

Numerische Lösung einer Verbaukonstruktion

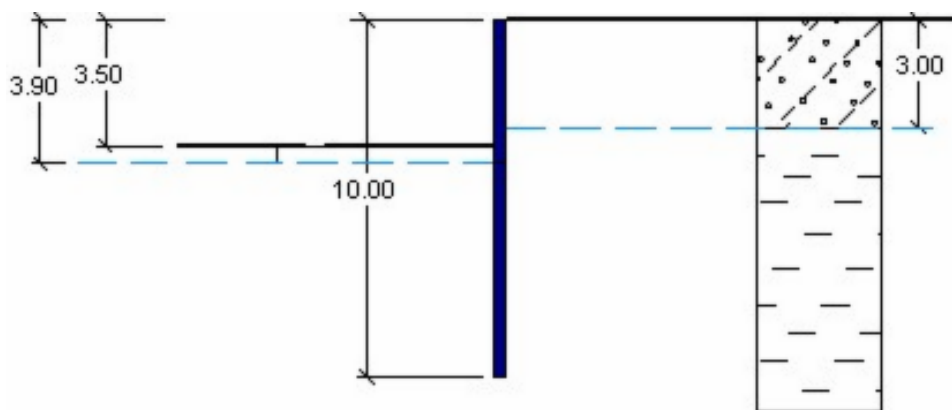
Programm: FEM

Datei: Demo_manual_24.gmk

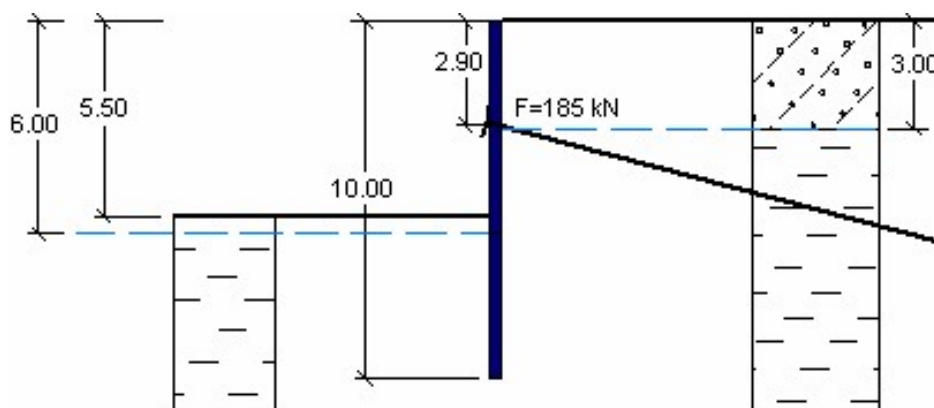
Ziel dieses Handbuchs ist es, die Verformungen einer Verbaukonstruktion aus Stahlspundbohlen zu berechnen und den Verlauf der inneren Kräfte mit der Finite-Elemente-Methode festzustellen.

Eingabe der Aufgabe

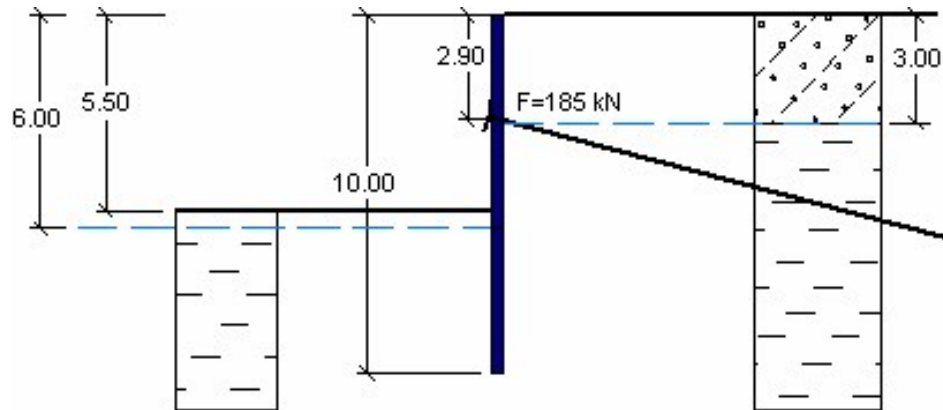
Bestimmen Sie die Beanspruchung (Verformung) der verankerten Stützmauer aus der Stahlspundbohlen VL 503 ($500 \times 340 \times 9,7 \text{ mm}$). Das Konstruktionsschema für die einzelnen Bauphasen ist aus den folgenden Abbildungen ersichtlich. Bestimmen Sie die inneren Kräfte, die entlang der Länge der verankerten Wand wirken. Die Spundwand besteht aus Stahl EN 10 025 : Fe 360. Die Länge der Verbauwand beträgt 10 m.



2. Bauphase – Abbau des Bodens bis zu einer Tiefe von 3,5 m



3. Bauphase – Einsetzen des Ankers



4. Bauphase – Bodenentnahme bis zu einer Tiefe von 5,5 m

Das geologische Profil besteht aus zwei Böden mit folgenden Parametern:

- 0,0 bis 3,0 m: Lehmiger Sand (Klasse S4, mittel verdichtet)
- ab 3,0 m: Ton mit niedriger oder mittlerer Plastizität (Klasse F6, feste Konsistenz).

Bodenparameter / Klassifikation (Sortieren)	Klasse S4	Klasse F6
Wichte des Bodens: γ [kN/m^3]	18	21
Elastizitätsmodul: E [MPa]	10	4,5
Poissonzahl: ν [–]	0,3	0,4
Kohäsion des Bodens: c_{ef} [kPa]	5	12
Winkel der inneren Reibung: ϕ_{ef} [$^\circ$]	29	19
Dilatanzwinkel: ψ [$^\circ$]	0	0
Wichte des gesättigten Bodens: γ_{sat} [kN/m^3]	20	23

Tabelle mit Bodenparameter – verankerte Wand aus Stahlspundbohlen

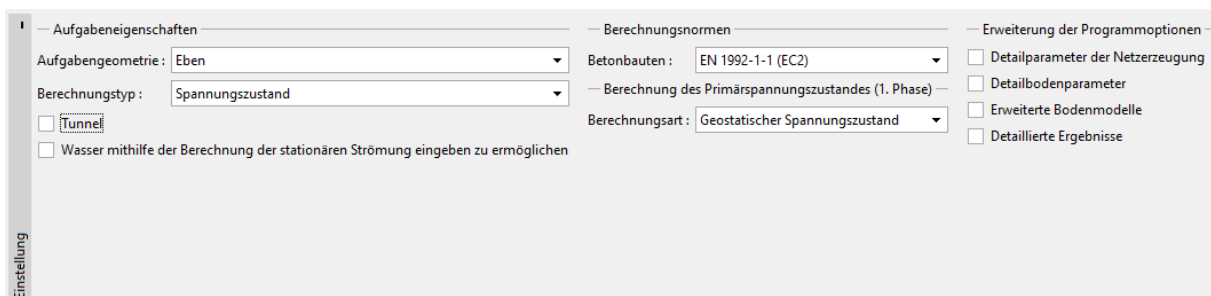
Lösung

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, Kontakte, Linienverfeinerung)
- Bauphase 1: primäre geostatische Spannung, Eingabe der Punkt-Monitoren
- Bauphase 2: Aktivierung der Bereiche,, Eingabe von Balken, Berechnung der Verformungen, innere Kräfte
- Bauphase 3: Festlegung der Anker
- Bauphase 4: Bodenaushub, Analyseergebnisse + Monitore.
- Auswertung der Ergebnisse: Vergleichung, Schlussfolgerung.

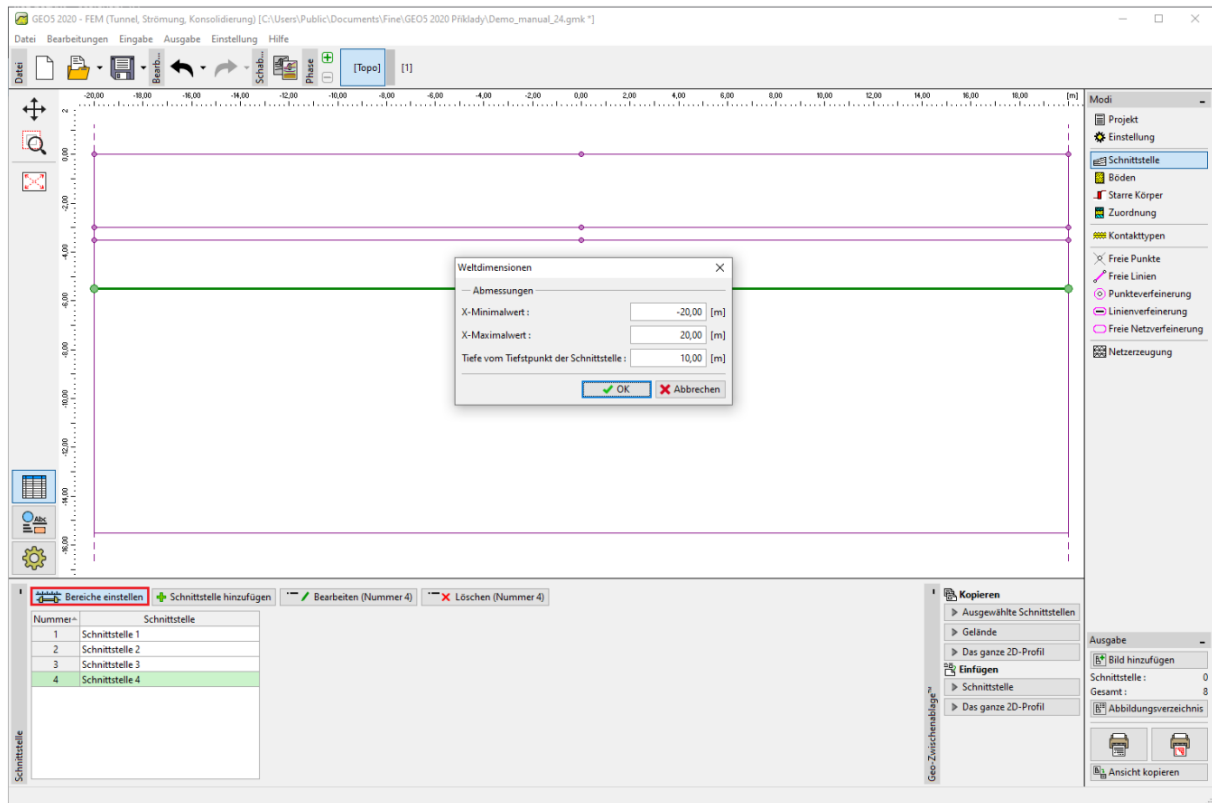
Topologie: Eingabe der Aufgabe

Im Fenster "Einstellung" belassen wir die Berechnungsmethode der 1. Bauphase als geostatische Spannung. Wir werden die Art der Berechnung als *planare Spannung* bzw. Verformung betrachten.



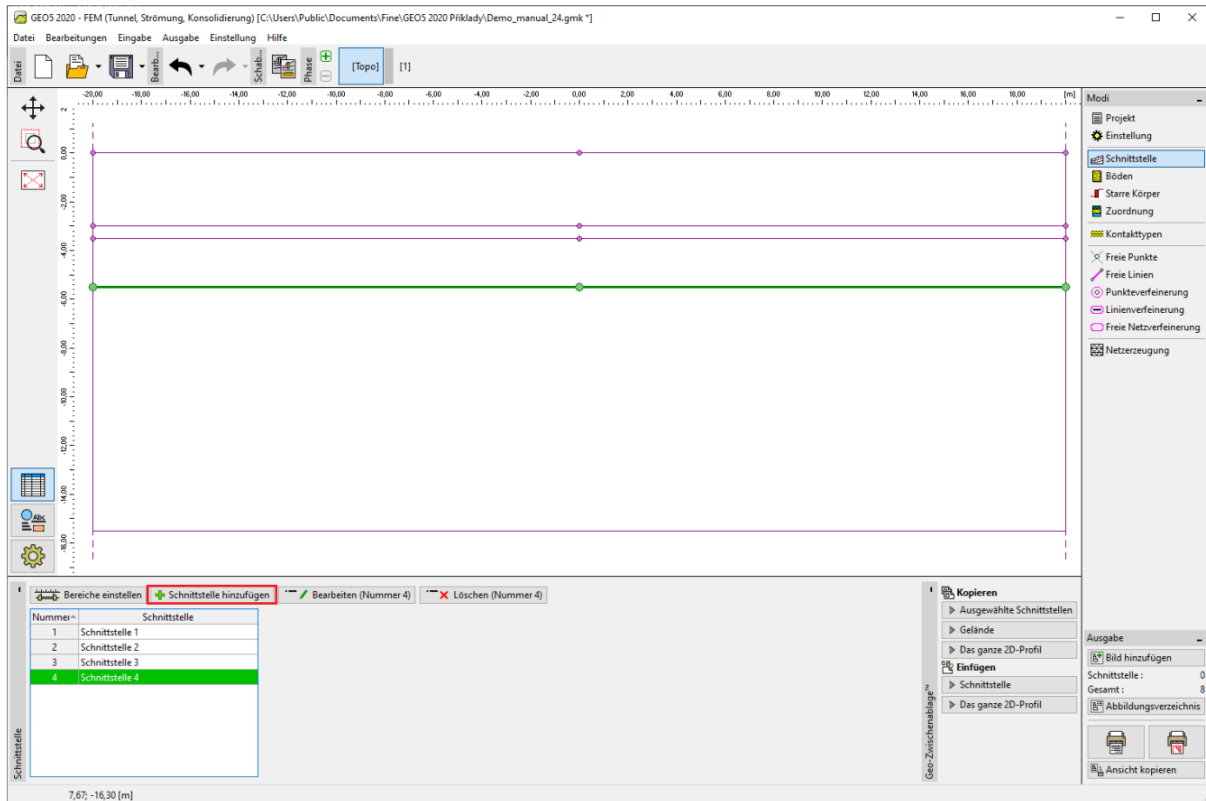
Fenster „Einstellung“

Als nächstes werden wir die Weltdimensionen eingeben, die wir groß genug wählen, damit die Ergebnisse nicht von den Bedingungen am Rand beeinflusst werden. Für unsere Aufgabe wählen wir die Abmessungen des Modells $\langle -20 \text{ m}; 20 \text{ m} \rangle$, die Tiefe vom tiefsten Punkt der Schnittstelle wird 10 m eingegeben.



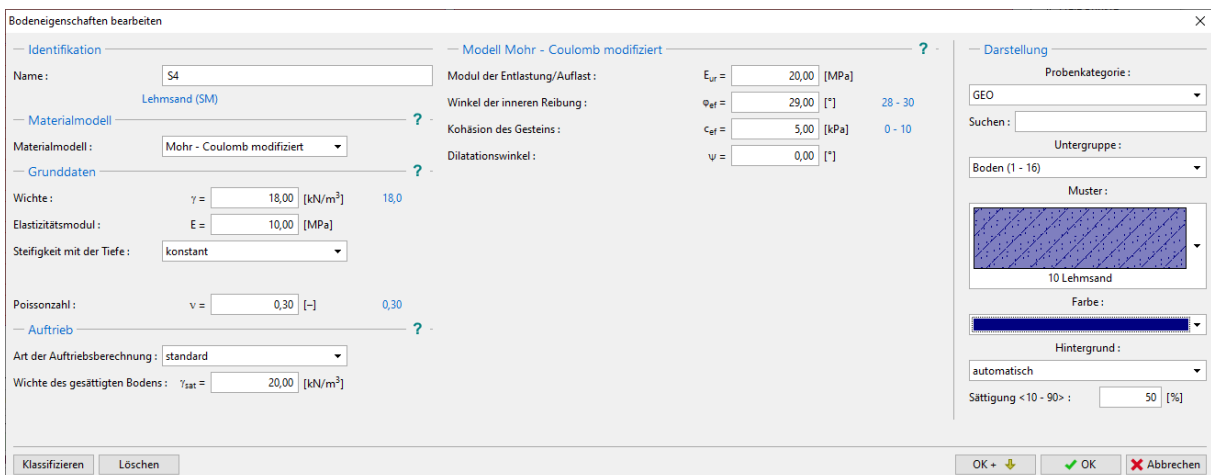
Dialogbox „Weltdimensionen“

Bei der Berechnungen von Verbauwände ist es notwendig, die Tiefen zu definieren, bis zu denen der Boden in den einzelnen Bauphasen als Schnittstellen des Bodens ausgehoben wird. In diesem speziellen Fall werden wir deshalb die Geländehöhe auf 0,0 m und horizontale Schnittstellen in den Höhenkoten von - 3,0 m, - 3,5 m und - 5,5 m festlegen. Der Punkt mit den Koordinaten [0,0; 0,0] bildet die Spitze der Verbauwand.



Fenster „Schnittstelle“

Nun werden wir die jeweiligen Parameter des Bodens spezifizieren und anschließend werden wir den Boden der erstellten Bereich zuordnen. Wir werden das modifizierte Mohr-Coulomb-Modell wählen (siehe *Anmerkung*).



Dialogbox „Neue Böden hinzufügen“

Bodeneigenschaften bearbeiten

— Identifikation —

Name: F6

— Materialmodell —

Materialmodell: Mohr - Coulomb modifiziert

— Grunddaten —

Wichte: $\gamma = 21,00$ [kN/m³] 21,0

Elastizitätsmodul: $E = 4,50$ [MPa]

Steifigkeit mit der Tiefe: konstant

Poissonzahl: $\nu = 0,40$ [-] 0,40

— Auftrieb —

Art der Auftriebsberechnung: standard

Wichte des gesättigten Bodens: $\gamma_{sat} = 23,00$ [kN/m³]

— Modell Mohr - Coulomb modifiziert —

Modul der Entlastung/Auflast: $E_{ur} = 13,00$ [MPa]

Winkel der inneren Reibung: $\phi_{eff} = 19,00$ [°] 17 - 21

Kohäsion des Gesteins: $c_{eff} = 12,00$ [kPa] 8 - 16

Dilatationswinkel: $\psi = 0,00$ [°]

— Darstellung —

Probenkategorie: GEO

Suchen:

Untergruppe: Boden (1 - 16)

Muster: 4 Ton

Farbe:

Hintergrund: automatisch

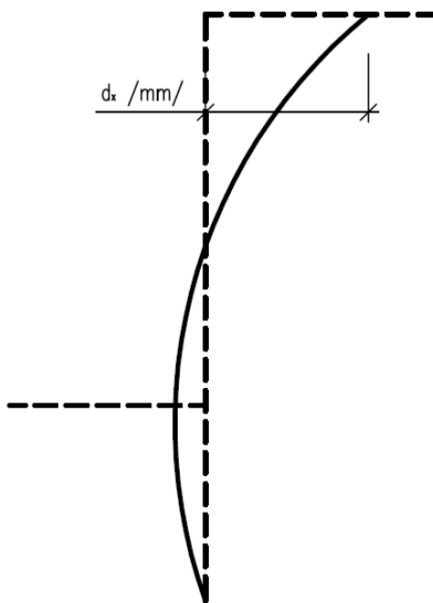
Sättigung <10 - 90>: 50 [%]

Klassifizieren Löschen OK + OK Abbrechen

Dialogbox „Neue Böden hinzufügen“

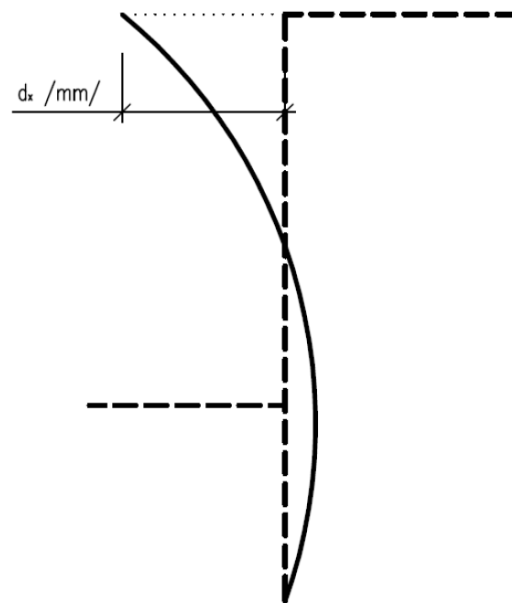
Hinweis: Bei der Berechnung von Verbaukonstruktionen ist es notwendig, Kontaktelemente zwischen dem Boden und dem Balken einzuführen. Das Lösen von Problemen ohne Kontaktelemente führt zu völlig unrealistischen Ergebnissen (für weitere Details siehe Hilfe - F1).

Solution without contacts



deformation of sheeting to a soil
(wrong)

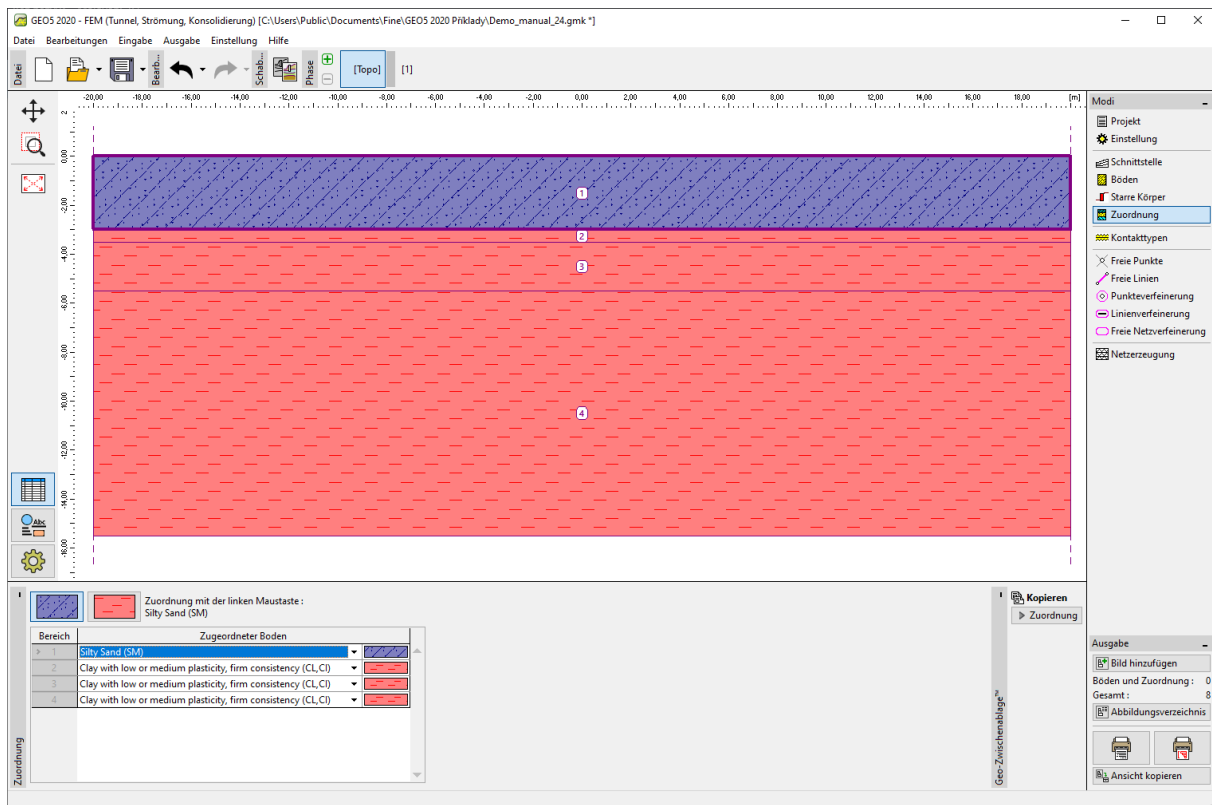
Solution with contacts



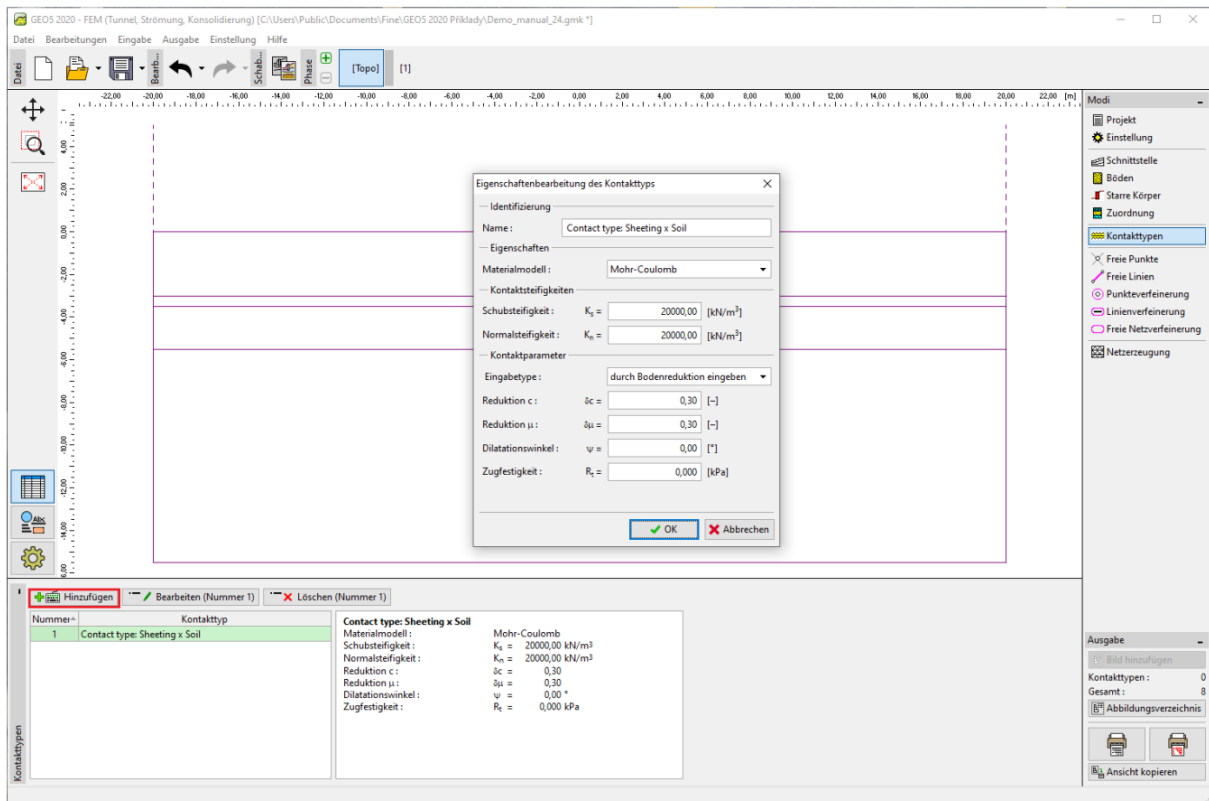
deformation of sheeting from a soil
(right)

Verwendung der Kontaktelemente

Die folgende Abbildung zeigt die Zuordnung von Böden zu einem geologischen Profil.

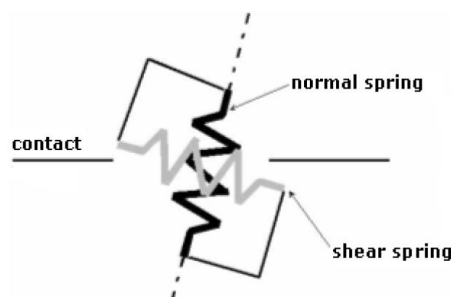


Der nächste Schritt besteht in der Einstellung der Kontaktparameter (mit der Schaltfläche "Hinzufügen"). Bei der Analyse von Verbaukonstruktionen ist es immer notwendig, den Kontakt mit dem nichtlinearen Materialmodell auf die Balkenelemente zu definieren. In diesem speziellen Fall werden wir die Option "Mohr-Coulomb" wählen, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Wir gehen davon aus, dass die Reduktion der Bodenparameter auf dem Kontakt $\delta c = \delta \mu = 0,3$ ist und werden wir die Standardwerte der Kontaktsteifigkeit beibehalten $K_s = K_n = 20\,000\text{ kN/m}^3$.



Dialogbox „Neue Kontakttypen“

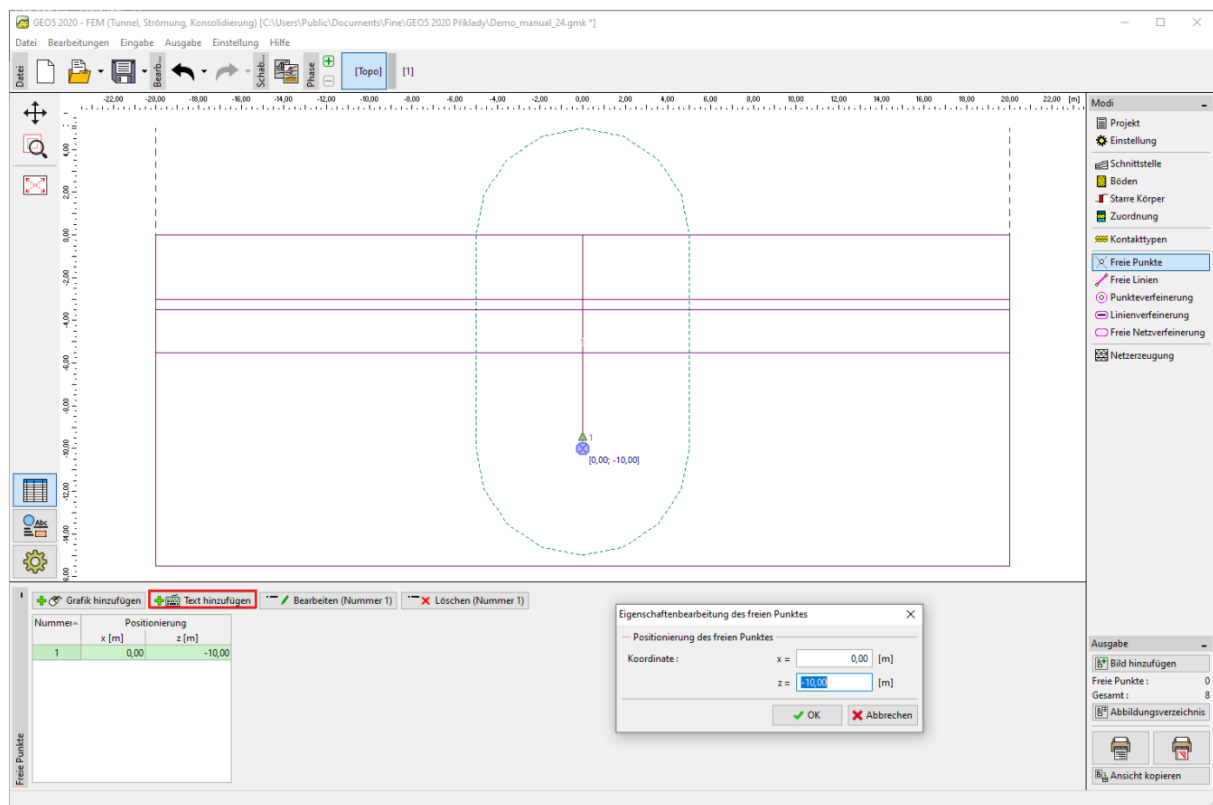
Hinweis: Kontaktelemente werden in Analysen verwendet, wenn es notwendig ist, die Wechselwirkung zwischen der Konstruktion und der Umgebung - einer Schnittstelle zwischen zwei völlig unterschiedlichen Materialien (Boden - Verbau) - zu berücksichtigen. Ein typisches Beispiel für die Verwendung von Kontaktelementen ist die Modellierung von Verbaukonstruktionen, Stützmauern oder Tunnelauskleidungen, bei denen wir das Kontaktelement zur Simulation eines dünnen Boden- oder Gesteinsbereichs verwenden, in dem starke Beanspruchungen, vor allem Scherspannungen, auftreten. Die Kontakte können auch zwischen einzelnen Bodenschnittstellen eingebracht werden. Das Kontaktelement ist ein Element mit einer Dicke von Null, das die Beziehung zwischen Kontaktspannungen und relativen Änderungen der Verschiebungen entlang des Kontaktes ausdrückt (für weitere Details siehe Hilfe - F1).



Schematische Darstellung der Steifigkeit von Kontaktelement

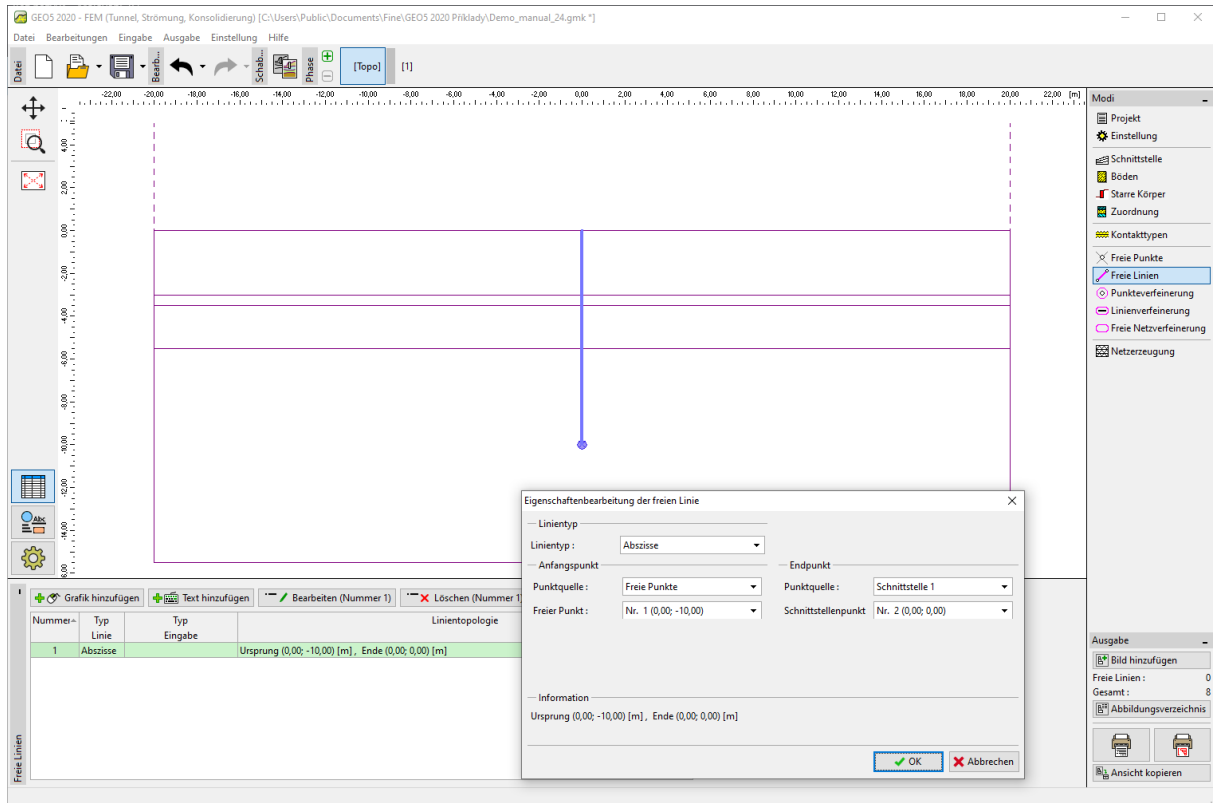
Hinweis: Obwohl die Wahl des Parameters K_s bei einem vollständig plastischen Verhalten des Kontakts nicht wichtig ist, ist die Größe dieses Parameters entscheidend für eine erfolgreiche Lösung des betrachteten nichtlinearen Problems. Zu hohe Steifigkeitswerte (über $100\,000\text{ kN/m}^3$) können zu einer Oszillation der numerischen Lösung führen. Im Gegensatz dazu können sehr niedrige Parameterwerte K_s und K_n (unter $10\,000\text{ kN/m}^3$) zu unrealistischen Verformungen der Konstruktionen führen. Die Werte der Kontaktspannungen K_s und K_n selbst werden jedoch durch die Wahl der Steifigkeit K_s und K_n nicht wesentlich beeinflusst (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1).

Anschließend werden wir die Geometrie der Verbaukonstruktion in "Freie Punkte" und "Freie Linien" Fenster festlegen. Das Prinzip der Eingabe von freien Punkten und freien Linien wurde im vorherigen Kapitel 23. Beanspruchung der Wandung des Kollektors näher beschrieben.



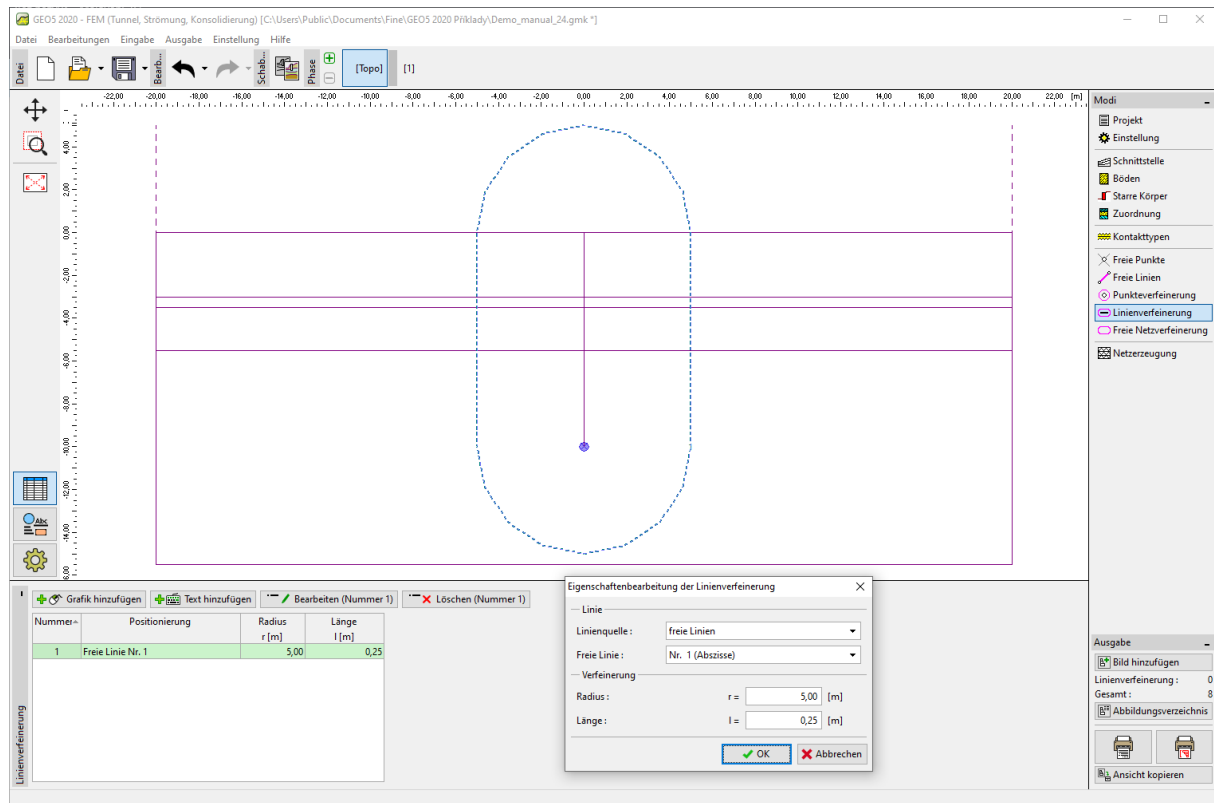
Dialogbox „Neue freie Punkte“

Zuerst werden wir einen neuen freien Punkt mit Koordinaten $[0,0;-10,0]$ eingeben. Die freie Linie, die die Verbauwand bildet, entsteht durch die Verbindung dieses Punktes mit dem Punkt der Geländeschnittstelle (für weitere Informationen siehe Hilfe - F1).



Dialogbox „Neue freie Linien“

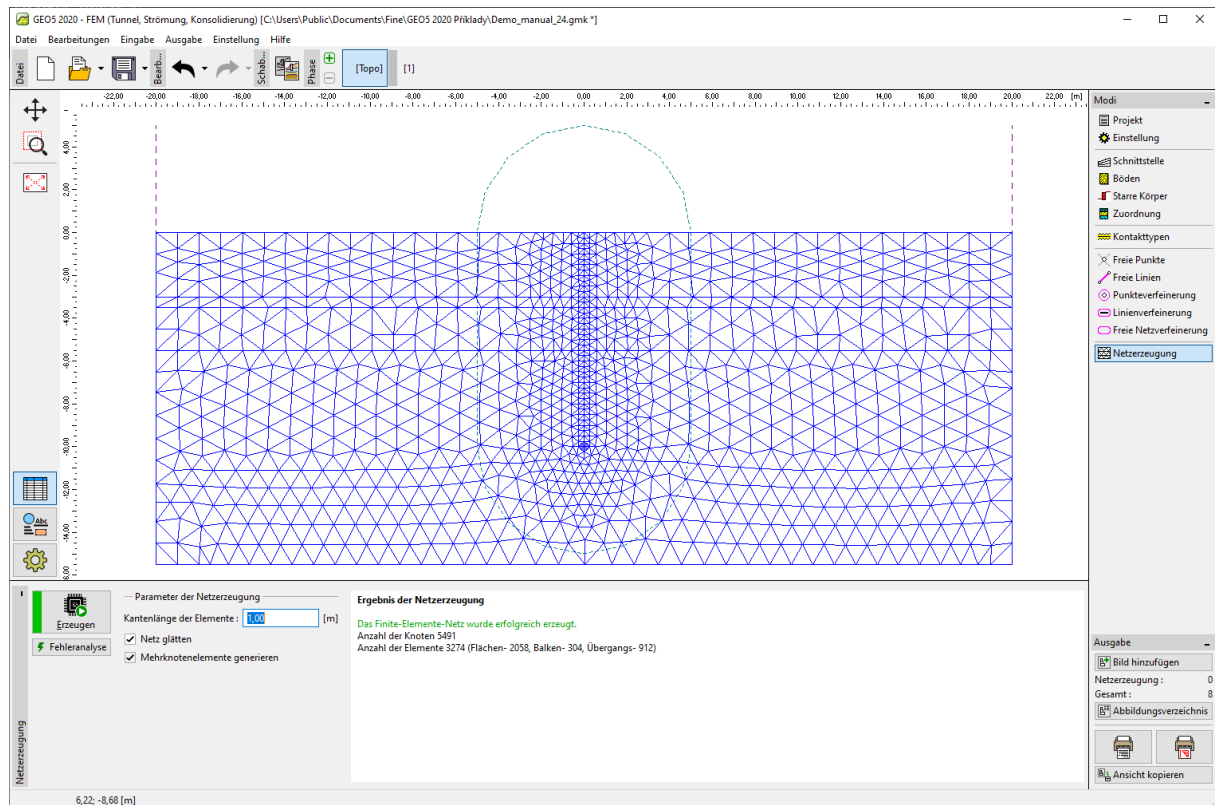
Der letzte Schritt bei der Eingabe der Topologie ist die Erzeugung des Finite-Elemente-Netzes. Es ist sinnvoll, das FE-Netz-Verfeinerung in der Umgebung von Verbauwand zu definieren. Im Fenster "Linienverfeinerung" werden wir den jeweiligen Bereich mit Radius $r = 5,0 \text{ m}$ und die Kantenlänge der Elemente $l = 0,25 \text{ m}$ auswählen.



Dialogbox „Neue Linienverfeinerungen“

Dann gehen wir zum Fenster "Netzerzeugung" über und generieren ein Netz mit der Kantenlänge der Elemente von 1,0 m (mit der Schaltfläche "**Generieren**"). Das verfeinerte FE-Netz wird vom Programm automatisch geglättet.

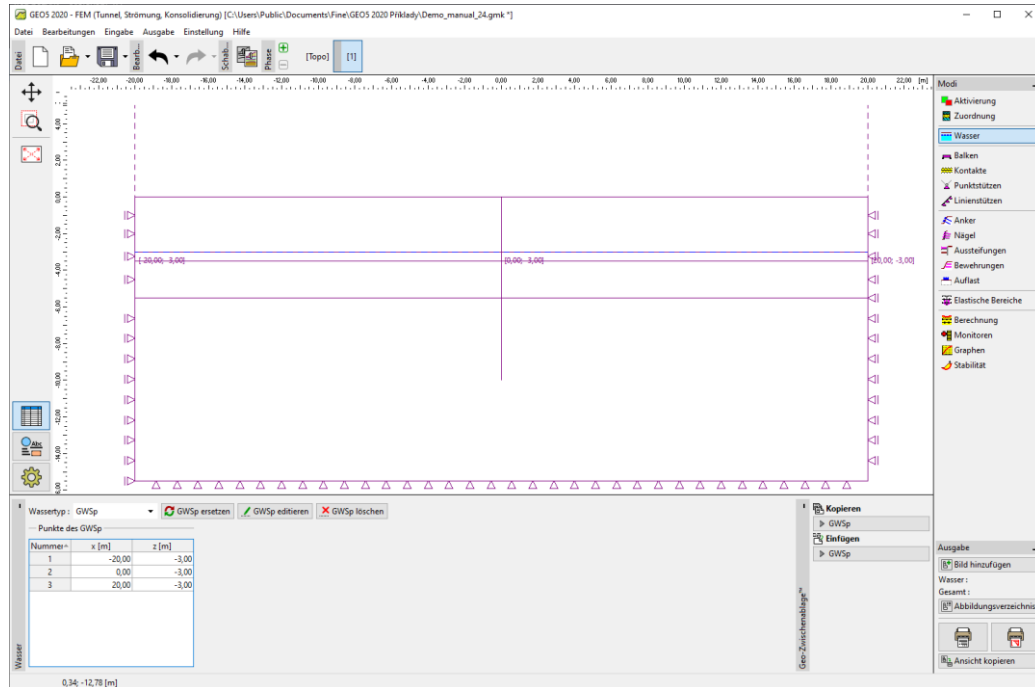
Hinweis: Anschließend werden wir visuell überprüfen, ob die Finite-Elemente-Netzdichte dem Umfang und der Komplexität der gegebenen Aufgabe angemessen ist (weitere Einzelheiten finden Sie unter Hilfe - F1). Die erhöhte Netzverfeinerung trägt zur Stabilisierung der nichtlinearen Berechnung bei, ähnlich wie die Abminderung der Schersteifigkeit.



Fenster „Netzzeugung“ – Kantenlänge der Elemente 1,0 m (mit lokaler Netzverfeinerung um die Wand)

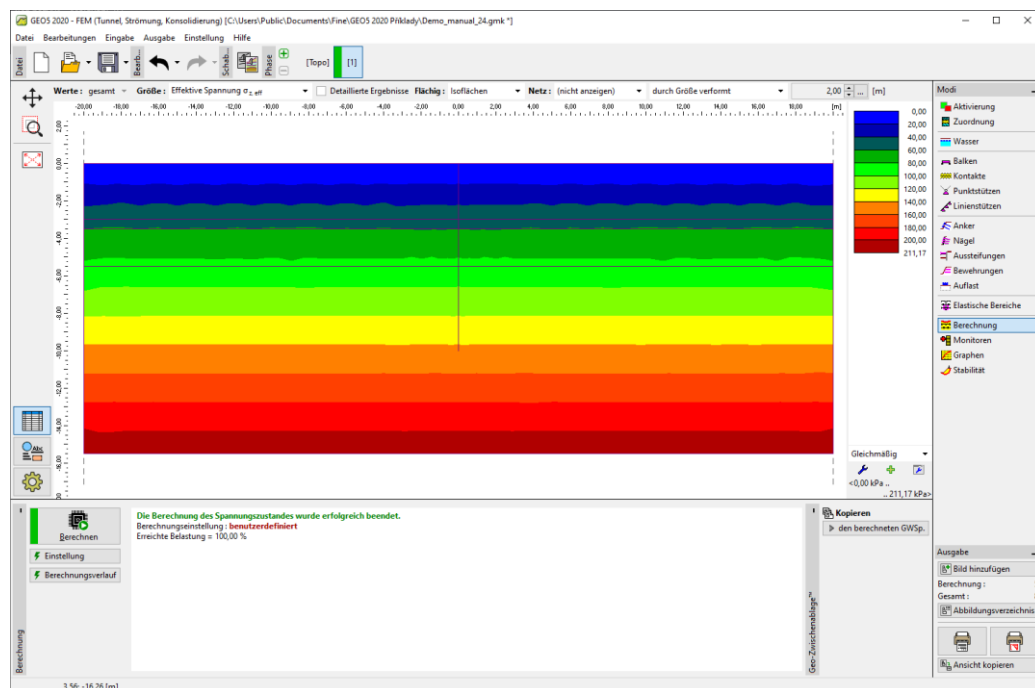
Bauphase 1: primäre geostatische Spannung

Nach der Netzerzeugung gehen wir zur Bauphase 1 über und stellen den Grundwasserspiegel (im Folgenden GWSp genannt) in einer Tiefe von 3,0 m unter der Geländeoberfläche ein (siehe *Abbildung*).



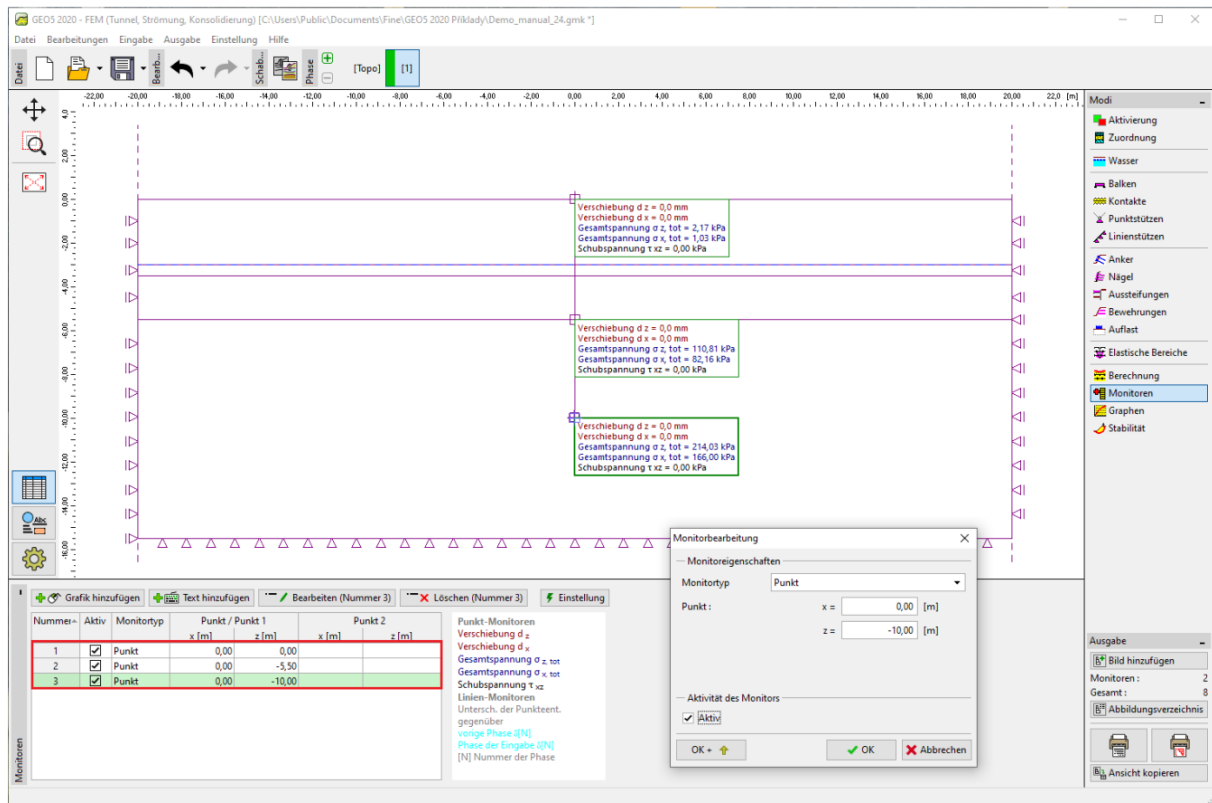
Fenster „Wasser“ – Bauphase 1 (Verlauf GWSp in der Tiefe von 3,0 m)

Wir werden die primäre geostatische Spannung berechnen. Wir behalten die Berechnungseinstellung als "Standard" bei (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 1 (Vertikale geostatische Spannung $\sigma_{z,ef}$)

Zum Zweck der Beobachtung der Werte bestimmter Größen (im Laufe der Berechnung einzelner Bauphasen) werden wir im Programm sogenannte *Punkt-Monitore* definieren (mit der Schaltfläche "Hinzufügen"). Die überwachten Stellen wählen wir an den Punkten aus, die Kopf und Fuß der zu modellierenden Verbauwand darstellen, d.h. $[0,0; 0,0]$ und $[0,0; -10,0]$ und weiter im Bereich des Bodenaushubs an der Baugrubensohle $[0,0; -5,5]$.

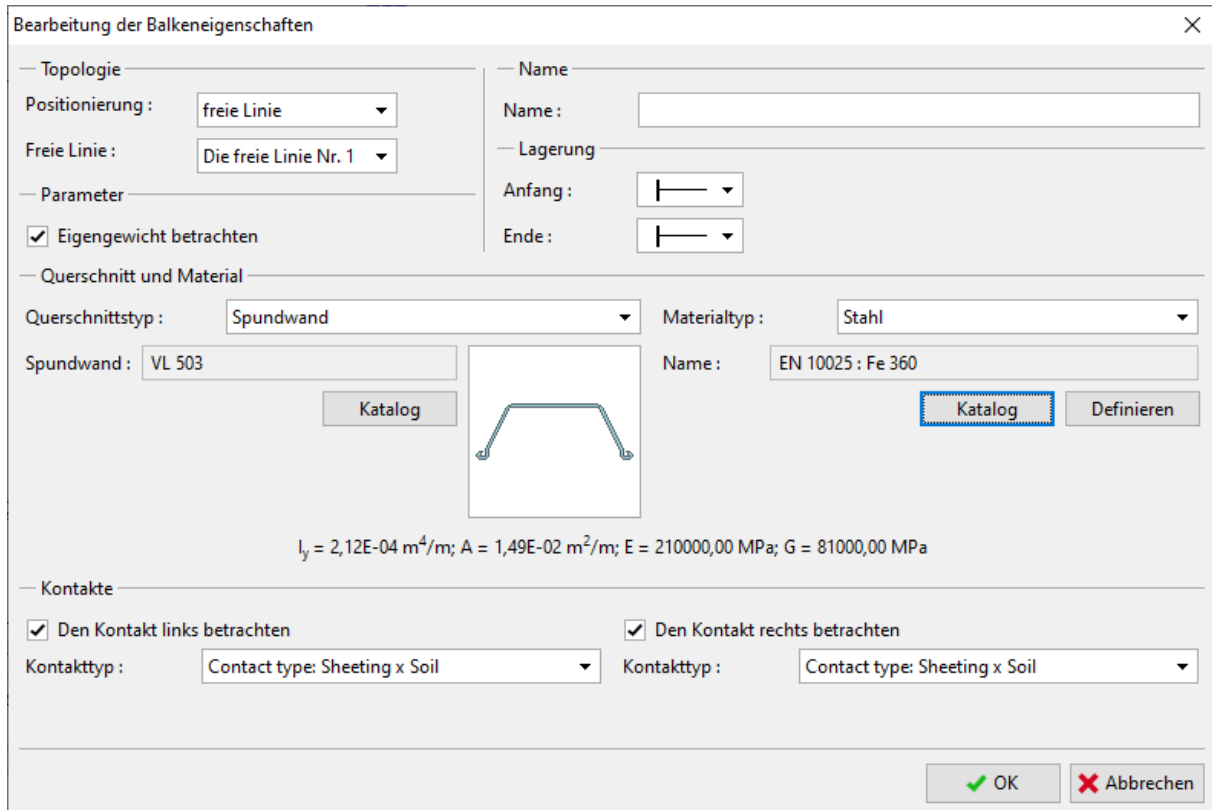


Fenster „Monitoren“ – Bauphase 1 (Punkt-Monitoren)

Hinweis: Die einzelnen Werte der Variablen, die in den Ergebnissen angezeigt werden sollen, werden gemäß der Schaltfläche "Einstellung" (unten rechts auf dem Bildschirm) angepasst. Für die Berechnung von Verbaukonstruktionen sind wir am meisten an der Änderung der geostatischen Spannung und der Größe der Vertikalen bzw. seitlichen Verformung interessiert.

Bauphase 2: Modellierung der Balkenelemente

Zunächst werden wir in dieser Bauphase zum "Balken"-Rahmen übergehen und die Verbauwand aus der Stahlspundbohlen modellieren. Wir werden folgende Beziehungen definieren: Lage des Balkens, Material- und Stahlklasse, Querschnittstyp (VL 503), Lagerung der Balkenenden und Kontakte (für weitere Informationen siehe Hilfe - F1).



Bearbeitung der Balkeneigenschaften

— Topologie
Positionierung : freie Linie
Freie Linie : Die freie Linie Nr. 1

— Name
Name :

— Lagerung
Anfang :
Ende :

— Parameter
☒ Eigengewicht betrachten

— Querschnitt und Material
Querschnittstyp : Spundwand
Materialtyp : Stahl
Spundwand : VL 503
Name : EN 10025 : Fe 360
Katalog Definieren

$I_y = 2,12E-04 \text{ m}^4/\text{m}$; $A = 1,49E-02 \text{ m}^2/\text{m}$; $E = 210000,00 \text{ MPa}$; $G = 81000,00 \text{ MPa}$

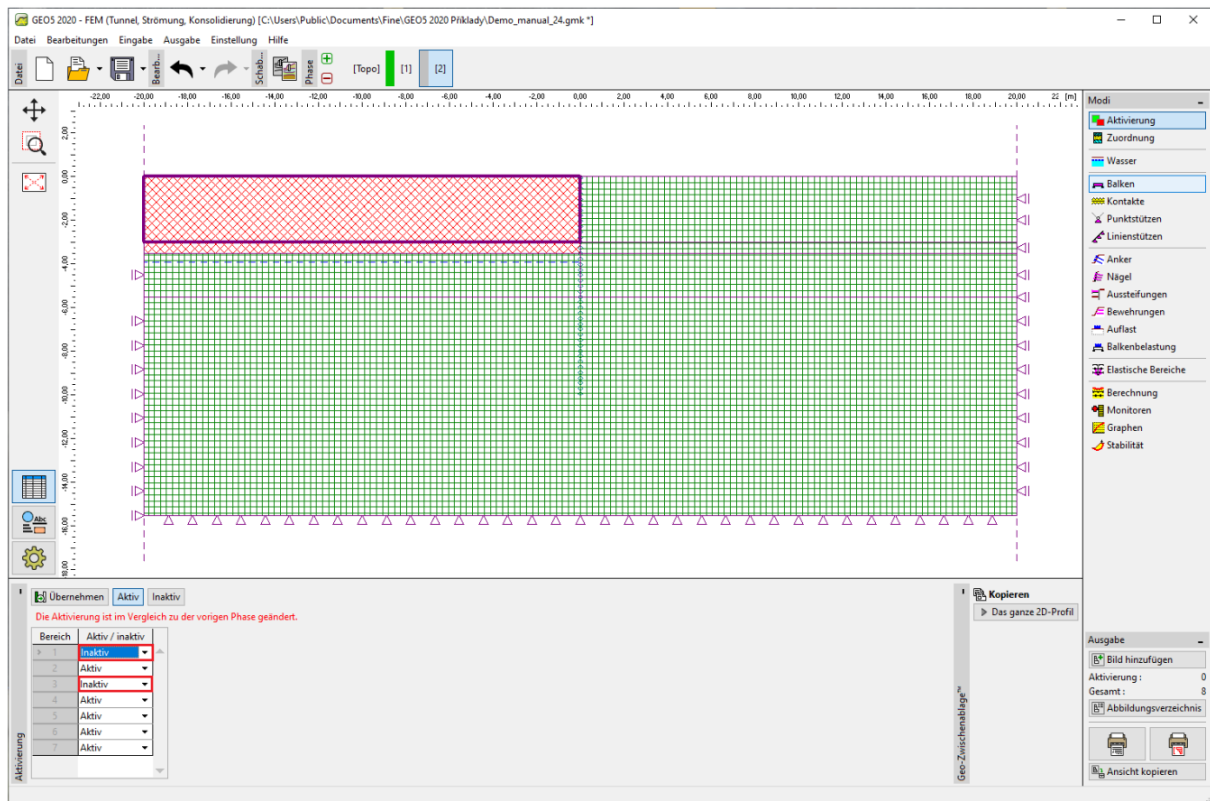
— Kontakte
☒ Den Kontakt links betrachten
Kontakttyp : Contact type: Sheeting x Soil
☒ Den Kontakt rechts betrachten
Kontakttyp : Contact type: Sheeting x Soil

OK Abbrechen

Dialogbox „Neue Balken“ – Bauphase 2

Hinweis: Am Wandfuß betrachten wir die Gelenklagerung des Balkenendes. Diese Randbedingung stellt sicher, dass am Fuß der Spundbohlenwand kein Biegemoment auftritt (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1).

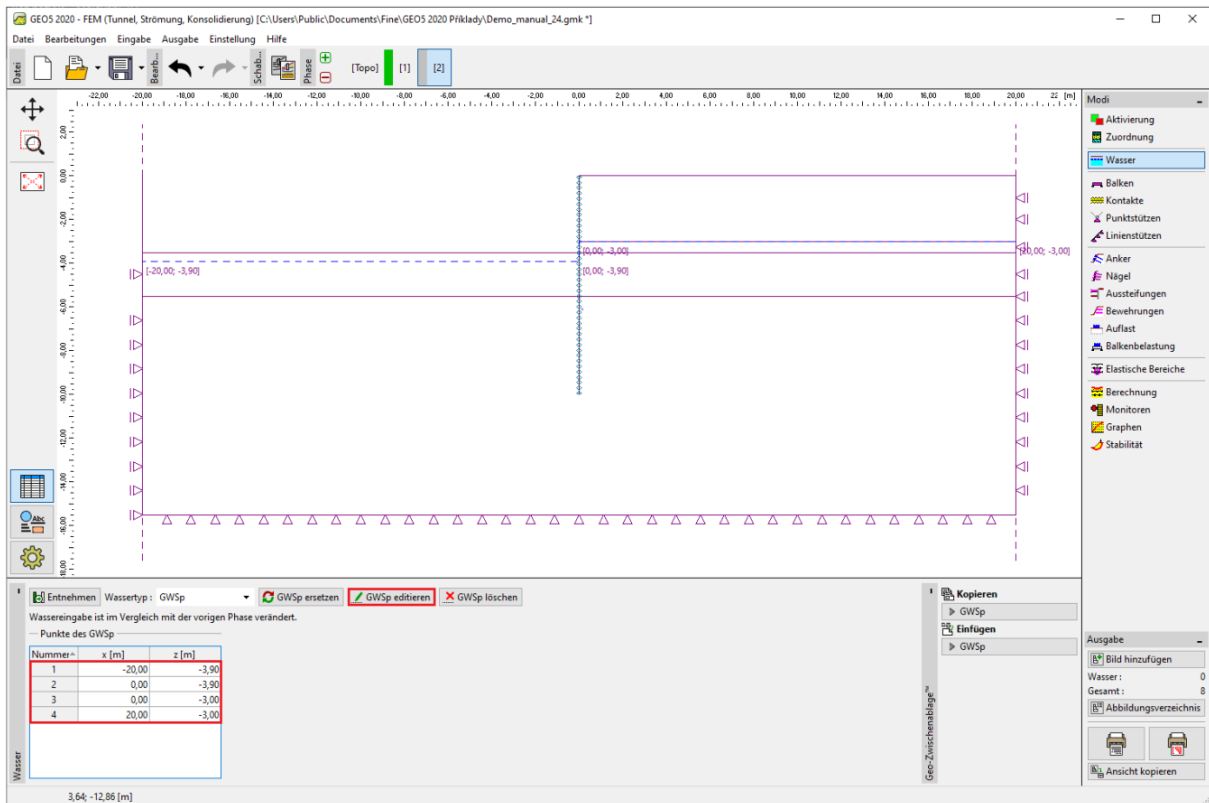
Dann werden wir den Aushub des Bodens im Fenster "Aktivierung" modellieren - wir werden die gegebenen Bereiche im Programm mit dem Mauszeiger als inaktiv setzen (für weitere Details siehe F1).



Fenster „Aktivierung“ – Bauphase 2

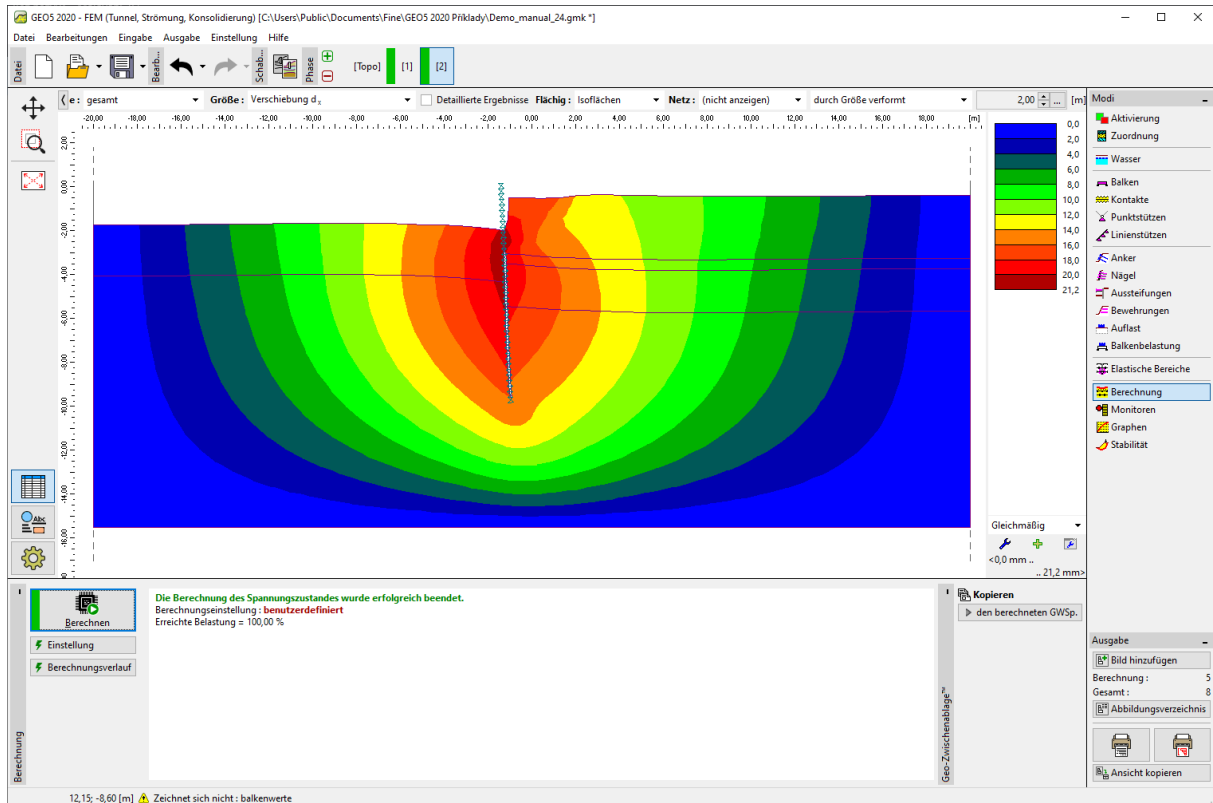
Hinweis: Aus der vorstehenden Abbildung ist ersichtlich, dass der automatische Korrektur, der im Programm eingebaut ist, die Schnittstellen der von der Mauer durchquerten Böden in einzelne umschriebene Bereiche unterteilt hat (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1).

Wir werden als Nächstes im Fenster "Wasser" die Änderung des Verlaufs von GWSp gemäß der folgenden Abbildung ein. Andere Parameter ändern sich nicht.

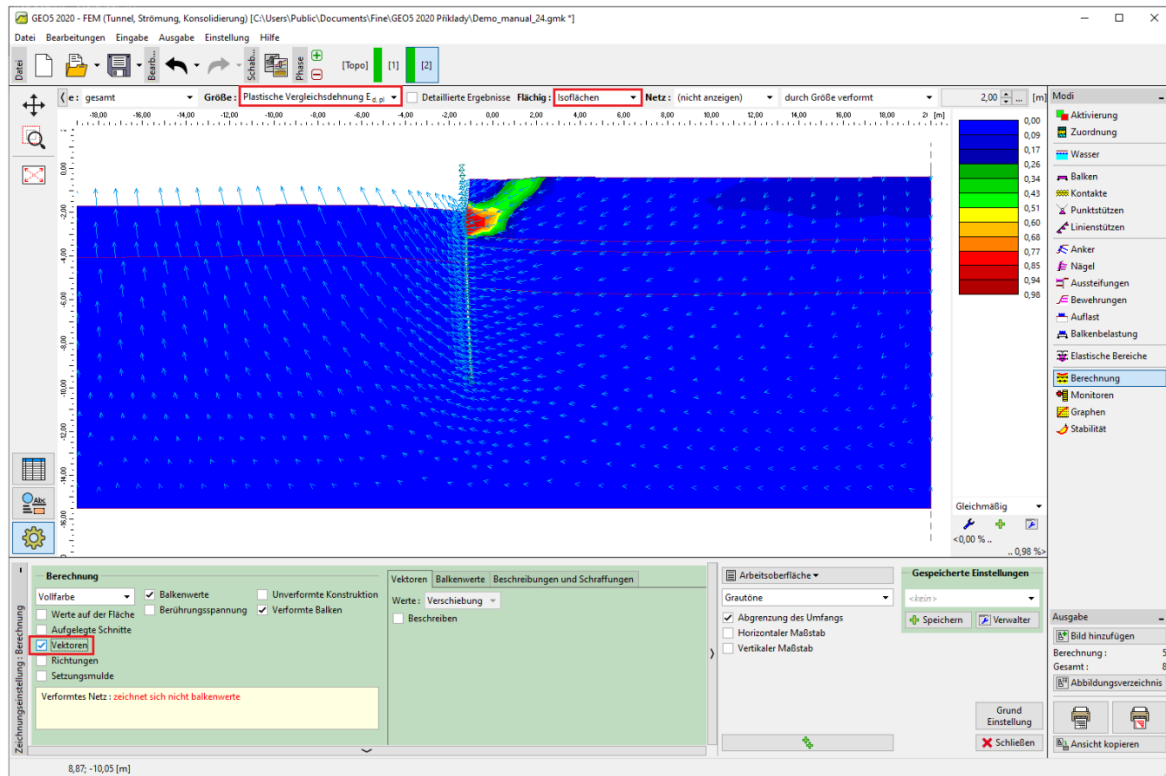


Fenster „Wasser“ – Bauphase 2 (Änderung des Verlaufs GWSp)

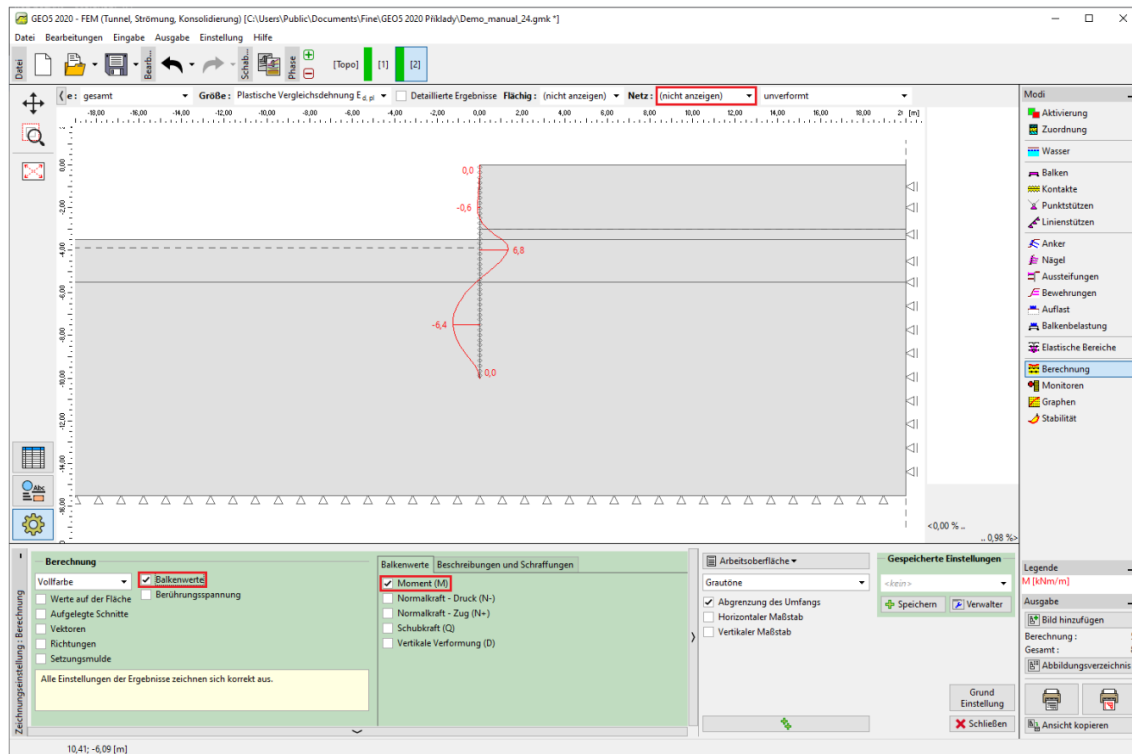
Wir werden nun die 2. Bauphase berechnen und die Ergebnisse für die Verläufe der inneren Kräfte entlang der Länge des Balkens, die äquivalente plastische Verformung und die verformte Konstruktion anschauen.



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (Setzung d_x – verformte Konstruktion)



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 2 (äquivalente plastische Verformung $E_{d,pl}$. Vektoren der Verschiebungen)



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

Bauphase 3: Einstellung der Anker

Wir fügen den Bauzustand 3 hinzu und drücken dann den Knopf "Hinzufügen" im Rahmen "Anker" und setzen im Dialogfenster "Neue Anker" einen Stahlanker mit der Vorspannkraft $F=185$ kN. Wir gehen davon aus, dass sich der Anker in einer Tiefe von 2,9 m unter der Geländeoberfläche befindet - wir setzen die Koordinaten des Ankerkopfes auf den Punkt $[0,0; -2,9]$.

Hinweis: Anker werden im Programm mit Hilfe eines elastischen Stabelements mit konstanter Normalsteifigkeit modelliert. Ein Versagen des Verankerungselements wird durch die Angabe der Maximalkraft kontrolliert. Der Anker wird an zwei Punkten - am Anfang und am Ende - im Boden befestigt. Entlang der Ankerlänge wird keine Wechselwirkung zwischen dem Boden und dem Bewehrungselement angenommen (für weitere Informationen siehe Hilfe - F1).

In dieser Aufgabe werden die folgenden Ankerparameter betrachtet:

Ankerlänge: $l=12$ m,

Ankerneigung: $\alpha=15^\circ$,

Ankerquerschnitt: $d=10$ mm,

Ankerabstand: $b=1$ m.

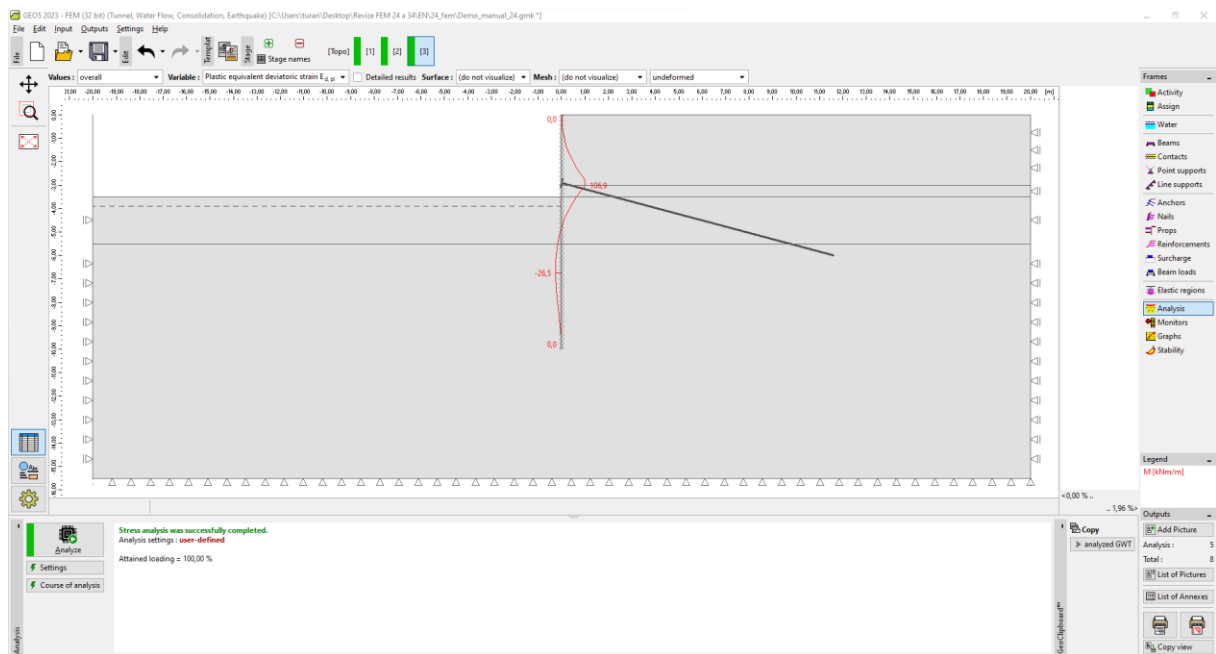
Hinweis: Die Ankersteifigkeit wird in der Analyse durch das Elastizitätsmodul, die Ankerquerschnittsfläche und den Ankerabstand definiert. Es ist zu beachten, dass bei der Verformung durch ebene Dehnung diskrete Anker durch eine 1 m breite Membran ersetzt werden. Weitere wichtige Eingangsdaten von Ankern sind die Vorspannkraft und die Ankerbruchkraft. In diesem speziellen Fall werden wir die Möglichkeit eines Bruchs des Bewehrungselements nicht in Betracht ziehen, daher werden wir die Bruchkraft F_c auf einen ausreichend hohen Wert setzen (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1).

Fenster "Neue Anker" - Bauphase 3

Hinweis: Der Anker verformt sich im Laufe der Berechnung. Infolge der Verformung des Ankers und des umgebenden Baugrunds kann die für den Anker eingestellte Vorspannkraft abfallen. Wenn wir also die konkrete Vorspannkraft erreichen wollen, ist es notwendig, im nächsten Schritt eine zusätzliche Spannung in den Anker einzuleiten oder eine ausreichend höhere Vorspannkraft einzustellen (die resultierende Kraft im Anker nach der Analyse ist im Diagramm am Ankerkopf unter der eingestellten Vorspannkraft angegeben). In den folgenden Bauphasen können die Parameter des Ankers nicht geändert werden; es ist nur möglich, eine zusätzliche Spannung zur Erreichung der neuen Vorspannkraft zu erzeugen oder den gesamten Anker aus der Konstruktion zu entfernen.

Die Einbettung des Ankers in die Bodenmasse sollte ausreichend starr sein (Befestigung an einem Element), damit es nicht zu einem unrealistischen Ausziehen des Ankers kommt, wenn sich in der Nähe der Ankerwurzel erhebliche plastische Verformungen entwickeln (Befestigung an einem Knoten, zu große Verfeinerung in der Umgebung der Wurzel), die zu einem unrealistischen Verlust der Vorspannkraft führen.

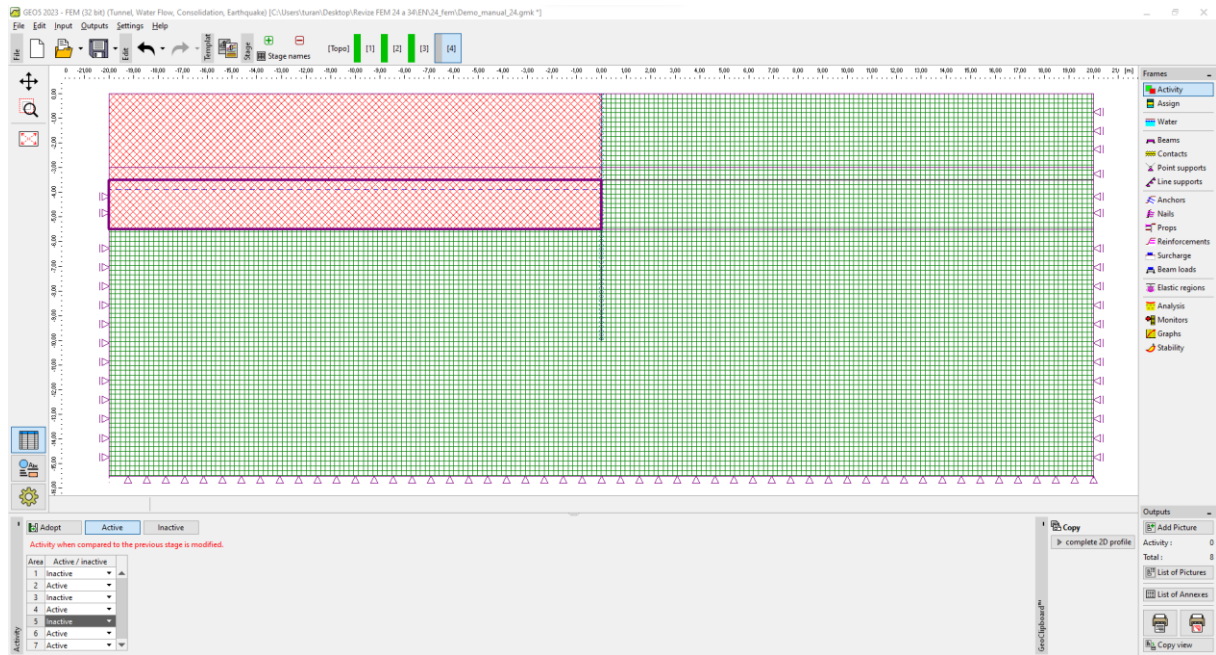
Im letzten Schritt der Festlegung der Bauphase 3 werden wir den Grundwasserspiegel gemäß dem untenstehenden Diagramm ändern. Die anderen Eingabeparameter bleiben unverändert.



Rahmen "Analyse" - Bauphase 3

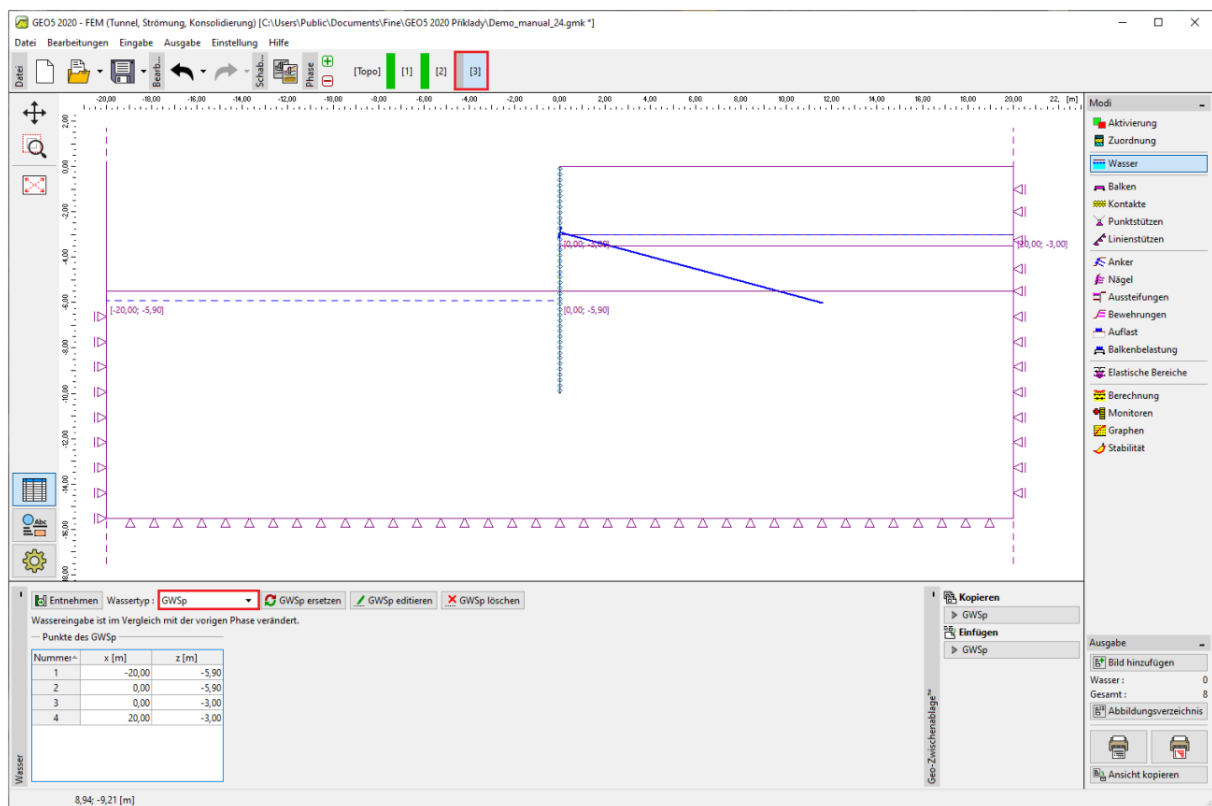
Bauphase 4: Aushub des restlichen Bodens

Wir fügen den Bauphase 4 hinzu und extrahieren den restlichen Boden. Zunächst markieren wir die angegebene Region mit dem Mauszeiger und klicken auf die Schaltfläche "Inaktiv".

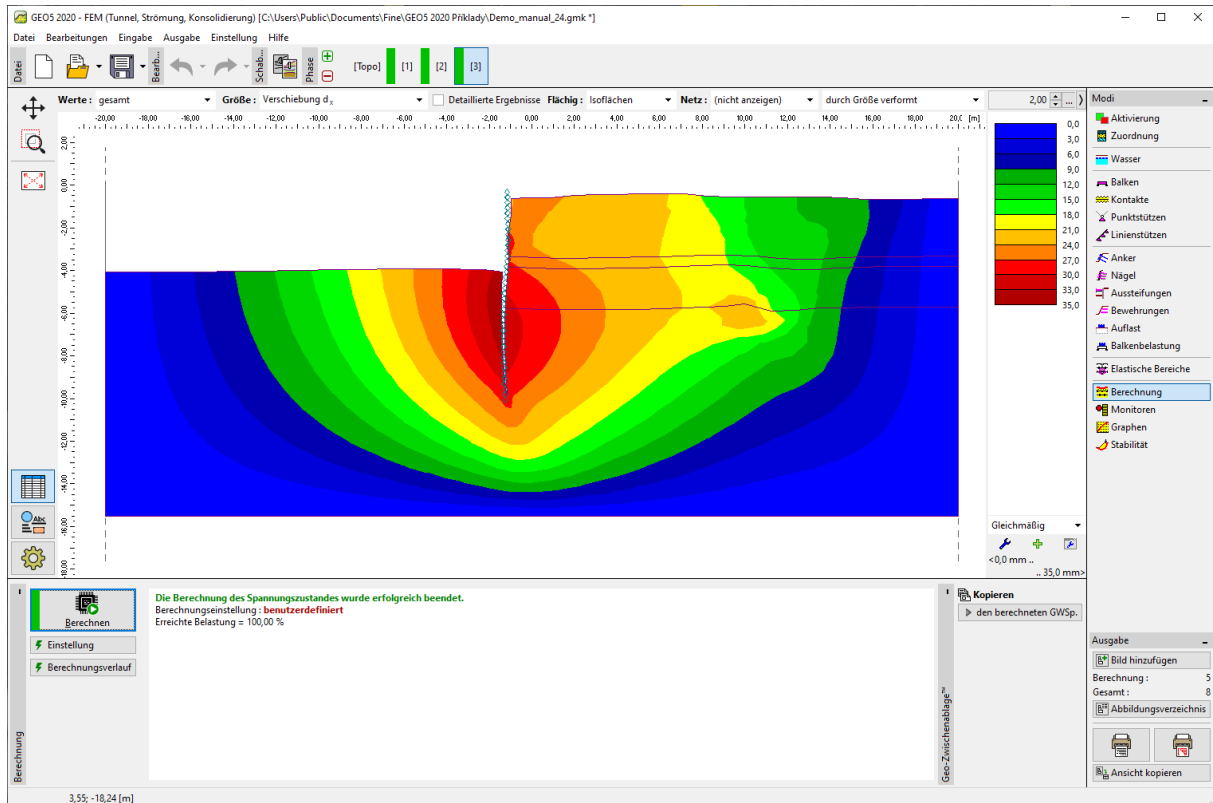


Rahmen "Aktivität" - Baustufe 4

Im letzten Schritt des Bauphase 4 ändern wir den Grundwasserspiegel gemäß dem untenstehenden Diagramm. Die anderen Eingabeparameter bleiben unverändert.

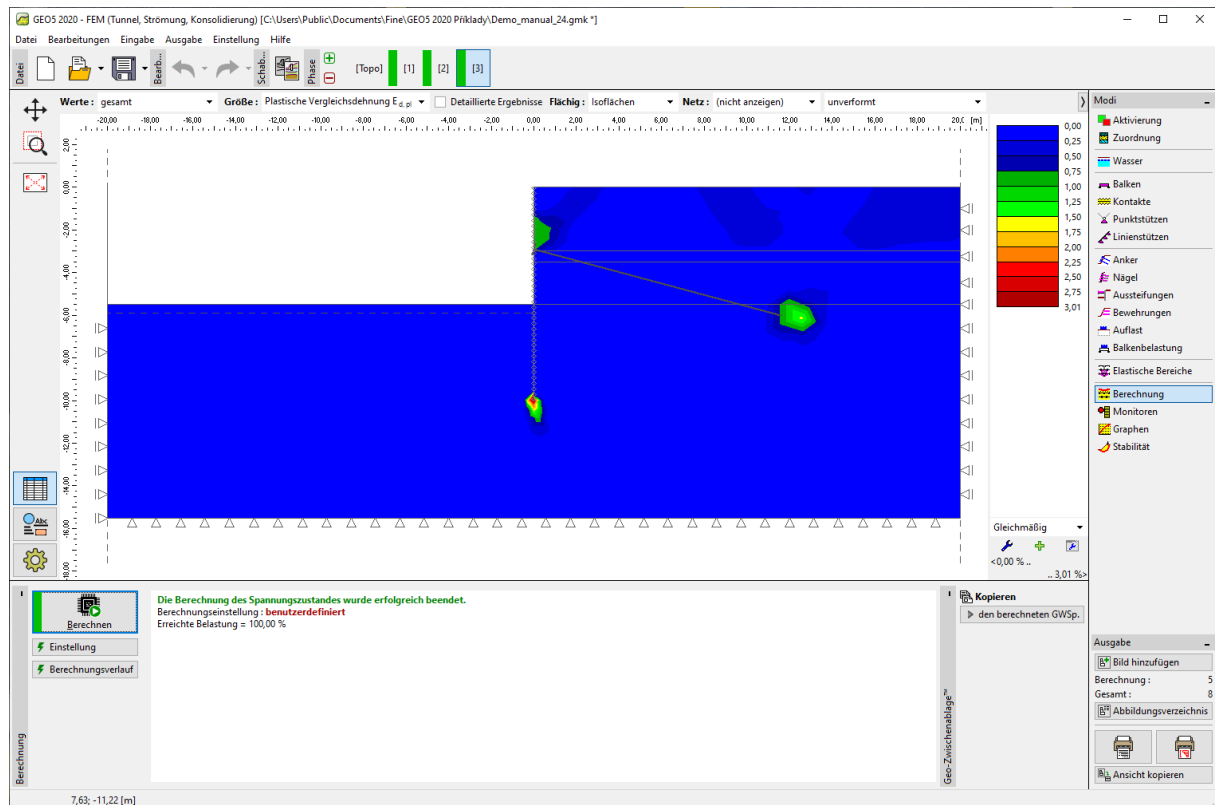


Fenster „Wasser“ – Bauphase 4 (Änderung des Verlaufs des GWSp)



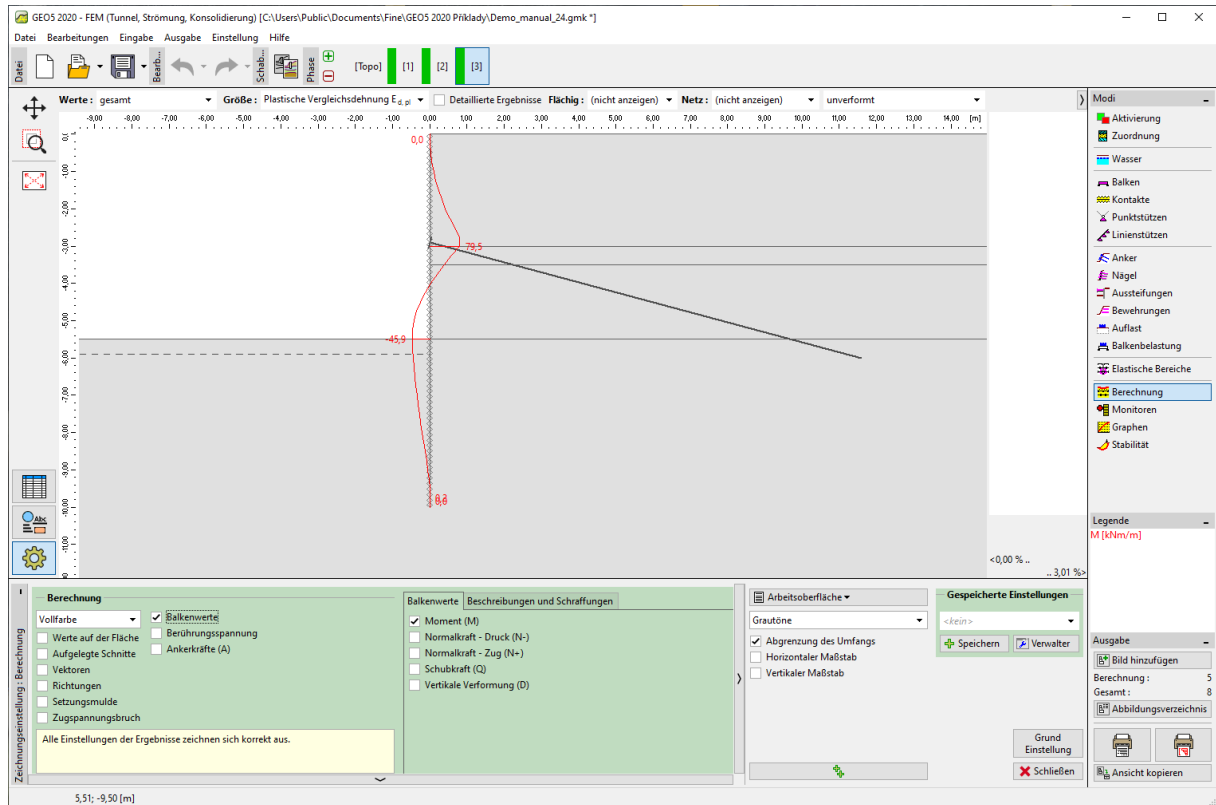
Fenster „Berechnung“ – Bauphase 4 (Setzung d_x – verformte Konstruktion)

Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die maximale seitliche Verformung in der Umgebung der Verbauwand aus Stahlspundbohlen 34 mm beträgt.



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 4 (äquivalente plastische Verformung $\varepsilon_{eq,pl.}$)

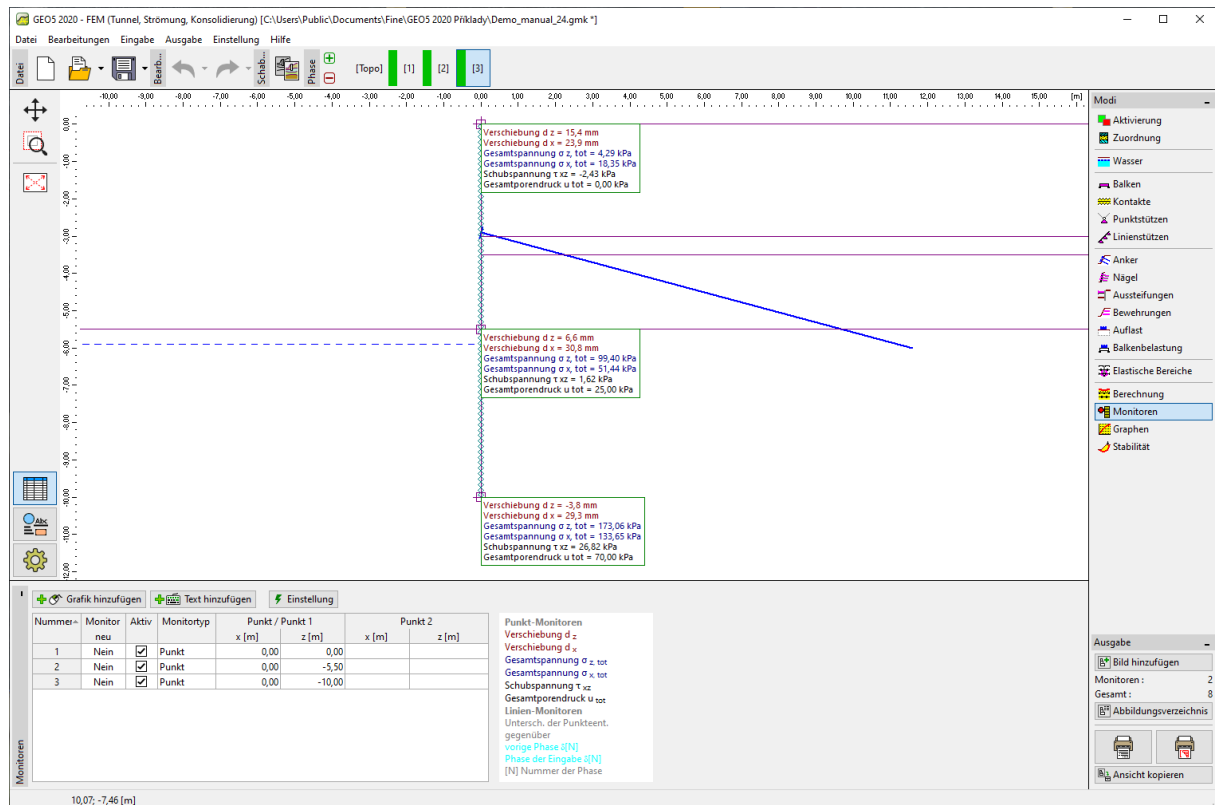
Aus den aufgezeichneten äquivalenten plastischen Dehnungen ist ersichtlich, dass sich die größten plastischen Dehnungen im Boden in der Nähe des Spundwandfußes entwickeln. In der zweiten Phase wurde der Boden in der Nähe der Verankerungsstelle plastisch verformt (weitere Einzelheiten finden Sie unter Hilfe - F1).



Fenster „Berechnung“ – Bauphase 4 (Verlauf der Biegemomente M)

Aus dem Bild des Verlaufs der Biegemomente entlang der Länge der Verbauwand ermitteln wir die lokalen Extreme und notieren sie in der Tabelle, die im vorletzten Teil dieses Kapitels angegeben ist.

Wir werden uns nun die Ergebnisse für die Monitore anschauen und Verformungen im Kopf der Verbauwand feststellen.



Fenster „Monitoren“ – Bauphase 4 (Punkt-Monitoren)

Auswertung der Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt die Extremwerte der inneren Kräfte auf und entlang der Länge der Verbauwand für die Bauphasen 2 und 3. Es handelt sich um die Werte der Biegemomente. Wir haben diese Berechnung zuerst für das modifizierte Mohr-Coulomb-Materialmodell mit lokalen Linienverfeinerungen durchgeführt. Dann haben wir diese Ergebnisse mit dem Programm GEO 5 - Verbauwand verglichen.

Materialmodell / Programm	Phase 2 $M \text{ [kNm/m]}$	Phase 3 – Feld $M \text{ [kNm/m]}$	Phase 3 – Anker $M \text{ [kNm/m]}$
MCM (modifizierter M-C)	9,60	-49	104,4
Verbauwand * (analytische Lösung)	29,16	- 28,91	110,57

Zusammenfassung der Ergebnisse - Biegemomente entlang der Länge der Verbauwand

*Hinweis *: Für die analytische Lösung haben wir die Berechnung des Moduls der horizontalen Reaktion des Untergrunds nach Schmitt betrachtet (weitere Informationen finden Sie unter Hilfe - F1). Wir haben zusätzliche Bodenparameter wie folgt definiert:*

- **Klasse S4, mittel verdichtet:** *Berechnung des Ruhedrucks - nichtbindiger Boden, Reibungswinkel zwischen Konstruktion und Boden*
 $\delta = 17^\circ$;
Verformungsmodul des Bodens $E_{def} = 10 \text{ MPa}$.

- **Klasse F6, starre Konsistenz:** *Ruhedruck – bindiger Boden ($\nu = 0,4$), Reibungswinkel zwischen Konstruktion und Boden*
 $\delta = 14^\circ$;
Verformungsmodul des Bodens $E_{def} = 4,5 \text{ MPa}$.

Wir betrachteten die Analyseeinstellung als "Standard - Grenzzustände". Die Analyse der Erddrücke wurde ohne Reduzierung der Bodenparameter durchgeführt. Ferner haben wir den Wert des Mindestdrucks für die Bemessung nicht berücksichtigt (für weitere Einzelheiten siehe Hilfe - F1).

Schlussfolgerung

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

- Die lokale Verfeinerung des FE-Netzes in der Umgebung der Verbauwand führt zu einer genaueren Feststellung der Ergebnisse der inneren Kräfte.
- Für die Analyse von Verbauwänden ist es notwendig, Kontaktelemente und nichtlineare Materialmodelle zu verwenden, die die Entwicklung plastischer Verformungen ermöglichen ein wahrhaftiges Bild des realen Verhaltens von Konstruktionen in der umgebenden Bodenmasse liefern.
- Die maximal äquivalenten plastischen Verformungen $E_{d,pl}$ drücken die Stellen aus, an denen der Boden plastifiziert ist und stellen einen potenziellen Versagensbereich dar (als Folge des Überschreitens der der Plastizitätsbedingung des Materials).