

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 <i>E</i> _{dyn}	Dämpfungsverhältnis ξ [-]
	[MPa]	
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 ξ oder direkt der Rayleigh-Dämpfungsparameter α und β wählen. Die Bedeutung dieser Parameter ist in "GEO5 - FEM - Erdbeben - Theoretischer Leitfaden" unter <u>https://www.fine.cz/manualy/</u>erläutert. Der gebräuchlichste Wert des Dämpfungsverhältnisses in geotechnischen Anwendungen ist ξ = 5%.

Bodeneigenschaften bearbeiter	1							×	
- Identifikation			- Modell Mohr - Coulomb			? •	— Darstellung —		
Name :	Soil 1		Modul der Entlastung/Auflast :	E _{ur} =	45,00	[MPa]	Probe	nkategorie :	
		_	Winkel der inneren Reibung :	$\phi_{ef} =$	28,00	[°]	GEO	-	
— Materialmodell —		? ·	Kohäsion des Gesteins :	c _{ef} =	8,00	[kPa]	Suchen :		
Materialmodell :	Mohr - Coulomb 👻		Dilatationswinkel :	ψ=	0,00	m	Unte	ergruppe :	
- Grunddaten		? -					Boden (1 - 16)	•	
Wichte :	γ = 20,00 [kN/m ³]						N	fuster :	
Elastizitätsmodul :	E = 15,00 [MPa]								
Steifigkeit mit der Tiefe :	konstant 👻						///////////////////////////////////////		
-							11	.ehm	
Poissonzahl :	v = 0,35 [-]							Farbe :	
— Auftrieb ———		? -						-	
Art der Auftriebsberechnung :	standard						Hint	tergrund :	
Wichte der gerättigten Roden	20.00 [1-b] (automatisch	•	
mente des gesutigten boden.	20,00 [RM/11]						Sättigung <10 - 90> :	50 [%]	
Klassifizieren Löschen							OK + 🦊 🗸	OK X Abbrechen	

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 Antwortsspektren erzeugt das Programm ein spektrenkompatibles 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, ν_i ist die Poissonzahl, γ_i das spezifische Gewicht und g die Fallbeschleunigung.

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	
							vs,30 =	465,6	

Berechnung der charakteristischen Scherwellengeschwindigkeit

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 nichtstationären Beschleunigungsdiagramm aus, daher lassen wir die Option nicht aktiviert.

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 ξ - 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 η – 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 ξ 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.

Akzelerogramm erzeugen X								
Akzelerogramm : horizontal 👻 🗌 Stationär				Akzelerogramm				
— Allgemeine Parameter —			Generieren	Nummer	Zeit	Beschleunigung		
Dauer des Erdbebens :	t _s =	5,000 [s]			t [s]	a _h [m/s⁺]		
Number of steps :		256						
Viskose Dämpfung :	ξ =	0,05 [-]						
Dämpfungsfaktor :	η =	1,00 [-]						
Variante :		0						
— Horizontales Antwortspel	ktrum —							
Bemessungsbeschleunigung	g : a _{gh} =	2,000E+00 [m/s ²]						
Baugrundfaktor :	S _h =	1,20 [-]						
Periode :	T _{Bh} =	0,150 [s]						
Periode :	T _{Ch} =	0,500 [s]						
Periode :	T _{Dh} =	2,000 [s]						
— Parameter von Enveloppe	enfunktione	en						
Parameter :	ε _m =	0,20 [-]						
Parameter :	$\eta_m =$	0,05 [-]						
					🗸 ОК	X Abbrechen		

Das Fenster der Erzeugung des Beschleunigungsdiagramms mit generierten Werten von Zeitschritten und Beschleunigungen

Als nächstes müssen wir die Parameter des gewünschten elastischen Antwortspektrums eingeben. Wir geben diese Parameter getrennt für das horizontale und vertikale Beschleunigungsspektrum an. Die Werte dieser Parameter für einen bestimmten Bodentyp finden Sie im Eurocode 8.

Der letzte Teil der Dialogbox dient zur Einstellung der Parameter, die die Hüllkurvenfunktion des Beschleunigungsdiagramms definieren. Der Parameter ε_m bestimmt die Zeit $t = \varepsilon_m t_s$, bei der die Hüllkurvenfunktion ihr Maximum erreicht. Der Parameter η_m steuert die Intensität der Beschleunigungen am Ende des Beschleunigungsprogramms. Er ist ein Verhältnis zwischen dem Wert der Hüllkurvenfunktion am Ende des Akzelerogramms in der Zeit t_s und dem Maximum bei $t = \varepsilon_m t_s$.

Nachdem wir alle oben genannten Parameter definiert haben, erzeugen wir das Beschleunigungsdiagramm, indem wir auf *Erzeugen* klicken. Wenn Sie auf *OK* klicken, wird das Fenster geschlossen und der generierte Datensatz wird im Fenster *Erdbeben* angezeigt.



Fenster Erdbeben mit erzeugtem Beschleunigungsdiagramm

Berechnung von Eigenformen und Eigenfrequenzen

Wir haben die Materialdämpfung über den Beiwert von Dämpfungsverhältnis ξ 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.

🧃 df 05 321 - FIM (funnet, Steinung, Krissieliderung, Erdelstei) (C.U.Seerl Public/Decoments/Feel (df 05) 3221 PM/skg/Demo, manual_48.geta ']									
Image: Image	10 10 14 10 Norminung der Eigendom die Dezilleitet Ergeboise Netz: [nicht anzügen]	Modi California Modi Attivieung Zuordnung Vandung Waser Kater Vantas Vantas Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater Kater							
		Ander Nage Ander Nage Ander Ander Ander Sevennigen Andiest Salkebeketung Belantung der Bereiche Selstebeketung Belantung der Bereiche Selstebeketung Bereichung Monteren Salkonteren Stabilität							
-1.57; -7; 14 (m)	S Egenternen van Sprinderten gelanden. De Berechwaa van Tree field wurde nicht durcharführt.	7 <u>7</u>							
Berchung Analyse nach de Berchung der eigenn Formen Aberchung Dämpfung: Am wingter gesingter Forspunct Berchungsverlauf Dämpfung: Frequenc 16: 1, tug = 25,42 rad/s	Die Berechnung des Spannungsstattende beim Erflichene wurde nicht durchgeführt. Image: Marken Imag	Ausgabe - Er Bild hinzufügen Breechnung 1 0 Gesamt 0 Er Abbildungsverzeichnis Er Anlagen-Manager Er Anlagen-Manager Er Ansicht kopieren							

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 Beteiligungsfaktoren 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

a GEOS 2021 - FEM (Tunnel, Strömung, Konsolidierung, Erdbeben) [C:\Users\Public\Documents\Fine\GEOS 2021 Pikklady\Derno_manual_48.gmk *]			- 🗆 X					
Datei Bearbehungen Eingabe Ausgabe Einstellung Hilfe								
g L 💾 − 🔚 − g 🐜 − μ→ − g 📾 g 💾 news n α α α μ α α								
🛧 Werte : Erdöeben : zum Zeitgunkt 🔍 2,539 s 👻 Größe : Verschiebung d z 🔹 🖳 Detaillierte Ergebnisse Flächig : (nicht anzeigen) 💌	Netz : (nicht anzeigen) 🔻 unverformt 👻		Modi _					
₩ <u>409 409 409 409 409 409 409 409 409 409 </u>								
🖂 🚽								
#			wasser Wasser					
			🚗 Balken					
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2			Kontakte					
			Linienstützen					
g.			S Anker					
			🗯 Nägel					
			T Aussteifungen					
			JE Bewehrungen					
541	31,4		- Auflast					
	229		Belastung der Bereiche					
	>		Tartische Bereiche					
	the state of the second se		Erdbeben					
			Berechnung					
	P'		Monitoren					
			Graphen					
Oax			J Stabilitat					
2: 133. 14/00 (m)		<-1,8 mm						
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		_ 8,5 mm>						
Berechnung Balkenwerte Beschreibungen und Schraffungen	🔛 Arbeitsoberfläche 🕶	Gespeicherte Einstellungen						
Vollfarbe Vollfarbe Voll	Grautône 👻	<kein> •</kein>	Ausgabe -					
Werte auf der Fläche Normalkraft - Druck (N-) Auforalorste Schnitte Normalkraft - Zun (Na.)	Abgrenzung des Umfangs	💠 Speichern 🔀 Verwalter	5* Bild hinzufügen					
Vektoren Schubkraft (Q)	Horizontaler Maßstab		Berechnung: 0					
Richtungen Vertikale Verformung (D)	- vermaner medstab		Gesamt: 0					
2 Setzungsmulde			B Abbildungsverzeichnis					
Alle Einstellungen der Ergebnisse zeichnen sich korrekt aus.			E Anlagen-Manager					
		Grund						
Chevra		Einstellung						
	•	X Schließen	Ra Ansicht kopieren					

Verläufe der Biegemomente zum Zeitpunkt t = 2,539 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.

/ GEC	05 2021 - FEM (Tunnel, Strömung, Konsolidierung, Erdbeben) [C:\Users\]	Public\Documents\Fine\GEO5 2021 Piklady\Demo_manual_48.gmk *]				- 🗆 ×		
Datei Bearbeiungen Eingabe Ausgabe Einstellung Hilfe								
Datei) 💾 • 🔚 • 🐒 숙 • 🥕 • 🐉 🏙 🖉 🗒	[Topo] [1] [2] [3] [4] [5]						
۰Ť.	Werte : Spannung : gesamt • Größe : Plast	tische Vergleichsdehnung E _{d. pl} 🔹 🗌 Detaillierte Ergebnisse 🛛 Flächig : Isoflächen 🔹 Netz : (nic	ht anzeigen) 👻 unverformt 💌			Modi _		
Ŧ	3,00 -57,00 -54,00 -51,00 -46,00 -45,00 -42,00 -36,00 -	33,00 -30,00 -27,00 -24,00 -21,00 -80,00 -85,00 -42,00 -4,00 -4,00 -3,00 0,00 3,00 6,00 9,00	12,00 15,00 10,00 21,00 24,00 27,00 30,00 33,00 36	00 33.00 42.00 45.00 48.00 59.00 54.00	57.00 [m] 0,0000	Exkavation		
Q					0,0015	Aktivierung		
-					0,0045	Q Wasters		
	000		AI		0,0060	- Wasser		
	872				0,0090	Balken		
	8	D			0,0105	MM Kontakte		
	***				0,0135	📓 Punktstützen		
	490 				0,0150	✓ Linienstützen		
	022				0,0177	Anker .		
	80					Aussteifungen		
	¥ -					E Bewehrungen		
						📇 Auflast		
	1 1 2200	D				Balkenbelastung		
	80					S Delastung der Bereiche		
						Erdbeben		
	22.0	Þ				Berechnung		
	0000					Monitoren		
	8					Graphen		
Ak	8					🥑 Stabilität		
	8				Gleichmäßig			
<u></u>	8-				<0,0000 %			
	2'28' -co'oa [m]			-	0,0177 %>			
	Berechnung			Arbeitsoberfläche 🕶	Gespeicherte Einstellungen			
V	Ilfarbe - Balkenwerte			Grautóne 👻	<kein> •</kein>	Ausgabe _		
6 ui	Aufgelegte Schnitte			Abgrenzung des Umfangs Horizontaler Maßstab	💠 Speichern 🔀 Verwalter	B* Bild hinzufügen		
echna	Vektoren			Vertikaler Maßstab		Berechnung: 0 Gerannti 0		
Ben	Richtungen Setzungsmulde					B Abbildungsverzeichnis		
tellung	lle Einstellungen der Ergebnisse zeichnen sich korrekt aus.					III Anlagen-Manager		
pseinst					Grund			
hnum					Einstellung	3 7		
Zeic		~		•	🗙 Schließen	Ra Ansicht kopieren		

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 entsprechenden 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.