbeschleunigung für Baugrundklasse A ($a_g = \gamma_I * a_{gR}$)

T_B als untere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_C als obere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_D als Wert, der den Beginn des Bereichs konstanter Verschiebung des Spektrums definiert

$S...$ als Bodenparameter

η als Dämpfungs-Korrekturbeiwert mit dem Referenzwert $\eta = 1$ für 5 % viskose Dämpfung [1 S. 33]

Falls das Bauwerk keine viskose Dämpfung von 5 % aufweist, kann η lt. ÖNORM 1998-1:2013 Pkt. 3.2.2.2 (3) mit folgender Formel berechnet werden:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55$$

ξ viskoses Dämpfungsverhältnis[1]

Vertikales elastisches Antwortspektrum:

Lt. ÖNORM B 1998-1:2011 braucht die Vertikalkomponente nicht berücksichtigt werden, wenn die Bedingung $a_{vg} \leq 0,25 * g$ erfüllt ist. Erfahrungsgemäß wird a_{vg} folgendermaßen berechnet:

$$a_{vg} = \frac{2}{3} * a_{gR} = \frac{2}{3} * 1,17 = 0,78 \text{ m/s}^2$$

$$\rightarrow a_{vg} = 0,78 \text{ m/s}^2 \leq 0,25 * g = 0,25 * 9,81 = 2,45 \text{ m/s}^2$$

→ Die Vertikalkomponente muss nicht berücksichtigt werden [2]

5.3.4 Bemessungsspektrum für lineare Berechnung

Da Tragwerke durch ihr duktiles Verhalten Energie dissipieren können, ist das Bemessungsspektrum kleiner als das elastische Antwortspektrum. Um bei der Bemessung detaillierte nichtlineare Berechnungen zu vermeiden, wird diese Abminderung durch die Einführung des Verhaltensbeiwerts q erzielt. [1]

Verhaltensbeiwert q

„Der Verhaltensbeiwert q ist ein Näherungswert des Verhältnisses derjenigen Erdbebenkräfte, die das Bauwerk beanspruchen würden, wenn seine Antwort bei 5 % viskoser Dämpfung vollkommen elastisch wäre, zu den Erdbebenkräften, die zur Bemessung mit einem konventionellen Modell verwendet werden dürfen, um gerade noch eine zufrieden stellende Antwort des Bauwerks sicherzustellen.“[1 S. 37]

Die Werte des Verhaltensbeiwerts q berücksichtigen auch den Einfluss einer von 5 % abweichenden Dämpfung und dürfen, obwohl die Duktilitätsklassifizierung in allen Richtungen des Gebäudes die gleiche sein muss, in den unterschiedlichen horizontalen Richtungen verschieden sein.[1]

Betonbauteile können einer von zwei Duktilitätsklassen, in Abhängigkeit von ihrer hysteretischen Energiedissipationskapazität zugeordnet werden. Diese beiden Duktilitätsklassen sind DCM (mittlere Duktilität) und DCH (hohe Duktilität).[1]

Da das Tragsystem des Gebäudes aus einem Kern und Stützen besteht, wird es dem Tragwerkstyp „torsionsweiches System“, nach Definition ÖNORM EN 1998-1:2004 Pkt. 5.1.2, zugeordnet.

$$q = q_0 * k_w \geq 1,5$$

mit

q_0 als Grundwert des Verhaltensbeiwerts, abhängig vom Tragwerkstyp und von seiner Regelmäßigkeit

k_w als Beiwert zur Berücksichtigung der vorherrschenden Versagensart bei Tragsystemen mit Wänden. [1 S. 73]

Lt. ÖNORM B 1998-1:2013 ist für ein torsionsweiches System (Kernsystem) ein q_0 von 2,0 für die Duktilitätsklasse M und ein Wert von 3,0 für die Duktilitätsklasse H definiert.

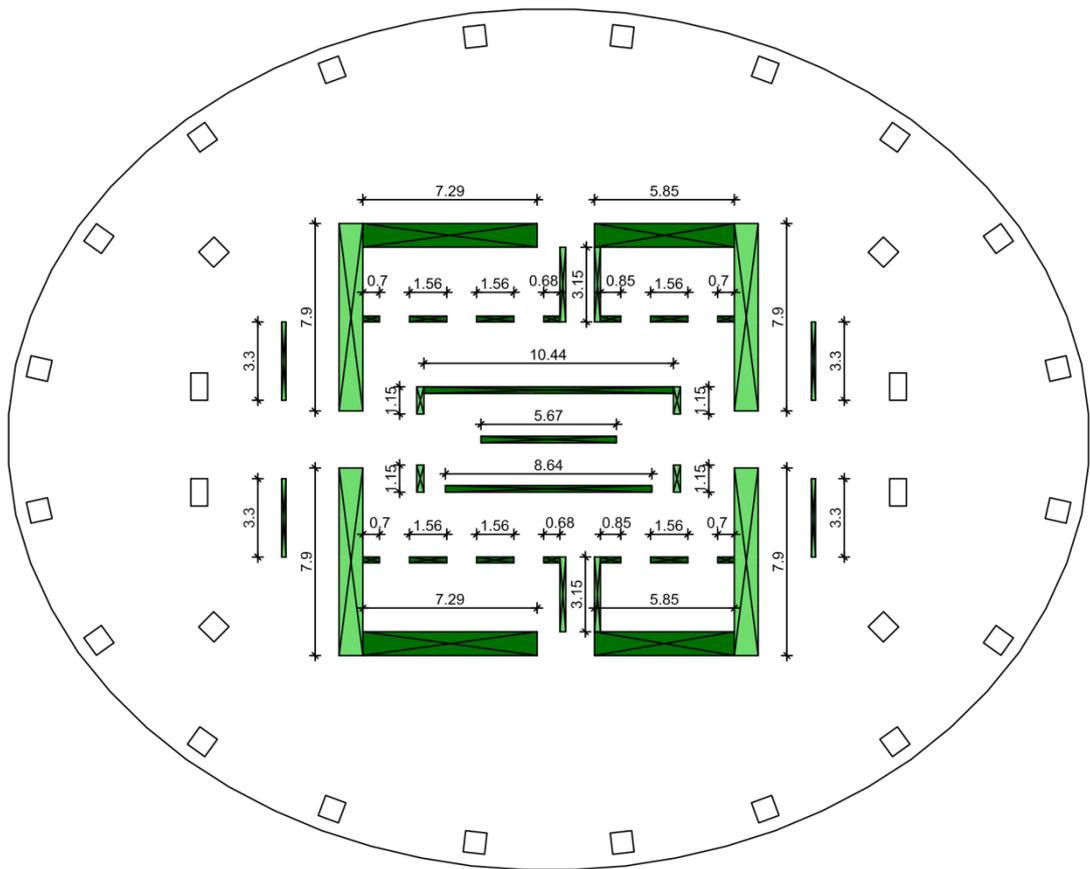
Der Beiwert k_w berücksichtigt die vorherrschende Versagensart und wird für torsionsweiche Systeme (Kernsysteme) mit der Formel $k_w = \frac{(1+\alpha_0)}{3} \leq 1$ bestimmt. Das Massenverhältnis α_0 wird folgendermaßen berechnet:

$$\alpha_0 = \sum h_{wi} / \sum l_{wi}$$

mit

h_{wi} Höhe der Wand i

l_{wi} Länge des Querschnitts der Wand i[1]

Abbildung 5-2 Wandlängen zur Bestimmung von α_0

$$\alpha_0 = (37 \cdot 103,09) / \left(2 \cdot 7,29 + 2 \cdot 5,85 + 4 \cdot 7,9 + 4 \cdot 3,3 + 4 \cdot 1,15 + 10,44 + 5,67 + 8,64 + 4 \cdot 3,15 + 4 \cdot 0,7 + 6 \cdot 1,56 + 2 \cdot 0,68 + 2 \cdot 0,85 \right)$$

$$\alpha_0 = 4813,33 / 128,25 = 37,53 \leq 1,0$$

$$k_w = \frac{(1 + \alpha_0)}{3} = \frac{(1 + 37,53)}{3} = 12,84 \leq 1,0$$

$$\rightarrow k_w = 1,0$$

DCM:

$$q = 2,0 \cdot 1,0 = 2,0$$

DCH:

$$q = 3,0 \cdot 1,0 = 3,0$$

Die Entscheidung, ob man den Verhaltensbeiwert für hohe Duktilität oder mittlere Duktilität verwenden darf, hängt von der Durchbildung der Bauteile ab. Es wird in weiterer Folge davon ausgegangen, wie es am Anfang dieser Arbeit auch dargelegt wurde, dass die Duktilitätsklasse DMH (hohe Duktilität) verwendet werden darf.

→ **q = 3,0**

Horizontales Bemessungsspektrum:

Folgende Gleichungen definieren die Horizontalkomponenten des Bemessungsspektrums:

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

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

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) \left\{ \begin{array}{l} = a_g * S * \frac{2,5}{q} * \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta * a_g \end{array} \right.$$

$$T_D \leq T: S_d(T) \left\{ \begin{array}{l} = a_g * S * \frac{2,5}{q} * \left[\frac{T_C * T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta * a_g \end{array} \right.$$

mit

$S_e(T)$ als Ordinate des Bemessungsspektrums

T als Schwingungsdauer eines linearen Einmassenschwingers

a_g als Bemessungs-Bodenbeschleunigung für Baugrundklasse A ($a_g = \gamma_I * a_{gR}$)

T_B als untere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_C als obere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_D als Wert, der den Beginn des Bereichs konstanter Verschiebung des Spektrums definiert

S als Bodenparameter

q als Verhaltensbeiwert

β als Beiwert für den unteren Grenzwert für das horizontale Bemessungsspektrum [1 S. 37-38]

Lt. ÖNORM B 1998-1:2011 7.2.10 darf der empfohlene Wert für β aus der ÖNORM EN 1998-1:2013 übernommen werden und nimmt die Größe $\beta = 0,2$ an. [2]

In der ÖNORM EN 1998-1:2013 gibt es bei der Ermittlung der Parameter der Antwortspektren eine Unterscheidung zwischen Typ 1- und Typ 2-Spektralform, welche von der Größe der Oberflächenmagnitudenwellen M_s abhängt.[1]

Das nationale Anwendungsdokument ÖNORM B 1998-1:2011 gibt jedoch für Österreich nur die Typ 1-Spektralform vor.[2]

Baugrundklasse	S	TB(s)	TC(s)	TD(s)
B	1,2	0,15	0,5	2

Tabelle 5-2 Parameterwerte zur Beschreibung der empfohlenen elastischen Antwortspektren vom Typ 1 [1]

5.4 Berechnungsverfahren

5.4.1 Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren

Wenn bei einem Hochbau die Antwort des Bauwerks nicht wesentlich durch höhere Schwingungsformen als die Grundswingform beeinflusst wird, darf das vereinfachte Antwortspektrumverfahren angewendet werden.

Es müssen daher die folgenden zwei Bedingungen erfüllt werden:

- Die Regelmäßigkeitskriterien im Aufriss müssen erfüllt sein
- Die Eigenschwingdauer der Grundswingform muss kleiner als die folgenden Werte sein:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 * T_c \\ 2,0s \end{cases} [1]$$

Gesamterdbebenkraft

Lt. ÖNORM EN 1998-1:2013 wird die Gesamterdbebenkraft F_b des Bauwerks in jeder Richtung durch folgende Formel bestimmt:

$$F_b = S_d(T_1) * m * \lambda$$

mit

$S_d(T_1)$ als Ordinate des Bemessungsspektrums bei der Periode T_1

T_1 als Eigenschwingungsdauer des Bauwerks für horizontale Bewegungen in der betrachteten Richtung

m als Gesamtmasse des Bauwerks, oberhalb der Gründung oder über der Oberkante eines starren Kellergeschosses

λ als Korrekturbeiwert

$\lambda = 0,85$ bei $T \leq 2 * T_c$ und das Bauwerk hat mehr als 2 Stockwerke

$\lambda = 1,0$ bei allen anderen Fällen [1]

Verteilung der horizontalen Erdbebenkraft

Die Gesamterdbebenkraft muss auf die einzelnen Geschosse in beiden Richtungen aufgeteilt werden. Dies erfolgt über den Anteil der Verschiebung der Massen an der Summe aller Verschiebungen nach folgender Formel:

$$F_i = F_b * \frac{s_i * m_i}{\sum s_j * m_j}$$

mit

F_i als Stockwerk i angreifende Horizontalkraft

F_b als Gesamterdbebenkraft

s_i, s_j als Verschiebungen der Massen m_i, m_j in der Grundeigenform

m_i, m_j als Stockwerkmassen [1]

5.4.2 Modales Antwortspektrumverfahren

Dieses Berechnungsverfahren muss angewendet werden, wenn die Bedingungen, um das vereinfachte Antwortspektrum anzuwenden aus Kapitel 5.4.1 nicht erfüllt werden können.

Es müssen die Modalformen berücksichtigt werden, die wesentlich zur Gesamtantwort beitragen.

Folgende Bedingungen müssen berücksichtigt werden:

- Die Summe der effektiven Modalmassen der berücksichtigten Modalbeiträge müssen mindestens 90 % der Gesamtmasse des Bauwerks sein.
- Es müssen alle Modalbeiträge mit effektiver Modalmasse, welche größer als 5 % der Gesamtmasse ist, berücksichtigt werden.

Wenn, wie bei Hochbauten mit einem wesentlichen Beitrag an Torsionsmodalformen, die oberen Bedingungen nicht erfüllt werden können, muss zumindest bei der räumlichen Berechnung so viele Eigenformen berücksichtigt werden, dass Folgendes erfüllt ist:

$$k \geq 3 * \sqrt{n}$$

und

$$T_k \leq 0,20 \text{ s}$$

mit

k die Anzahl der Modalbeiträge, die zu berücksichtigen sind

n die Geschossanzahl über Fundament bzw. starren Kellergeschoss

T_k die Periode der Modalform k [1]

Kombination der Modalbeiträge

Die Perioden der Modalformen T_i und T_j gelten voneinander als unabhängig, wenn die Bedingung $T_j \leq 0,9 * T_i$ erfüllt wird.

Bei Berücksichtigung der Unabhängigkeit aller maßgebenden Modalbeiträge darf der Größtwert E_E der seismischen Beanspruchungsgröße folgendermaßen berechnet werden:

$$E_E = \sqrt{\sum E_{E_i}^2}$$

mit

E_E die seismische Beanspruchungsgrößen (Verschiebung, Kraft...), die betrachtet wird

E_{E_i} der Wert der seismischen Beanspruchungsgröße, den der Modalbeitrag i liefert

Die oben angegebene Formel wird in der Literatur auch als SRSS-Formel (Square-Root-of-Sum-of-Squares) bezeichnet. Sind die Perioden der benötigten Modalformen allerdings nicht unabhängig, muss ein genaueres Verfahren, wie das Vollständige Quadratische Verfahren, auch CQC Verfahren (Complete Quadratic Combination) genannt, verwendet werden.[1]

5.5 Einflüsse nach Theorie 2. Ordnung

Es brauchen keine Einflüsse aus Theorie 2. Ordnung berücksichtigt werden, vorausgesetzt folgende Gleichung wird erfüllt:

$$\theta = \frac{P_{tot} * d_r}{V_{tot} * h} \leq 0,10$$

mit

θ Empfindlichkeitsbeiwert der gegenseitigen Stockwerkverschiebung

P_{tot} Gesamtgewichtskraft am und oberhalb des in der Erdbeben-Bemessungssituation betrachteten Geschosses

d_r Bemessungswert der Gegenseitigen Stockwerkverschiebung, ermittelt als Differenz der mittleren horizontalen Verschiebung d_s oben und unten im betrachteten Geschoss.

V_{tot} Gesamterdbebens Schub des Stockwerks

h Geschosshöhe

$$d_s = q_d * d_e$$

mit

d_s Verschiebung eines Punktes im Tragwerk infolge der Bemessungseinwirkung

q_d Verschiebungsverhaltensbeiwert, der gleich q angenommen wird, wenn nichts anderes vorgeschrieben ist

d_e Verschiebung des gleichen Punktes des Tragwerks wie durch eine lineare Berechnung auf der Grundlage des Bemessungsantwortspektrums

Torsionseinwirkungen aus Erdbebeneinwirkung sind bei der Ermittlung von d_e zu berücksichtigen.

Liegt θ zwischen 0,1 und 0,2, dann können die Einflüsse aus Theorie 2. Ordnung näherungsweise durch Multiplikation der seismischen Beanspruchungsgrößen mit dem Beiwert gleich $1/(1 - \theta)$ berücksichtigt werden. Es darf der Wert 0,3 für θ nicht überschritten werden. [1]

In weiterer Folge wird auf die Theorie 2. Ordnung nicht weiter eingegangen, da sie für die Aufstellung eines Vergleichs der Berechnungsmethoden nicht relevant ist.

5.6 Torsion

Die Torsion wird anhand des Berechnungsmodells 3 der ÖNORM B1998-1:2011 Anhang B berechnet.

$M_{t,z} = F_{b,z} * e_{max}$ bzw. $F_{b,z} * e_{min}$ für den Bauteil ungünstigerer Wert ist maßgebend

$M_{t,y} = F_{b,y} * e_{max}$ bzw. $F_{b,y} * e_{min}$ für den Bauteil ungünstigerer Wert ist maßgebend

$$e_{max} = e_0 + e_1 + e_2$$

$$e_{min} = e_0 - e_2$$

mit

$F_{b,z}$ Erdbebeneinwirkung in z-Richtung

$F_{b,y}$ Erdbebeneinwirkung in y-Richtung

e_{max} maximale anzusetzende Exzentrizität

e_{min} minimale anzusetzende Exzentrizität

e_0 tatsächliche Ausmittigkeit (siehe Kapitel 5.6.1)

e_1 Zusatzausmitte zufolge Vereinfachung beim Rechenmodell 3 (siehe Kapitel 5.6.2)

e_2 Ausmitte für zufällige Abweichung (siehe Kapitel 5.6.3) [2]

Die Erdbebeneinwirkungen werden, wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben, über die Höhe des Gebäudes aufgeteilt. Die Überlagerung von y- und z-Richtung erfolgt analog zu Kapitel 5.7.

Beim 3D-System muss man, im Gegensatz zum 2D-System, nur die zufällige Ausmitte berücksichtigen, da die tatsächliche und die zusätzliche Ausmitte durch die dreidimensionale Modellierung schon in der Computerberechnung berücksichtigt werden.

In weiterer Folge wird auf die Torsion nicht weiter eingegangen, da man den Unterschied der Berechnungsmethoden am besten durch den Vergleich der Schnittkräfte M_y , Q_z , M_z und Q_y darstellen kann.

5.6.1 Tatsächliche Ausmittigkeit

Die horizontalen Erdbebenkräfte greifen im Schwerpunkt der einzelnen Geschosse an. Durch den Abstand e_0 zwischen Schwerpunkt und Schubmittelpunkt entsteht ein Torsionsmoment.

5.6.2 Zusatzausmitte

Die Zusatzausmitte e_1 berücksichtigt eine zusätzliche Ausmittigkeit zufolge der Vereinfachung (Berechnung anhand des Ersatzstabs) des Rechenmodells 3.

$$e_1 = 0,1 * (l + b) * (10 * e_0 / l)^{0,5} \leq 0,1 * (l + b)$$

mit

l Gebäudelänge normal auf die Erdbebeneinwirkung

b Gebäudetiefe in Richtung der Erdbebeneinwirkung

5.6.3 Zufällige Ausmittigkeit

Der berechnete Massenmittelpunkt jedes Geschosses i wird, um Unsicherheiten bezüglich Lage der Massen und der räumlichen Veränderlichkeit der Erdbebenbewegung abdecken zu können, um folgende zufällige Ausmittigkeit in beiden Richtungen verschoben.

$$e_2 = e_{ai} = \pm 0,05 * L_i$$

mit

e_{ai} als zufällige Ausmittigkeit der Geschossmasse i , für alle Geschosse in gleicher Richtung anzusetzen

L_i als Geschossabmessung senkrecht zur Richtung der Erdbebeneinwirkung [1]

Zufällige Ausmittigkeit der Geschossmasse bei Erdbebeneinwirkung in z-Richtung

$$e_{ai} = \pm 0,05 * 46 = \pm 2,3 \text{ m}$$

Zufällige Ausmittigkeit der Geschossmasse bei Erdbebeneinwirkung in y-Richtung

$$e_{ai} = \pm 0,05 * 37 = \pm 1,85 \text{ m}$$

Alternativ:

Die zufällige Torsionswirkung kann, wenn horizontale Steifigkeit und die Masse im Grundriss symmetrisch verteilt sind, durch Multiplikation der aus der Erdbebeneinwirkung vorhandenen Kraft in den einzelnen Bauteilen mit dem Beiwert δ berücksichtigt werden.

$$\delta = 1 + 0,6 * \frac{x}{L_e}$$

mit

x als Abstand des betrachteten Bauteils vom Massenmittelpunkt des Gebäudes im Grundriss gemessen senkrecht zur Richtung der betrachteten Erdbebeneinwirkung

L_e als Abstand zwischen den äußersten Bauteilen, die horizontale Lasten abtragen, gemessen senkrecht zur Richtung der betrachteten Erdbebeneinwirkung

5.7 Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung

Die Erdbebeneinwirkungen in den beiden horizontalen Richtungen müssen im Allgemeinen als gleichzeitig wirkend angesehen werden. Dieses Zusammenwirken wird mit folgender Kombination berücksichtigt:

$$E_{Ed_z} + 0,30 * E_{Ed_y}$$

$$0,30 * E_{Ed_z} + E_{Ed_y}$$

E_{Ed_z} die Beanspruchungsgrößen, welche infolge eines Angriffs der Erdbebeneinwirkung in Richtung der gewählten horizontalen Achse z des Bauwerks auftreten

E_{Ed_y} die Beanspruchungsgrößen, welche infolge eines Angriffs der Erdbebeneinwirkung in Richtung der gewählten horizontalen Achse y des Bauwerks auftreten[1]

In weiterer Folge wird die Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung nicht berücksichtigt, da sie erst nach der Ermittlung der Schnittkräfte der einzelnen Richtungen auftritt und deshalb nichts zu einem Vergleich der Berechnungsmethoden beiträgt.

5.8 Ablaufschema einer Erdbebenberechnung und Untersuchungsbereich der Masterarbeit

Untersuchungsbereich der Masterarbeit

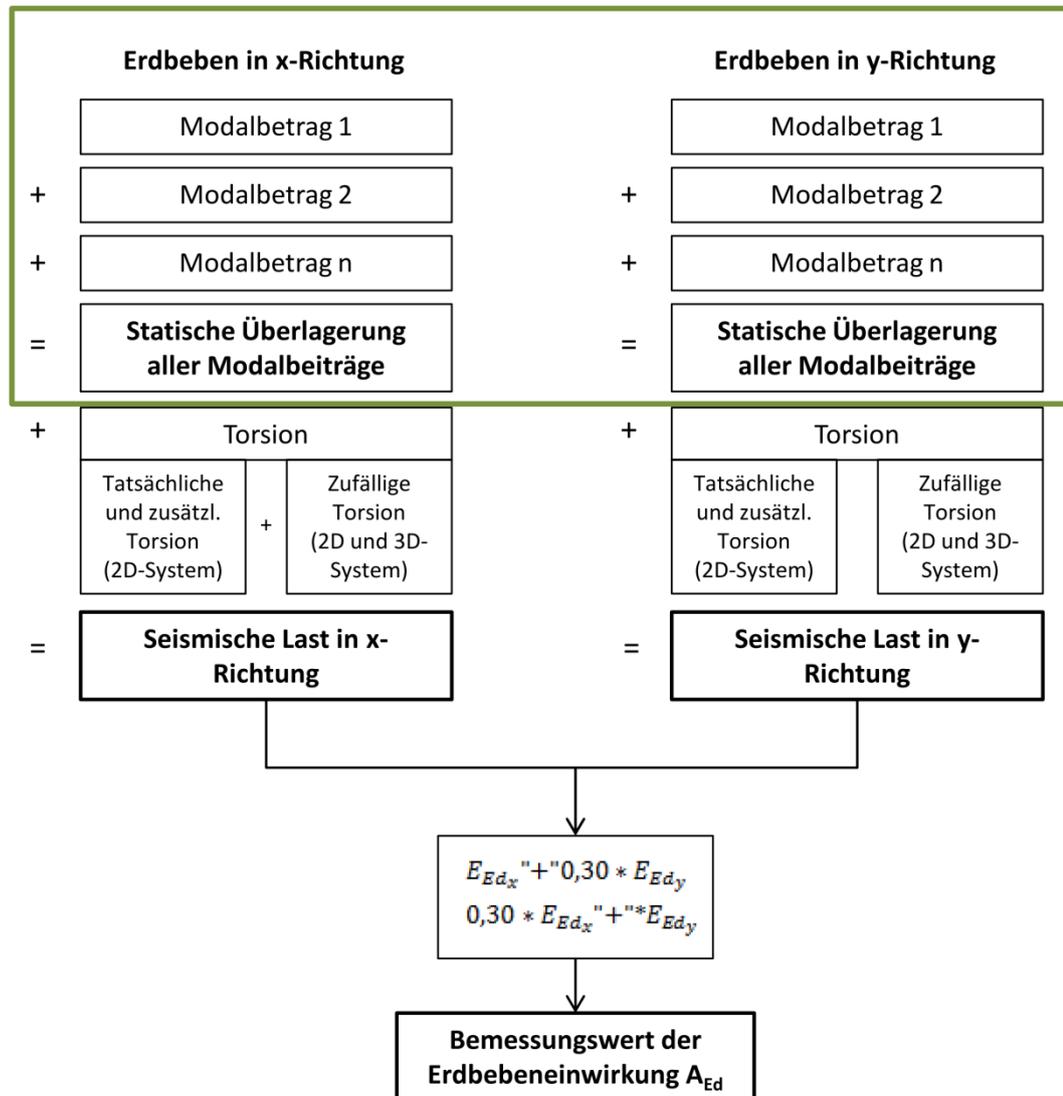


Abbildung 5-3 Untersuchungsbereich der Masterarbeit

Aufgrund des Ziels der Arbeit einen Vergleich der Berechnungsmethoden aufzustellen, wird nur der in Abbildung 5-3 dargestellte Bereich näher betrachtet.

6 Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren

Da ein ebenes Modell zur Berechnung der Erdbebeneinwirkung möglich ist, kann als statisches System ein Kragarm gewählt werden. Die Massen des Gebäudes werden dabei als konzentrierte Punktmassen in Höhe der Geschossdecke angeordnet (siehe Abbildung 6-1).



Abbildung 6-1 Konzentrierte Punktmassen in der Höhe der Geschossdecken

Da die Kellergeschosse sehr steif ausgebildet sind, wird das Hochhaus als in der Erdgeschossesebene eingespannt angesehen.

6.1 Bestimmung der Gebäudemasse

Die Massen aus den Gewichtskräften werden dazu benötigt, die Trägheitseffekte des Bauwerks während des Erdbebens abzubilden.

Der Eurocode 8-1 gibt für die Berechnung der Massen folgende Formel vor:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} * Q_{k,i}$$

mit

$G_{k,j}$ ständige Einwirkungen

$Q_{k,i}$ veränderliche Einwirkungen

$\psi_{E,i}$ Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkungen[1]

Da nicht überall im Bauwerk zur gleichen Zeit die Lasten $Q_{k,i}$ auftreten, wird mit Hilfe des Beiwerts $\psi_{E,i}$ die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Vorhandenseins der Lasten berücksichtigt. $\psi_{E,i}$ berücksichtigt, aber auch die Mitwirkung von Massen infolge nicht starrer Verbindungen bei der Bewegung des Bauwerks, ausgelöst durch Erdbeben.

$$\psi_{E,i} = \varphi * \psi_{2i} [1]$$

mit $\varphi = 1,0$ lt. ÖNORM B 1998-1:2011 8.1.2[2]

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Kategorie B: Bürogebäude	0,7	0,5	0,3

Tabelle 6-1 Kombinationsbeiwert ψ_{2i} im Hochbau [3]

$$\rightarrow \psi_{E,i} = 1,0 * 0,3 = 0,3$$

6.1.1 Punktmassen aus ständigen Einwirkungen

Punktmasse Regelgeschoss

$$M_{G,RG} = \frac{G_{\text{Decke}} + G_{\text{Wände,Stützen,Kern,RG}} + G_{\text{Fußbodenaufbau}}}{g}$$

$$= \frac{7082,30 \text{ KN} + 8598,88 \text{ KN} + 2189,07 \text{ KN}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 1820,72 \text{ t}$$

Unterste Punktmasse (mit Erdgeschoss)

$$\begin{aligned}
 M_{G,EG} &= \frac{G_{\text{Decke}} + G_{\text{Wände,Stützen,Kern,EG}} + G_{\text{Wände,Stützen,Kern,RG}/2} + G_{\text{Fußbodenaufbau}}}{g} \\
 &= \frac{7082,30\text{KN} + 10037,88\text{KN} + 8589,88\text{KN}/2 + 2189,07\text{KN}}{9,81 \text{ m/s}^2} \\
 &= 2406,14 \text{ t}
 \end{aligned}$$

Oberste Punktmasse (mit Dach)

$$\begin{aligned}
 M_{G,Dach} &= \frac{G_{\text{Decke}} + G_{\text{Wände,Stützen,Kern,RG}/2} + G_{\text{Dachaufbau}}}{g} \\
 &= \frac{7082,30\text{KN} + 8589,88\text{KN}/2 + 5150,76\text{KN}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 1684,81 \text{ t}
 \end{aligned}$$

6.1.2 Punktmassen aus veränderliche Einwirkung

$$M_{Q,Geschoß} = \frac{4893,22}{9,81} = 498,80 \text{ t}$$

$$M_{Q,Dach} = \frac{3863,07}{9,81} = 393,79 \text{ t}$$

6.1.3 Punktmassen gesamt

$$M_{ges} = \sum M_{G,k,j} + \sum \psi_{E,i} * M_{Q,k,i}$$

Punktmasse Regelgeschoss gesamt

$$M_{RG,ges} = 1820,72\text{t} + 0,3 * 498,80\text{t} = 1970,36 \text{ t}$$

Punktmasse unterstes Geschoss (mit Erdgeschoss) gesamt

$$M_{EG,ges} = 2406,14\text{t} + 0,3 * 498,80\text{t} = 2555,78 \text{ t}$$

Punktmasse oberste Geschoss (mit Dach) gesamt

$$M_{RG,ges} = 1684,81\text{t} + 0,3 * 393,79 \text{ t} = 1802,95 \text{ t}$$

6.1.4 Gesamte Gewichtskraft des Bauwerks

Die Gewichtskraft des Bauwerks wird berechnet aus der Summe von 35-mal der Punktmasse des Regelgeschosses, ein Mal der Punktmasse des untersten Geschosses und ein Mal der Punktmasse des obersten Geschosses.

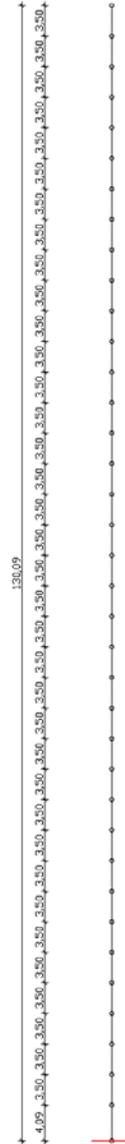
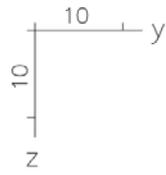
$$M_{ges} = 35 * 1970,36t + 2555,78t + 1802,95 = 73321,33 t$$

6.2 Bestimmung der Eigenfrequenzen

Mit Hilfe des Programms InfoCAD wird die erste Eigenfrequenz anhand eines Ersatzstabs und den daran aufgebrauchten Gewichtskräften bestimmt. Zur Modellierung des Ersatzstabs werden die horizontalen Trägheitsmomente aus dem Kapitel 3.2 verwendet.

Folgende Seiten enthalten Auszüge aus dem Programm InfoCAD.

6.2.1 System



6.2.2 Querschnitts- und Materialkennwerte und Vorgaben für die dynamische Berechnung

Querschnittswerte

1	Stab	Querschnittswerte Regelgeschoß
		Fläche [m ²] A = 7,5510e+01
		Trägheitsmomente [m ⁴] Ix = 1,0000e+00 Iy = 3,1824e+03
		Iz = 2,8768e+03 Iyz = 0,0000e+00

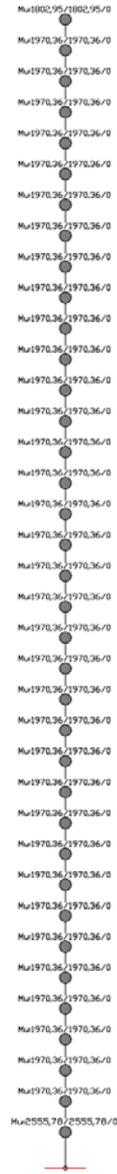
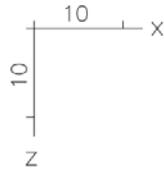
Materialkennwerte

	Nr.	Art	E-Modul [MN/m ²]	G-Modul [MN/m ²]	Quer- dehnz.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m ³]
1	1	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	0,000

Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Antwortspektrum EN 1998-1:2004
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	8 16 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X, Y X, Y
Bodenbeschleunigungen Komponenten getrennt aufbringen Bezugssystemwinkel alpha	ax = 1,17 ay = 1,17 az = 0 [m/s ²] Nein 0 [°]
Beiwerte nach EN 1998-1:2004 Baugrundklasse Antwortspektrum vom Typ Parameter für Antwortspektren Lehr'sches Dämpfungsmaß Bedeutungsbeiwert gamma I Verhaltensbeiwert q Kombinationsmethode Stat. Ersatzlasten speichern	B - Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies... 1 S = 1,2 TB = 0,15 TC = 0,5 TD = 2 0,05 1 3 SRSS Methode Nein

6.2.3 Punktmassen



6.2.4 Ergebnisse der dynamischen Berechnung

Eigenfrequenzen

Nr.	Eigenwert [1/s ²]	rel. Tol. [-]	Omega [rad/s]	Eigenfrequenz [Hz]	Periode [s]
18	4,2747e+04	4,5652e-24	206,754	32,906	0,030390
19	5,5162e+04	2,6108e-26	234,866	37,380	0,026752
20	6,6647e+04	6,1464e-22	258,160	41,087	0,024338
21	8,2232e+04	4,1558e-23	286,761	45,639	0,021911
22	9,9352e+04	4,8284e-18	315,202	50,166	0,019934
23	1,1816e+05	1,1752e-21	343,749	54,709	0,018278
24	1,4276e+05	7,8084e-16	377,842	60,135	0,016629
25	1,6467e+05	7,7824e-22	405,792	64,584	0,015484
26	1,9895e+05	2,8459e-11	446,039	70,989	0,014087
27	2,2358e+05	6,2874e-20	472,846	75,256	0,013288
28	2,7013e+05	2,5576e-11	519,742	82,720	0,012089
29	2,9687e+05	1,0890e-17	544,858	86,717	0,011532
30	3,5868e+05	7,1728e-09	598,898	95,317	0,010491
31	3,8660e+05	3,6352e-15	621,774	98,958	0,010105
32	4,6709e+05	8,0706e-08	683,443	108,773	0,009193
33	4,9495e+05	1,3666e-11	703,525	111,969	0,008931
34	5,9847e+05	8,1694e-05	773,608	123,123	0,008122
35	6,2415e+05	9,7882e-16	790,029	125,737	0,007953
36	7,5484e+05	4,0372e-06	868,815	138,276	0,007232

Effektive modale Massen (global)

Eigenform	Mx eff [t]	My eff [t]	Mz eff [t]
1	45403,568	0,000	0,000
2	0,000	45403,568	0,000
3	13953,374	0,000	0,000
4	0,000	13953,374	0,000
5	4808,058	0,000	0,000
6	0,000	4808,058	0,000
7	2469,461	0,000	0,000
8	0,000	2469,461	0,000
9	1505,674	0,000	0,000
10	0,000	1505,674	0,000
11	1019,467	0,000	0,000
12	0,000	1019,467	0,000
13	740,813	0,000	0,000
14	0,000	740,813	0,000
15	566,510	0,000	0,000
16	0,000	566,510	0,000
17	450,146	0,000	0,000
18	0,000	450,146	0,000
19	368,319	0,000	0,000
20	0,000	368,319	0,000
21	308,164	0,000	0,000
22	0,000	308,164	0,000
23	262,123	0,000	0,000
24	0,000	262,123	0,000
25	225,518	0,000	0,000
26	0,000	225,521	0,000
27	195,347	0,000	0,000
28	0,000	195,352	0,000
29	169,654	0,000	0,000
30	0,000	169,620	0,000
31	147,175	0,000	0,000
32	0,000	147,136	0,000
33	127,128	0,000	0,000
34	0,000	126,326	0,000
35	109,072	0,000	0,000
36	0,000	108,102	0,000
Summe:	72829,570	72827,733	0,000
Anteil der Gesamtmasse:	99 [%]	99 [%]	0 [%]

6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren

Punktmassen in den Elementknoten

Knoten	Mux [t]	Muy [t]	Muz [t]	Mphi.x [tm ²]	Mphi.y [tm ²]	Mphi.z [tm ²]
8	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
9	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
10	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
11	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
12	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
13	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
14	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
15	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
16	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
17	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
18	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
19	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
20	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
21	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
22	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
23	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
24	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
25	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
26	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
27	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
28	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
29	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
30	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
31	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
32	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
33	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
34	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
35	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
36	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
37	1,970e+03	1,970e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00
38	1,803e+03	1,803e+03	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00	0,000e+00

Summe der aufgebrauchten Massen (global)

	Mx [t]	My [t]	Mz [t]
Eigenmassen :	0,000	0,000	0,000
Punktmassen :	73321,320	73321,320	0,000
Massen aus LF :	0,000	0,000	0,000
Summe :	73321,320	73321,320	0,000

Eigenfrequenzen

Nr.	Eigenwert [1/s ²]	rel. Tol. [-]	Omega [rad/s]	Eigenfrequenz [Hz]	Periode [s]
1	7,1738e+00	7,7574e-23	2,678	0,426	2,345872
2	7,9360e+00	3,3141e-22	2,817	0,448	2,230376
3	2,8177e+02	7,5618e-16	16,786	2,672	0,374312
4	3,1171e+02	1,1011e-15	17,655	2,810	0,355883
5	2,2093e+03	8,2767e-11	47,003	7,481	0,133676
6	2,4440e+03	9,0015e-11	49,437	7,868	0,127094
7	8,4845e+03	9,7742e-08	92,111	14,660	0,068213
8	9,3859e+03	2,4012e-08	96,881	15,419	0,064855

Effektive modale Massen (global)

Eigenform	Mx eff [t]	My eff [t]	Mz eff [t]
1	0,000	45403,568	0,000
2	45403,568	0,000	0,000
3	0,000	13953,374	0,000

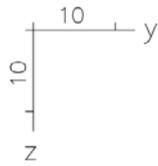
6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren

Effektive modale Massen (global)

Eigenform	Mx eff [t]	My eff [t]	Mz eff [t]
4	13953,374	0,000	0,000
5	0,000	4808,058	0,000
6	4808,058	0,000	0,000
7	0,000	2469,455	0,000
8	2469,461	0,000	0,000
Summe:	66634,460	66634,455	0,000
Anteil der Gesamtmasse:	91 [%]	91 [%]	0 [%]

6.2.5 Die ersten Eigenfrequenzen in y- und z-Richtung

y-Richtung:



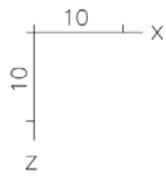
Eigenform 1: Eigenfrequenz = 0,43 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1797,4
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/7,24 [mm]

6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren

Dynamische Eigenform 1

	Knoten	ux [m]	uy [m]	uz [m]	phi.x [rad]	phi.y [rad]	phi.z [rad]
1	1	-1,531e-28	8,911e-14	0,000e+00	1,527e-12	1,168e-28	0,000e+00
2	2	-6,496e-22	1,231e-05	0,000e+00	5,977e-06	2,428e-22	0,000e+00
3	3	-1,385e-21	4,188e-05	0,000e+00	1,088e-05	1,366e-22	0,000e+00
4	4	-1,411e-21	8,828e-05	0,000e+00	1,560e-05	-1,369e-22	0,000e+00
5	5	-4,316e-22	1,509e-04	0,000e+00	2,013e-05	-4,058e-22	0,000e+00
6	6	1,230e-21	2,289e-04	0,000e+00	2,446e-05	-5,033e-22	0,000e+00
7	7	2,793e-21	3,219e-04	0,000e+00	2,860e-05	-3,446e-22	0,000e+00
8	8	3,391e-21	4,289e-04	0,000e+00	3,256e-05	2,968e-23	0,000e+00
9	9	2,510e-21	5,495e-04	0,000e+00	3,632e-05	4,682e-22	0,000e+00
10	10	2,665e-22	6,830e-04	0,000e+00	3,989e-05	7,757e-22	0,000e+00
11	11	-2,589e-21	8,286e-04	0,000e+00	4,328e-05	7,999e-22	0,000e+00
12	12	-4,954e-21	9,857e-04	0,000e+00	4,648e-05	4,993e-22	0,000e+00
13	13	-5,810e-21	1,154e-03	0,000e+00	4,950e-05	-3,622e-23	0,000e+00
14	14	-4,647e-21	1,332e-03	0,000e+00	5,233e-05	-6,180e-22	0,000e+00
15	15	-1,683e-21	1,520e-03	0,000e+00	5,498e-05	-1,030e-21	0,000e+00
16	16	2,178e-21	1,717e-03	0,000e+00	5,746e-05	-1,111e-21	0,000e+00
17	17	5,655e-21	1,922e-03	0,000e+00	5,976e-05	-8,142e-22	0,000e+00
18	18	7,537e-21	2,135e-03	0,000e+00	6,189e-05	-2,256e-22	0,000e+00
19	19	7,116e-21	2,355e-03	0,000e+00	6,384e-05	4,643e-22	0,000e+00
20	20	4,436e-21	2,581e-03	0,000e+00	6,564e-05	1,027e-21	0,000e+00
21	21	2,977e-22	2,814e-03	0,000e+00	6,727e-05	1,273e-21	0,000e+00
22	22	-4,009e-21	3,052e-03	0,000e+00	6,875e-05	1,120e-21	0,000e+00
23	23	-7,131e-21	3,295e-03	0,000e+00	7,008e-05	6,155e-22	0,000e+00
24	24	-8,101e-21	3,543e-03	0,000e+00	7,127e-05	-7,464e-23	0,000e+00
25	25	-6,652e-21	3,794e-03	0,000e+00	7,232e-05	-7,271e-22	0,000e+00
26	26	-3,297e-21	4,049e-03	0,000e+00	7,323e-05	-1,135e-21	0,000e+00
27	27	8,620e-22	4,306e-03	0,000e+00	7,402e-05	-1,176e-21	0,000e+00
28	28	4,508e-21	4,567e-03	0,000e+00	7,469e-05	-8,526e-22	0,000e+00
29	29	6,547e-21	4,829e-03	0,000e+00	7,525e-05	-2,870e-22	0,000e+00
30	30	6,462e-21	5,093e-03	0,000e+00	7,572e-05	3,257e-22	0,000e+00
31	31	4,447e-21	5,359e-03	0,000e+00	7,608e-05	7,844e-22	0,000e+00
32	32	1,314e-21	5,626e-03	0,000e+00	7,637e-05	9,493e-22	0,000e+00
33	33	-1,813e-21	5,894e-03	0,000e+00	7,658e-05	7,841e-22	0,000e+00
34	34	-3,875e-21	6,162e-03	0,000e+00	7,673e-05	3,619e-22	0,000e+00
35	35	-4,221e-21	6,431e-03	0,000e+00	7,682e-05	-1,677e-22	0,000e+00
36	36	-2,773e-21	6,700e-03	0,000e+00	7,688e-05	-6,365e-22	0,000e+00
37	37	2,304e-23	6,969e-03	0,000e+00	7,690e-05	-9,240e-22	0,000e+00
38	38	3,463e-21	7,238e-03	0,000e+00	7,691e-05	-1,012e-21	0,000e+00

z-Richtung



Eigenform 2: Eigenfrequenz = 0,45 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1797,4
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/7,24 [mm]

6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren

Dynamische Eigenform 2

	Knoten	ux [m]	uy [m]	uz [m]	phi.x [rad]	phi.y [rad]	phi.z [rad]
1	1	8,911e-14	-8,535e-29	0,000e+00	2,925e-30	-1,527e-12	0,000e+00
2	2	1,231e-05	1,946e-22	0,000e+00	1,369e-22	-5,977e-06	0,000e+00
3	3	4,188e-05	1,069e-21	0,000e+00	3,633e-22	-1,088e-05	0,000e+00
4	4	8,828e-05	2,598e-21	0,000e+00	4,700e-22	-1,560e-05	0,000e+00
5	5	1,509e-04	3,976e-21	0,000e+00	2,490e-22	-2,013e-05	0,000e+00
6	6	2,289e-04	3,912e-21	0,000e+00	-3,400e-22	-2,446e-05	0,000e+00
7	7	3,219e-04	1,423e-21	0,000e+00	-1,078e-21	-2,860e-05	0,000e+00
8	8	4,289e-04	-3,344e-21	0,000e+00	-1,567e-21	-3,256e-05	0,000e+00
9	9	5,495e-04	-8,827e-21	0,000e+00	-1,440e-21	-3,632e-05	0,000e+00
10	10	6,830e-04	-1,257e-20	0,000e+00	-5,824e-22	-3,989e-05	0,000e+00
11	11	8,286e-04	-1,233e-20	0,000e+00	7,645e-22	-4,328e-05	0,000e+00
12	12	9,857e-04	-7,254e-21	0,000e+00	2,081e-21	-4,648e-05	0,000e+00
13	13	1,154e-03	1,521e-21	0,000e+00	2,787e-21	-4,950e-05	0,000e+00
14	14	1,332e-03	1,111e-20	0,000e+00	2,512e-21	-5,233e-05	0,000e+00
15	15	1,520e-03	1,798e-20	0,000e+00	1,271e-21	-5,498e-05	0,000e+00
16	16	1,717e-03	1,938e-20	0,000e+00	-5,099e-22	-5,746e-05	0,000e+00
17	17	1,922e-03	1,456e-20	0,000e+00	-2,162e-21	-5,976e-05	0,000e+00
18	18	2,135e-03	5,136e-21	0,000e+00	-3,048e-21	-6,189e-05	0,000e+00
19	19	2,355e-03	-5,495e-21	0,000e+00	-2,833e-21	-6,384e-05	0,000e+00
20	20	2,581e-03	-1,354e-20	0,000e+00	-1,629e-21	-6,564e-05	0,000e+00
21	21	2,814e-03	-1,634e-20	0,000e+00	4,876e-23	-6,727e-05	0,000e+00
22	22	3,052e-03	-1,345e-20	0,000e+00	1,512e-21	-6,875e-05	0,000e+00
23	23	3,295e-03	-6,653e-21	0,000e+00	2,208e-21	-7,008e-05	0,000e+00
24	24	3,543e-03	9,086e-22	0,000e+00	1,960e-21	-7,127e-05	0,000e+00
25	25	3,794e-03	6,261e-21	0,000e+00	1,022e-21	-7,232e-05	0,000e+00
26	26	4,049e-03	7,867e-21	0,000e+00	-8,164e-23	-7,323e-05	0,000e+00
27	27	4,306e-03	6,089e-21	0,000e+00	-8,423e-22	-7,402e-05	0,000e+00
28	28	4,567e-03	2,653e-21	0,000e+00	-1,018e-21	-7,469e-05	0,000e+00
29	29	4,829e-03	-4,650e-22	0,000e+00	-7,029e-22	-7,525e-05	0,000e+00
30	30	5,093e-03	-2,052e-21	0,000e+00	-2,033e-22	-7,572e-05	0,000e+00
31	31	5,359e-03	-2,029e-21	0,000e+00	1,750e-22	-7,608e-05	0,000e+00
32	32	5,626e-03	-1,134e-21	0,000e+00	2,895e-22	-7,637e-05	0,000e+00
33	33	5,894e-03	-2,512e-22	0,000e+00	1,911e-22	-7,658e-05	0,000e+00
34	34	6,162e-03	1,378e-22	0,000e+00	3,647e-23	-7,673e-05	0,000e+00
35	35	6,431e-03	9,444e-23	0,000e+00	-4,075e-23	-7,682e-05	0,000e+00
36	36	6,700e-03	-2,439e-23	0,000e+00	-1,246e-23	-7,688e-05	0,000e+00
37	37	6,969e-03	5,284e-23	0,000e+00	5,492e-23	-7,690e-05	0,000e+00
38	38	7,238e-03	3,179e-22	0,000e+00	8,612e-23	-7,691e-05	0,000e+00

Aus dem InfoCAD Auszug erkennt man die erste Eigenfrequenz in x- und y-Richtung.

$$f_{0,y} = 0,43 \text{ Hz} \rightarrow T_{1,y} = \frac{1}{f_{0,y}} = \frac{1}{0,43} = 2,33 \text{ s}$$

$$f_{0,z} = 0,45 \text{ Hz} \rightarrow T_{1,z} = \frac{1}{f_{0,z}} = \frac{1}{0,45} = 2,22 \text{ s}$$

y-Richtung:

$$T_{1,y} = 2,33 \text{ s} > \begin{cases} 4 * T_c = 4 * 0,5 = 2,0 \text{ s} \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \rightarrow \text{vereinfachtes Antwortspektrumverfahren darf nicht angewendet werden}$$

z-Richtung:

$$T_{1,z} = 2,22 \text{ s} > \begin{cases} 4 * T_c = 4 * 0,5 = 2,0 \text{ s} \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \rightarrow \text{vereinfachtes Antwortspektrumverfahren darf nicht angewendet werden}$$

Da ein Vergleich aufgestellt wird, wird dennoch eine Berechnung nach vereinfachten Antwortspektrumverfahren durchgeführt.

6.3 Bestimmung der Gesamterdbebenkraft

$$F_b = S_d(T_1) * m * \lambda$$

$$T_{1,y} = 2,33 \geq 2 * 0,5 = 1,0 = 2 * T_c \rightarrow \lambda_y = 1,0$$

$$T_{1,z} = 2,22 \geq 2 * 0,5 = 1,0 = 2 * T_c \rightarrow \lambda_z = 1,0$$

$$T_D \leq T: S_e(T) \begin{cases} = a_g * S * \frac{2,5}{q} * \left[\frac{T_c * T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta * a_g \end{cases}$$

Es wird in Folge mit $q = 3,0$ für den Fall DCH gerechnet.

6.3.1 Bestimmung der Gesamterdbebenkraft in y-Richtung bzw. in z-Richtung

$$T_D = 2,0 \leq 2,33 = T: S_{d,y}(T) \begin{cases} = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} * \left[\frac{0,5 * 2,0}{2,33^2} \right] = 0,216 = 0,234 m/s^2 \\ \geq 0,2 * 1,17 = 0,234 \end{cases}$$

$$T_D = 2,0 \leq 2,22 = T: S_{d,z}(T) \begin{cases} = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} * \left[\frac{0,5 * 2,0}{2,22^2} \right] = 0,237 = 0,237 m/s^2 \\ \geq 0,2 * 1,17 = 0,234 \end{cases}$$

6.3.2 Bestimmung der Gesamterdbebenkraft in y-Richtung bzw. in z-Richtung

$$F_{b,y} = 0,234 m/s^2 * 73321,33t * 1,0 = 17157,19 KN$$

$$F_{b,z} = 0,237 m/s^2 * 73321,33t * 1,0 = 17377,16 KN$$

6.4 Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte

$$F_i = F_b * \frac{s_i * m_i}{\sum s_j * m_j}$$

Die Verschiebungen werden aus dem Auszug aus dem Programm InfoCAD aus dem Unterkapitel 6.2.5 genommen

Man kann erkennen, dass die Verschiebungen in y- und in z-Richtung gleich sind. Deshalb wird die Gesamterdbebenkraft auch in beiden Richtungen auf die Stockwerke gleich verteilt. Da die Gesamterdbebenkraft jedoch unterschiedlich groß ist, gibt es eine Diskrepanz zwischen y- und z-Richtung der Erdbebeneinwirkung im Bezug auf die Größe der verteilten Kräfte.

y-Richtung mit $F_b=17157,19$ KN				
Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung s_i	Massen der Massenpunkte m_i	$m_i \times s_i$	F_i
1	1,23E-05	2555,78 t	0,03	2,53 KN
2	4,19E-05	1970,36 t	0,08	6,64 KN
3	8,83E-05	1970,36 t	0,17	14,01 KN
4	1,51E-04	1970,36 t	0,30	23,94 KN
5	2,29E-04	1970,36 t	0,45	36,31 KN
6	3,22E-04	1970,36 t	0,63	51,07 KN
7	4,29E-04	1970,36 t	0,85	68,04 KN
8	5,50E-04	1970,36 t	1,08	87,18 KN
9	6,83E-04	1970,36 t	1,35	108,36 KN
10	8,29E-04	1970,36 t	1,63	131,46 KN
11	9,86E-04	1970,36 t	1,94	156,38 KN
12	1,15E-03	1970,36 t	2,27	183,08 KN
13	1,33E-03	1970,36 t	2,62	211,32 KN
14	1,52E-03	1970,36 t	2,99	241,15 KN
15	1,72E-03	1970,36 t	3,38	272,40 KN
16	1,92E-03	1970,36 t	3,79	304,92 KN
17	2,14E-03	1970,36 t	4,21	338,72 KN
18	2,36E-03	1970,36 t	4,64	373,62 KN
19	2,58E-03	1970,36 t	5,09	409,47 KN
20	2,81E-03	1970,36 t	5,54	446,44 KN
21	3,05E-03	1970,36 t	6,01	484,20 KN
22	3,30E-03	1970,36 t	6,49	522,75 KN
23	3,54E-03	1970,36 t	6,98	562,09 KN
24	3,79E-03	1970,36 t	7,48	601,91 KN
25	4,05E-03	1970,36 t	7,98	642,37 KN
26	4,31E-03	1970,36 t	8,48	683,14 KN
27	4,57E-03	1970,36 t	9,00	724,55 KN
28	4,83E-03	1970,36 t	9,51	766,12 KN
29	5,09E-03	1970,36 t	10,04	808,00 KN
30	5,36E-03	1970,36 t	10,56	850,20 KN
31	5,63E-03	1970,36 t	11,09	892,56 KN
32	5,89E-03	1970,36 t	11,61	935,08 KN
33	6,16E-03	1970,36 t	12,14	977,60 KN
34	6,43E-03	1970,36 t	12,67	1020,27 KN
35	6,70E-03	1970,36 t	13,20	1062,95 KN
36	6,97E-03	1970,36 t	13,73	1105,63 KN
37	7,24E-03	1802,95 t	13,05	1050,74 KN
		Summe	213,09	17157,19 KN

Tabelle 6-2 Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte in y-Richtung auf die Massenpunkte

z-Richtung mit $F_b=17377,16$ KN				
Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung s_i	Massen der Massenpunkte m_i	$m_i \times s_i$	F_i
1	1,23E-05	2555,78 t	0,03	2,57 KN
2	4,19E-05	1970,36 t	0,08	6,73 KN
3	8,83E-05	1970,36 t	0,17	14,19 KN
4	1,51E-04	1970,36 t	0,30	24,25 KN
5	2,29E-04	1970,36 t	0,45	36,78 KN
6	3,22E-04	1970,36 t	0,63	51,72 KN
7	4,29E-04	1970,36 t	0,85	68,92 KN
8	5,50E-04	1970,36 t	1,08	88,30 KN
9	6,83E-04	1970,36 t	1,35	109,75 KN
10	8,29E-04	1970,36 t	1,63	133,14 KN
11	9,86E-04	1970,36 t	1,94	158,39 KN
12	1,15E-03	1970,36 t	2,27	185,43 KN
13	1,33E-03	1970,36 t	2,62	214,03 KN
14	1,52E-03	1970,36 t	2,99	244,24 KN
15	1,72E-03	1970,36 t	3,38	275,89 KN
16	1,92E-03	1970,36 t	3,79	308,83 KN
17	2,14E-03	1970,36 t	4,21	343,06 KN
18	2,36E-03	1970,36 t	4,64	378,41 KN
19	2,58E-03	1970,36 t	5,09	414,72 KN
20	2,81E-03	1970,36 t	5,54	452,16 KN
21	3,05E-03	1970,36 t	6,01	490,40 KN
22	3,30E-03	1970,36 t	6,49	529,45 KN
23	3,54E-03	1970,36 t	6,98	569,30 KN
24	3,79E-03	1970,36 t	7,48	609,63 KN
25	4,05E-03	1970,36 t	7,98	650,61 KN
26	4,31E-03	1970,36 t	8,48	691,90 KN
27	4,57E-03	1970,36 t	9,00	733,84 KN
28	4,83E-03	1970,36 t	9,51	775,94 KN
29	5,09E-03	1970,36 t	10,04	818,36 KN
30	5,36E-03	1970,36 t	10,56	861,10 KN
31	5,63E-03	1970,36 t	11,09	904,00 KN
32	5,89E-03	1970,36 t	11,61	947,07 KN
33	6,16E-03	1970,36 t	12,14	990,13 KN
34	6,43E-03	1970,36 t	12,67	1033,35 KN
35	6,70E-03	1970,36 t	13,20	1076,58 KN
36	6,97E-03	1970,36 t	13,73	1119,80 KN
37	7,24E-03	1802,95 t	13,05	1064,21 KN
Summe			213,09	17377,16 KN

Tabelle 6-3 Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte in y-Richtung auf die Massenpunkte

6.5 Ermittlung der Schnittkräfte

Die Schnittkraftermittlung des Kerns wird mit dem Programm InfoCAD durchgeführt. Sie wird mit Hilfe der ermittelten horizontalen Erdbebenkräfte durchgeführt. Es werden dabei nur die Schnittkräfte aus der Erdbebeneinwirkung betrachtet.

6.5.1 Systemeingaben

Finite Elemente

Materialkennwerte

Nr.	Material- Art	E-Modul [MN/m ²]	G-Modul [MN/m ²]	Quer- dehn.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m ³]
1	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	0,000

Kriech- und Schwindbeiwerte

Material	phi.t	rho	epsilon.s
1	0,000	0,800	0,00E-05

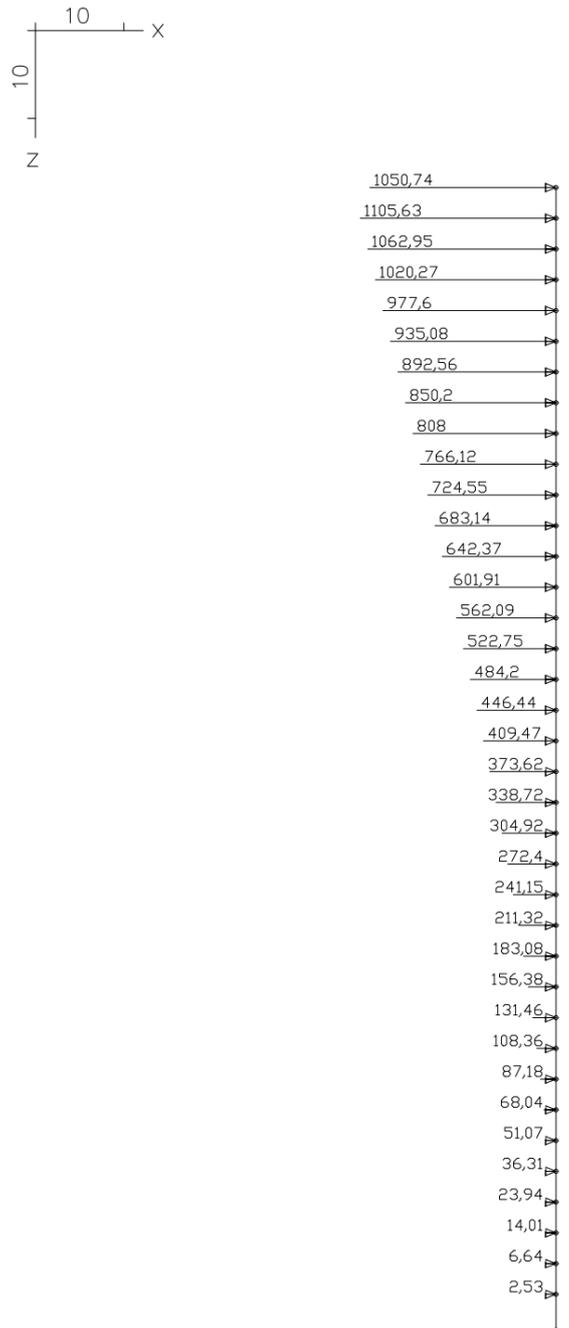
Querschnittswerte

Nr.	1	ST
		A = 7,551e+01 [m ²]
		Ix = 1,000e+00 [m ⁴], Iy = 3,182e+03 [m ⁴], Iz = 2,877e+03 [m ⁴]

Systemkenngrößen

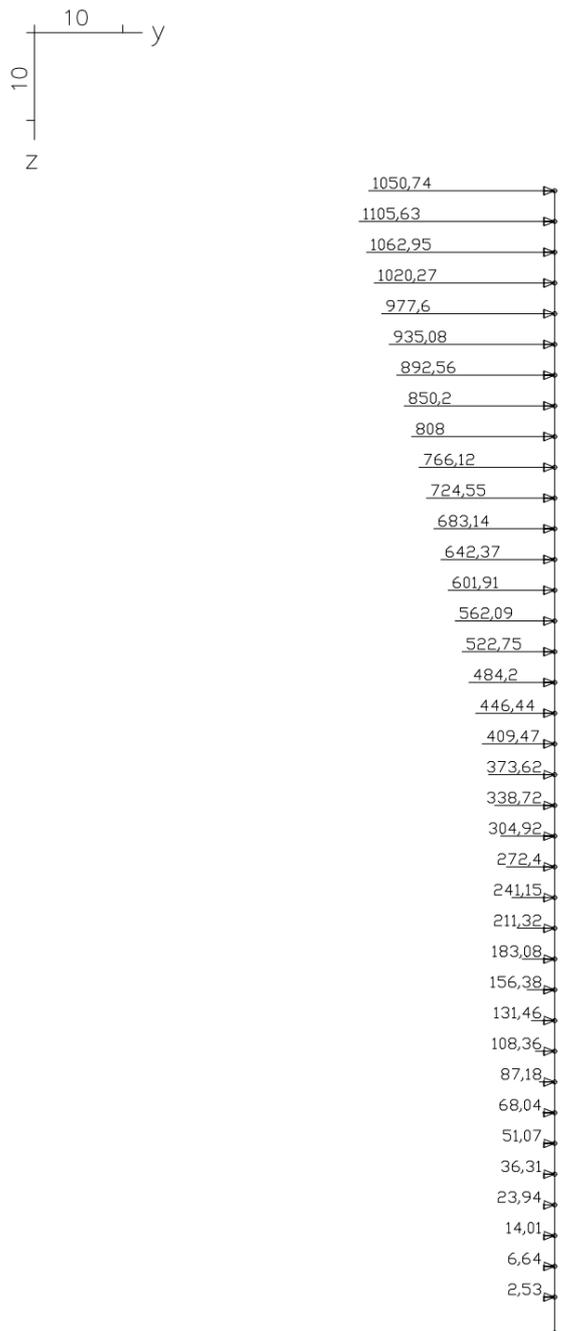
Knoten	38
Elemente	37
Festhaltungen	1
Unbekannte	228
Bandbreite	0
Steifigkeitsmatrix	16,6 KB
Massenmatrix	16,6 KB

6.5.2 Lastfälle



LF 1: Belastung, Erdbebenkräfte in z-Richtung

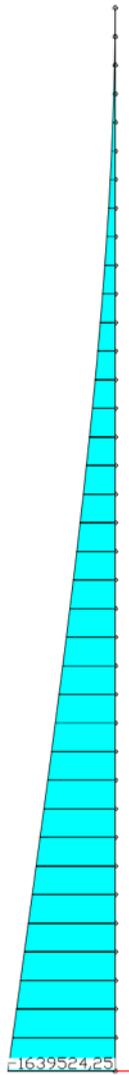
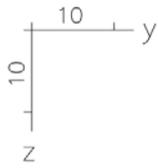
6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren



LF 2: Belastung, Erdbebenkräfte in y-Richtung

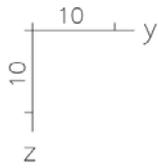
6.6 Schnittkräfte

6.6.1 Schnittkräfte aus Lastfall 1 Erdbebenkräfte in y-Richtung



LF 1: Erdbebenkräfte in y-Richtung
Schnittgrößen Mz: 815288,29 [kNm] = 
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1639524,25/0,00 [kNm]

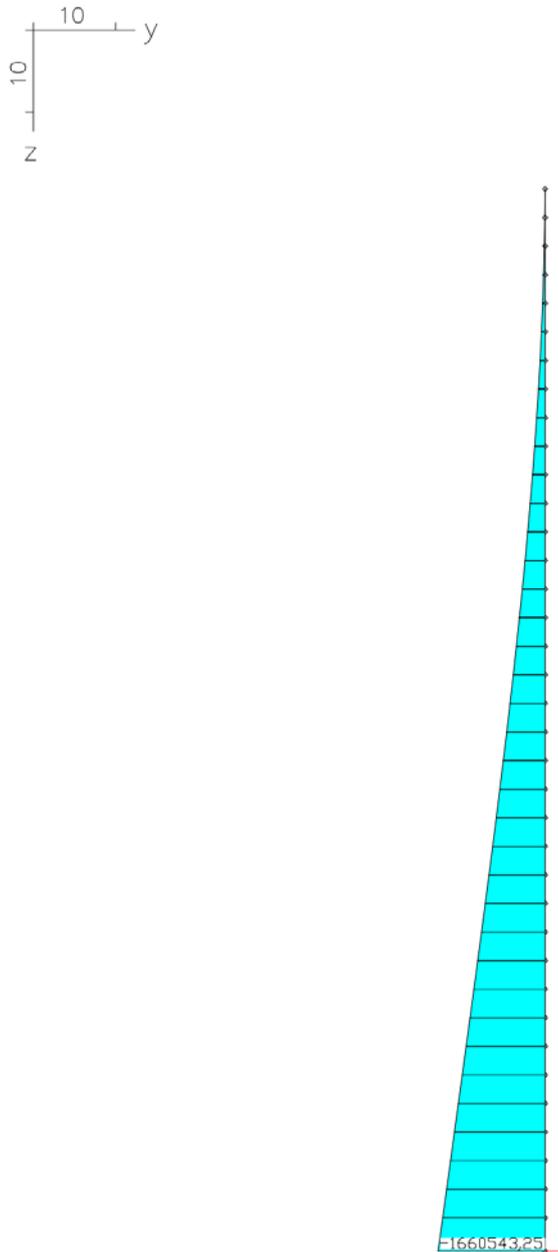
6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren



1050,74
1050,74
2156,37
2156,37
3219,52
3219,52
4239,59
4239,59
5217,19
5217,19
6152,27
6152,27
7044,83
7044,83
7895,03
7895,03
8703,03
8703,03
9469,15
9469,15
10193,20
10193,20
10876,84
10876,84
11519,21
11519,21
12121,12
12121,12
12683,21
12683,21
13205,52
13205,52
13690,16
13690,16
14136,60
14136,60
14546,07
14546,07
14918,69
14918,69
15258,41
15258,41
15563,33
15563,33
15835,73
15835,73
16075,88
16075,88
16283,20
16283,20
16471,28
16471,28
16627,66
16627,66
16759,12
16759,12
16857,48
16857,48
16924,69
16924,69
17022,70
17022,70
17073,77
17073,77
17110,08
17110,08
17134,02
17134,02
17143,03
17143,03
17154,67
17154,67
17157,20
17157,20

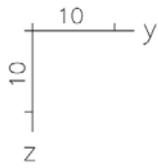
LF 1: Erdbebenkräfte in y-Richtung
 Schnittgrößen Qy: 8531,78 [kN] =
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 1050,74/17157,20 [kN]

6.6.2 Schnittkräfte aus Lastfall 2 Erdbebenkräfte in z-Richtung



LF 2: Erdbebenkräfte in z-Richtung
Schnittgrößen My: 825740,43 [kNm] = |-----|
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1660543,25/0,00 [kNm]

6. Berechnung anhand des vereinfachten Antwortspektrumverfahren



1064,21
1064,21
2184,01
2184,01
3260,59
3260,59
4293,94
4293,94
5284,07
5284,07
6231,14
6231,14
7135,14
7135,14
7996,24
7996,24
8814,60
8814,60
9590,54
9590,54
10324,38
10324,38
11016,28
11016,28
11666,89
11666,89
12276,52
12276,52
12845,85
12845,85
13375,27
13375,27
13865,67
13865,67
14317,83
14317,83
14732,23
14732,23
15110,93
15110,93
15454,02
15454,02
15762,85
15762,85
16038,74
16038,74
16282,98
16282,98
16497,01
16497,01
16682,44
16682,44
16840,83
16840,83
16973,97
16973,97
17083,72
17083,72
17172,02
17172,02
17240,94
17240,94
17292,66
17292,66
17323,44
17323,44
17333,69
17333,69
17352,88
17352,88
17374,51
17374,51
17377,18
17377,18

LF 2: Erdbebenkräfte in z-Richtung
 Schnittgrößen Qz: 8641,17 [kN] = _____
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 1064,21/17377,18 [kN]

6.7 Zusammenfassung

Obwohl das Verfahren bei diesem Bauwerk aufgrund der zu geringen Steifigkeit und daraus zu geringen Grundschiebung nicht zur Anwendung kommen darf, können einige interessante Aussagen getätigt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass nur die 1. Eigenform (Grundschiebung) berücksichtigt wird, liegen die Ergebnisse immer auf der sicheren Seite.

Das Ergebnis aus dieser Berechnung lässt sich relativ schnell ermitteln. Jedoch müssen vor Anwendung dieses Verfahrens, die die Regelmäßigkeiten im Grund- und Aufriss überprüft werden. Der damit verbundene Rechenaufwand kann diese Methode in gewissen Fällen mitunter unwirtschaftlich werden lassen.

7 Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab

In diesem Kapitel wird das Multimodale Antwortspektrumverfahren anhand eines Ersatzstabs durchgeführt. Dabei wird die Berechnung der modalen Massen und den daraus resultierenden Kräften händisch durchgeführt, um die einzelnen Schritte besser erkennbar zu machen.

Dieses Kapitel enthält Auszüge aus dem Programm InfoCAD.

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab

Querschnittswerte

1	Stab	Querschnittswerte Regelgeschoß Fläche [m²] A = 7,5510e+01 Trägheitsmomente [m4] Ix = 1,0000e+00 Iy = 3,1824e+03 Iz = 2,8768e+03 Iyz = 0,0000e+00
---	------	---

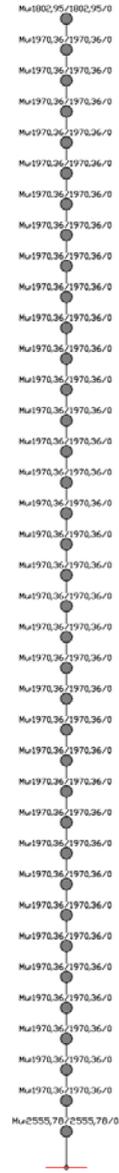
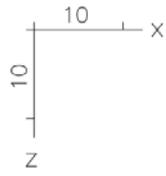
Materialkennwerte

	Nr.	Art	E-Modul [MN/m²]	G-Modul [MN/m²]	Quer- dehnz.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m³]
1	1	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	0,000

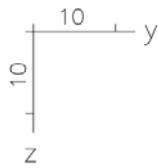
Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Antwortspektrum EN 1998-1:2004
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	8 16 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X, Y X, Y
Bodenbeschleunigungen Komponenten getrennt aufbringen Bezugssystemwinkel alpha	ax = 1,17 ay = 1,17 az = 0 [m/s²] Nein 0 [°]
Beiwerte nach EN 1998-1:2004 Baugrundklasse Antwortspektrum vom Typ Parameter für Antwortspektren Lehr'sches Dämpfungsmaß Bedeutungsbeiwert gamma I Verhaltensbeiwert q Kombinationsmethode Stat. Ersatzlasten speichern	B - Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies... 1 S = 1,2 TB = 0,15 TC = 0,5 TD = 2 0,05 1 3 SRSS Methode Nein

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



1. Eigenform

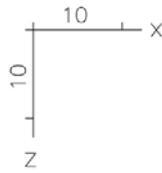


Eigenform 1: Eigenfrequenz = 0,43 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1797,4
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/7,24 [mm]

$$f_{1,y} = 0,43 \text{ Hz} \rightarrow T_1 = \frac{1}{f_{1,y}} = \frac{1}{0,43} = 2,33 \text{ s}$$

$$T_D = 2,0 \leq 2,33 = T_1 \cdot S_{1,y}(T) \left\{ \begin{array}{l} = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} * \left[\frac{0,5 * 2,0}{2,33^2} \right] = 0,216 = 0,234 \text{ m/s}^2 \\ \geq 0,2 * 1,17 = 0,234 \end{array} \right.$$

2. Eigenform

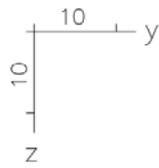


Eigenform 2: Eigenfrequenz = 0,45 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1797,4
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/7,24 [mm]

$$f_{2,z} = 0,45 \text{ Hz} \rightarrow T_2 = \frac{1}{f_{2,z}} = \frac{1}{0,45} = 2,22 \text{ s}$$

$$T_D = 2,0 \leq 2,22 = T_2: S_{2,z}(T) \left\{ \begin{array}{l} = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} * \left[\frac{0,5 * 2,0}{2,22^2} \right] = 0,237 = 0,237 \text{ m/s}^2 \\ \geq 0,2 * 1,17 = 0,234 \end{array} \right.$$

3. Eigenform

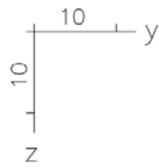


Eigenform 3: Eigenfrequenz = 2,67 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1868,6
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,96 [mm]

$$f_{3,y} = 2,67 \text{ Hz} \rightarrow T_3 = \frac{1}{f_{3,y}} = \frac{1}{2,67} = 0,38 \text{ s}$$

$$T_B = 0,15 \leq 0,38 \leq 0,5 = T_C: S_{3,y}(T) = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} = 1,170 \text{ m/s}^2$$

4. Eigenform

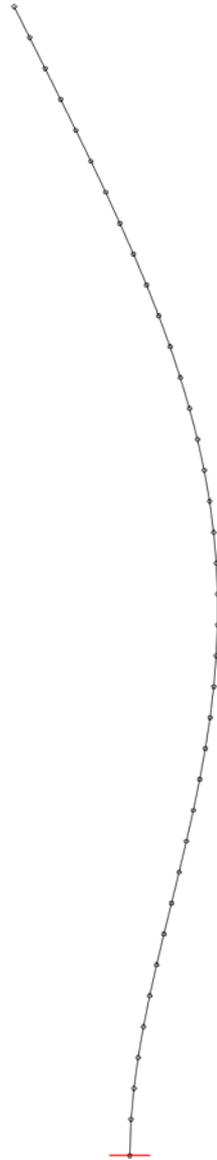
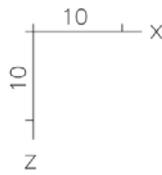


Eigenform 5: Eigenfrequenz = 7,48 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1937,6
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,71 [mm]

$$f_{4,z} = 2,81 \text{ Hz} \rightarrow T_4 = \frac{1}{f_{4,z}} = \frac{1}{2,81} = 0,36 \text{ s}$$

$$T_B = 0,15 \leq 0,36 \leq 0,5 = T_C: S_{3,z}(T) = 1,17 * 1,2 * \frac{2,5}{3,0} = 1,170 \text{ m/s}^2$$

5. Eigenform

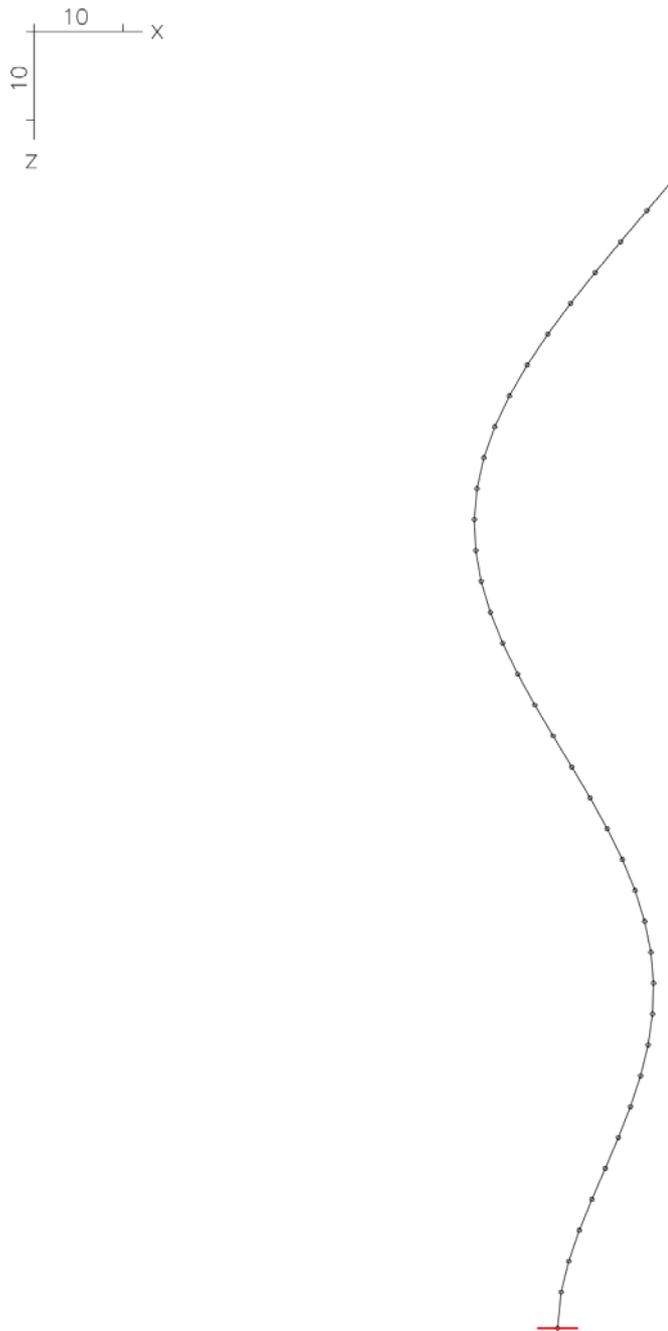


Eigenform 4: Eigenfrequenz = 2,81 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1868,6
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,96 [mm]

$$f_{5,y} = 7,48\text{Hz} \rightarrow T_5 = \frac{1}{f_{5,z}} = \frac{1}{7,48} = 0,13 \text{ s}$$

$$0 \leq 0,13 \leq 0,15 = T_B: S_{5,y}(T) = 1,17 * 1,2 * \left[\frac{2}{3} + \frac{0,13}{0,15} * \left(\frac{2,5}{3,0} - \frac{2}{3} \right) \right] = 1,139 \text{ m/s}^2$$

6. Eigenform

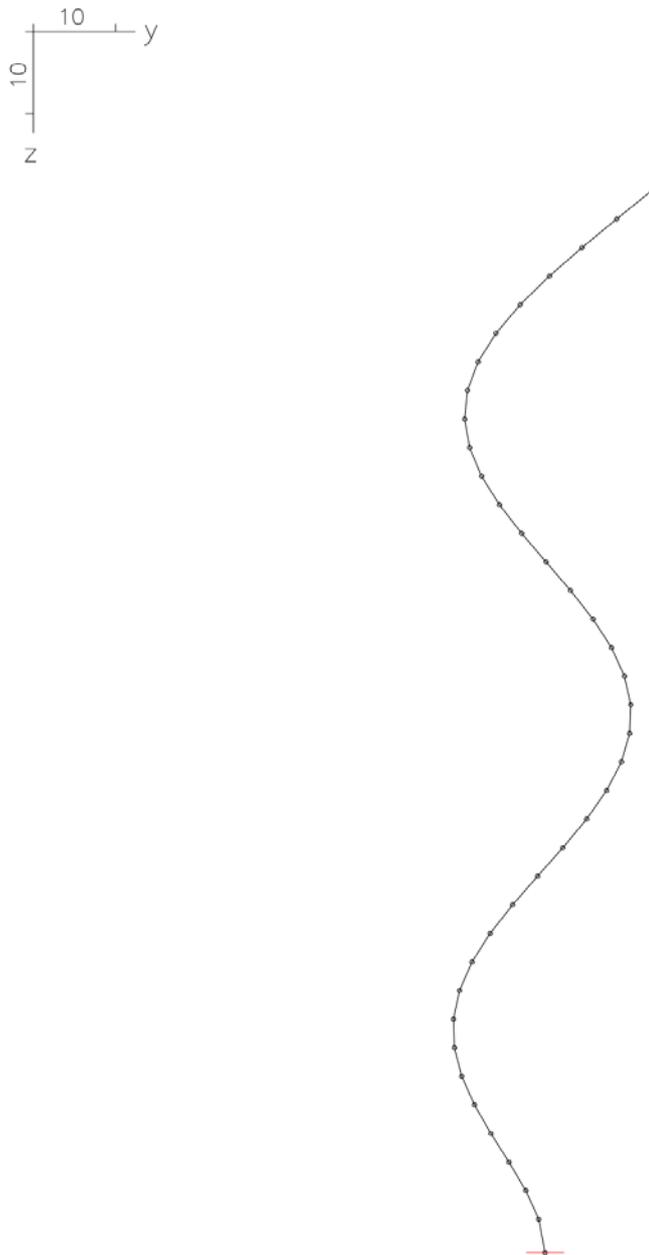


Eigenform 6: Eigenfrequenz = 7,87 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1937,6
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,71 [mm]

$$f_{6,y} = 7,87 \text{ Hz} \rightarrow T_6 = \frac{1}{f_{6,y}} = \frac{1}{7,87} = 0,13 \text{ s}$$

$$0 \leq 0,13 \leq 0,15 = T_B: S_{6,y}(T) = 1,17 * 1,2 * \left[\frac{2}{3} + \frac{0,13}{0,15} * \left(\frac{2,5}{3,0} - \frac{2}{3} \right) \right] = 1,139 \text{ m/s}^2$$

7. Eigenform

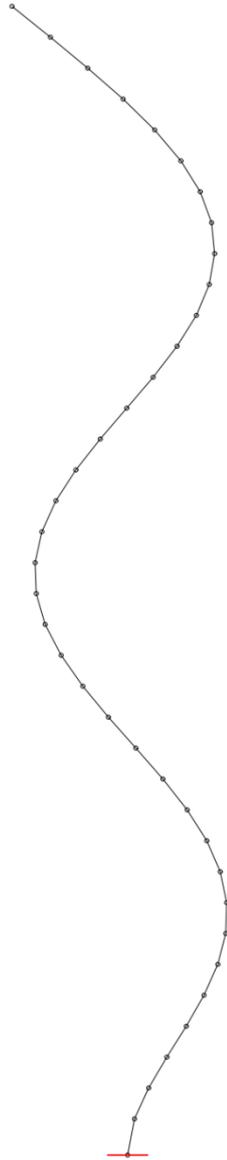
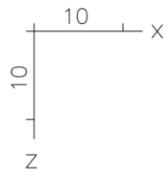


Eigenform 7: Eigenfrequenz = 14,66 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 2013,8
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,46 [mm]

$$f_{7,y} = 14,66 \text{ Hz} \rightarrow T_7 = \frac{1}{f_{7,y}} = \frac{1}{14,66} = 0,07 \text{ s}$$

$$0 \leq 0,07 \leq 0,15 = T_B: S_{7,y}(T) = 1,17 * 1,2 * \left[\frac{2}{3} + \frac{0,07}{0,15} * \left(\frac{2,5}{3,0} - \frac{2}{3} \right) \right] = 1,045 \text{ m/s}^2$$

8. Eigenform



Eigenform 8: Eigenfrequenz = 15,42 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 2013,8
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/6,46 [mm]

$$f_{8,z} = 15,42 \text{ Hz} \rightarrow T_8 = \frac{1}{f_{8,z}} = \frac{1}{15,42} = 0,06 \text{ s}$$

$$0 \leq 0,06 \leq 0,15 = T_B: S_{8,z}(T) = 1,17 * 1,2 * \left[\frac{2}{3} + \frac{0,06}{0,15} * \left(\frac{2,5}{3,0} - \frac{2}{3} \right) \right] = 1,030 \text{ m/s}^2$$

7.2 Bestimmung der modalen Massen der einzelnen Eigenformen

Bei der Bestimmung der modalen Massen wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Bestimmung der einzelnen Punktmassen (übernommen aus Kapitel 6.1)
2. Bestimmung der aus der Eigenform resultierenden Auslenkung der einzelnen Punktmassen (übernommen aus dem Programm InfoCAD)
3. Berechnung der generalisierten Massen M^* :

$$M^* = \sum_{j=1}^n m_j * \psi_{j,i}^2$$

mit

M^* generalisierte Masse

m_j Punktmasse

$\psi_{j,i}$ Verschiebung der Punktmasse m_j der Eigenform i

4. Berechnung des Beteiligungsfaktors („modaler Anteil“) α_i :

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n m_j * \psi_{j,i}$$

mit

α_i Beteiligungsfaktor („modaler Anteil“) der Eigenform i

5. Berechnung der Ersatzmasse (modale Masse) $m_{e,i}$ der zugehörigen Eigenform:

$$m_{e,i} = \frac{\alpha_i^2}{M^*}$$

mit

$m_{e,i}$ Ersatzmasse (modale Masse) der Eigenform i [4]

Auf den folgenden Seiten wird die Berechnung der modalen Massen für die einzelnen Eigenformen mit Hilfe von Excel-Tabellen durchgeführt.

1. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	8,91E-14	0,00	0,00	0,00
2	1,23E-05	2555,78	0,03	0,00
3	4,19E-05	1970,36	0,08	0,00
4	8,83E-05	1970,36	0,17	0,00
5	1,51E-04	1970,36	0,30	0,00
6	2,29E-04	1970,36	0,45	0,00
7	3,22E-04	1970,36	0,63	0,00
8	4,29E-04	1970,36	0,85	0,00
9	5,50E-04	1970,36	1,08	0,00
10	6,83E-04	1970,36	1,35	0,00
11	8,29E-04	1970,36	1,63	0,00
12	9,86E-04	1970,36	1,94	0,00
13	1,15E-03	1970,36	2,27	0,00
14	1,33E-03	1970,36	2,62	0,00
15	1,52E-03	1970,36	2,99	0,00
16	1,72E-03	1970,36	3,38	0,01
17	1,92E-03	1970,36	3,79	0,01
18	2,14E-03	1970,36	4,21	0,01
19	2,36E-03	1970,36	4,64	0,01
20	2,58E-03	1970,36	5,09	0,01
21	2,81E-03	1970,36	5,54	0,02
22	3,05E-03	1970,36	6,01	0,02
23	3,30E-03	1970,36	6,49	0,02
24	3,54E-03	1970,36	6,98	0,02
25	3,79E-03	1970,36	7,48	0,03
26	4,05E-03	1970,36	7,98	0,03
27	4,31E-03	1970,36	8,48	0,04
28	4,57E-03	1970,36	9,00	0,04
29	4,83E-03	1970,36	9,51	0,05
30	5,09E-03	1970,36	10,04	0,05
31	5,36E-03	1970,36	10,56	0,06
32	5,63E-03	1970,36	11,09	0,06
33	5,89E-03	1970,36	11,61	0,07
34	6,16E-03	1970,36	12,14	0,07
35	6,43E-03	1970,36	12,67	0,08
36	6,70E-03	1970,36	13,20	0,09
37	6,97E-03	1970,36	13,73	0,10
38	7,24E-03	1802,95	13,05	0,09
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		45405,51 t		
modale Masse der Eigenform		45403,41 t		

Tabelle 7-1 Berechnung der modalen Masse der ersten Eigenform

2. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	8,91E-14	0,00	0,00	0,00
2	1,23E-05	2555,78	0,03	0,00
3	4,19E-05	1970,36	0,08	0,00
4	8,83E-05	1970,36	0,17	0,00
5	1,51E-04	1970,36	0,30	0,00
6	2,29E-04	1970,36	0,45	0,00
7	3,22E-04	1970,36	0,63	0,00
8	4,29E-04	1970,36	0,85	0,00
9	5,50E-04	1970,36	1,08	0,00
10	6,83E-04	1970,36	1,35	0,00
11	8,29E-04	1970,36	1,63	0,00
12	9,86E-04	1970,36	1,94	0,00
13	1,15E-03	1970,36	2,27	0,00
14	1,33E-03	1970,36	2,62	0,00
15	1,52E-03	1970,36	2,99	0,00
16	1,72E-03	1970,36	3,38	0,01
17	1,92E-03	1970,36	3,79	0,01
18	2,14E-03	1970,36	4,21	0,01
19	2,36E-03	1970,36	4,64	0,01
20	2,58E-03	1970,36	5,09	0,01
21	2,81E-03	1970,36	5,54	0,02
22	3,05E-03	1970,36	6,01	0,02
23	3,30E-03	1970,36	6,49	0,02
24	3,54E-03	1970,36	6,98	0,02
25	3,79E-03	1970,36	7,48	0,03
26	4,05E-03	1970,36	7,98	0,03
27	4,31E-03	1970,36	8,48	0,04
28	4,57E-03	1970,36	9,00	0,04
29	4,83E-03	1970,36	9,51	0,05
30	5,09E-03	1970,36	10,04	0,05
31	5,36E-03	1970,36	10,56	0,06
32	5,63E-03	1970,36	11,09	0,06
33	5,89E-03	1970,36	11,61	0,07
34	6,16E-03	1970,36	12,14	0,07
35	6,43E-03	1970,36	12,67	0,08
36	6,70E-03	1970,36	13,20	0,09
37	6,97E-03	1970,36	13,73	0,10
38	7,24E-03	1802,95	13,05	0,09
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		45405,51 t		
modale Masse der Eigenform		45403,41 t		

Tabelle 7-2 Berechnung der modalen Masse der zweiten Eigenform

3. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	1,94E-12	0,00	0,00	0,00
2	7,44E-05	2555,78	0,19	0,00
3	2,45E-04	1970,36	0,48	0,00
4	4,98E-04	1970,36	0,98	0,00
5	8,20E-04	1970,36	1,62	0,00
6	1,20E-03	1970,36	2,36	0,00
7	1,61E-03	1970,36	3,18	0,01
8	2,06E-03	1970,36	4,05	0,01
9	2,51E-03	1970,36	4,95	0,01
10	2,97E-03	1970,36	5,84	0,02
11	3,41E-03	1970,36	6,71	0,02
12	3,82E-03	1970,36	7,53	0,03
13	4,21E-03	1970,36	8,29	0,03
14	4,54E-03	1970,36	8,95	0,04
15	4,83E-03	1970,36	9,51	0,05
16	5,05E-03	1970,36	9,95	0,05
17	5,20E-03	1970,36	10,25	0,05
18	5,28E-03	1970,36	10,41	0,05
19	5,29E-03	1970,36	10,41	0,06
20	5,21E-03	1970,36	10,26	0,05
21	5,05E-03	1970,36	9,94	0,05
22	4,80E-03	1970,36	9,46	0,05
23	4,48E-03	1970,36	8,82	0,04
24	4,07E-03	1970,36	8,03	0,03
25	3,59E-03	1970,36	7,08	0,03
26	3,04E-03	1970,36	5,99	0,02
27	2,42E-03	1970,36	4,77	0,01
28	1,74E-03	1970,36	3,43	0,01
29	1,01E-03	1970,36	1,98	0,00
30	2,23E-04	1970,36	0,44	0,00
31	-6,01E-04	1970,36	-1,18	0,00
32	-1,46E-03	1970,36	-2,87	0,00
33	-2,34E-03	1970,36	-4,62	0,01
34	-3,25E-03	1970,36	-6,40	0,02
35	-4,17E-03	1970,36	-8,21	0,03
36	-5,10E-03	1970,36	-10,04	0,05
37	-6,03E-03	1970,36	-11,88	0,07
38	-6,96E-03	1802,95	-12,55	0,09
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		13953,55 t		
modale Masse der Eigenform		13953,40 t		

Tabelle 7-3 Berechnung der modalen Masse der dritten Eigenform

4. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	1,94E-12	0,00	0,00	0,00
2	7,44E-05	2555,78	0,19	0,00
3	2,45E-04	1970,36	0,48	0,00
4	4,98E-04	1970,36	0,98	0,00
5	8,20E-04	1970,36	1,62	0,00
6	1,20E-03	1970,36	2,36	0,00
7	1,61E-03	1970,36	3,18	0,01
8	2,06E-03	1970,36	4,05	0,01
9	2,51E-03	1970,36	4,95	0,01
10	2,97E-03	1970,36	5,84	0,02
11	3,41E-03	1970,36	6,71	0,02
12	3,82E-03	1970,36	7,53	0,03
13	4,21E-03	1970,36	8,29	0,03
14	4,54E-03	1970,36	8,95	0,04
15	4,83E-03	1970,36	9,51	0,05
16	5,05E-03	1970,36	9,95	0,05
17	5,20E-03	1970,36	10,25	0,05
18	5,28E-03	1970,36	10,41	0,05
19	5,29E-03	1970,36	10,41	0,06
20	5,21E-03	1970,36	10,26	0,05
21	5,05E-03	1970,36	9,94	0,05
22	4,80E-03	1970,36	9,46	0,05
23	4,48E-03	1970,36	8,82	0,04
24	4,07E-03	1970,36	8,03	0,03
25	3,59E-03	1970,36	7,08	0,03
26	3,04E-03	1970,36	5,99	0,02
27	2,42E-03	1970,36	4,77	0,01
28	1,74E-03	1970,36	3,43	0,01
29	1,01E-03	1970,36	1,98	0,00
30	2,23E-04	1970,36	0,44	0,00
31	-6,01E-04	1970,36	-1,18	0,00
32	-1,46E-03	1970,36	-2,87	0,00
33	-2,34E-03	1970,36	-4,62	0,01
34	-3,25E-03	1970,36	-6,40	0,02
35	-4,17E-03	1970,36	-8,21	0,03
36	-5,10E-03	1970,36	-10,04	0,05
37	-6,03E-03	1970,36	-11,88	0,07
38	-6,96E-03	1802,95	-12,55	0,09
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		13953,55 t		
modale Masse der Eigenform		13953,40 t		

Tabelle 7-4 Berechnung der modalen Masse der vierten Eigenform

5. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	8,93E-12	0,00	0,00	0,00
2	2,01E-04	2555,78	0,51	0,00
3	6,41E-04	1970,36	1,26	0,00
4	1,26E-03	1970,36	2,48	0,00
5	1,98E-03	1970,36	3,91	0,01
6	2,76E-03	1970,36	5,44	0,01
7	3,52E-03	1970,36	6,94	0,02
8	4,22E-03	1970,36	8,32	0,04
9	4,81E-03	1970,36	9,48	0,05
10	5,25E-03	1970,36	10,34	0,05
11	5,51E-03	1970,36	10,85	0,06
12	5,56E-03	1970,36	10,96	0,06
13	5,41E-03	1970,36	10,66	0,06
14	5,05E-03	1970,36	9,95	0,05
15	4,49E-03	1970,36	8,85	0,04
16	3,76E-03	1970,36	7,40	0,03
17	2,87E-03	1970,36	5,66	0,02
18	1,88E-03	1970,36	3,71	0,01
19	8,19E-04	1970,36	1,61	0,00
20	-2,65E-04	1970,36	-0,52	0,00
21	-1,33E-03	1970,36	-2,61	0,00
22	-2,31E-03	1970,36	-4,56	0,01
23	-3,19E-03	1970,36	-6,28	0,02
24	-3,91E-03	1970,36	-7,70	0,03
25	-4,44E-03	1970,36	-8,75	0,04
26	-4,76E-03	1970,36	-9,37	0,04
27	-4,84E-03	1970,36	-9,54	0,05
28	-4,68E-03	1970,36	-9,23	0,04
29	-4,28E-03	1970,36	-8,44	0,04
30	-3,65E-03	1970,36	-7,20	0,03
31	-2,81E-03	1970,36	-5,53	0,02
32	-1,77E-03	1970,36	-3,49	0,01
33	-5,71E-04	1970,36	-1,12	0,00
34	7,56E-04	1970,36	1,49	0,00
35	2,18E-03	1970,36	4,29	0,01
36	3,66E-03	1970,36	7,22	0,03
37	5,18E-03	1970,36	10,21	0,05
38	6,71E-03	1802,95	12,11	0,08
$M^* = \sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		4808,10 t		
modale Masse der Eigenform		4808,07 t		

Tabelle 7-5 Berechnung der modalen Masse der fünften Eigenform

6. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	8,93E-12	0,00	0,00	0,00
2	2,01E-04	2555,78	0,51	0,00
3	6,41E-04	1970,36	1,26	0,00
4	1,26E-03	1970,36	2,48	0,00
5	1,98E-03	1970,36	3,91	0,01
6	2,76E-03	1970,36	5,44	0,01
7	3,52E-03	1970,36	6,94	0,02
8	4,22E-03	1970,36	8,32	0,04
9	4,81E-03	1970,36	9,48	0,05
10	5,25E-03	1970,36	10,34	0,05
11	5,51E-03	1970,36	10,85	0,06
12	5,56E-03	1970,36	10,96	0,06
13	5,41E-03	1970,36	10,66	0,06
14	5,05E-03	1970,36	9,95	0,05
15	4,49E-03	1970,36	8,85	0,04
16	3,76E-03	1970,36	7,40	0,03
17	2,87E-03	1970,36	5,66	0,02
18	1,88E-03	1970,36	3,71	0,01
19	8,19E-04	1970,36	1,61	0,00
20	-2,65E-04	1970,36	-0,52	0,00
21	-1,33E-03	1970,36	-2,61	0,00
22	-2,31E-03	1970,36	-4,56	0,01
23	-3,19E-03	1970,36	-6,28	0,02
24	-3,91E-03	1970,36	-7,70	0,03
25	-4,44E-03	1970,36	-8,75	0,04
26	-4,76E-03	1970,36	-9,37	0,04
27	-4,84E-03	1970,36	-9,54	0,05
28	-4,68E-03	1970,36	-9,23	0,04
29	-4,28E-03	1970,36	-8,44	0,04
30	-3,65E-03	1970,36	-7,20	0,03
31	-2,81E-03	1970,36	-5,53	0,02
32	-1,77E-03	1970,36	-3,49	0,01
33	-5,71E-04	1970,36	-1,12	0,00
34	7,56E-04	1970,36	1,49	0,00
35	2,18E-03	1970,36	4,29	0,01
36	3,66E-03	1970,36	7,22	0,03
37	5,18E-03	1970,36	10,21	0,05
38	6,71E-03	1802,95	12,11	0,08
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		4808,10 t		
modale Masse der Eigenform		4808,07 t		

Tabelle 7-6 Berechnung der modalen Masse der sechsten Eigenform

7. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	-2,46E-11	0,00	0,00	0,00
2	-3,81E-04	2555,78	-0,97	0,00
3	-1,17E-03	1970,36	-2,30	0,00
4	-2,19E-03	1970,36	-4,31	0,01
5	-3,27E-03	1970,36	-6,45	0,02
6	-4,26E-03	1970,36	-8,40	0,04
7	-5,03E-03	1970,36	-9,91	0,05
8	-5,48E-03	1970,36	-10,79	0,06
9	-5,53E-03	1970,36	-10,90	0,06
10	-5,17E-03	1970,36	-10,19	0,05
11	-4,42E-03	1970,36	-8,71	0,04
12	-3,32E-03	1970,36	-6,54	0,02
13	-1,96E-03	1970,36	-3,87	0,01
14	-4,59E-04	1970,36	-0,90	0,00
15	1,07E-03	1970,36	2,12	0,00
16	2,51E-03	1970,36	4,94	0,01
17	3,72E-03	1970,36	7,32	0,03
18	4,61E-03	1970,36	9,08	0,04
19	5,11E-03	1970,36	10,06	0,05
20	5,17E-03	1970,36	10,18	0,05
21	4,79E-03	1970,36	9,44	0,05
22	4,01E-03	1970,36	7,90	0,03
23	2,89E-03	1970,36	5,70	0,02
24	1,53E-03	1970,36	3,02	0,00
25	5,39E-05	1970,36	0,11	0,00
26	-1,42E-03	1970,36	-2,80	0,00
27	-2,76E-03	1970,36	-5,43	0,01
28	-3,84E-03	1970,36	-7,56	0,03
29	-4,56E-03	1970,36	-8,98	0,04
30	-4,86E-03	1970,36	-9,57	0,05
31	-4,69E-03	1970,36	-9,24	0,04
32	-4,05E-03	1970,36	-7,98	0,03
33	-2,97E-03	1970,36	-5,85	0,02
34	-1,51E-03	1970,36	-2,97	0,00
35	2,55E-04	1970,36	0,50	0,00
36	2,23E-03	1970,36	4,39	0,01
37	4,32E-03	1970,36	8,51	0,04
38	6,46E-03	1802,95	11,65	0,08
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		2469,36 t		
modale Masse der Eigenform		2469,34 t		

Tabelle 7-7 Berechnung der modalen Masse der siebenten Eigenform

8. Eigenform				
Knoten	Eigenform	Massen [t]	$m_i \cdot \psi_i$	$m_i \cdot \psi_i^2$
1	2,46E-11	0,00	0,00	0,00
2	3,81E-04	2555,78	0,97	0,00
3	1,17E-03	1970,36	2,30	0,00
4	2,19E-03	1970,36	4,31	0,01
5	3,27E-03	1970,36	6,45	0,02
6	4,26E-03	1970,36	8,40	0,04
7	5,03E-03	1970,36	9,91	0,05
8	5,48E-03	1970,36	10,79	0,06
9	5,53E-03	1970,36	10,90	0,06
10	5,17E-03	1970,36	10,19	0,05
11	4,42E-03	1970,36	8,71	0,04
12	3,32E-03	1970,36	6,54	0,02
13	1,96E-03	1970,36	3,87	0,01
14	4,59E-04	1970,36	0,90	0,00
15	-1,07E-03	1970,36	-2,12	0,00
16	-2,51E-03	1970,36	-4,94	0,01
17	-3,72E-03	1970,36	-7,32	0,03
18	-4,61E-03	1970,36	-9,08	0,04
19	-5,11E-03	1970,36	-10,06	0,05
20	-5,17E-03	1970,36	-10,18	0,05
21	-4,79E-03	1970,36	-9,44	0,05
22	-4,01E-03	1970,36	-7,90	0,03
23	-2,89E-03	1970,36	-5,70	0,02
24	-1,53E-03	1970,36	-3,02	0,00
25	-5,39E-05	1970,36	-0,11	0,00
26	1,42E-03	1970,36	2,80	0,00
27	2,76E-03	1970,36	5,43	0,01
28	3,84E-03	1970,36	7,56	0,03
29	4,56E-03	1970,36	8,98	0,04
30	4,86E-03	1970,36	9,57	0,05
31	4,69E-03	1970,36	9,24	0,04
32	4,05E-03	1970,36	7,98	0,03
33	2,97E-03	1970,36	5,85	0,02
34	1,51E-03	1970,36	2,97	0,00
35	-2,55E-04	1970,36	-0,50	0,00
36	-2,23E-03	1970,36	-4,39	0,01
37	-4,32E-03	1970,36	-8,51	0,04
38	-6,46E-03	1802,95	-11,65	0,08
M* = $\sum m_i \cdot \psi_i^2 =$		1,00		
$\alpha^2 = (\sum m_i \cdot \psi_i)^2 =$		2469,36 t		
modale Masse der Eigenform		2469,34 t		

Tabelle 7-8 Berechnung der modalen Masse der achten Eigenform

7.3 Bestimmung und Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte der einzelnen Eigenformen

Bei der Bestimmung der horizontalen Erdbebenkräfte wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Berechnung der gesamten Erdbebenkraft resultierend aus den einzelnen Eigenformen:

$$F_{b,i} = m_{e,i} * S_{d,i}$$

mit

$F_{b,i}$ Gesamte Erdbebenkraft der Eigenform i

$S_{d,i}$ Spektralwert des Bemessungsspektrums der Eigenform i

2. Aufteilung der gesamten Erdbebenkraft $F_{b,i}$ auf die einzelnen Punktmassen (siehe Kapitel 5.4.1)

$$F_i = F_b * \frac{s_i * m_i}{\sum s_j * m_j}$$

Auf den folgenden Seiten wird die Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte für die einzelnen Eigenformen mit Hilfe von Excel-Tabellen durchgeführt.[4]

1. Eigenform

Gesamtmasse 73321,33 t
modale Masse 45403,41 t
Sd 0,234 m/s²
Fb 10624,40 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	1,23E-05 m	1582,64 t	0,02	1,57 KN
2	4,19E-05 m	1220,12 t	0,05	4,11 KN
3	8,83E-05 m	1220,12 t	0,11	8,67 KN
4	1,51E-04 m	1220,12 t	0,18	14,82 KN
5	2,29E-04 m	1220,12 t	0,28	22,49 KN
6	3,22E-04 m	1220,12 t	0,39	31,62 KN
7	4,29E-04 m	1220,12 t	0,52	42,14 KN
8	5,50E-04 m	1220,12 t	0,67	53,98 KN
9	6,83E-04 m	1220,12 t	0,83	67,10 KN
10	8,29E-04 m	1220,12 t	1,01	81,40 KN
11	9,86E-04 m	1220,12 t	1,20	96,84 KN
12	1,15E-03 m	1220,12 t	1,41	113,37 KN
13	1,33E-03 m	1220,12 t	1,63	130,86 KN
14	1,52E-03 m	1220,12 t	1,85	149,33 KN
15	1,72E-03 m	1220,12 t	2,09	168,68 KN
16	1,92E-03 m	1220,12 t	2,35	188,82 KN
17	2,14E-03 m	1220,12 t	2,60	209,75 KN
18	2,36E-03 m	1220,12 t	2,87	231,36 KN
19	2,58E-03 m	1220,12 t	3,15	253,56 KN
20	2,81E-03 m	1220,12 t	3,43	276,45 KN
21	3,05E-03 m	1220,12 t	3,72	299,83 KN
22	3,30E-03 m	1220,12 t	4,02	323,71 KN
23	3,54E-03 m	1220,12 t	4,32	348,07 KN
24	3,79E-03 m	1220,12 t	4,63	372,73 KN
25	4,05E-03 m	1220,12 t	4,94	397,78 KN
26	4,31E-03 m	1220,12 t	5,25	423,03 KN
27	4,57E-03 m	1220,12 t	5,57	448,67 KN
28	4,83E-03 m	1220,12 t	5,89	474,41 KN
29	5,09E-03 m	1220,12 t	6,21	500,34 KN
30	5,36E-03 m	1220,12 t	6,54	526,48 KN
31	5,63E-03 m	1220,12 t	6,86	552,71 KN
32	5,89E-03 m	1220,12 t	7,19	579,04 KN
33	6,16E-03 m	1220,12 t	7,52	605,37 KN
34	6,43E-03 m	1220,12 t	7,85	631,79 KN
35	6,70E-03 m	1220,12 t	8,17	658,22 KN
36	6,97E-03 m	1220,12 t	8,50	684,65 KN
37	7,24E-03 m	1116,46 t	8,08	650,66 KN
Summe		45403,41 t	131,95	10624,40 KN

Tabelle 7-9 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der ersten Eigenform

2. Eigenform

Gesamtmasse 73321,33 t
modale Masse 45403,41 t
Sd 0,237 m/s²
Fb 10760,61 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	1,23E-05 m	1582,64 t	0,02	1,59 KN
2	4,19E-05 m	1220,12 t	0,05	4,17 KN
3	8,83E-05 m	1220,12 t	0,11	8,78 KN
4	1,51E-04 m	1220,12 t	0,18	15,01 KN
5	2,29E-04 m	1220,12 t	0,28	22,78 KN
6	3,22E-04 m	1220,12 t	0,39	32,03 KN
7	4,29E-04 m	1220,12 t	0,52	42,68 KN
8	5,50E-04 m	1220,12 t	0,67	54,68 KN
9	6,83E-04 m	1220,12 t	0,83	67,96 KN
10	8,29E-04 m	1220,12 t	1,01	82,45 KN
11	9,86E-04 m	1220,12 t	1,20	98,08 KN
12	1,15E-03 m	1220,12 t	1,41	114,82 KN
13	1,33E-03 m	1220,12 t	1,63	132,54 KN
14	1,52E-03 m	1220,12 t	1,85	151,24 KN
15	1,72E-03 m	1220,12 t	2,09	170,84 KN
16	1,92E-03 m	1220,12 t	2,35	191,24 KN
17	2,14E-03 m	1220,12 t	2,60	212,43 KN
18	2,36E-03 m	1220,12 t	2,87	234,33 KN
19	2,58E-03 m	1220,12 t	3,15	256,81 KN
20	2,81E-03 m	1220,12 t	3,43	280,00 KN
21	3,05E-03 m	1220,12 t	3,72	303,68 KN
22	3,30E-03 m	1220,12 t	4,02	327,86 KN
23	3,54E-03 m	1220,12 t	4,32	352,53 KN
24	3,79E-03 m	1220,12 t	4,63	377,51 KN
25	4,05E-03 m	1220,12 t	4,94	402,88 KN
26	4,31E-03 m	1220,12 t	5,25	428,45 KN
27	4,57E-03 m	1220,12 t	5,57	454,42 KN
28	4,83E-03 m	1220,12 t	5,89	480,49 KN
29	5,09E-03 m	1220,12 t	6,21	506,76 KN
30	5,36E-03 m	1220,12 t	6,54	533,23 KN
31	5,63E-03 m	1220,12 t	6,86	559,79 KN
32	5,89E-03 m	1220,12 t	7,19	586,46 KN
33	6,16E-03 m	1220,12 t	7,52	613,13 KN
34	6,43E-03 m	1220,12 t	7,85	639,89 KN
35	6,70E-03 m	1220,12 t	8,17	666,66 KN
36	6,97E-03 m	1220,12 t	8,50	693,42 KN
37	7,24E-03 m	1116,46 t	8,08	659,00 KN
Summe		45403,41 t	131,95	10760,61 KN

Tabelle 7-10 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der zweiten Eigenform

3. Eigenform

Gesamtmasse	73321,33 t
modale Masse	13953,40 t
Sd	1,170 m/s²
Fb	16325,48 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	7,44E-05 m	486,38 t	0,04	26,28 KN
2	2,45E-04 m	374,97 t	0,09	66,66 KN
3	4,98E-04 m	374,97 t	0,19	135,69 KN
4	8,20E-04 m	374,97 t	0,31	223,38 KN
5	1,20E-03 m	374,97 t	0,45	325,96 KN
6	1,61E-03 m	374,97 t	0,60	439,24 KN
7	2,06E-03 m	374,97 t	0,77	559,60 KN
8	2,51E-03 m	374,97 t	0,94	683,51 KN
9	2,97E-03 m	374,97 t	1,11	807,41 KN
10	3,41E-03 m	374,97 t	1,28	927,77 KN
11	3,82E-03 m	374,97 t	1,43	1041,33 KN
12	4,21E-03 m	374,97 t	1,58	1145,62 KN
13	4,54E-03 m	374,97 t	1,70	1237,39 KN
14	4,83E-03 m	374,97 t	1,81	1314,73 KN
15	5,05E-03 m	374,97 t	1,89	1375,18 KN
16	5,20E-03 m	374,97 t	1,95	1416,85 KN
17	5,28E-03 m	374,97 t	1,98	1438,63 KN
18	5,29E-03 m	374,97 t	1,98	1439,18 KN
19	5,21E-03 m	374,97 t	1,95	1417,66 KN
20	5,05E-03 m	374,97 t	1,89	1373,82 KN
21	4,80E-03 m	374,97 t	1,80	1307,65 KN
22	4,48E-03 m	374,97 t	1,68	1219,15 KN
23	4,07E-03 m	374,97 t	1,53	1109,13 KN
24	3,59E-03 m	374,97 t	1,35	978,42 KN
25	3,04E-03 m	374,97 t	1,14	828,11 KN
26	2,42E-03 m	374,97 t	0,91	659,54 KN
27	1,74E-03 m	374,97 t	0,65	474,10 KN
28	1,01E-03 m	374,97 t	0,38	273,95 KN
29	2,23E-04 m	374,97 t	0,08	60,78 KN
30	-6,01E-04 m	374,97 t	-0,23	-163,55 KN
31	-1,46E-03 m	374,97 t	-0,55	-397,03 KN
32	-2,34E-03 m	374,97 t	-0,88	-638,03 KN
33	-3,25E-03 m	374,97 t	-1,22	-884,47 KN
34	-4,17E-03 m	374,97 t	-1,56	-1134,73 KN
35	-5,10E-03 m	374,97 t	-1,91	-1387,44 KN
36	-6,03E-03 m	374,97 t	-2,26	-1641,23 KN
37	-6,96E-03 m	343,11 t	-2,39	-1734,77 KN
Summe		13953,40 t	22,48	16325,48 KN

Tabelle 7-11 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der dritten Eigenform

4. Eigenform

Gesamtmasse 73321,33 t
 modale Masse **13953,40 t**
 Sd **1,170 m/s²**
 Fb **16325,48 KN**

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	7,44E-05 m	486,38 t	0,04	26,28 KN
2	2,45E-04 m	374,97 t	0,09	66,66 KN
3	4,98E-04 m	374,97 t	0,19	135,69 KN
4	8,20E-04 m	374,97 t	0,31	223,38 KN
5	1,20E-03 m	374,97 t	0,45	325,96 KN
6	1,61E-03 m	374,97 t	0,60	439,24 KN
7	2,06E-03 m	374,97 t	0,77	559,60 KN
8	2,51E-03 m	374,97 t	0,94	683,51 KN
9	2,97E-03 m	374,97 t	1,11	807,41 KN
10	3,41E-03 m	374,97 t	1,28	927,77 KN
11	3,82E-03 m	374,97 t	1,43	1041,33 KN
12	4,21E-03 m	374,97 t	1,58	1145,62 KN
13	4,54E-03 m	374,97 t	1,70	1237,39 KN
14	4,83E-03 m	374,97 t	1,81	1314,73 KN
15	5,05E-03 m	374,97 t	1,89	1375,18 KN
16	5,20E-03 m	374,97 t	1,95	1416,85 KN
17	5,28E-03 m	374,97 t	1,98	1438,63 KN
18	5,29E-03 m	374,97 t	1,98	1439,18 KN
19	5,21E-03 m	374,97 t	1,95	1417,66 KN
20	5,05E-03 m	374,97 t	1,89	1373,82 KN
21	4,80E-03 m	374,97 t	1,80	1307,65 KN
22	4,48E-03 m	374,97 t	1,68	1219,15 KN
23	4,07E-03 m	374,97 t	1,53	1109,13 KN
24	3,59E-03 m	374,97 t	1,35	978,42 KN
25	3,04E-03 m	374,97 t	1,14	828,11 KN
26	2,42E-03 m	374,97 t	0,91	659,54 KN
27	1,74E-03 m	374,97 t	0,65	474,10 KN
28	1,01E-03 m	374,97 t	0,38	273,95 KN
29	2,23E-04 m	374,97 t	0,08	60,78 KN
30	-6,01E-04 m	374,97 t	-0,23	-163,55 KN
31	-1,46E-03 m	374,97 t	-0,55	-397,03 KN
32	-2,34E-03 m	374,97 t	-0,88	-638,03 KN
33	-3,25E-03 m	374,97 t	-1,22	-884,47 KN
34	-4,17E-03 m	374,97 t	-1,56	-1134,73 KN
35	-5,10E-03 m	374,97 t	-1,91	-1387,44 KN
36	-6,03E-03 m	374,97 t	-2,26	-1641,23 KN
37	-6,96E-03 m	343,11 t	-2,39	-1734,77 KN
Summe		13953,40 t	22,48	16325,48 KN

Tabelle 7-12 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der vierten Eigenform

5. Eigenform

Gesamtmasse	73321,33 t
modale Masse	4808,07 t
Sd	1,139 m/s²
Fb	5476,39 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung s_i	Massen der Massenpunkte m_i	$m_i \times s_i$	F_i
1	2,01E-04 m	167,60 t	0,03	40,65 KN
2	6,41E-04 m	129,21 t	0,08	99,78 KN
3	1,26E-03 m	129,21 t	0,16	195,61 KN
4	1,98E-03 m	129,21 t	0,26	308,74 KN
5	2,76E-03 m	129,21 t	0,36	429,34 KN
6	3,52E-03 m	129,21 t	0,46	548,39 KN
7	4,22E-03 m	129,21 t	0,55	657,32 KN
8	4,81E-03 m	129,21 t	0,62	748,82 KN
9	5,25E-03 m	129,21 t	0,68	816,98 KN
10	5,51E-03 m	129,21 t	0,71	856,97 KN
11	5,56E-03 m	129,21 t	0,72	865,84 KN
12	5,41E-03 m	129,21 t	0,70	842,19 KN
13	5,05E-03 m	129,21 t	0,65	785,86 KN
14	4,49E-03 m	129,21 t	0,58	698,87 KN
15	3,76E-03 m	129,21 t	0,49	584,49 KN
16	2,87E-03 m	129,21 t	0,37	447,24 KN
17	1,88E-03 m	129,21 t	0,24	292,71 KN
18	8,19E-04 m	129,21 t	0,11	127,51 KN
19	-2,65E-04 m	129,21 t	-0,03	-41,21 KN
20	-1,33E-03 m	129,21 t	-0,17	-206,19 KN
21	-2,31E-03 m	129,21 t	-0,30	-360,09 KN
22	-3,19E-03 m	129,21 t	-0,41	-496,10 KN
23	-3,91E-03 m	129,21 t	-0,50	-608,15 KN
24	-4,44E-03 m	129,21 t	-0,57	-690,78 KN
25	-4,76E-03 m	129,21 t	-0,61	-740,11 KN
26	-4,84E-03 m	129,21 t	-0,63	-753,18 KN
27	-4,68E-03 m	129,21 t	-0,60	-728,59 KN
28	-4,28E-03 m	129,21 t	-0,55	-666,50 KN
29	-3,65E-03 m	129,21 t	-0,47	-568,31 KN
30	-2,81E-03 m	129,21 t	-0,36	-436,66 KN
31	-1,77E-03 m	129,21 t	-0,23	-275,28 KN
32	-5,71E-04 m	129,21 t	-0,07	-88,84 KN
33	7,56E-04 m	129,21 t	0,10	117,66 KN
34	2,18E-03 m	129,21 t	0,28	338,93 KN
35	3,66E-03 m	129,21 t	0,47	570,02 KN
36	5,18E-03 m	129,21 t	0,67	806,40 KN
37	6,71E-03 m	118,23 t	0,79	956,03 KN
Summe		4808,07 t	4,55	5476,39 KN

Tabelle 7-13 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der fünften Eigenform

6. Eigenform

Gesamtmasse 73321,33 t
modale Masse 4808,07 t
Sd 1,139 m/s²
Fb 5476,39 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	2,01E-04 m	167,60 t	0,03	40,65 KN
2	6,41E-04 m	129,21 t	0,08	99,78 KN
3	1,26E-03 m	129,21 t	0,16	195,61 KN
4	1,98E-03 m	129,21 t	0,26	308,74 KN
5	2,76E-03 m	129,21 t	0,36	429,34 KN
6	3,52E-03 m	129,21 t	0,46	548,39 KN
7	4,22E-03 m	129,21 t	0,55	657,32 KN
8	4,81E-03 m	129,21 t	0,62	748,82 KN
9	5,25E-03 m	129,21 t	0,68	816,98 KN
10	5,51E-03 m	129,21 t	0,71	856,97 KN
11	5,56E-03 m	129,21 t	0,72	865,84 KN
12	5,41E-03 m	129,21 t	0,70	842,19 KN
13	5,05E-03 m	129,21 t	0,65	785,86 KN
14	4,49E-03 m	129,21 t	0,58	698,87 KN
15	3,76E-03 m	129,21 t	0,49	584,49 KN
16	2,87E-03 m	129,21 t	0,37	447,24 KN
17	1,88E-03 m	129,21 t	0,24	292,71 KN
18	8,19E-04 m	129,21 t	0,11	127,51 KN
19	-2,65E-04 m	129,21 t	-0,03	-41,21 KN
20	-1,33E-03 m	129,21 t	-0,17	-206,19 KN
21	-2,31E-03 m	129,21 t	-0,30	-360,09 KN
22	-3,19E-03 m	129,21 t	-0,41	-496,10 KN
23	-3,91E-03 m	129,21 t	-0,50	-608,15 KN
24	-4,44E-03 m	129,21 t	-0,57	-690,78 KN
25	-4,76E-03 m	129,21 t	-0,61	-740,11 KN
26	-4,84E-03 m	129,21 t	-0,63	-753,18 KN
27	-4,68E-03 m	129,21 t	-0,60	-728,59 KN
28	-4,28E-03 m	129,21 t	-0,55	-666,50 KN
29	-3,65E-03 m	129,21 t	-0,47	-568,31 KN
30	-2,81E-03 m	129,21 t	-0,36	-436,66 KN
31	-1,77E-03 m	129,21 t	-0,23	-275,28 KN
32	-5,71E-04 m	129,21 t	-0,07	-88,84 KN
33	7,56E-04 m	129,21 t	0,10	117,66 KN
34	2,18E-03 m	129,21 t	0,28	338,93 KN
35	3,66E-03 m	129,21 t	0,47	570,02 KN
36	5,18E-03 m	129,21 t	0,67	806,40 KN
37	6,71E-03 m	118,23 t	0,79	956,03 KN
Summe		4808,07 t	4,55	5476,39 KN

Tabelle 7-14 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der sechsten Eigenform

7. Eigenform

Gesamtmasse 73321,33 t
 modale Masse 2469,34 t
 Sd 1,045 m/s²
 Fb 2580,46 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	-3,81E-04 m	86,07 t	-0,03	50,57 KN
2	-1,17E-03 m	66,36 t	-0,08	119,51 KN
3	-2,19E-03 m	66,36 t	-0,15	223,97 KN
4	-3,27E-03 m	66,36 t	-0,22	334,89 KN
5	-4,26E-03 m	66,36 t	-0,28	436,28 KN
6	-5,03E-03 m	66,36 t	-0,33	514,86 KN
7	-5,48E-03 m	66,36 t	-0,36	560,19 KN
8	-5,53E-03 m	66,36 t	-0,37	565,82 KN
9	-5,17E-03 m	66,36 t	-0,34	529,29 KN
10	-4,42E-03 m	66,36 t	-0,29	452,14 KN
11	-3,32E-03 m	66,36 t	-0,22	339,80 KN
12	-1,96E-03 m	66,36 t	-0,13	200,95 KN
13	-4,59E-04 m	66,36 t	-0,03	46,91 KN
14	1,07E-03 m	66,36 t	0,07	-109,89 KN
15	2,51E-03 m	66,36 t	0,17	-256,31 KN
16	3,72E-03 m	66,36 t	0,25	-380,32 KN
17	4,61E-03 m	66,36 t	0,31	-471,58 KN
18	5,11E-03 m	66,36 t	0,34	-522,43 KN
19	5,17E-03 m	66,36 t	0,34	-528,88 KN
20	4,79E-03 m	66,36 t	0,32	-490,31 KN
21	4,01E-03 m	66,36 t	0,27	-410,40 KN
22	2,89E-03 m	66,36 t	0,19	-296,01 KN
23	1,53E-03 m	66,36 t	0,10	-156,96 KN
24	5,39E-05 m	66,36 t	0,00	-5,51 KN
25	-1,42E-03 m	66,36 t	-0,09	145,19 KN
26	-2,76E-03 m	66,36 t	-0,18	281,89 KN
27	-3,84E-03 m	66,36 t	-0,25	392,39 KN
28	-4,56E-03 m	66,36 t	-0,30	466,47 KN
29	-4,86E-03 m	66,36 t	-0,32	496,86 KN
30	-4,69E-03 m	66,36 t	-0,31	479,56 KN
31	-4,05E-03 m	66,36 t	-0,27	414,18 KN
32	-2,97E-03 m	66,36 t	-0,20	303,68 KN
33	-1,51E-03 m	66,36 t	-0,10	154,19 KN
34	2,55E-04 m	66,36 t	0,02	-26,05 KN
35	2,23E-03 m	66,36 t	0,15	-227,76 KN
36	4,32E-03 m	66,36 t	0,29	-441,91 KN
37	6,46E-03 m	60,72 t	0,39	-604,81 KN
Summe		2469,34 t	-1,67	2580,46 KN

Tabelle 7-15 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der siebenten Eigenform

8. Eigenform

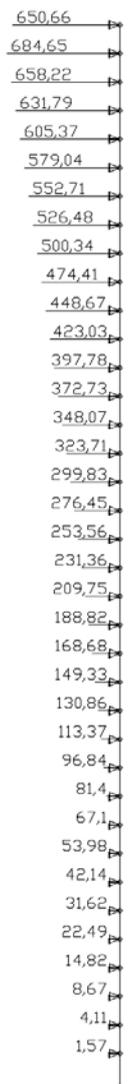
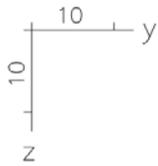
Gesamtmasse	73321,33 t
modale Masse	2469,34 t
Sd	1,030 m/s²
Fb	2543,43 KN

Massenpunkte	Verschiebungen in y bzw. z-Richtung si	Massen der Massenpunkte mi	mi x si	Fi
1	3,81E-04 m	86,07 t	0,03	49,84 KN
2	1,17E-03 m	66,36 t	0,08	117,79 KN
3	2,19E-03 m	66,36 t	0,15	220,76 KN
4	3,27E-03 m	66,36 t	0,22	330,08 KN
5	4,26E-03 m	66,36 t	0,28	430,02 KN
6	5,03E-03 m	66,36 t	0,33	507,47 KN
7	5,48E-03 m	66,36 t	0,36	552,15 KN
8	5,53E-03 m	66,36 t	0,37	557,70 KN
9	5,17E-03 m	66,36 t	0,34	521,69 KN
10	4,42E-03 m	66,36 t	0,29	445,65 KN
11	3,32E-03 m	66,36 t	0,22	334,92 KN
12	1,96E-03 m	66,36 t	0,13	198,07 KN
13	4,59E-04 m	66,36 t	0,03	46,24 KN
14	-1,07E-03 m	66,36 t	-0,07	-108,31 KN
15	-2,51E-03 m	66,36 t	-0,17	-252,63 KN
16	-3,72E-03 m	66,36 t	-0,25	-374,86 KN
17	-4,61E-03 m	66,36 t	-0,31	-464,81 KN
18	-5,11E-03 m	66,36 t	-0,34	-514,94 KN
19	-5,17E-03 m	66,36 t	-0,34	-521,29 KN
20	-4,79E-03 m	66,36 t	-0,32	-483,27 KN
21	-4,01E-03 m	66,36 t	-0,27	-404,51 KN
22	-2,89E-03 m	66,36 t	-0,19	-291,76 KN
23	-1,53E-03 m	66,36 t	-0,10	-154,70 KN
24	-5,39E-05 m	66,36 t	0,00	-5,43 KN
25	1,42E-03 m	66,36 t	0,09	143,11 KN
26	2,76E-03 m	66,36 t	0,18	277,84 KN
27	3,84E-03 m	66,36 t	0,25	386,76 KN
28	4,56E-03 m	66,36 t	0,30	459,77 KN
29	4,86E-03 m	66,36 t	0,32	489,72 KN
30	4,69E-03 m	66,36 t	0,31	472,68 KN
31	4,05E-03 m	66,36 t	0,27	408,24 KN
32	2,97E-03 m	66,36 t	0,20	299,32 KN
33	1,51E-03 m	66,36 t	0,10	151,98 KN
34	-2,55E-04 m	66,36 t	-0,02	-25,68 KN
35	-2,23E-03 m	66,36 t	-0,15	-224,49 KN
36	-4,32E-03 m	66,36 t	-0,29	-435,57 KN
37	-6,46E-03 m	60,72 t	-0,39	-596,13 KN
Summe		2469,34 t	1,67	2543,43 KN

Tabelle 7-16 Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der achten Eigenform

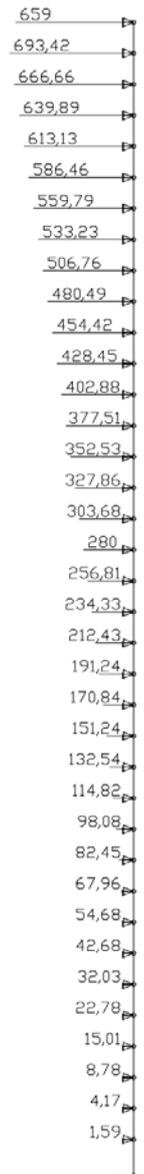
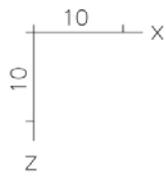
7.4 Ermittlung der Schnittkräfte der einzelnen Eigenformen

7.4.1 Lastfälle



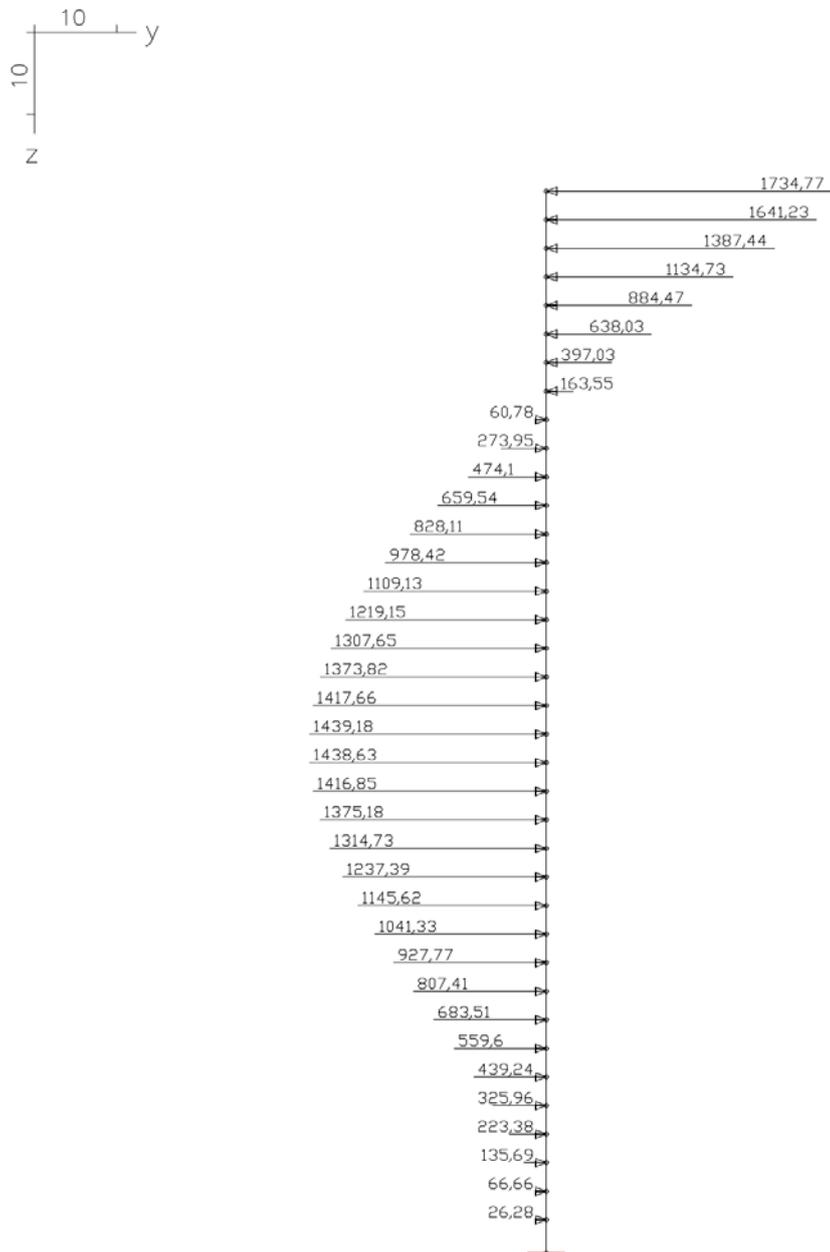
LF 11: Belastung, Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF1

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



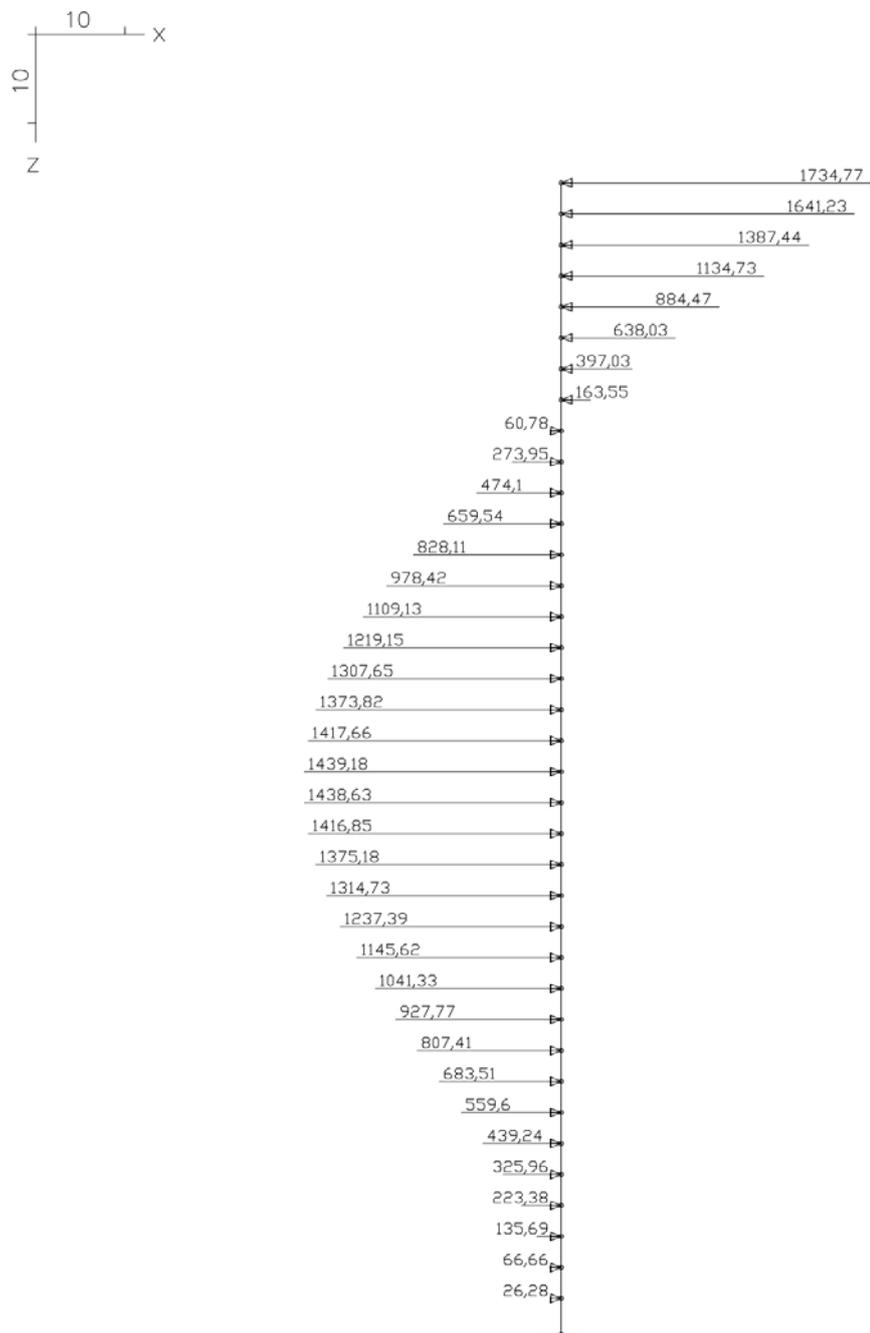
LF 12: Belastung, Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF2

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



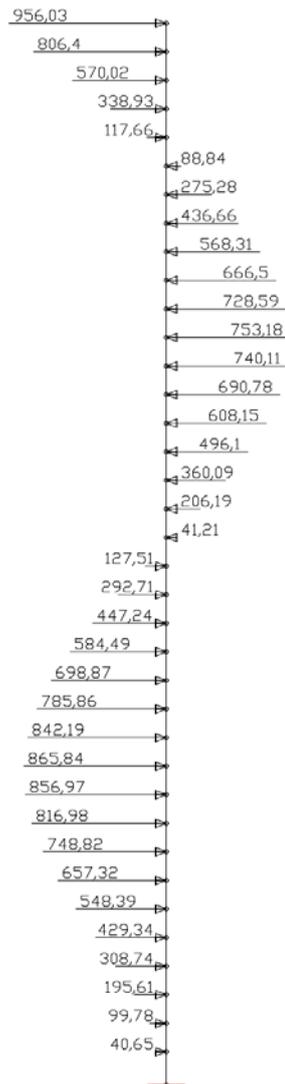
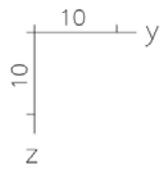
LF 13: Belastung, Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF3

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



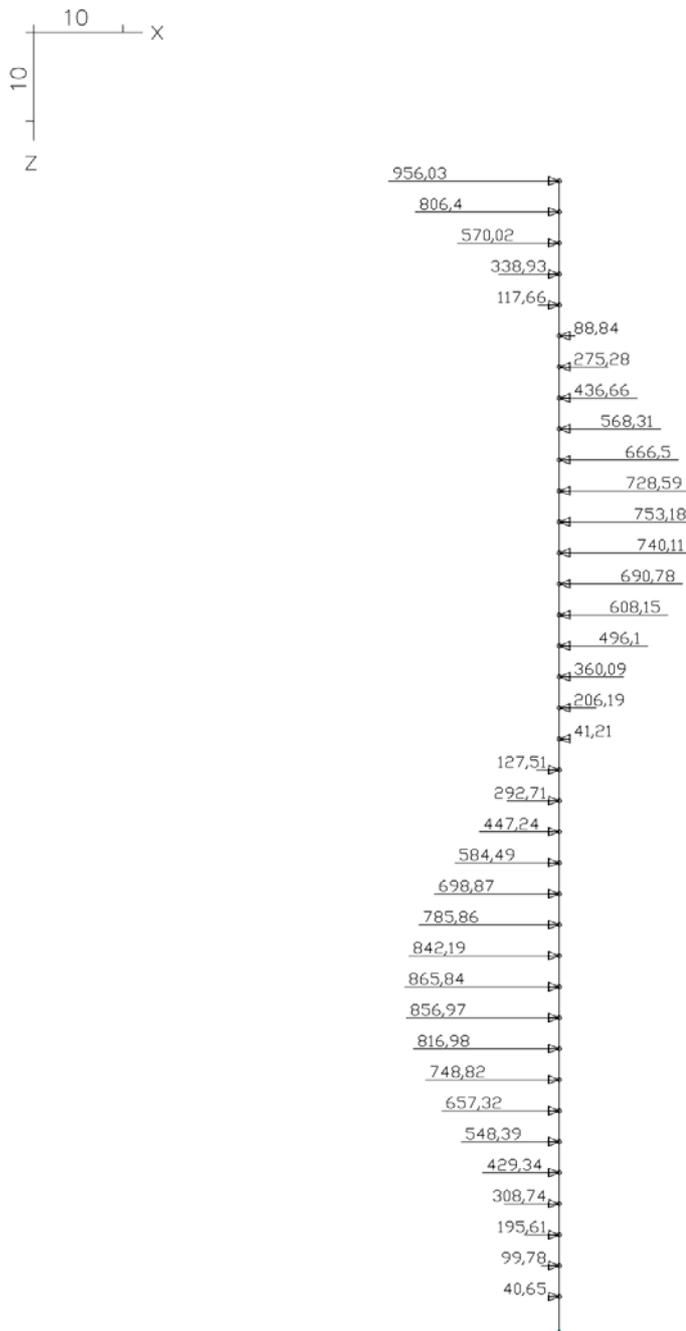
LF 14: Belastung, Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF4

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



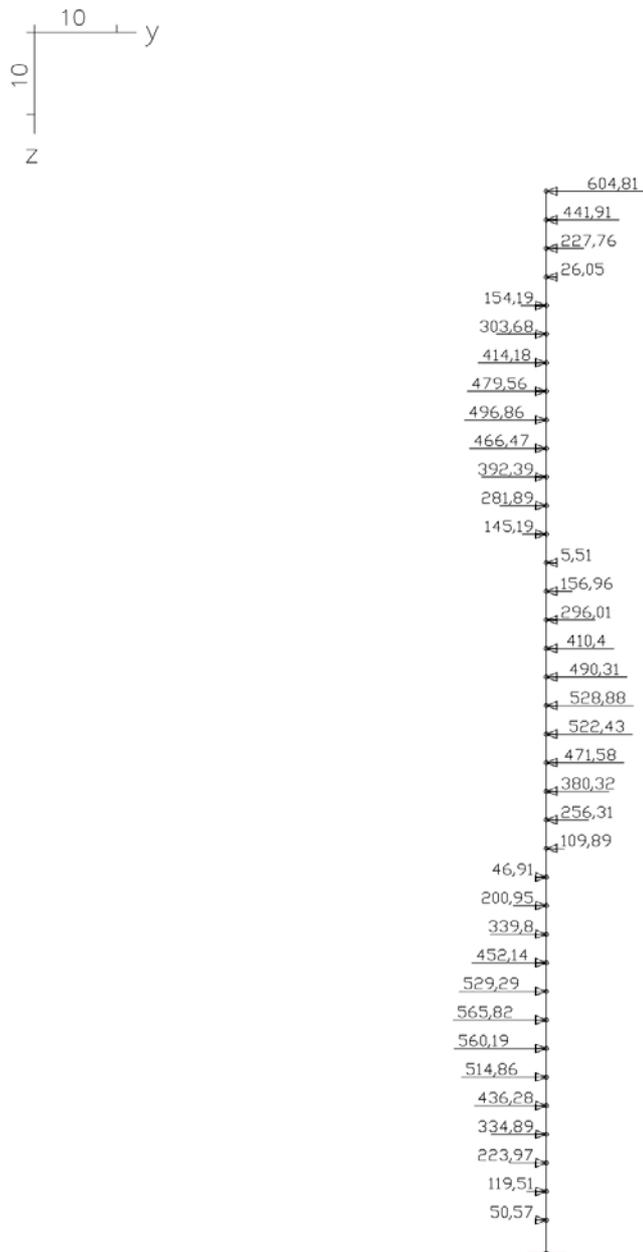
LF 15: Belastung, Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF5

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



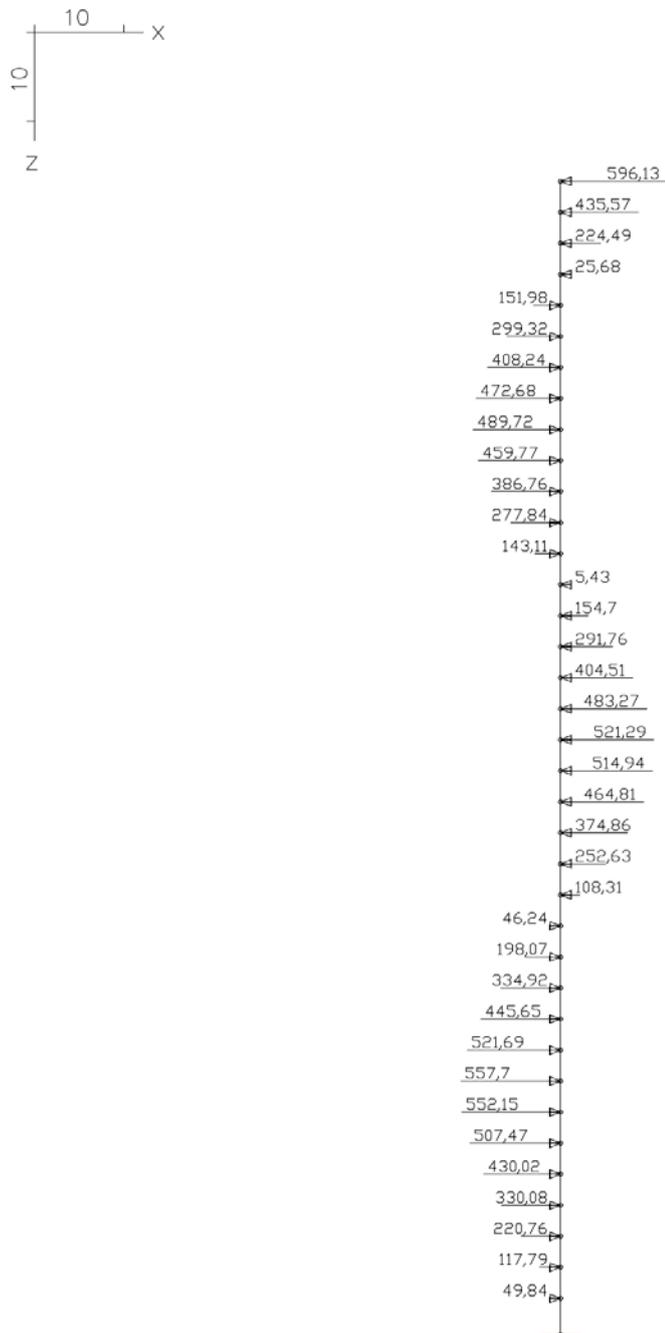
LF 16: Belastung, Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF6

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



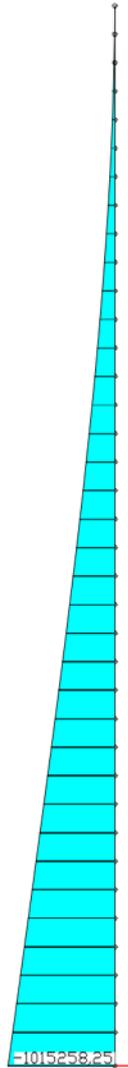
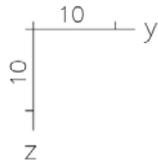
LF 17: Belastung, Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF7

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



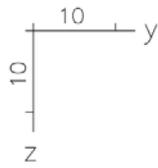
LF 18: Belastung, Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF8

7.4.2 Schnittkräfte



LF 11: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF1
Schnittgrößen Mz: 504858,75 [kNm] ←
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1015258,25/0,00 [kNm]

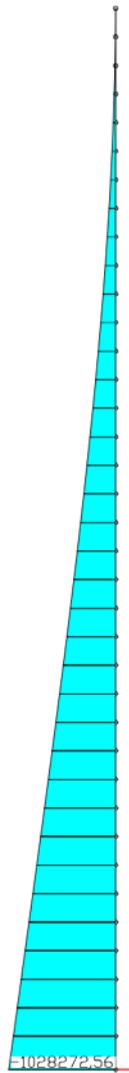
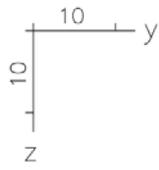
7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



650,66
650,66
1339,31
1339,31
1993,53
1993,53
2625,32
2625,32
3230,69
3230,69
3809,73
3809,73
4362,44
4362,44
4888,92
4888,92
5389,26
5389,26
5853,67
5853,67
6289,94
6289,94
6735,37
6735,37
7133,15
7133,15
7505,88
7505,88
7853,95
7853,95
8177,66
8177,66
8477,49
8477,49
8753,94
8753,94
9007,50
9007,50
9238,86
9238,86
9448,61
9448,61
9637,43
9637,43
9805,11
9805,11
9955,44
9955,44
10089,30
10089,30
10199,67
10199,67
10296,51
10296,51
10377,91
10377,91
10443,01
10443,01
10498,99
10498,99
10541,13
10541,13
10572,75
10572,75
10595,24
10595,24
10610,09
10610,09
10618,73
10618,73
10622,84
10622,84
10624,41
10624,41

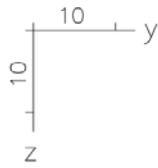
LF 11: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF1
 Schnittgrößen Q_y : 5283,21 [kN] = $\frac{1}{2} \cdot \dots$
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 650,66/10624,41 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



LF 12: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF2
Schnittgrößen My. 511330,39 [kNm] = 
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1028272,56/-0,00 [kNm]

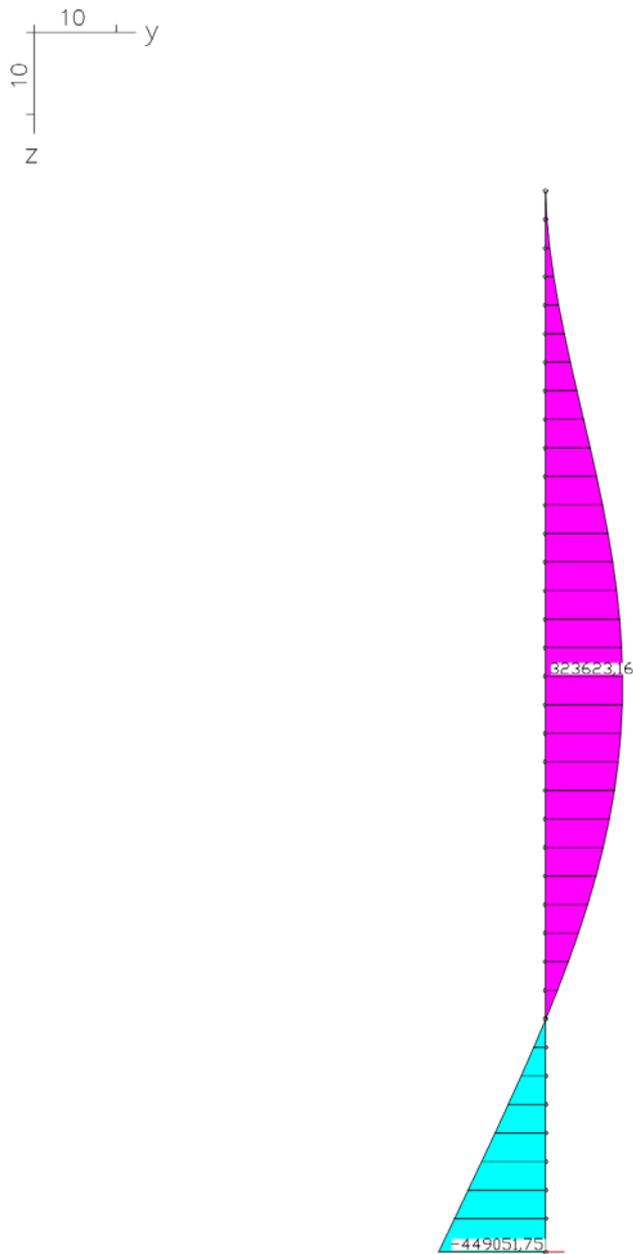
7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



659,00
659,00
1359,45
1359,45
2019,08
2019,08
2658,97
2658,97
3272,10
3272,10
3858,56
3858,56
4418,99
4418,99
4951,58
4951,58
5458,34
5458,34
5938,83
5938,83
6394,25
6394,25
6824,70
6824,70
7224,58
7224,58
7602,09
7602,09
7954,66
7954,66
8282,48
8282,48
8586,16
8586,16
8866,16
8866,16
9122,97
9122,97
9357,30
9357,30
9562,73
9562,73
9750,97
9750,97
9918,81
9918,81
10083,05
10083,05
10215,59
10215,59
10330,41
10330,41
10428,49
10428,49
10510,94
10510,94
10578,20
10578,20
10638,58
10638,58
10675,29
10675,29
10708,29
10708,29
10731,07
10731,07
10745,08
10745,08
10754,89
10754,89
10757,08
10757,08
10760,62
10760,62

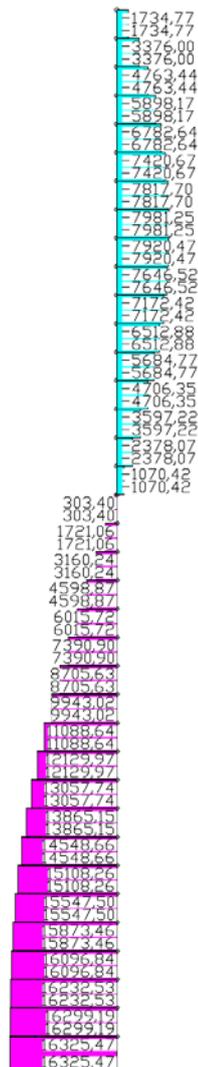
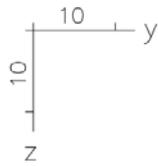
LF 12: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF2
 Schnittgrößen Qz: 5350,95 [kN] = $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10 \cdot 5350,95$
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 659,00/10760,62 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



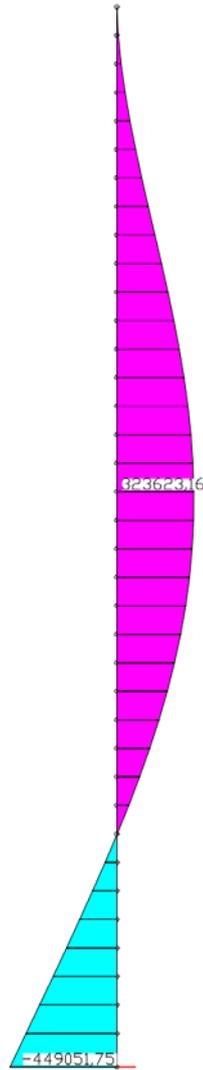
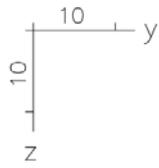
LF 13: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF3
Schnittgrößen Mz: 223300,53 [kNm] = 
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -449051,75/323623,16 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



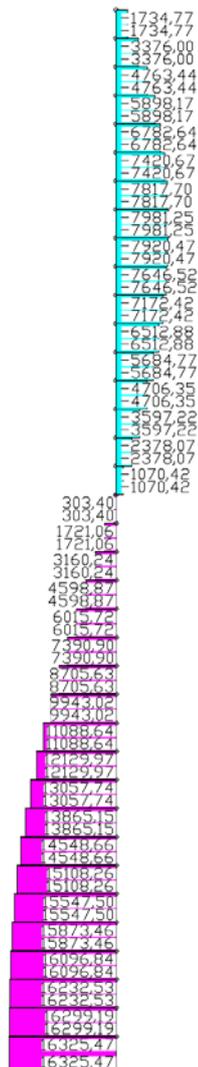
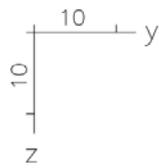
LF 13: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF3
 Schnittgrößen Qy, 8118,19 [kN] = 
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -7981,25/16325,47 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



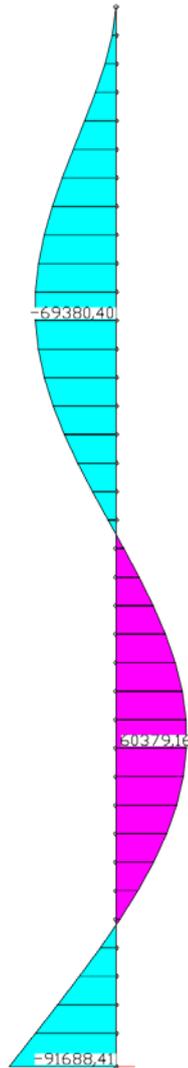
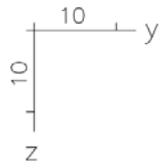
LF 14: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF4
Schnittgrößen My: 223300,53 [kNm] = |-----|
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -449051,75/323623,16 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



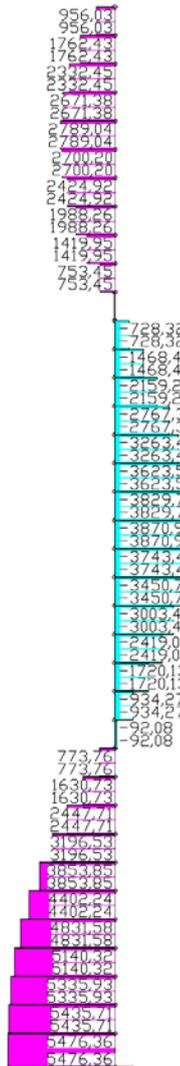
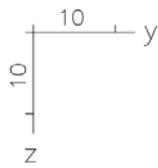
LF 14: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF4
 Schnittgrößen Qz. 8118,19 [kN] = 
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -7981,25/16325,47 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



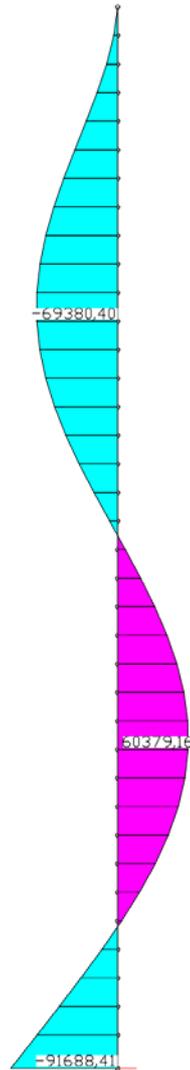
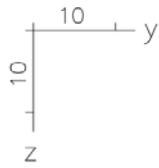
LF 15: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF5
Schnittgrößen Mz: 45594,01 [kNm] = 
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -91688,41/60379,16 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



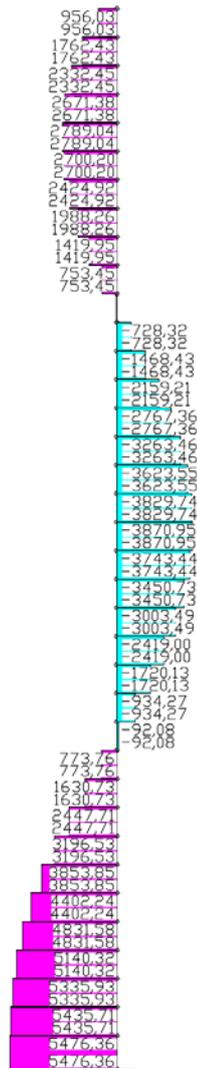
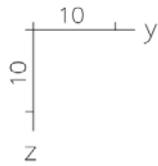
LF 15: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF5
 Schnittgrößen Qy: 2723,24 [kN] = |-----|
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -3870,95/5476,36 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



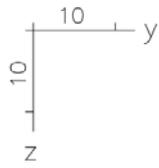
LF 16: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF6
Schnittgrößen My, 45594,01 [kNm] = |-----|
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -91688,41/60379,16 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



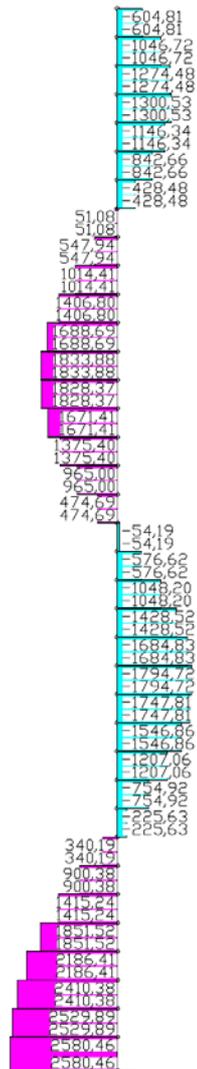
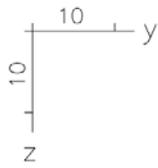
LF 16: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF6
 Schnittgrößen Qz. 2723,24 [kN] = |-----|
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -3870,95/5476,36 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



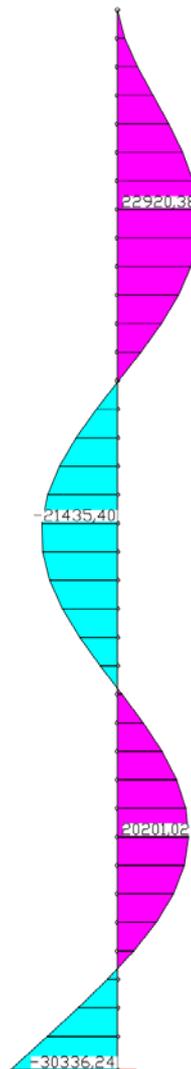
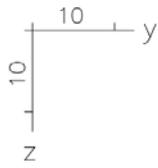
LF 17: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF7
Schnittgrößen Mz: 15305,08 [kNm] = 
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -30778,13/23254,07 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



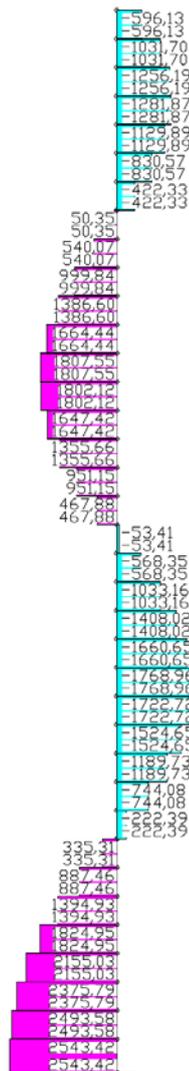
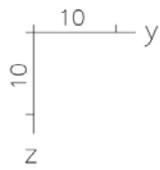
LF 17: Erdbebenkräfte in y-Richtung aus EF7
 Schnittgrößen Qy, 1283,19 [kN] =
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1794,72/2580,46 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



LF 18: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF8
Schnittgrößen My: 15085,34 [kNm] =
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -30336,24/22920,38 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



LF 18: Erdbebenkräfte in z-Richtung aus EF8
 Schnittgrößen Qz: 1264,77 [kN] = |-----|
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1768,96/2543,42 [kN]

7.5 Kombination der Schnittkräfte infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung

Es muss zuerst überprüft werden, ob als Kombinationsformel die SRSS-Formel angewendet werden darf (siehe Kapitel 5.4.2).

$$T_j \leq 0,9 * T_i$$

Eigenformen in y-Richtung

$$T_1 = 2,33 \text{ s} \leq 0,9 * T_1 = 0,9 * 2,67 = 2,40 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

$$T_3 = 2,67 \text{ s} \leq 0,9 * T_5 = 0,9 * 7,48 = 6,73 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

$$T_5 = 7,48 \text{ s} \leq 0,9 * T_7 = 0,9 * 14,66 = 13,19 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Eigenformen in z-Richtung

$$T_2 = 2,22 \text{ s} \leq 0,9 * T_4 = 0,9 * 2,81 = 2,53 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

$$T_4 = 2,81 \text{ s} \leq 0,9 * T_6 = 0,9 * 7,87 = 7,08 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

$$T_6 = 7,87 \text{ s} \leq 0,9 * T_8 = 0,9 * 15,42 = 13,88 \text{ s} \quad \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

→ SRSS-Formel darf angewendet werden

$$E_E = \sqrt{\sum E_{E_i}^2}$$

Kombinierte Schnittkräfte

M_z :

$$\begin{aligned} M_z &= \sqrt{(-1015258,25)^2 + (-449051,75)^2 + (-91688,41)^2 + (-30778,13)^2} \\ &= 1114338,75 \text{ KNm} \end{aligned}$$

Q_y :

$$Q_y = \sqrt{10624,41^2 + 16325,47^2 + 5476,36^2 + 2580,46^2} = 20397,26 \text{ KNm}$$

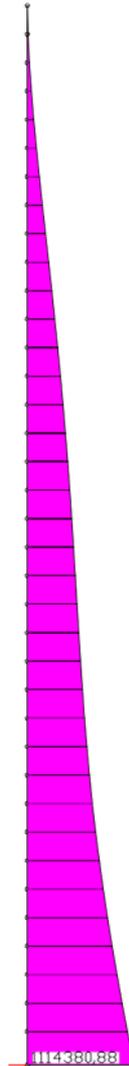
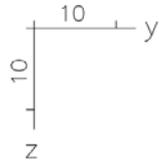
M_y :

$$\begin{aligned} M_y &= \sqrt{(-1028272,56)^2 + (-449051,75)^2 + (-91688,41)^2 + (-30336,24)^2} \\ &= 1126196,69 \text{ KNm} \end{aligned}$$

Q_z :

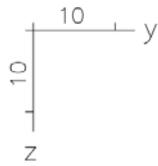
$$Q_z = \sqrt{10760,62^2 + 16325,47^2 + 5476,36^2 + 2543,42^2} = 20463,91 \text{ KNm}$$

7.6 Kontrolle mit Schnittkräfte aus Computerbe- rechnung



LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen Mz: 554149,58 [kNm] ←————→
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/1114380,88 [kNm]

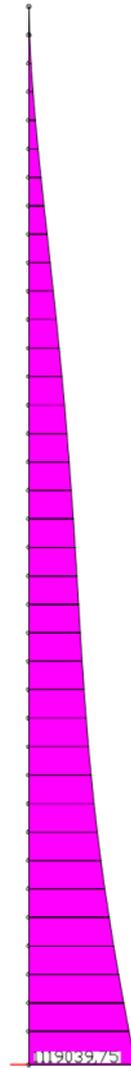
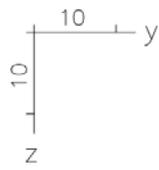
7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



2173,10
2173,10
4173,24
4173,24
5812,55
5812,55
7112,18
7112,18
8100,29
8100,29
8812,52
8812,52
9288,25
9288,25
9570,69
9570,69
9701,27
9701,27
9718,69
9718,69
9657,44
9657,44
9548,31
9548,31
9420,25
9420,25
9302,86
9302,86
9228,08
9228,08
9229,57
9229,57
9388,97
9388,97
9579,88
9579,88
9752,32
9752,32
10480,58
10480,58
11115,85
11115,85
11841,88
11841,88
12630,87
12630,87
13427,69
13427,69
14201,56
14201,56
15145,71
15145,71
15975,59
15975,59
16776,94
16776,94
17532,21
17532,21
18230,14
18230,14
18846,76
18846,76
19357,48
19357,48
19779,94
19779,94
20078,99
20078,99
20292,12
20292,12
20355,90
20355,90
20405,09
20405,09

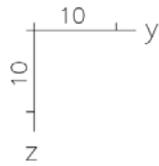
LF ASP: Antwortspektrum überlagert
 Schnittgrößen Q_y : 10146,86 [kN] = 
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 2173,10/20405,09 [kN]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen My: 556466,31 [kNm] = |—————|
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 0,00/1119039,75 [kNm]

7. Berechnung anhand des Multimodalen Antwortspektrumverfahrens mit Ersatzstab



2169,55
2169,55
4182,59
4182,59
5806,51
5806,51
7107,11
7107,11
8097,61
8097,61
8818,98
8818,98
9291,05
9291,05
9579,83
9579,83
9714,61
9714,61
9735,77
9735,77
9777,56
9777,56
9970,68
9970,68
9444,13
9444,13
9327,67
9327,67
9253,48
9253,48
9259,46
9259,46
9365,44
9365,44
9607,18
9607,18
9990,71
9990,71
10510,59
10510,59
11147,01
11147,01
11874,44
11874,44
12664,63
12664,63
13492,26
13492,26
14386,39
14386,39
15180,08
15180,08
16008,78
16008,78
16808,24
16808,24
17563,03
17563,03
18259,12
18259,12
18869,78
18869,78
19387,69
19387,69
19797,72
19797,72
20094,90
20094,90
20283,80
20283,80
20675,92
20675,92
20418,83
20418,83

LF ASP: Antwortspektrum überlagert
 Schnittgrößen Qz: 10153,70 [kN] =
 Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 2169,55/20418,83 [kN]

7.7 Zusammenfassung

Das multimodale Antwortspektrumverfahren anhand eines Ersatzstabs berücksichtigt im Gegensatz zum vereinfachten Verfahren mehrere Modalformen. Die Vorgehensweise bleibt jedoch die gleiche.

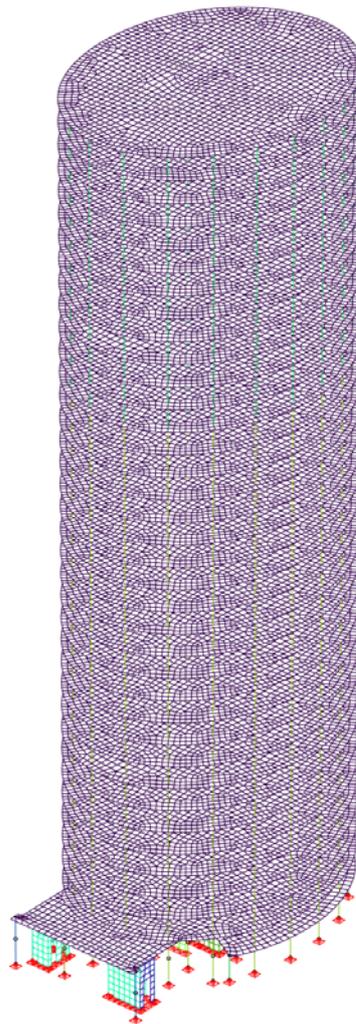
Eine rein händische Ermittlung der Erdbebenersatzkräfte wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurde, ist sehr zeitintensiv und daher wirtschaftlich kaum vertretbar. Es wird daher geraten, die Schnittkräfte mit Hilfe eines eingegebenen Ersatzstabs mit Punktmassen zu ermitteln.

So wie beim vereinfachten Antwortspektrumverfahren muss auch hier die Regelmäßigkeit im Grund- und Aufriss überprüft werden, was oft mit sehr viel Rechenaufwand verbunden ist und damit mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Erstellung eines 3D-Modells.

8 Multimodales Antwortspektrumverfahren anhand eines 3D Modells

Dieses Kapitel enthält Auszüge aus dem Programm InfoCAD.

8.1 System



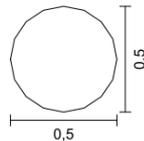
8.2 Querschnittswerte

Querschnittswerte

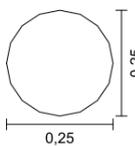
1	Rechteck	Stütze 1,3x1,1 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,300	dz = 1,100
2	Fläche	Wand 1,2 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 1,2000 = 1 = 1	drillsteif
3	Fläche	Wand 0,3 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,3000 = 1 = 1	drillsteif
4	Fläche	Wand 0,28 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,2800 = 1 = 1	drillsteif
5	Fläche	Wand 0,25 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,2500 = 1 = 1	drillsteif
6	Fläche	Wand 0,4 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,4000 = 1 = 1	drillsteif
7	Fläche	Wand 0,5 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,5000 = 1 = 1	drillsteif
8	Fläche	Wand 0,45 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,4500 = 1 = 1	drillsteif
9	Fläche	Wand 1,3 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 1,3000 = 1 = 1	drillsteif
10	Fläche	Wand 0,6 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,6000 = 1 = 1	drillsteif
11	Fläche	Wand 0,2 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,2000 = 1 = 1	drillsteif
12	Rechteck	Stütze 1,15x1,15 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,150	dz = 1,150
13	Rechteck	Stütze 0,95x0,5 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,950	dz = 0,500
14	Rechteck	Stütze 1,2x0,3 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,200	dz = 0,300

Querschnittswerte

15	Rechteck	Stütze 0,76x0,3 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,760	dz = 0,300
16	Rechteck	Stütze 1,64x0,25 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,640	dz = 0,250
17	Rechteck	Stütze 1,15x0,3 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,150	dz = 0,300
18	Rechteck	Stütze 1,275x1,275 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,275	dz = 1,275
19	Fläche	Wand 0,35 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,3500 = 1 = 1	drillsteif
20	Rechteck	Stütze 0,9x0,4 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,900	dz = 0,400
21	Fläche	Wand 0,9 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,9000 = 1 = 1	drillsteif
22	Rechteck	Stütze 0,5x0,5 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,500	dz = 0,500
23	Fläche	Wand 0,18 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 0,1800 = 1 = 1	drillsteif
24	Fläche	Wand 1,0 m C35/45 Elementdicke [m] Orthotropie dzy/dz E-Modul Platte/Scheibe	dz = 1,0000 = 1 = 1	drillsteif
25	Rechteck	Stütze 1,0x1,0 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,000	dz = 1,000
26	Rechteck	Stütze 1,4x0,2 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,400	dz = 0,200
27	Rechteck	Stütze 1,15x0,7 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,150	dz = 0,700
28	Rechteck	Stütze 1,6x0,4 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 1,600	dz = 0,400
29	Rechteck	Stütze 0,68x0,2 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,680	dz = 0,200
30	Rechteck	Stütze 0,4x0,28 C35/45 Breite, Höhe [m]	dy = 0,400	dz = 0,280
31	Polygon	Stütze d=0,5 m C35/45 Schwerpunkt [m] Fläche [m ²] Trägheitsmomente [m ⁴] Hauptachsenwinkel [Grad] Mittlung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite	ys = -0,000 A = 1,9134e-01 Ix = 5,8169e-03 Iy = 2,9139e-03 Iz = 2,9139e-03 Phi = 0,000	zs = -0,000 lyz = 0,0000e+00 I1 = 2,9139e-03 I2 = 2,9139e-03



Querschnittswerte

32	Polygon 	Stütze d=0,25 m C35/45 Schwerpunkt [m] $y_s = -0,000$ $z_s = -0,000$ Fläche [m ²] $A = 4,7835e-02$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 3,6356e-04$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_y = 1,8212e-04$ $I_1 = 1,8212e-04$ $I_z = 1,8212e-04$ $I_2 = 1,8212e-04$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = 0,000$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite
33	Rechteck	Stütze 0,9x0,9 C35/45 Breite, Höhe [m] $d_y = 0,900$ $d_z = 0,900$
34	Rechteck	Stütze 0,7x0,7 C35/45 Breite, Höhe [m] $d_y = 0,700$ $d_z = 0,700$
35	Fläche	Decke 0,22 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 0,2200$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
36	Fläche	Decke 0,25 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 0,2500$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
37	Fläche	Decke 0,3 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 0,3000$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
38	Fläche	Decke 0,4 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 0,4000$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
39	Fläche	Decke 2,05 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 2,0500$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
40	Fläche	Decke 1,2 m C35/45 Elementdicke [m] $d_z = 1,2000$ drillsteif Orthotropie dzy/dz = 1 E-Modul Platte/Scheibe = 1
41	Polygon 	Bemessungsobjekt Schwerpunkt [m] $y_s = 20,000$ $z_s = 32,500$ Fläche [m ²] $A = 2,6000e+03$ Trägheitsmomente [m ⁴] $I_x = 8,5545e+05$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_y = 9,1542e+05$ $I_1 = 9,1542e+05$ $I_z = 3,4667e+05$ $I_2 = 3,4667e+05$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = -0,000$ Mittelung der Querkraft-Schubspannungen über die Qu.-breite

8.3 Materialkennwerte

Materialkennwerte

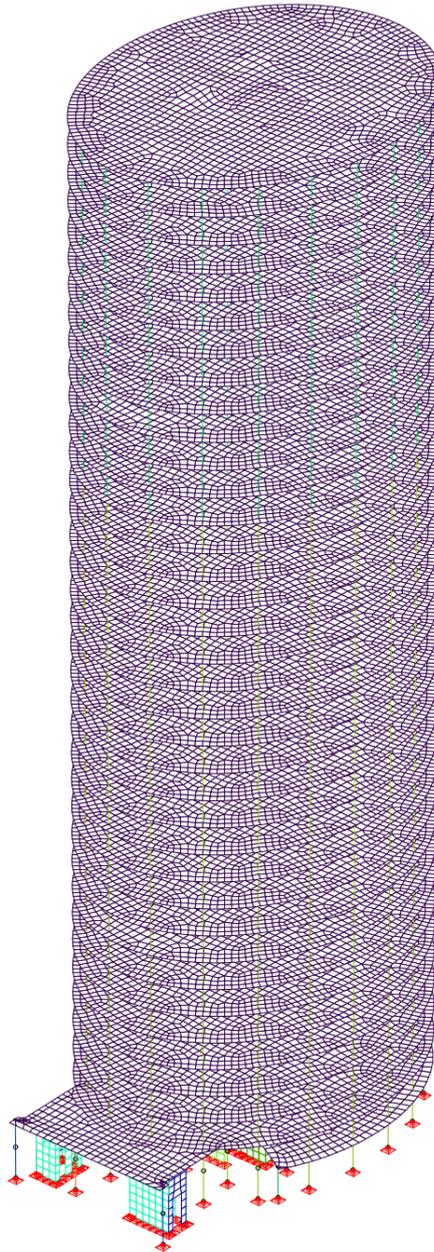
	Nr.	Art	E-Modul [MN/m ²]	G-Modul [MN/m ²]	Quer- dehnz.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m ²]
1	1	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
2	2	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
3	3	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
4	4	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
5	5	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
6	6	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
7	7	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
8	8	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
9	9	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
10	10	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
11	11	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
12	12	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
13	13	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
14	14	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
15	15	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
16	16	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
17	17	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
18	18	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
19	19	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
20	20	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
21	21	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
22	22	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
23	23	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
24	24	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
25	25	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
26	26	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
27	27	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
28	28	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
29	29	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
30	30	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
31	31	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
32	32	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
33	33	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
34	34	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
35	35	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
36	36	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
37	37	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
38	38	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
39	39	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
40	40	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000
41	41	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000

8.4 Lastfälle

8.4.1 Eigengewicht



EIGENLAST



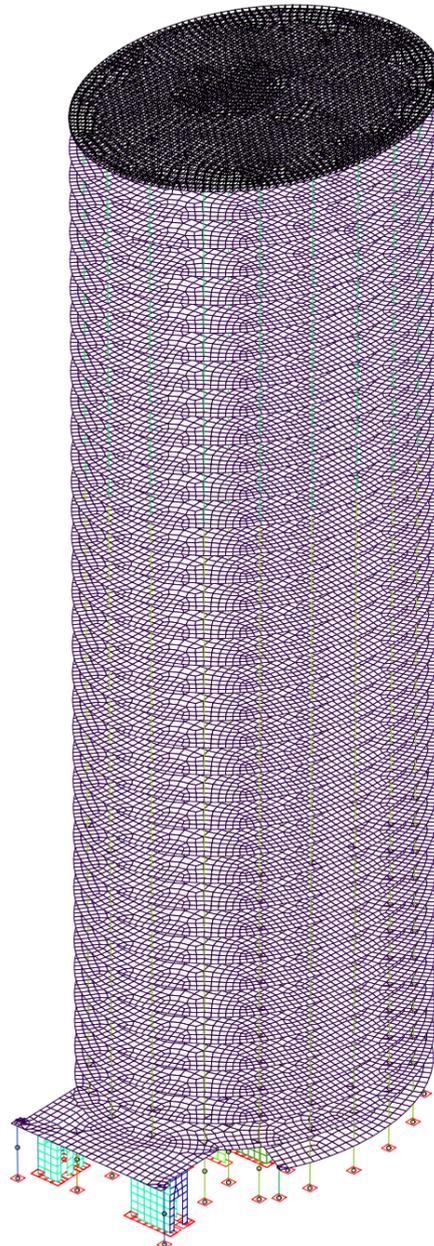
LF 1: Belastung, Eigengewicht

8.4.2 Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 KN/m²



LF 2: Belastung, Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 KN/m²

8.4.3 Eigengewicht Dachaufbau 4,0 KN/m²



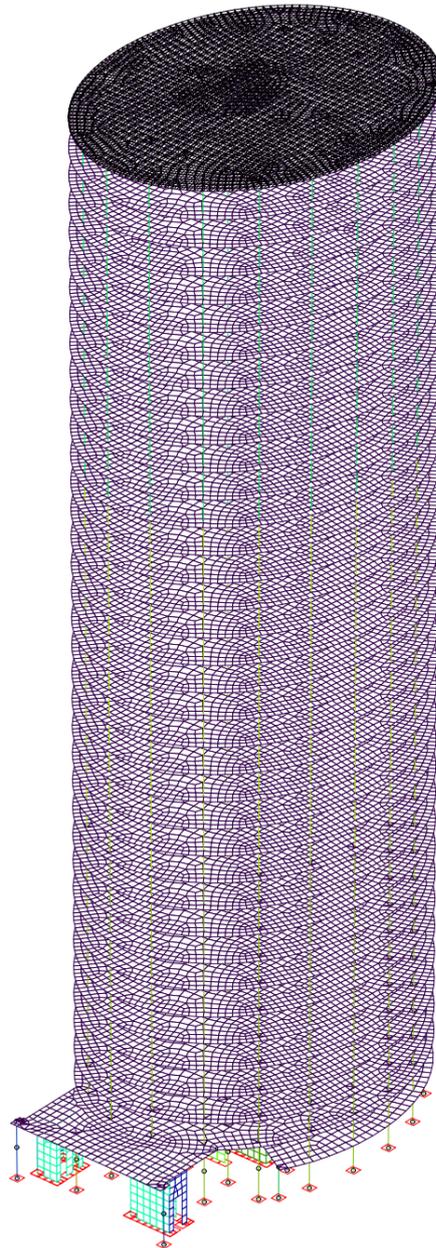
LF 3: Belastung, Eigengewicht Dachaufbau 4,0 KN/m²

8.4.4 Nutzlast Geschoss 3,8 KN/m²



LF 11: Belastung, Nutzlast Geschöß 3,8 KN/m²

8.4.5 Nutzlast Dach 3,0 KN/m²



LF 12: Belastung, Nutzlast Dach 3,0 KN/m²

8.5 Berechnungsvorgaben für die dynamische Berechnung

Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Antwortspektrum EN 1998-1:2004
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	40 48 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X, Y, Z X, Y, Z
Bodenbeschleunigungen Komponenten getrennt aufbringen Bezugssystemwinkel alpha	$a_x = 1,17 \quad a_y = 1,17 \quad a_z = 0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ Nein 0 [°]
Beiwerte nach EN 1998-1:2004 Baugrundklasse Antwortspektrum vom Typ Parameter für Antwortspektren Lehr'sches Dämpfungsmaß Bedeutungsbeiwert gamma I Verhaltensbeiwert q Kombinationsmethode Stat. Ersatzlasten speichern	B - Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies... 1 $S = 1,2 \quad T_B = 0,15 \quad T_C = 0,5 \quad T_D = 2$ 0,05 1 3 SRSS Methode Nein

Massen aus Lastfällen erzeugen

Gewählte Lastfälle	Faktor
2 Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 KN/m ²	1,000
3 Eigengewicht Dachaufbau 4,0 KN/m ²	1,000
11 Nutzlast Geschoß 3,8 KN/m ²	0,300
12 Nutzlast Dach 3,0 KN/m ²	0,300

8.6 Ergebnisse aus der dynamischen Berechnung

8.6.1 Summe der aufgebrauchten Massen

Summe der aufgebrauchten Massen (global)

	Mx [t]	My [t]	Mz [t]
Eigenmassen :	61048,805	61048,805	61048,805
Punktmassen :	0,000	0,000	0,000
Massen aus LF :	14025,659	14025,659	14025,659
Summe :	75074,461	75074,461	75074,461

8.6.2 Eigenfrequenzen

Eigenfrequenzen

Nr.	Eigenwert [1/s ²]	rel. Tol. [-]	Omega [rad/s]	Eigenfrequenz [Hz]	Periode [s]
1	8,1672e+00	2,3736e-27	2,858	0,455	2,198581
2	8,3167e+00	4,1330e-23	2,884	0,459	2,178735
3	6,0559e+01	6,4822e-25	7,782	1,239	0,807403
4	1,7702e+02	2,0236e-26	13,305	2,118	0,472245
5	1,8147e+02	1,7308e-26	13,471	2,144	0,466419
6	5,4215e+02	1,1540e-27	23,284	3,706	0,269849
7	5,4424e+02	4,5398e-28	23,329	3,713	0,269329
8	5,4633e+02	3,0870e-27	23,374	3,720	0,268815
9	6,3532e+02	5,3435e-25	25,206	4,012	0,249278
10	6,5310e+02	2,3232e-23	25,556	4,067	0,245862
11	6,8870e+02	4,4363e-23	26,243	4,177	0,239422
12	6,8974e+02	4,4965e-23	26,263	4,180	0,239242
13	7,3283e+02	8,3437e-22	27,071	4,308	0,232102
14	7,5843e+02	1,2791e-20	27,540	4,383	0,228151
15	7,7545e+02	4,8672e-20	27,847	4,432	0,225633
16	8,6186e+02	8,3804e-19	29,357	4,672	0,214024
17	8,6944e+02	1,5545e-18	29,486	4,693	0,213088
18	8,7910e+02	1,5536e-17	29,650	4,719	0,211914
19	9,0910e+02	3,4791e-21	30,151	4,799	0,208389
20	1,0178e+03	4,5887e-16	31,902	5,077	0,196951
21	1,0487e+03	2,0297e-13	32,384	5,154	0,194019
22	1,0716e+03	1,7380e-13	32,735	5,210	0,191939
23	1,1754e+03	6,9720e-13	34,284	5,456	0,183270
24	1,3426e+03	8,4324e-11	36,641	5,832	0,171480
25	1,3566e+03	6,5386e-09	36,832	5,862	0,170591
26	1,3631e+03	1,1649e-08	36,920	5,876	0,170183
27	1,5036e+03	2,0884e-11	38,777	6,171	0,162035
28	1,5585e+03	9,0374e-06	39,478	6,283	0,159156
29	1,5760e+03	5,3360e-05	39,699	6,318	0,158270
30	1,8068e+03	2,2377e-05	42,507	6,765	0,147815
31	1,8213e+03	1,1749e-05	42,676	6,792	0,147228
32	1,8396e+03	3,4132e-05	42,891	6,826	0,146492
33	1,8524e+03	1,6234e-05	43,040	6,850	0,145985
34	1,8864e+03	1,8324e-05	43,433	6,913	0,144665
35	1,9209e+03	5,5165e-07	43,828	6,975	0,143361
36	1,9343e+03	3,7349e-06	43,981	7,000	0,142862
37	1,9388e+03	1,3334e-06	44,032	7,008	0,142695
38	1,9464e+03	1,0948e-06	44,118	7,022	0,142417
39	1,9543e+03	1,0940e-07	44,208	7,036	0,142128
40	1,9583e+03	5,7725e-07	44,252	7,043	0,141985

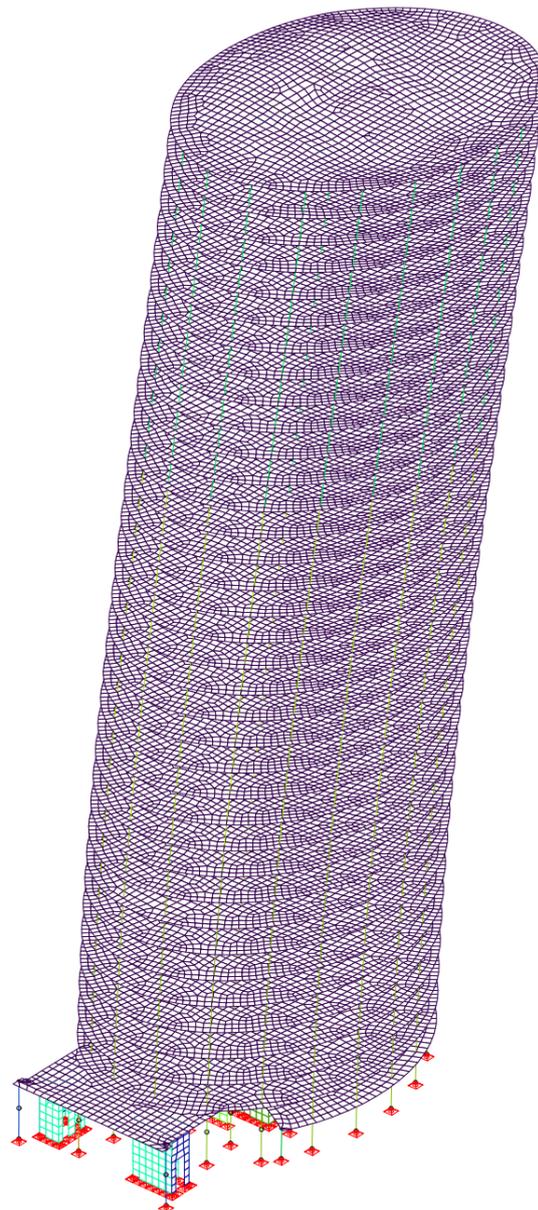
8.6.3 Effektive modale Massen

Effektive modale Massen (global)

Eigenform	Mx eff [t]	My eff [t]	Mz eff [t]
1	18,331	44354,882	0,001
2	44341,548	18,208	0,002
3	0,203	0,549	0,000
4	5,405	14240,143	0,013
5	14050,323	5,305	0,002
6	0,078	0,081	0,134
7	0,018	0,000	14809,477
8	2,996	0,000	100,262
9	0,001	0,002	17000,077
10	0,000	31,824	2,687
11	0,000	0,000	0,000
12	0,000	3,708	0,009
13	18,518	0,003	0,201
14	0,017	0,018	2,225
15	0,003	0,002	4788,810
16	0,353	2307,729	0,050
17	0,152	1763,450	0,138
18	0,581	0,048	0,084
19	4166,711	0,445	0,010
20	0,019	0,000	12740,169
21	0,000	0,002	0,080
22	0,000	0,001	174,707
23	33,915	0,000	0,360
24	0,004	0,001	9056,846
25	0,802	0,000	1,495
26	0,000	0,013	0,355
27	0,003	0,095	0,017
28	0,013	24,090	141,649
29	0,000	7,247	372,895
30	0,008	2,956	299,308
31	0,084	0,334	97,976
32	0,000	41,590	13,782
33	0,001	75,789	91,694
34	0,008	398,399	30,875
35	0,067	1,083	386,541
36	0,182	0,124	211,373
37	0,022	4,760	16,322
38	0,025	12,436	7,107
39	0,016	0,116	39,227
40	0,050	0,290	24,200
Summe:	62640,459	63295,722	60411,161
Anteil der Gesamtmasse:	83 [%]	84 [%]	80 [%]

Es sind nur 83 % bzw. 84 % der modalen Masse bei der 3D-Berechnung berücksichtigt worden. Um 90 % zu erreichen, müssten weit über 500 Eigenformen (mit 500 Eigenformen erst ~87 %) ermittelt werden, was einen nicht zu vertretenden Rechenaufwand darstellen würde.

8.6.4 1.Eigenform (Grundswingform in y-Richtung)



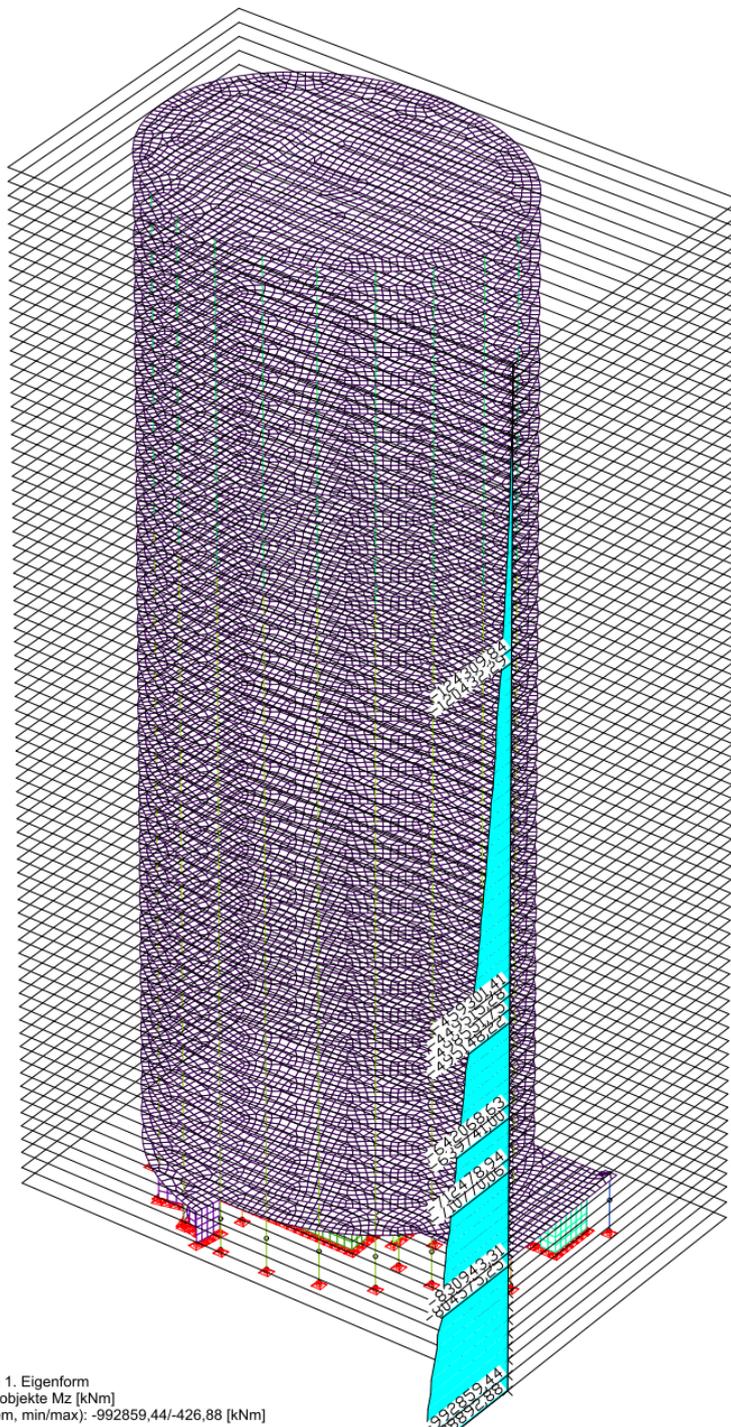
Eigenform 1: Eigenfrequenz = 0,45 Hz, Deformationen u [mm], Faktor = 1997,7
Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/7,24 [mm]

8.6.5 1.Eigenform (Grundswingform in z-Richtung)

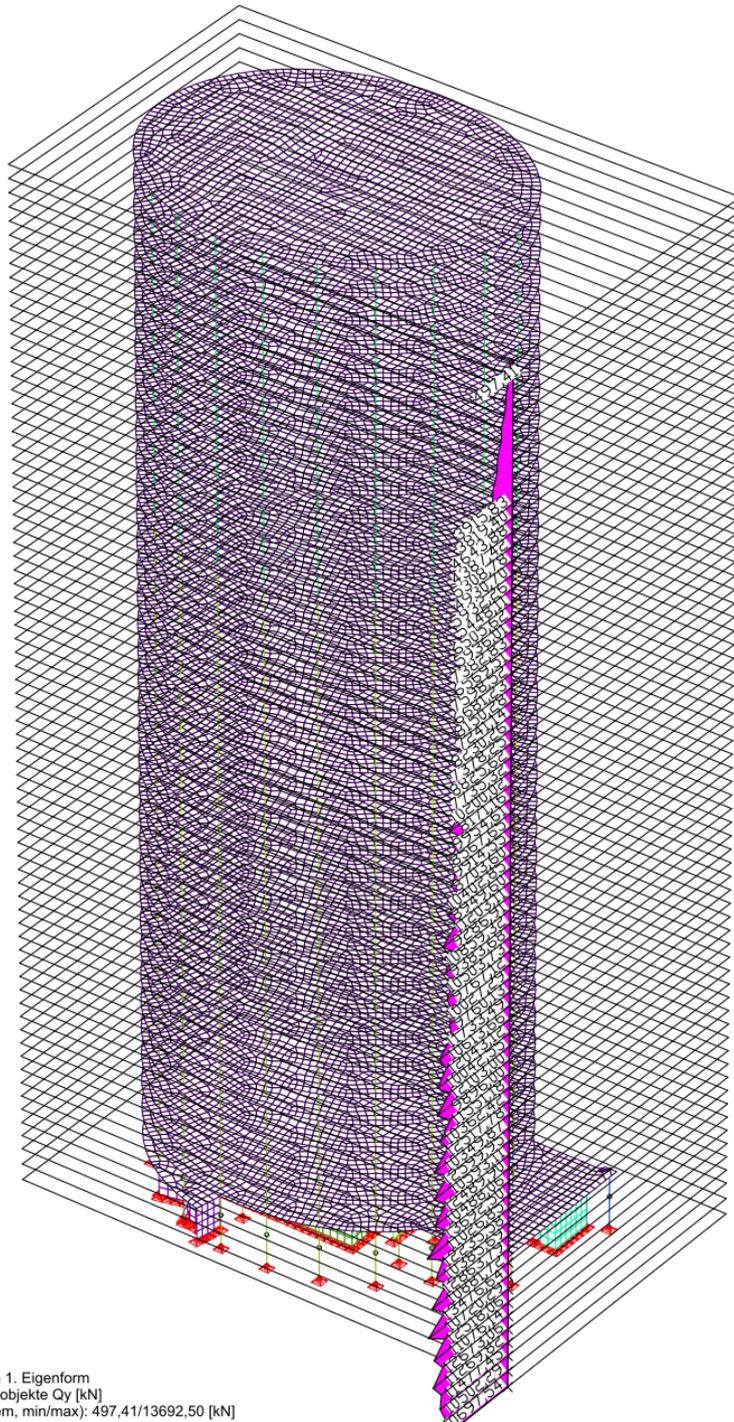


Eigenform 2: Eigenfrequenz = 0,46 Hz. Deformationen u [mm], Faktor = 2001,9
Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/7,23 [mm]

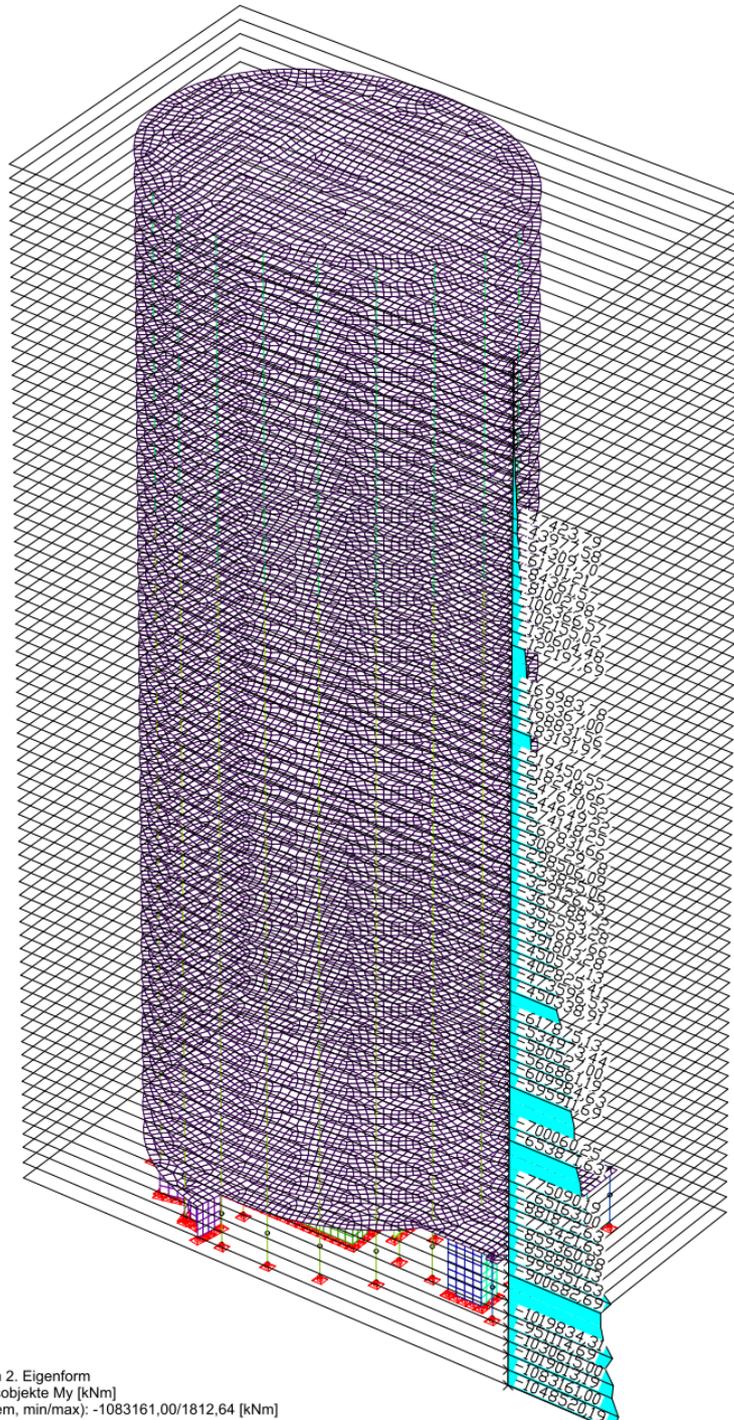
8.7 Schnittkräfte aus den Grundschiebformen



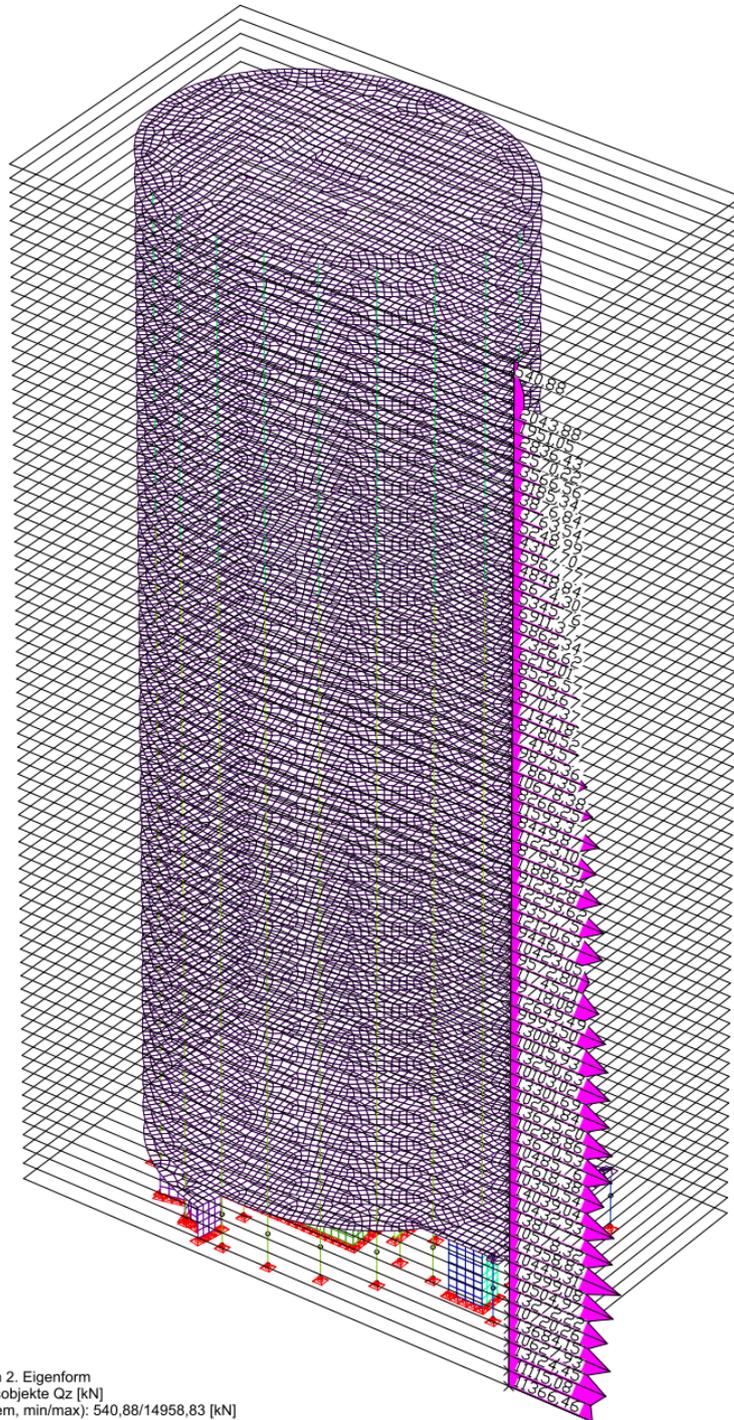
LF ASP.1: Antwortspektrum 1. Eigenform
Schnittgrößen Bemessungsobjekte Mz [kNm]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -992859,44/-426,88 [kNm]



LF ASP.1: Antwortspektrum 1. Eigenform
Schnittgrößen Bemessungsobjekte Q_y [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 497,41/13692,50 [kN]

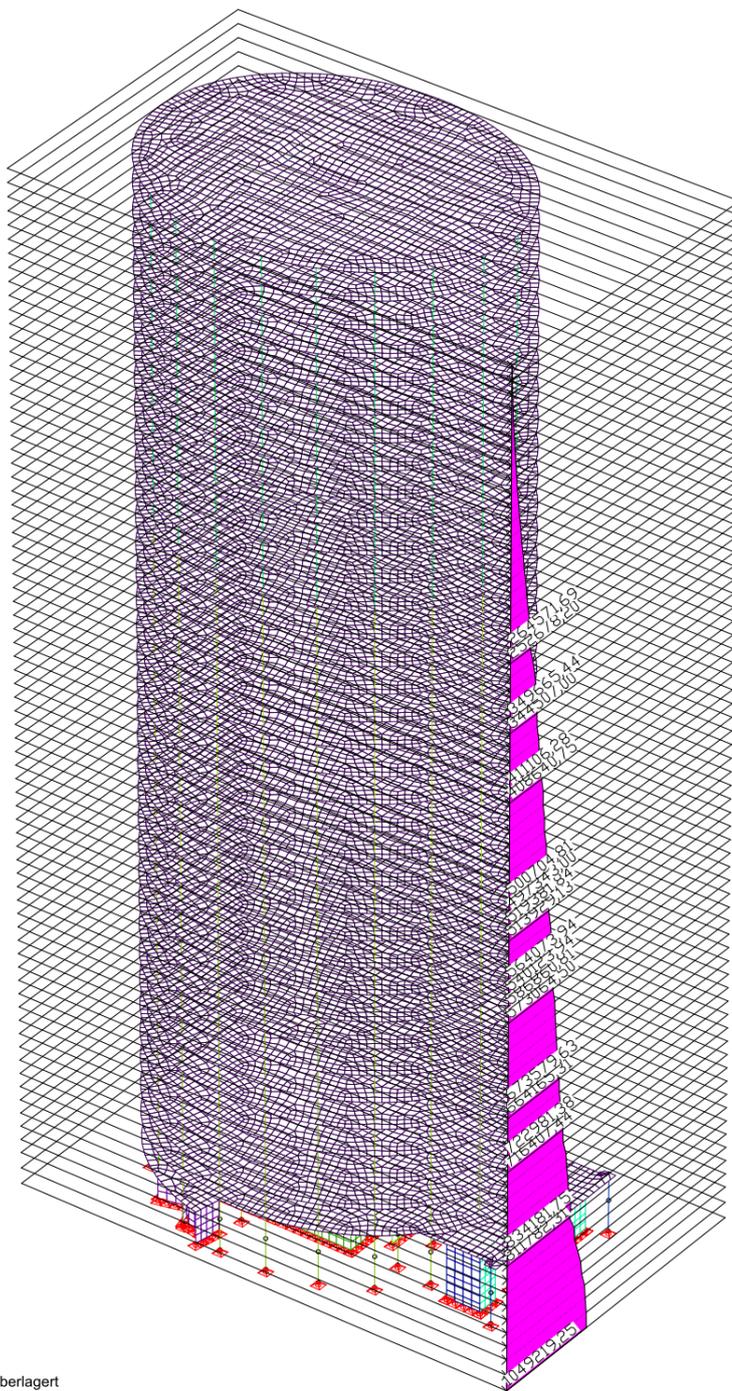


LF ASP.2: Antwortspektrum 2. Eigenform
Schnittgrößen Bemessungsobjekte My [kNm]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -1083161,00/1812,64 [kNm]

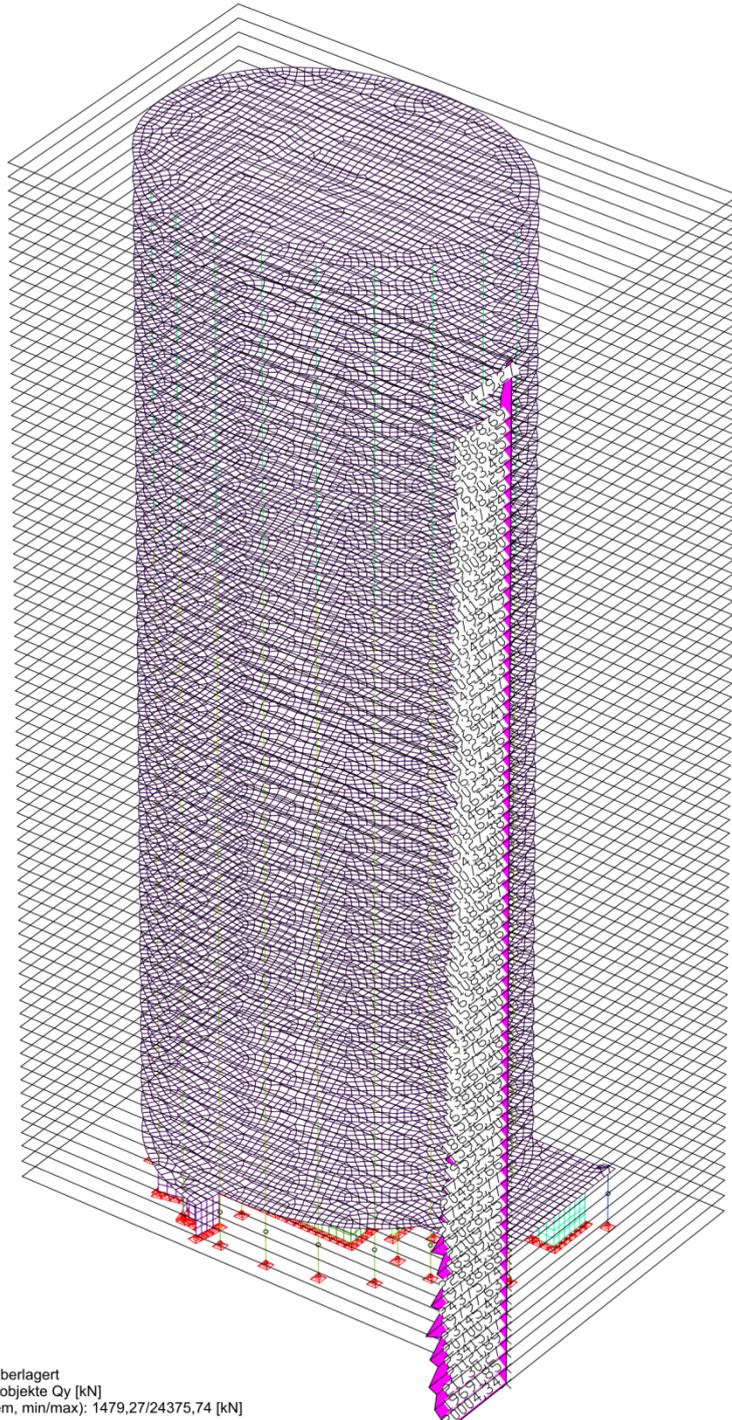


LF ASP.2: Antwortspektrum 2. Eigenform
Schnittgrößen Bemessungsobjekte Qz [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 540,88/14958,83 [kN]

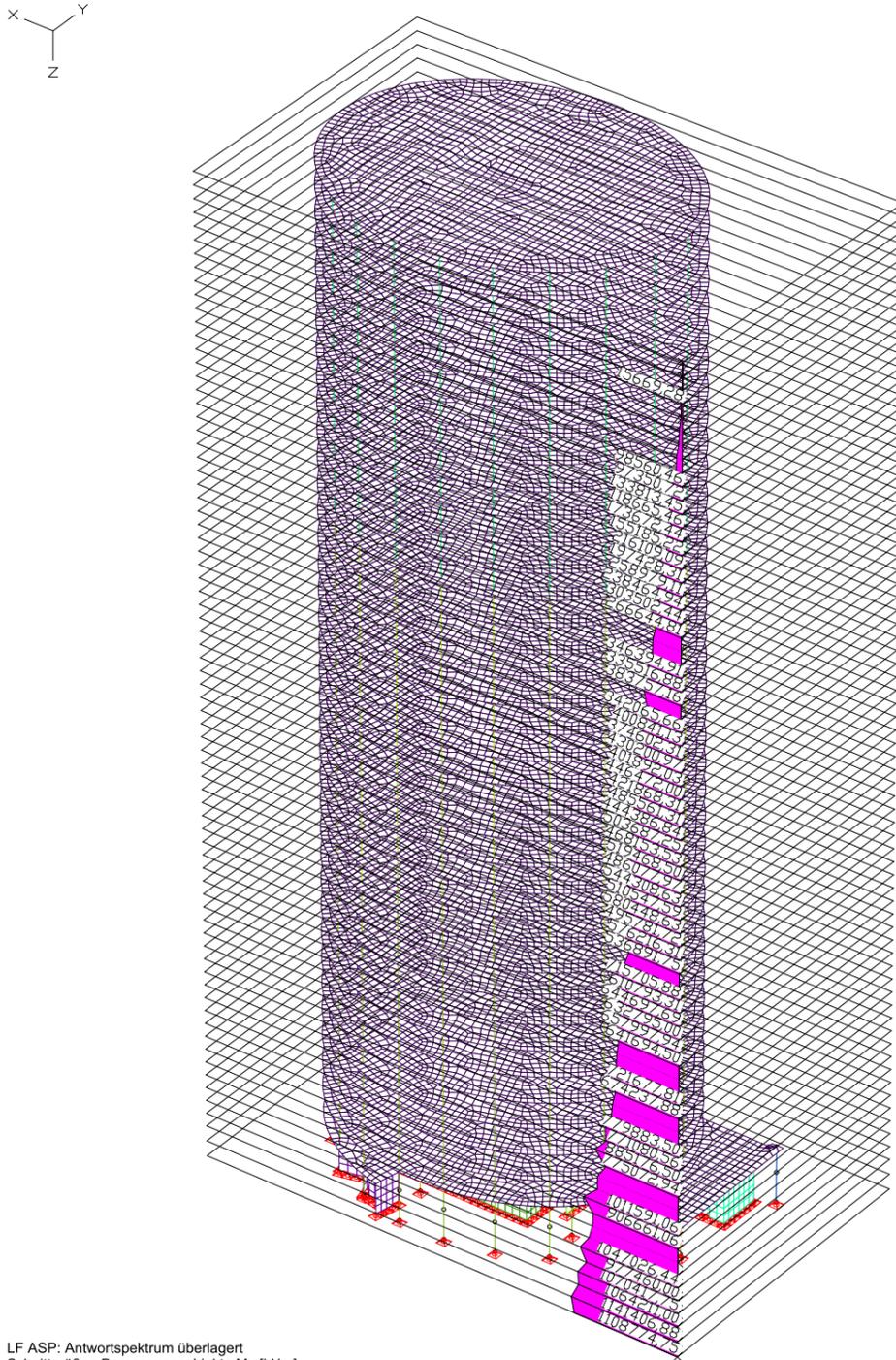
8.8 Überlagerte Schnittkräfte aus der Erdbebenbe- rechnung



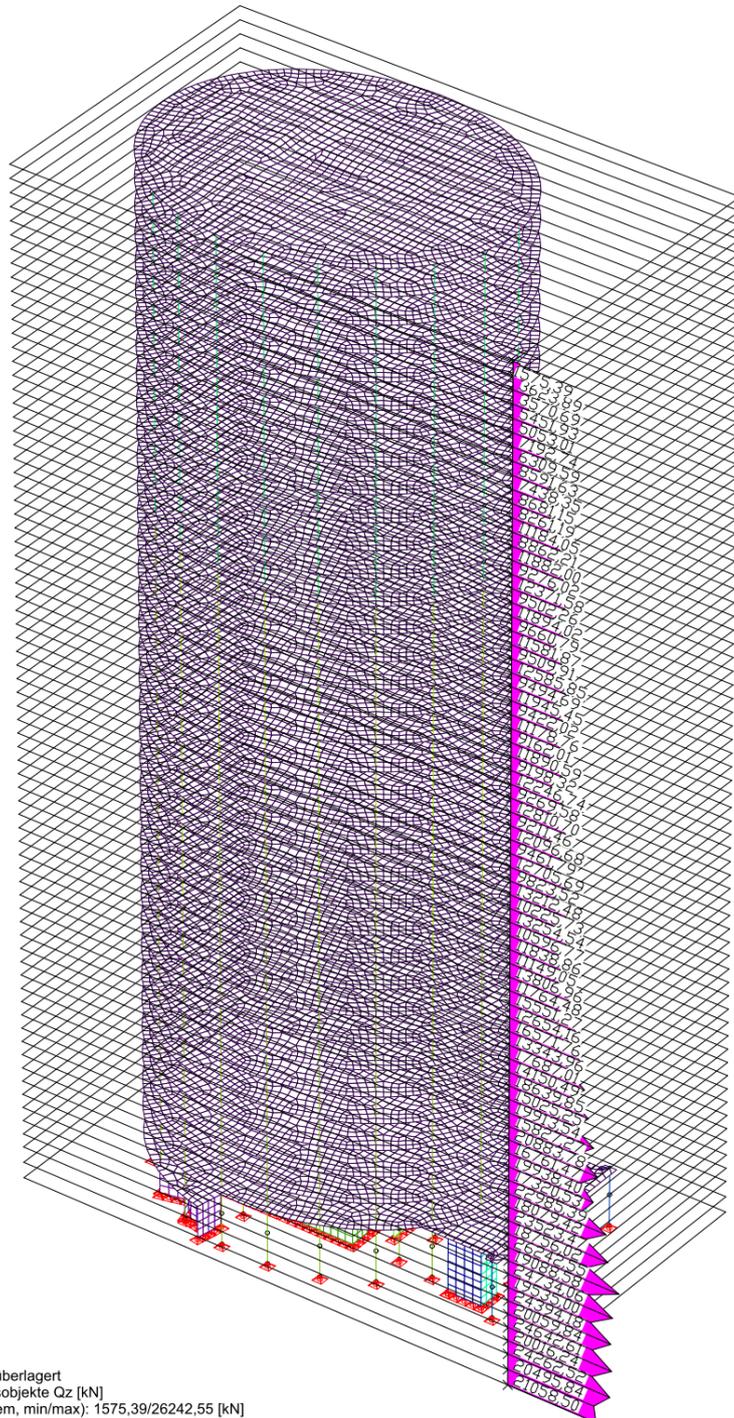
LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen Bemessungsobjekte M_z [kNm]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 3097,84/1049219,25 [kNm]



LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen Bemessungsobjekte Q_y [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 1479,27/24375,74 [kN]



LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen Bemessungsobjekte My [kNm]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 2962.50/1141406,88 [kNm]



LF ASP: Antwortspektrum überlagert
Schnittgrößen Bemessungsobjekte Qz [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): 1575,39/26242,55 [kN]

8.9 Zusammenfassung

Die Berechnungsmethode mit einem 3D-Modell kann mitunter sehr aufwändig werden, dennoch ist sie die genaueste Methode, da sie alle Eigenformen berücksichtigt.

Obwohl in dieser Arbeit nicht näher auf Torsion eingegangen wird, wird an dieser Stelle erwähnt dass die Methode mit 3D-Modell vor allem bei der Torsionsberechnung ihre Vorteile hat, da sie schon etwaige Unterschiede zwischen Schwerpunkt und Schubmittelpunkt durch die Eingabe der gesamten Geometrie berücksichtigt.

Die Schnittkräfte dieser 3D-Berechnung berücksichtigen allerdings nur ~86 % der modalen Masse, da eine 90 %-ige Berücksichtigung zu einem zu hohen Rechenaufwand führt.

Bei der Erstellung des 3D Modells ist darauf zu achten bei einer Kernbauweise alle Riegel zwischen den Wänden zu modellieren, da sie wesentlich die horizontale Steifigkeit des Kerns beeinflussen (siehe Kapitel 9). Es sollte auch immer überlegt werden, welche Vereinfachungen in der Modellierung getroffen werden können, um sich gegebenenfalls Aufwand zu ersparen.

Ein weiterer Vorteil, den das Benutzen eines 3D-Systems mit sich bringt, ist die Aufteilung der Schnittkräfte direkt auf die einzelnen Bauteile des Bauwerks, was beim 2D-System erst nach durch Verteilung anhand der horizontalen Steifigkeiten geschieht.

Da man sich die aufwändige Beurteilung der Regelmäßigkeit im Grund- und Aufriss erspart und genauere Ergebnisse vorliegen, ist in vielen Fällen die Erstellung eines 3D-Modells die bevorzugte Variante.

9 Vergleich der Steifigkeiten der Systeme

Dieses Kapitel enthält Auszüge aus dem Programm InfoCAD.

9.1 Ermittlung der Steifigkeit am 3D-System mit Berücksichtigung der Riegel

Vorgangsweise:

- Aufbringen einer 1,0 kN/m² Last auf dem Dach des 3D-Systems
- Ermittlung der Durchbiegung des 3D-Systems
- Berechnung der Ersatzsteifigkeit anhand eines Kragarmsystems

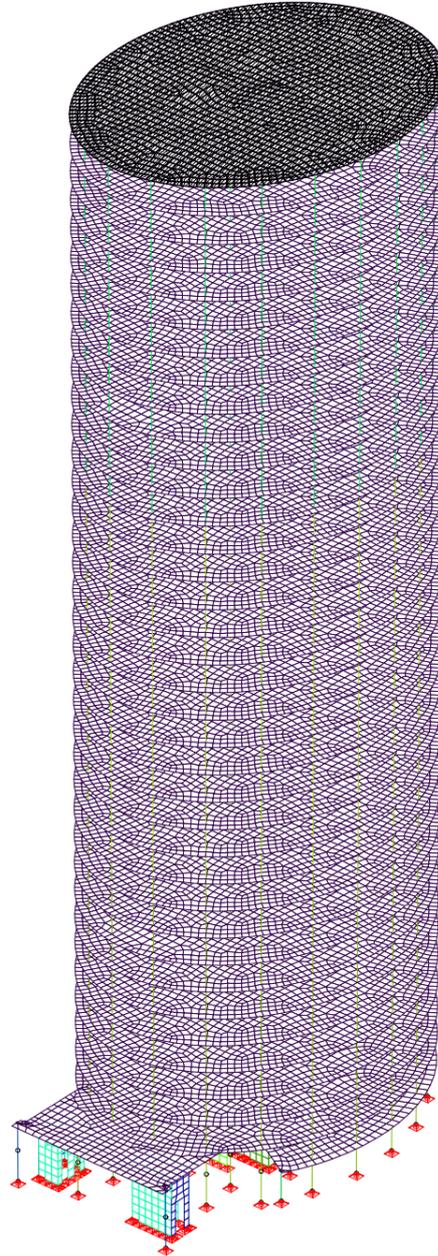
$$f = \frac{F * l^3}{3 * E * I} \rightarrow I = \frac{F * l^3}{3 * E * f}$$

Die Kraft F wird aus der Summe der aufgetragenen Flächenlast berechnet und dem Programm InfoCAD entnommen.

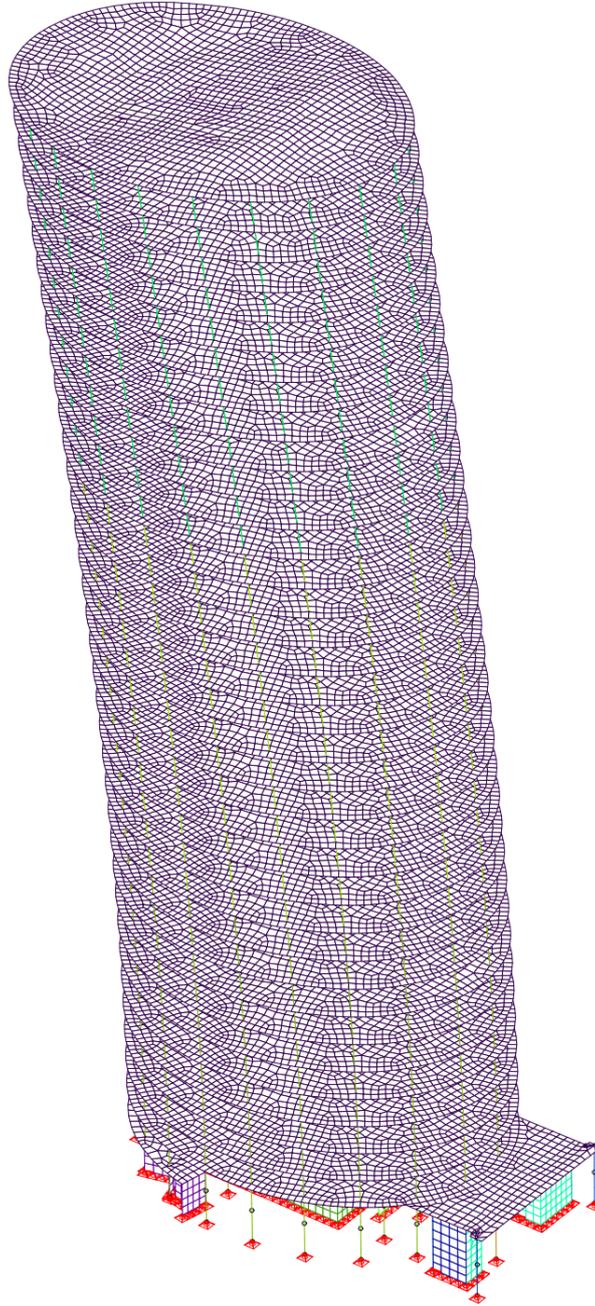
Summe der aufgetragenen Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	Eigengewicht	0,000	-0,000	581220,125
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	581220,125
2	Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 ...	-0,000	-0,000	78559,445
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	78559,445
3	Eigengewicht Dachaufbau 4,0 kN/m ²	-0,000	-0,000	5185,638
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	5185,638
11	Nutzlast Geschoß 3,8 kN/m ²	-0,000	0,000	175603,453
	Auflagerreaktionen	-0,000	-0,000	175603,453
12	Nutzlast Dach 3,0 kN/m ²	-0,000	-0,000	3889,229
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	3889,229
21	Last in x-Richtung zur Bestimmung ...	1296,410	0,000	-0,000
	Auflagerreaktionen	1296,410	0,000	0,000
22	Last in y-Richtung zur Bestimmung ...	0,000	1296,410	-0,000
	Auflagerreaktionen	0,000	1296,410	0,000

Berechnung von I_y



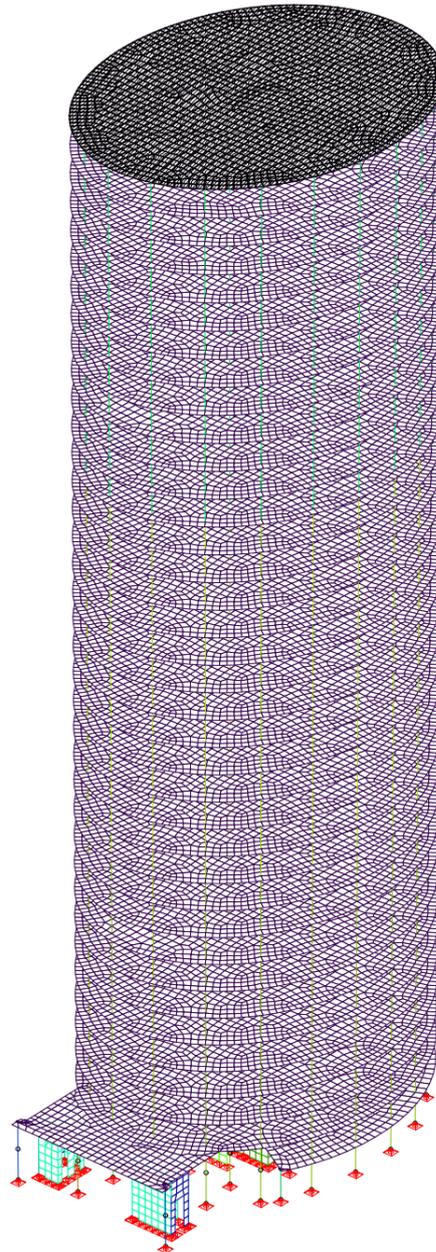
LF 21: Belastung, Last in x-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²



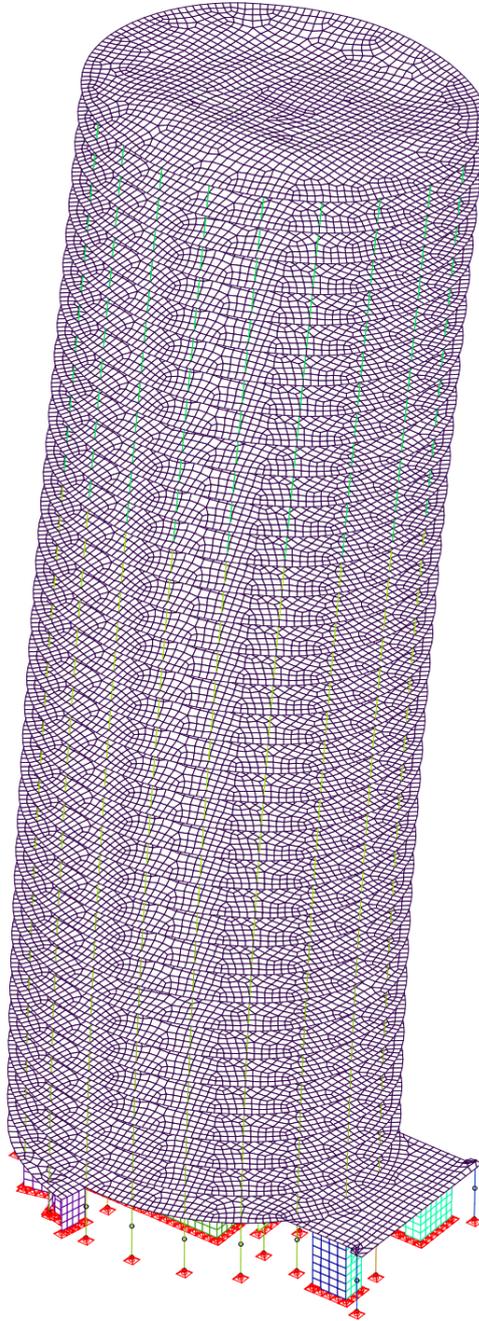
LF 21: Last in x-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²
Deformationen u [mm], Faktor = 1697,5
Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/8,53 [mm]

$$I_y = \frac{F_y * l^3}{3 * E * f_y} = \frac{1,29641 * 130,09^3}{3 * 34000 * 0,00853} = 3280,39 \text{ m}^4$$

Berechnung von I_z



LF 22: Belastung, Last in y-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit $1,0 \text{ KN/m}^2$



LF 22: Last in y-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²
 Deformationen u [mm], Faktor = 1663,4
 Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/8,70 [mm]

$$I_z = \frac{F_z * l^3}{3 * E * f_z} = \frac{1,29641 * 130,09^3}{3 * 34000 * 0,00870} = 3216,29 \text{ m}^4$$

9.2 Ermittlung der Steifigkeit am 2D System mit Berücksichtigung der Riegel

Die Berechnung wurde in Kapitel 3.2 Trägheitsmomente der tragenden Bauteile bereits durchgeführt.

Ergebnisse:

$$I_y = 3211,42 \text{ m}^4$$

$$I_z = 2962,24 \text{ m}^4$$

9.3 Ermittlung der Steifigkeit am 3D-System ohne Berücksichtigung der Riegel

Vorgangsweise:

- Aufbringen einer 1,0 kN/m² Last auf dem Dach des 3D-Systems
- Ermittlung der Durchbiegung des 3D-Systems
- Berechnung der Ersatzsteifigkeit anhand eines Kragarmsystems

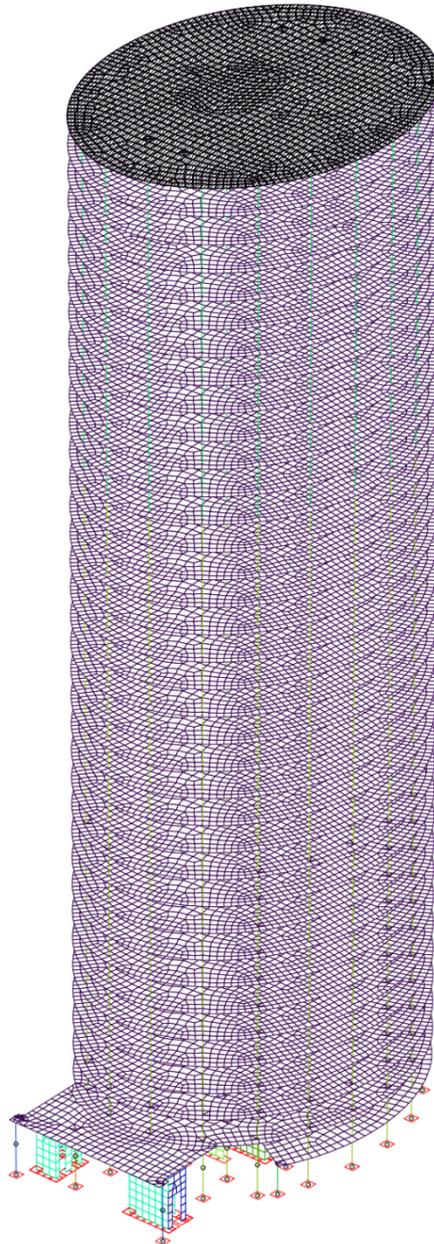
$$f = \frac{F * l^3}{3 * E * I} \rightarrow I = \frac{F * l^3}{3 * E * f}$$

Die Kraft F wird aus der Summe der aufgetragenen Flächenlast berechnet und dem Programm InfoCAD entnommen.

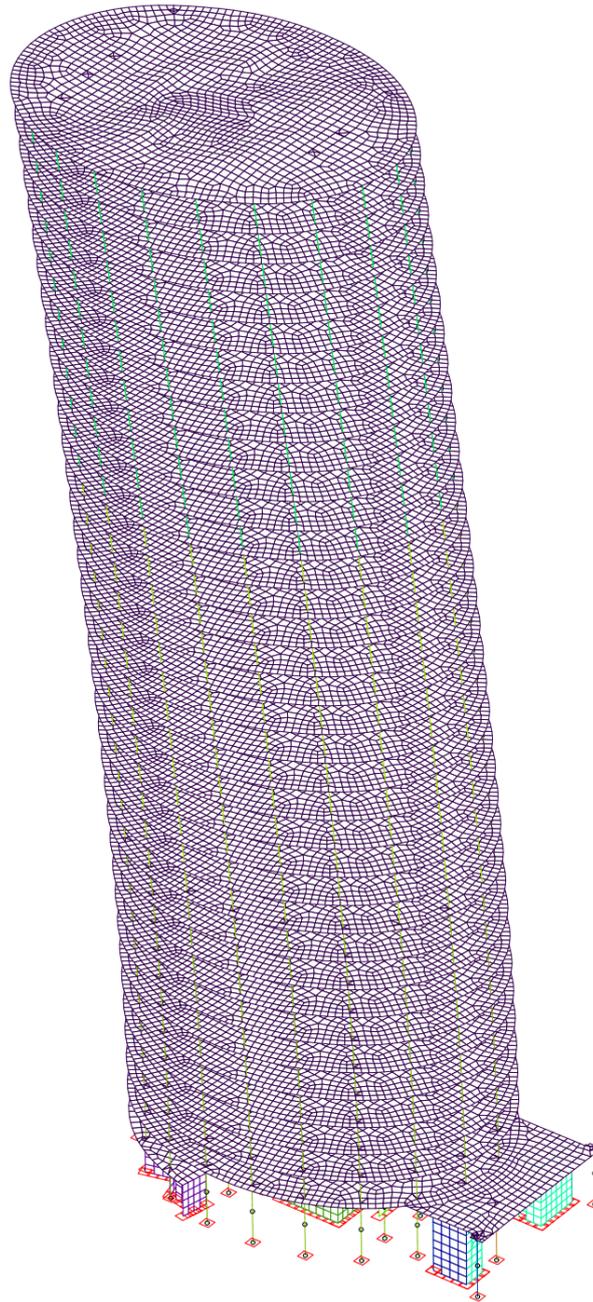
Summe der aufgetragenen Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	Eigengewicht	0,000	-0,000	581220,125
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	581220,125
2	Eigengewicht Fußbodenaufbau 1,7 ...	-0,000	-0,000	78559,445
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	78559,445
3	Eigengewicht Dachaufbau 4,0 kN/m ²	-0,000	-0,000	5185,638
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	5185,638
11	Nutzlast Geschoß 3,8 kN/m ²	-0,000	0,000	175603,453
	Auflagerreaktionen	-0,000	-0,000	175603,453
12	Nutzlast Dach 3,0 kN/m ²	-0,000	-0,000	3889,229
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	3889,229
21	Last in x-Richtung zur Bestimmung ...	1296,410	0,000	-0,000
	Auflagerreaktionen	1296,410	0,000	0,000
22	Last in y-Richtung zur Bestimmung ...	0,000	1296,410	-0,000
	Auflagerreaktionen	0,000	1296,410	0,000

Berechnung von I_y



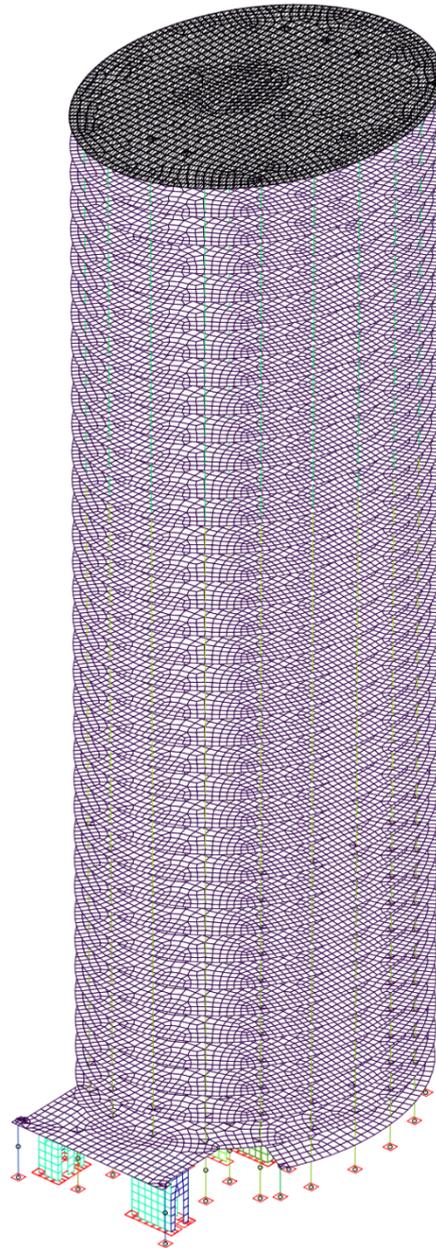
LF 21: Belastung, Last in x-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²



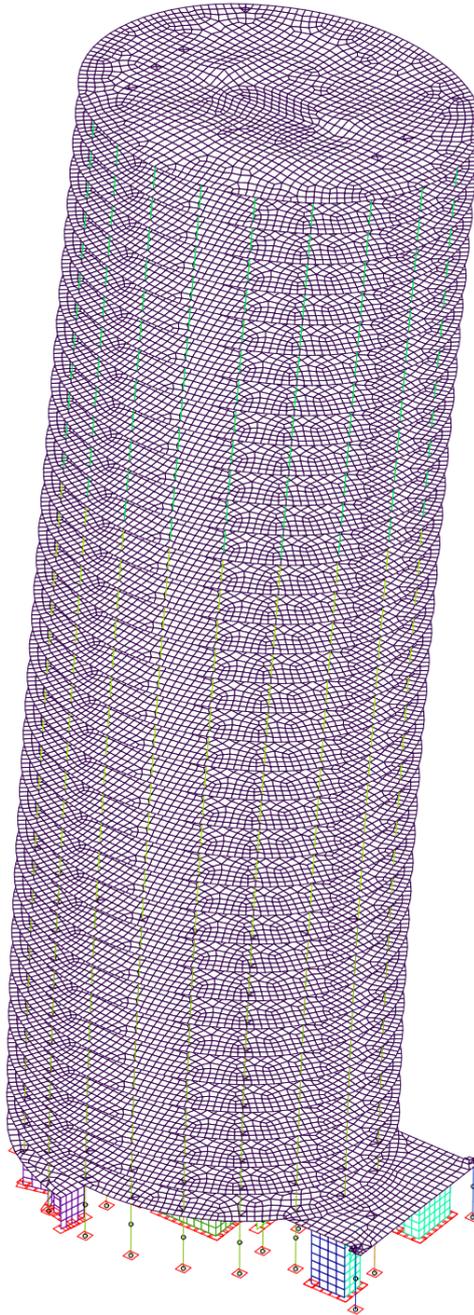
LF 21: Last in x-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²
 Deformationen u [mm], Faktor = 1012,9
 Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/14,29 [mm]

$$I_y = \frac{F_z * l^3}{3 * E * f_z} = \frac{1,29641 * 130,09^3}{3 * 34000 * 0,014288} = 1958,40 \text{ m}^4$$

Berechnung von I_z



LF 22: Belastung, Last in y-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²



LF 22: Last in y-Richtung zur Bestimmung der Steifigkeit 1,0 KN/m²
 Deformationen u [mm], Faktor = 726,7
 Wertebereich (Teilsystem, min/max): 0,00/19,92 [mm]

$$I_z = \frac{F_y * l^3}{3 * E * f_y} = \frac{1,29641 * 130,09^3}{3 * 34000 * 0,019916} = 1404,99 \text{ m}^4$$

9.4 Ermittlung der Steifigkeit am 2D System ohne Berücksichtigung der Riegel

Da die Riegel nicht berücksichtigt werden, gelten die einzelnen Wände und Wandgruppen als voneinander unabhängige Bauteile. Die einzige Verbindung zueinander ist die Geschossdecke. Da jedoch diese sehr dünn ist, wird sie nicht weiter berücksichtigt und deshalb darf der Steineranteil bei der Berechnung der Trägheitsmomente vernachlässigt werden.

Vorgehensweise:

1. Die Trägheitsmomente der einzelnen Wände wird (für Wände mit rechteckigem Grundriss) mit der Formel $\frac{l^3*d}{12}$ berechnet, wobei l die Länge der Wand und d die Dicke der Wand ist.
2. Die Trägheitsmomente der Wandgruppen werden mit dem Programm InfoCAD berechnet (siehe Kapitel 3.2).
3. Die gesamten Trägheitsmomente des Kerns erhält man durch Summierung der einzelnen Trägheitsmomente der Wände und der Wandgruppen.

i	Ly [m]	Lz [m]	Iy [m ⁴]	Iz [m ⁴]
4	1,560	0,250	0,00	0,08
5	1,560	0,250	0,00	0,08
8	1,560	0,250	0,00	0,08
11	5,670	0,280	0,00	4,25
12	8,640	0,280	0,00	15,05
14	1,560	0,250	0,00	0,08
15	1,560	0,250	0,00	0,08
18	1,560	0,250	0,00	0,08
26	0,180	3,300	0,54	0,00
27	0,180	3,300	0,54	0,00
30	0,300	1,145	0,04	0,00
31	0,300	1,145	0,04	0,00
32	0,180	3,300	0,54	0,00
33	0,180	3,300	0,54	0,00
1/3/22 (WG A)			87,34	98,31
13/20/34 (WG A)			87,34	98,31
2/7/9/24/25 (WG B)			83,13	77,14
17/19/21/36/37 (WG B)			83,13	77,14
6/23 (WG C)			0,94	0,04
16/35 (WG C)			0,94	0,04
10/28/29 (WG D)			0,20	46,37
Σ			345,25	417,13

Trägheitsmomente	
Iy	345,25 m ⁴
Iz	417,13 m ⁴

Tabelle 9-1 Berechnung der Trägheitsmomente ohne Berücksichtigung der Riegel

9.5 Zusammenfassung

Vergleich der Steifigkeiten	I_y [m ⁴]	I_z [m ⁴]
3D Berechnung mit Riegel	3280,39	3216,29
2D Berechnung mit Riegel	3211,42	2962,24
3D Berechnung ohne Riegel	1958,40	1404,99
2D Berechnung ohne Riegel	345,25	417,13

Tabelle 9-2 Vergleich der Stetigkeiten der unterschiedlichen Systeme

Man erkennt, dass die Riegel sehr wichtig sind, um bei einem Bauwerk mit Kernbauweise eine vernünftige Steifigkeit zu erreichen. Durch eine Ausführung mit Riegel darf immer der Steineranteil mit berücksichtigt werden.

Der Unterschied in der Steifigkeit vom 2D- und 3D-Systemen begründet sich auf die zusätzliche Wirkung der Decke, welche sich noch deutlicher bei den Systemen ohne Riegel zeigt. Beim Vergleich 3D-Berechnung mit Riegel und 2D-Berechnung mit Riegel findet man, durch Berücksichtigung der Riegel, kaum Unterschiede. Der Unterschied der Trägheitsmomente I_z begründet sich durch das nicht Berücksichtigen des Steineranteils der Wände W26, W27, W32 und W33, die beim 3D-System durch die Decke mit den anderen Teilquerschnitten des Kerns verbunden ist und so sich das Trägheitsmoment erhöht. Jedoch wurde im 3D-System linear gerechnet. Die dadurch größere Beeinflussung der Decke auf die Steifigkeit des Kerns sollte nicht überschätzt werden.

Man erkennt die Wichtigkeit der Riegel beim Vergleich der Steifigkeiten der 2D-Systemen. Die Vernachlässigung der Riegel und dadurch des Steineranteils ergibt eine Steifigkeitsabminderung vom Faktor 9,3 bei I_y und vom Faktor 7,1 bei I_z und macht das Bauwerk damit extrem weich. Eine interessante Tatsache ist, dass durch die Berücksichtigung der Riegel sich I_y größer wird als I_z .

Die 2D-Querschnittbetrachtung kann also relativ gute Resultate liefern und bietet daher eine gute Alternative zu 3D-Systemen bei nicht zu komplexen Grundrissgestaltungen.

10 Auswertung und Ergebnisse

Das Thema Erdbeben ist sehr komplex und wird im Eurocode 8 behandelt. Jedoch muss man sagen, dass diese Norm sehr groß und unübersichtlich gestaltet ist. Auch gibt es viele Formeln, die unzureichend beschrieben sind bzw. deren Hintergrund unklar ist.

Die in der Tabelle 10-1 dargestellten Schnittkräfte stellen die Momente und Querkräfte an der Fundamentoberkante des Bauwerks da. Man erkennt, dass es große Unterschiede zwischen dem vereinfachten und den multimodalen Verfahren gibt. Die Momente sind im Schnitt um 150 % größer als im 3D System, was unter Umständen zu einer unwirtschaftlichen Ausführung des Bauwerks führen kann. Der Grund dieser zu großen Momente beim vereinfachten Antwortspektrumverfahren liegt in der alleinigen Berücksichtigung von ausschließlich der ersten Eigenform in jeder Richtung. Das ist auch der Grund, dass die Querkräfte in Höhe der Fundamentoberkante unterschätzt werden.

Ergebnisse	Mz [KNm]	Abweichung Mz zum 3D System [%]	Qy [KN]	Abweichung Qy zum 3D System [%]	My [KNm]	Abweichung My zum 3D System [%]	Qz [KN]	Abweichung Qz zum 3D System [%]
2D Modell vereinfachtes Antwort- spektrumverfahren	1639524,25	156 %	17157,20	86 %	1660543,25	145 %	17377,18	83 %
2D Modell multimodales Antwort- spektrumverfahren	1114380,75	106 %	20397,26	102 %	1126196,69	99 %	20463,91	97 %
3D Modell multimodales Antwort- spektrumverfahren	1049219,25	100 %	20004,34	100 %	1141406,88	100 %	21058,50	100 %

Tabelle 10-1 Zusammengefasste Ergebnisse der Schnittkraftberechnung

Es lässt sich auch erkennen, dass ein 2D-System sehr wohl gute Resultate liefern kann, wenn die Ergebnisse nach der Berechnungsmethode des multimodalen Antwortspektrumverfahrens ermittelt werden. Die Abweichung bewegt sich in diesem Fall im 6 %-Bereich.

Zwar deutet dieses Ergebnis darauf hin, dass es im Grunde immer schneller ist, die Schnittkräfte, falls erlaubt (Regelmäßigkeit im Grundriss), anhand eines ebenen Modells zu be-

rechnen. Doch das ist in vielen Fällen falsch. Um ein vernünftiges 2D-Modell erstellen zu können muss zuerst geprüft werden, ob diese Art der Modellbildung überhaupt zulässig ist, was mit erheblichem Rechenaufwand verknüpft ist. Überdies ist es in vielen Fällen nur über vereinfachte Annahmen möglich, gewisse Eigenschaften des Bauwerks zu ermitteln, wie das zum Beispiel in dieser Arbeit bei der Ermittlung des Schubmittelpunkts und der Torsionssteifigkeit der Fall war. Auch ist die händische Berechnung der Steifigkeiten des Bauwerks mit einigem Aufwand verbunden und kann nie so genau sein wie die Berechnung mit einem 3D-System, da eventuell vorhandene Riegel, welche die einzelnen Wände und Wandgruppen miteinander verbinden, die Steifigkeit des Geschosses so beeinflussen, dass man die Gesamtwirkung händisch kaum genau erfassen kann. Die Wirkung der Decke, welche auch eine Verbindung darstellt, wird bei der händischen Berechnung prinzipiell ganz außer Betracht gelassen. Bei der 3D-Modellierung wird linear gerechnet, was zu einer zu großen Beeinflussung der Decke auf die Steifigkeit führt (wie bereits in Kapitel 9.5 beschrieben). Da jedoch nach Rissbildung die Steifigkeit der Decke stark abnimmt, sollte man diesen Einfluss nicht überschätzen.

Werden die Schnittkräfte über ein ebenes Modell ermittelt, müssen sie im Anschluss erst auf die einzelnen Wände und Wandgruppen aufgeteilt werden, wodurch ein erneuter Rechenaufwand entsteht. Auch bei der Berücksichtigung der Torsion ist ein 3D-Modell genauer.

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass es nur bei sehr einfachen Systemen Sinn macht ebene Modelle zu benutzen, aber dass für die Berechnung von Gebäuden generell ein 3D-Modell sinnvoll ist.

Abschließend lässt sich noch sagen, dass, obwohl Erdbeben in Österreich nur eine untergeordnete Rolle spielen, es Sinn macht sich als Bauingenieur näher mit dem Thema zu beschäftigen.

Literaturverzeichnis

- [1] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT. ÖNORM EN 1998-1. *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. 2013.
- [2] —. ÖNORM B 1998-1. *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. 2011.
- [3] —. ÖNORM EN 1990. *Eurocode Grundlagen der Tragwerksplanung*. 2013.
- [4] Flesch, Rainer. *Baudynamik praxisgerecht - Band 1 Berechnungsgrundlagen*. Berlin: Bauverlag GmbH, 1993.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Regelgeschossflächen zur Ermittlung des ständigen Lasten.....	5
Abbildung 3-1	Regelgeschoss (OG 12) zur Berechnung der Eigenschaften des Bauwerks	7
Abbildung 3-2	Teilquerschnitte.....	8
Abbildung 3-3	Steifigkeiten der Wandgruppen	11
Abbildung 5-1	Form des elastischen Antwortspektrum [1 S. 33]	26
Abbildung 5-2	Wandlängen zur Bestimmung von α_0	29
Abbildung 5-3	Untersuchungsbereich der Masterarbeit.....	41
Abbildung 6-1	Konzentrierte Punktmassen in der Höhe der Geschosdecken	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Berechnung des Schwerpunkts vom Teilquerschnitt 1	9
Tabelle 3-2	Berechnung des Schwerpunkts vom Teilquerschnitt 2	9
Tabelle 3-3	Berechnung des Schwerpunkts vom gesamten Kern.....	10
Tabelle 3-4	Berechnung der Trägheitsmomente vom Teilquerschnitt 1	12
Tabelle 3-5	Berechnung der Trägheitsmomente vom Teilquerschnitt 2	12
Tabelle 3-6	Berechnung der Trägheitsmomente vom gesamten Kern	13
Tabelle 3-7	Berechnung des Schubmittelpunkts	15
Tabelle 3-8	Berechnung der Torsionssteifigkeit.....	16

Tabelle 4-1	Auswirkung der konstruktiven Regelmäßigkeit auf die Erdbebenberechnung und Erdbebenauslegung [1]	17
Tabelle 5-1	Festlegung der γI -Werte[2]	24
Tabelle 5-2	Parameterwerte zur Beschreibung der empfohlenen elastischen Antwortspektren vom Typ 1 [1]	31
Tabelle 6-1	Kombinationsbeiwert ψ_{2i} im Hochbau [3]	43
Tabelle 6-2	Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte in y -Richtung auf die Massenpunkte	58
Tabelle 6-3	Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte in y -Richtung auf die Massenpunkte	59
Tabelle 7-1	Berechnung der modalen Masse der ersten Eigenform	81
Tabelle 7-2	Berechnung der modalen Masse der zweiten Eigenform	82
Tabelle 7-3	Berechnung der modalen Masse der dritten Eigenform	83
Tabelle 7-4	Berechnung der modalen Masse der vierten Eigenform	84
Tabelle 7-5	Berechnung der modalen Masse der fünften Eigenform	85
Tabelle 7-6	Berechnung der modalen Masse der sechsten Eigenform	86
Tabelle 7-7	Berechnung der modalen Masse der siebenten Eigenform	87
Tabelle 7-8	Berechnung der modalen Masse der achten Eigenform	88
Tabelle 7-9	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der ersten Eigenform	90
Tabelle 7-10	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der zweiten Eigenform	91
Tabelle 7-11	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der dritten Eigenform	92
Tabelle 7-12	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der vierten Eigenform	93
Tabelle 7-13	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der fünften Eigenform	94
Tabelle 7-14	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der sechsten Eigenform	95
Tabelle 7-15	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der siebenten Eigenform	96
Tabelle 7-16	Berechnung der horizontalen Erdbebenkräfte der achten Eigenform	97

Tabelle 9-1	Berechnung der Trägheitsmomente ohne Berücksichtigung der Riegel.....	164
Tabelle 9-2	Vergleich der Stetigkeiten der unterschiedlichen Systeme	165
Tabelle 10-1	Zusammengefasste Ergebnisse der Schnittkraftberechnung.....	166

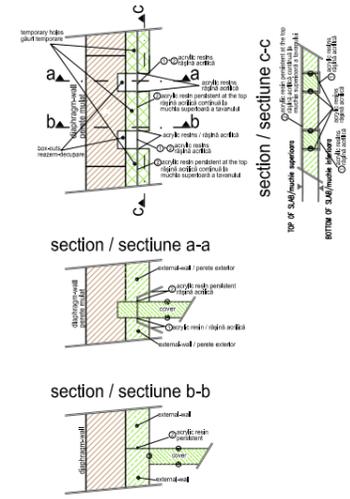
Anhang

A1. Konstruktionsübersichtspläne

Die, sich im Anhang A1 befindenden, Konstruktionsübersichtspläne entstammen dem Projekt. Sie sind ohne Maßstab abgebildet und bilden die Grundlage dieser Masterarbeit.

slab above 5^obasement scale 1:100
 placa peste etajul 5^osubsol - cota -14.42 scara 1:100

sealing cover-external wall slab (cover) above 5^obasement
 capac de inchidere - perete exterior placa peste etajul 5^o subsoal
 scale / scara 1:50



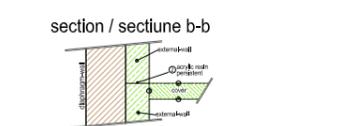
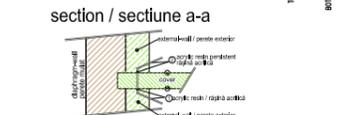
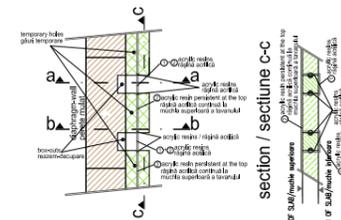
materials:
 concrete: C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C50/60
 rebar quality: S500c

NO.	DATE	DESCRIPTION	BY	CHECKED

FLOREASCA CITY-CENTER SKY TOWER BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246		
S.C. FAL STRUCTURAL EXPERTS S.R.L. RO-BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 38 TEL: 0744 100000		
S.C. CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L. RO-BUCHAREST, SECTOR 2, Str. Dr. Ion. Gh. Ionescu nr. 11 UJ: 2318717 constructiv97@gmail.com		
STRUCTURE PROIECT DE STRUCTURA		
slab above 5 ^o basement placa peste etajul 5 ^o subsol - cota -14.42		DATE 1:100 Feb.2011
322 Fl. 3 ST SOV US - 000 00 A-		D.T.A.C.

slab above 3^obasement scale 1:100
 placa peste etajul 3^osubsol - cota -7.86 scara 1:100

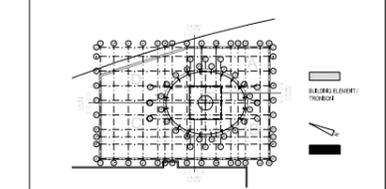
sealing cover-external wall
 slab (cover) above 3^o basement
 capac de inchidere - perete exterior
 placa peste etajul 3^o subsol
 scale / scara 1:50



materials:
 concrete: C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C50/60
 rebar quality: S500c

NO.	DATE	BY	REVISION

FLOREASCA CITY-CENTER SKY TOWER BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246		
S.C. FAL STRUCTURAL EXPERTS S.R.L. RO-BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 31		
S.C. CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L. BUCHAREST, SECTOR 2, Str. Dnieu Crutacu nr.11 UJ 2318717 constructia97@gmail.com		
TEL: 0744 100000		



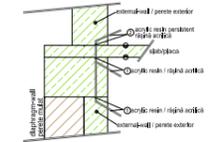
STRUCTURE PROIECT DE STRUCTURA		02-02-2011 15/02/2011 Feb, 2011
slab above 3 ^o basement placa peste etajul 3 ^o subsol - cota -7.86		1:100 Feb, 2011
D.T.A.C.		000 00 A-

322	Fl.	3	ST	SOV	US	-	000	00	A-
-----	-----	---	----	-----	----	---	-----	----	----

slab above 2°basement scale 1:100
 placa peste etajul 2°subsol - cota -4.58 scara 1:100

sealing slab-external wall
 slab above 2°basement
 placa peste etajul 2°subsol-perete exterior

section / sectiune
 scale / scara 1:50



materials:

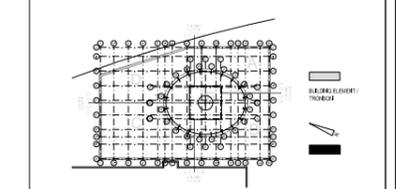
concrete: C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C50/60
 rebar quality: S500c

NO.	DATE	DESCRIPTION	BY

FLOREASCA CITY-CENTER SKY TOWER
 BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246

S.C. F&L STRUCTURAL EXPERTS S.R.L.
 RO-BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 3F

SC CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L.
 RO-BUCHAREST, SECTOR 2, Str. Dinu Patrilas nr.11
 UF 2318717 constructiv97@gmail.com

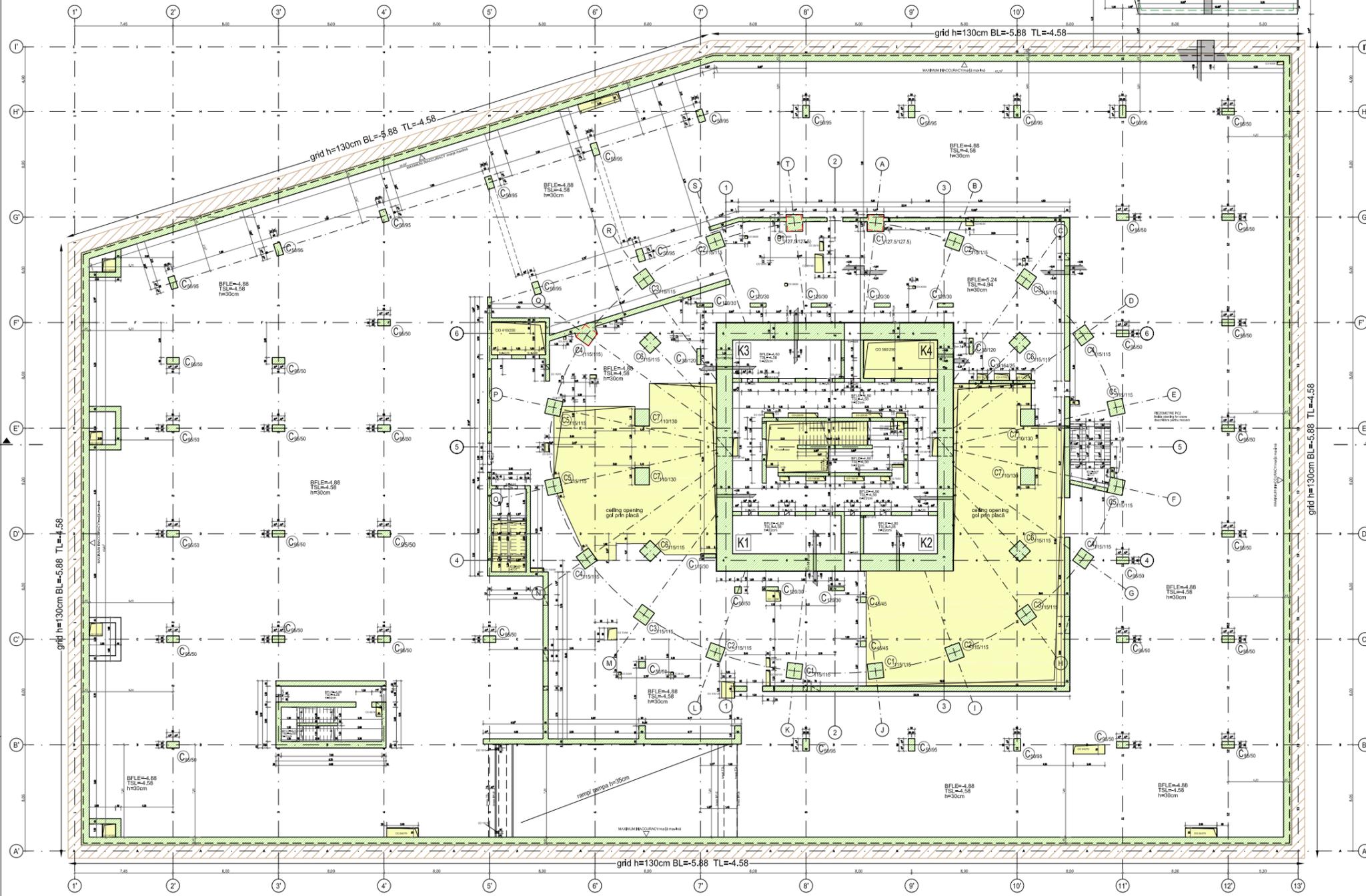


NO.	DATE	DESCRIPTION	BY

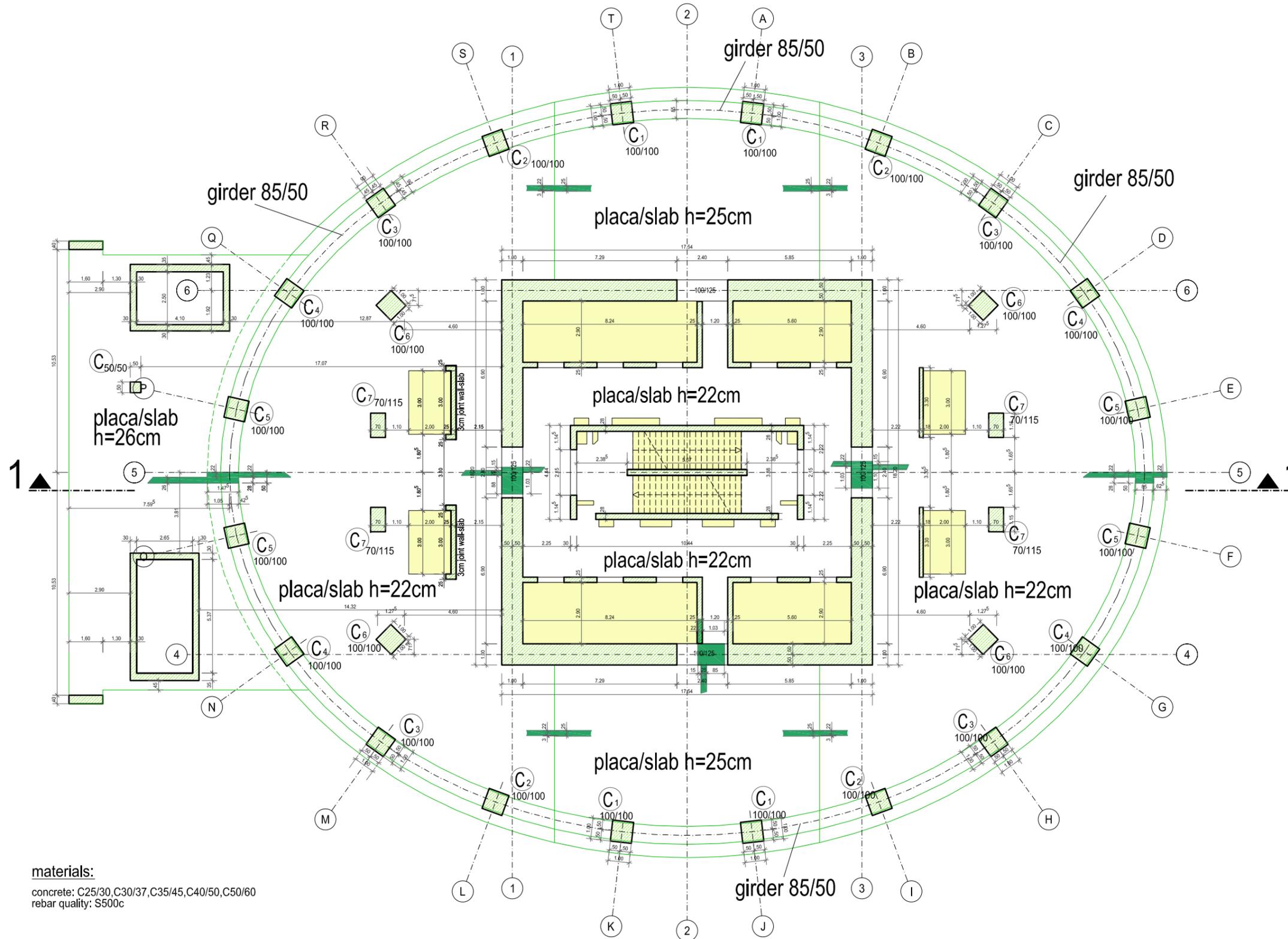
STRUCTURE
 PROIECT DE STRUCTURA

slab above 2°basement
 placa peste etajul 2°subsol - cota -4.58

302	Fl.	3	ST	SOV	UZ	-	000	00	A-
-----	-----	---	----	-----	----	---	-----	----	----



placa peste etajul 1° / slab above 1° floor
 scara / scale 1:100

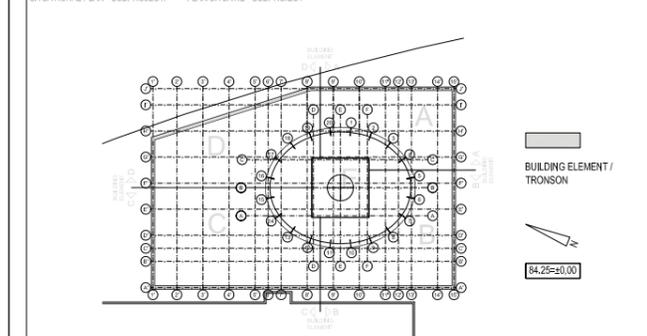


materials:
 concrete: C25/30,C30/37,C35/45,C40/50,C50/60
 rebar quality: S500c

REVISION NR. / INDEX	DATE / DATA	EDITED BY / REDACTAT	MODIFICATIONS / MODIFICARI
00	Feb.2011	ok	-

302_FL-3_ST_SOV_01_-000_00_A

PROJECT / PROIECT FLOREASCA CITY-CENTER		SUBPROJECT / SUBPROIECT SKY TOWER	
ADDRESS / ADRESA BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246			
BENEFICIARY / BENEFICIAR SC FLOREASCA CITY CENTER SRL RO - BUCHAREST, SECTOR 1 CALEA FLOREASCA 175, ETAJ 1, CAMERA 3			
DRAWING AUTHOR / PROIECTANT S.C. F&L STRUCTURAL EXPERTS S.R.L. RO-BUCHAREST, SECTOR 1 CALEA FLOREASCA 39		PROJECTANT LOCAL / LOCAL DRAWING SC CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L. RO-011663,Bucuresti,sector 2, Str.Dimitrie Orbescu nr.11 t/f: 2316717 constructdesign97@gmail.com	
PROJECTAT / ING. KARL FRÖHLICH			

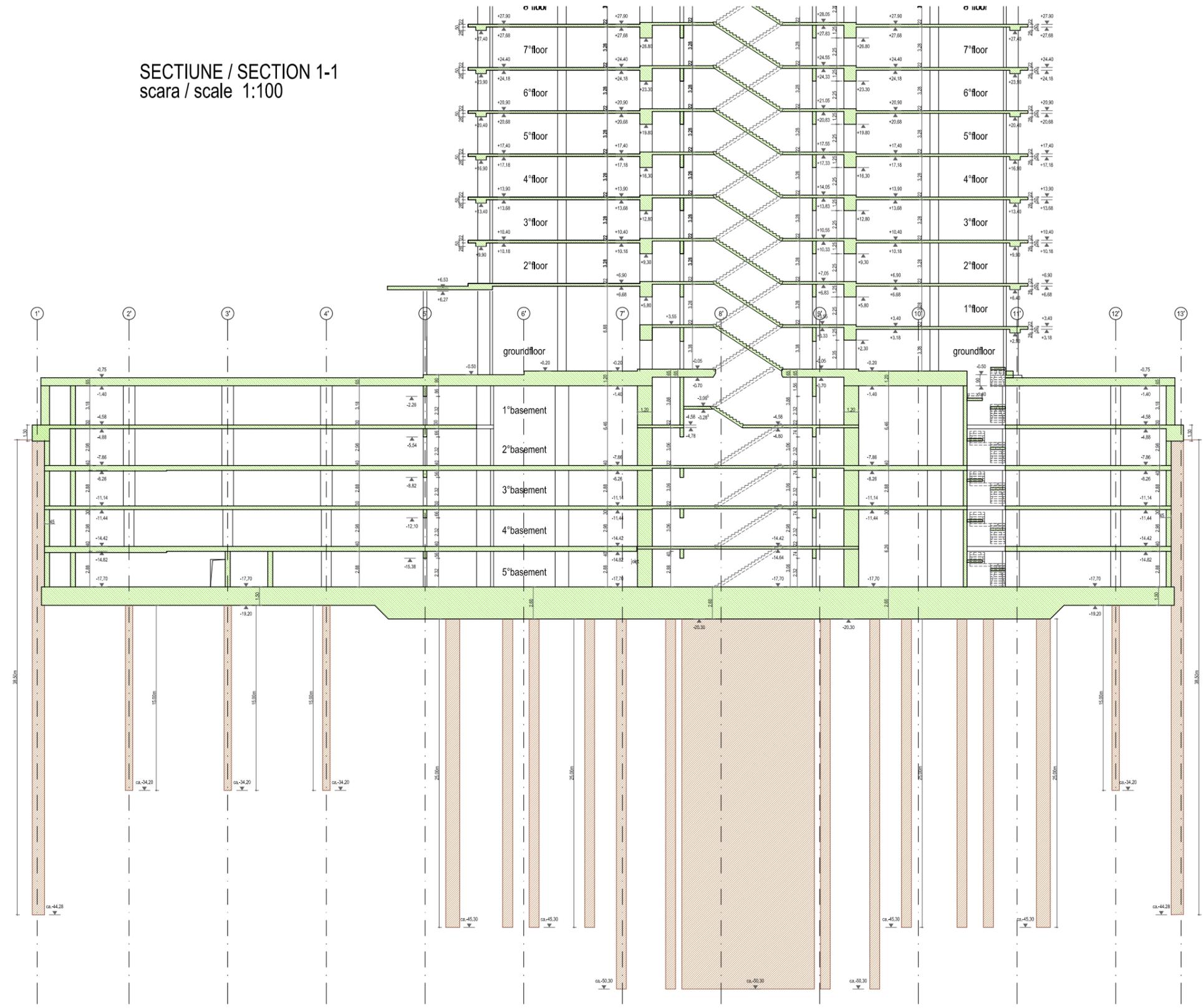


VERIFIER / MAȘI / VERIFICATOR NUME ING. VOICU DORDEA	SIGNATURE / SEMNATURĂ	LEGAL QUALITY REG. / GERINTA CALITATE A	REPORT / EXPERT OPINION NO. / DATE REFERAT / EXPERTIZA NR. / DATA REF.NR /
---	-----------------------	--	---

DRAWING TYPE / TIP PLANSA STRUCTURE		DRAWN BY / DESENAT otto-kogler e.		CHECKED BY / VERIFICAT fröhlich k.	
PROJECT DE STRUCTURA		SCALE / SCARA 1:100		INITIAL DATE / DATA ÎNȚĂLA Feb.2011	
DRAWING SUBJECT / SUBIECT PLANSA slab above 1° floor placa peste etajul 1° - cota ca.+6.90		STAGE / FAZĂ D.T.A.C.		LAST DATE / DATA FINĂLA Feb.2011	

PROJECT NO. / NR. PROIECT	AUTHOR / PROIECTANT	STAGE / FAZA	SPECIALIST / SPECIALIST	TYPE / TIP	CONTENT / TITLU PLANSA	BLDG. EL. / TRONSON	CONT. NR. / NR. CURENT	REVISION NR. / INDEX	APPROVAL / APROBARE
332	FL-	3	ST	SOV	01	--	000	00	A-

SECTIUNE / SECTION 1-1
scara / scale 1:100

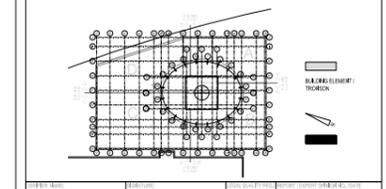


NO.	DATA	DATA	DATA
1	15.00	15.00	15.00
2	15.00	15.00	15.00
3	15.00	15.00	15.00
4	15.00	15.00	15.00
5	15.00	15.00	15.00
6	15.00	15.00	15.00
7	15.00	15.00	15.00
8	15.00	15.00	15.00
9	15.00	15.00	15.00
10	15.00	15.00	15.00
11	15.00	15.00	15.00
12	15.00	15.00	15.00
13	15.00	15.00	15.00

FLOREASCA CITY-CENTER SKY TOWER
 BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246

SC FLOREASCA CITY CENTER SRL
 RO-BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 175, ETAJ 1, CAMERA 3

SC CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L.
 RO-011663, Bucuresti, Sector 2, Str. Chisinau, nr. 11, et. 2/19717



NO.	DATA	DATA	DATA
1	15.00	15.00	15.00
2	15.00	15.00	15.00
3	15.00	15.00	15.00
4	15.00	15.00	15.00
5	15.00	15.00	15.00
6	15.00	15.00	15.00
7	15.00	15.00	15.00
8	15.00	15.00	15.00
9	15.00	15.00	15.00
10	15.00	15.00	15.00
11	15.00	15.00	15.00
12	15.00	15.00	15.00
13	15.00	15.00	15.00

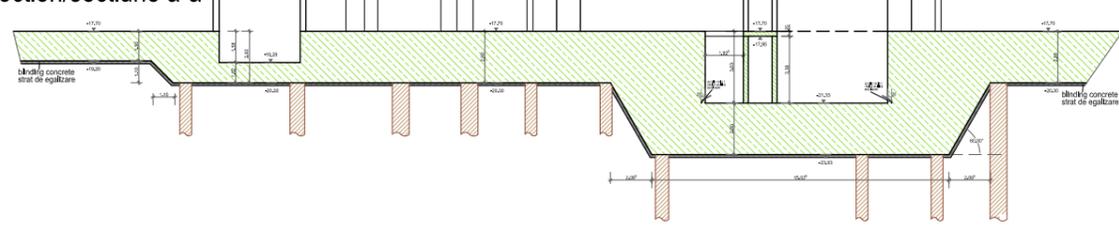
STRUCTURE
 PROIECT DE STRUCTURA

section 1-1 / foundation - 7th floor
 sectiune 1-1 / fundatie - etajul 7th

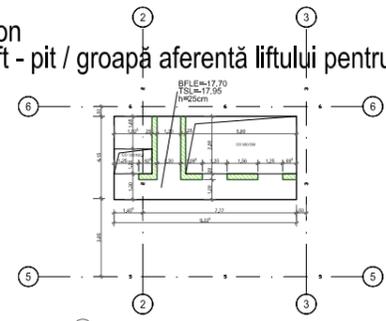
D.T.A.C.

332	FL	3	ST	SOV	CA	001	00	A-
-----	----	---	----	-----	----	-----	----	----

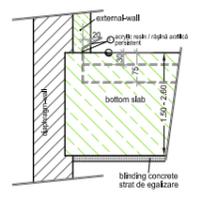
section/sectiune a-a



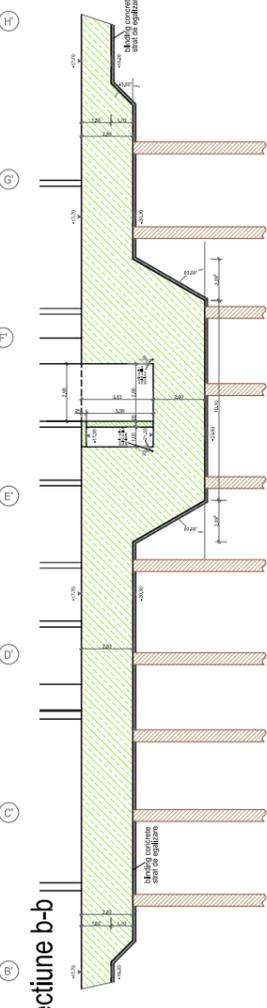
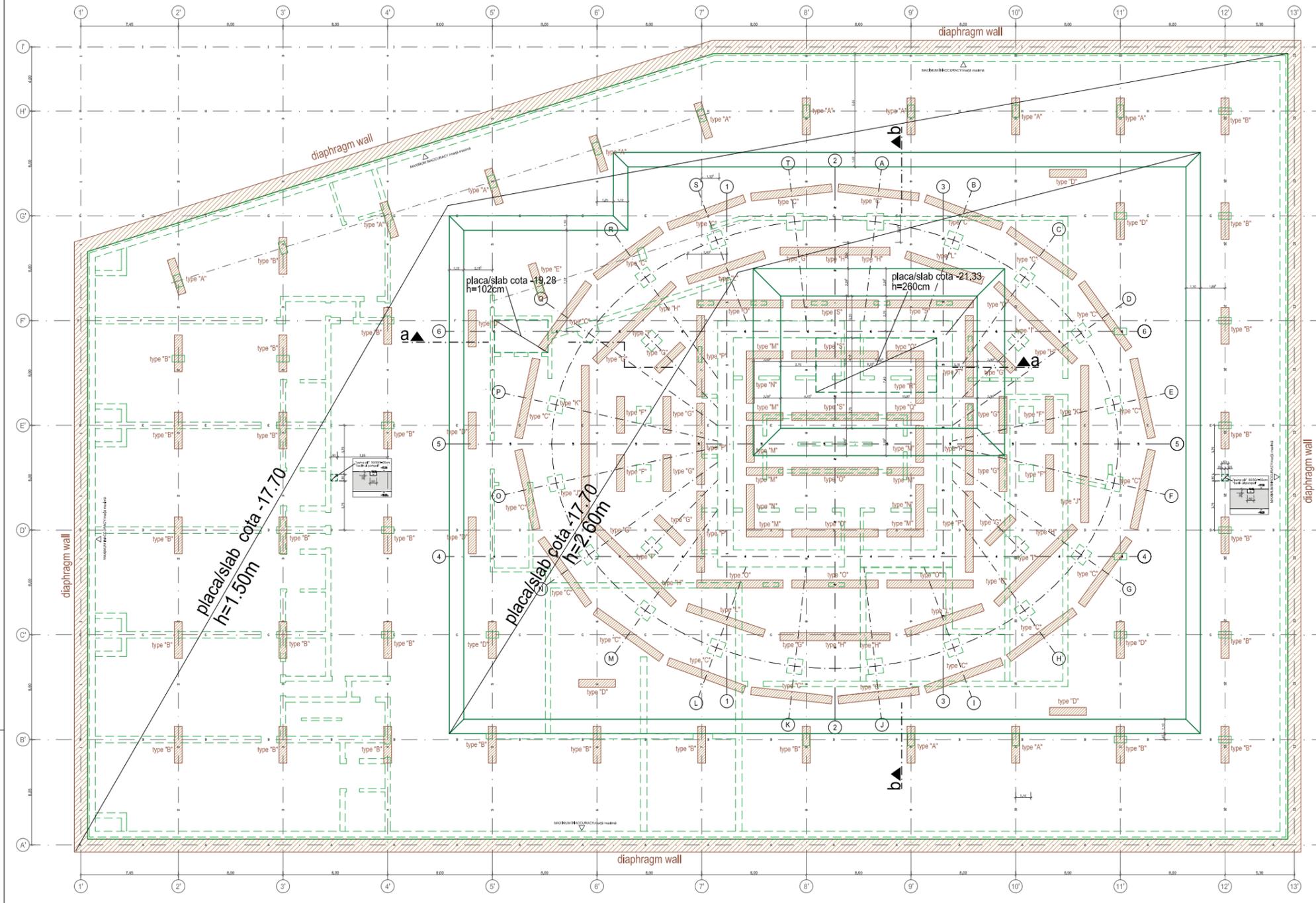
slab - section firemen's lift - pit / groapă aferentă liftului pentru



sealing foundation slab - external wall izolarea plăcii fundației - peretele exterior scale / scara 1:50



foundation slab scale 1:100
fundatie - cota -17.70



Slab Type	Area (m²)	Volume (m³)	Rebar (kg)	Concrete (m³)
slab type A	12.50	1.250	1250	1.250
slab type B	15.00	1.500	1500	1.500
slab type C	18.00	1.800	1800	1.800
slab type D	20.00	2.000	2000	2.000
slab type E	22.00	2.200	2200	2.200
slab type F	25.00	2.500	2500	2.500
slab type G	28.00	2.800	2800	2.800
slab type H	30.00	3.000	3000	3.000
slab type I	32.00	3.200	3200	3.200
slab type J	35.00	3.500	3500	3.500
slab type K	38.00	3.800	3800	3.800
slab type L	40.00	4.000	4000	4.000
slab type M	42.00	4.200	4200	4.200
slab type N	45.00	4.500	4500	4.500
slab type O	48.00	4.800	4800	4.800
slab type P	50.00	5.000	5000	5.000
slab type Q	52.00	5.200	5200	5.200
slab type R	55.00	5.500	5500	5.500
slab type S	58.00	5.800	5800	5.800
diaphragm wall	100.00	100.00	10000	100.00
total	1000.00	1000.00	10000	1000.00

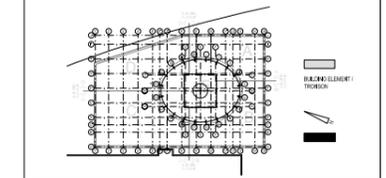
materials:
concrete: C25/30; C30/37; C35/45
rebar quality: S500c
all vehicle-accessed slabs must have an extra sealing

REVISION	NO.	DATE	BY	REASON

FLOREASCA CITY-CENTER SKY TOWER
 BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 242-246
 SC FLOREASCA CITY CENTER SRL
 RD - BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 175, ETAJ 1, CAMERA 3

S.C. F&L STRUCTURAL EXPERTS S.R.L.
 RD-BUCHAREST, SECTOR 1, CALEA FLOREASCA 30

SC CONSTRUCT DESIGN 97 S.R.L.
 RD-11803, Bucuresti, sector 2, Str. Dimitrie Oncescu nr.11, UC 2316717 - constructdesign97@gmail.com



PROIECTANT	ING. VIKTOR DORNEA	PROIECTANT	ING. CESAR CULETA
------------	--------------------	------------	-------------------

STRUCTURE
PROIECT DE STRUCTURA

foundation slab
fundatie - cota -17.70

NO.	FL.	ST.	SOV.	FU.	000	00	A-
-----	-----	-----	------	-----	-----	----	----