

# Nachweis und Zertifizierung der Erdbebensicherheit eines Diesel-dynamischen USV-Systems (DRUPS) unter Anwendung von strukturmechanischen Simulationen

Primpuna Saptogino, Dr.-Ing. Kerstin-Evelyne Voigt

Kinolt S.A., Grâce-Hollogne, Belgien

Prof. Vincent Denoël

Structural and Stochastic Dynamics, University of Liège, Lüttich, Belgien

## Summary

Operation during and after a seismic event is a requirement for installed emergency power supply systems. This work provides the seismic proof and seismic qualification for a Diesel Rotary Uninterruptible Power Supply (DRUPS) which is located in Switzerland. Finite Element Analysis (FEA)-Simulations of static structural analysis with maximal accelerations and response spectrum analysis are conducted using ANSYS Mechanical. The loads are defined according to the Swiss seismic norm and the resulting stresses are compared to the yield stress limit.

## Keywords

Erdbebensicherheit, Seismische Analyse, DRUPS, Response spectrum analysis, Dynamic UPS, USV, Modalanalyse, Antwortspektrumanalyse

## 1. Einführung

Die Firma Kinolt S.A. (ehemals Euro-Diesel S.A.) entwickelt und produziert Diesel-dynamischen USV-Systeme (DRUPS, *Diesel Rotary Uninterruptible Power Supply*) für Leistungen von 150 kVa bis 3000 kVa (50 & 60 Hz). Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)-Anlagen schützen vor kurzen Spannungsunterbrechungen im Millisekunden Bereich bis hin zu Langzeitausfällen über mehrere Stunden oder Tage. Im Gegensatz zu Netzersatzanlagen erfolgt der Übergang auf dem Dieselmotorbetrieb unterbrechungsfrei.

Der Betrieb während und nach einem seismischen Ereignis ist Voraussetzung für eine installierte USV-Anlage. Es bestehen standortabhängige Normen welche entsprechend seismische Einwirkungen und Aktivitäten beschreiben und als Grundlage für eine geeignete seismische Auslegung von Strukturen dienen. In dieser Arbeit wird ein DRUPS-System mit Leistung von 2200 kVa bei 50 Hz bestehend aus zwei Akkumulatoren und Standort in der Schweiz untersucht.

Zur seismischen Qualifizierung werden folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Modalanalyse
2. Antwortspektrum-Strukturanalyse basierend auf der Schweizer seismischen Norm.
3. Statische Strukturanalyse unter Verwendung der geforderten maximalen Bodenbeschleunigungswerte

Das Antwortspektrum beschreibt dabei die Antwort von Einmassenschwingern auf eine bestimmte zeitabhängige Lastfunktion und repräsentiert dabei die Last für langanhaltende Erregungen z. B. bei einem Erdbeben. Bei der Antwortspektrumanalyse werden die Ergebnisse der Modalanalyse mit dem vorgegebenen Antwortspektrum verwendet, um die maximalen Verschiebungen und Spannungen einer Struktur zu berechnen. Die Finite Element Analysis (FEA)-Simulationen werden in ANSYS Mechanical 19.1 durchgeführt.

## 2. Aufbau und Funktionsweise

Der Aufbau des DRUPS-Systems ist in Fig. 1 dargestellt. Das System besteht aus einem Dieselmotor, der über eine elektromagnetische Kupplung an einen Stator-Alternator gekoppelt ist. Der Stator-Alternator wiederum ist eine Kombination aus einem kinetischen Energiespeicher (Akkumulator) mit innerem und äußerem Rotor sowie einer Synchronmaschine. Je nach geforderter Leistung kann das System aus ein oder zwei Akkumulatoren bestehen.

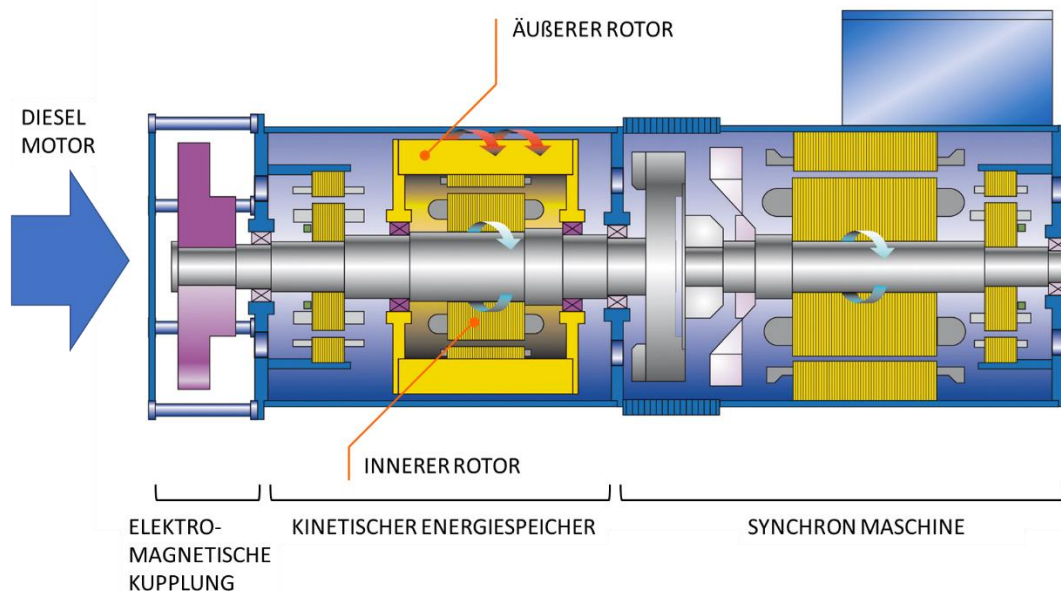


Fig. 1: Schnittansicht Aufbau Stator-Alternator

Bei einem Netzausfall wird der Generator über die im Außenrotor gespeicherte kinetische Energie angetrieben. Der kinetische Energiespeicher gibt so lange Energie ab, bis der Dieselmotor seine Nenndrehzahl erreicht hat. Mit dem Schließen der Kupplung übernimmt der Dieselmotor als Antriebsquelle die Versorgung der kritischen Verbraucher. Der gesamte Funktionsablauf erfolgt ohne Unterbrechung oder Schwankung der Verbraucherspannung.

### 3. Anforderungen

Die Qualifizierung basiert auf folgenden Anforderungen:

1. Schweizer Erdbebenzone: Zone Z1 (SIA 261:2003)
2. Bodenbeschleunigung (Kundenspezifikation):
  - a. Horizontal:  $a_{max,h} = 0,25 \text{ g}$
  - b. Vertikal:  $a_{max,v} = 0,18 \text{ g}$

Die erforderlichen Lasten werden in den Simulationen mit dem Sicherheitsfaktor 1,5 multipliziert.

#### 3.1 Schweizer Erdbebenzone

Die Berechnung der seismischen Belastungen basiert auf der Schweizer Norm SIA 261: 2003 [1]. Die horizontale Bodenbeschleunigung  $a_{gd}$  ist für die Erdbebenzone Z1 bestimmt als  $a_{gd} = 0,6 \text{ m/s}^2$ .

Das Antwortspektrum  $S_e$  der horizontalen Bodenbeschleunigung werden wie folgt bestimmt:

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

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \eta \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (2)$$

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \frac{T_C}{T} \quad (T_C \leq T \leq T_D) \quad (3)$$

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \frac{T_C T_D}{T^2} \quad (T_D \leq T) \quad (4)$$

mit  $T$  als die Schwingungsperiode und  $\eta$  als dämpfungsabhängiger Faktor, der für einen angenommenen viskosen Dämpfungsfaktor  $\xi = 5 \%$  gleich  $\eta = 1$  ist. Die Parameter  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  and  $T_D$  sind aus Tab. 1 zu entnehmen für die Bodenklasse B.

Tab. 1: Bodenklassen und Parameter für das elastische Antwortspektrum und das Dimensionierungsspektrum

Bodenklasse	Beschreibung	$v_s$ [m/s]	$N_{SPT}$	$S_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$S$	$T_B$ [s]	$T_C$ [s]	$T_D$ [s]
B	Einlagen von ausgedehntem zementier-tem Kies und Sand und / oder über-befestigten Böden mit einer Dicke von mehr als 30 m	400...800	>50	>250	1,20	0,15	0,5	2,0

Eine graphische Darstellung der resultierenden elastischen Antwortspektren ist in Fig. 2 gegeben. Die Frequenz  $F$  wird aus der Periode  $T$  mit  $F = 1/T$  umgewandelt und die resultierenden  $S_e$ -Werte werden weiterhin mit dem Sicherheitsfaktor 1,5 multipliziert Für die vertikale Komponente der seismischen Aktion werden die Werte von  $S_e$  mit einem Faktor von 0,7 multipliziert.

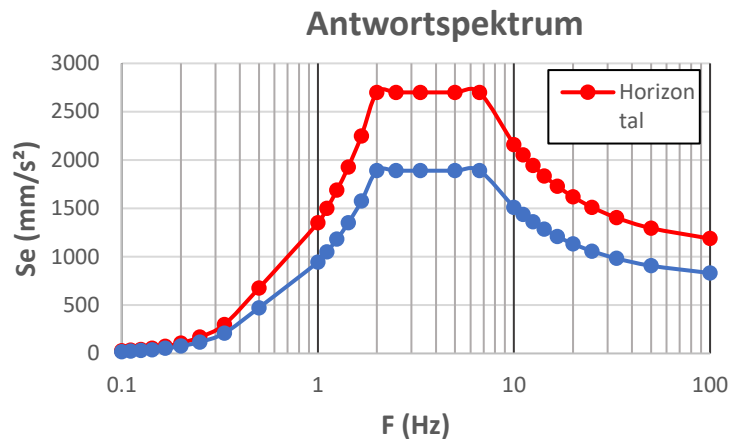


Fig. 2: Elastisches Antwortspektrum

### 3.2 Bodenbeschleunigung

Die erforderliche Bodenbeschleunigung wird mit dem Sicherheitsfaktor von 1,5 multipliziert und ergibt folgende Werte für die Beschleunigungslast:

$$\begin{aligned} \text{Horizontal} \quad a_{max,h} &= 0,25 \text{ g } S_f = 3,68 \text{ m/s}^2 \\ \text{Vertikal} \quad a_{max,v} &= 0,18 \text{ g } S_f = 2,65 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Diese Beschleunigungslast in X-, Y- und Z-Richtung wird kombiniert in einer Simulationsrechnung angewendet. Die Erdbeschleunigung von  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  in vertikaler Richtung wird in beiden Simulationsfällen berücksichtigt. In der Simulation mit vertikaler Beschleunigung liegt die Richtung der seismischen Beschleunigung in der gleichen Richtung wie die Erdbeschleunigung (ungünstigster Fall).

## 4. Modellbeschreibung

### 4.1 Geometrie

Die Hauptkomponenten des DRUPS-Systems besteht aus einem Dieselmotor, zwei Akkumulatoren und einem Alternator. Die Komponenten befinden sich auf seismischen Schwingungsisolatoren und sind mit einem Rahmen verbunden, welcher am Boden durch BefestigungsfüÙe mit M24 Schrauben befestigt ist. Der Rahmen ist aus hohlen Trägern zusammengesetzt. Fig. 3 zeigt die Geometrie welche in den FEA-Simulationen verwendet wird. Die Geometrie der Komponenten wurde für die Simulationen durch einfache Formen substituiert. Durch Anpassung der Dichte wurden die entsprechende Massen der realen Bauteile nachgebildet. Die Massen der Komponenten befinden sich in Tab. 2 Tab. 2.

Tab. 2: Massen der DRUPS-Komponenten

Komponente	Dieselmotor	Akkumulator 1	Akkumulator 2	Alternator	Summe
Masse (kg)	8287,4	6799,2	5839,4	8623,5	29549,5
<b>Komponente</b>	<b>Rahmen &amp; Andere</b>				
Mass (kg)	8659,5				
<b>Komponente</b>	<b>Gesamt</b>				
Masse (kg)	38209				

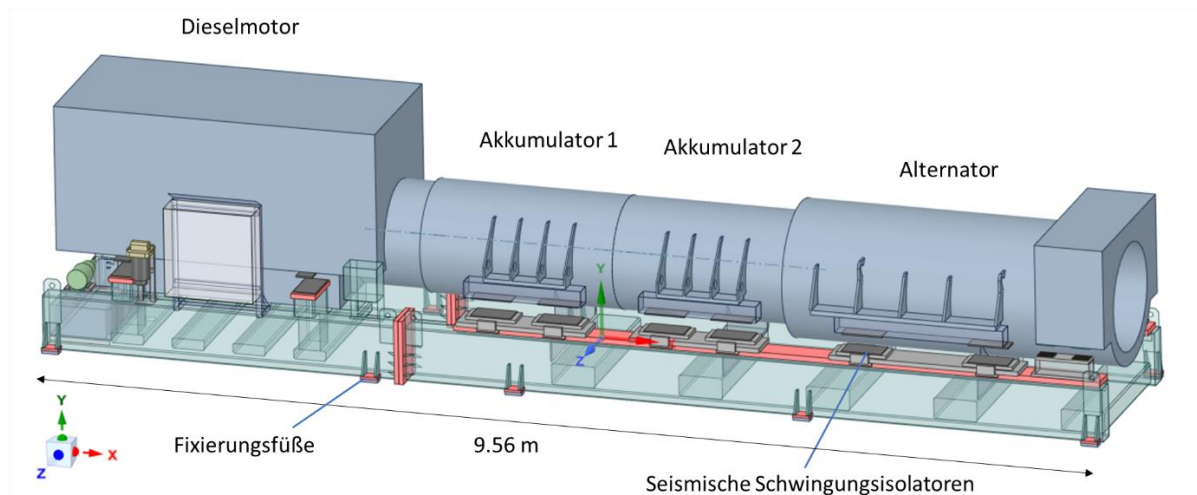


Fig. 3: Geometrie DRUPS für FEA-Simulation

#### 4.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen der DRUPS Simulation sind in Fig. 4 dargestellt. Die Fußstützen und die Flächen unterhalb des Rahmens sind als fixierte bzw. reibungsfreie Lagerung definiert.

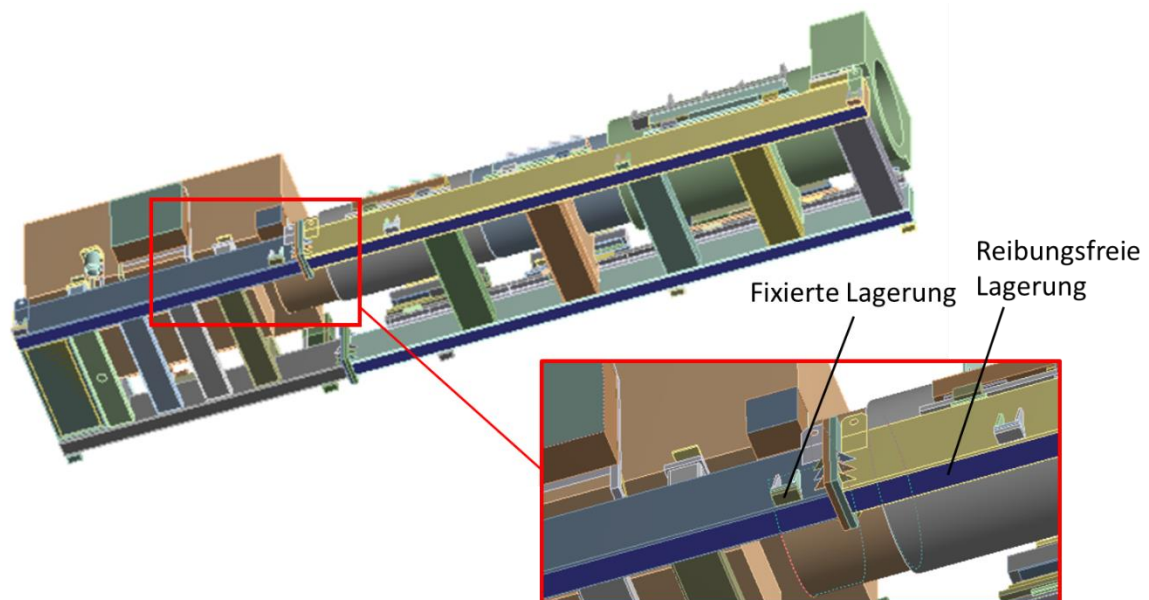


Fig. 4: Randbedingungen DRUPS für FEA-Simulation

Das Material für alle Bauteile ist Stahl ST 52-3 mit einer Dichte von  $7850 \text{ kg/m}^3$ , einem Elastizitätsmodul von  $200\,000 \text{ N/mm}^2$  und einer Streckgrenze von  $355 \text{ MPa}$ .

Der DRUPS-Rahmen wird durch 10 Befestigungsfüße mit M24-Schrauben am Boden befestigt. Die entsprechende Vorspannung beträgt  $220 \text{ kN}$  per Schraube. Unter Verwendung eines Reibungskoeffizienten von  $0,15$  kann die maximale Schubkraftgrenze der Gesamtfixierung wie folgt berechnet werden:  $10 \times 0,15 \times 220 \text{ kN} = 330 \text{ kN}$ .

In vertikaler Richtung (Y) richtet sich die Kraftbegrenzung nach der Stärke des Schraubenmaterials. Durch die Vorspannung beträgt die Anfangsbelastung der Schrauben bereits  $90\%$  der Streckgrenze.

### 4.3 Vernetzung

Das Netz für die Berechnungen ist in Fig. 5 abgebildet. Die Vernetzung erfolgt dabei mit Elementen der Größe 24 mm, außer den Hauptkomponenten, welche mit einer Elementgröße von 100 mm Vernetzt sind. Die Wände des Rahmens sind als dünnwandige SolidShell-Elemente mit einer Dicke von 16 mm vernetzt. Insgesamt ergibt sich eine Netzgröße von 288500 Elementen.

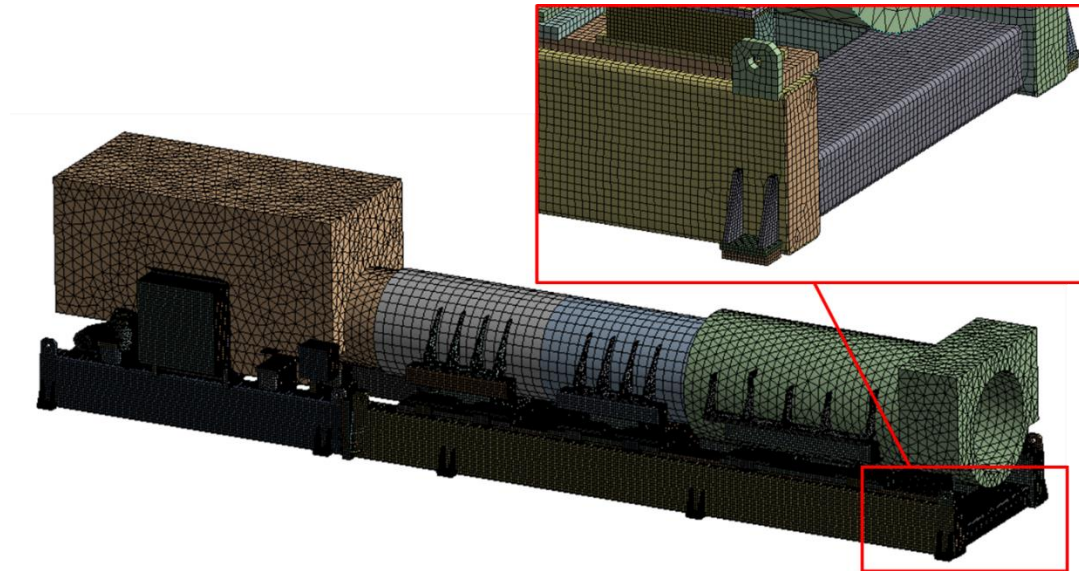


Fig. 5: Vernetzung DRUPS für FEA-Simulation mit vergrößertem Ausschnitt

## 5. Simulationsergebnisse

### 5.1 Modalanalyse

Ein Auszug der Ergebnisse der Moden der Modalanalyse mit hoher Massenbeteiligung ist in Tab. 3 gegeben. Die entsprechenden Moden sind im Antwortspektrum in Fig. 6 veranschaulicht. Es kann entnommen werden, dass die erste Mode mit 2,96 Hz innerhalb des Hauptbereichs von Erdbebenfrequenzen (<33 Hz) befindet.

Tab. 3: Moden der Eigenfrequenzen DRUPS mit hoher Massenbeteiligung

Richtung	Mode Nr.	Frequenz (Hz)	Periode (s)	Effektive Masse (ton)	Kumulative Massenfraktion	Verhältnis Eff. Masse zur Gesamtmasse	Se (mm/s <sup>2</sup> )
X (horizontal)	37	39,87	0,025	30,97	0,9999	0,8133	1328,4
Y (vertikal)	1	2,96	0,338	30,57	0,9938	0,8028	1890
Z (horizontal)	14	14,06	0,071	23,87	0,7056	0,6267	1846,8
	23	25,73	0,039	5,03	0,8487	0,1321	1501,2
	40	43,32	0,023	3,89	0,9996	0,1022	1328,4

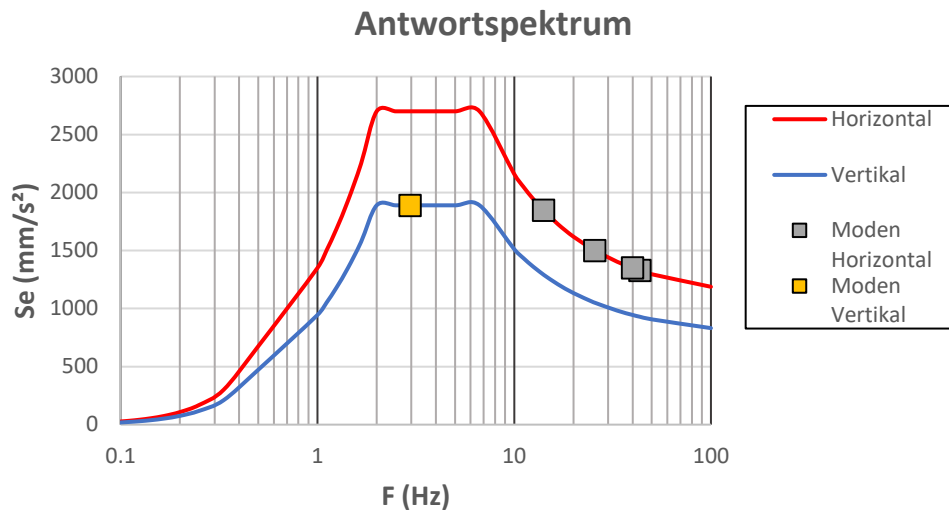


Fig. 6: Berechnete Moden im Antwortspektrum

## 5.2 Antwortspektrumanalyse

Fig. 7 zeigt die Vergleichsspannungen der Simulationsergebnisse des horizontalen Antwortspektrums in X-Richtung und Tab. 4 gibt einen Überblick über die maximalen Vergleichsspannungen für die Antwortspektrumanalyse der DRUPS. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Vergleichsspannungen für die X- und Z-Richtung 89 MPa bzw. 110 MPa betragen. Diese Werte liegen unterhalb der Streckgrenze von 355 MPa. Die Ergebnisse des vertikalen Antwortspektrums in Y-Richtung liegen mit einer maximalen Vergleichsspannung von 10 MPa ebenfalls unterhalb der Streckgrenze.

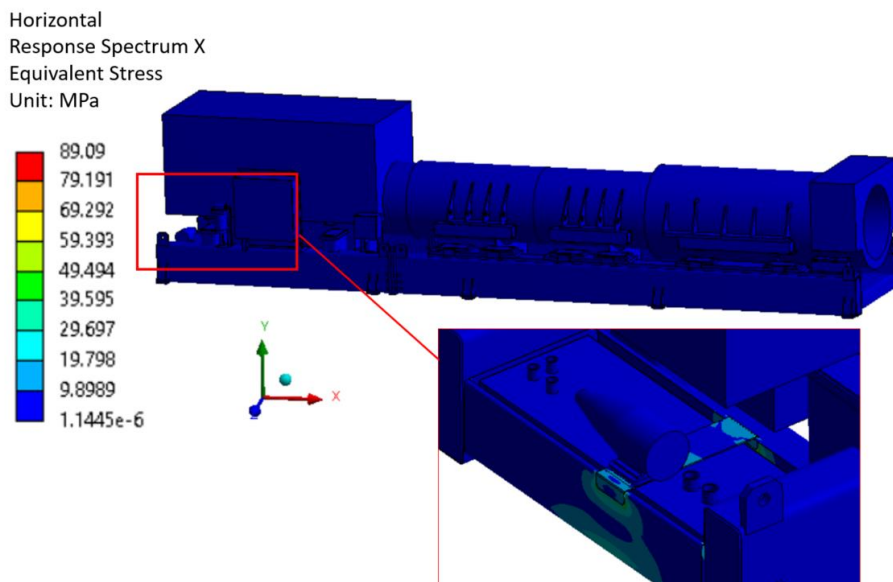


Fig. 7: Simulationsergebnisse der Vergleichsspannung der horizontale Antwortspektrumanalyse in X-Richtung

Tab. 4: Zusammenfassung Simulationsergebnisse der Vergleichsspannung der Antwortspektrumanalyse

Simulation	Max Vergleichsspannung (MPa)			Streckgrenze (MPa)
	X (horiz.)	Y (vert.)	Z (horiz.)	
Antwortspektrumanalyse	89	10	110	355

Die Kräfte, die aus der Antwortspektrumbelastung auf die FixierungsfüÙe wirken, können aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate (SRSS, *square root of the sum of the squares*) der effektiven Massen multipliziert mit der Beschleunigung  $S_e$  der jeweiligen Eigenfrequenzmoden berechnet werden. Die Summen der berechneten Ergebnisse sind:

- X-Richtung (horizontal) 44,90 kN
- Y-Richtung (vertikal) 57,78 kN
- Z-Richtung (horizontal) 45,12 kN

Die Kräfte in X- und Z-Richtung liegen unterhalb der maximalen Scherkraft der FixierungsfüÙe (horizontal <330 kN). Die zusätzliche Belastung der Befestigungsschrauben (Y-Richtung) führt zu einer Spannung von 92% der Streckgrenze. Folgend kann geschlossen werden, dass die Bodenfixierung für das gegebene seismische Spektrum geeignet ist.

### 5.3 Strukturanalyse Maximale Beschleunigung

Die Ergebnisse der Simulation mit Beschleunigung in X-, Y- und Z-Richtung sind in Fig. 8 dargestellt. Die maximalen Vergleichsspannungswerte liegen mit 66 MPa unterhalb der Streckgrenze von 355 MPa.

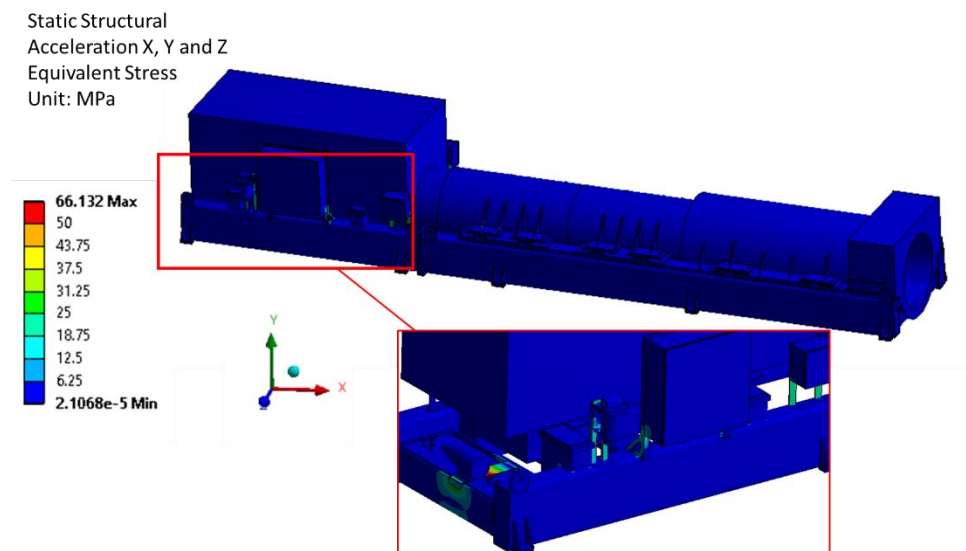


Fig. 8: Simulationsergebnisse der maximalen Beschleunigung in horizontaler und vertikaler Richtung

Die resultierende Schubkraft auf die FixierungsfüÙe aufgrund der maximalen Beschleunigungslasten wird aus den Simulationsergebnissen entnommen und ergibt 198 kN, welches unter dem Grenzwert von 330 kN liegt. Eine zusätzliche Kraft in vertikaler Richtung von 101 kN wirkt auf die Schrauben (10,1 kN pro Schraube), welche eine Belastung zu 94 % der Streckgrenze führt. Dementsprechend kann geschlossen werden, dass die Bodenfixierung für die gegebene Beschleunigungslast geeignet ist.



## **6. Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurde der seismische Beweis auf der Grundlage der Analyse des Antwortspektrums und der statischen Beschleunigung des DRUPS-Systems gegeben. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Belastungen der Bauteile unterhalb der Streckgrenze liegen. Weiterhin wurde die Beständigkeit der Fixierung zum Boden nachgewiesen. Das DRUPS-System kann daher für die Erdbebenzone Z1 in der Schweiz als seismisch qualifiziert betrachtet werden.

## **7. References**

- [1] "Einwirkung auf Tragwerke", Schweizer Norm SIA 261, 2003, Seite 59 ff.