

Numerische Modellierung eines Tunnels nach der NÖT-Methode

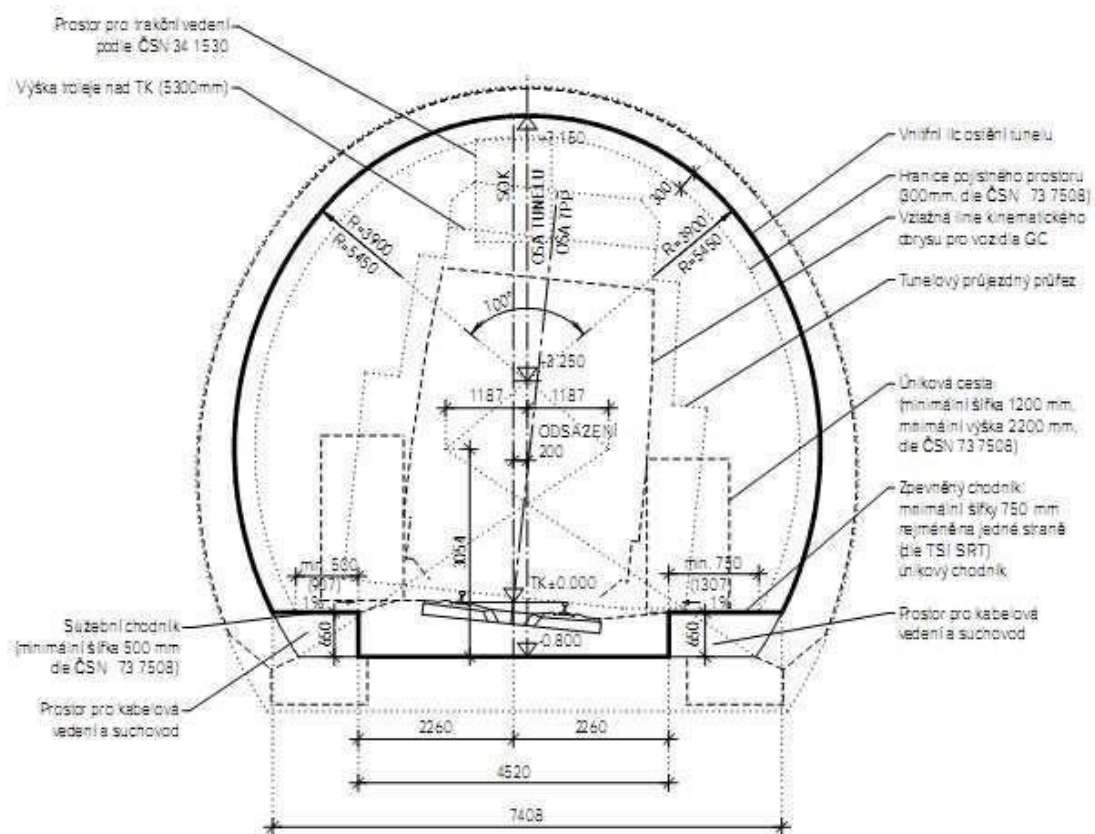
Programm: FEM - Tunnel

Datei: Demo_manual_26.gmk

Ziel dieses technischen Handbuchs ist es, die numerische Modellierung eines eingleisigen Eisenbahntunnels mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu beschreiben.

Eingabe der Aufgabe

Modellieren und bewerten Sie die Primärauskleidung eines eingleisigen Eisenbahntunnels für Geschwindigkeiten von 160 bis 230 km / h. Der Querschnitt des Tunnels wird anhand des SZDC-Musterblatts (Railway Infrastructure Administration, Landesorganisation) - (siehe *Abbildung*) betrachtet.



Querschnitt für einen eingleisigen Eisenbahntunnel nach dem SZDC-Musterblatt

Der Tunnel wird mithilfe einer konventionellen Vortriebsmethode (Neue Österreichische Tunnelbaumethode, Sequential Excavation Method) mit Kalottenvortrieb ausgehoben. Die Überlagerungshöhe beträgt ca. 14 m. Die Primärauskleidung mit einer Dicke von 200 mm besteht aus Spritzbeton der Klasse C 20/25. Die Decke wird mit hydraulisch geklemmten Schrauben (HUIS, Typ WIBOLT EXP) mit einer Tragfähigkeit von 120 kN gesichert. Basierend auf der Bewertung der Phasen der Erkundungsarbeiten gehen wir davon aus, dass die geologischen Schichten parallel zur Oberfläche sind. Die Zusammensetzung des geologischen Profils ist aus *Tabelle 1* ersichtlich.

Tabelle 1 – Boden- und Gesteinsparameter

Boden, Gestein (Spezifikation)	Profil [m]	γ [kN/m ³]	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	ν [–]	E_{def} [MPa]	E [MPa]	K_0 [–]	γ_{sat} [kN/m ³]
Lehmiger Sand (S4 / SM)	0 – 3	19	29	10	0,3	30	10	0,5	19
Lehmiger Kies (G4 / GM)	3 – 5	19	33	8	0,3	210	70	0,5	19
Stark verwitterter Schiefer (R5)	5 – 19,75	20	29	30	0,33	135	45	0,5	20
Leicht verwitterter bis gesunder Schiefer (R3)	19,75 und depth	22	38	250	0,25	1050	350	0,35	22
Verankerter Bereich (R5)	–	20	29	63	0,33	135	45	0,5	20

Lösung:

Um diese Aufgabe zu berechnen, verwenden wir das Programm GEO 5 - FEM. Im folgenden Text werden wir schrittweise die Lösung des Beispiels beschreiben:

- Topologie: Einstellung und Modellierung der Aufgabe (Kontaktelemente, Modellierung der Wandung)
- Modellierung des Bauprozesses: Material der Primärauskleidung des Tunnels, Aushubschritte
- Bauphase 1: primäre geostatische Spannung des Gesteinskörpers
- Bauphase 2: Modellierung des Kalottenvortriebs, Aktivierung des nicht gesicherten Bereichs
- Bauphase 3: Sicherung der Kalotte mit einer Primärauskleidung aus jungem Beton
- Bauphase 4: Erhöhung der Materialeigenschaften des ausgehärteten Betons (Kalotte)

- Bauphase 5: Modellierung des Abbaus der Strosse des Tunnels, Aktivierung des nicht gesicherten Bereichs
- Bauphase 6: Bewehrung der der Seitenwände des Tunnels mit einer Auskleidung aus jungem Beton
- Bauphase 7: Erhöhung der Materialeigenschaften des bereits ausgehärteten Betons (Strosse)
- Ergebnisse, Schlussfolgerung: Setzungsmulde der Geländeoberfläche, Verformung des Gesteinsmassivs, Verläufe der inneren Kräfte und Verformung der Primärauskleidung des Tunnels, Kräfte in den Ankern.

Hinweis: Die benutzerdefinierte Modellierung im Programm GEO5 - FEM besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil ist es im Topologie-Modus erforderlich, die Größe des numerischen Modells zu bestimmen, die Schnittstelle von Böden und Gesteinen und ihre Parameter einzugeben, die Geometrie des Tunnels mithilfe von Punkten und Linien zu definieren und die Zuordnung zu den entsprechenden Schnittstellen des Modells durchzuführen (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).

Im zweiten Teil werden einzelne Bauphasen definiert und eigene Berechnungen durchgeführt. Ziel ist es, in den einzelnen Bauphasen den realen Bauablauf des jeweiligen unterirdischen Bauwerks durch Aktivierung, Deaktivierung oder Änderung von Materialien in vorab begrenzten Bereichen des Modells, durch Hinzufügen oder Entfernen von repräsentierenden Balkenelementen des Bauwerks (z.B. der Tunnelauskleidung) oder durch Änderung ihrer Parameter (Material, Abmessungen) zu modellieren. Wir erhalten ein numerisches Modell, bei dem wir davon ausgehen, dass sein Verhalten mit dem zukünftigen Verhalten der realen unterirdischen Konstruktion identisch sein wird und das zur eigenen Dimensionierung der Konstruktion des Tunnels verwendet wird.

Topologie (Teil 1): Eingabe der Schnittstelle der Aufgabe (des Profils) und der Bodenparameter

Im Fenster „Einstellungen“ lassen wir die Berechnung des Bauphase 1 im K_0 -Verfahren eingestellt. Es wird die Berechnungsart „Spannungsberechnung“ angewendet. Außerdem schalten wir auf den Modus „Tunnel“ um, der es uns ermöglicht, den Verlauf des Baus der primären Tunnelschale realistisch zu modellieren.

Aufgabeneigenschaften	Berechnungsnormen	Erweiterung der Programmoptionen
Aufgabengeometrie : Eben	Betonbauten : EN 1992-1-1 (EC2)	☐ Detailparameter der Netzerzeugung
Berechnungstyp : Spannungszustand	Berechnung des Primärspannungszustandes (1. Phase)	☐ Detailbodenparameter
☒ Tunnel	Berechnungsart : K_0 Prozedur verwenden	☐ Temperaturbelastung
☐ Wasser mithilfe der Berechnung der stationären Strömung eingeben		☒ Detaillierte Ergebnisse
☐ Dynamische Berechnung von Erdbeben		
☐ Berechnung der Stabilität ermöglichen		

Fenster „Einstellung“

Anmerkung: Wenn der Modus "Tunnel" gewählt wird, ist es möglich, im Programm z.B. die Modellierung des Vortriebs (Modellierung des 3D-Effekts von Ortsbrust in der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode) durchzuführen. Weiter können die Degradationen von Balken, Balkenbelastungen und Temperaturbelastungen, Belastung der Bereiche durch Quellung eingegeben und berechnet werden. Ebenso kann man auch die Überwachung der Ergebnisse durchführen (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1).

Als nächstes geben wir die Größe des numerischen Modells und die Schnittstelle des Geländes ein. Im Fenster „Schnittstelle“ befindet sich die Schaltfläche „Einstellbereiche“. Für diese Aufgabe wählen wir die Abmessungen des Modells mit $\{-50\text{ m}; 50\text{ m}\}$. Geben Sie die untersuchte Tiefe der Schicht mit 50 m ein.

Hinweis: Die Schnittstelle der gelösten Aufgabe bzw. die Weltdimensionen müssen groß genug gewählt werden, um die Spannung und Verformung des Baugrunds am Ort der Konstruktion (oder in den umliegenden Bereichen) durch die Randbedingungen des numerischen Modells nicht zu beeinflussen. Die Orientierungswerte der empfohlenen Grenzabmessungen der Modelle für einzelne Lösungsfälle werden detailliert in der Programmhilfe beschrieben (weitere Informationen finden Sie unter F1).

Dialogbox „Weltdimensionen“

Schnittstelle 1		Schnittstelle 2		Schnittstelle 3		Schnittstelle 4	
x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
-50,0	22,0	-50,0	19,0	-50,0	17,0	-50,0	12,0
50,0	22,0	50,0	19,0	50,0	17,0	50,0	12,0

Liste der Punkte für einzelne Schnittstellen der Boden- und Gesteinsschichten

Im Fenster "Böden" definieren wir die Parameter der Bodenschichten bzw. Gesteine und die Parameter des Gesteins in dem Bereich, in dem sich die Gebirgsanker befinden (*siehe Hinweis*). Um die Aufgabe zu modellieren, verwenden wir das Mohr-Coulomb-Materialmodell, mit dem wir die Bereiche mit lokalem oder globalem Versagen berücksichtigen können (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).

Hinweis: Die Einführung von Ankern in das numerische Modell erfolgt nach einer Methode, bei deren sich der verankerten Bereich in der Nähe des Aushubs, die der Länge der Anker (= Nägel) entspricht, durch Gestein mit besseren Materialparametern ersetzt wird. In solchen Fällen wird üblicherweise eine Erhöhung der Kohäsion des Gesteins in Betracht gezogen. Die durch die Wirkung der Ankerbewehrung erhöhte Gesamtkohäsion des Gesteins ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [kPa]}$$

wo: c_{h+s} die aufgrund der Ankerbewehrung erhöhte gesamte Kohäsion des Gesteins,
 c_h primäre Kohäsion des Gesteins,
 c_s Erhöhung der Kohäsion durch Ankerbewehrung

Die Zunahme der Kohäsion aufgrund der Ankerbewehrung wird gemäß der folgenden Beziehung berechnet:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \phi_{ef}}{2 \cdot \cos \phi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} = \frac{120}{2,058} \cdot \frac{1 + \sin 29^\circ}{2 \cdot \cos 29^\circ} \cdot \frac{1}{1,5} = 33,0 \text{ kPa}$$

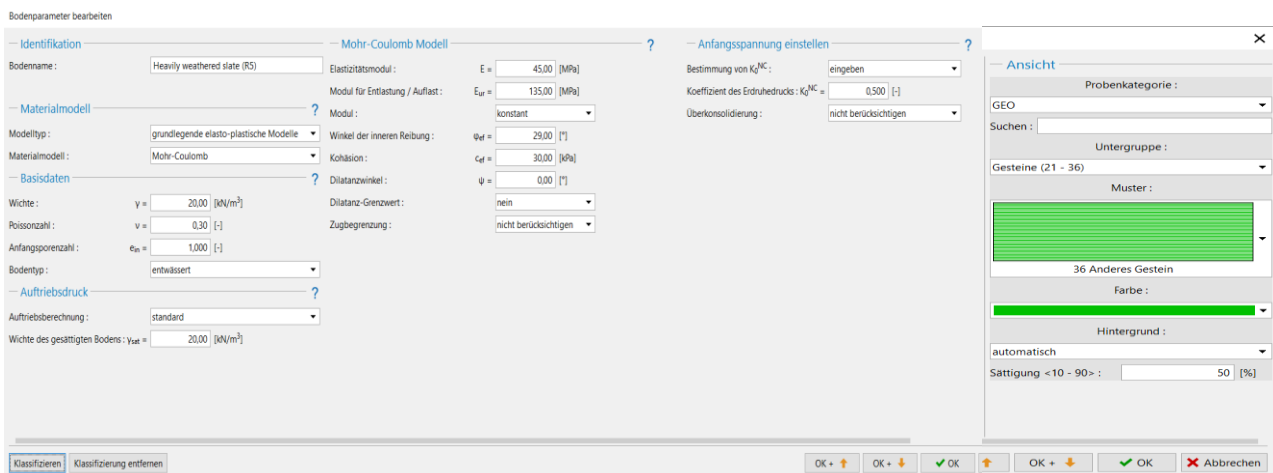
wo: N_u Tragfähigkeit des Ankers [kN],
 A_k einem Felsanker zugeordneter Bereich [m²],
 ϕ_{ef} Winkel der inneren Reibung des Gesteins [°],
 γ_{kc} Zuverlässigkeitsbeiwert der Verankerung[—].

Bei dieser Aufgabe betrachten wir **10 Stück HUIS-Anker mit einer Tragfähigkeit von 120 kN in einem Abstand von 3,5 m**. Die resultierende Scherfestigkeit bzw. Kohäsion im verankerten Bereich entspricht dem Gesteinstyp R5:

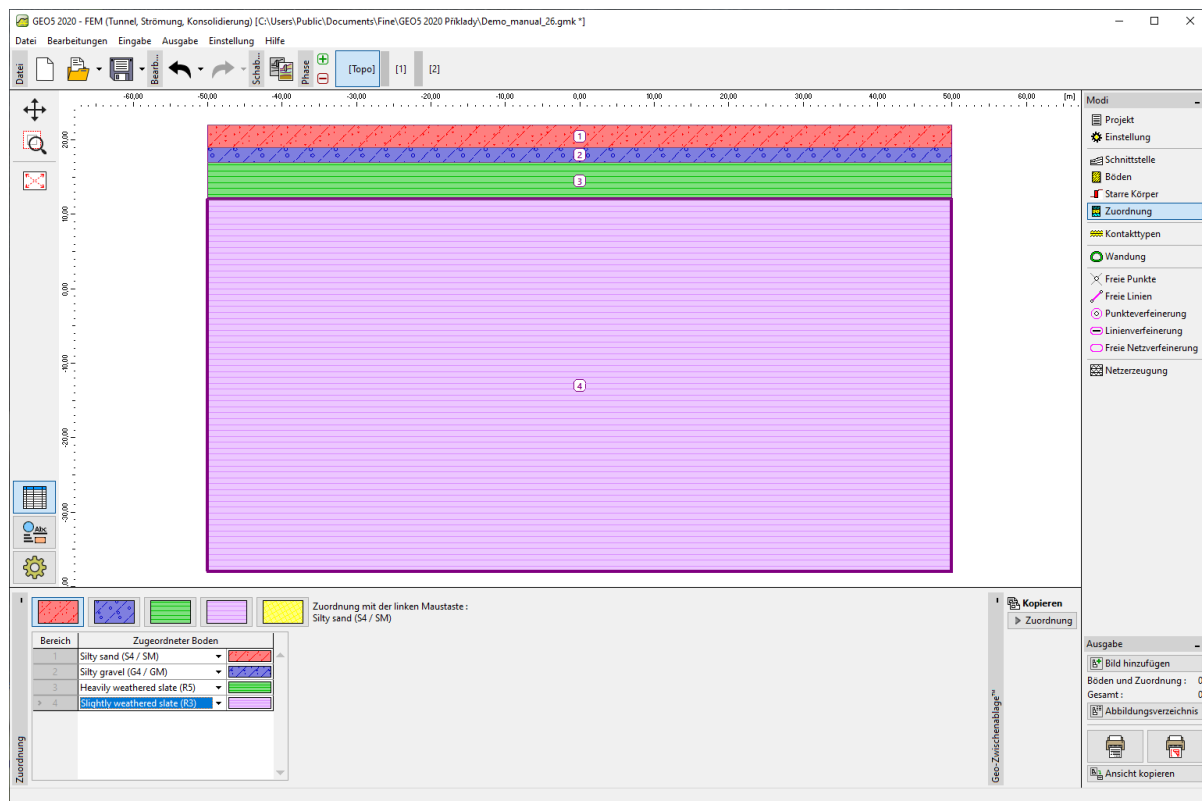
$$c_{h+s} = c_h + c_s = 30 + 33 = 63 \text{ kPa}$$

Der Elastizitätsmodul E [MPa] wurde nicht direkt durch eine geologische Untersuchung bestimmt, daher wurde sein Wert aus dem Verformungsmodul E_{def} [MPa] unter Verwendung der allgemeinen Beziehung $E = 3 \cdot E_{def}$ abgeleitet. Der Entlastungsmodul wird berücksichtigt $E_{ur} = 3E$

Für alle Boden- und Gesteinsschichten betrachten wir den Dilatanzwinkel ψ [°] als Null. Anschließend ordnen wir einzelnen Bereichen Böden und Gesteine zu (siehe folgende Abbildung).



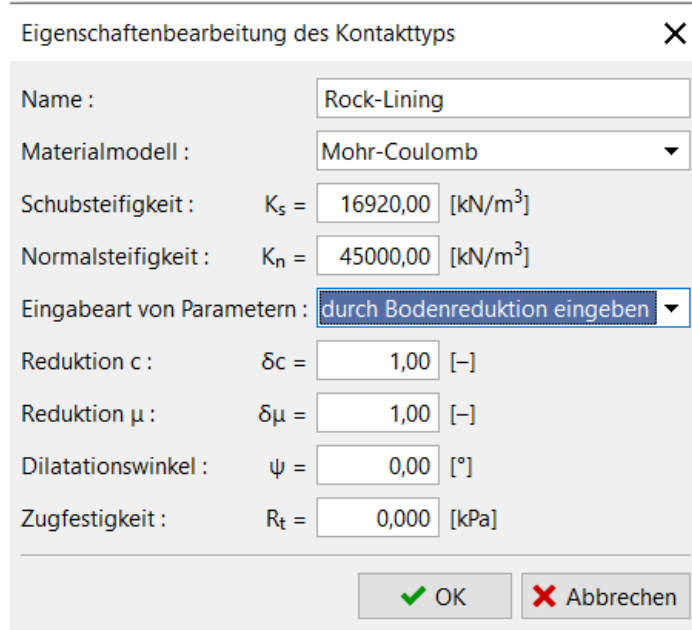
Dialogbox „Neue Böden hinzufügen“



Fenster „Zuordnung“

Der nächste Schritt besteht darin, die Art der Kontaktelemente einzugeben, die an der Schnittstelle der Wandung mit dem Boden oder Gestein im Fenster "Kontakttypen" eingeführt werden. Wir nehmen die Parameter der Kontakte auf der Schnittstelle wie folgt an:

- Scherfestigkeit: $K_s = 16,920 \text{ kN/m}^3$,
- Normalsteifigkeit: $K_n = 45,000 \text{ kN/m}^3$,
- Bodenreduktion: $\delta c = \delta \mu = 1.0$.



Dialogbox „Neue Kontakttypen“

Hinweis: Kontaktelemente ermöglichen es, die gegenseitige Wechselwirkung von Materialien entlang der Schnittstelle zwischen Boden und Konstruktion bzw. zwischen einzelnen Böden zu berücksichtigen. Das Kontaktelement hat eine Dicke von Null und drückt die Beziehung zwischen den Kontaktspannungen und der relativen Änderung der Verschiebungen entlang des Kontakts aus (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1). In diesem Fall betrachten wir die Kontaktelemente an der Schnittstelle zwischen der Primärauskleidung und dem Gestein, d.h. wir betrachten eine bestimmte Möglichkeit, die Primärauskleidung auf der Ausbruchsfläche zu verschieben.

Kontaktelemente werden im Allgemeinen in weniger tragfähigen Böden eingeführt. Bei gesunden intakten Gesteinen können Kontakte mit einiger Vorsicht (bei Tunnelkonstruktionen) vernachlässigt werden. Das Problem und die Methode zur Einführung von Kontaktelementen wurden in Kapitel 24. Numerische Lösung einer Verbaukonstruktion ausführlich beschrieben. (weitere Informationen finden Sie unter <https://www.finesoftware.de/projektierungs-handbucher/>) Orientierungswerte für die Steifheit K_s und K_n [kN/m³] sind in der Programmhilfe angegeben (siehe F1).

Damit ist die grundlegende Eingabe der Aufgabe (Schnittstellenmodellierung, Bodenparameter, Kontakttypen) abgeschlossen. Wir werden nun mit der Modellierung der Primärauskleidung des Tunnels fortfahren und dann zu der Eingabe des verankerten Bereichs übergehen.

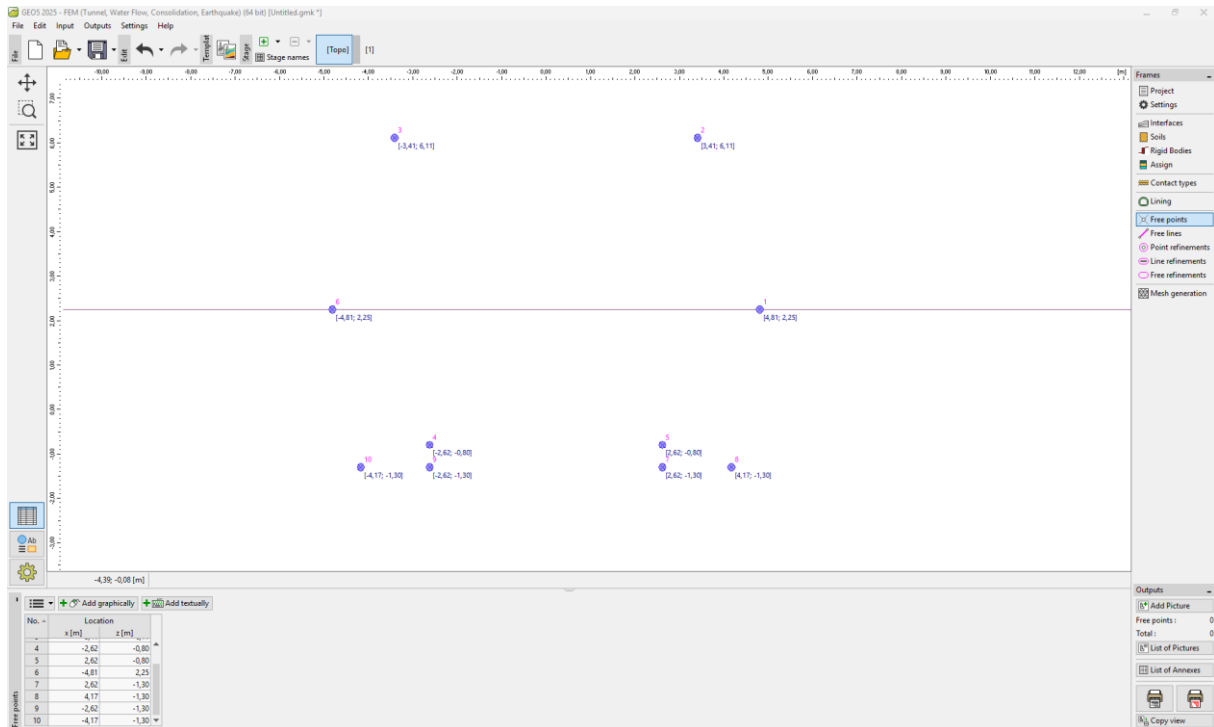
Topologie (Teil 2): Modellierung der Wandung und des mit Gebirgsankern bewehrten Bereichs

Wir wechseln in den Rahmen „Freie Punkte“ und klicken auf die Schaltfläche „Textuell hinzufügen“, um die Punkte der Verkleidung zu definieren.

Die Aushubquerschnittsgeometrie wird durch zehn freie Punkte festgelegt (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2 – Freie Punkte der Form des Aushubs (Primärauskleidung)

Nummer des Punkts	Koordinate x [m]	Koordinate y [m]
1	4,81	2,25
2	3,41	6,11
3	-3,41	6,11
4	-2,62	-0,80
5	2,62	-0,80
6	-4,81	2,25
7	2,62	-1,30
8	4,17	-1,30
9	-2,62	-1,30
10	-4,17	-1,30



Modellierung der Wandung

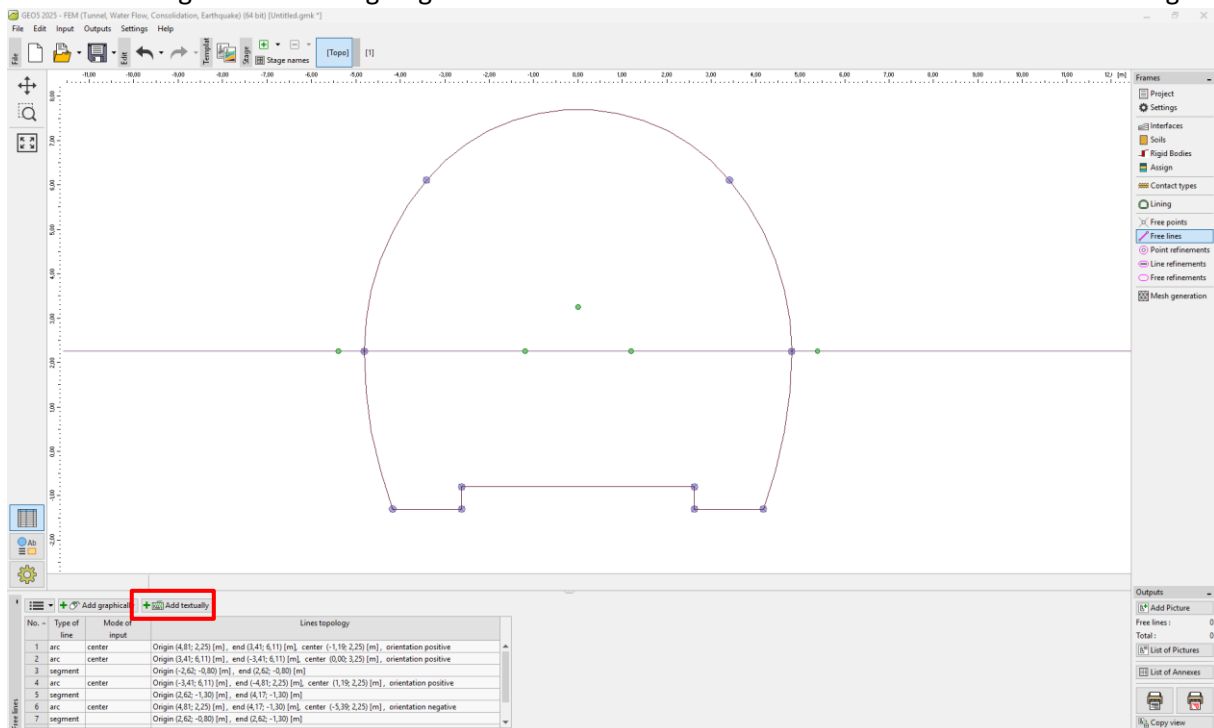
Danach wechseln wir zum Rahmen „Freie Linien“ und verbinden den Punkt durch Segmente und Bögen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 – Freie Linien des Aushubs (Primärauskleidung)

Nummer der Linie	Linientyp	Art der Eingabe	Topologie der Linie
1	Bogen	Mitte	Ursprung – Punkt 1, Ende – Punkt 2 Mitte (-1,19; 2,25), Orientierung positiv
2	Bogen	Mitte	Ursprung – Punkt 2, Ende – Punkt 3, Mitte (0,00; 3,25), Orientierung positiv
3	Abszisse	–	Ursprung – Punkt 4, Ende – Punkt 5
4	Bogen	Mitte	Ursprung – Punkt 3, Ende – Punkt 6, Mitte (1,19; 2,25), Orientierung positiv

5	Abszisse	–	Ursprung – Punkt 7, Ende – Punkt 8
6	Bogen	Mitte	Ursprung – Punkt 1, Ende – Punkt 8, Mitte (-5,39; 2,25), Orientierung negativ
7	Abszisse	–	Ursprung – Punkt 5, Ende – Punkt 7
8	Abszisse	–	Ursprung – Punkt 9, Ende – Punkt 10
9	Bogen	Mitte	Ursprung – Punkt 10, Ende – Punkt 6, Mitte (5,39; 2,25), Orientierung negativ
10	Abszisse	–	Ursprung – Punkt 4, Ende – Punkt 9

Die folgende Abbildung zeigt die freien Linien der Form des Aushubs der Primärauskleidung.



Modul „Auskleidung“ - FEM" - Freie Aushublinien (mit horizontaler Sequenzierung)

Während des Aufbaus des unterirdischen Baus wird die Sicherung der Decke mit Felsankern berücksichtigt. Dies wird in der Ingenieurpraxis normalerweise als Verbesserung der Parameter des in diesem Bereich vorhandenen Gesteins modelliert.

Aus diesem Grund ist es auch erforderlich, den mit Felsankern bewehrten Bereich mit freien Punkten (siehe *Tabelle 4*) und freien Linien (siehe *Tabelle 5*) einzugeben.

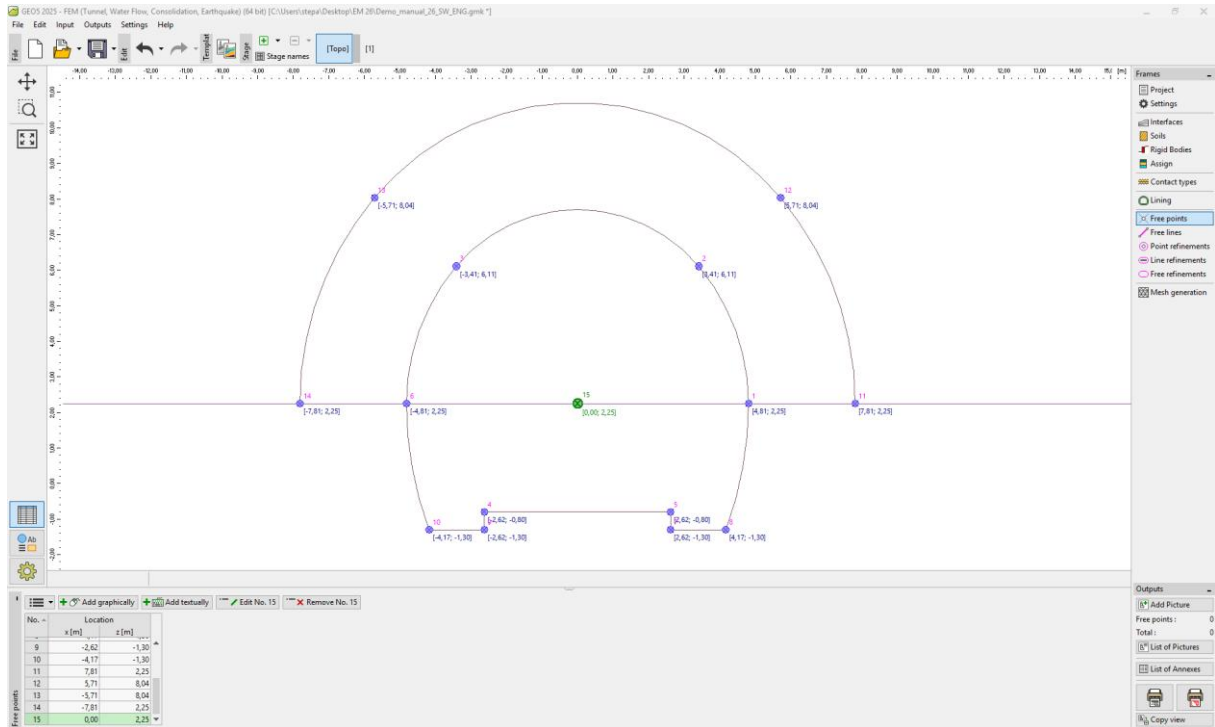
Tabelle 4 - Freie Punkte in der Nähe des verankerten Bereichs mit hydraulisch expandierten Felsbolzen

Nummer des Punkts	Koordinate x [m]	Koordinate y [m]
11	7,81	2,25
12	5,71	8,04
13	-5,71	8,04
14	-7,81	2,25

Tabelle 5 - Freie Linien in der Nähe des verankerten Bereichs mit hydraulisch expandierten Felsbolzen

Nummer der Linie	Linientyp	Art der Eingabe	Topologie der Linie
11	Bogen	Halbmesser	Ursprung – Punkt 14, Ende – Punkt 13 Halbmesser – 9,0 m, Orientierung negativ Eingeschlossener Winkel – scharf
12	Bogen	Halbmesser	Ursprung – Punkt 13, Ende – Punkt 12 Halbmesser – 7,45 m, Orientierung negativ Eingeschlossener Winkel – scharf
13	Bogen	Halbmesser	Ursprung – Punkt 12, Ende – Punkt 11 Halbmesser – 9,0 m, Orientierung negativ Eingeschlossener Winkel – scharf

Dann fügen wir einen neuen freien Punkt Nr. 15 mit den Koordinaten [0,0; 2,25] im Rahmen „Freie Punkte“ hinzu und erhöhen anschließend die Dichte des Netzes der finiten Elemente um ihn herum (siehe Topologie - Teil 3.



Freie Punkte in der Nähe des verankerten Bereichs und freie Punkte der Primärverkleidung

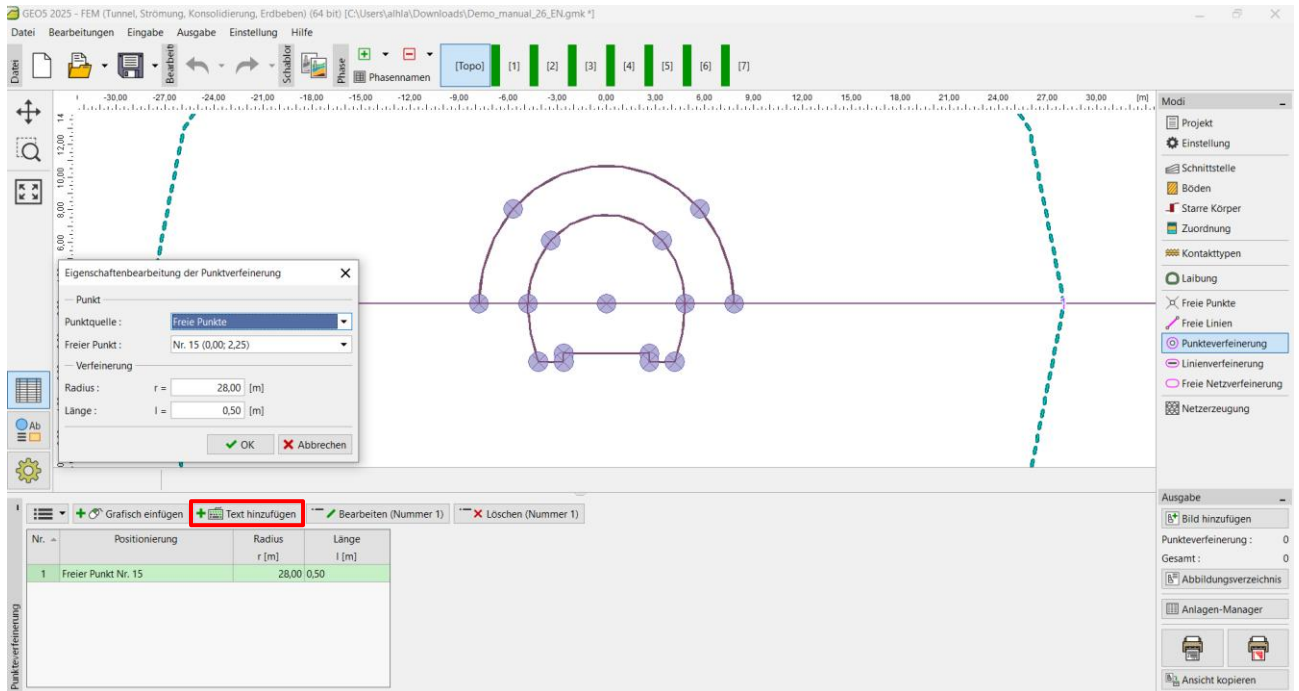
Im letzten Teil der Eingabe der Topologie der Konstruktion fahren wir mit der Erzeugung und Verfeinerung des Finite-Elemente-Netzes fort.

Topologie (Teil 3): Erzeugung und Verfeinerung eines Finite-Elemente-Netzes

Das Finite-Elemente-Netzwerk beeinflusst die resultierenden Werte der Berechnung erheblich. Bevor wir das Netz erzeugen, werden wir zunächst die Verfeinerung im Aushubraum (um Punkt Nr. 15) mit der Kantenlänge der Elemente $l = 0,5 \text{ m}$ und der Reichweite mit dem Halbmesser $r = 28 \text{ m}$ durchführen.

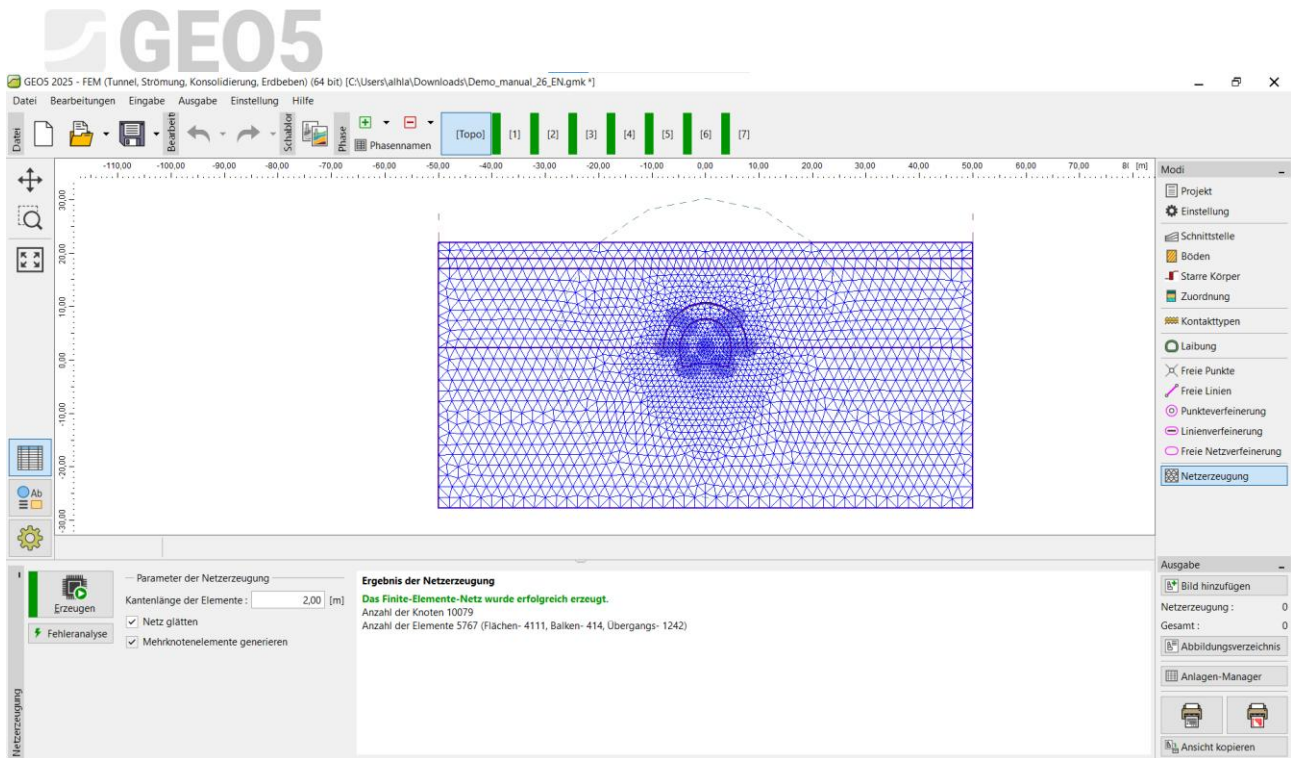
Im Rahmen „Punktverfeinerungen“ wählen wir durch Klicken auf die Schaltfläche „Grafisch hinzufügen“ oder „[Text] hinzufügen“ den Punkt Nr. 15 und setzen $r = 28 \text{ m}$ und $l = 0,5 \text{ m}$.

Hinweis: Dieser Schritt stellt ein ausreichend dichtes Netz um das Bereich in und um den Ausbruchquerschnitt sicher. Die Beschreibung der Verfeinerung der freien Punkte bzw. der Linien wird in Kapitel 23. Beanspruchung der Wandung des Kollektors ausführlich beschrieben. (siehe mehr <https://www.finesoftware.de/projektierungs-handbuecher/>).



Dialogbox „Neue Punktverfeinerungen“

Dann gehen wir direkt zur FE-Netzerzeugung über. Stellen Sie im Fenster "Netzerzeugung" die Kantenlänge der Elemente auf 2,0 m ein und wählen Sie dann die Option zum Glätten des Netzes.



Rahmen „Netzgenerierung“ - Verfeinerung der Punkte in der Nähe des Aushubbereichs (Länge 0,5 m)

Hinweise zur Modellierung des Bauprozesses:

In diesem Teil des Handbuchs präsentieren wir der Übersichtlichkeit halber einige wichtige Hinweise, die sich auf den tatsächlichen Bauablauf beziehen - das Material der Primärauskleidung des Tunnels, Ausbruchsequenzen. Diese Informationen sind nützlich für die numerische Modellierung unseres Beispiels, da einige Einfügungen der Eingangsdaten wiederholt werden (wie z. B. der Ablauf des Ausbruchs).

Hinweis: Die Bauphasen berücksichtigen den tatsächlichen Bauablauf. Um die einzelnen Bauphasen zusammenstellen zu können, müssen wir das Material der Primärauskleidung, Ausgrabungssequenzen und die hydrogeologischen Bedingungen während des Ausbruchs kennen.

*Wir werden die **Primärauskleidung** aus Spritzbeton C 20/25 mit der erforderlichen Dicke von 200 mm entwerfen. Wir geben in das numerische Modell nur Spritzbeton und den Einfluss der Festigkeitssteigerung bzw. Elastizitätsmodul mit der Zeit ein. (siehe Tabelle 6).*

Tabelle 6 – Werte des Elastizitätsmoduls von Spritzbeton (zeitliche Entwicklung)

Reifungsphase von Spritzbeton	Elastizitätsmodul E_{cm} [MPa]	Elastizitätsmodul bei Scherung G [MPa]
Junger Beton	2 900	1 134
Ausgehärteter Beton	29 000	11 340

Hinweis: Der Tunnelvortrieb wird als ebenes Modell modelliert, das die räumlichen Änderungen der Spannung des Gebirges, die während des Vortriebs im Bereich der Ortsbrust auftreten, nicht vollständig berücksichtigt. Während des Ausbruchs wird der vorübergehend nicht armierte Bereich vom Gebirge vor der Ortsbrust (Längs- oder Quergewölbe aus Gestein) und dem zuvor armierten Teil des Ausbruchs gestützt. Dieses Verhalten kann nur durch ein räumliches 3D-Modell beschrieben werden, bei einem ebenen 2D-Modell ist das Verhalten in Richtung des Ausbruchs annähernd gelöst.

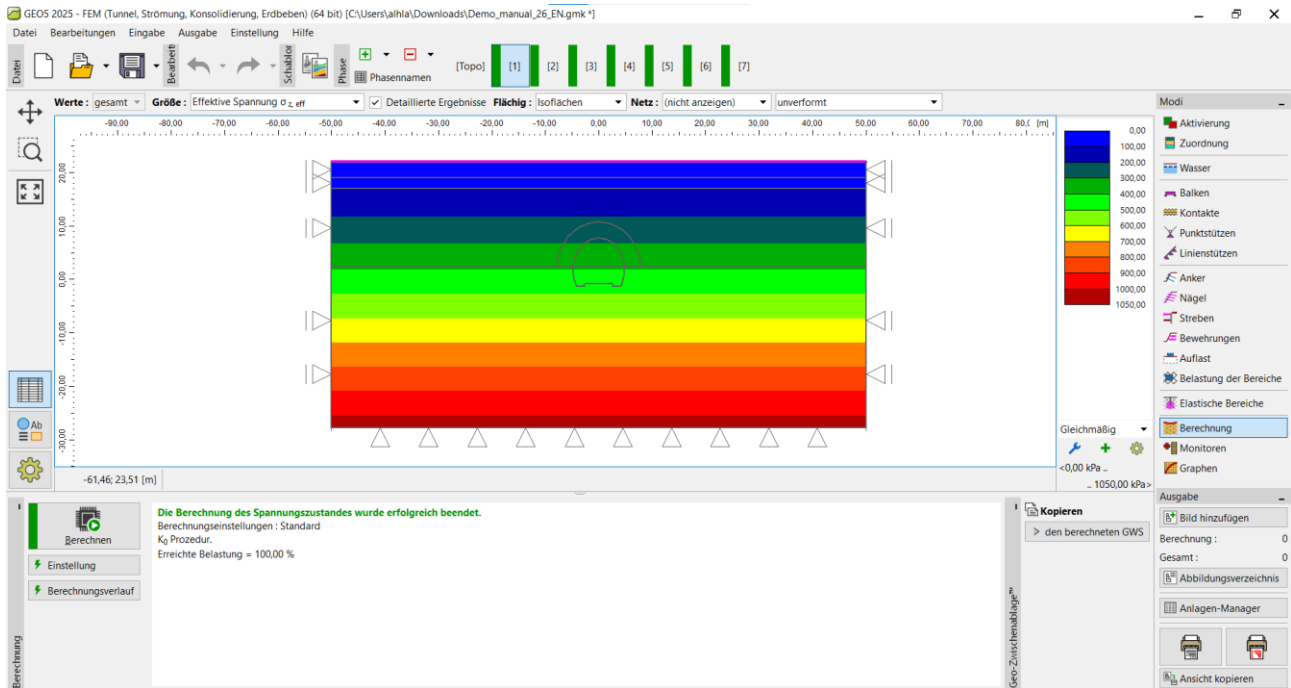
Die in der Ingenieurpraxis am häufigsten verwendete Methode (allgemein als λ -Methode oder β -Methode bezeichnet), bei der davon ausgegangen wird, dass sich die Primärspannung des Gebirges, d.h. die ursprüngliche Spannung σ_0 , die vor dem Aushub um den zukünftigen Ausbruch wirkt, sich mit der Zeit gemäß der Beziehung $((1 - \beta) \cdot \sigma_0)$ allmählich ändert (für Primärspannung $\beta = 1$).

Wenn wir die Änderung der Primärspannung in 2 Phasen der Berechnung (Bauphasen) modellieren, wird in der ersten Phase der nicht armierte Ausbruch mit dem Wert $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ belastet und die verbleibende Belastung der Größe $\beta \cdot \sigma_0$ wird in der zweiten Phase berücksichtigt.

Bei einem Teilausbruch muss dieses Verfahren für jeden Ausbruchsabschnitt separat angewendet werden. Der Wert des Koeffizienten β hängt von der Geologie des Gebirges ab, der Abschlagslänge und der Größe des Ausbruchquerschnitts ab und ist somit relativ schwer zu bestimmen. In GEO5 - FEM wird diese Methode durch die sogenannte ‚Exkavation‘ dargestellt. Für die numerische Modellierung des Tunnels haben wir seinen Wert für das eingeleisige Profil für die Kalotte und die Strosse auf $\beta = 0,6$ geschätzt.

Bauphase 1: primäre geostatische Spannung (Primärspannungszustand)

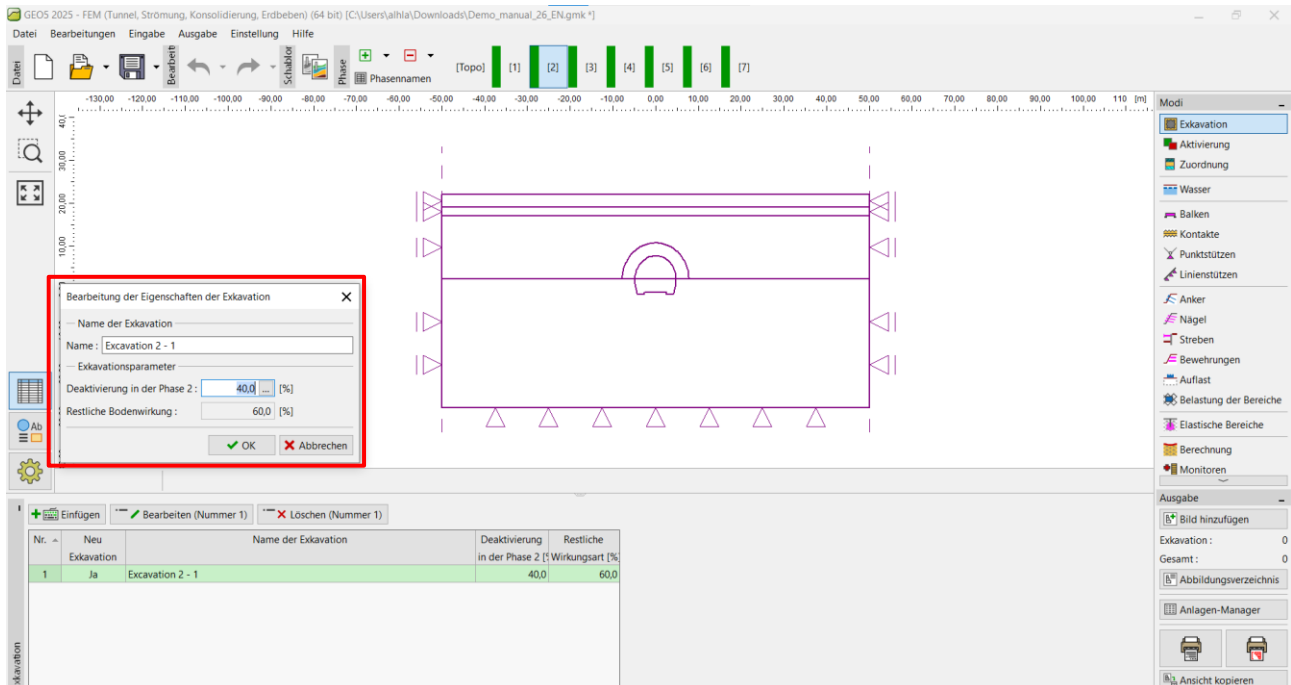
Nach der Erzeugung des FE-Netzes wechseln wir in die 1. Bauphase und führen dann die Berechnung der primären geostatischen Spannung des Gebirges durch. Wir behalten die Berechnungseinstellung für alle Bauphasen als "Standard" bei (weitere Informationen finden Sie in der Hilfe - F1).



Rahmen „Berechnung,“ - Bauphase 1 (primäre geostatische Spannung) $\sigma_{z,eff}$

Bauphase 2: Aushub der Kalotte, Aktivierung des nicht gesicherten Bereichs

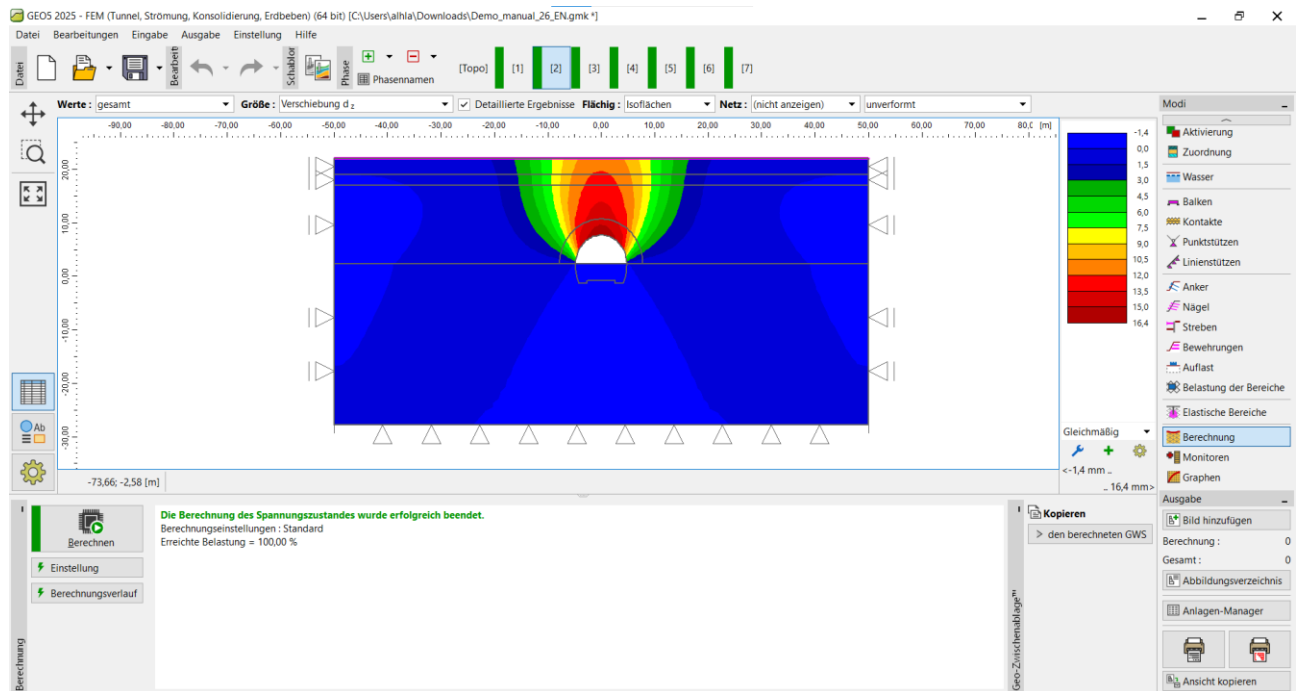
Im nächsten Schritt fügen wir den Bauphase 2 hinzu. Im Rahmen „Aushub“ fügen wir einen neuen Aushub hinzu und setzen die Deaktivierung auf 40%, dann im Rahmen „Aktivität“ und führen den Aushub für die Region Nr. 5 durch.



Dialogbox „Neue Exkavationen“ – Bauphase 2

Hinweis: In der Ingenieurpraxis erfolgt die Aufteilung der Ortsbrust (einzelne Teilausbrüche) anhand des prozentualen Verhältnisses der Deaktivierung des Bodens zur verbleibenden Bodenwirkung. In diesem Beispiel berücksichtigen wir für die einzelnen Phasen des Tunnelbaus die folgenden Verhältnisse der Exkavationen:

- Aushub der Kalotte, Aktivierung des nicht gesicherten Bereichs: 40 % / 60 %,
- Sicherung des Gewölbes der Kalotte mit Primärauskleidung aus jungem Beton: 30 % / 30 %,
- Erhöhung der Materialeigenschaften des ausgehärteten Betons (Kalotte): 30 % / 0 %.
- Modellierung des Ausbruchs der Strosse, Aktivierung des nicht gesicherten Ausbruchs: 40 % / 60 %,
- Wandbewehrung der Strosse mit der Primärauskleidung aus jungem Beton: 30 % / 30 %,



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (vertikale Verschiebung d_z mit der Setzungsmulde)

Bauphase 3: Bewehrung des Gewölbes der Kalotte mit einer Primärauskleidung aus jungem Beton

Im nächsten Schritt fügen wir den Bauabschnitt 3 hinzu. Zunächst modellieren wir den oberen Gewölbeträger mit einer 200 mm dicken, unreifen Primärbetonauskleidung ($E = 2900 \text{ MPa}$, $G = 1134 \text{ MPa}$), wählen im Rahmen „Träger“ durch Klicken auf die Schaltfläche „Grafisch hinzufügen“ Teile der Auskleidung aus und stellen die Parameter ein.

The screenshot displays the GEO5 software interface. The main window shows a cross-section of a tunnel with three beams (1, 2, 3) defined. The 'Balken' (Beam) editor is open, showing the properties for the selected beam (Beam 3). The 'Material-Editor - Beton' (Concrete) dialog is also open, showing the material properties for concrete (C 20/25).

Balken-Editor (Beam Editor) Details:

- Topologie: freie Linie
- Positionierung: freie Linie
- Freie Linie: Die freie Linie Nr. 1
- Parameter: ☒ Eigengewicht berücksichtigen
- Querschnitt und Material:
 - Querschnittstyp: rechteckige Wand
 - Querschnittshöhe: $h = 0,20 \text{ [m]}$
 - Querschnittsbreite: $b = 1,00 \text{ [m]}$
 - Materialtyp: Beton
 - Name: C 20/25
- Kontakte:
 - ☐ Den Kontakt links berücksichtigen
 - ☒ Den Kontakt rechts berücksichtigen
 - Kontakttyp: Rock-Lining

Material-Editor - Beton (Material Editor - Concrete) Details:

- Name: C 20/25
- Grundlegende Materialeigenschaften:
 - Elastizitätsmodul $E_{cm} = 2900,00 \text{ MPa}$
 - Schubmodul $G = 1134,00 \text{ MPa}$
 - Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_t = 0,000010 \text{ 1/K}$
 - Reinwichte $\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
- Besondere Materialeigenschaften:
 - Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck} = 20,00 \text{ MPa}$
 - Zugfestigkeit $f_{ctm} = 2,20 \text{ MPa}$
- Werte nachrechnen: ☐
- Zementfestigkeitsklasse: ☐ S ☒ N ☐ R

Balken-Liste (Beam List):

Nr.	Balken	Positionierung	Auflagerung [m]	Eigengewicht berücksichtigen	Querschnitt / Degradation in der aktuellen Phase [%]	Material / Aktuelle Balkenwirkung [%]	Kontakte
1	Ja	Die freie Linie Nr. 1	Anfang 0,20 Ende	☒	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; $E = 2900,00 \text{ MPa}$; $G = 1134,00$ (nicht eingegeben)	Rock-Lining
2	Ja	Die freie Linie Nr. 2		☒	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; $E = 2900,00 \text{ MPa}$; $G = 1134,00$ (nicht eingegeben)	Rock-Lining
3	Ja	Die freie Linie Nr. 4		☒	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; $E = 2900,00 \text{ MPa}$; $G = 1134,00$ (nicht eingegeben)	Rock-Lining

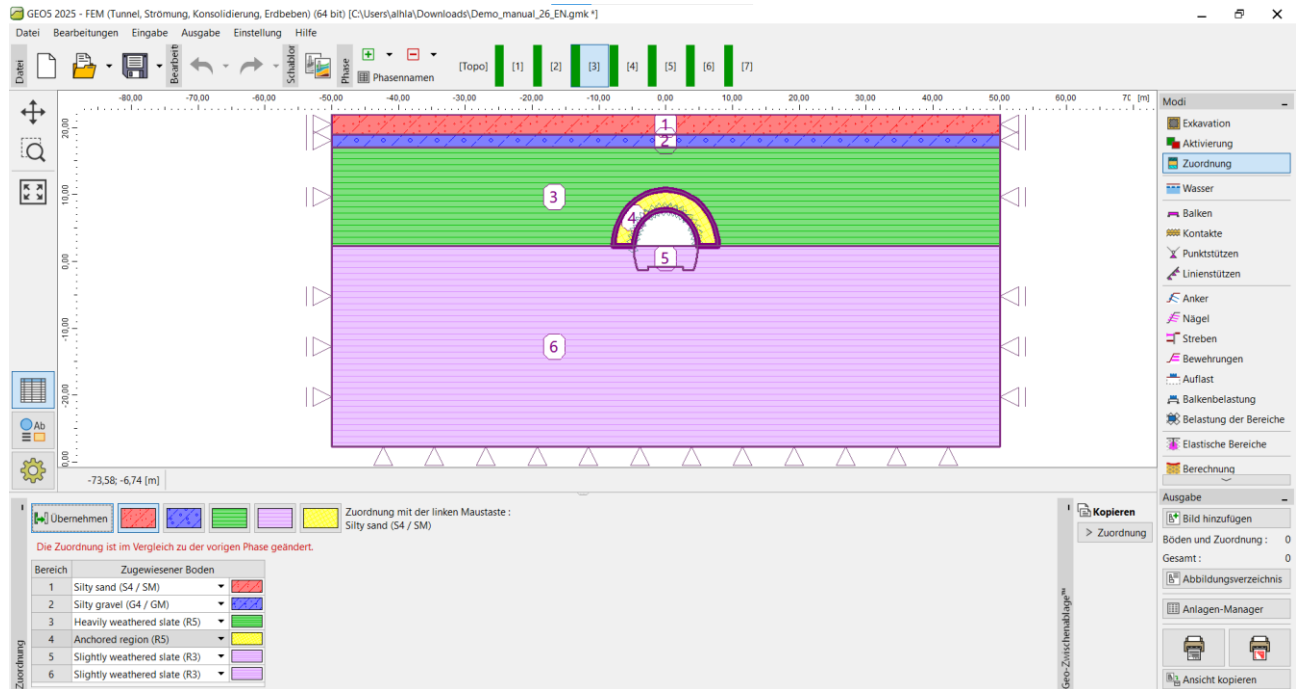
Eingabe der Primärauskleidung der Kalotte mithilfe eines neuen Balkens - Bauphase 3 (junger Beton)

Hinweis: Wir betrachten die Enden von Trägern, die an beiden Enden als Fuß modelliert sind, was bedeutet, dass die Biegemomente an den unteren Enden der Träger null sind. Der Fuß ist ein spezieller



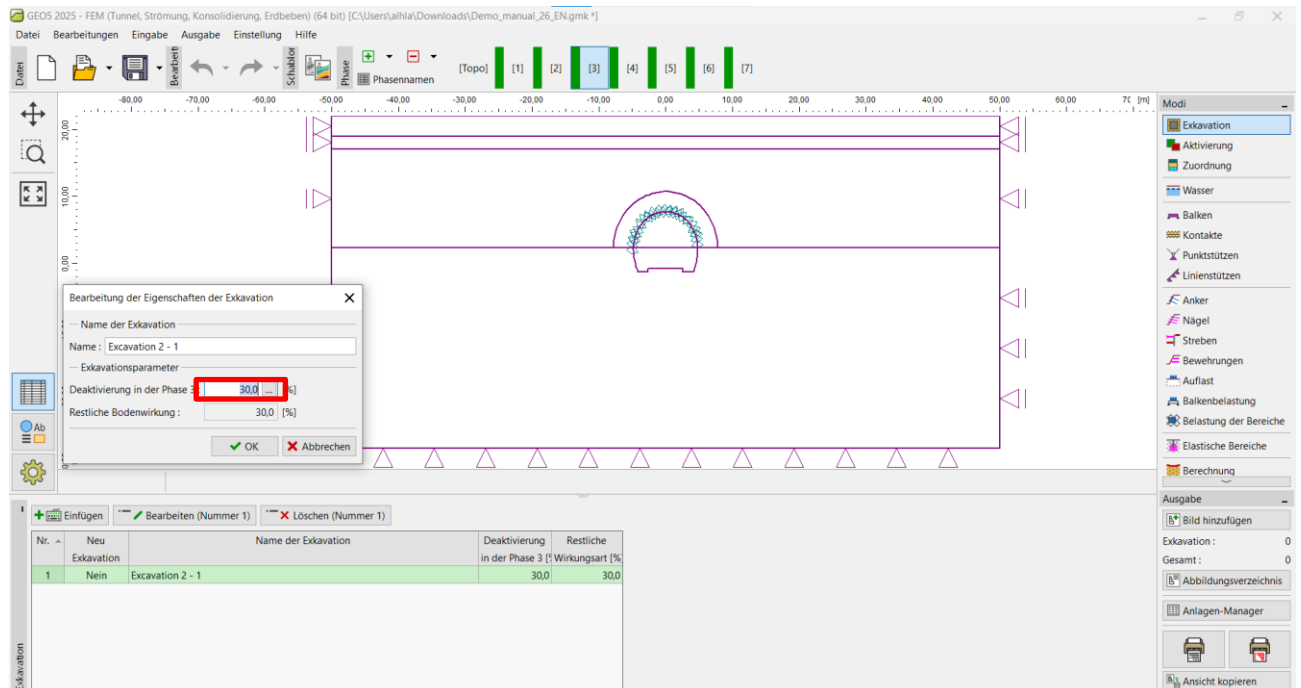
Typ eines Endträgers, der die Stabilität und Konvergenz der Analyse sicherstellt (weitere Details finden Sie unter Hilfe - F1).

Im Fenster "Zuordnung" ändern wir das Gestein im Bereich Nr. 5 (in die Option "Verankert R5"), wobei wir die Verankerung mit hydraulisch expandierten Stahllankern betrachten (siehe *Bild*).



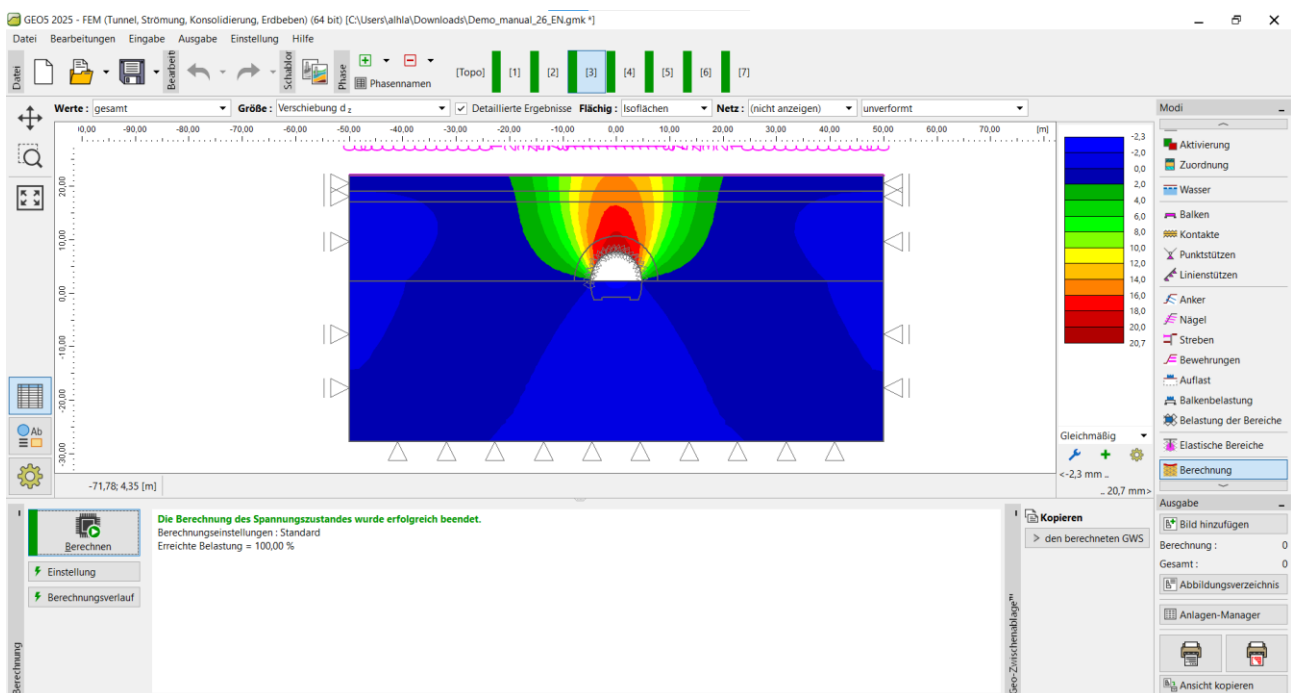
Rahmen „Zuordnung“ - Bauphase 3 (Region verankert mit hydraulisch expandierten Felsbolzen)

Im weiteren Verlauf werden wir die Anker im mit Verankerungen verstärkten Gebirge in der Umgebung des oberen Vortriebsaushubs aktivieren und die Ausbruchseigenschaften bearbeiten, indem wir 30 % der Last hinzufügen (mit der Schaltfläche "Bearbeiten").



Dialogbox „Bearbeitung der Eigenschaften des Ausbruchs“ – Bauphase 3

Dann führen wir die Berechnung erneut durch.



Rahmen „Berechnung,“ - Bauphase 3 (Vertikalverschiebung d_z mit Setzungsmulde)

Bauphase 4: Erhöhung der Materialeigenschaften des bereits ausgehärteten Betons (Kalotte)

Im Bauphase 4 werden wir die Materialeigenschaften des bereits ausgereiften Betons, der die obere Überschrift trägt, verbessern. Im Rahmen „Träger“ ändern wir Teile der Auskleidung und klicken auf die Schaltfläche ‚Bearbeiten‘. Im Dialogfenster „Trägereigenschaften ändern“ wählen wir die Option

„Verstärkung“ und stellen die entsprechenden Werte der Elastizitätsmodule ein ($E = 29000 \text{ MPa}$, $G = 11340 \text{ MPa}$). Die anderen Parameter lassen wir unverändert.

Bearbeitung der Balkeneigenschaften

— Topologie

Positionierung : freie Linie

Freie Linie : Die freie Linie Nr. 1

— Parameter

☒ Eigengewicht berücksichtigen

— Querschnitt und Material

Balkenparameter in der Phase der Eingabe 3
rechteckige Wand 1,00 (b) x 0,20 (h) m
Beton C 20/25; $E = 29000,00 \text{ MPa}$; $G = 11340,00 \text{ MPa}$; $\alpha = 0,000010$
 $1/K; \gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$

Balkenparameter in der vorigen Phase 3
 $h = 0,20 \text{ m}$
 $E = 29000,00 \text{ MPa}$
 $G = 11340,00 \text{ MPa}$

Änderungsart : Verstärkung / Schwächung

Querschnittshöhe : $h = 0,20 \text{ [m]}$

Elastizitätsmodul : $E = 29000,00 \text{ [MPa]}$

Schubelastizitätsmodul : $G = 11340,00 \text{ [MPa]}$

$I_y = 6,67E-04 \text{ m}^4/\text{m}$; $A = 2,00E-01 \text{ m}^2/\text{m}$; $E = 29000,00 \text{ MPa}$; $G = 11340,00 \text{ MPa}$

— Kontakte

☐ Parameteränderung

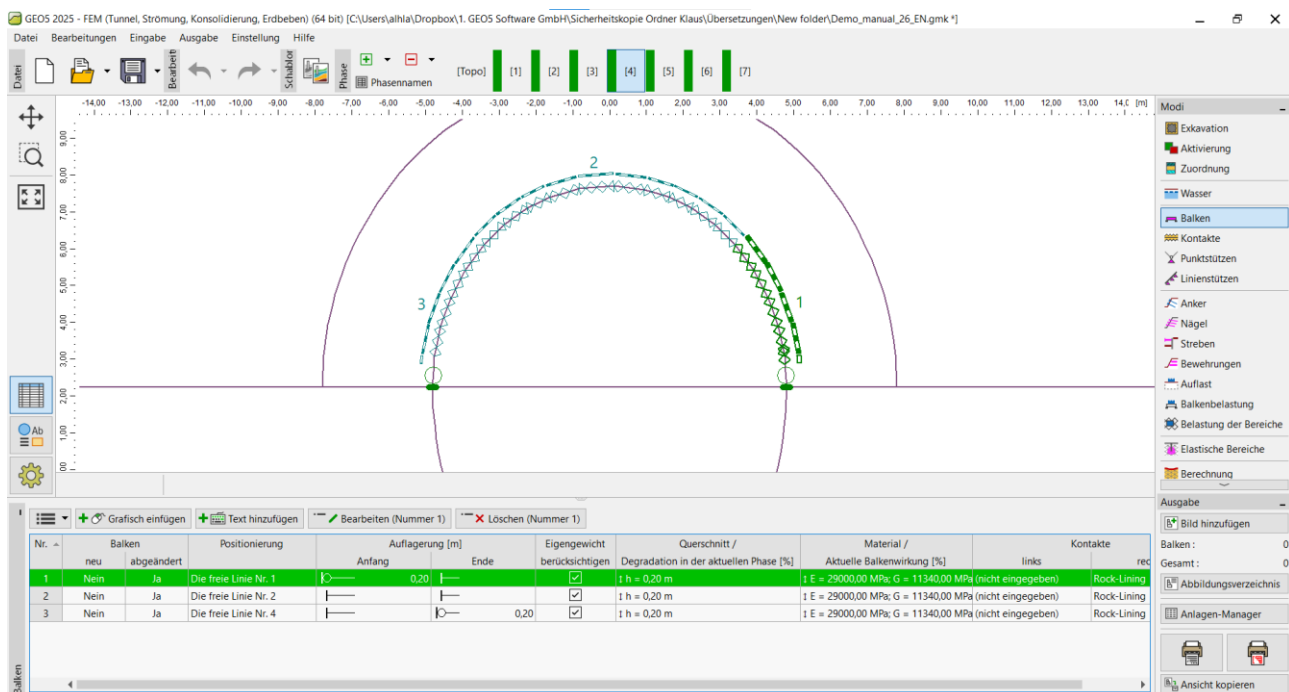
☐ Den Kontakt links berücksichtigen

☒ Den Kontakt rechts berücksichtigen

Kontakttyp : Rock-Lining

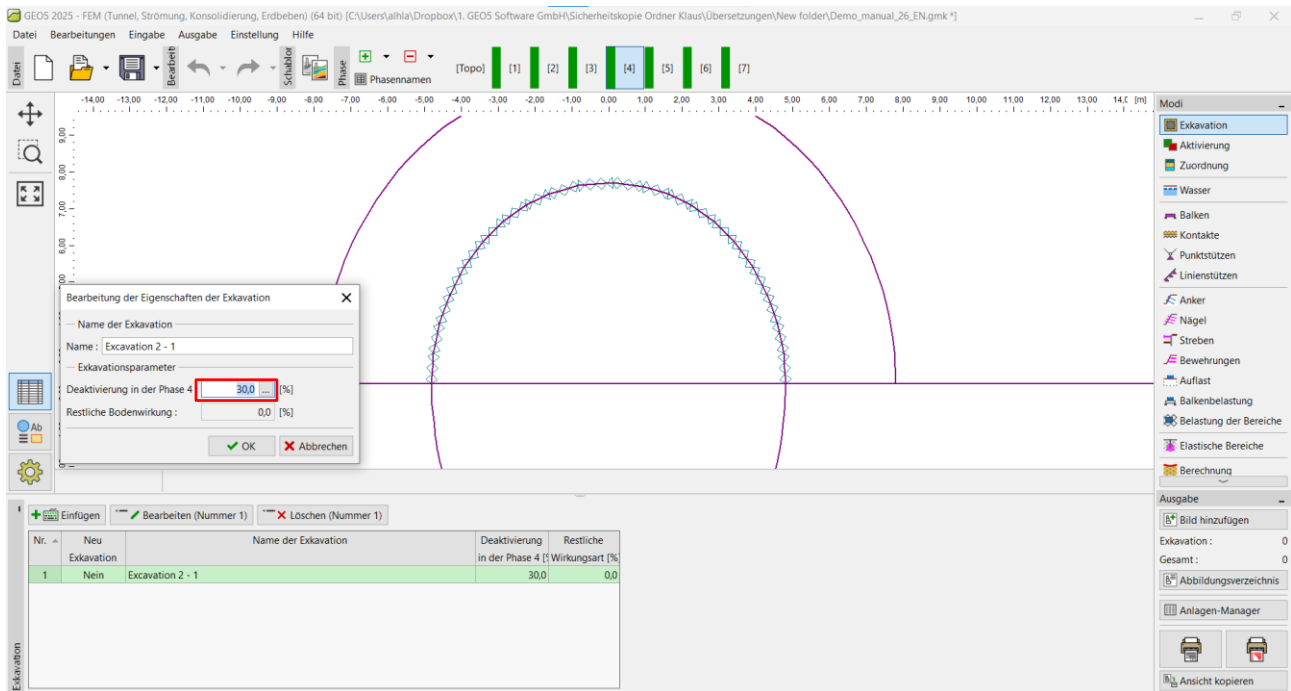
OK + OK Abbrechen

Dialogfenster „Trägereigenschaften ändern“ - Bauphase 4 (Träger Nr. 2)



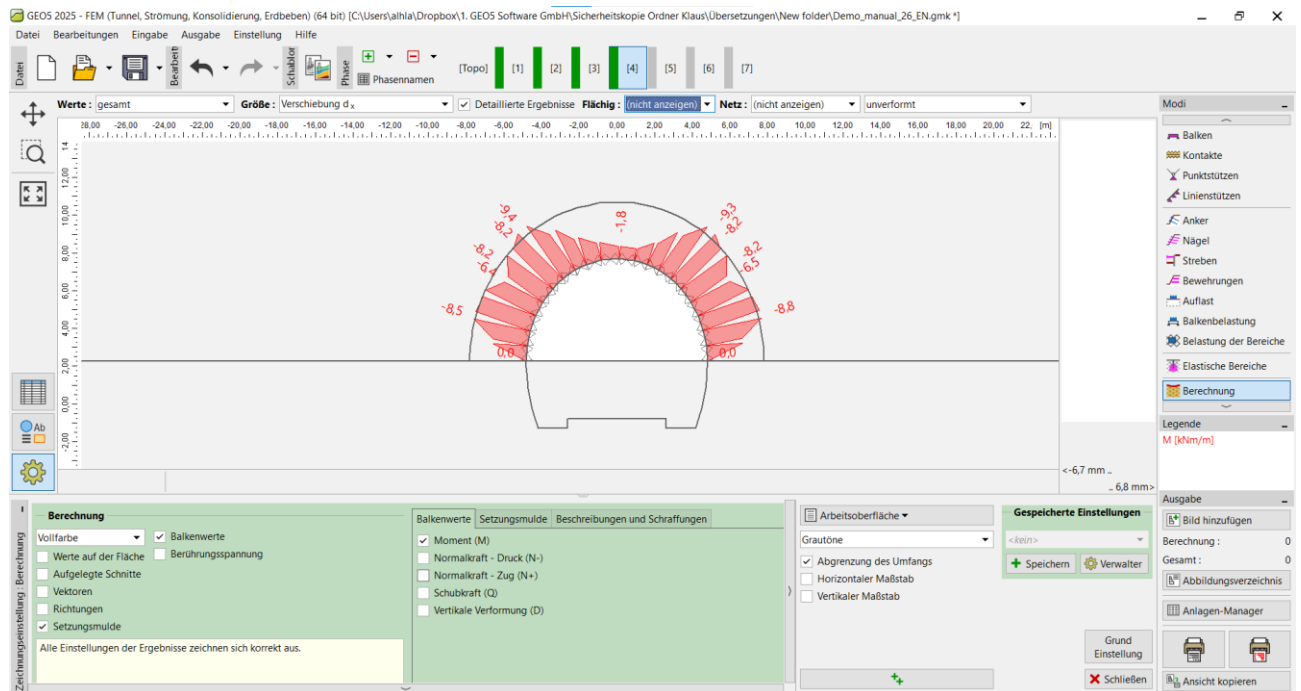
Ändern der Eigenschaften der Erstauskleidung (oberste Rubrik) - Bauabschnitt 4 (ausgereifter Spritzbeton)

Wir werden die restlichen 30% der Belastung des Gebirges aktivieren. Die Methode zur Bearbeitung der Eigenschaften des Ausbruchs ähnelt den vorherigen Bauphasen.



Dialogfenster „Baugrubeneigenschaften bearbeiten“ - Bauphase 4

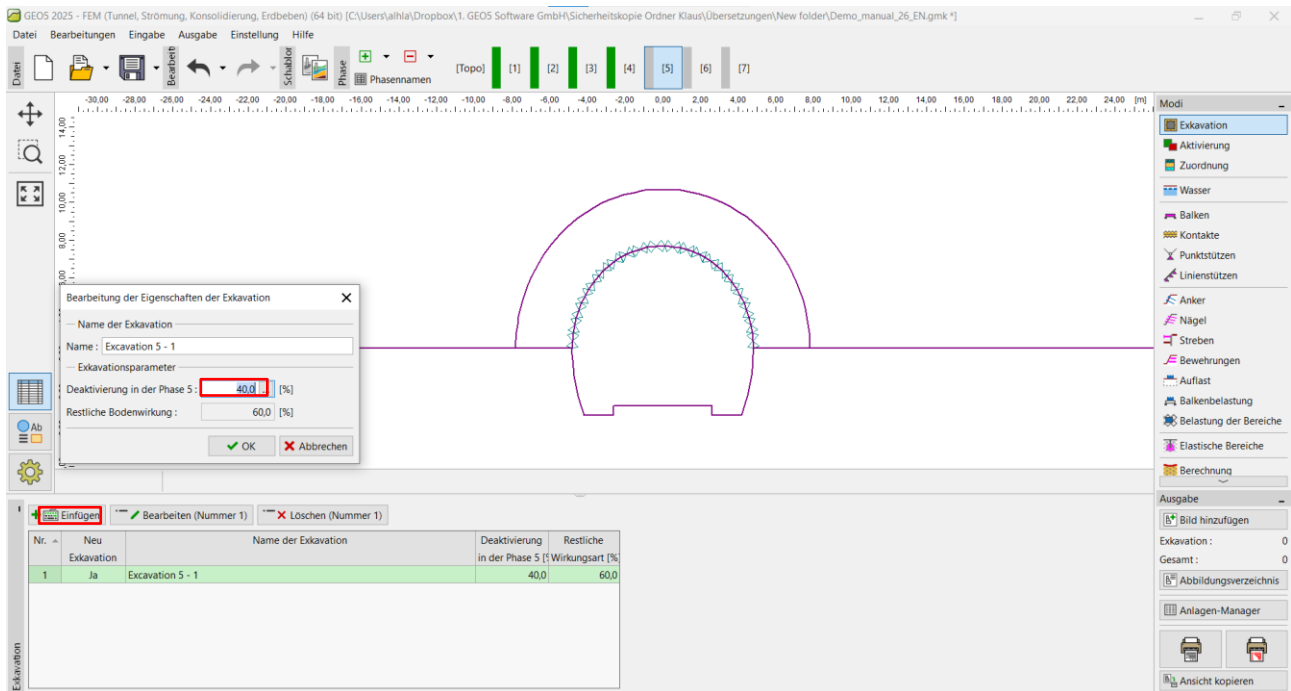
Dann führen wir die Berechnung durch und betrachten den Verlauf des Biegemoments auf der Kalottensicherung.



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 4 (Verlauf des Biegemoments M [kNm/m])

Bauphase 5: Modellierung des Ausbruchs der Strosse des Tunnels, Aktivierung des nicht gesicherten Bereichs

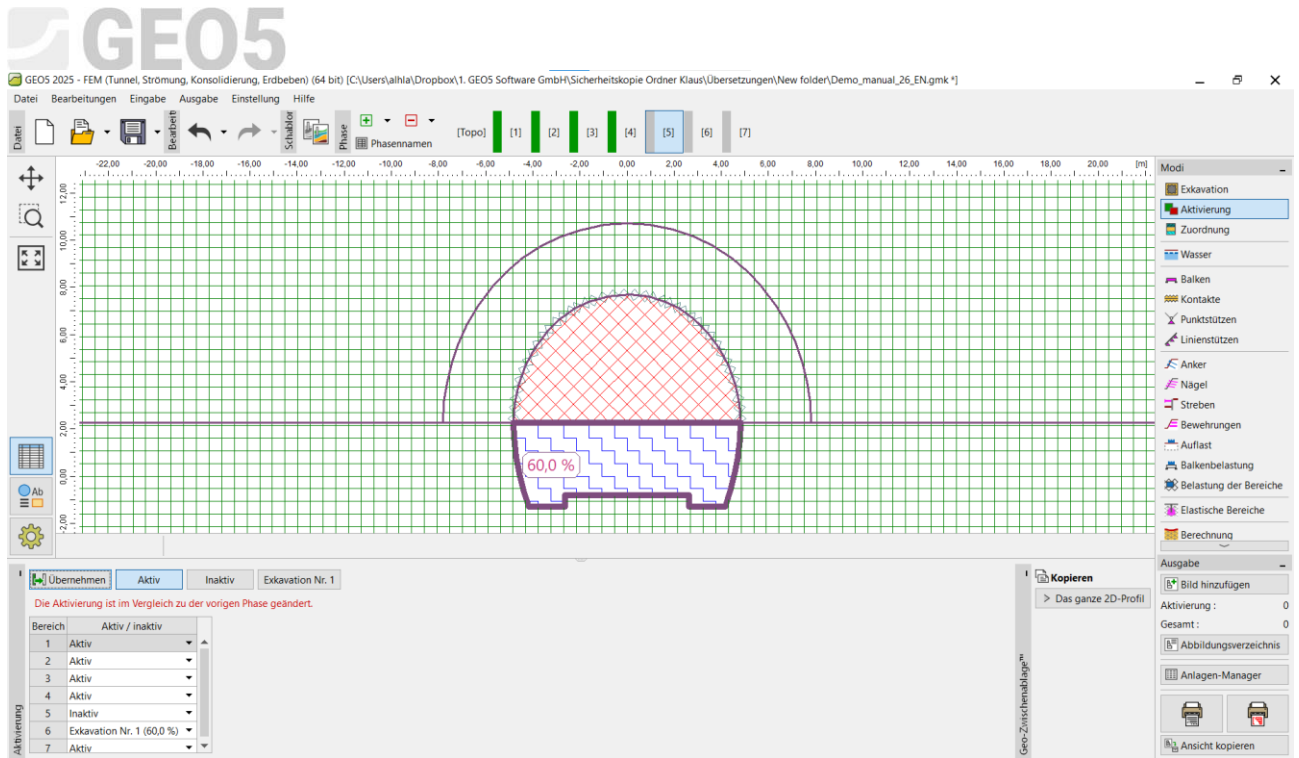
Im nächsten Schritt werden wir die 5. Bauphase hinzufügen. Geben Sie dann im Fenster "Aktivierung" den Ausbruch der Strosse des Tunnels als neue Exkavation für Bereich Nr. 7 ein (über die Schaltfläche "Hinzufügen"). In dieser Bauphase betrachten wir die Deaktivierung des Bodens bzw. die Einwirkung der Belastung von 40 %. Die verbleibende Wirkung des Bodens bzw. des Gebirges in der Nähe des Ausbruchs der Strosse beträgt daher 60%. Im Rahmen „Exkavation“ fügen wir „Exkavation 5 - 1“ hinzu und setzen die Deaktivierung auf 40%.



Dialogbox „Neue Exkavation“ – Bauphase 5

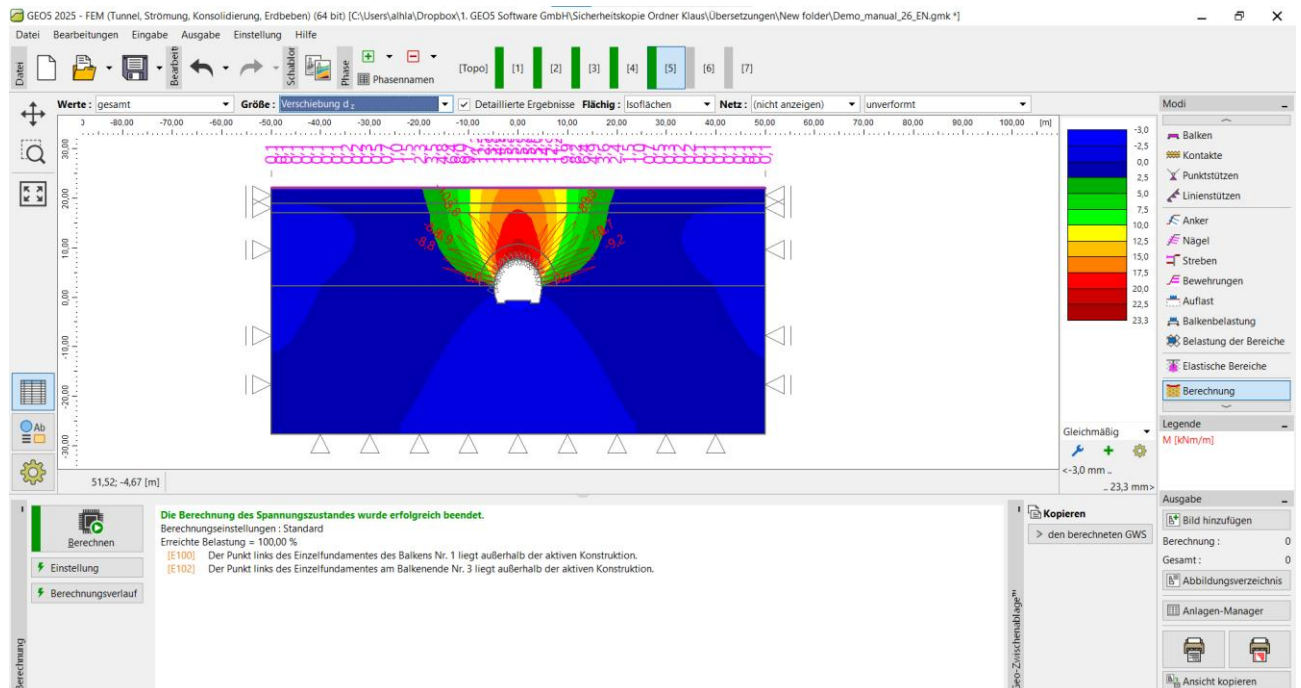
Hinweis: Das Verfahren zum Modellieren dieser Aufgabe ist für die folgenden Bauphasen ähnlich. Zuerst wird die Primärauskleidung der Strosse des Tunnels aus jungen Spritzbeton durchgeführt, dann wird ein weiterer Lastprozentsatz aktiviert. In der nächsten Stufe werden die Materialeigenschaften des bereits ausgehärteten Spritzbetons erhöht und der restliche Belastungsanteil aktiviert.

Im Rahmen „Aktivität“ wählten wir die Fläche Nr. 5 und ordneten sie der „Exkavation Nr. 1 (60%)“ zu.



Rahmen „Aktivität“ - Bauphase 5 (Aktivität von 40 % der Belastung beim Aushub der Tunnelsohle)

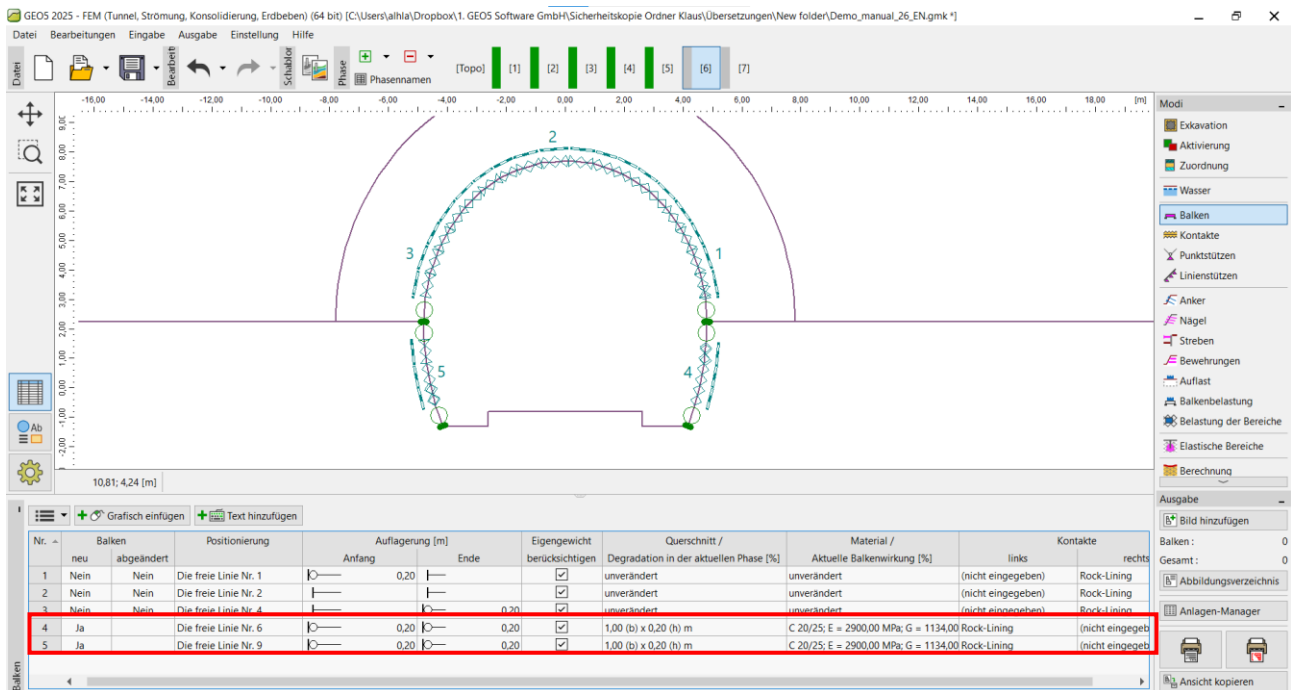
Dann werden wir die Berechnung durchführen.



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 5 (vertikale Verformung d_z mit der Setzungsmulde)

Bauphase 6: Die Bewehrung der Strossenwände des Tunnels mit einer Primärauskleidung aus jungem Beton

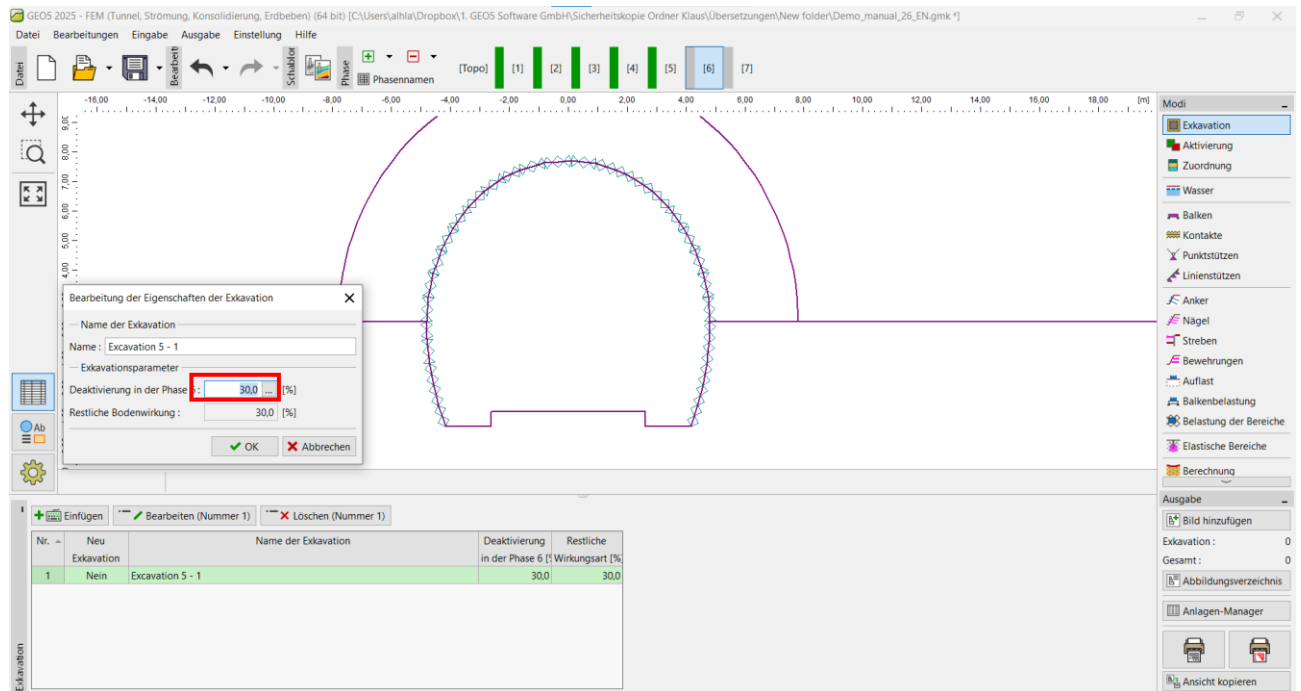
In der 6. Bauphase geben wir in die Bewehrung der Strossenwände des Tunnels mithilfe einer 200 mm dicken Primärauskleidung aus jungem Spritzbeton ein. Die Auskleidung der Kalotte bleibt in den nächsten Bauphasen unverändert.



Eingabe der Primärauskleidung der Strosse mithilfe eines neuen Balkens - Bauphase 6 (junger Beton)

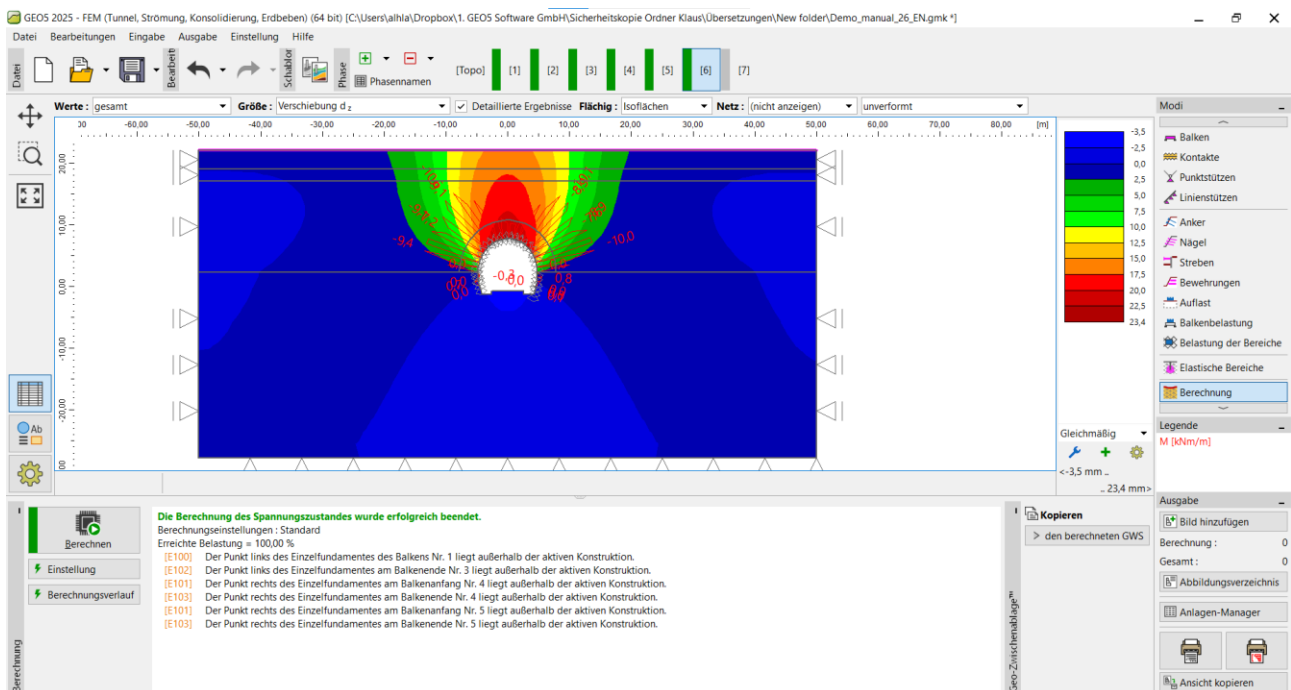
Hinweis: Wir betrachten die Balken erneut als an beiden Enden gelenkig gelagert. Der Kontakt zwischen Kalotte und Strosse ist nicht in der Lage, Lasten durch ein Biegemoment zu übertragen (es handelt sich nicht um durchgehend biegefest verbundene Anschlüsse). Die Abmessungen des Strossen-Querschnitts entsprechen denen der Kalottenwände, d. h. $b=1,0$, $b=1,0$ m, $h=0,2$, $h=0,2$ m. Allerdings müssen wir die Kontakte an den neuen Balken in umgekehrter Weise definieren (weitere Details siehe Abbildung), da die Orientierung der Balken (Seitenwände der Strosse) negativ ist.

In dieser Bauphase werden wir weitere 30 % der Belastung des Gebirges aktivieren.



"Änderung der Eigenschaften von Exkavation" - Bauphase 6

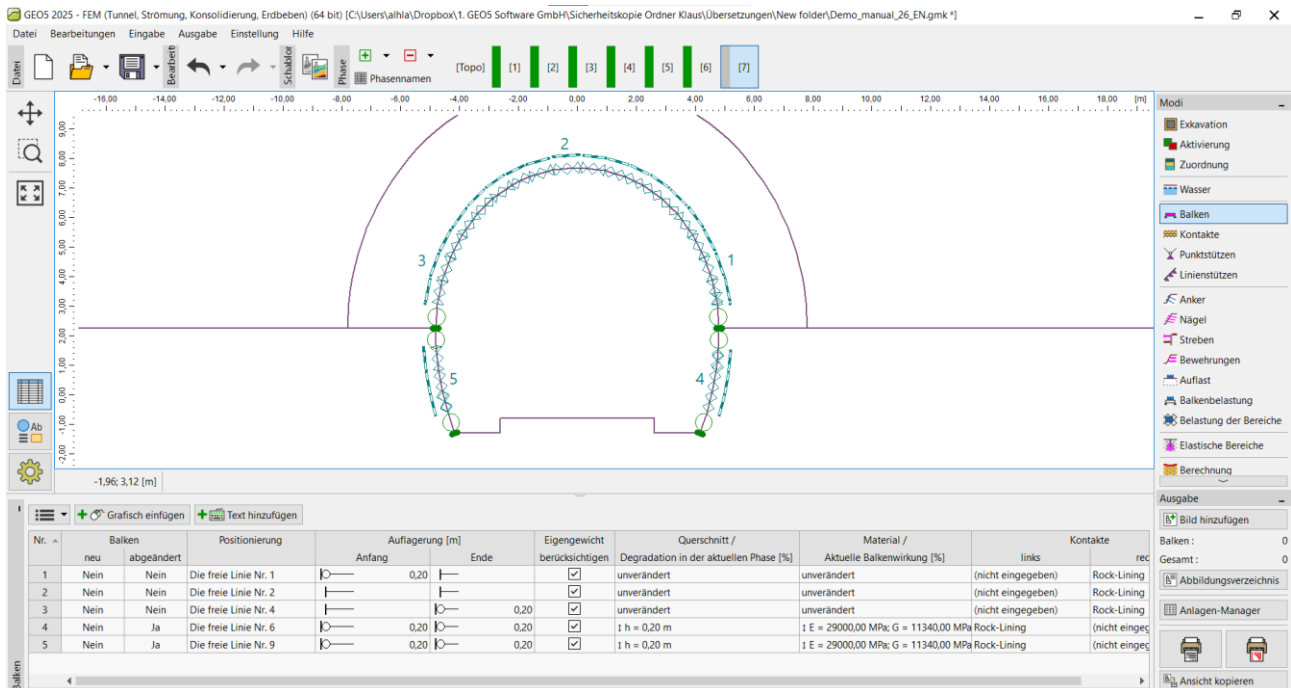
Im letzten Teil dieser Phase werden wir die Berechnung erneut durchführen.



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 6 (Vertikale Verformung d_z mit der Setzungsmulde)

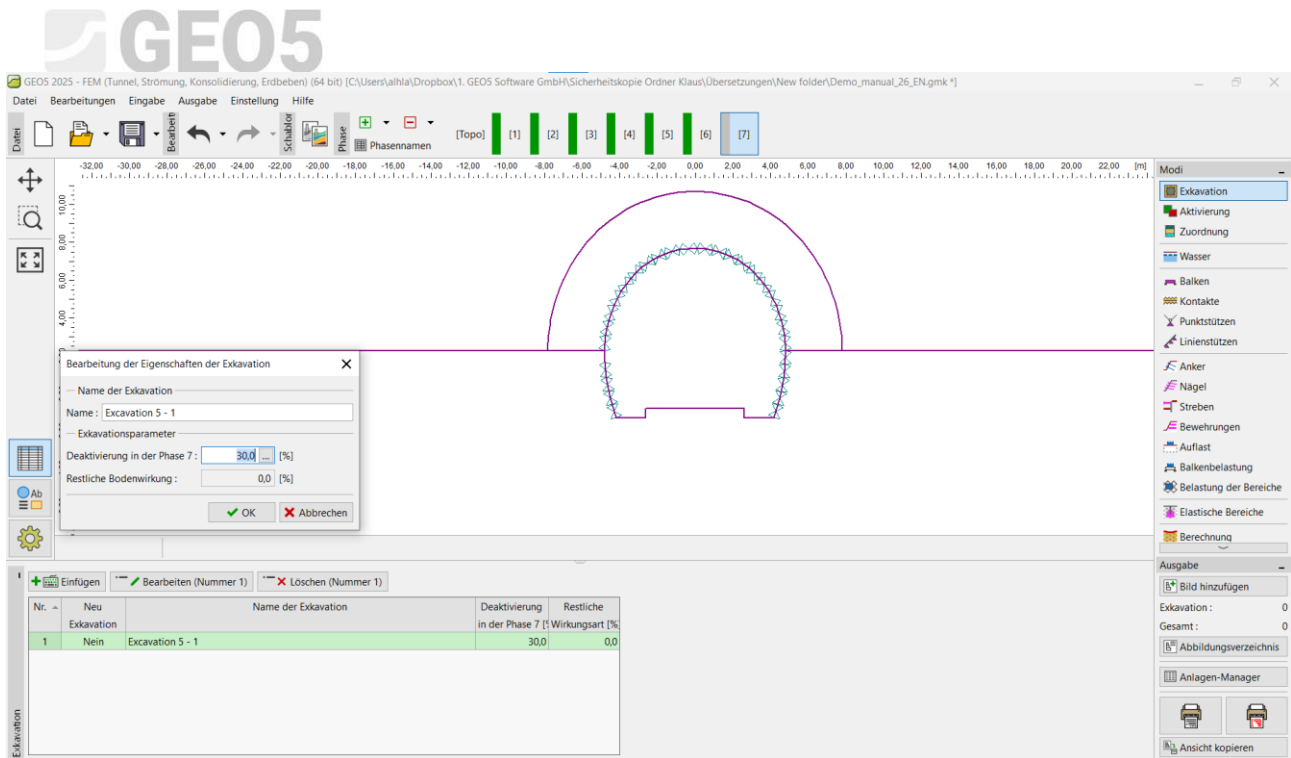
Bauphase 7: Erhöhung der Materialeigenschaften des bereits ausgehärteten Betons (Strosse)

Im letzten Bauphase werden wir die Materialeigenschaften des bereits ausgereiften Betons, der den Ausbruch der Strosse des Tunnels sichert, verbessern.



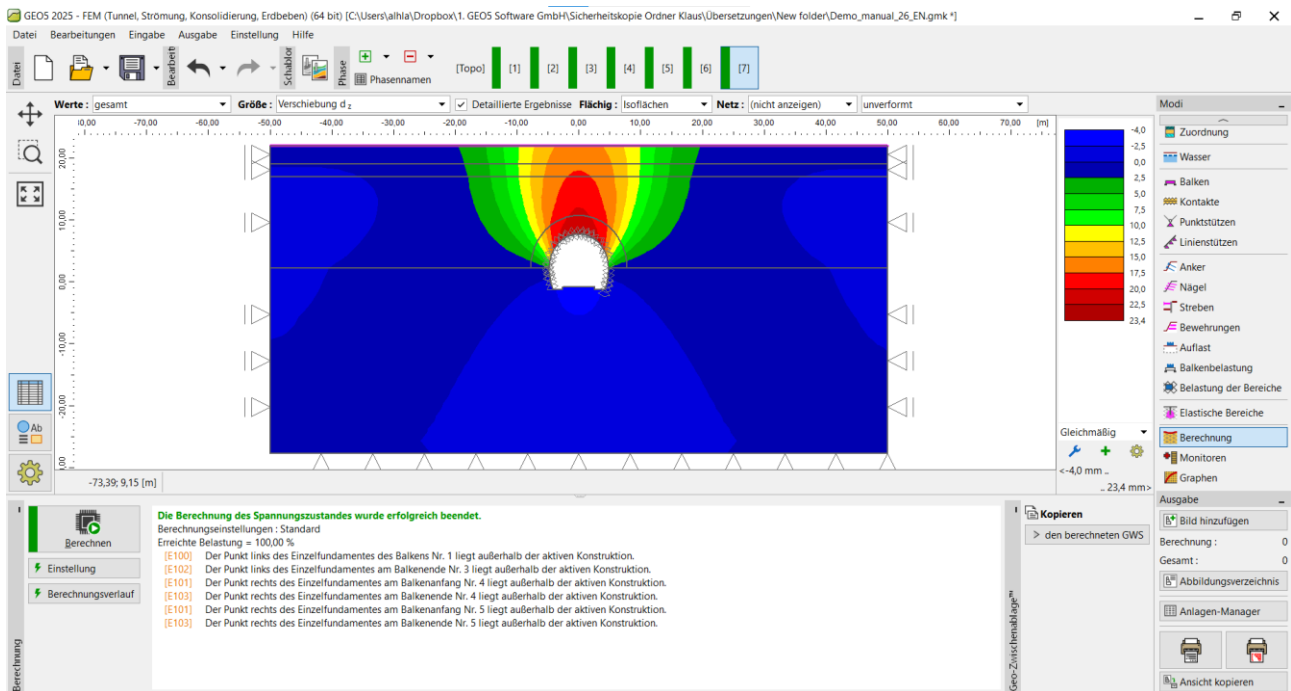
Bearbeitung der Eigenschaften der Primärauskleidung der Strosse - Bauphase 7 (ausgehärteter Spritzbeton)

Das Eingabeverfahren zur Bewehrung der Balken ähnelt der 4. Bauphase. Wir werden die restlichen 30% der Belastung des Gebirges aktivieren. Mit diesem Schritt haben wir den gesamten Boden aus dem Ausbruchquerschnitt entfernt und die Belastung auf die Primärauskleidung des Tunnels beträgt daher 100% (einschließlich der Wände der Kalotte und der Strosse).



Dialogbox „Bearbeitung der Eigenschaften der Exkavation“ – Bauphase 7

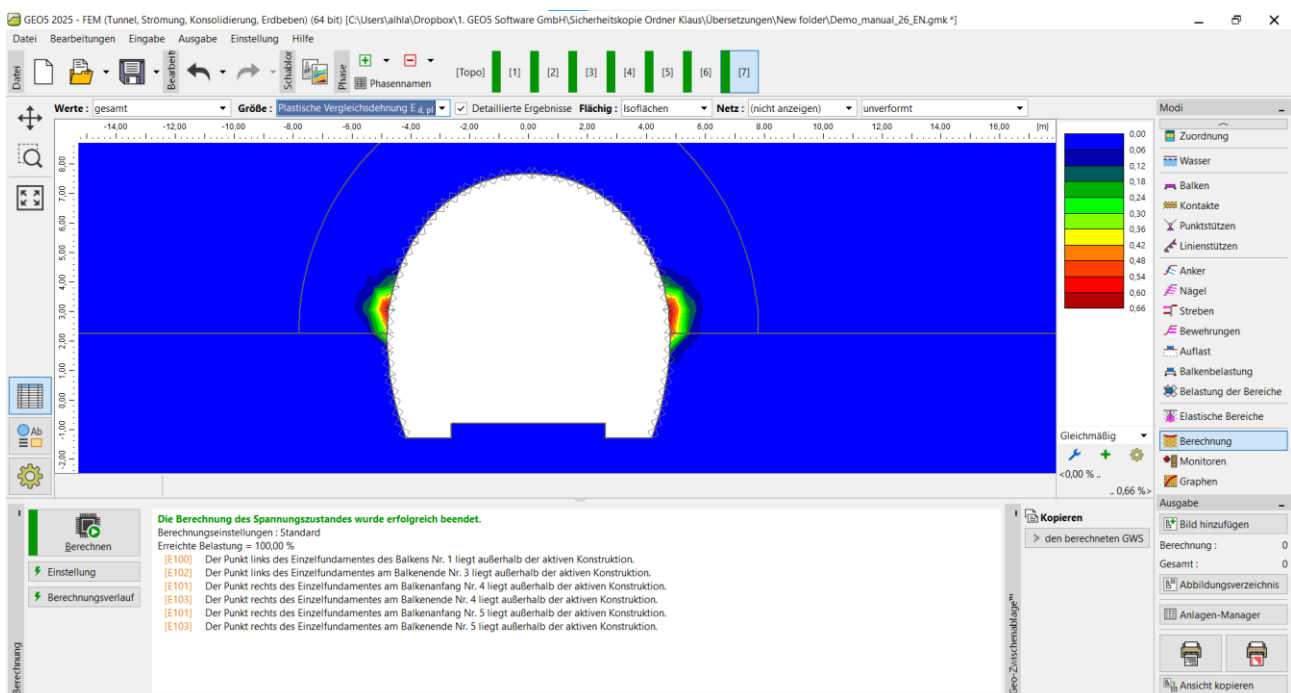
Wir werden nun eine Berechnung für die letzte Bauphase durchführen



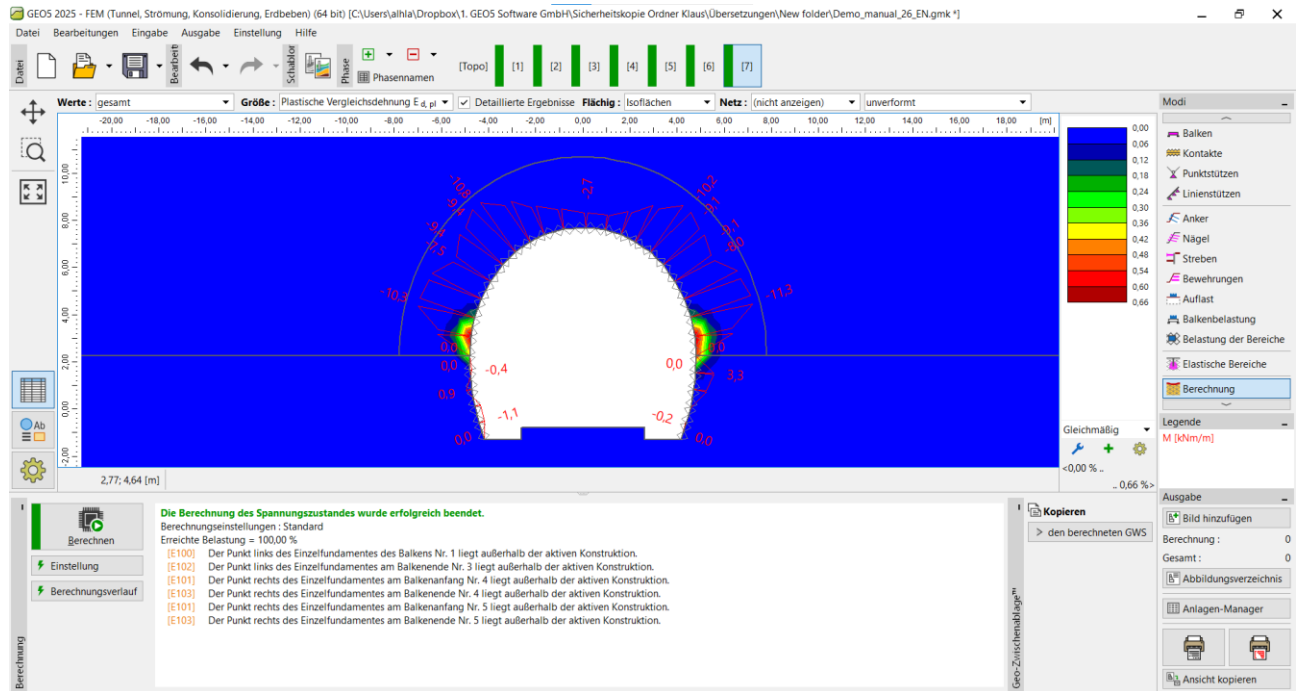
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 7 (vertikale Verformung d_z mit der Setzungsmulde)

Weiterhin werden wir in dieser Bauphase die äquivalenten plastischen Verformungen $\varepsilon_{eq,pl.}$ und die Verläufe der inneren Kräfte für Biegemomente und Normalkräfte bildlich darstellen. Wir zeichnen die Ergebnisse dann in einer Übersichtstabelle auf.

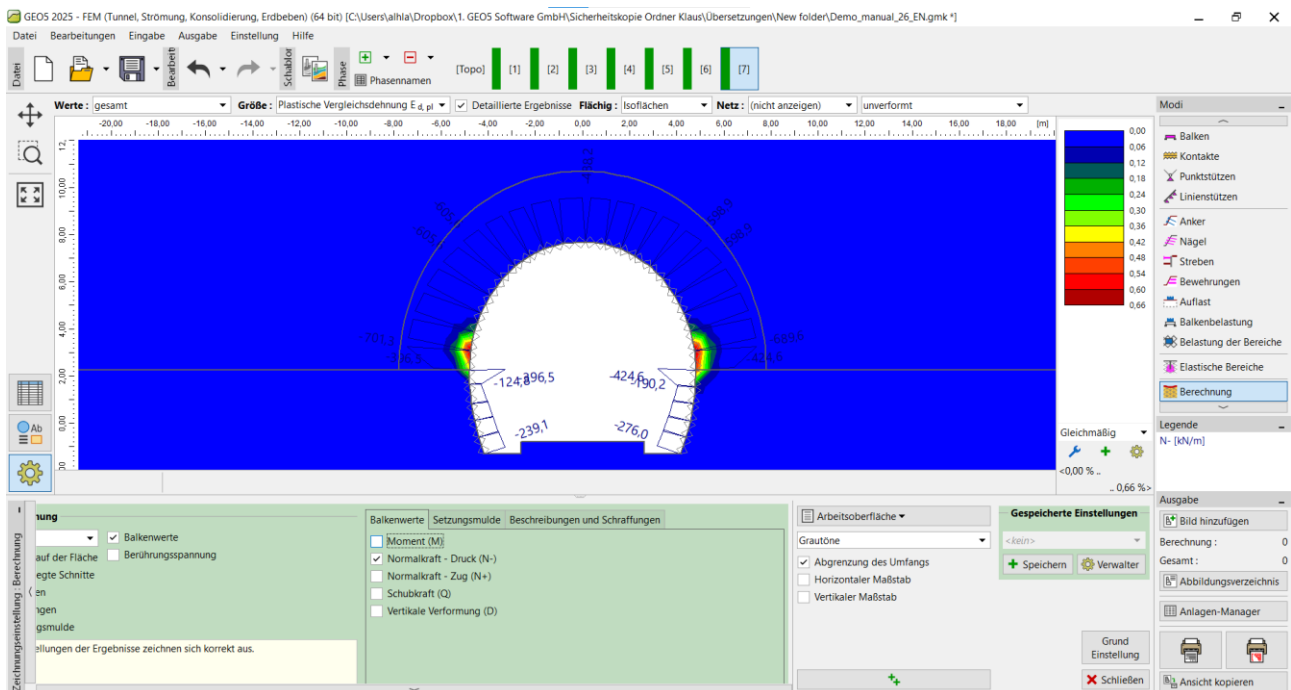
Die folgende Abbildung zeigt, dass die äquivalenten plastischen Verformungen $\varepsilon_{eq,pl.}$ nicht gleich Null sind, was dem Verhalten der Konstruktion gemäß dem nichtlinearen Materialmodell (Mohr-Coulomb) entspricht).



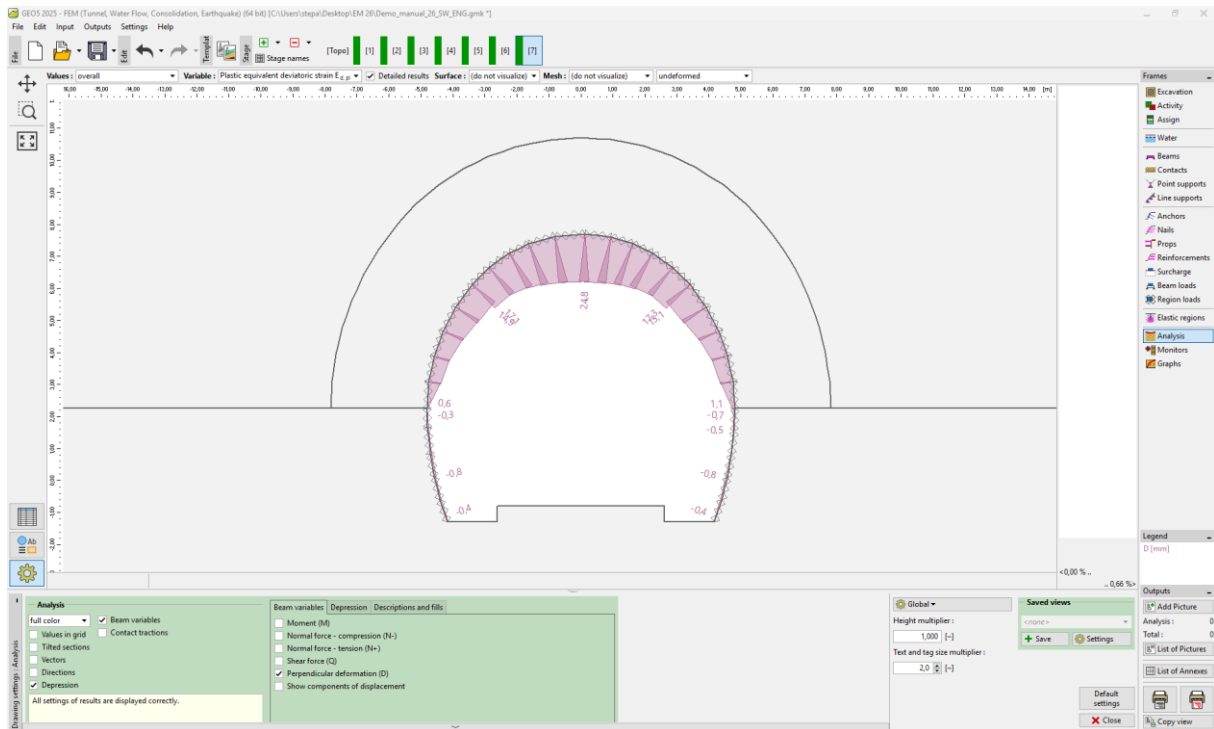
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 7 (äquivalente Verformung $\varepsilon_{eq,pl.}$ gemäß MC Modell)



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 7 (Verlauf des Biegemoments M [kNm/m])



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 7 (Verläufe der Normalkdruckkräfte) N – [kN/m]



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 7 (Anzeige der vertikalen Verformung)

Auswertung der Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt die Werte der Extreme der inneren Kräfte auf der Balken (Primärauskleidung des Tunnels) für die 7. Bauphase. Es handelt sich um die Werte für Biegemomente, Scher- und Normalkräfte. Wir haben diese Berechnung für ein plastisches Materialmodell (Mohr-Coulomb) mit lokaler Verfeinerung dreieckiger Elemente durchgeführt.

Materialmodell	Bauphase 7 – Innere Kräfte		
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Mohr – Coulomb	– 701,3	– 11,3	– 13,8
	– 124,8	+ 3,3	+ 9,8

Extremwerte der inneren Kräfte auf die Primärauskleidung des Tunnels – Bauphase 7

In dieser Tabelle sind die Gesamtwerte der vertikalen und horizontalen Verformungen d_z , d_x [mm] der Primärauskleidung des Tunnels für die einzelnen Bauphasen aufgeführt.

Bauphase	Werte der Gesamtverschiebung d_z, d_x [mm]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
1	–	–	–	–
2	-1,4	+16,4	-4,9	+4,9
3	-2,3	+20,7	-6,2	+6,2
4	-3,2	+22,7	-6,7	+6,8
5	-3,0	+23,3	-6,9	+7,0
6	-3,5	+23,4	-7,0	+7,1
7	-4,0	+23,4	-7,0	+7,1

Verformungswerte d_z, d_x auf der Primärauskleidung des Tunnels (Extreme) - Bauphase 1 bis 7

Schlussfolgerung

In dieser Aufgabe haben wir die Modellierung der Primärauskleidung eines realen Tunnels mithilfe der Finite-Elemente-Methode demonstriert. Der Tunnel wird mit der NÖT erstellt. Der Tunnelvortrieb ist in bestimmte Teile gegliedert. Beim Ausbruch wird das Gebirge entlastet und der Boden bzw. der Fels verformt, wobei die Verschiebungsrichtung in Richtung der ausgebrochenen Bereichs geht.

Die primäre Auskleidung wird mit KARI-Netzen (Betonstahlnetzen, geschweißt aus Stahlstäben mit 8 mm Durchmesser und Netzabmessungen von 150 x 150 mm) und Stahlgitterträgern mit 3 tragenden Stäben verstärkt. Die Einführung von KARI-Netzen in das numerische FEM-Modell (die Homogenisierung von Beton und Bewehrung) ist umstritten; sie wird meist erst nach der getrennten Bewertung der Auskleidung in Betracht gezogen.

Die Bewehrung der Primärauskleidung des Tunnels würde anschließend mit den berechneten Extremwerten der inneren Kräfte mit Hilfe einer Statiksoftware (z.B. FIN EC - BETON 2D) als Kombination der Beanspruchung des Querschnitts durch ein Biegemoment und eine Normalkraft (gemäß Interaktionsdiagramm) bewertet.

Hinweis: Die Berechnung einer unterirdischen Konstruktion ohne die Verwendung von Balken- und Kontaktelementen nach einem linearen Materialmodell (mit elastischem Verhalten) wurde in Kapitel 23. Beanspruchung der Wandung des Kollektors beschrieben. (siehe <http://www.finesoftware.eu/projektierungs-handbuecher/>).

Hinweis: Ein Beispiel zu dieser Aufgabe (Demo_manual_26.gmk) ist in [Online examples](#) zu finden.