

## Beanspruchung der Wandung eines Versorgungstunnels (collector tunnel)

Programm: FEM

Datei: Demo\_manual\_23.gmk

Ziel dieses Handbuchs ist es, die Spannung der Wandung des geprägten Kollektors nach der Finite-Elemente-Methode zu berechnen.

### Eingabe der Aufgabe

Bestimmen Sie die Beanspruchung (Verformung) der Wandung des geprägten Kollektors. Seine Abmessungen sind aus der folgenden Abbildung ersichtlich. Bestimmen Sie die auf die Wandung des Kollektors wirkenden innere Kräfte. Die Wandung des geprägten Kollektors (0,1 m dick) besteht aus Stahlbeton der Klasse C 20/25, die Sohle befindet sich 12,0 m Tiefe unter der Geländeoberfläche. Das geologische Profil ist homogen, der Boden hat folgende Parameter:

- Wichte des Bodens:  $\gamma = 20,0 \text{ kN/m}^3$
- Elastizitätsmodul:  $E = 12,0 \text{ MPa}$
- Poissonzahl:  $\nu = 0,40$
- Effektive Kohäsion des Bodens:  $c_{ef} = 12,0 \text{ kPa}$
- Effektiver Winkel der inneren Reibung:  $\phi_{ef} = 21,0^\circ$
- Wichte des gesättigten Bodens:  $\gamma_{sat} = 22,0 \text{ kN/m}^3$

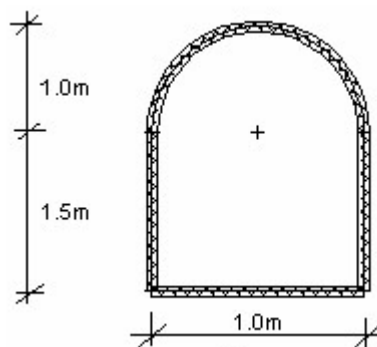


Diagramm der Eingabe der Aufgabe – geprägter Kollektor

Wir werden die Werte von Verformungen und der inneren Kräfte nur für das elastische Modell bestimmen, weil wir keine Bildung von plastischen Verformungen annehmen. Zur Kontrolle der Plastizitätsbedingung werden wir danach das Mohr-Coulomb-Materialmodell verwenden.

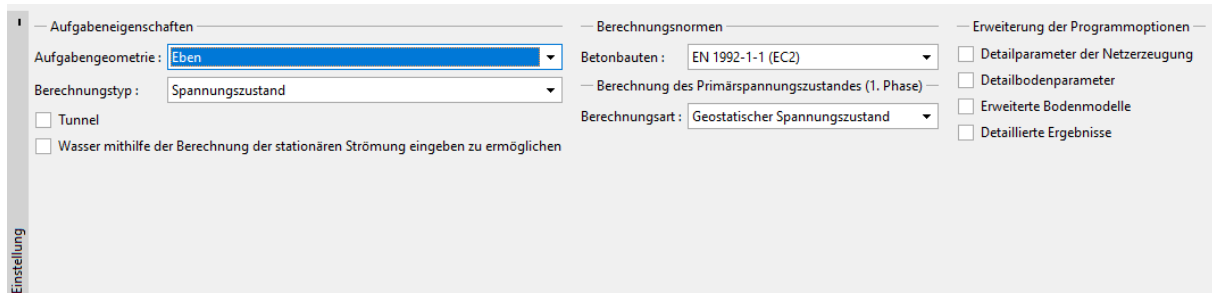
## Lösung

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 (Schnittstelle, freie Punkte und Linien – Verfeinerung)
- Bauphase 1: primäre geostatische Spannung
- Bauphase 2: Modellierung der Balkenelemente, Berechnung der Verformungen, innere Kräfte
- Auswertung der Ergebnisse: Vergleich, Schlussfolgerung.

## Topologie: Eingabe der Aufgabe

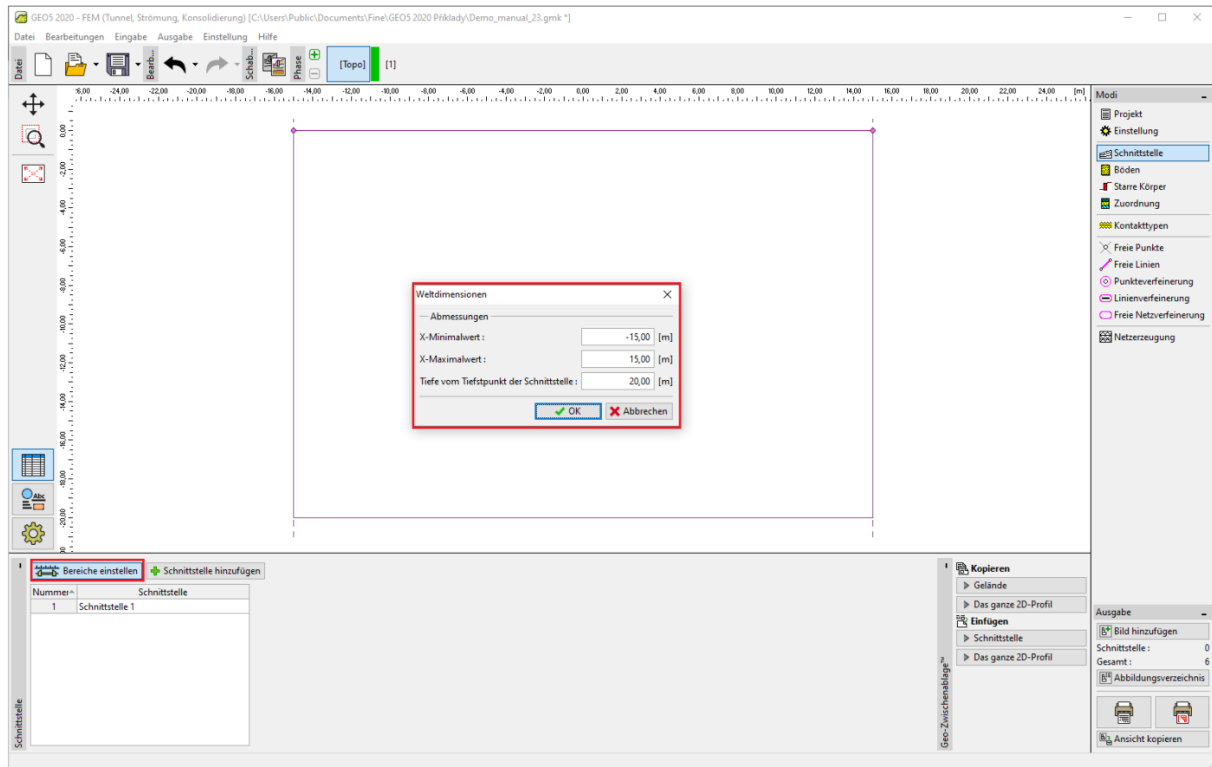
Im Fenster "Einstellung" verlassen wir die Berechnungsmethode der 1. Bauphase als geostatische Spannung. Art der Aufgabe bzw. der Berechnung werden wir als *ebene* Verformung (plane strain) betrachten.



Fenster „Einstellung“

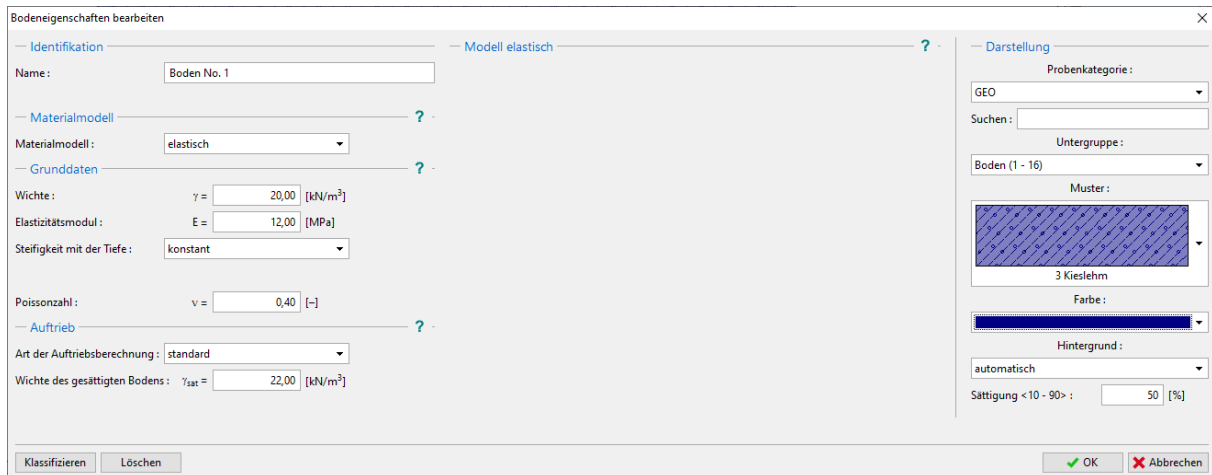
Als nächstes werden wir die Weltdimensionen (= Berechnungsausschnitt) und die Geländeschnittstelle eingeben. Wir wählen die Weltdimensionen groß genug, damit die Ergebnisse nicht von den Randbedingungen beeinflusst werden. Für unsere Aufgabe wählen wir die Abmessungen des Modells  $\{-15 \text{ m}; 15 \text{ m}\}$  und geben die untersuchte Tiefe der Schicht mit 20,0 m ein.

Dann fügen wir eine Schnittstelle mit den Koordinaten (x, z): [-15, 0]; [15, 0] [m] hinzu.



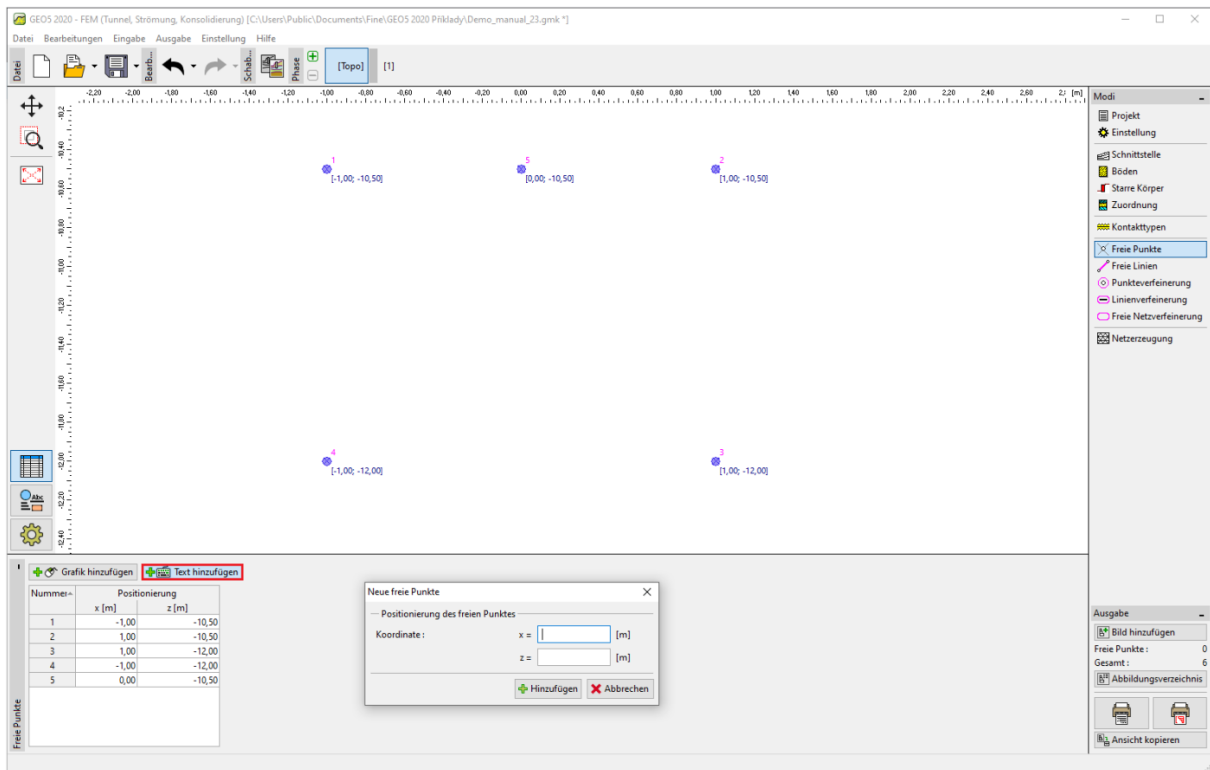
Fenster „Schnittstelle“ + Dialogbox „Weltdimensionen“

Jetzt geben wir die zugehörigen Bodenparameter einschließlich des Materialmodells ein und weisen den Boden dem erstellten Bereich zu (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



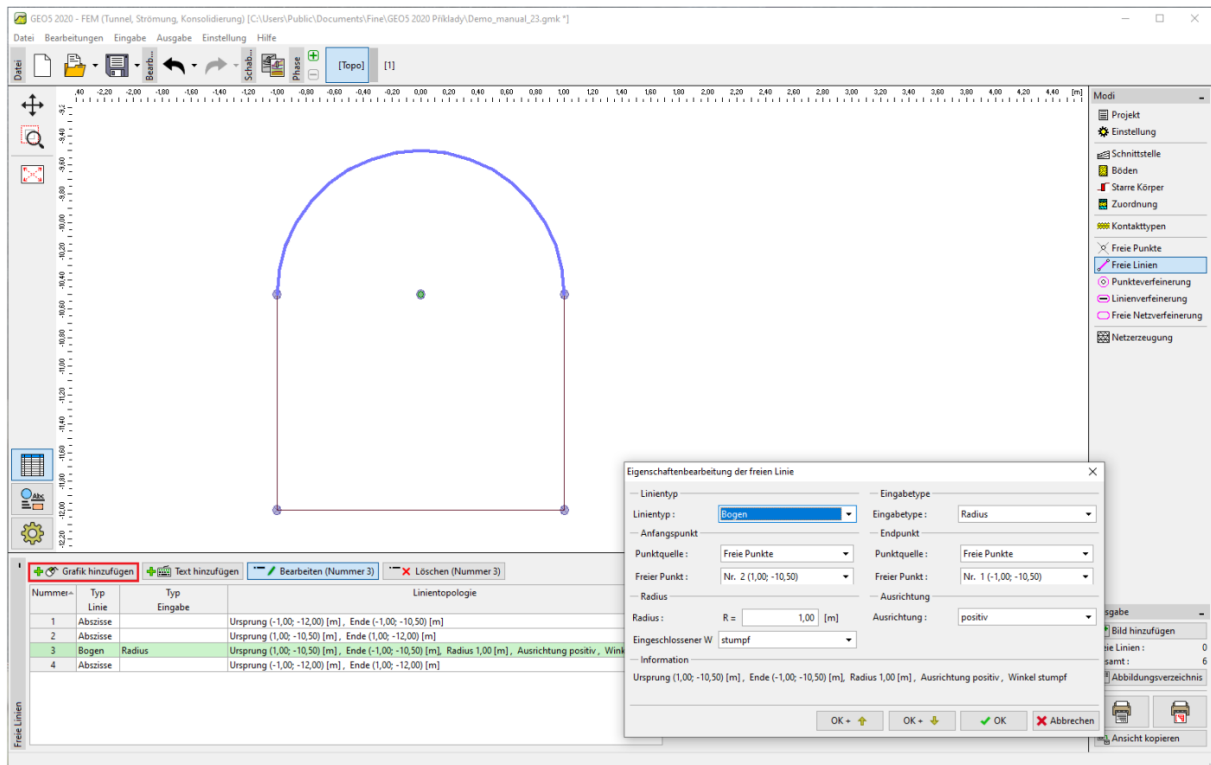
Dialogbox „Neue Böden hinzufügen“

Der nächste Schritt ist die Eingabe der Geometrie der Konstruktion. Zuerst definieren wir die Koordinaten der freien Punkte (Schaltfläche "Hinzufügen"), die die Ecken des Kollektors bilden (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



Fenster „Freie Punkte“ + Dialogbox „Neue freie Punkte“

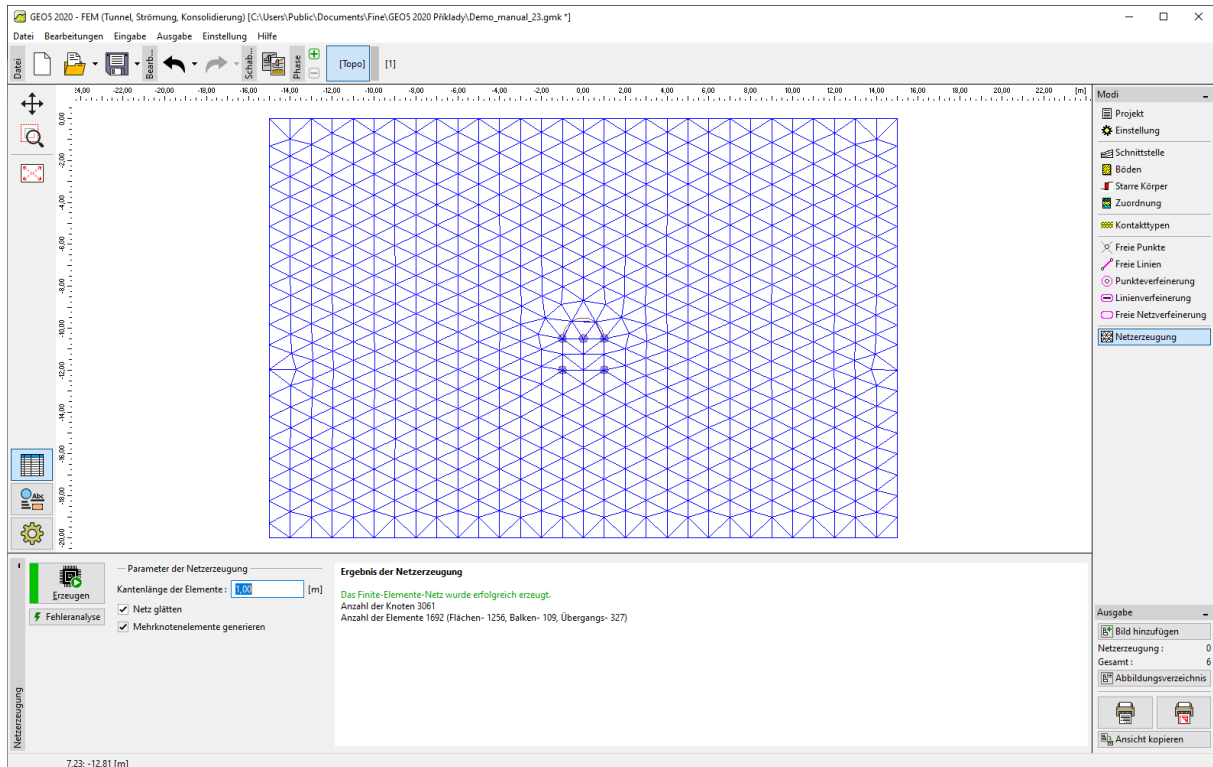
Anschließend klicken wir auf die Schaltfläche "Hinzufügen" im Fenster "Freie Linien" und verbinden die angegebenen Punkte auf dem Bildschirm mit Hilfe des Cursors durch entsprechende Linien (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1). Um den Bogen mit dem Radius  $R = 1,0 \text{ m}$  einzustellen, müssen wir den Linientyp ändern (mit Hilfe der Schaltfläche "Bearbeiten").



Dialogbox „Bearbeitung der Eigenschaften der freien Linie“

Durch diesen Schritt wird die Einstellung der Kollektorgeometrie beendet und wir gehen über zur FE-Netz-Generierung (für weitere Informationen siehe Hilfe - F1).

Für die Parameter der Netzerzeugung wählen wir die Elementkantenlänge von 1,0 m und drücken den Knopf "**Generieren**". Das Programm wird das FE-Netz automatisch generieren und glätten.



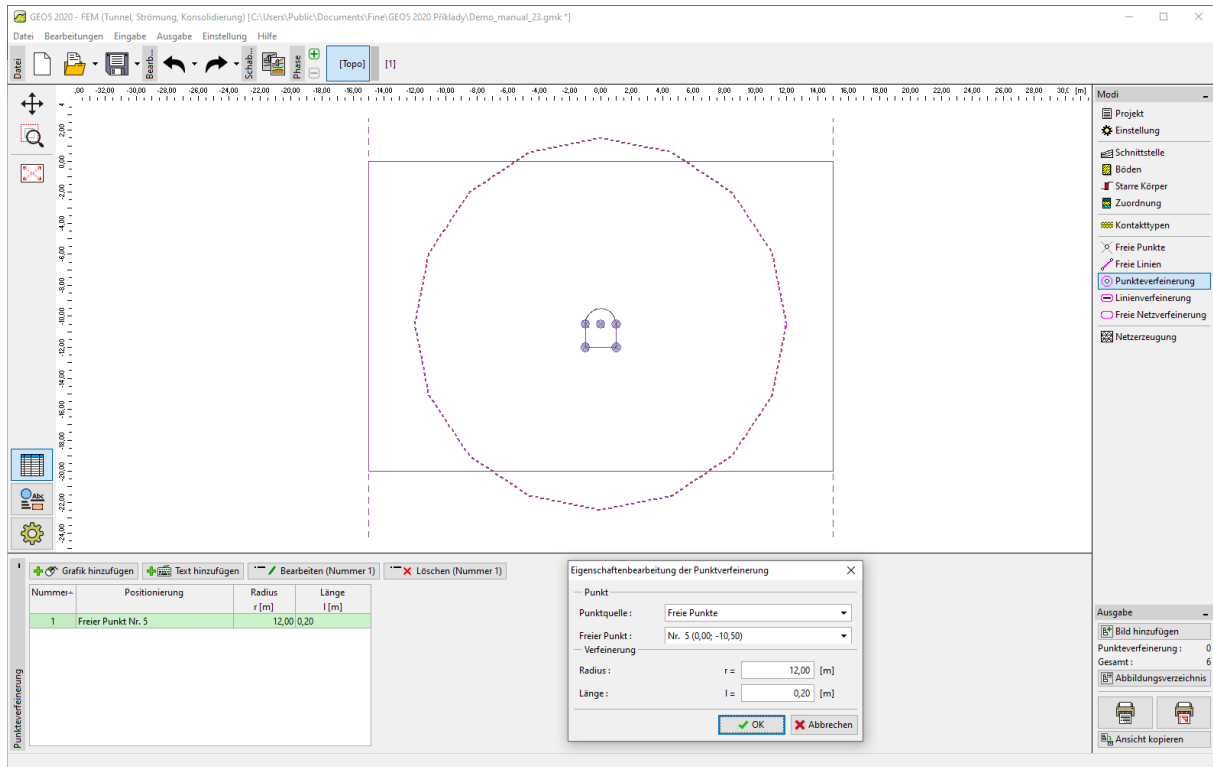
*Fenster „Netzzeugung“ – Elementkantenlänge 1,0 m (ohne lokalen Netzverfeinerung)*

Es ist auf den ersten Blick offensichtlich, dass das erzeugte Netz in der Umgebung des Kollektors sehr grob ist. Wir werden daher die Verfeinerung erhöhen. Wir können das Netz entweder rundum Linien oder rundum freie Punkte verfeinern. Das folgende Verfahren eignet sich für die Verfeinerung um die Wandung des Kollektors (im Allgemeinen der Aushub):

- wir werden einen freien Punkt um die Mitte der Ausgrabung festlegen,
- wir werden die Dichte um diesen Punkt verfeinern.

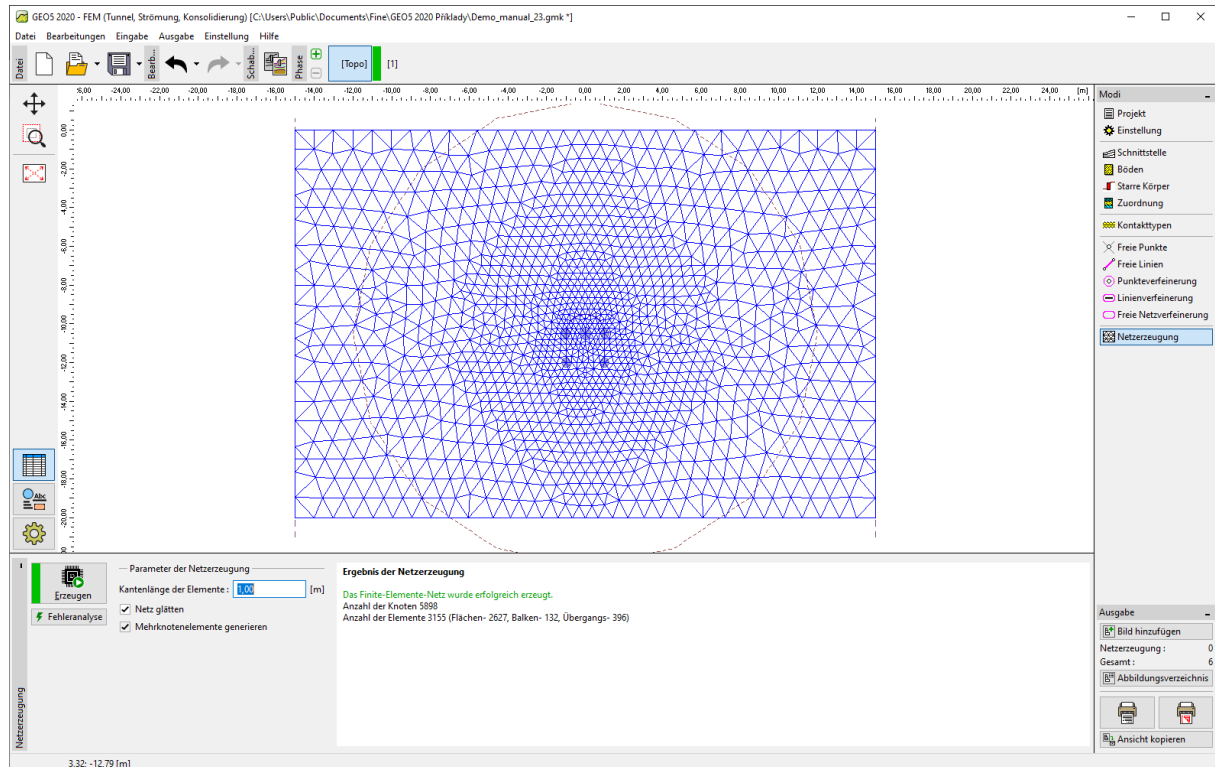
*Hinweis: Die inneren Kräfte in der Balken werden an den einzelnen Punkten des Netzes berechnet. Daher müssen die freien Linien und Punkte des FE-Netzwerks ausreichend verfeinert werden (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).*

Zur Verfeinerung des Finite-Elemente-Netzes geben wir den entsprechenden Bereich  $r = 12,0 \text{ m}$  und die Kantenlänge der Elemente  $l = 0,2 \text{ m}$  ein. Dann kehren wir zum Fenster "Netzzeugung" zurück und generieren das FE-Netz erneut.



Dialogbox „Neue Punktverfeinerungen“

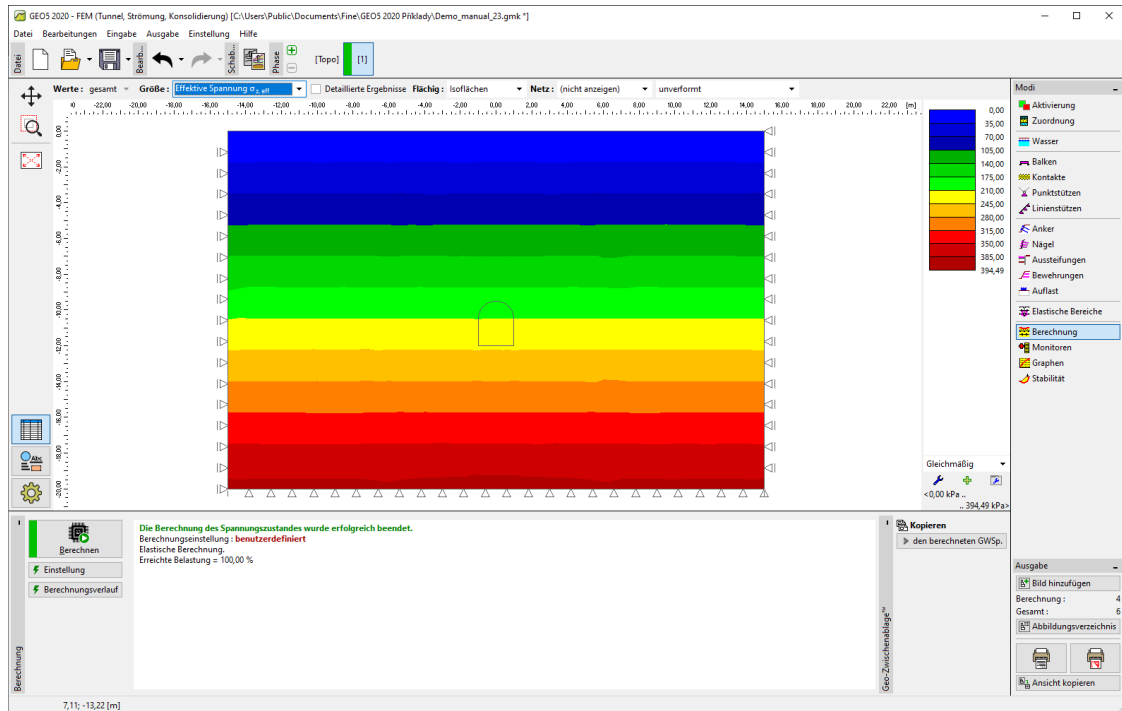
*Hinweis: Das Elementnetz sollte insbesondere in einem Bereich, in dem große Spannungsgradienten zu erwarten sind (Punktstützen, scharfe Ecken, unterirdische Ausgrabungen usw.), ausreichend dicht sein. Es ist erforderlich, dass der Bereich der Verfeinerung mindestens das 3- bis 5-fache der Dichte in der Mitte der Verfeinerung beträgt und dass beide Werte in den Punkten (Länge, Bereich) in einem angemessenen Verhältnis zur Netzdichte stehen, die für das umgebende Gebiet vorgeschrieben ist. Dies garantiert einen reibungslosen Übergang zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Dichte (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).*



*Fenster „Netzerzeugung“ – Kantenlänge FE 1,0 m (mit lokalen Netzverfeinerung in der Umgebung des Kollektors)*

## Bauphase 1: primäre geostatische Spannung

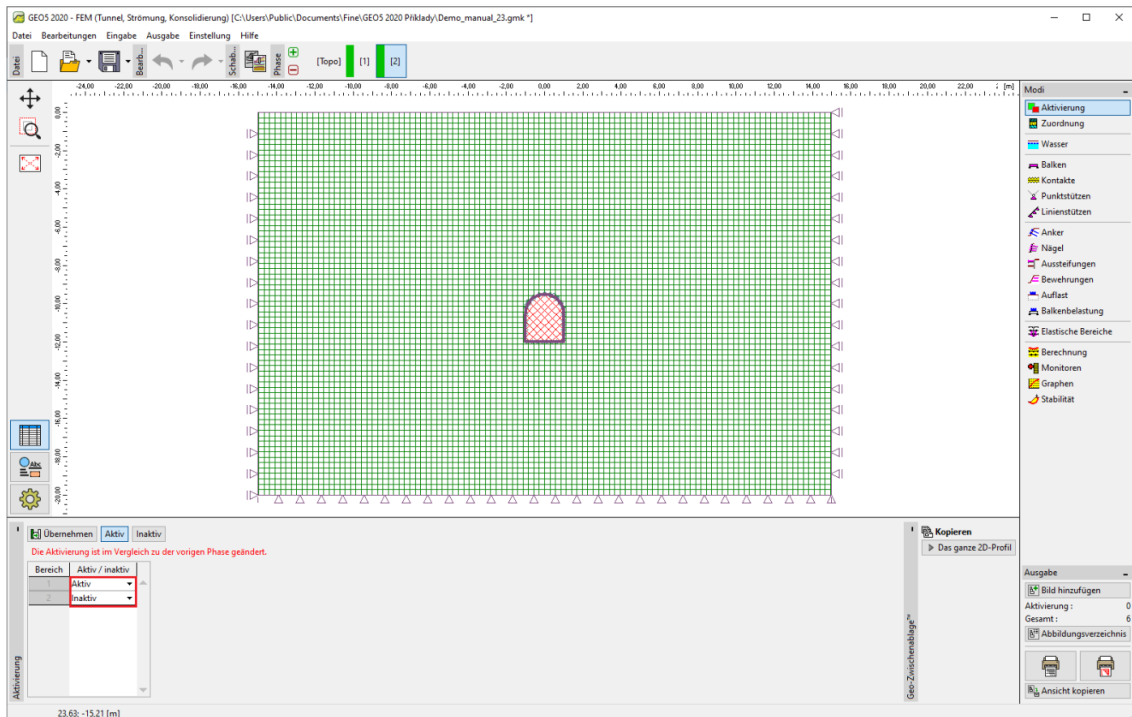
Nach der nachfolgenden Erzeugung sieht das Netz um den Kollektor deutlich besser aus. Wir werden nun mit der 1. Bauphase fortfahren und werden die Berechnung der primären geostatischen Spannung durchführen. Wir behalten die Berechnungseinstellung als "Standard" bei (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 1

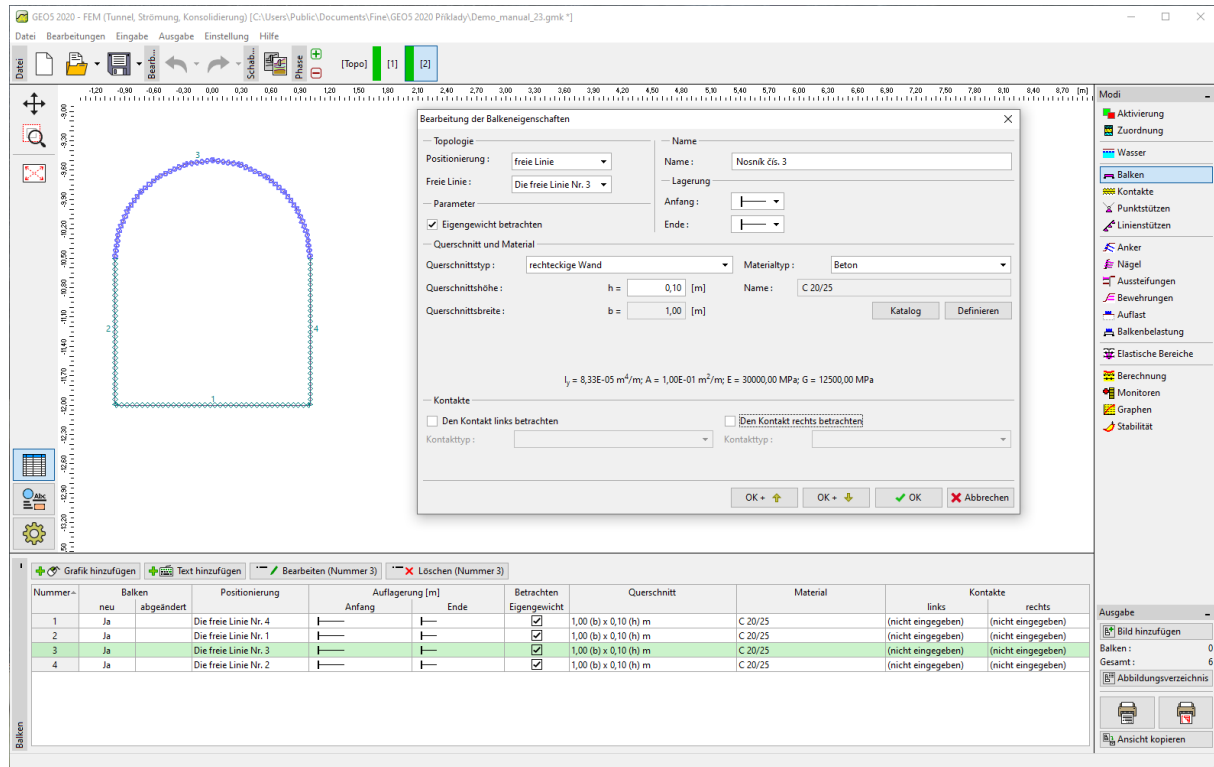
## Bauphase 2: Modellierung der Balkenelemente

Im Fenster „Aktivierung“ modellieren wir zunächst den Abbau des Bodens aus dem Kollektorquerschnitt - wir setzen den jeweiligen Bereich als inaktiv (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



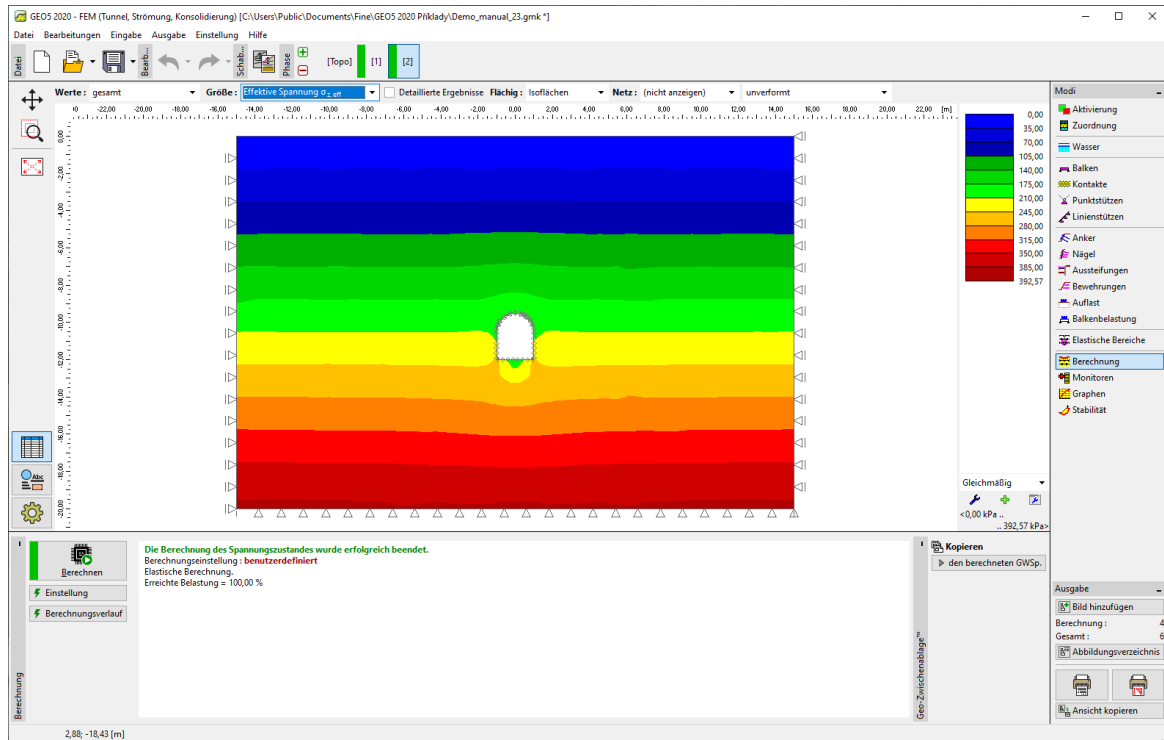
Fenster „Aktivierung“ – Bauphase 2

Dann gehen wir zum Fenster "Balken" und modellieren die Wandung des Kollektors. Wir definieren die folgenden Parameter - Position des Balkens (wir betrachten alle freien Linien), Material und Klasse des Betons, Querschnittshöhe (0,1 m) und Lagerung der Enden des Balkens (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



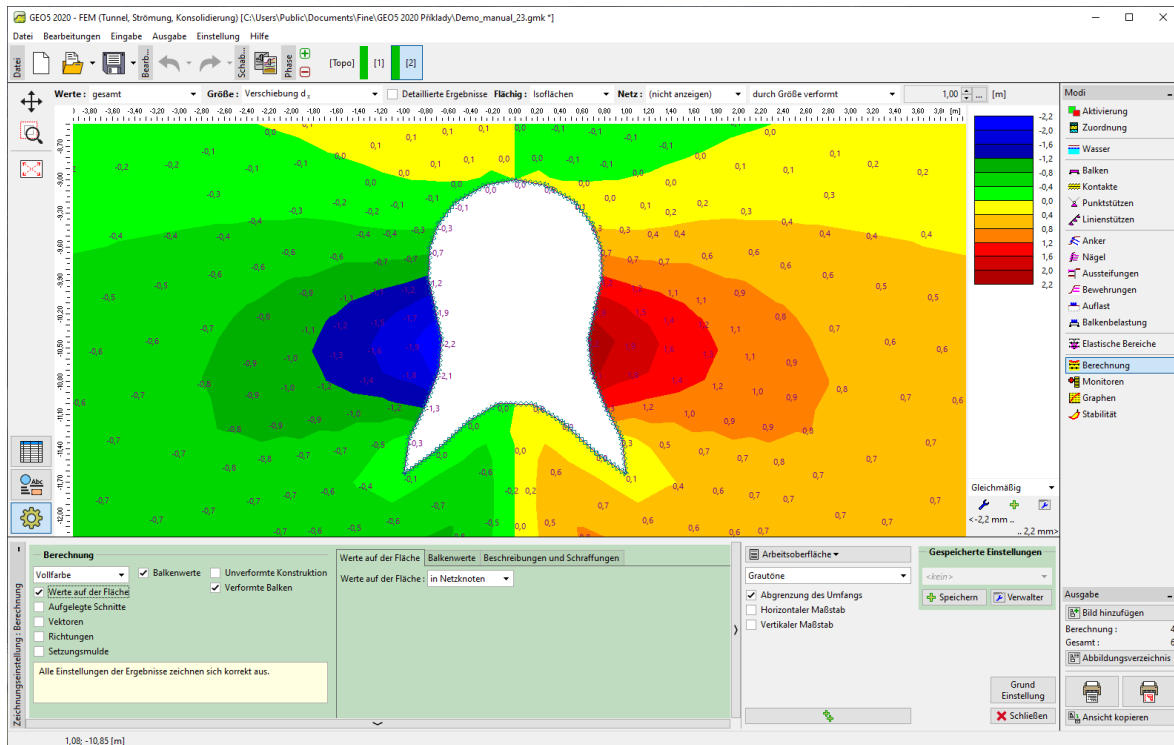
Dialogbox „Neue Balken“ – Bauphase 2

Nun werden wir die Analyse durchführen und die Ergebnisse für die vertikale geostatische Spannung  $\sigma_{z,ef}$  [kPa], die seitliche Verformung  $d_x$  [mm] und die inneren Kräfte auf der Wandung des Kollektors visualisieren.



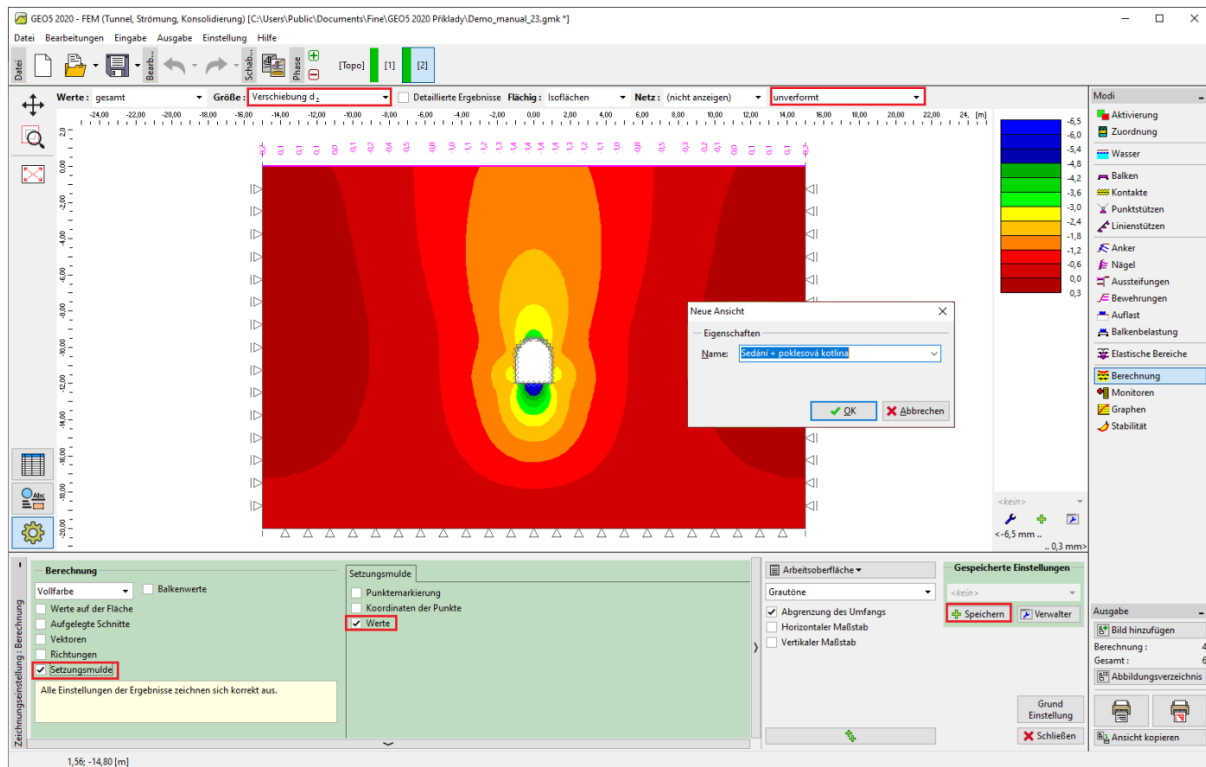
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (vertikale geostatische Spannung  $\sigma_{z,ef}$ )

Aus dem Bild geht hervor, dass die maximale horizontale Verformung 2,2 mm beträgt (der Kollektor verhält sich wie ein starrer Körper). Um das Konstruktionsverhalten besser zu verstehen, werden wir das verformte Netz (der Knopf im oberen Teil des Bildschirms) visualisieren.



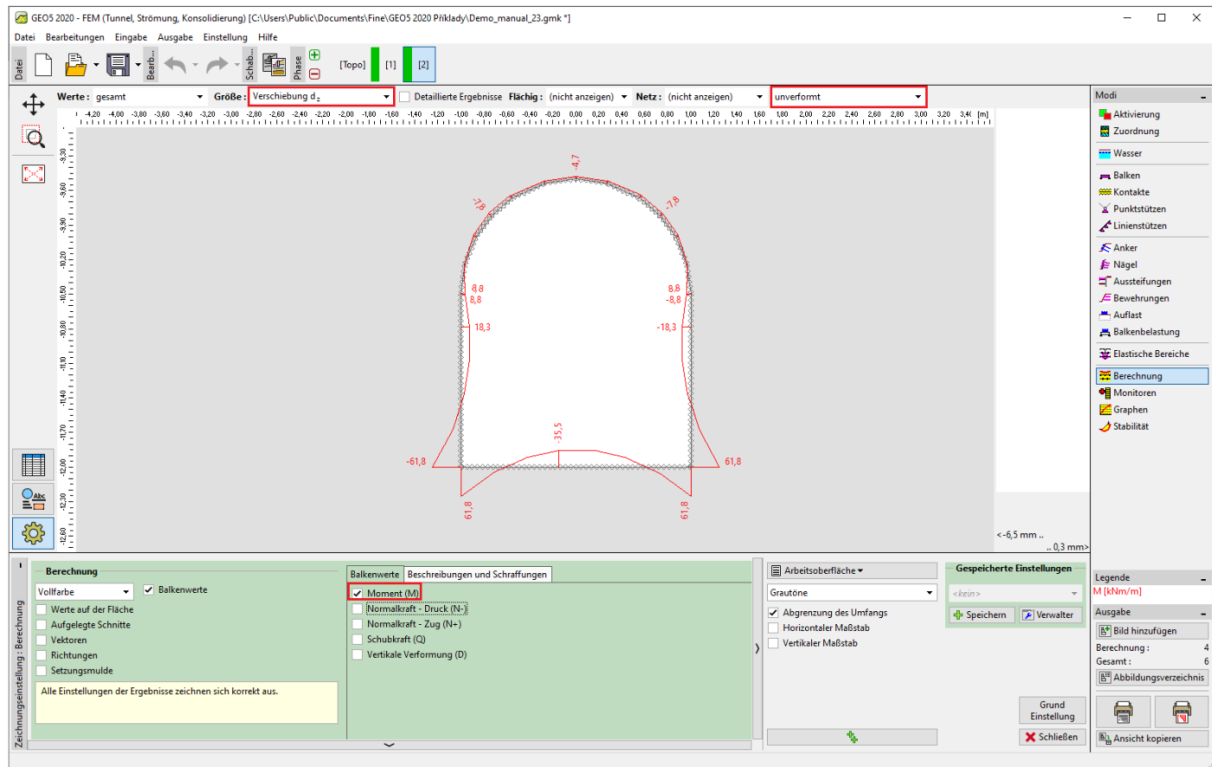
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (horizontale Verformung  $d_x$  nach der Entlastung des Bodens)

Hinweis: Einzelne aktuelle Ansichten, die auf dem Bildschirm dargestellt werden, können auch als unabhängige Objekte heruntergeladen werden. Sie können auch nachträglich verwaltet werden. Auf diese Weise wird die Visualisierung der Ergebnisse erheblich beschleunigt (für weitere Details siehe Hilfe F1).



Dialogbox „Neuer Ansicht“

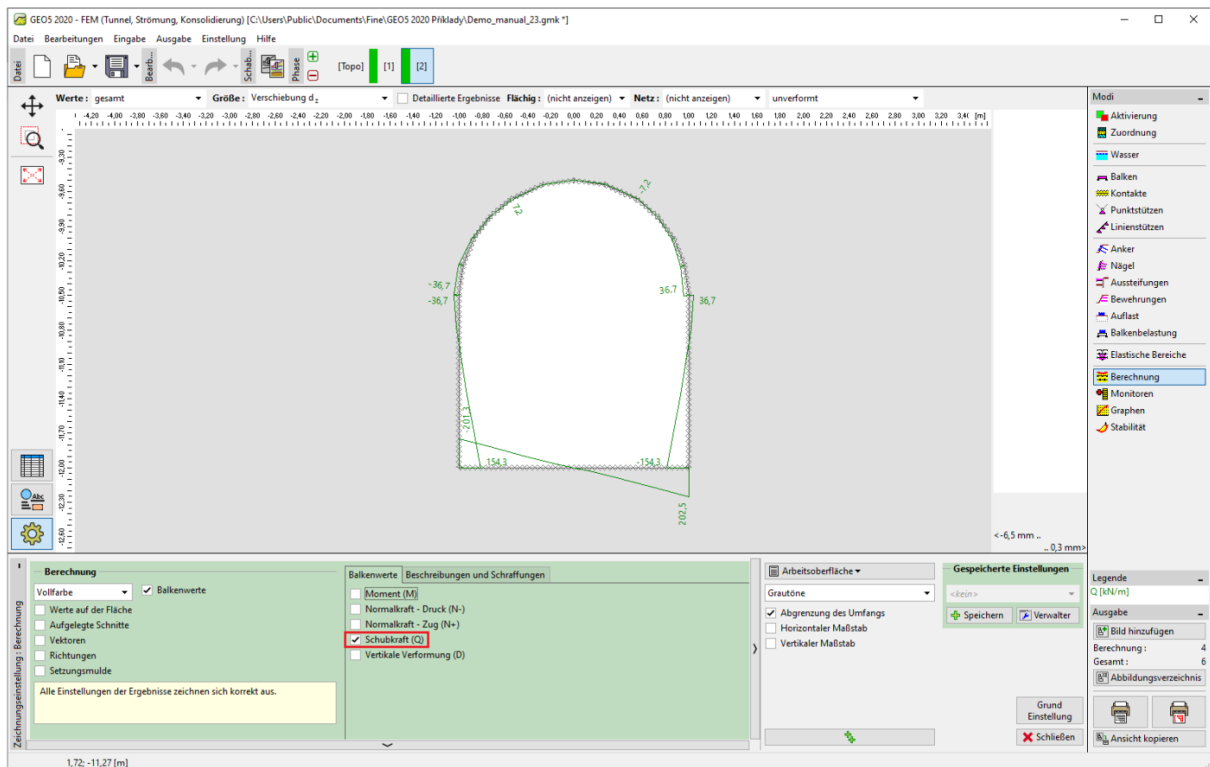
Nun untersuchen wir die Verläufe der Biegemomente  $M$  [ $kNm/m$ ], Scherkräfte  $Q$  [ $kN/m$ ] und normale Druckkräfte  $N$  [ $kN/m$ ] für Bauphase 2. (unter Verwendung der Schaltfläche "Einstellung" in der Tab "Balkenvariablen").



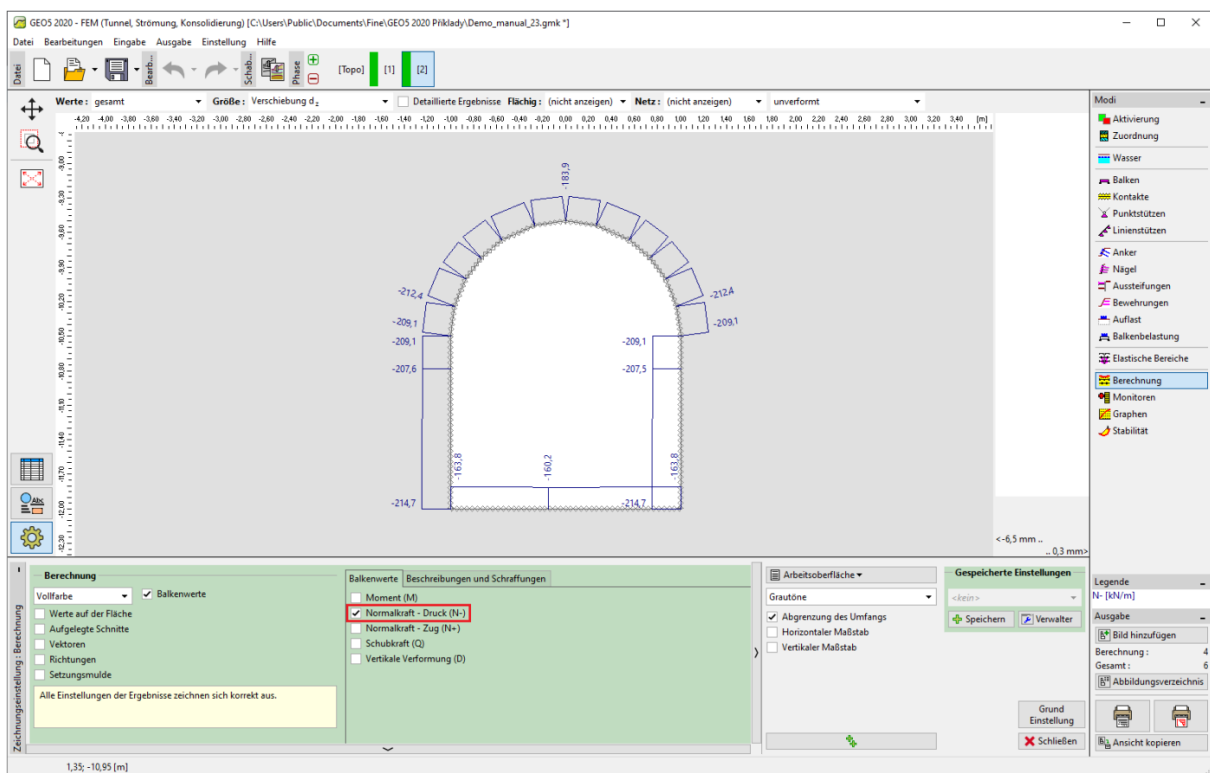
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (Verläufe der Biegemomente  $M$ )

Hinweis: Aus Gründen der Klarheit und Verständlichkeit können einige Ergebnisse nicht gleichzeitig aufzeichnet werden. Beispielsweise ist es nicht möglich, eine deformierte Konstruktion zu zeichnen und gleichzeitig den Verlauf der inneren Kräfte auf den Balken zu bestimmen, es muss immer nur eine Variante ausgewählt werden. Wenn unzulässige Kombinationen von Ausgängen eingegeben werden, werden Sie vom Programm am unteren Rand der Dialogbox gewarnt (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).

Die Bewehrung der Wandung des Kollektors kann für diese Werte in jedem statischen Programm (z. B. FIN EC - BETON 2D) entworfen und beurteilt werden. Wir zeichnen die Ergebnisse in einer Übersichtstabelle auf.



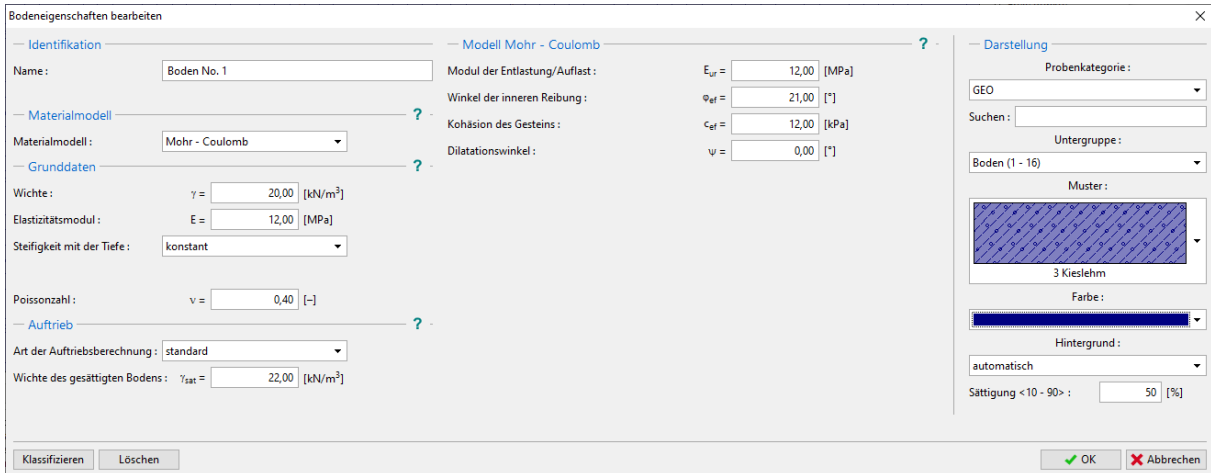
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (Verläufe der Scherkräfte  $Q$ )



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (Verläufe der normalen Druckkräften  $N^-$ )

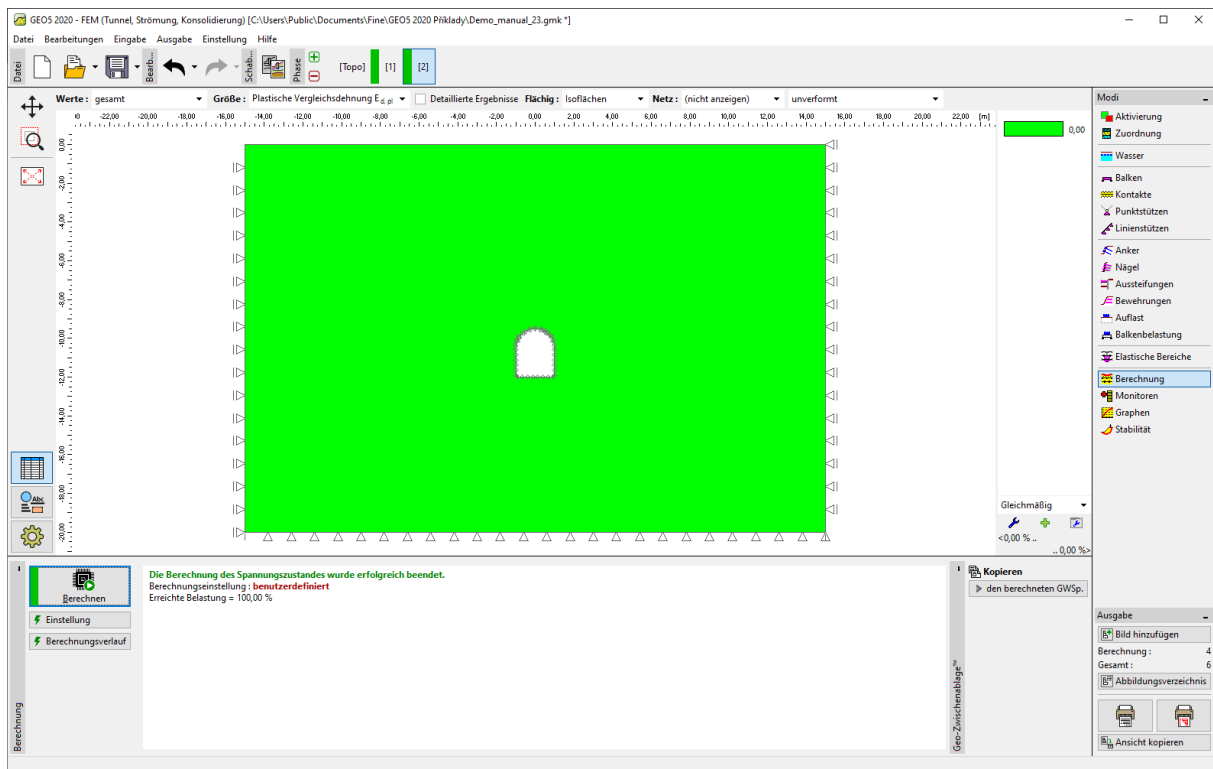
## Kontrolle der Plastizitätsbedingung: Mohr-Coulomb-Materialmodell

Wir werden nun überprüfen, ob bei nichtlinearen Modellen plastische Verformungen auftreten oder nicht. Wir kehren in den Modus "Topologie" zurück und ändern das Materialmodell im Fenster "Böden" in "Mohr-Coulomb".



### Bearbeitung der Bodeneigenschaften

Nach der Durchführung der Berechnungen werden wir die äquivalenten plastischen Verformungen anschauen.



### Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (äquivalente Verformung $\varepsilon_{eq,pl}$ nach MC-Modell)

Aus der vorherigen Abbildung folgt, dass die Plastizitätsbedingung für das Mohr-Coulomb-Modell nicht überschritten wird - die äquivalenten plastischen Verformungen  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  sind Null, was dem Verhalten der Konstruktion gemäß dem elastischen Materialmodell entspricht. Die resultierenden Werte für Verformungen, geostatische Spannung und innere Kräfte sind daher identisch.

### Auswertung der Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt die Werte der Extreme der inneren Kräfte auf den Balken (Wandung des Kollektors) für die 2. Bauphase. Dies sind die Werte für Biegemomente, Scherkräfte und Normalkräfte. Wir haben diese Berechnung für ein elastisches Materialmodell mit lokaler Verfeinerung dreieckiger Elemente durchgeführt.

Materialmodell	Bauphase 2		
	$N^-$ [kN/m]	$M$ [kNm/m]	$Q$ [kN/m]
Elastisch	- 160,2	+ 61,8	+ 202,5
	- 214,7	- 61,8	- 201,3

Verläufe der inneren Kräfte auf den Balken (Extreme) – Bauphase 2

### Schlussfolgerung

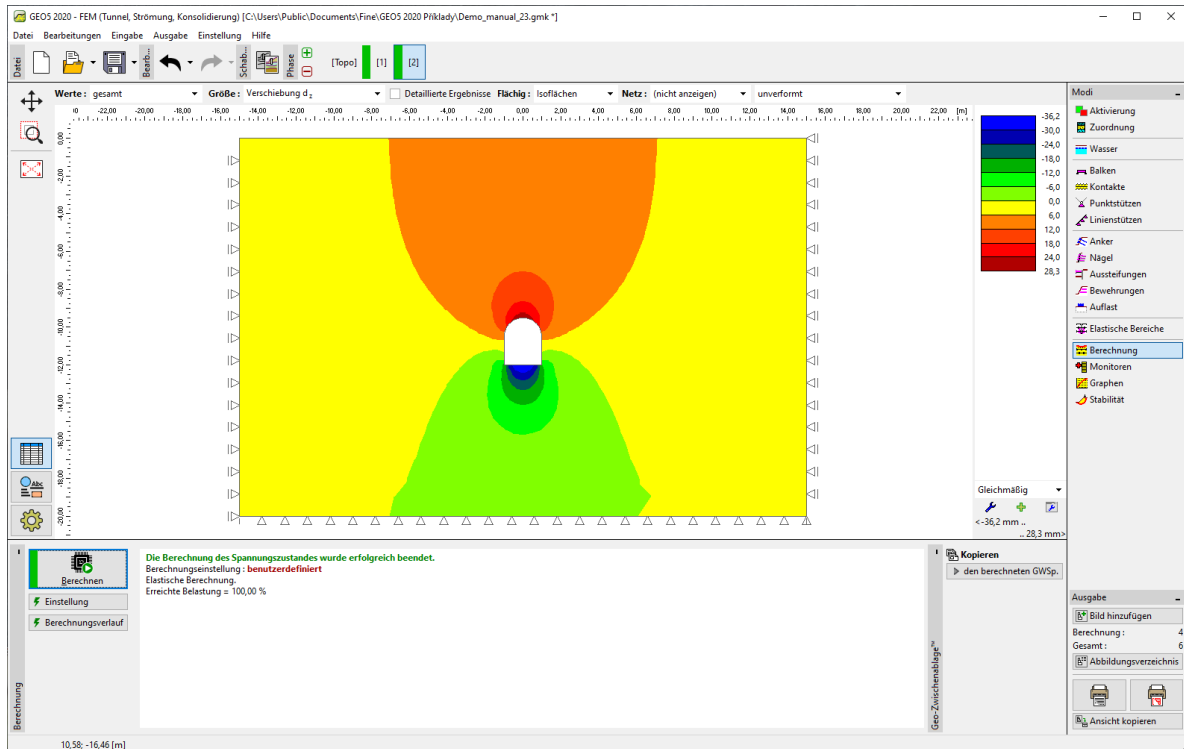
Die folgenden Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung gezogen werden:

- Die lokale Verfeinerung des Finite-Elemente-Netzes führt zu genaueren Ergebnissen.
- Wenn in nichtlinearen Materialmodellen (z. B. Mohr-Coulomb) die äquivalenten plastischen Verformungen  $\varepsilon_{eq.,pl.}$  Null sind, verhält sich die Konstruktion elastisch und die Ergebnisse von inneren Kräften, Verformungen und Spannungen sind für beide Modelltypen gleich.

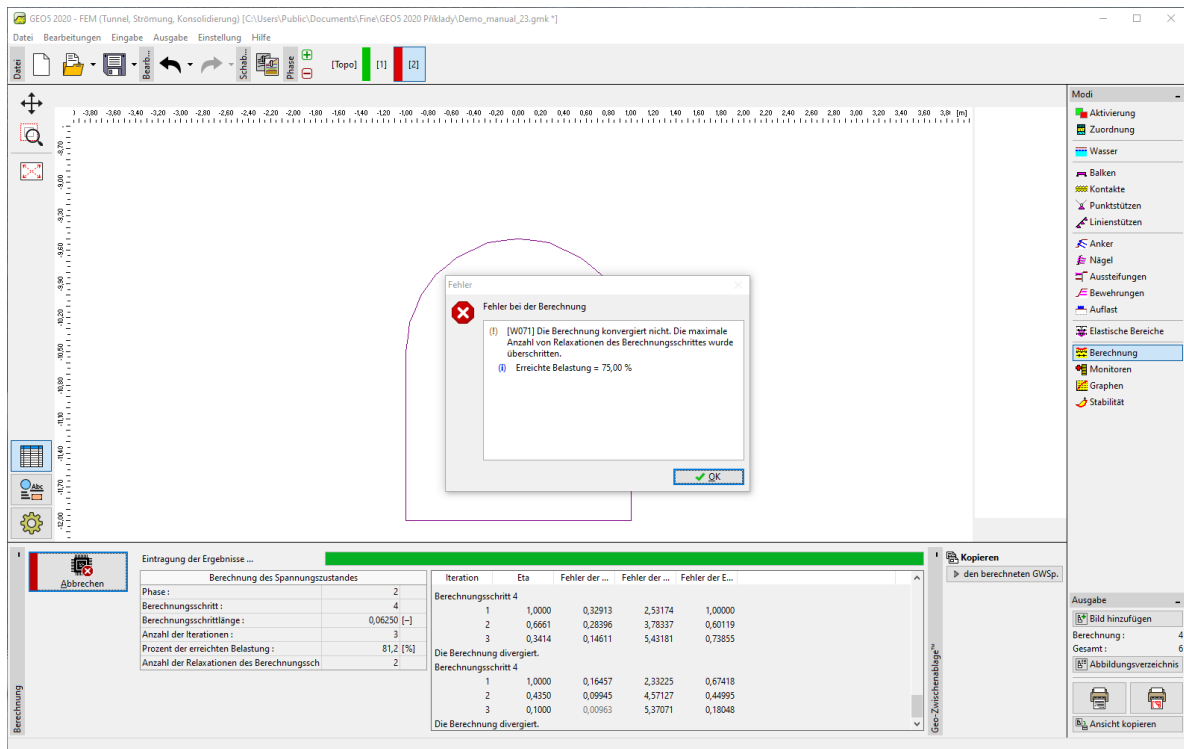
*Hinweis: Die Berechnung, die wir durchgeführt haben, basiert tatsächlich auf der unrealistischen Annahme, dass die Wandung gleichzeitig mit dem Ausheben des Bodens wirkt. Diese Methode wäre für Konstruktionen geeignet, die durch Extrusion in weichen Böden gebaut wurden (Verdrücken der fertigen Konstruktion in den Boden). Tatsächlich kommt es beim Ausheben zur Entlastung des Baugrunds und dieser wird in Richtung zu der Ausgrabung deformiert. Ein reales Beispiel für die Tunnelmodellierung ist in Kapitel 26. Numerische Modellierung des Tunnels nach der NRTM-Methode beschrieben.*

*Wenn in unserem Beispiel die Wandung nicht sofort aktiviert wurde (kann als weitere Bauphase ohne Eingabe der Balkenelemente modelliert werden), würde die Ausgrabung kollabieren - für das*

elastische Modell wird dies durch große Verformungen gezeigt, beim nichtlinearen Modell findet das Programm keine Lösung.



Berechnung ohne Verwendung von Balkenelementen (Setzung  $d_z$  nach dem elastischen Modell)



Dialogbox „Fehler“ – Berechnung ohne Verwendung der Balkenelemente (nach MC-Modell)