

## Numerické řešení pažící konstrukce

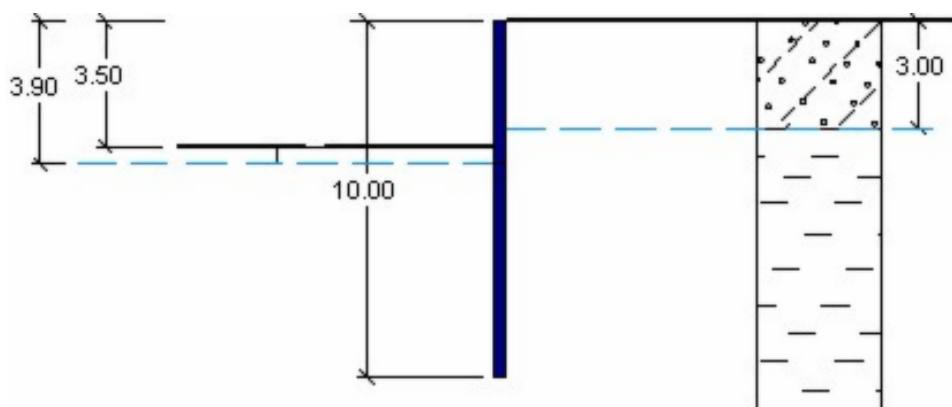
Program: MKP

Soubor: Demo\_manual\_24.gmk

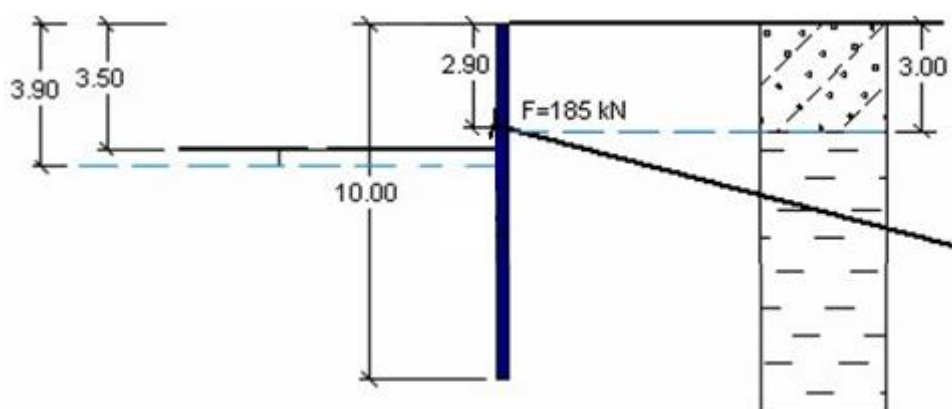
Cílem tohoto manuálu je vypočítat deformace kotvené stěny z ocelových štětovnic a dále zjistit průběhy vnitřních sil pomocí metody konečných prvků.

### Zadání úlohy

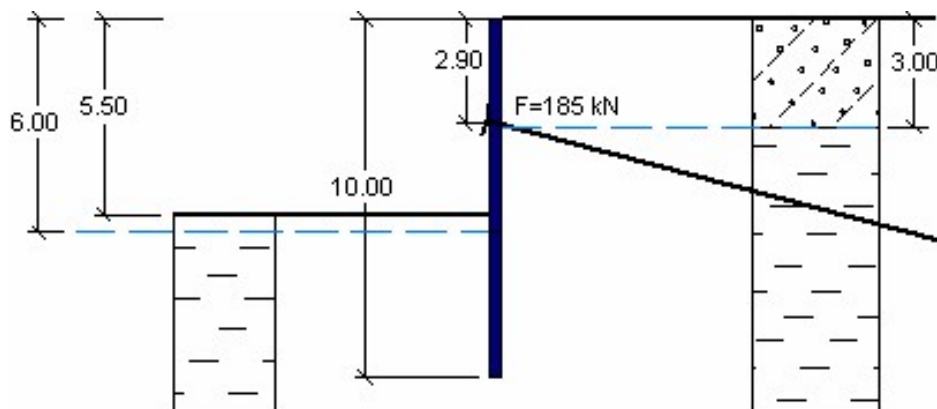
Určete namáhání (deformace) kotvené opěrné stěny z ocelových štětovnic VL 503 ( $500 \times 340 \times 9,7 \text{ mm}$ ), schéma konstrukce pro jednotlivé fáze budování je patrné z následujících obrázků. Stanovte vnitřní síly, které působí po délce kotvené stěny. Štětovnicová stěna je provedena z oceli EN 10 025 : Fe 360. Délka pažící konstrukce je 10 m.



2. fáze budování – odtěžení zeminy do hloubky 3,5 m



3. fáze budování – přidání kotvy



4. fáze budování – odtěžení zeminy do hloubky 5,5 m

Geologický profil se skládá ze dvou zemín, které mají následující parametry:

- 0,0 až 3,0 m: Písek hlinitý (třída S4, středně ulehlý),
- od 3,0 m: Jíl s nízkou či střední plasticitou (třída F6, konzistence tuhá).

Parametry zemín / Klasifikace (zatřídění)	Třída S4	Třída F6
Objemová tíha zeminy: $\gamma$ [ $kN/m^3$ ]	18	21
Modul pružnosti: $E$ [ $MPa$ ]	10	4,5
Modul pružnosti: $E_{ur}$ [ $MPa$ ]	20	13
Poissonovo číslo: $\nu$ [–]	0,3	0,4
Soudržnost zeminy: $c_{ef}$ [ $kPa$ ]	5	12
Úhel vnitřního tření: $\phi_{ef}$ [°]	29	19
Úhel dilatance: $\psi$ [°]	0	0
Objemová tíha saturované zeminy: $\gamma_{sat}$ [ $kN/m^3$ ]	20	23

Tabulka s parametry zemín – kotvená stěna z ocelových štětovnic

## Řešení

K výpočtu této úlohy použijeme program GEO 5 – MKP. V následujícím textu postupně popíšeme řešení příkladu po jednotlivých krocích:

- Topologie: nastavení a modelování úlohy (rozhraní, kontakty, zahuštění linií)
- Fáze budování 1: primární geostatická napjatost, zadání bodových monitorů
- Fáze budování 2: aktivace oblastí, zadání nosníků, výpočet deformací, vnitřní síly
- Fáze budování 3: zadání kotev
- Fáze budování 4: odtěžení zeminy, výsledky výpočtu + monitory.
- Vyhodnocení výsledků: porovnání, závěr.

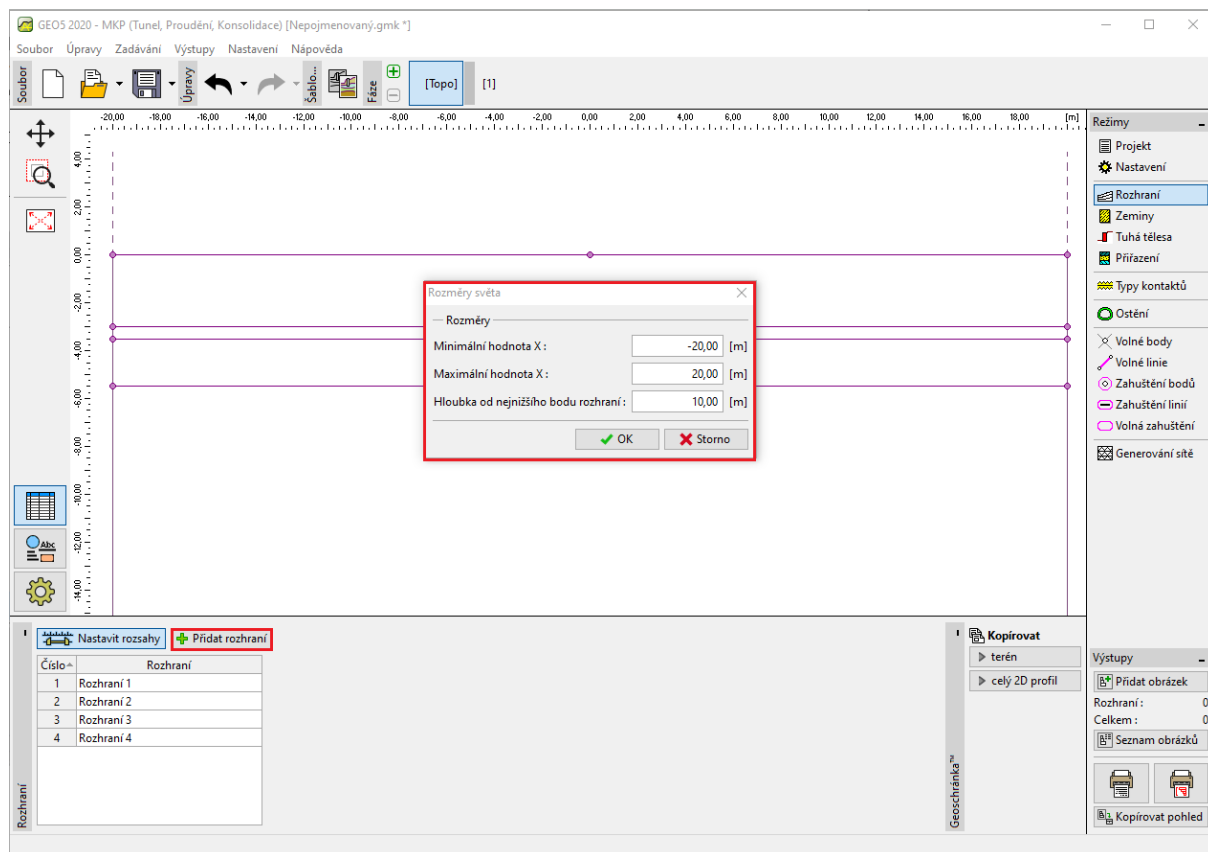
### Topologie: zadání úlohy

V rámu „Nastavení“ ponecháme způsob výpočtu 1. fáze budování jako geostatickou napjatost. Typ výpočtu budeme uvažovat jako *rovinnou napjatost*, resp. deformaci.

Charakteristiky úlohy	Výpočtové normy	Rozšířené možnosti programu
Geometrie úlohy : <span>Rovinná</span>	Betonové konstrukce : <span>EN 1992-1-1 (EC2)</span>	<input type="checkbox"/> Podrobné parametry generování sítě
Typ výpočtu : <span>Napjatost</span>	Výpočet primární napjatosti (1. fáze)	<input type="checkbox"/> Podrobné parametry zemin
<input type="checkbox"/> Tunely	Způsob výpočtu : <span>Geostatická napjatost</span>	<input type="checkbox"/> Speciální modely zemin
<input type="checkbox"/> Umožnit zadat vodu pomocí výpočtu ustáleného proudění		<input type="checkbox"/> Podrobné výsledky
<input type="checkbox"/> Umožnit dynamický výpočet zemětřesení		

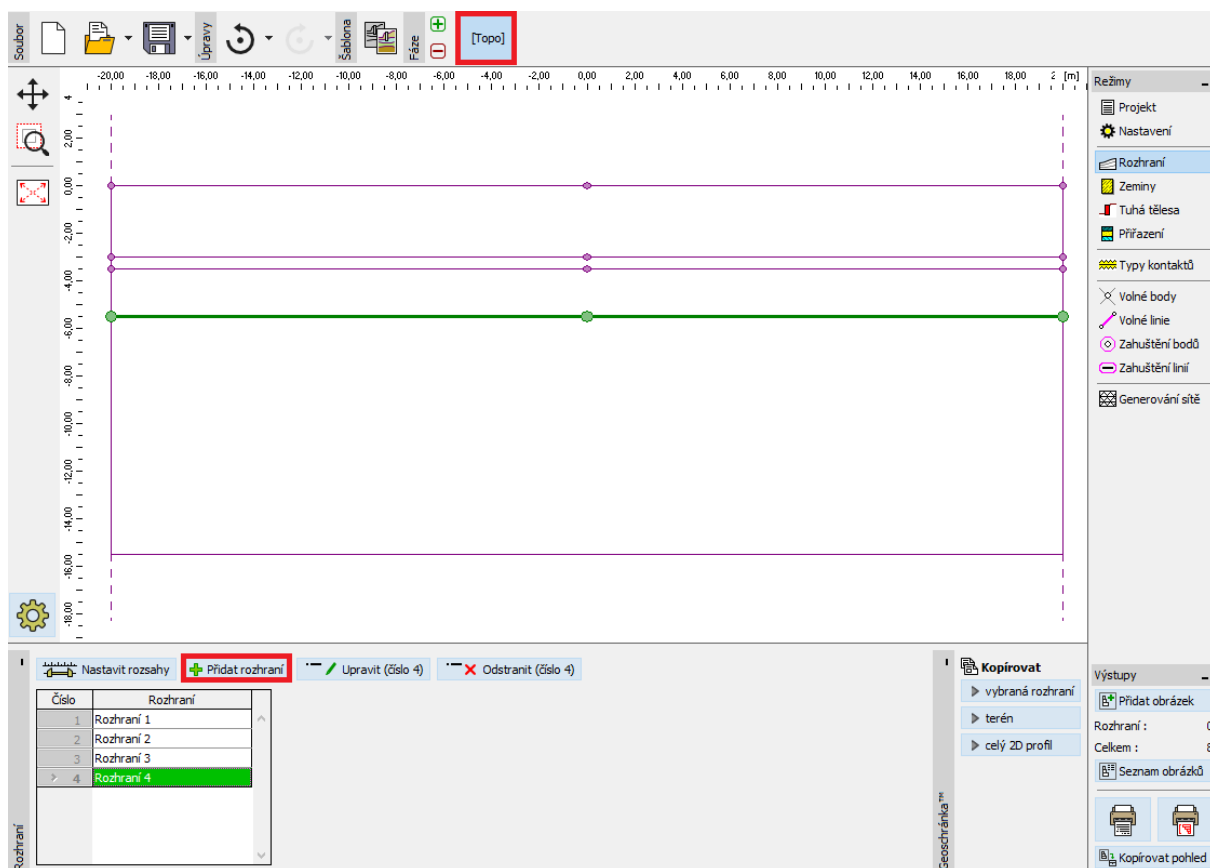
### Rám „Nastavení“

Dále zadáme rozměry světa, které zvolíme dostatečně velké, aby výsledky nebyly ovlivněny podmínkami na okraji. Pro naši úlohu zvolíme rozměry modelu  $\{-20\text{ m}; 20\text{ m}\}$ , hloubku od nejnižšího bodu rozhraní zadáme 10 m.



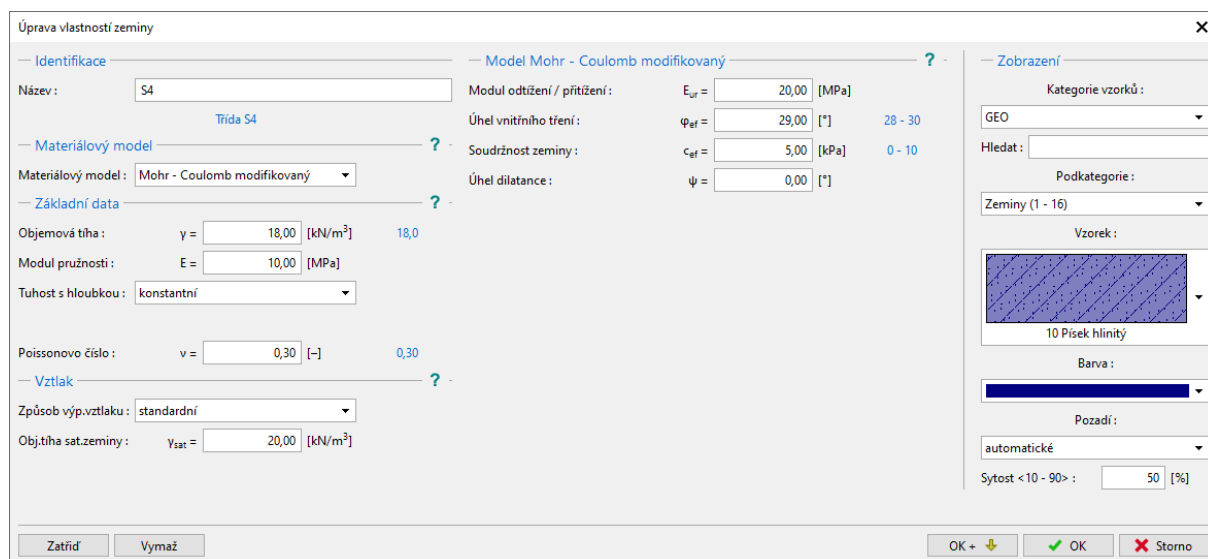
Dialogové okno „Rozměry světa“

Při výpočtech pažicích konstrukcí je nutné definovat hloubky, do kterých bude provedeno odtěžení zeminy v jednotlivých fázích budování jako rozhraní zemin. V tomto případě tedy zadáme úroveň terénu o kótě 0,0 m a vodorovná rozhraní o výškových kótách – 3,0 m, – 3,5 m a – 5,5 m). Bod o souřadnicích [0,0; 0,0] tvoří vrchol pažicí stěny.

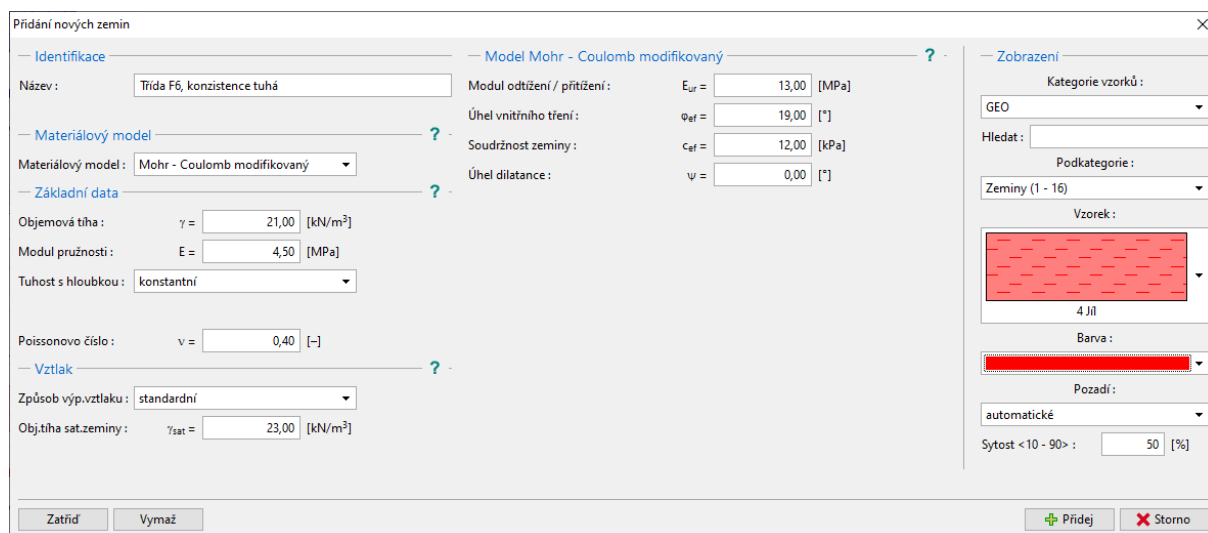


Rám „Rozhraní“

Nyní zadáme příslušné parametry zeminy a následně přiřadíme zeminu do vzniklé oblasti. Pro tuto úlohu zvolíme modifikovaný Mohr-Coulombův model (viz *poznámka*).



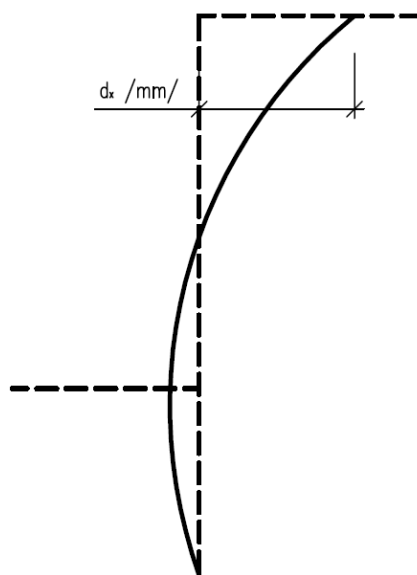
Dialogové okno „Přidání nových zemin“



Dialogové okno „Přidání nových zemin“

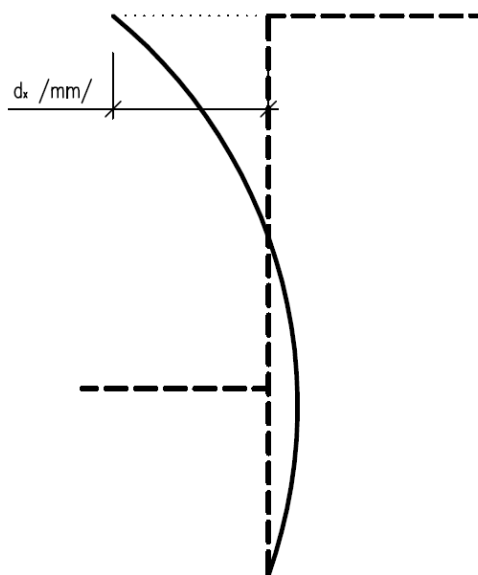
*Poznámka: Při výpočtu pažících konstrukcí je nutné zavést kontaktní prvky mezi zeminou a nosníkem. Řešení úloh bez kontaktních prvků vede k naprosto nerealným výsledkům (více viz Help – F1).*

Řešení bez kontaktů



deformace pažení do zeminy  
(chybně)

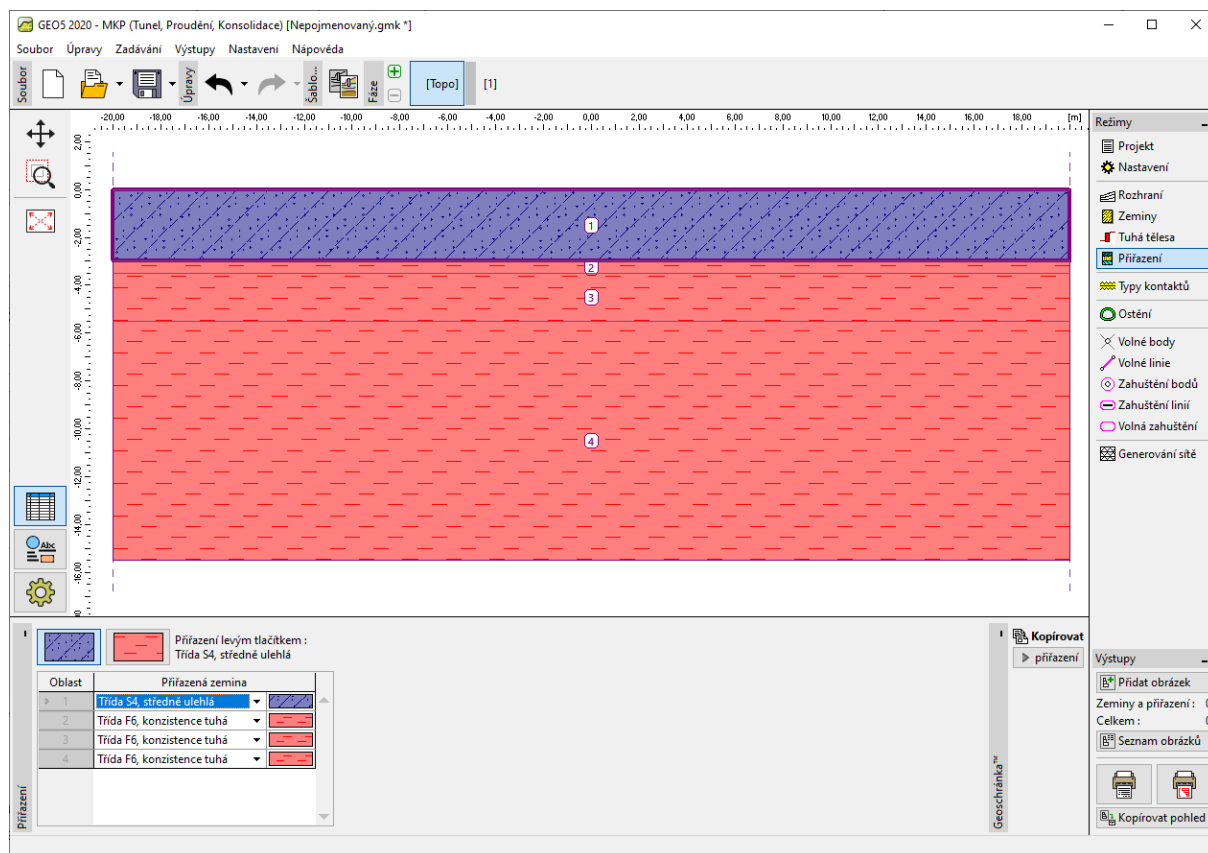
Řešení s kontaktními prvky



deformace pažení od zeminy  
(správně)

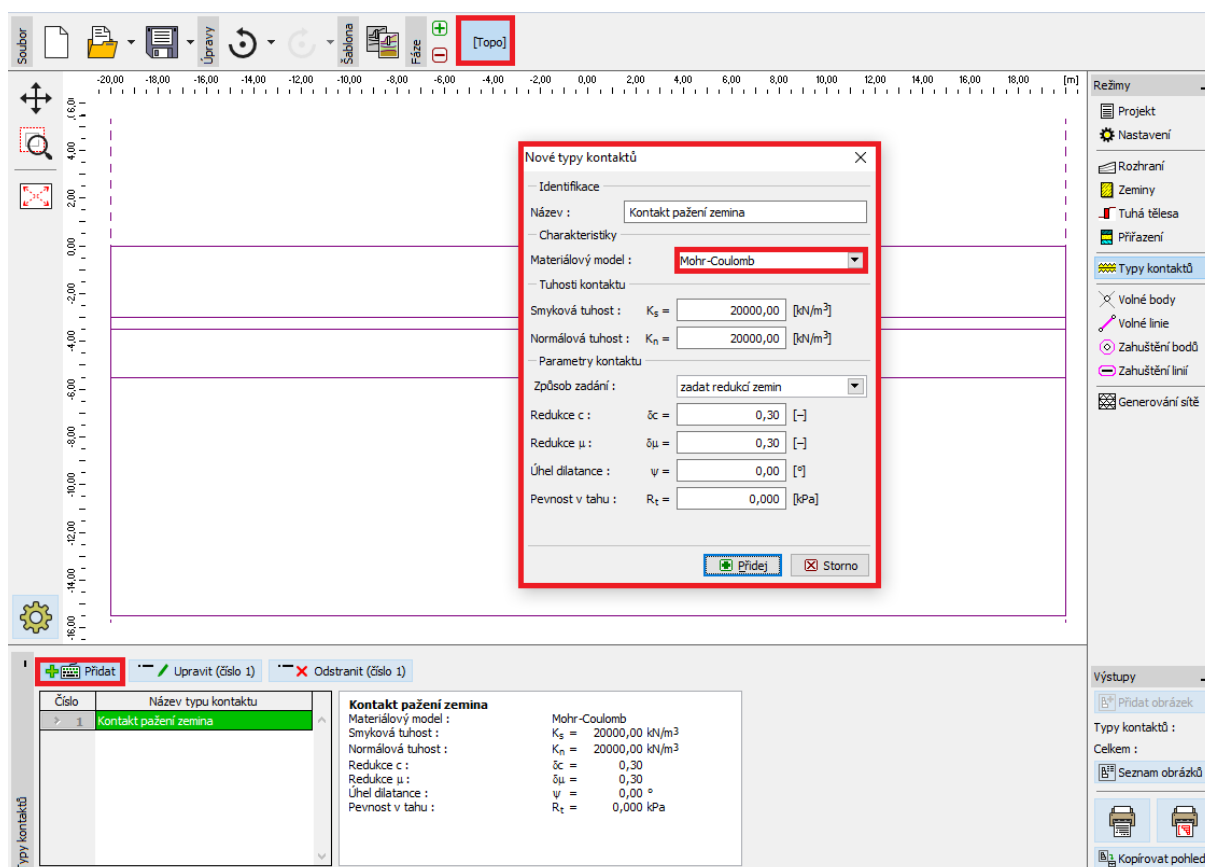
*Použití kontaktních prvků*

Na následujícím obrázku je zobrazeno přiřazení zemin do geologického profilu.



Rám „Přiřazení“

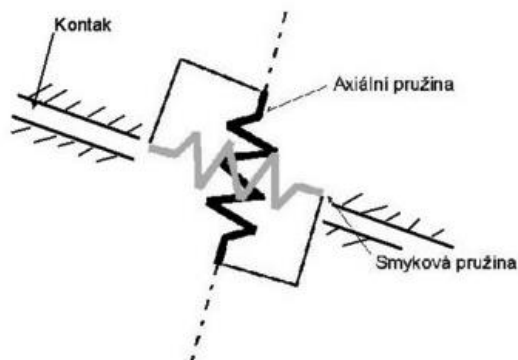
Dalším krokem je zadání parametrů kontaktu (pomocí tlačítka „Přidat“). Na nosníkové prvky je při výpočtech pažení vždy nutné definovat kontakt s nelineárním materiálovým modelem. V tomto případě vybereme možnost „Mohr-Coulomb“, abychom získali reálné výsledky. Redukci parametrů zemin na kontaktu předpokládáme jako  $\delta c = \delta \mu = 0,3$  a tuhosti kontaktu ponecháme se standardními hodnotami jako  $K_s = K_n = 20\,000\text{ kN/m}^3$ .



Dialogové okno „Nové typy kontaktů“

*Poznámka: Kontaktní prvky se používají při výpočtech, kde je nutno zohlednit vzájemné působení konstrukce a okolního prostředí – rozhraní dvou zcela odlišných materiálů (zemina – pažení). Typickým příkladem použití kontaktních prvků je modelování pažicích konstrukcí, opěrných zdí či tunelových ostění, kde kontaktním prvkem simulujeme tenkou oblast zeminy či horniny, ve které dochází k intenzivnímu namáhání převážně smykem. Kontakty lze zadávat i samostatně mezi jednotlivými rozhraními zemin. Kontaktní prvek je element s nulovou tloušťkou vyjadřující vztah mezi kontaktními napětími a relativní změnou posunu podél kontaktu (více viz Help – F1).*

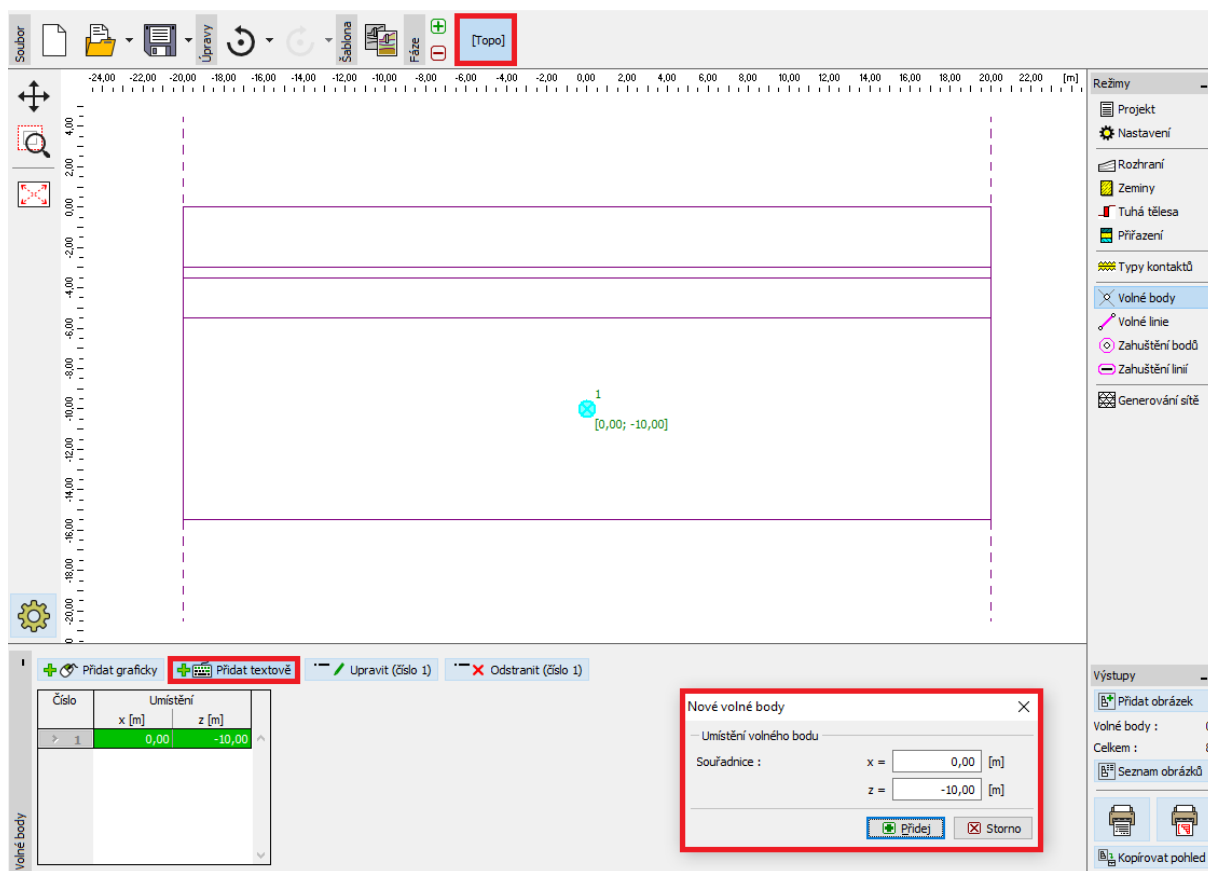




*Schematické znázornění tuhosti kontaktního prvku*

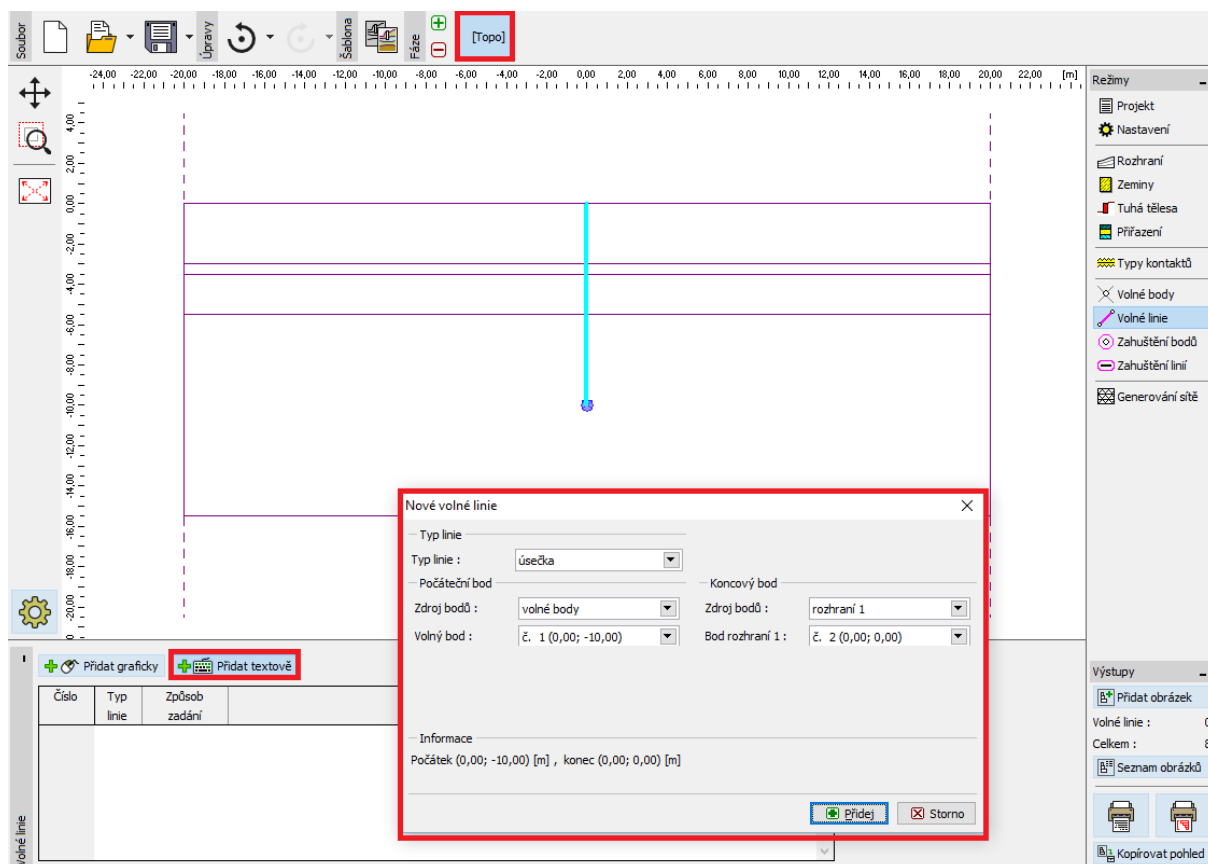
*Poznámka: Přestože v případě zcela plastického chování kontaktu není volba parametru  $K_s$  významná, je velikost této veličiny rozhodující pro úspěšné řešení uvažovaného nelineárního problému. Příliš vysoké hodnoty tuhostí (nad 100 000 kN/m<sup>3</sup>) mohou vést k oscilaci numerického řešení. Naopak příliš nízké hodnoty parametrů  $K_s$  a  $K_n$  (pod 10 000 kN/m<sup>3</sup>) vedou k nereálným deformacím konstrukcí. Vlastní hodnoty kontaktních napětí však nejsou volbou tuhostí  $K_s$  a  $K_n$  zásadně ovlivněny (více viz Help – F1).*

Následně v rámci „Volné body“ a „Volné linie“ zadáme geometrii pažící konstrukce. Princip zadávání volných bodů a linií byl podrobněji popsán v předchozí kapitole 23. *Namáhání ostění kolektoru*.



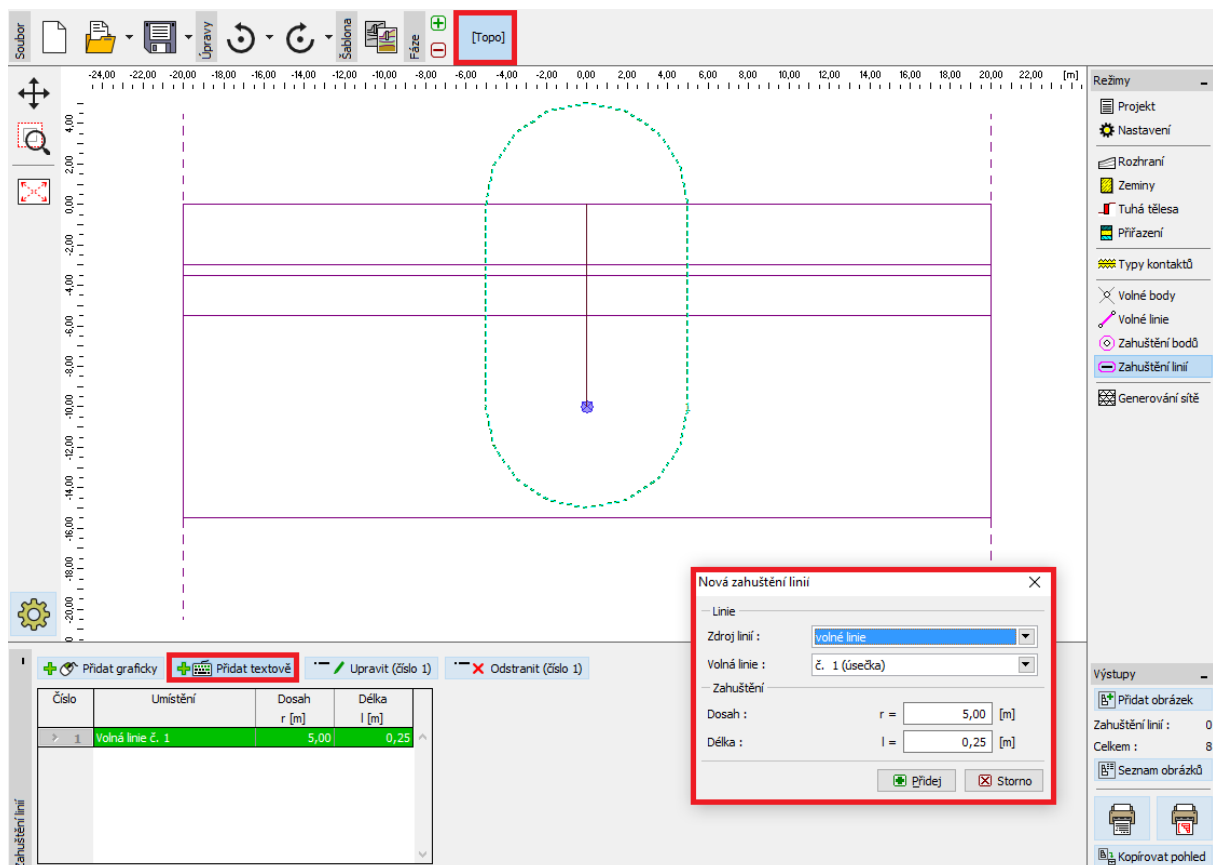
Dialogové okno „Nové volné body“

Nejprve zadáme nový volný bod o souřadnicích  $[0,0; -10,0]$ . Volná linie tvořící pažící stěny vznikne spojením tohoto bodu s bodem rozhraní terénu (více viz Help – F1).



Dialogové okno „Nové volné linie“

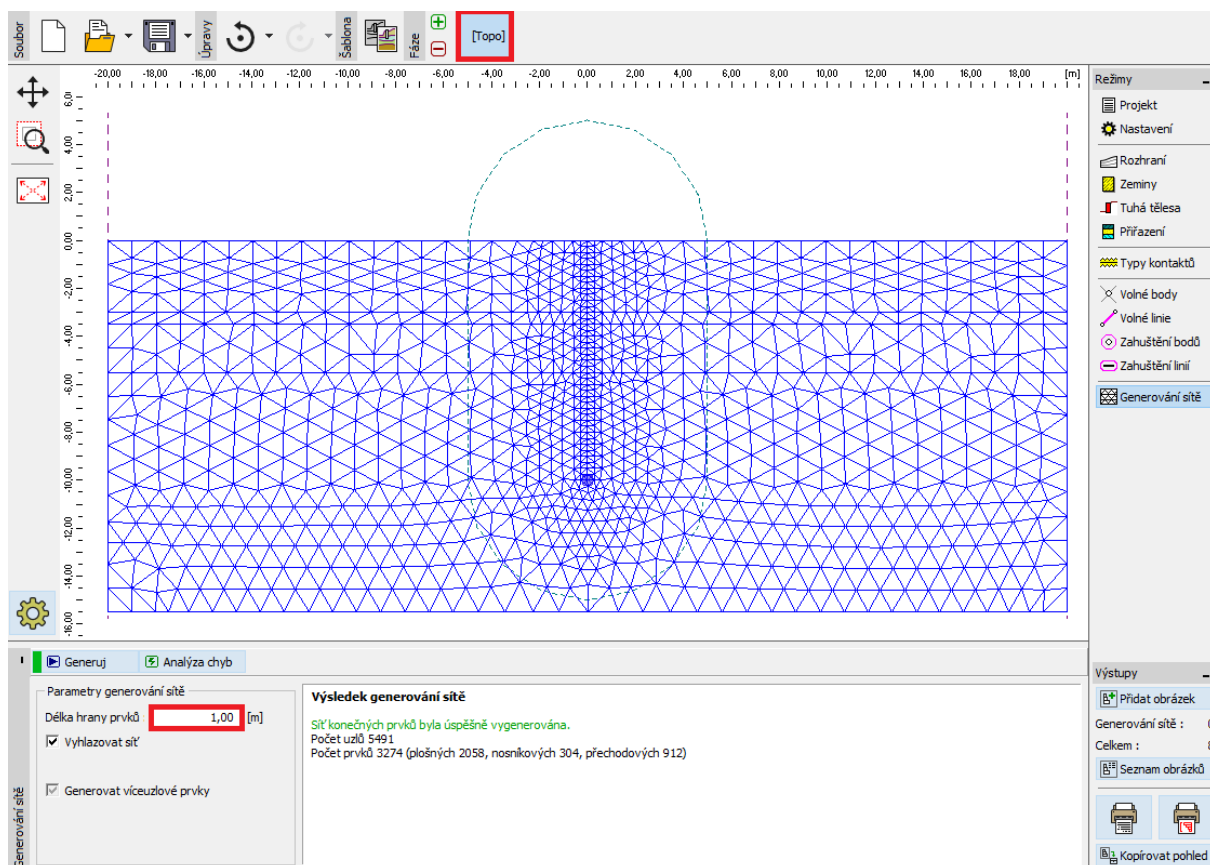
Posledním krokem při zadávání topologie je vygenerování sítě konečných prvků. V okolí pažící stěny je vhodné definovat zahuštění sítě KP. V rámu „Zahuštění linií“ zvolíme příslušný dosah o poloměru  $r = 5,0 \text{ m}$  a délku hrany prvků  $l = 0,25 \text{ m}$ .



Dialogové okno „Nová zahuštění linií“

Poté přejdeme do rámu „Generování sítě“ a vygenerujeme síť s délkou hrany prvků 1,0 m (pomocí tlačítka „Generuj“). Program automaticky vyhladí zahuštěnou síť KP.

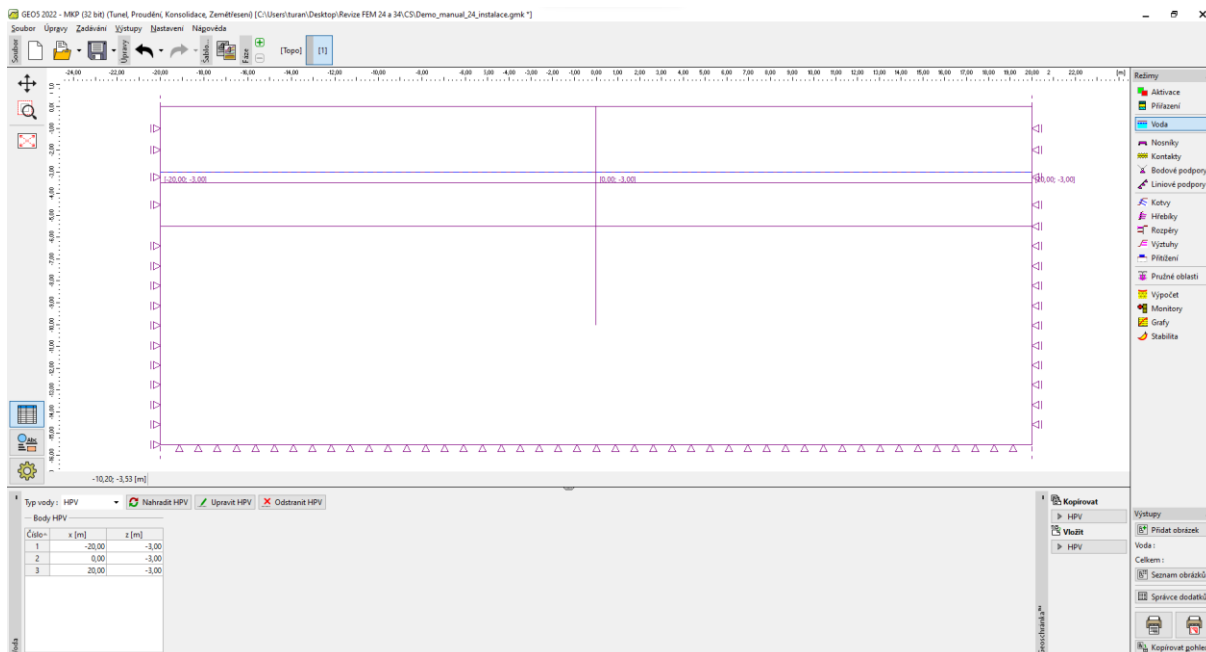
*Poznámka: Následně provedeme vizuální kontrolu, zda je hustota sítě konečných prvků vzhledem k rozsahu a složitosti dané úlohy přiměřená (více viz Help – F1). Podobně jako snížení smykové tuhosti, tak i zahuštění sítě přispívá ke stabilizaci nelineárního výpočtu.*



Rám „Generování sítě“ – délka hrany prvků 1,0 m (s lokálním zahuštěním sítě v okolí stěny)

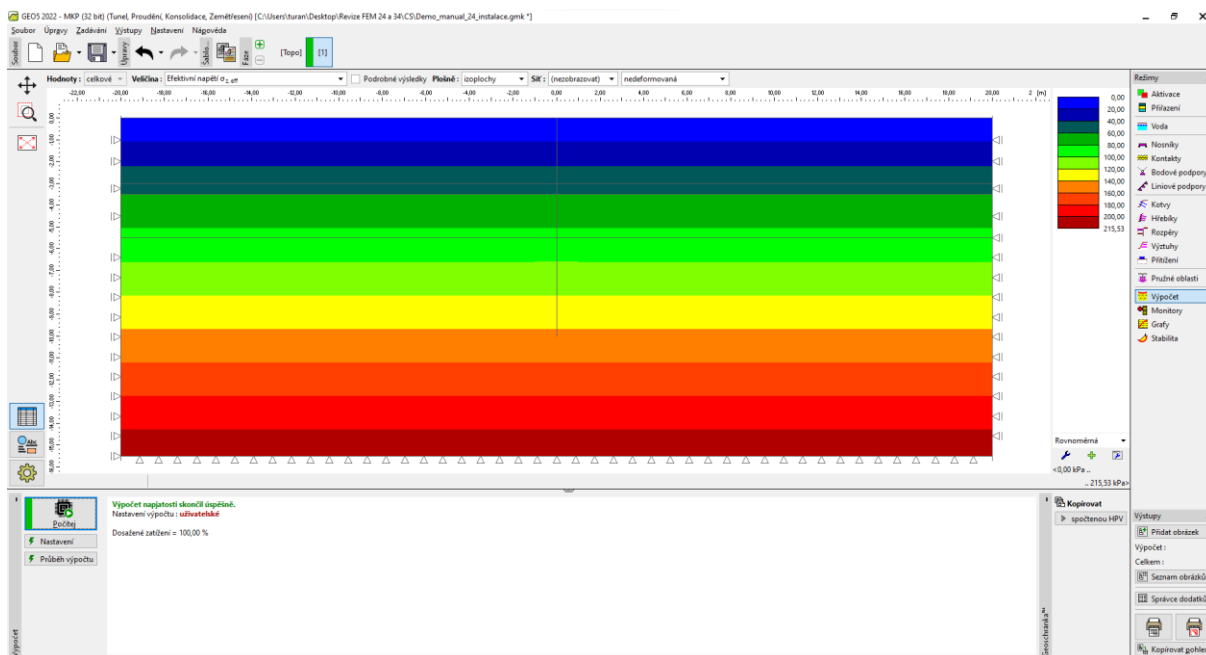
## Fáze budování 1: primární geostatická napjatost

Po vygenerování sítě přejdeme do 1. fáze budování a v rámu „Voda“ zadáme hladinu podzemní vody (dále jen HPV) v hloubce 3,0 m pod úrovní terénu (viz *obrázek*).



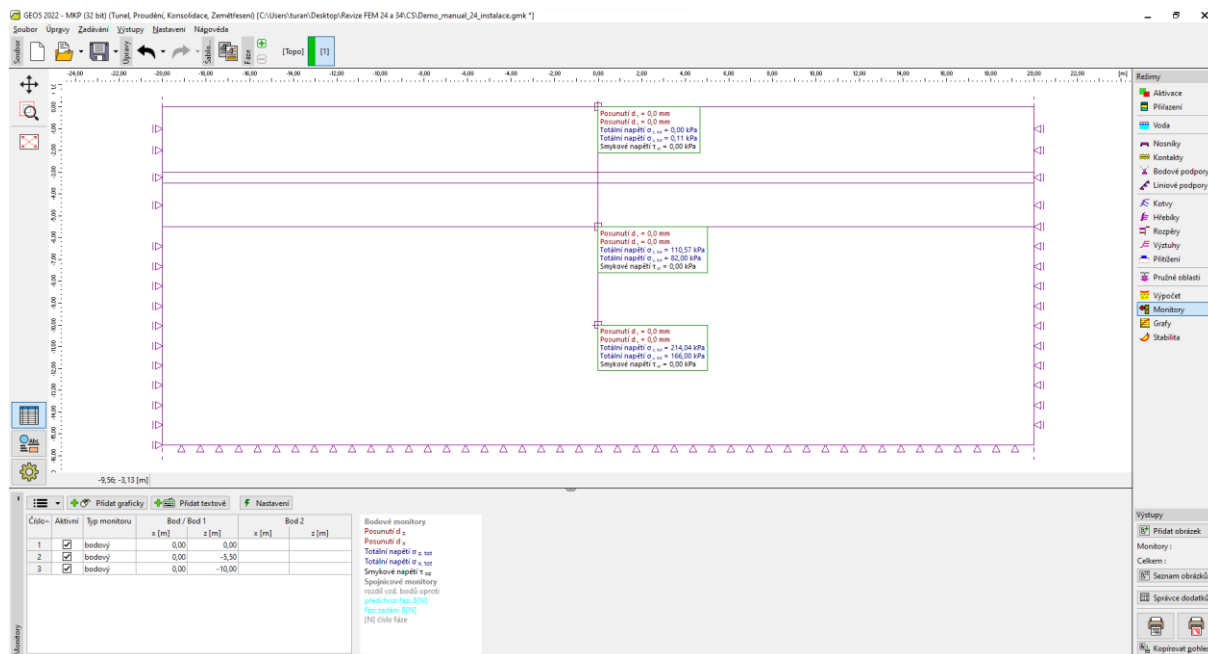
*Rám „Voda“ – Fáze budování 1 (průběh HPV v hloubce 3,0 m)*

Provedeme výpočet primární geostatické napjatosti. Nastavení výpočtu ponecháme jako „Standardní“ (více viz Help – F1).



*Rám „Výpočet“ – Fáze budování 1 (Svislé geostatické napětí  $\sigma_{z,ef}$ )*

Pro sledování hodnot určitých veličin (v průběhu výpočtu jednotlivých fází budování) v programu definujeme tzv. *bodové monitory* (pomocí tlačítka „Přidat“). Sledovaná místa zvolíme v bodech, které budou představovat hlavu a patu modelované pažící stěny, tj.  $[0,0; 0,0]$  a  $[0,0; -10,0]$  a dále v oblasti odtěžení zeminy na dně stavební jámy  $[0,0; -5,5]$ .

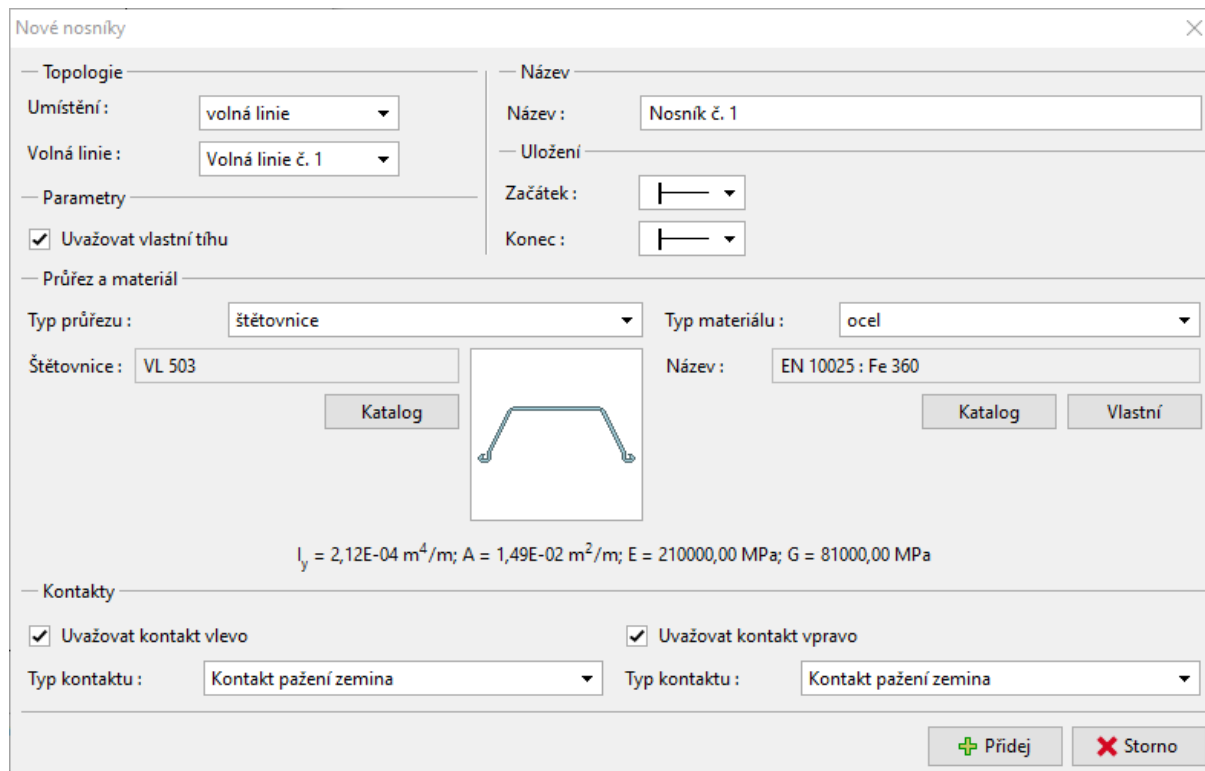


Rám „Monitory“ – Fáze budování 1 (Bodové monitory)

*Poznámka: Jednotlivé hodnoty veličin, které chceme zobrazovat ve výsledcích, upravíme podle tlačítka „Nastavení“ (v pravé dolní části obrazovky). Pro výpočty pažících konstrukcí nás nejvíce zajímá změna geostatického napětí a dále velikost svislé, resp. boční deformace.*

## Fáze budování 2: modelování nosíkových prvků

V této fázi budování nejprve přejdeme do rámu „Nosníky“ a namodelujeme pažící stěnu z ocelových štetovnic. Definujeme následující parametry – umístění nosníku, materiál a třídu oceli, typ průřezu (VL 503), uložení konců nosníku a kontakty (více viz Help – F1).



Nové nosníky

— Topologie

Umístění : volná linie

Volná linie : Volná linie č. 1

— Parametry

☒ Uvažovat vlastní tíhu

— Průřez a materiál

Typ průřezu : štetovnice

Štetovnice : VL 503

Katalog

Typ materiálu : ocel

Název : EN 10025 : Fe 360

Katalog Vlastní

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

— Kontakty

☒ Uvažovat kontakt vlevo

Typ kontaktu : Kontakt pažení zemina

☒ Uvažovat kontakt vpravo

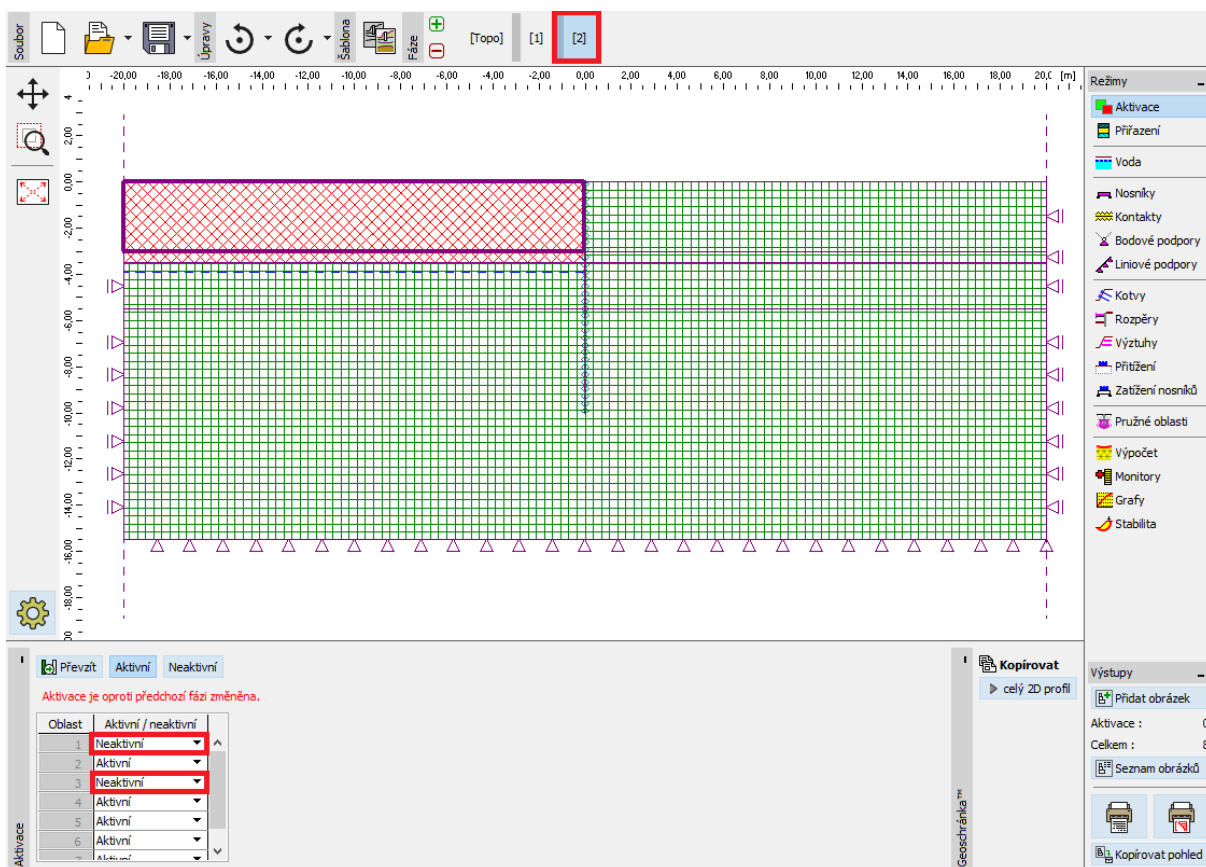
Typ kontaktu : Kontakt pažení zemina

+ Přidej X Storno

Dialogové okno „Nové nosníky“ – Fáze budování 2



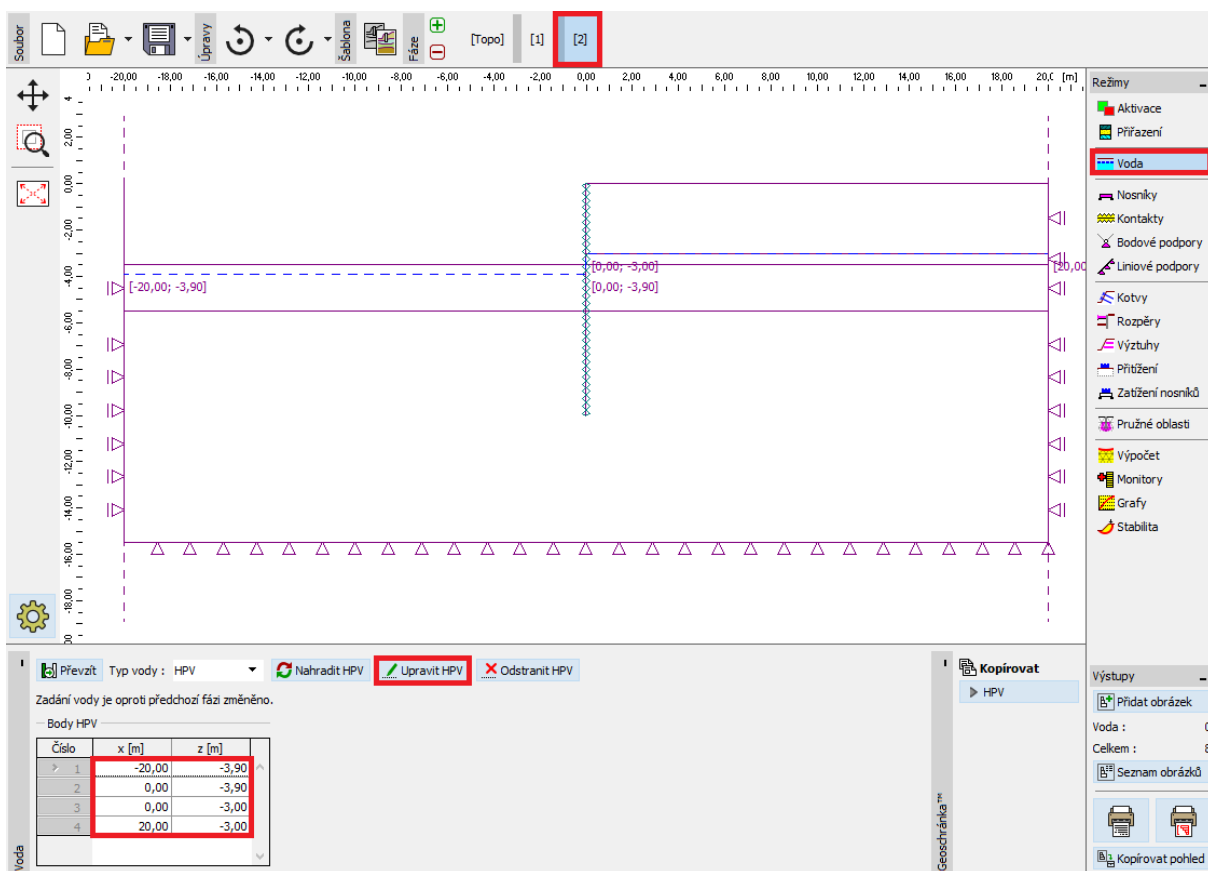
Poté v rámu „Aktivace“ nejprve namodelujeme odtěžení zeminy – dané oblasti v programu zadáme kurzorem na myši jako neaktivní (více viz Help – F1).



Rám „Aktivace“ – Fáze budování 2

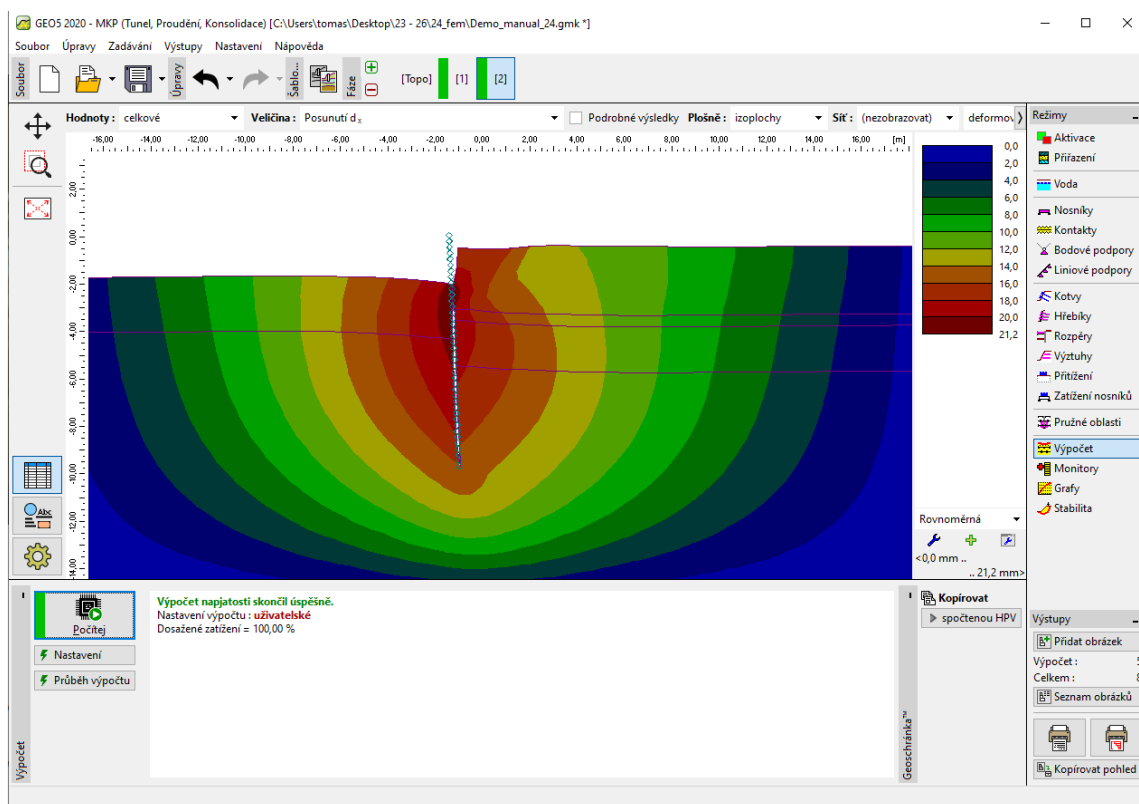
*Poznámka: Z předchozího obrázku je patrné, že automatický korektor konstrukce zabudovaný v programu rozdělil rozhraní zemin předělené stěnou na jednotlivé ohraničené oblasti (více viz Help – F1).*

Dále v rámu „Voda“ zadáme změnu průběhu HPV podle následujícího obrázku. Ostatní parametry se nemění.

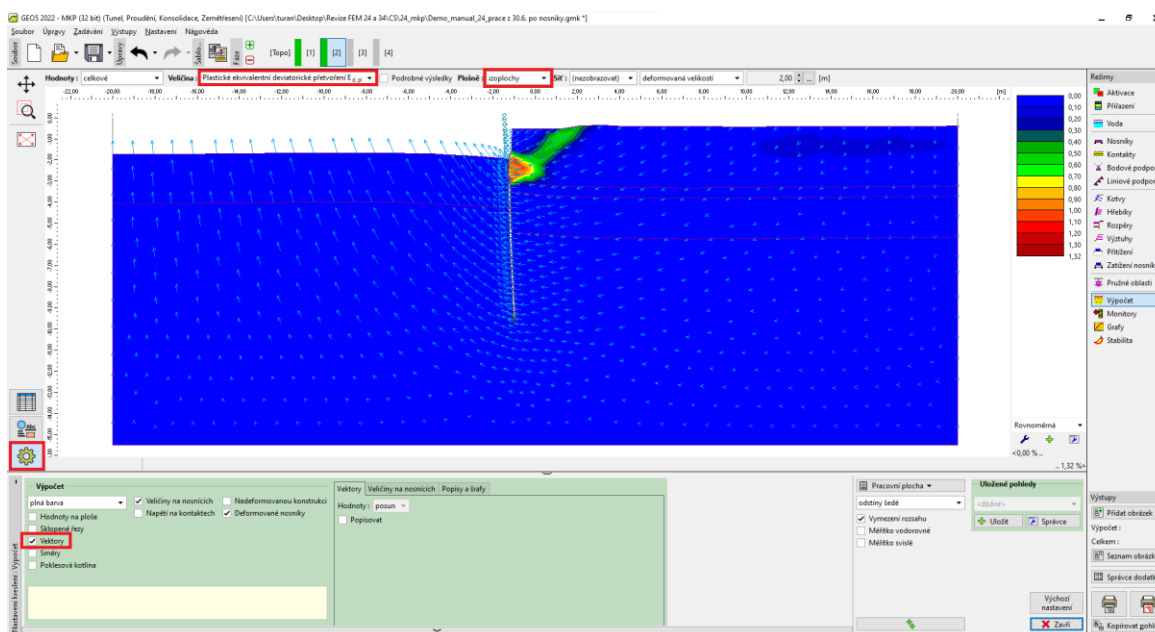


Rám „Voda“ – Fáze budování 2 (změna průběhu HPV)

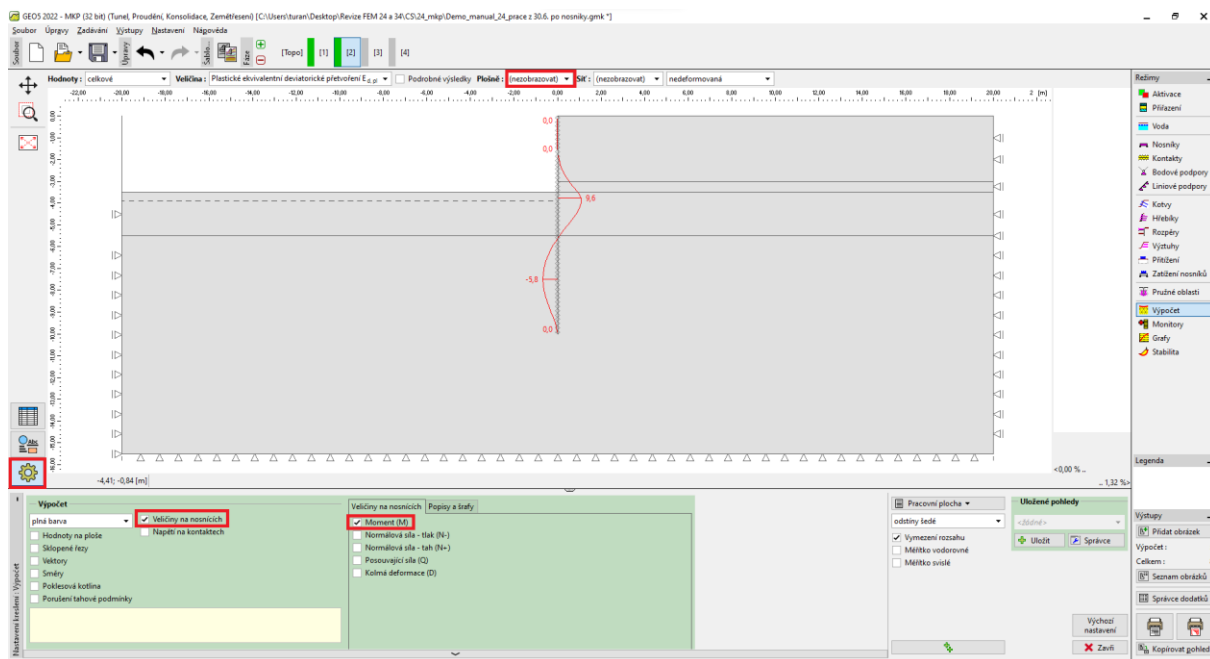
Nyní provedeme výpočet 2. fáze budování a prohlédneme si výsledky pro průběhy vnitřních sil po délce nosníku, ekvivalentní plastické deformace a deformovanou konstrukci.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 2 (sednutí  $d_x$  – deformovaná konstrukce)



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 2 (ekvivalentní plastická deformace  $E_{d,pl}$ , vektory posunů)



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 2 (průběh ohybových momentů  $M$ )

### Fáze budování 3: zadání kotev

Přidáme 3. fázi budování a v rámu „Kotvy“ stiskneme tlačítko „Přidat“ a v dialogovém okně „Nové kotvy“ zadáme ocelovou kotvu s velikostí předpínací síly  $F = 185 \text{ kN}$ . Kotvu uvažujeme v hloubce 2,9 m pod úroveň povrchu terénu – souřadnice hlavy kotvy tedy zadáme bodem  $[0,0; -2,9]$ .

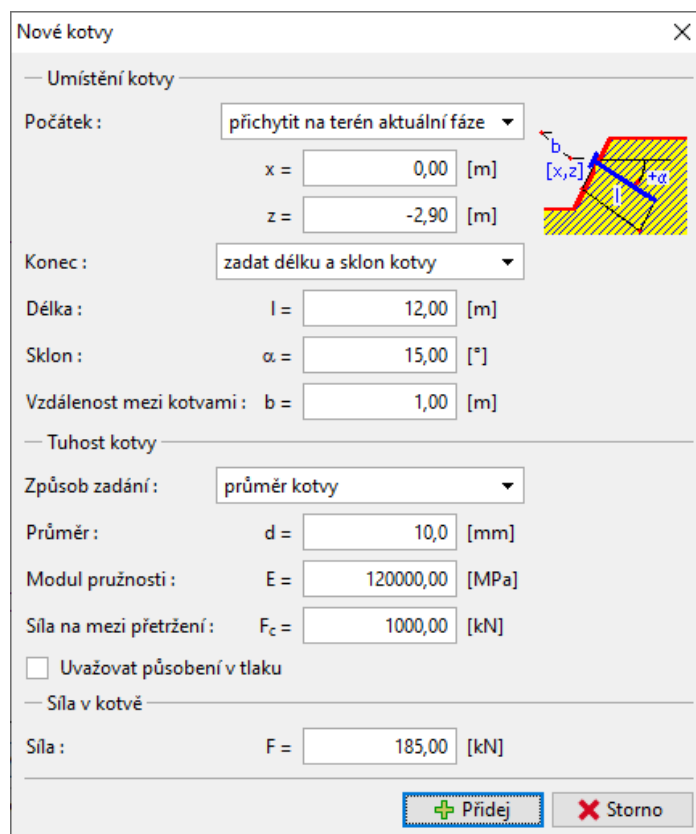
*Poznámka: Kotvy jsou v programu modelovány pomocí elastického tyčového prvku s konstantní normálovou tuhostí. Porušení kotevního prvku je dáno zadáním maximální síly. Kotva je uchycena do zeminy ve dvou bodech – na počátku a na konci. Po délce kotvy není působení mezi zeminou a výztužným prvkem uvažováno (více viz Help – F1).*

V této úloze budeme uvažovat následující parametry kotvy:

- Délka kotvy:  $l = 12 \text{ m}$ ,
- Sklon kotvy:  $\alpha = 15^\circ$ ,
- Průměr kotvy:  $d = 10 \text{ mm}$ ,
- Vzdálenost mezi kotvami:  $b = 1 \text{ m}$ .

*Poznámka: Tuhost kotvy uvažovaná ve výpočtu je definována modulem pružnosti, plochou kotvy a vzdáleností kotev. Je potřeba si uvědomit, že v případě rovinné deformace jsou diskrétní kotvy nahrazeny membránou o šířce 1 m. Dalším důležitým vstupním údajem u kotev je předpínací síla a síla*

na mezi přetržení kotvy. V tomto případě nebudeme uvažovat možnost přetržení výztužného prvku, a proto zadáme dostatečně velkou velikost síly na mezi přetržení  $F_c$  (více viz Help – F1).

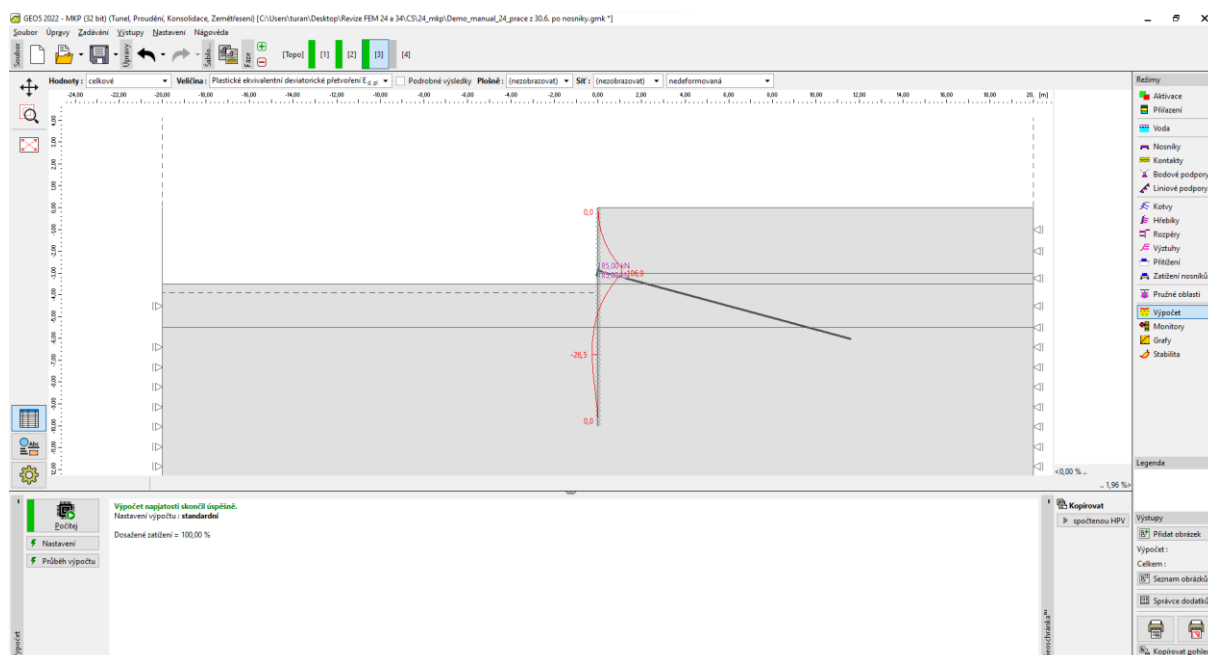


Dialogové okno „Nové kotvy“ – Fáze budování 3

*Poznámka: Kotva se při výpočtu deformuje. V důsledku deformace kotvy a okolního masivu pak může dojít k poklesu zadané předpínací síly v kotvě. Chceme-li tedy dosáhnout konkrétní předpínací síly, je nutné kotvu v další fázi na tuto sílu dopnout, nebo zadat dostatečně větší předpínací sílu (výsledná síla v kotvě po provedení výpočtu se zobrazuje u hlavy kotvy pod zadanou předpínací silou). V dalších fázích budování nelze parametry kotvy měnit, lze ji pouze dopnout na novou předpínací sílu, popřípadě úplně odstranit z konstrukce.*

*Uložení kotvy v masivu by mělo být dostatečně tuhé (uchycení na prvek), aby nedocházelo k nereálnému vytažení kotvy při vniku významných plastických deformací v okolí kořene kotvy (uchycení na uzel, příliš velké zahuštění v okolí kořene) a tím nereálné ztrátě předpínací síly.*

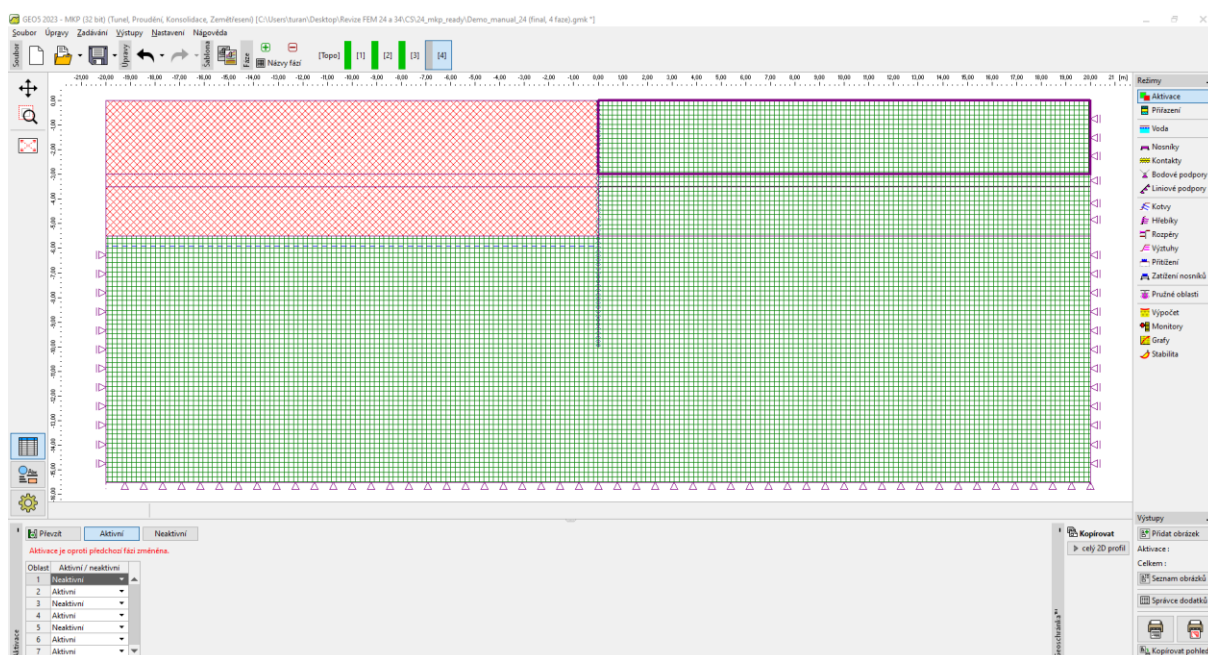
Nyní provedeme výpočet 3. fáze budování a opět si prohlédneme výsledky numerického řešení (obdobně jako v předchozí fázi budování).



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 3 (průběh ohybového momentu  $M$ )

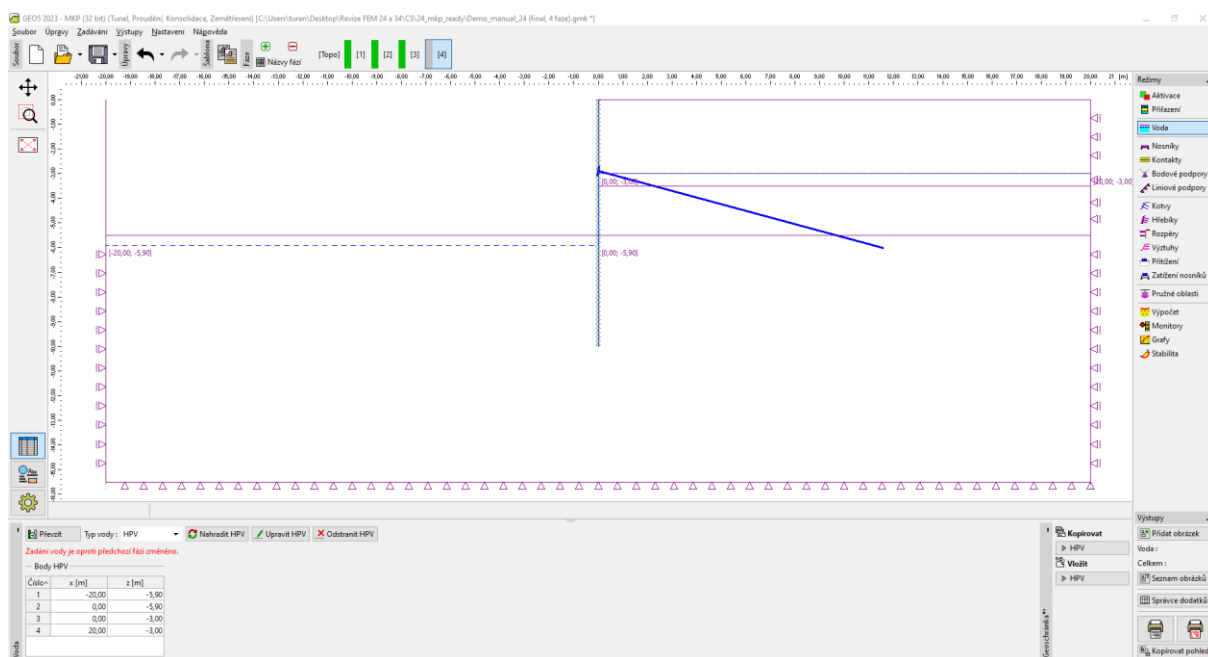
## Fáze budování 4: odtěžení zeminy

Přidáme 4. fázi budování a v rámu „Aktivace“ odtěžíme zbylou zeminu. Nejprve vybereme danou oblast kurzorem na myši a poté klikneme na tlačítko „Neaktivní“.



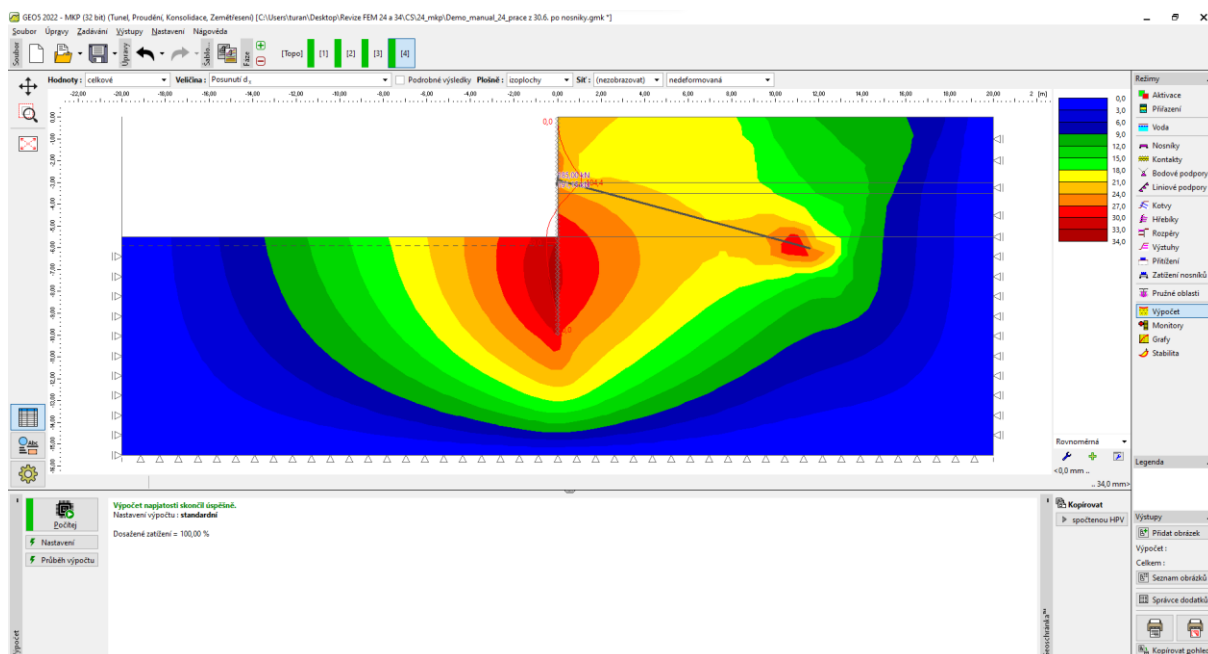
Rám „Aktivace“ – Fáze budování 4

V posledním kroku při zadávání 4. fáze budování změníme hladinu podzemní vody podle následujícího obrázku. Ostatní vstupní parametry zůstávají beze změn.



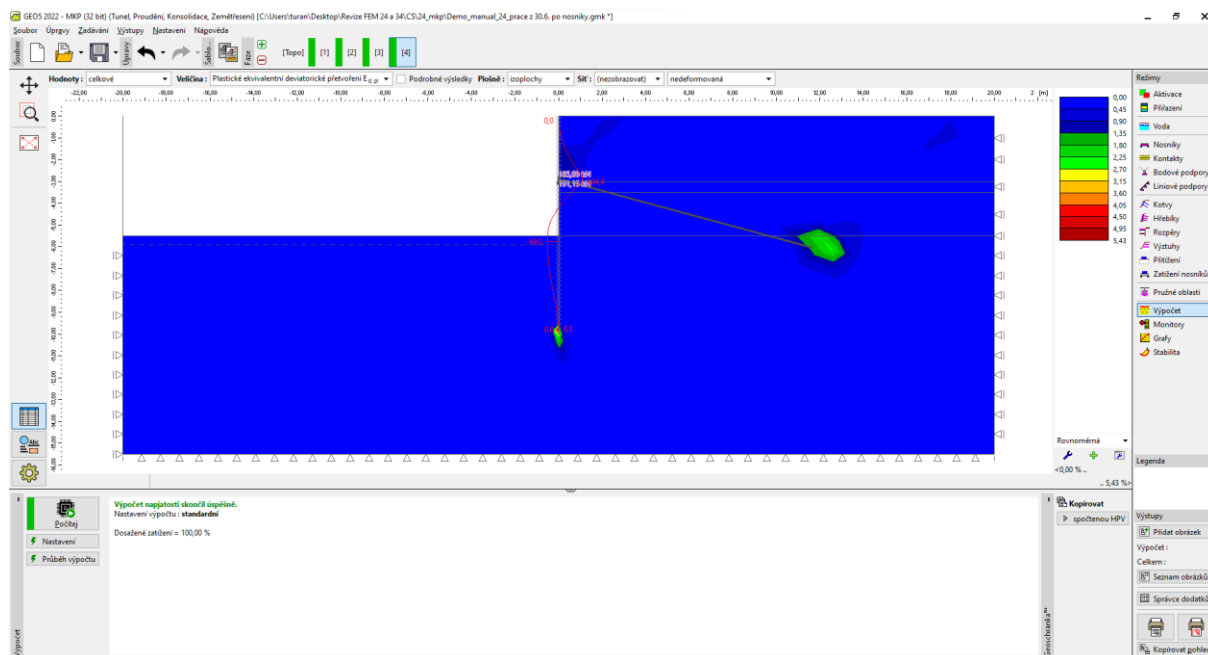
Rám „Voda“ – Fáze budování 3 (změna průběhu HPV)

Nyní provedeme výpočet 4. fáze budování a opět si prohlédneme výsledky numerického řešení (obdobně jako v předchozí fázi budování).



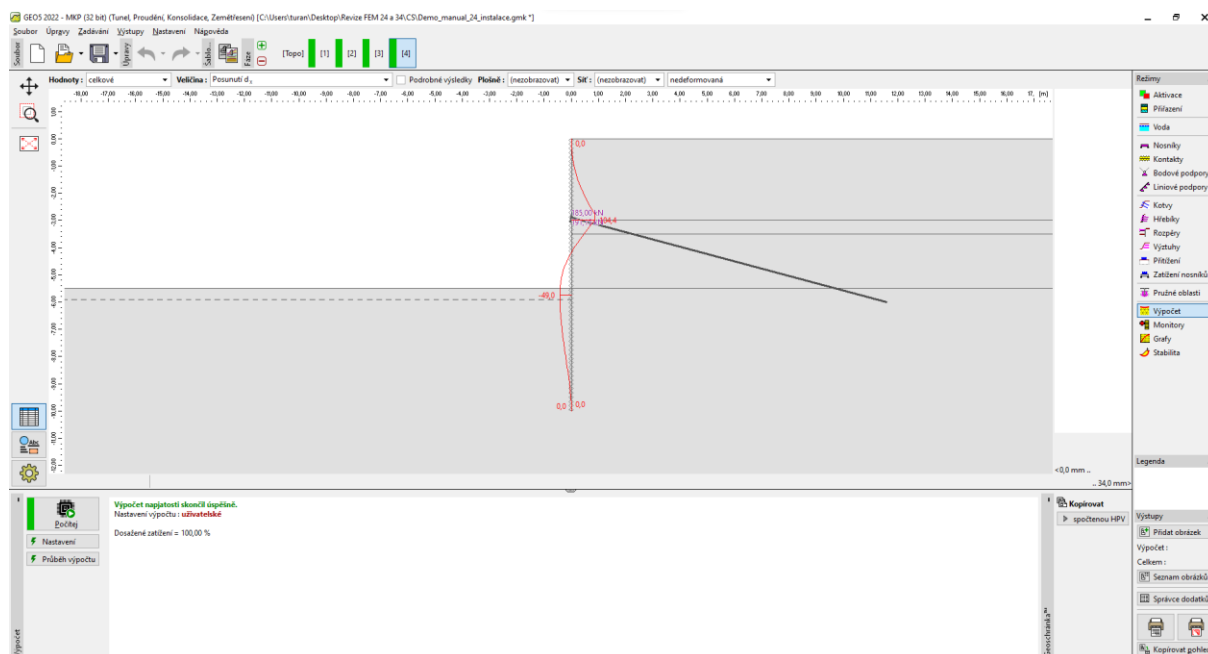
Rám „Výpočet“ – Fáze budování 4 (posunutí dx)

Z tohoto obrázku plyne, že maximální boční deformace v okolí pažicí stěny provedené z ocelových štetovnic je 34 mm.



*Rám „Výpočet“ – Fáze budování 4 (ekvivalentní plastická deformace  $E_{d,pl}$ )*

Z vykreslení ekvivalentních plastických deformací je patrné, že k největšímu zplastizování zeminy dochází v okolí paty pažící stěny. Ve druhé fázi budování docházelo ke zplastizování zeminy v okolí místa budoucí kotvy (více viz Help – F1).

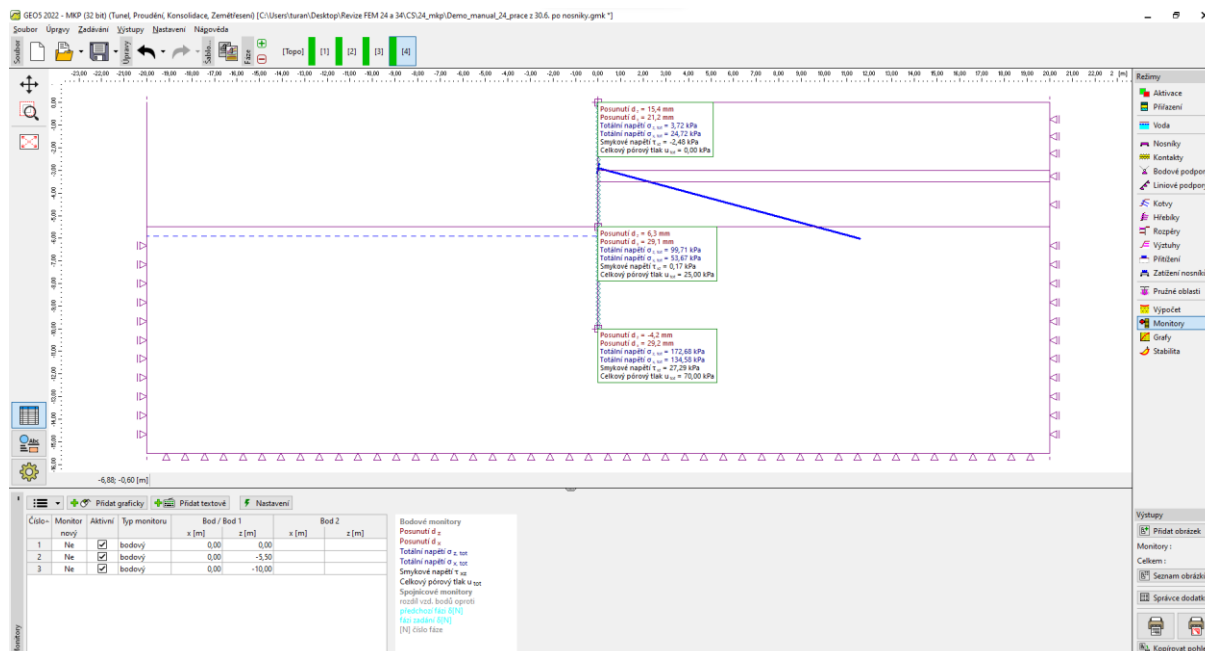


*Rám „Výpočet“ – Fáze budování 4 (průběh ohybových momentů  $M$ )*

Z obrázku průběhu ohybových momentů po délce pažící stěny zjistíme lokální extrémy a zaznamenejme je do tabulky, která je uvedena v předposlední části této kapitoly.



Nyní si prohlédneme výsledky pro monitory a zjistíme deformace v hlavě pažící stěny.



Rám „Monitory“ – Fáze budování 4 (Bodové monitory)

## Vyhodnocení výsledků

V následující tabulce jsou vypsány extrémy vnitřních sil na po délce štětovnicové stěny pro 2. a 3. fázi budování. Jedná se o hodnoty ohybových momentů. Tento výpočet jsme provedli nejprve pro modifikovaný Mohr-Coulombův materiálový model s lokálním zahuštěním linií a poté jsme tyto výsledky porovnali s programem GEO 5 – Pažení posudek.

Materiálový model / program	Fáze 2 $M \text{ [kNm/m]}$	Fáze 4 – pole $M \text{ [kNm/m]}$	Fáze 4 – kotva $M \text{ [kNm/m]}$
MCM (modifikovaný M-C)	9,60	-49,00	104,40
Pažení posudek * (analytické řešení)	29,16	- 28,91	110,57

Souhrnný přehled výsledků – ohybové momenty po délce pažící konstrukce

*Poznámka \*: Pro analytické řešení jsme uvažovali výpočet modulu vodorovné reakce podloží podle Schmitta (více viz Help – F1). Doplňující parametry zemin jsme definovali takto:*

- **Třída S4, středně ulehlá:** výpočet tlaku v klidu – nesoudržná zemina,  
úhel tření mezi konstrukcí a zeminou  $\delta = 17^\circ$  ;  
modul přetvárnosti zeminy  $E_{def} = 10 \text{ MPa}$ .
  
- **Třída F6, tuhá konzistence:** tlak v klidu – soudržná zemina ( $\nu = 0,4$ ),  
úhel tření mezi konstrukcí a zeminou  $\delta = 14^\circ$  ;  
modul přetvárnosti zeminy  $E_{def} = 4,5 \text{ MPa}$ .

*Nastavení výpočtu jsme uvažovali jako „Standardní – mezní stavy“. Vlastní výpočet zemních tlaků byl proveden bez redukce parametrů zemin. Při výpočtu jsme dále neuvažovali hodnotu minimálního dimenzačního tlaku (více viz Help – F1).*

## Závěr

Z výsledků numerického výpočtu lze vyvodit následující závěry:

- Lokální zahuštění sítě KP v okolí pažící stěny vede k přesnějšímu zjištění výsledků vnitřních sil.
- Pro výpočty pažících stěn je zapotřebí používat kontaktní prvky a nelineární materiálové modely, které zohledňují vznik plastických deformací a lépe vystihují reálné chování konstrukcí v okolním masivu.
- Maximální ekvivalentní plastické deformace  $E_{d,pl}$  vyjadřují místa, kde dochází ke zplastizování zeminy a představují potenciální oblast porušení (vlivem překročení podmínky plasticity materiálu).