

## Tunnelvortrieb: Dynamische Erdbeben-Analyse

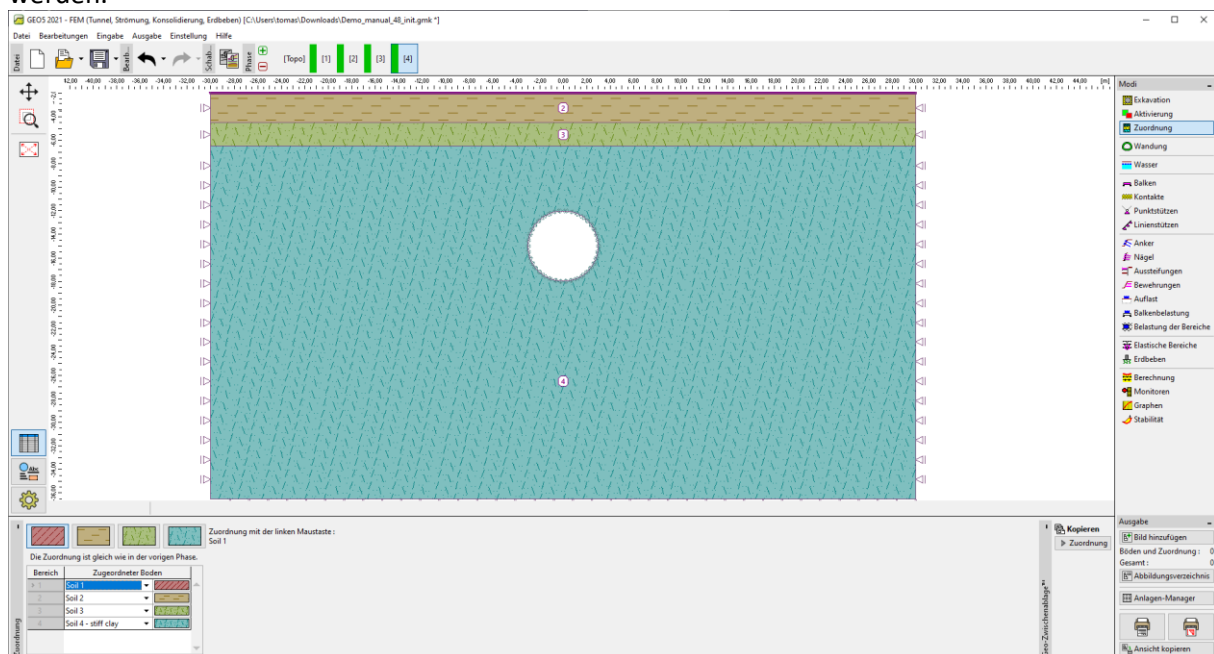
Programm: GEO5 FEM – Erdbeben

Datei: Demo\_manual\_48\_init.gmk, Demo\_manual\_48.gmk

Das GEO5 FEM-Erdbebenmodul dient zur Durchführung einer dynamischen Analyse von geotechnischen Bauwerken, die durch Bodenbewegung belastet werden. Die Erdbebenbelastung kann in einer beliebigen Bauphase des vorhandenen Modells angesetzt werden und ihre Wirkung wird mithilfe der Finite-Elemente-Methode als dynamische Aufgabe analysiert. Das Ergebnis der dynamischen Analyse ist die zeitliche Entwicklung des Verschiebungsfeldes, des gesamten und des plastischen Dehnungsfeldes sowie des Spannungsfeldes. Außerdem berechnet das Programm die Entwicklung der inneren Kräfte in den Konstruktionselementen wie Balken, Ankern usw. Diese Größen können zu einem beliebigen Zeitpunkt der dynamischen Analyse angezeigt werden. Wir werden die Ausnützung des Erdbeben-Moduls auf der Aufgabe des gebohrten Tunnels anzeigen.

### Eingabe

Wir wollen die Entwicklung der Bodenverformung und die Entwicklung der inneren Kräfte in der Auskleidung eines gebohrten Tunnels während eines Erdbebens ermitteln. Der Tunnel wird in der letzten Bauphase, wenn alle Ausbruchsarbeiten abgeschlossen sind und die Auskleidung eingebaut ist, einem Erdbeben unterworfen. Das für diese statische Analyse aller Bauzustände verwendete Aufbaumodell des Tunnels ist in der Datei "Demo\_manual\_48\_init.gmk" gespeichert. Das Modell enthält die Definition des geologischen Profils, die Materialparameter des Bodens, die Geometrie der Konstruktion, die Bauphasen und weitere Eingaben, die für die statische Berechnung benötigt werden.



Modell des gebohrten Tunnels, geologisches Profil

Das angenommene Erdbeben hat die Bemessungsbeschleunigung  $a_g = 2 \text{ m/s}^2$ . Für die einzelnen Bodenschichten des Untergrunds nehmen wir folgende Werte für den dynamischen Elastizitätsmodul und das viskose Dämpfungsverhältnis an:

Boden	Dynamisches Modul $E_{dyn}$ [MPa]	Dämpfungsverhältnis $\xi$ [-]
Schicht 1	200	0,05
Schicht 2	300	0,05
Schicht 3	1200	0,05
Schicht 4	1965	0,05

Der Hauptbereich des Modells, der als Schicht 4 bezeichnet wird, entspricht dem tonhaltigen Boden, der sich Dutzende von Metern unter der unteren Grenze des bestehenden FEM-Modells erstreckt.

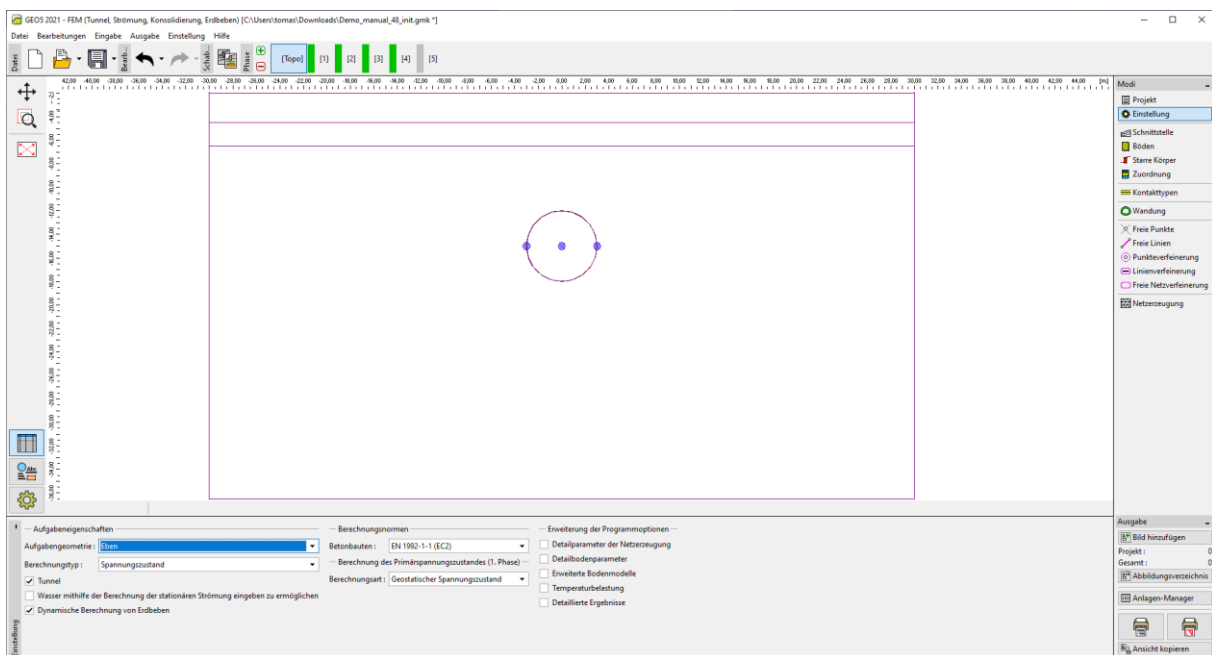
Neben dem bestehenden FE-Modell basiert dieses Handbuch auf dem "Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben" (Eurocode 8) auf. Dieser Bemessungscode gibt die Bodenarten des Untergrunds A - E, S1 und S2 und entsprechende elastische Antwortspektren vor. Mit GEO5 FEM-Erdbeben ist es möglich, ein Antwortspektrum-kompatibles Akzelerogramm zu erzeugen, das dann in die dynamische Analyse eingeht.

## Lösungsverfahren

Wir beginnen mit dem vorhandenen FE-Modell, das wir um die dynamische Berechnung des Erdbebens erweitert haben. Wir beginnen mit dem Öffnen der Datei "Demo\_manual\_48\_init.gmk" und speichern diese als Arbeitskopie "Demo\_manual\_48.gmk".

### Aktivierung der dynamischen Erdbebenanalyse

Die dynamische Erdbebenanalyse wird durch Aktivieren des entsprechenden Kontrollkästchens in [Topo] im Fenster *Einstellung* verfügbar.



Das Fenster *Einstellung* - hier wird die dynamische Erdbebenanalyse aktiviert

Wenn diese Option aktiviert ist, verlangt das Programm die Eingabe von zusätzlichen Materialparametern für die dynamische Berechnung. So können wir die dynamische Analyse der Erdbebeneinflüsse in jeder Berechnungsphase durchführen.

## Materialparameter für die dynamische Analyse

Der nächste Schritt in der Modellvorbereitung ist die Festlegung der dynamischen Materialparameter für jeden Boden. Diese Parameter werden in [Topo] im Fenster *Böden* festgelegt. In der Dialogbox des ausgewählten Bodens im Abschnitt *Erdbeben* ist es nötig, Folgendes einzugeben:

- *Dynamischer Elastizitätsmodul* - dies ist der Elastizitätsmodul, den der Boden bei kleinen Verformungen aufweist.
- *Art der Dämpfung* - wir können zwischen der Eingabe des proportionalen Dämpfungsverhältnisses  $\xi$  oder direkt der Rayleigh-Dämpfungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  wählen. Die Bedeutung dieser Parameter ist in "GEO5 - FEM - Erdbeben - Theoretischer Leitfaden" unter <https://www.fine.cz/manualy/> erläutert. Der gebräuchlichste Wert des Dämpfungsverhältnisses in geotechnischen Anwendungen ist  $\xi = 5\%$ .

*Fenster Bodeneigenschaften, in dem ein dynamisches Modul hinzugefügt und die Materialdämpfung eingestellt werden muss*

Daher geben wir die Werte des entsprechenden dynamischen Moduls und der relativen Dämpfungskoeffizienten ein, die in der Tabelle für die einzelnen Böden im Modell angegeben sind. Dies bereitet die Materialmodelle vor und wir können fortfahren, indem wir die Parameter des Erdbebens in der ausgewählten Berechnungsphase einstellen.

## Aktivierung der Erdbebenanalyse in der gewählten Bauphase

Wir können die dynamische Berechnung im gewählten Bauzustand ausführen, indem wir die Option *Erdbeben berechnen* im Fenster *Erdbeben* aktivieren. Mit dieser Option führt das Programm die folgenden Berechnungen in einer Folge aus:

1. Statische Spannungsanalyse
2. Berechnung von eigenen Formen und Eigenfrequenzen
3. Free-field-Analyse
4. Dynamische Analyse der Erdbebeneinwirkung

Wir können in der gegebenen Phase die Eingabe für die statische Analyse spezifizieren (Hinzufügen von statischen Auflasten, Böden aktivieren oder deaktivieren und den Einbau von Konstruktionselementen usw.) wie gewohnt festlegen. Die dynamische Analyse beginnt dann aus dem Gleichgewichtszustand am Ende der statischen Analyse.

Unser bestehendes Modell mit statischer Analyse hat vier Berechnungsphasen: 1. Berechnung der geostatischen Spannung, 2. Auflast auf das Gelände, 3. teilweiser Ausbruch des Tunnelquerschnitts, 4. Einbau der Auskleidung und Fertigstellung des Tunnelausbruchs. Die vierte Phase entspricht also der letzten Bauphase. Es wäre möglich, in dieser Phase die Erdbebenberechnung zu wählen. Da es aber eine gute Praxis ist, die Bauabschnitte so einfach wie möglich zu halten, fügen wir noch einen weiteren Berechnungsabschnitt hinzu (den fünften), in dem wir nur das Erdbeben definieren. Da in dieser Stufe keine zusätzliche Belastung in der statischen Analyse wirkt, werden ihre Ergebnisse mit den Ergebnissen der vorherigen Phase (vierten) identisch sein.

### Randbedingungen an der Unterkante des Modells

In diesem fünften Schritt wählen wir im Fenster "*Erdbeben*" die Randbedingungen am unteren Rand des Modells. Verfügbare Optionen sind:

- Feste Randbedingungen
- Absorbierende Randbedingungen

Die *festen Randbedingungen* werden in Fällen verwendet, in denen die untere Grenze des Modells eine Schnittstelle zwischen einem relativ weichen und einem sehr steifen Material darstellt, z. B. Schnittstelle zwischen überlagerndem Boden und Felsuntergrund. Diese Randbedingungen reflektieren die sich nach unten ausbreitenden Wellen zurück in das Modell.

Im Gegensatz dazu setzen die *absorbierenden Randbedingungen* voraus, dass es auf der Ebene der Unterkante des Modells keine Materialschnittstelle gibt und dass das Material der tiefsten Schicht gleichzeitig das Material eines unendlich tiefen Untergrunds ist, der sich nur elastisch verformt. Diese Art von Randbedingungen an der unteren Grenze des Modells dämpft die nach unten wandernden Wellen vollständig. Dies entspricht einer Situation, in der die reflektierte Welle das Gelände durch eine imaginäre Grenze außerhalb des Modellbereichs frei verlässt.

Da sich derselbe Tonboden oberhalb und unterhalb der Untergrenze unseres Modells befindet und auf der Ebene der Untergrenze keine Schnittstelle zwischen der starren und der flexiblen Schicht besteht, wählen wir in unserer Aufgabe die absorbierenden Randbedingungen.

### Richtung des Akzelerogramms

Der Verlauf des Erdbebens wird in Form einer Liste von Zeitpunkten und zugehörigen Beschleunigungen (ein Akzelerogramm) der ankommenden Welle an der unteren Kante des Modells definiert. Das Programm erlaubt die Eingabe von entweder horizontalen oder vertikalen Komponenten des Beschleunigungsprogramms oder einer Kombination aus beiden. Ein horizontales Akzelerogramm, das an der unteren Begrenzung vorgegeben wird, erzeugt eine aufwärts laufende Scherwelle (S-Welle). Ein vertikales Akzelerogramm, das an der unteren Grenze vorgegeben wird, erzeugt eine aufwärts laufende Druckwelle (P-Welle). Der Einfachheit halber verwenden wir in unserem Modell nur die horizontale Beschleunigung.

### Künstliches Akzelerogramm

Der Eurocode 8 erlaubt es, die seismische Bewegung der Konstruktionen durch künstlich erzeugte Akzelerogramme zu beschreiben. Diese Beschleunigungskurven müssen jedoch so erzeugt werden, dass sie mit dem erforderlichen elastischen Antwortspektrum übereinstimmen. Der Eurocode 8 definiert unterschiedliche elastische Antwortspektren für verschiedene Bodentypen, die mit A-E für fünf Typen des Untergrunds bezeichnet werden. Daher müssen wir zunächst den Bodentyp bestimmen und dann die entsprechenden Antwortspektrum-Parameter finden. Für diese Parameter von Antwortspektren erzeugt das Programm ein spektralkompatibles Beschleunigungsdiagramm.

### Arten des Gründungsbodens

Die Bodentypen sind im Eurocode 8 definiert. Der Untergrund in unserem Modell entspricht der Beschreibung des Typs B: "Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton mit

einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch eine allmähliche Zunahme der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe." Für Typ B definiert der Bemessungscode weiterhin den typischen Bereich einer mittleren Scherwellengeschwindigkeit in den oberen 30 Metern des Bodenprofils. Der Bereich liegt zwischen 360 m/s und 800 m/s.

Die durchschnittliche Scherwellengeschwindigkeit in den oberen 30 Metern wird nach Eurocode 8 wie folgt berechnet

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

wobei  $h_i$  die Dicke der  $i$ -ten Schicht gemessen in Metern bezeichnet. Die Scherwellengeschwindigkeit der  $i$ -ten Schicht wird berechnet als

$$v_i = \sqrt{\frac{G_{dyn,i}}{\rho_i}}$$

mit

$$G_{dyn,i} = \frac{E_{dyn,i}}{2(1 + \nu_i)}$$

bezeichnet den dynamischen Schermodul,  $\rho_i = \gamma_i/g$  die Massendichte,  $E_{dyn,i}$  den dynamischen Young-Modul bezeichnet,  $\nu_i$  ist die Poissonzahl,  $\gamma_i$  das spezifische Gewicht und  $g$  die Fallbeschleunigung.

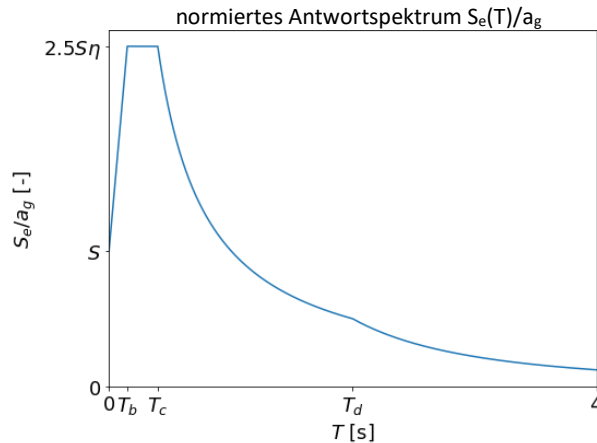
*Berechnung der charakteristischen Scherwellengeschwindigkeit*

i	E [Mpa]	nu [-]	G [Mpa]	gamma [kN/m3]	rho [kg/m3]	v [m/s]	h [m]	h/v [s]
1	200	0,35	74,1	20	2000	192,5	2	0,0104
2	300	0,35	111,1	20	2000	235,7	2.5	0,0106
3	1200	0,3	461,5	21	2100	468,8	2	0,0043
4	1965	0,3	755,8	21	2100	599,9	23.5	0,0392
							sum(hi/vi) =	0,0644
							<b>vs,30 =</b>	<b>465,6</b>

Die erhaltene Scherwellengeschwindigkeit  $v_{s,30} = 465,6$  m/s bestätigt, dass der Gründungsboden tatsächlich vom Typ B ist.

### Elastisches Antwortspektrum

Der Eurocode 8 führt das elastische Bodenbeschleunigungs-Antwortspektrum ein, das durch die aufgeführten Parameter für jeden Bodentyp definiert ist. Für Bodentyp B und Typ\* 1 des Antwortspektrums schreibt das Dokument  $S = 1.2$ ,  $T_B = 0.15$  s,  $T_C = 0.5$  s,  $T_D = 2.0$  s. vor. Die Bedeutung dieser Parameter zeigt die folgende Abbildung.



Parametrisches elastisches Antwortspektrum definiert in Eurocode 8

### Erzeugen der Beschleunigungsaufzeichnung

Wenn wir ein stationäres Beschleunigungsdiagramm erzeugen wollen, d. h. ein Beschleunigungsdiagramm ohne die charakteristischen Anstiegs-, Starkbewegungs- und Abklingperioden, aktivieren wir die Option *Stationär*. Wir gehen in unserem Modell von einem nicht-stationären Beschleunigungsdiagramm aus, daher lassen wir die Option nicht aktivieren.

Im nächsten Schritt geben wir die gemeinsamen Parameter für das horizontale und das vertikale Beschleunigungsdiagramm ein. Diese sind:

**Dauer des Erdbebens  $t_s$**  – die Eingabe wird in Sekunden eingegeben. Es ist die Gesamtdauer des erzeugten Beschleunigungsdiagramms einschließlich der Anstiegs-, der starken Bewegungs- und der Abklingperioden.

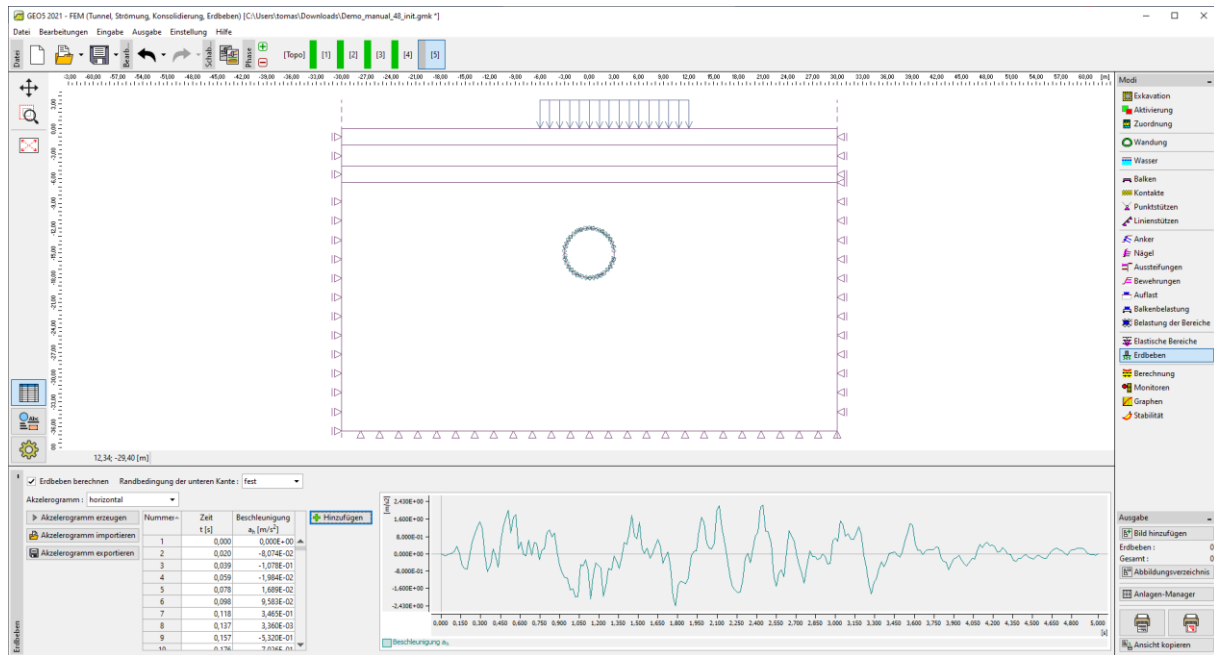
**Anzahl der Schritte** – ist die Anzahl der Zeitpunkte, für die die Beschleunigung erzeugt wird. GEO5 FEM verwendet die Fast-Fourier-Transformation (FFT) im Algorithmus zur Erzeugung des Beschleunigungsdiagramms und daher wird empfohlen,  $2^n$  Zeitschritte zu verwenden, z.B. 256, 512, 1024, usw. Eine sinnvolle Zeitschrittgröße hat die Größenordnung von Hundertstelsekunden.

**Proportionales Dämpfungsverhältnis  $\xi$**  – dieser Beiwert von Dämpfungsverhältnis erscheint bei der Definition der erforderlichen elastischen Antwortspektren der gegebenen Beschleunigungsaufzeichnung. Es wird als ein Wert zwischen 0 und 1 eingegeben.

**Dämpfungskorrekturfaktor  $\eta$**  – für den gebräuchlichsten Wert des Dämpfungsverhältnisses  $\xi = 5\%$  gibt der Eurocode 8 den Wert des Dämpfungskorrekturfaktors  $\eta = 1$  an. Für andere Werte schreibt das Dokument die Formel  $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)}$ , vor. Das Dämpfungsverhältnis  $\xi$  wird in Einheiten von Prozent angegeben.

**Alternative** – es handelt sich um sogenannten "Seed"-Wert des Generators Pseudo-Zufallszahlen. Wenn dieser Wert geändert wird, erzeugt das Programm verschiedene Beschleunigungskurven mit analogem elastischem Antwortspektrum. Diese Option ist nützlich, wenn man das Modell mehreren verschiedenen künstlichen Beschleunigungskurven aussetzt, wie es z.B. der Eurocode 8 verlangt.





Fenster Erdbeben mit erzeugtem Beschleunigungsdiagramm

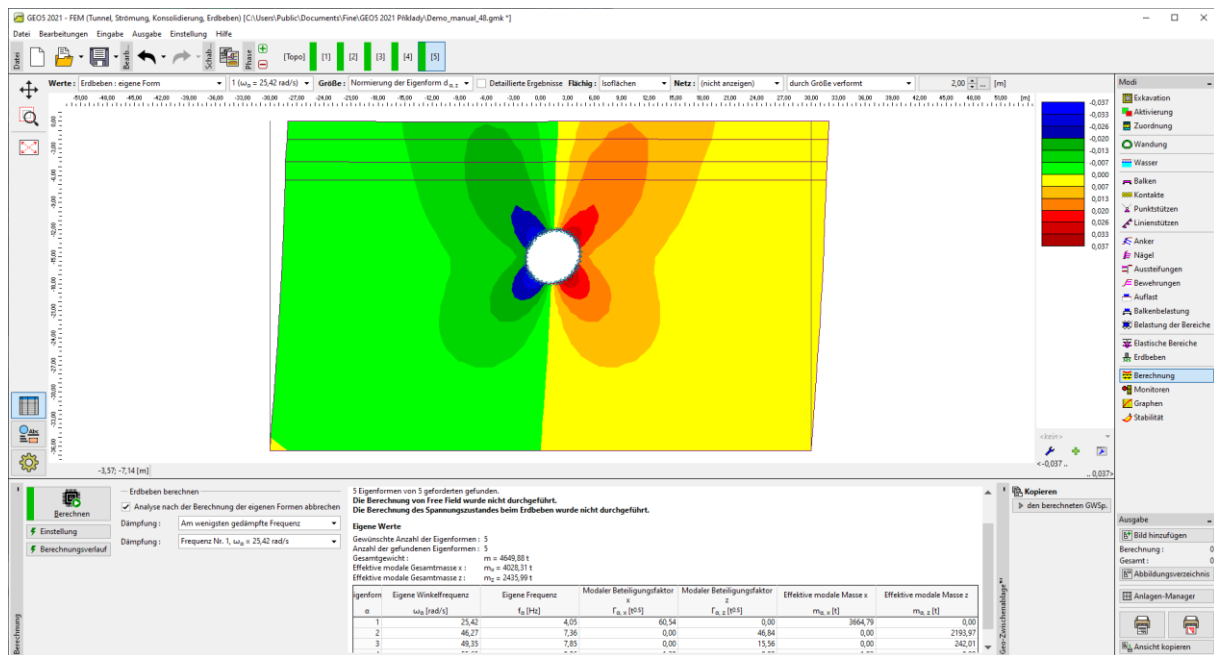
## Berechnung von Eigenformen und Eigenfrequenzen

Wir haben die Materialdämpfung über den Beiwert von Dämpfungsverhältnis  $\xi$  definiert und daher ist es notwendig festzulegen, welche Frequenz (oder Frequenzpaar) durch diesen Wert gedämpft wird. In GEO5 FEM - Erdbeben können diese Frequenzen aus den Eigenfrequenzen des jeweiligen Modells gewählt werden. Die Eigenfrequenzen werden vor der Durchführung der dynamischen Analyse berechnet.

Gehen wir davon aus, dass die am wenigsten gedämpfte Frequenz in unserem Modell die erste Eigenfrequenz ist, die der horizontalen Schwingung entspricht. Trotzdem wollen wir zum besseren Verständnis die fünf niedrigsten Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenformen berechnen. In der Dialogbox *Berechnungseinstellung*, Registerkarte Erdbeben, setzen wir die *Geforderte Anzahl der Eigenformen* auf fünf. Damit wird sichergestellt, dass der Algorithmus mindestens die ersten fünf Eigenformen und Eigenfrequenzen sucht. Wir setzen auch die *vertikale Randunterstützung für die Eigenwertanalyse auf vertikal*. Damit werden wir sicherstellen, dass die betrachteten Eigenformen auf den vertikalen Grenzen die vertikale Verschiebung gleich Null haben. Eine solche Anforderung ist sinnvoll, da wir nur den horizontalen Beschleunigungsdiagramm annehmen.

Wir schließen den Dialog *Berechnungseinstellung* und setzen im Fenster *Berechnung* das Häkchen bei *Berechnung nach Eigenwertanalyse abbrechen*. Dadurch wird das Programm angewiesen, die statische und die Eigenwertanalyse durchzuführen. Die Analyse wird durch Klicken auf die Schaltfläche *Berechnen* durchgeführt.





Ergebnisse der Berechnung von Eigenformen und Eigenfrequenzen

Die Ergebnisse der Analyse der Eigenformen sind im unteren Teil des Fensters *Berechnung* verfügbar. Das Programm teilt mit, dass der Algorithmus wie gewünscht die ersten fünf Eigenformen gefunden hat. Die zugehörigen Eigenfrequenzen werden in einer Tabelle zusammen mit modalen Beteiligungs faktoren und modalen effektiven Massen aufgelistet. Eine modale effektive Masse sagt uns, wie viel die zugehörige Eigenform zur Bewegung in einer bestimmten Richtung (horizontal oder vertikal) beiträgt. In unserem Modell ist die erste modale effektive Masse in  $x$ -Richtung gleich 3657,92 Tonnen. Die Gesamtmasse des Modells ist gleich 4649,88 Tonnen. Dies zeigt, dass die vorherrschende Frequenz der horizontalen Schwingung jeweils die erste Eigenfrequenz  $\omega_1 = 25,36$  rad/s ist und wir diese daher als am wenigsten gedämpfte Frequenz wählen. Die einzelnen Eigenformen können betrachtet werden, wenn wir im oberen Teil der Arbeitsoberfläche *Werte: Erdbeben: Eigenwert* wählen. Zur besseren Visualisierung ist es auch möglich, *Netz: deformiert nach Magnitude* zu wählen.

## Dynamische Berechnung

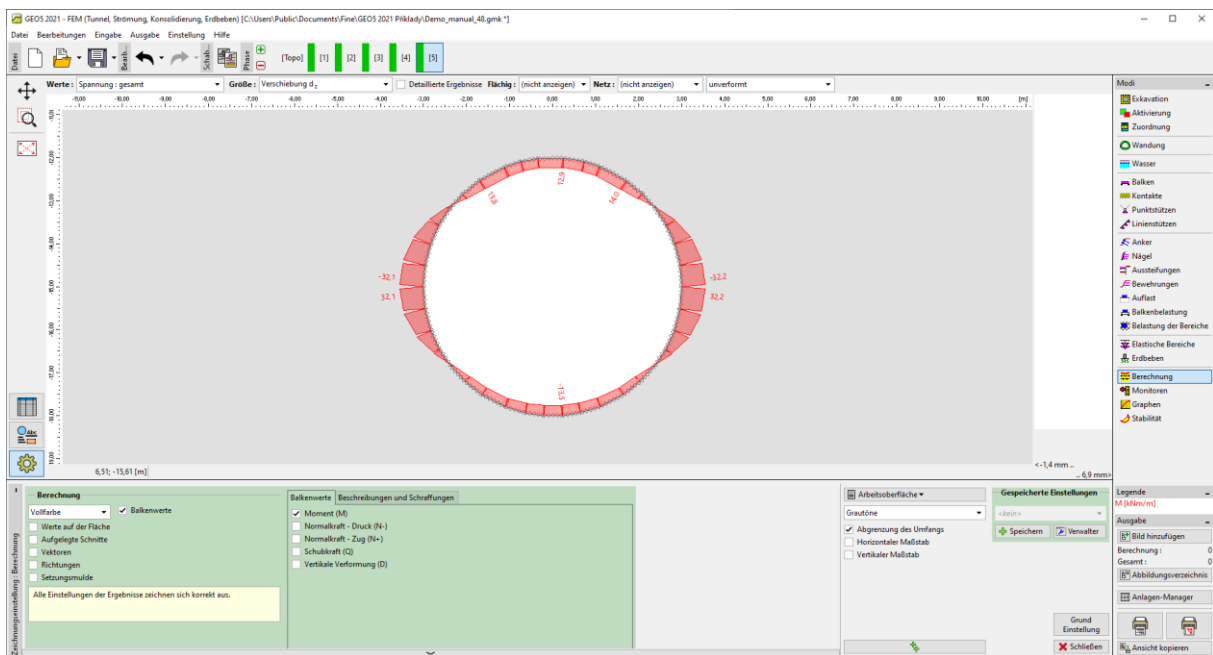
Die Dämpfungseinstellung ist fertig, und wir können die dynamische Analyse ausführen. Wir deaktivieren die Option: *Die Berechnung nach der Berechnung der Eigenform abbrechen* und dann werden wir auf die Schaltfläche *Berechnen* klicken. Wie bereits in diesem Handbuch oben geschrieben, geht der dynamischen 2D-Berechnung die sogenannte Free-field-Berechnung voraus. Dabei handelt es sich um eine dynamische 1D-Berechnung von Scher- und Druckwellen in der vertikalen Richtung, die sich durch einen geschichteten Untergrund bewegen, der den Schichten entspricht, die sich entlang der linken und rechten Begrenzung des Modells befinden. Die Ergebnisse der Berechnung gehen dann in die spezielle Art von Randbedingungen ein, die entlang der vertikalen Grenzen in der dynamischen 2D-Berechnung angewendet werden. Diese free-field-Randbedingungen stellen sicher, dass die auslaufenden mechanischen Wellen nicht zum Modell zurückreflektiert werden\*.

Die Ergebnisse am Ende des Erdbebens werden angezeigt, indem Sie *Werte: Erdbeben: gesamt* wählen.

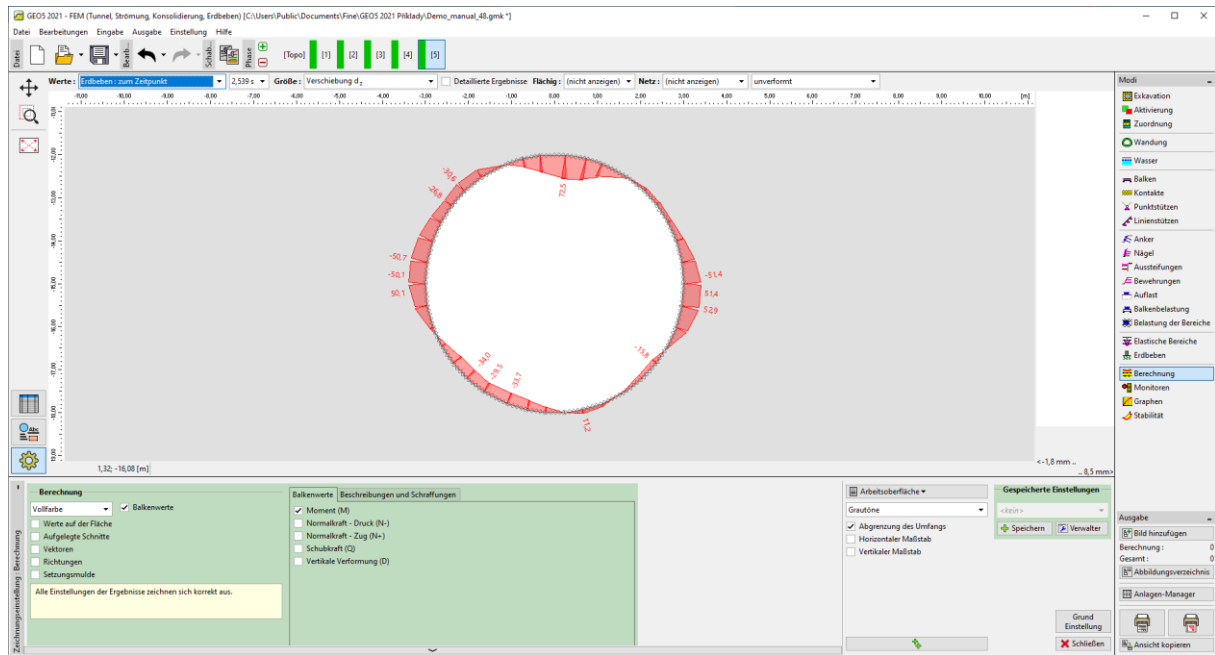
\* Sowohl die festen als auch die freien Randbedingungen reflektieren die mechanischen Wellen zurück in das Modell. Daher kann keine dieser beiden Arten für die vertikalen Ränder verwendet werden. Daher werden an den vertikalen Rändern die free-field-Randbedingungen verwendet.

Die Ergebnisse in den einzelnen Zeitschritten werden angezeigt, indem Sie *Werte: Erdbeben: in der Zeit* wählen. Wenn wir durch einzelne Zeitschritte gehen und das verformte Modell anzeigen wollen, ist es bequem, die Skalierung des verformten Netzes zu vereinheitlichen, indem Sie *Netz: verformt nach Wert* wählen.

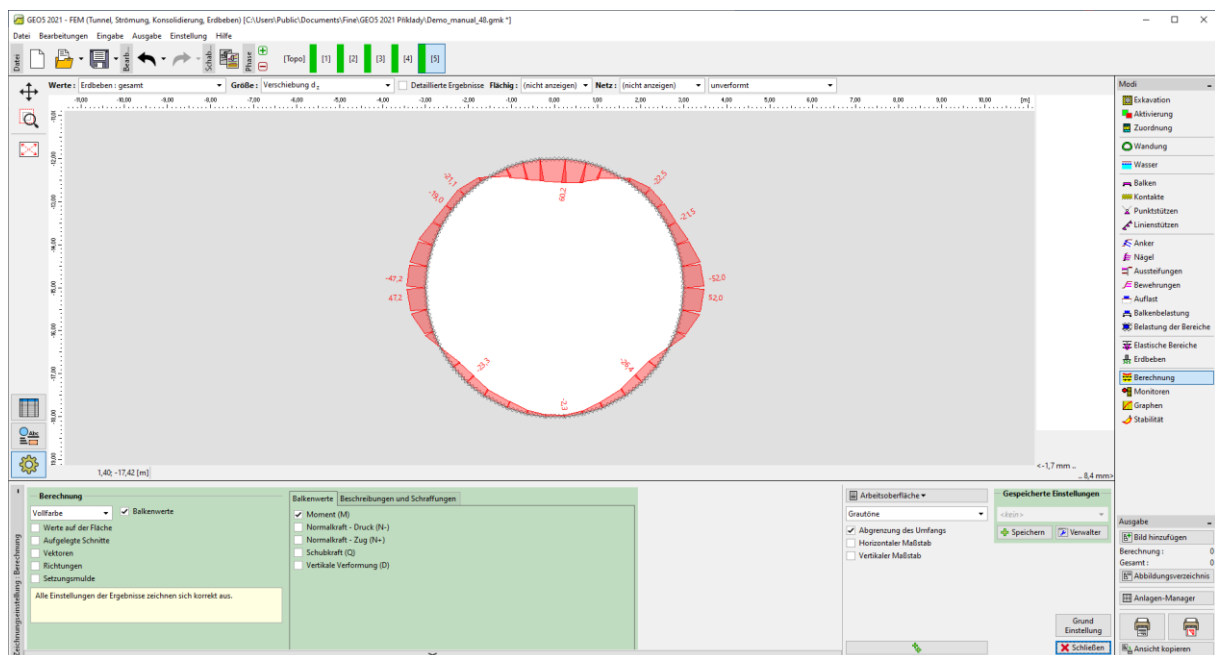
Um die Biegemomente zu visualisieren, müssen wir im Fenster *Berechnung: Netz: unverformt* einstellen. Weiter ist es nötig, *Zeichnen der Variablen auf der Balken* und *Moment* in den *Zeichnungseinstellungen* zu aktivieren, das durch Anklicken der Zahnrad-Schaltfläche im unteren linken Teil des Programmfensters geöffnet wird. Die folgenden Abbildungen vergleichen die Biegemomente in der Auskleidung am Ende der statischen Berechnung (vor dem Einwirkung von Erdbeben), zum Zeitpunkt  $t = 2,539$  s, wenn das Biegemoment sein Maximum erreicht und am Ende der dynamischen Berechnung.



*Verläufe der Biegemomente vor dem Erdbebenbelastung*

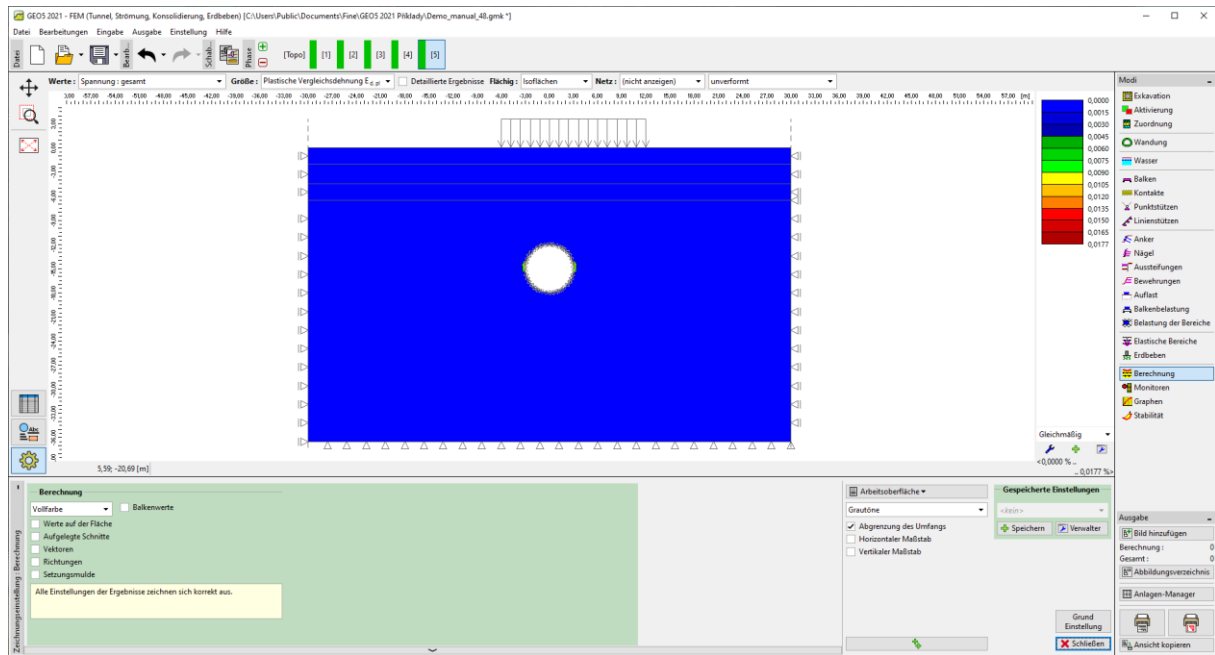


Verläufe der Biegemomente zum Zeitpunkt  $t = 2,539 \text{ s}$

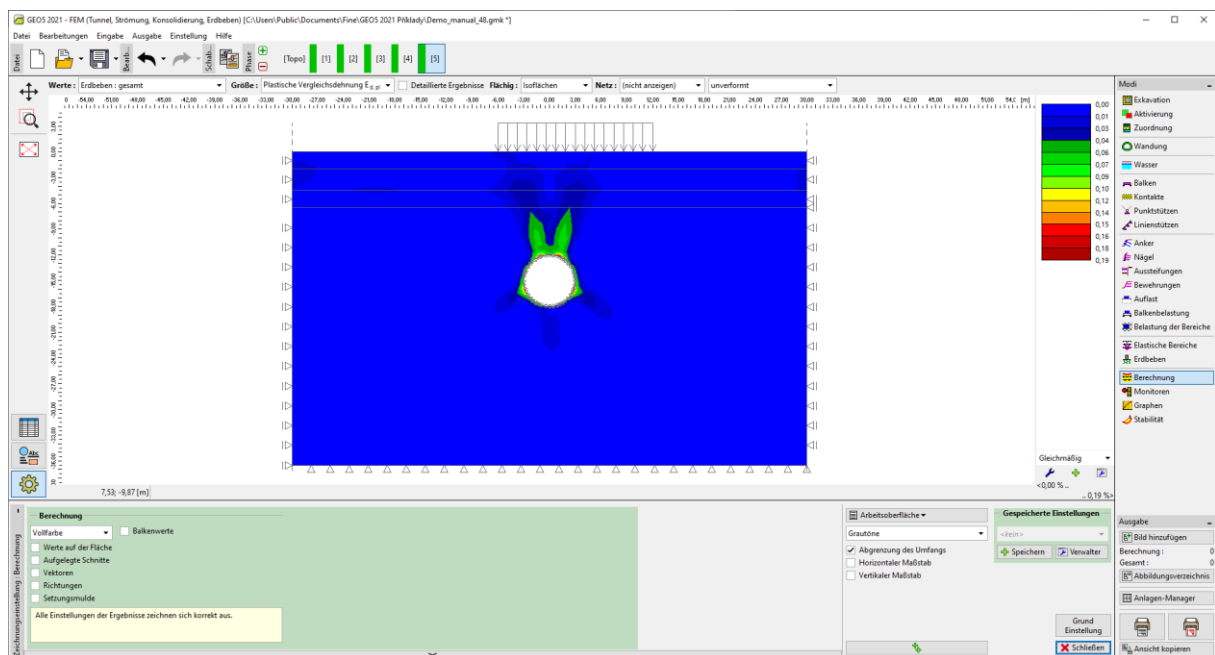


Verläufe der Biegemomente nach der Erdbebenbelastung

Die dauerhafte Änderung der Biegemomente zu Beginn und am Ende eines Erdbebens ist hauptsächlich auf die Umverteilung der Spannung zurückzuführen, die sich aus der Entwicklung plastischer Verformungen während des Erdbebens und der damit verbundenen dauerhaften Verformung der Bodenumgebung ergibt. Die plastischen Bereiche am Ende der statischen und dynamischen Analyse, d.h. vor und nach dem Erdbeben, sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.



*Bereiche mit äquivalenter deviatorischer plastischer Verformung vor Erdbebenbelastung.*



*Bereiche mit äquivalenter deviatorischer plastischer Verformung nach Erdbebenbelastung.*

## Schlussfolgerung

In diesem Handbuch haben wir das bestehende Modell in der Datei "Demo\_manual\_48\_init.gmk" um Eingaben erweitert, die für eine dynamische Berechnung des Erdbebens notwendig sind. Gemäß Eurocode 8 haben wir den Bodentyp bestimmt und ein entsprechendes Akzelerogramm erzeugt. Basierend auf der Analyse der Eigenformen und Eigenfrequenzen wählten wir die erste Eigenfrequenz des Modells als die am wenigsten gedämpfte Frequenz.

Die Ergebnisse der dynamischen Analyse zeigen eine signifikante Entwicklung der plastischen Bereiche in unmittelbarer Nähe der Tunnelauskleidung und eine Zunahme des Biegemoments von einem Maximalwert von 32,1 kNm (maximal vor dem Erdbeben an den Strossen des Tunnels) auf 60,2 kNm (Maximum am Ende des Erdbebens, in der Firste der Auskleidung). Das maximale Biegemoment während des Erdbebens betrug 72,5 kNm.