

Numerické modelování tunelu metodou NRTM

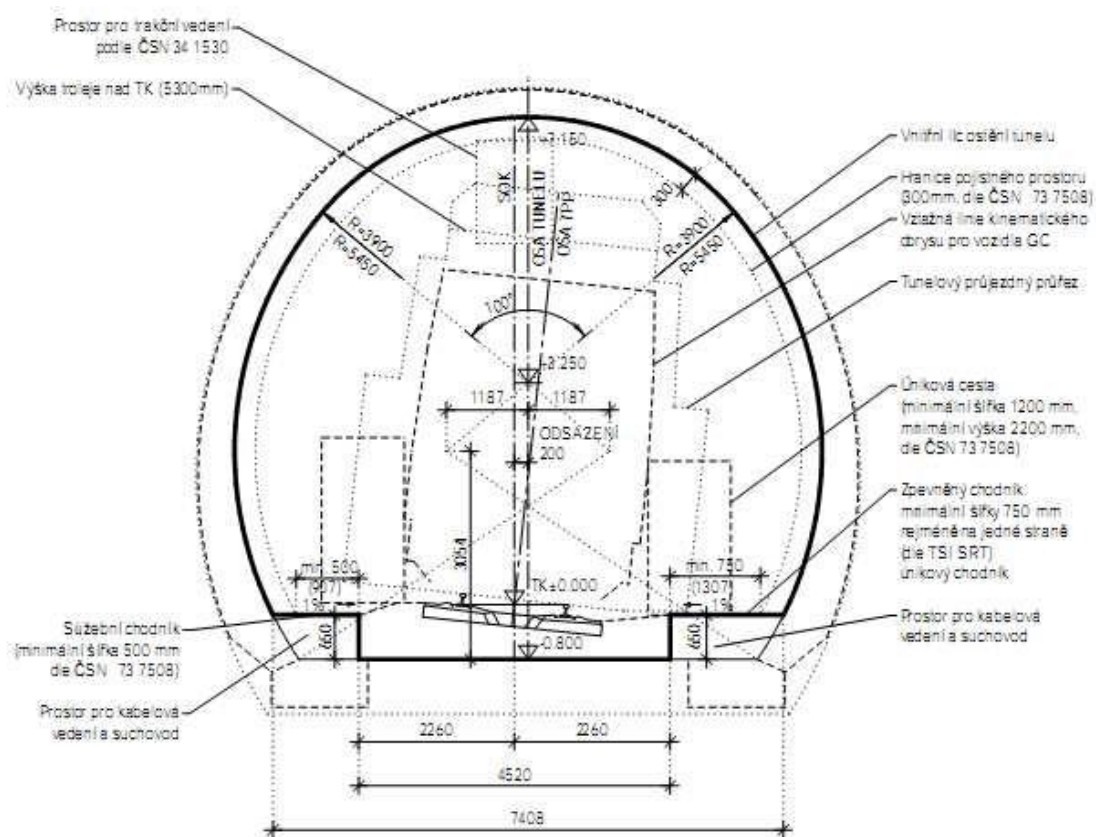
Program: MKP - Tunel

Soubor: Demo_manual_26.gmk

Cílem tohoto inženýrského manuálu je popsat numerické modelování jednokolejného železničního tunelu pomocí metody konečných prvků.

Zadání úlohy

Namodelujte a posuďte primární ostění jednokolejného železničního tunelu pro rychlosti 160 až 230 km/h. Průřez tunelu je uvažován na základě vzorového listu SŽDC (viz *obrázek*).



Světlý tunelový průřez jednokolejného železničního tunelu podle vzorového listu SŽDC

Ražba tunelu bude provedena pomocí konvenční metody ražby (Nová rakouská tunelovací metoda, Sequential Excavation Method) s horizontálním členěním čelby. Výška nadloží je cca 14 m. Primární ostění o tloušťce 200 mm je provedeno ze stříkaného betonu třídy C 20/25. Zajištění stropu je

provedeno hydraulicky upínanými svorníky (HUIS, typ WIBOLT EXP) s únosností 120 kN. Na základě vyhodnocení etap průzkumných prací předpokládáme, že geologické vrstvy jsou rovnoběžné s povrchem. Skladba geologického profilu je patrná z *tabulky 1*.

Tabulka 1 – Parametry zemin a hornin

Zemina, hornina (specifikace)	Profil [m]	γ [kN/m ³]	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]	ν [–]	E_{def} [MPa]	E [MPa]	γ_{sat} [kN/m ³]
Písek hlinitý (S4 / SM)	0 – 3	19,5	29	10	0,3	10	30	22
Hlinitý štěrk (G4 / GM)	3 – 5	19,5	33	8	0,3	70	210	22
Silně zvětralá břidlice (R5)	5 – 10	24	29	30	0,33	45	135	25
Navětralá až zdravá břidlice (R3)	nad 10	26	38	250	0,25	350	1050	26
Prokotvená oblast (R5)	–	24	29	63	0,33	45	135	29

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 (kontaktní prvky, modelování ostění)
- Modelování postupu výstavby: materiál primárního ostění tunelu, exkavace výrubu
- Fáze budování 1: primární geostatická napjatost horninového masivu
- Fáze budování 2: modelování výrubu kaloty, aktivace nevystrojeného výrubu
- Fáze budování 3: vyztužení klenby kaloty primárním ostěním z mladého betonu
- Fáze budování 4: zvýšení materiálových charakteristik vyzrálého betonu (kalota)
- Fáze budování 5: modelování výrubu opěří tunelu, aktivace nevystrojeného výrubu
- Fáze budování 6: vyztužení stěn opěří primárním ostěním z mladého betonu
- Fáze budování 7: zvýšení materiálových charakteristik již vyzrálého betonu (opěří)

- Výsledky, závěr: poklesová kotlina povrchu terénu, přetvoření horninového masivu, průběhy vnitřních sil a deformace primárního ostění tunelu, síly v kotvách.

Poznámka: Vlastní modelování v programu GEO5 – MKP se skládá ze dvou částí. V první části je nutné v režimu topologie určit velikost vlastního numerického modelu, zadat rozhraní zemin a hornin a jejich parametry, nadefinovat geometrii konstrukce tunelu pomocí bodů a linií a provést jejich přiřazení příslušným rozhraním modelu (více viz Help – F1).

Ve druhé části se definují jednotlivé fáze budování a provádějí se vlastní výpočty. V průběhu jednotlivých fází pomocí aktivace, deaktivace či změny materiálů v předem ohraničených oblastech modelu, přidáním a případně odstraněním nosníkových prvků reprezentujících konstrukce (např. ostění tunelu) a změnou jejich parametrů (materiál, rozměry) se snažíme namodelovat skutečný postup výstavby daného podzemního díla. Výsledkem je numerický model, u kterého předpokládáme shodu s budoucím chováním skutečného podzemního díla a podle kterého se provádí vlastní dimenzování konstrukce.

Topologie (část 1): zadání rozhraní úlohy (profilu) a parametrů zemin

V rámu „Nastavení“ ponecháme způsob výpočtu 1. fáze budování jako geostatickou napjatost. Typ výpočtu je „Napjatost“. Dále zde zapneme režim „Tunely“, který nám umožňuje modelovat reálný průběh výstavby primárního ostění tunelu.

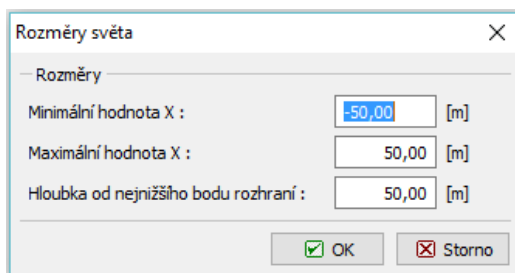
Charakteristiky úlohy	Výpočtové normy	Rozšířené možnosti programu
Geometrie úlohy: <input type="text" value="Rovinná"/>	Betonové konstrukce: <input type="text" value="EN 1992-1-1 (EC2)"/>	<input type="checkbox"/> Podrobné parametry generování sítě
Typ výpočtu: <input type="text" value="Napjatost"/>	Výpočet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

Rám „Nastavení“

Poznámka: V případě zvoleného režimu „Tunely“ lze v programu modelovat např. exkavace (modelování 3D efektu čelby u Nové rakouské tunelovací metody), dále lze zadávat a počítat degradace nosníků, zatížení nosníků a oblastí teplotou, zatížení oblastí bobtnáním, a provádět monitoring výsledků (více viz Help – F1).

Dále zadáme velikost numerického modelu řešené úlohy a rozhraní terénu. Pro tuto úlohu zvolíme rozměry modelu (–50 m; 50 m), vyšetřovanou hloubku vrstvy zadáme 50 m.

Poznámka: Rozhraní řešené úlohy, resp. rozměry světa je třeba zvolit dostatečně velké, aby nedocházelo k ovlivnění napjatosti a deformace horninového masivu v místě řešené konstrukce (resp. zájmových oblastech) okrajovými podmínkami numerického modelu. Orientační hodnoty doporučených velikostí hranic modelů pro jednotlivé případy řešení jsou blíže uvedeny a popsány v nápovědě k programu (více viz F1).



Dialogové okno „Rozměry světa“

Rozhraní 1		Rozhraní 2		Rozhraní 3		Rozhraní 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

Seznam bodů pro jednotlivá rozhraní vrstev zemin a hornin

V rámu „Zeminy“ definujeme jednak parametry vrstev zemin, resp. hornin a jednak parametry horniny v oblasti, kde se nacházejí svorníky (viz *poznámka*). Pro modelování úlohy jsme použili Mohr-Coulombův materiálový model, který nám umožňuje při výpočtu zohlednit oblasti lokálního, resp. globálního porušení (více viz Help – F1).

Poznámka: Zavedení svorníků do numerického modelu je provedeno metodou, při které se prokotvená oblast horninového masivu v okolí výrubu odpovídající délce svorníků nahradí horninou s lepšími materiálovými parametry. V takových případech se obvykle uvažuje nárůst soudržnosti horniny. Celková soudržnost horniny zvýšená vlivem svorníkové výztuže je dána následujícím vztahem:

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

kde: c_{h+s} celková soudržnost horniny zvýšená vlivem svorníkové výztuže,
 c_h původní soudržnost horniny,
 c_s zvýšení soudržnosti vlivem svorníkové výztuže.

Zvýšení soudržnosti vlivem svorníkové výztuže se spočte podle následujícího vztahu:

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

kde: N_u únosnost svorníku [kN],
 A_k plocha připadající na jeden svorník [m²],
 ϕ_{ef} úhel vnitřního tření horniny [°],
 γ_{kc} součinitel spolehlivosti kotvení [–].

V této úloze uvažujeme **10 ks svorníků HUIS o únosnosti 120 kN po vzdálenosti 3,5 m**. Výsledná smyková pevnost, resp. soudržnost v prokotvené oblasti odpovídá hornině typu R5:

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

Modul pružnosti E [MPa] nebyl geologickým průzkumem přímo stanoven, proto byla jeho hodnota odvozena z modulu přetvárnosti E_{def} [MPa] pomocí obecného vztahu $E = 3 \cdot E_{def}$.

Pro všechny vrstvy zemin a hornin uvažujeme úhel dilatance ψ [°] jako nulový. Poté přiřadíme zeminy a horniny je do jednotlivých oblastí (viz následující *obrázek*).

Úprava vlastností zeminy

Identifikace
Název: Silně zvětralá břidlice (R5)

Model Mohr - Coulomb
Modul odtížení / přitížení: $E_{ud} = 135,00$ [MPa]
Úhel vnitřního tření: $\phi_{ef} = 29,00$ [°]
Soudržnost zeminy: $c_{ef} = 30,00$ [kPa]
Úhel dilatace: $\psi = 0,00$ [°]

Materiálový model
Materiálový model: Mohr - Coulomb

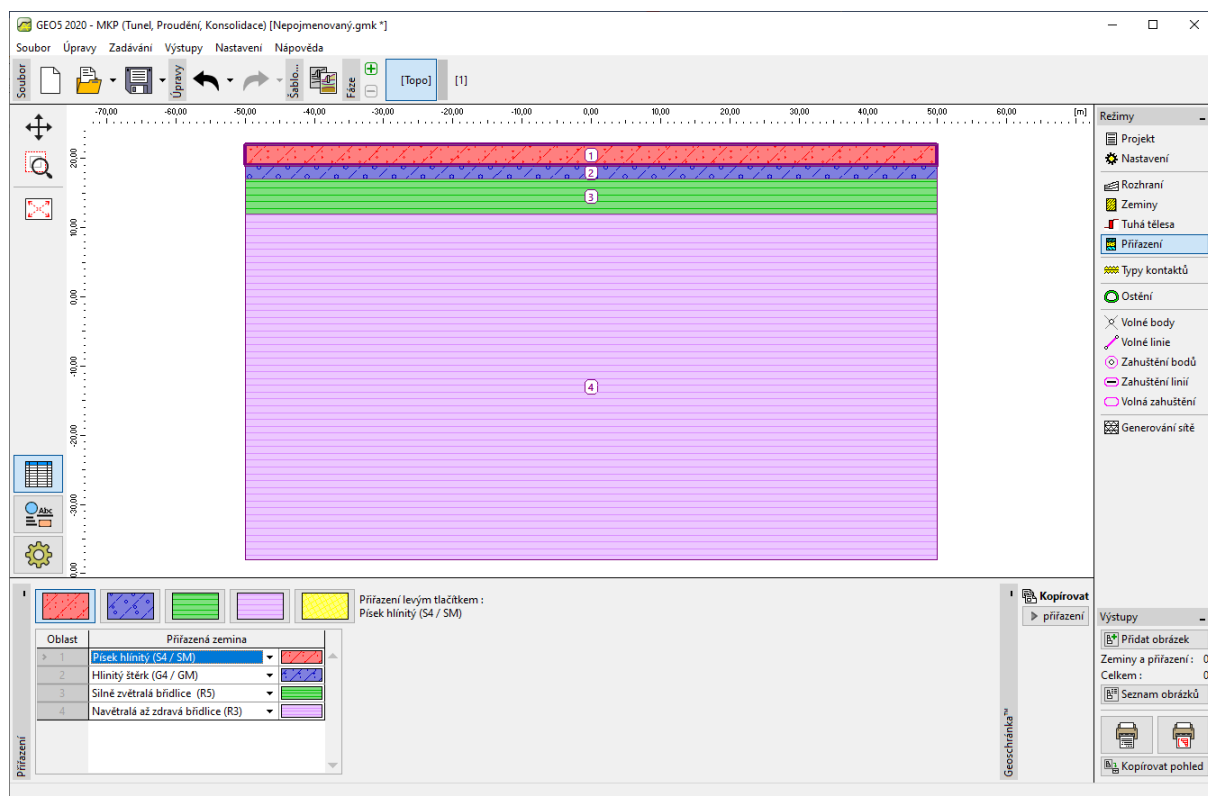
Základní data
Objemová tíha: $\gamma = 24,00$ [kN/m³]
Modul pružnosti: $E = 135,00$ [MPa]
Tuhost s hloubkou: konstantní
Poissonovo číslo: $\nu = 0,33$ [-]

Vztlak
Způsob výp.vztlatku: standardní
Obj.tíha sat.zeminy: $\gamma_{sat} = 25,00$ [kN/m³]

Zobrazení
Kategorie vzorků: GEO
Hledat:
Podkategorie: Horniny (21 - 36)
Vzorek: 36 Jiná hornina
Barva:
Pozadí: automatické
Sytost <10 - 90>: 50 [%]

Zatříd Vymaž OK + OK + OK Storno

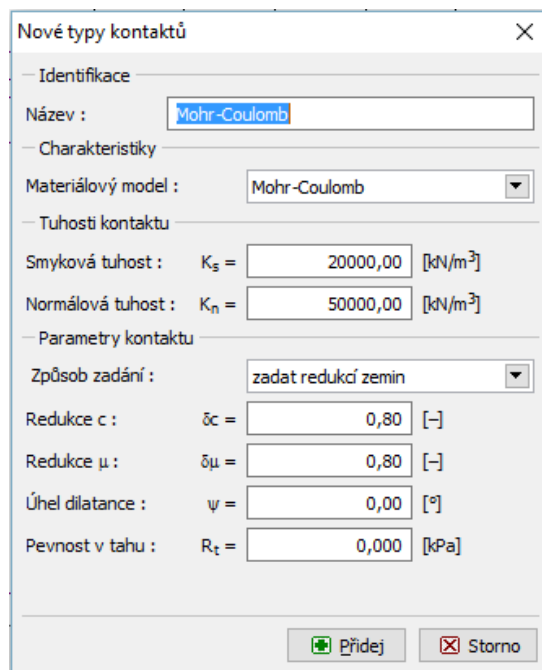
Dialogové okno „Přidání nových zemín“



Rám „Přirazení“

Dalším krokem je zadání typu kontaktních prvků, které se zavádějí na rozhraní ostění se zeminou, resp. horninou v rámu „Typy kontaktů“. Parametry kontaktů na rozhraní předpokládáme následovně:

- Smyková tuhost: $K_s = 20\,000 \text{ kN/m}^3$,
- Normálová tuhost: $K_n = 50\,000 \text{ kN/m}^3$,
- Redukce zemin: $\delta c = \delta \mu = 0,8$.



Dialogové okno „Nové typy kontaktů“

Poznámka: Kontaktní prvky umožňují zohlednit vzájemné působení materiálů podél rozhraní mezi zeminou a konstrukcí, resp. mezi jednotlivými zeminami atp. Kontaktní prvek má nulovou tloušťku a vyjadřuje vztah mezi kontaktními napětími a relativní změnou posunů podél kontaktu (více viz Help – F1). V tomto případě uvažujeme kontaktní prvky na rozhraní primárního ostění a horniny, tj. uvažujeme určitou možnost posunu primárního ostění po stěně výrubu.

Kontaktní prvky se obecně zavádějí v méně únosných zeminách, pro zdravé neporušené horniny lze s určitou opatrností kontakty zanedbat (u tunelových staveb). Problematika a způsob zavádění kontaktních prvků byla podrobněji popsána již v kapitole 24. Numerické řešení pažící konstrukce (více viz <http://www.fine.cz/inzenyrske-manualy/>). Orientační hodnoty tuhostí K_s a K_n [kN/m³] jsou uvedeny v nápovědě k programu (více viz F1).

Tímto je základní zadávání úlohy (modelování rozhraní, parametry zemin, typy kontaktů) ukončeno. Nyní přejdeme k modelování primárního ostění tunelu a následně k zadání prokotené oblasti.

Topologie (část 2): modelování ostění a oblasti prokotvené svorníky

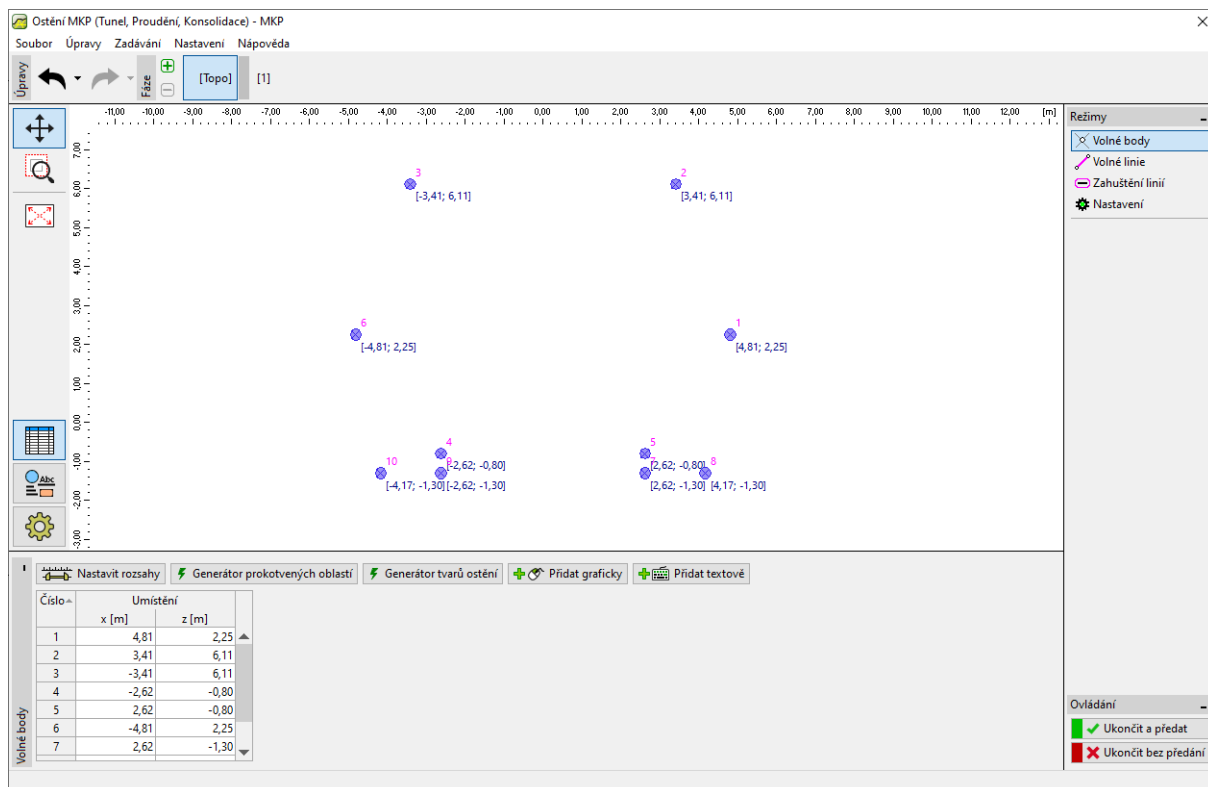
Přejdeme do rámu „Ostění“ a pomocí tlačítka „Přidat“ zadáme body primárního ostění tunelu, dále tvar výrubu a jeho umístění do řešené oblasti. Tloušťku ostění uvažujeme 200 mm s ohledem na použitý typ konstrukce, kdy modelujeme ostění železničního tunelu.

Poznámka: Ostění tunelu můžeme v programu zadat pomocí jednotlivých volných bodů a linií, nebo jej můžeme definovat jako tzv. makroprvek. Výhodou druhého způsobu zadání je skutečnost, že při změně geologického profilu můžeme ostění libovolně posunout (vodorovně nebo svisle) jako celek (více viz nápověda – F1).

Tvar výrubu je v modulu „Ostění – MKP“ zadán pomocí deseti volných bodů (viz *tabulka 2*), které se propojí pomocí volných linií (viz *tabulka 3*).

Tabulka 2 – Volné body tvaru výrubu (primární ostění)

Číslo bodu	Souřadnice x [m]	Souřadnice 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



Modelování ostění

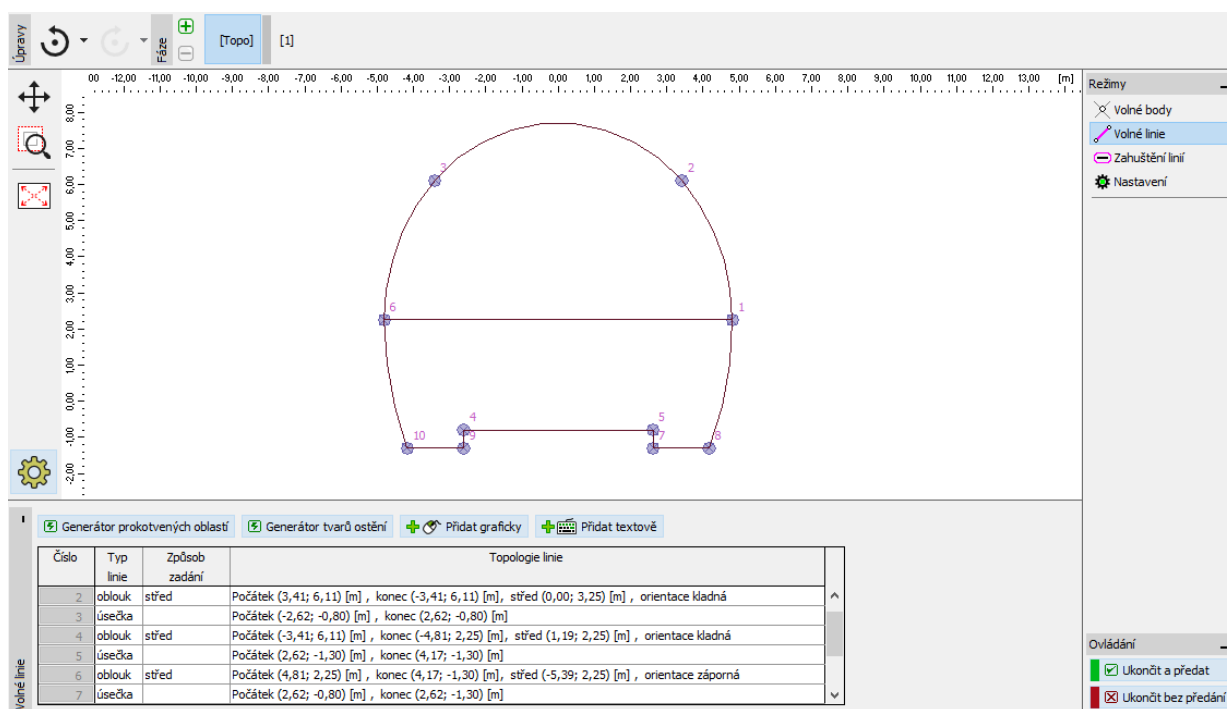
Poznámka: Generátory tvarů ostění vytvářejí podle parametrů příslušné prvky, se kterými se pak pracuje samostatně, bez možnosti je zpětně parametricky měnit. Jestliže jsou parametry generace korektní, zobrazuje se během jejich úprav aktuální grafická podoba vygenerovaných prvků (více viz Help – F1).

Tabulka 3 – Volné linie výrubu (primární ostění)

Číslo linie	Typ linie	Způsob zadání	Topologie linie
1	oblouk	střed	Počátek – bod 1, konec – bod 2 střed (-1,19; 2,25), orientace kladná
2	oblouk	střed	Počátek – bod 2, konec – bod 3, střed (0,00; 3,25), orientace kladná
3	úsečka	–	Počátek – bod 4, konec – bod 5
4	oblouk	střed	Počátek – bod 3, konec – bod 6, střed (1,19; 2,25), orientace kladná

5	úsečka	–	Počátek – bod 7, konec – bod 8
6	oblouk	střed	Počátek – bod 1, konec – bod 8, střed (-5,39; 2,25), orientace záporná
7	úsečka	–	Počátek – bod 5, konec – bod 7
8	úsečka	–	Počátek – bod 9, konec – bod 10
9	oblouk	střed	Počátek – bod 10, konec – bod 6, střed (5,39; 2,25), orientace záporná
10	úsečka	–	Počátek – bod 4, konec – bod 9
11	úsečka	–	Počátek – bod 6, konec – bod 1

Na následujícím obrázku jsou vykresleny volné linie tvaru výrubu primárního ostění.



Modul „Ostění – MKP“ – Volné linie tvaru výrubu (včetně horizontálního členění čelby)

Během budování podzemního díla se uvažuje zabezpečení jeho stropu svorníky. Toto se obvykle v inženýrské praxi modeluje jako zlepšení parametrů horniny, která se v dané oblasti nachází.

Z tohoto důvodu je zde dále nutné zadat oblast vyztuženou svorníky – pomocí volných bodů (viz tabulka 4) a volných linií (viz tabulka 5).

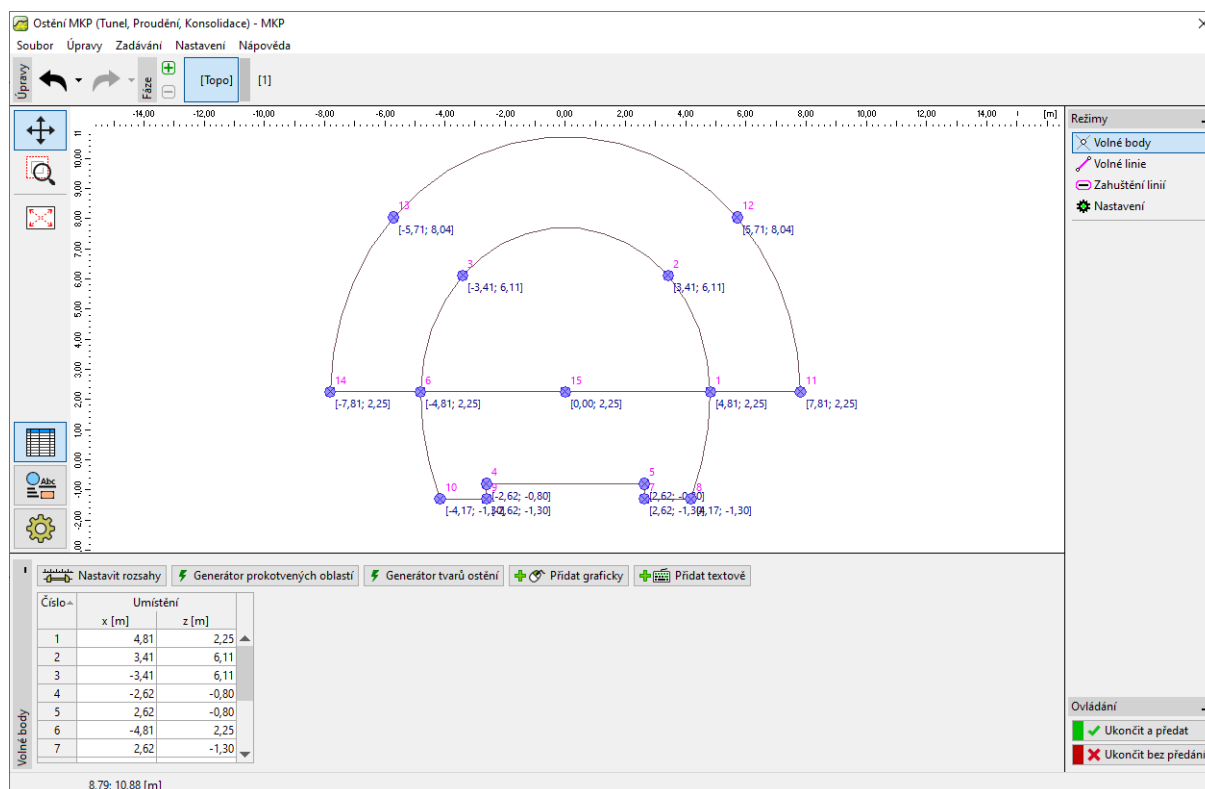
Tabulka 4 – Volné body v oblasti vyztužené svorníky

Číslo bodu	Souřadnice x [m]	Souřadnice y [m]
11	7,81	2,25
12	5,71	8,04
13	-5,71	8,04
14	-7,81	2,25

Tabulka 5 – Volné linie v oblasti vyztužené svorníky

Číslo linie	Typ linie	Způsob zadání	Topologie linie
12	oblouk	poloměr	Počátek – bod 14, konec – bod 13 Poloměr – 9,0 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý
13	oblouk	poloměr	Počátek – bod 13, konec – bod 12 Poloměr – 7,45 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý
14	oblouk	poloměr	Počátek – bod 12, konec – bod 11 Poloměr – 9,0 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý
15	úsečka	–	Počátek – bod 14, konec – bod 6
16	úsečka	–	Počátek – bod 11, konec – bod 1

V modulu „Ostění“ dále přidáme nový volný bod č. 15 o souřadnicích [0,0; 2,25], kolem něhož se poté provede zahuštění sítě konečných prvků (viz *Topologie – část 3*).



Volné body v oblasti vyztužené svorníky a volné body primárního ostění tunelu

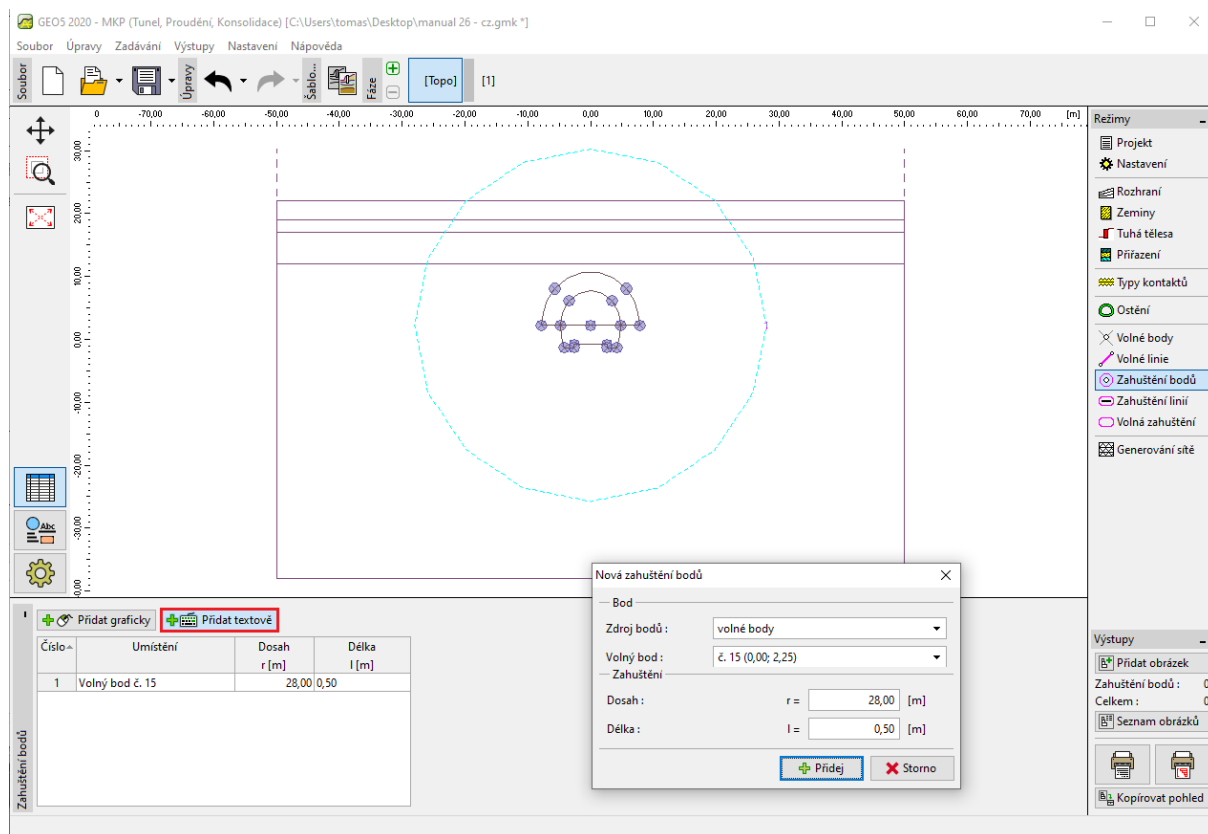
Nyní si prohlédneme výsledný tvar primárního ostění modelovaného tunelu spolu s oblastí prokotenou svorníky. Umístění ostění do prostoru řešené oblasti provedeme do počátku souřadného systému, tj. na souřadnici $[0,0]$ pomocí rámu „Nastavení“. Ukončení zadávání bodů a linií v modulu „Ostění“ potvrdíme tlačítkem „Ukončit a předat“.

V poslední části zadávání topologie konstrukce přejdeme k vygenerování a zahuštění sítě konečných prvků.

Topologie (část 3): generování a zahuštění sítě konečných prvků

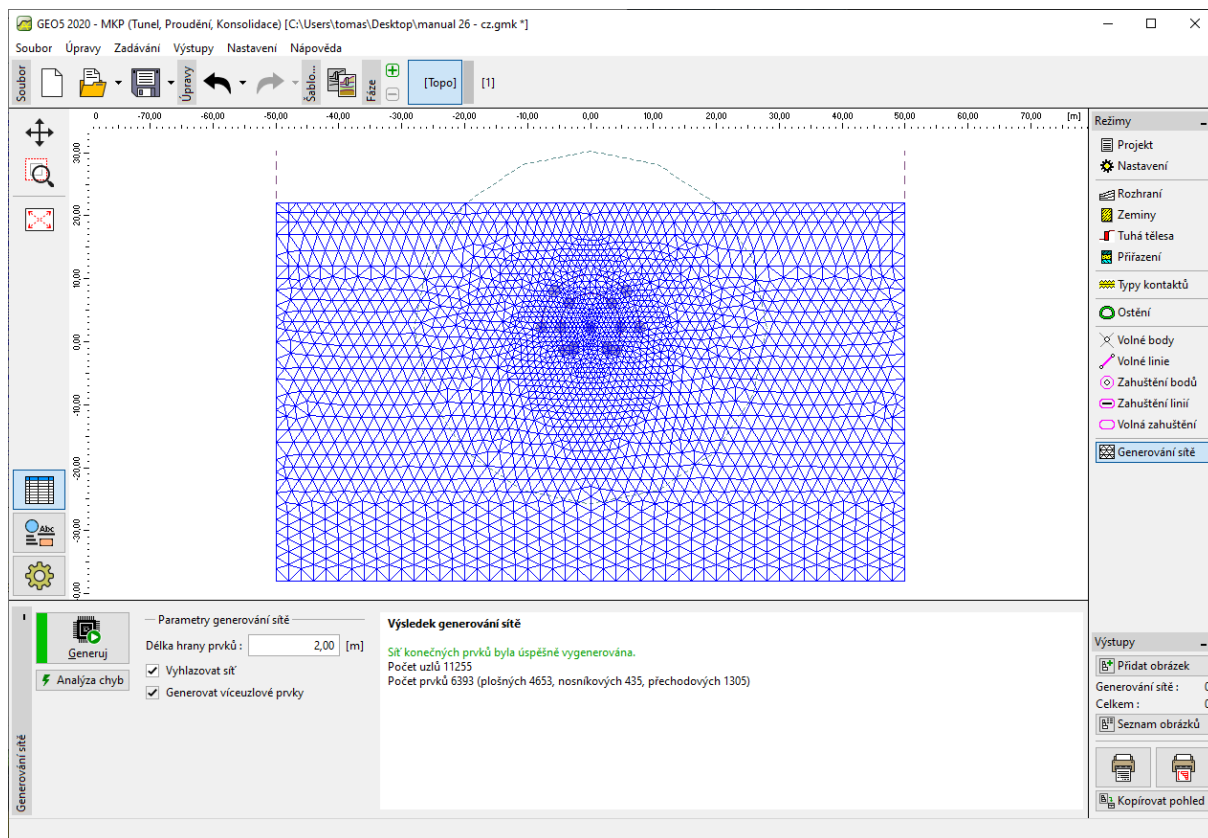
Síť konečných prvků ovlivňuje výrazně výsledné hodnoty výpočtu. Před samotným vygenerováním sítě nejprve provedeme zahuštění v prostoru výrubu (kolem bodu č. 15) s délkou hrany prvků $l = 0,5 \text{ m}$ a dosahem o poloměru $r = 28 \text{ m}$.

Poznámka: Tímto krokem zajistíme dostatečně hustou síť v okolí zájmové oblasti (výrubu). Popis zahuštění volných bodů, resp. linií bylo podrobněji popsáno již v kapitole 23. Namáhání ostění kolektoru (více viz <http://www.fine.cz/inzenyrske-manualy/>).



Dialogové okno „Nová zahuštění bodů“

Poté již přejdeme přímo k vygenerování sítě KP. V rámu „Generování sítě“ nastavíme délku hrany prvků na 2,0 m a dále zvolíme možnost vyhlazování sítě.



Rám „Generování sítě“ – Zahuštění sítě KP v okolí zájmové oblasti (výrubu) o délce 0,5 m

Poznámky k modelování postupu výstavby:

V této části manuálu pro přehlednost uvádíme některé důležité poznámky, které se týkají vlastního postupu výstavby – materiál primárního ostění tunelu, členění čelby (jednotlivé exkavace výrubu). Tyto informace jsou užitečné pro numerické modelování našeho příkladu, protože některé zadávání vstupních dat se opakuje (např. exkavace).

Poznámka: Fáze budování zohledňují postup tunelování. Pro sestavení jednotlivých etap výstavby musíme znát materiál primárního ostění, pobírání čelby a hydrogeologické poměry během ražby.

Primární ostění navrhne ze stříkaného betonu C 20/25 o požadované tloušťce 200 mm. Do numerického modelu zavádíme pouze stříkaný beton a vliv nárůstu pevnosti, resp. modulu pružnosti v čase (viz tabulka 6).

Tabulka 6 – Hodnoty modulu pružnosti stříkaného betonu (vývoj v čase)

Fáze zrání stříkaného betonu	Modul pružnosti E_{cm} [MPa]	Modul pružnosti ve smyku G [MPa]
Mladý beton	2 900	1 134
Vyzrálý beton	29 000	11 340

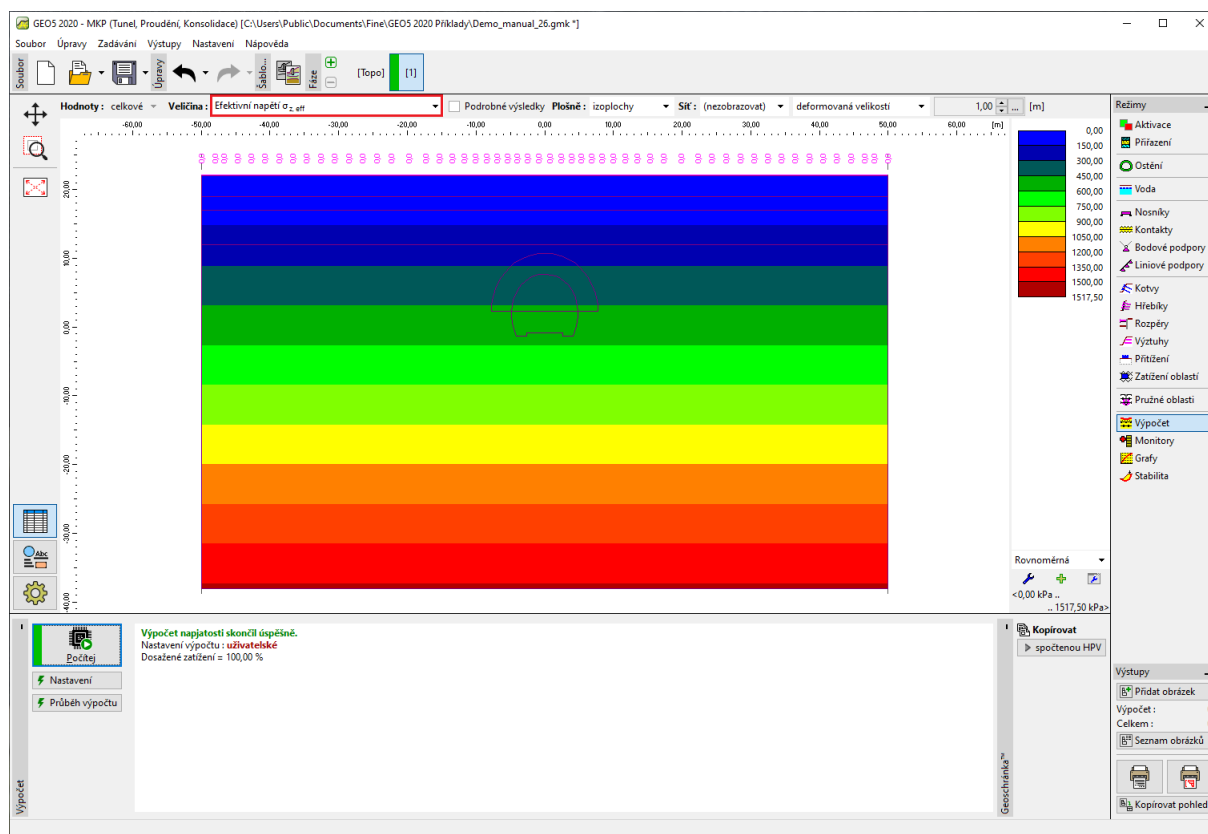
Poznámka: Ražba tunelu je modelována jako rovinný model, který plně nezohledňuje prostorové změny napjatosti horninového masivu probíhající během ražby v oblasti čelby. Při ražbě je dočasně nevystrojený výrub podporován horninovým masivem před čelbou (podélná, resp. příčná horninová klenba) a dříve vystrojenou částí výrubu. Toto chování dokáže popsat pouze prostorový 3D model, u rovinného 2D modelu je chování ve směru ražby řešeno přibližně.

Nejčastěji se v inženýrské praxi používá metoda (obecně nazývaná λ metoda či β metoda), která předpokládá, že primární napjatost masivu, tj. původní napětí σ_0 působící před ražbou v okolí budoucího výrubu se mění postupně s časem podle vztahu $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ (pro primární napjatost $\beta = 1$). Pokud modelujeme změnu primárního napětí ve 2 fázích výpočtu (budování), tak v první fázi se zatíží nevystrojený výrub hodnotou $(1 - \beta) \cdot \sigma_0$ a zbylé zatížení o velikosti $\beta \cdot \sigma_0$ se uvažuje ve druhé fázi.

V případě členěného výrubu je nutné tento postup aplikovat na každý dílčí výrub zvlášť. Hodnota součinitele β závisí na geologii horninového masivu, délce záběru a velikosti profilu výrubu a je poměrně obtížné ji stanovit. V GEO5 – MKP je tato metoda reprezentována tzv. exkavací. Pro numerické modelování tunelu jsme její hodnotu odhadnuli jako $\beta = 0,6$ pro jednokolejný profil pro kalotu i opěří.

Fáze budování 1: primární geostatická napjatost

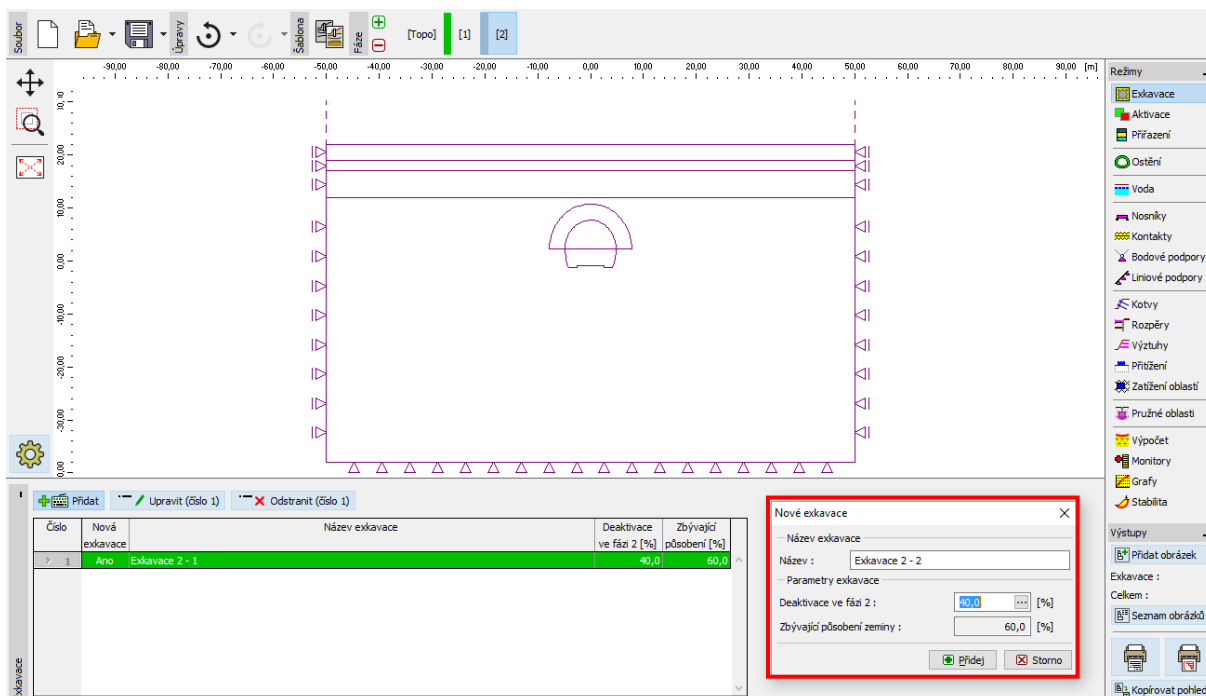
Po vygenerování sítě KP přepneme do 1. fáze budování a poté provedeme výpočet primární geostatické napjatosti masivu. Nastavení výpočtu ponecháme pro všechny fáze budování jako „Standardní“ (více viz Help – F1).



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 1 (primární geostatická napjatost masivu $\sigma_{z,eff}$)

Fáze budování 2: výrub kaloty, aktivace nevystrojeného výrubu

V dalším kroku přidáme 2. fázi budování. Poté v rámu „Exkavace“ zadáme novou exkavaci a namodelujeme výrub kaloty pro oblast č. 6 v rámu „Aktivace“



Dialogové okno „Nové exkavace“ – Fáze budování 2

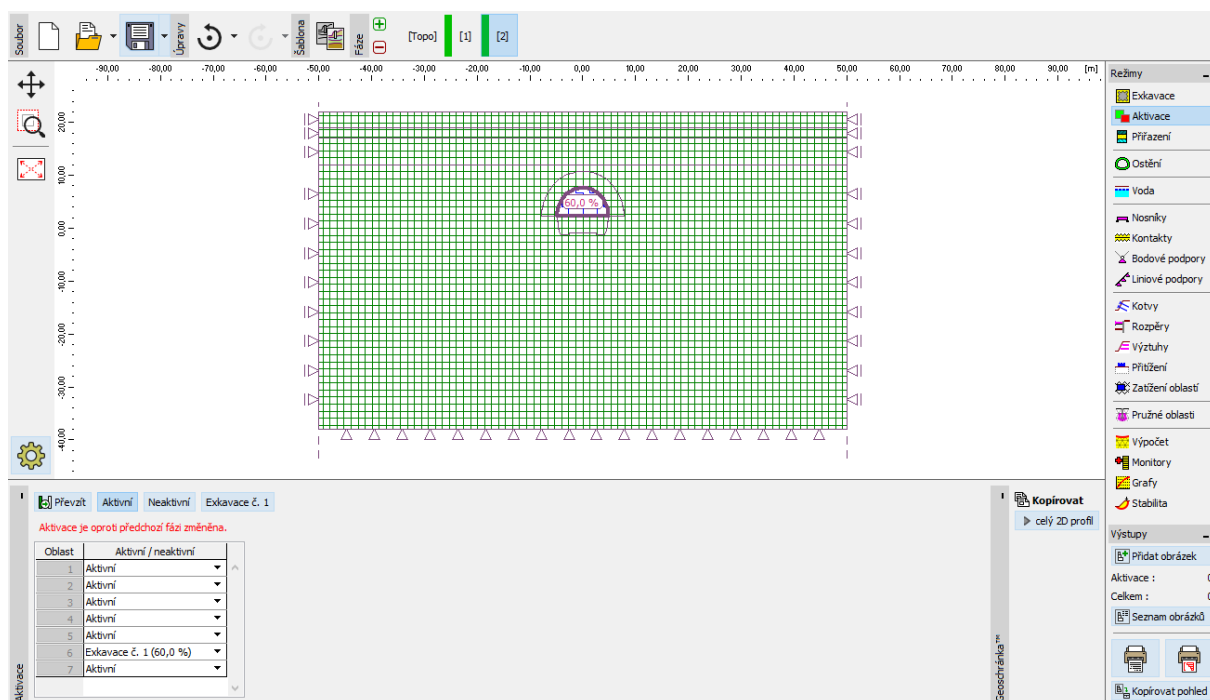
Poznámka: V inženýrské praxi se členění čelby (jednotlivé exkavace výrubu) provádí pomocí procentuálního poměru deaktivace zeminy ke zbývajcímu působení zeminy. V tomto příkladě pro jednotlivé etapy výstavby tunelu uvažujeme následující poměry exkavací:

- výrub kaloty, aktivace nevystrojeného výrubu: 40 % / 60 %,
- vyztužení klenby kaloty primárním ostěním z mladého betonu: 30 % / 30 %,
- zvýšení materiálových charakteristik vyzrálého betonu (kalota): 30 % / 0 %.

- modelování výrubu opěří tunelu, aktivace nevystrojeného výrubu: 40 % / 60 %,
- vyztužení stěn opěří primárním ostěním z mladého betonu: 30 % / 30 %,
- zvýšení materiálových charakteristik vyzrálého betonu (opěří): 30 % / 0 %.

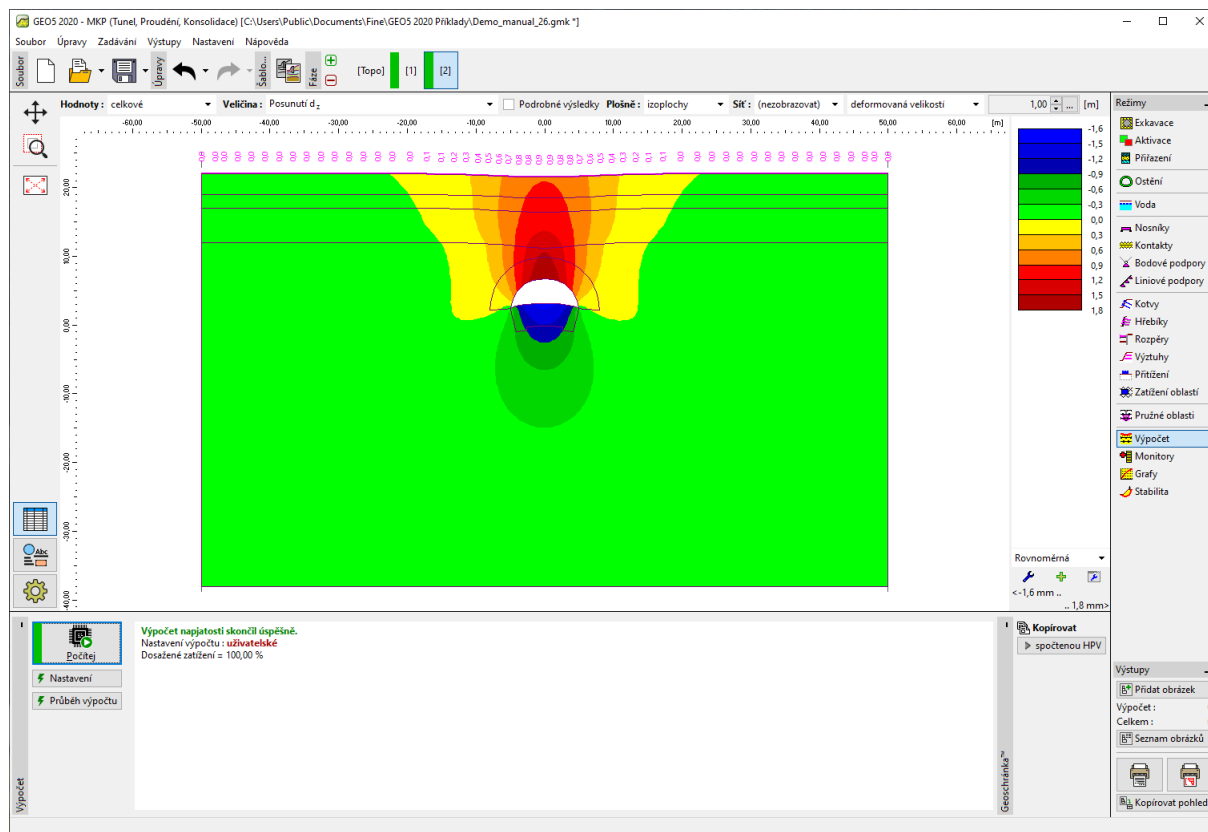
Tyto procentuální poměry vycházejí z letitých zkušeností uživatelů a udávají poměrně spolehlivé výsledky. V programu lze zadat pro jednotlivé fáze výstavby různé procentuální poměry exkavací (např. 25/75, 30/45, 30/15 a 15/0) pro výrub kaloty, resp. opěří tunelu.

V podstatě se jedná o aktivaci procentuálního podílu zatížení na nevystrojený výrub kaloty. V této fázi budování uvažujeme deaktivaci zeminy o velikosti 40 % (viz obrázek).



Rám „Aktivace“ – Fáze budování 2 (aktivace 40 % zatížení na nevystrojený výrub kaloty)

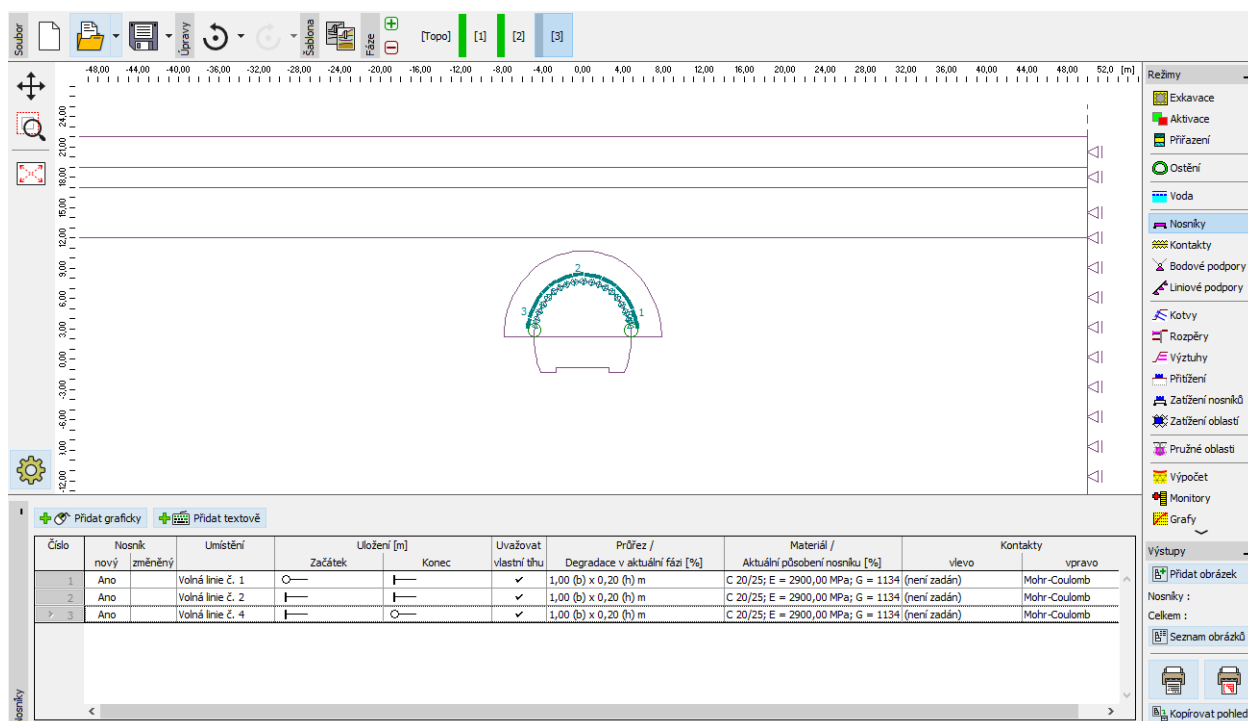
Nyní provedeme výpočet a prohlédneme si výsledky pro svislou deformaci d_z [mm]. Pro lepší představu o chování výrubu si zobrazíme deformovanou síť a poklesovou kotlinu.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 2 (svislá deformace d_z s poklesovou kotlinou)

Fáze budování 3: vyztužení klenby kaloty primárním ostěním z mladého betonu

V dalším kroku přidáme 3. fázi budování. V rámu „Nosníky“ nejprve namodelujeme vyztužení klenby kaloty primárním ostěním tloušťky 200 mm z mladého stříkaného betonu.

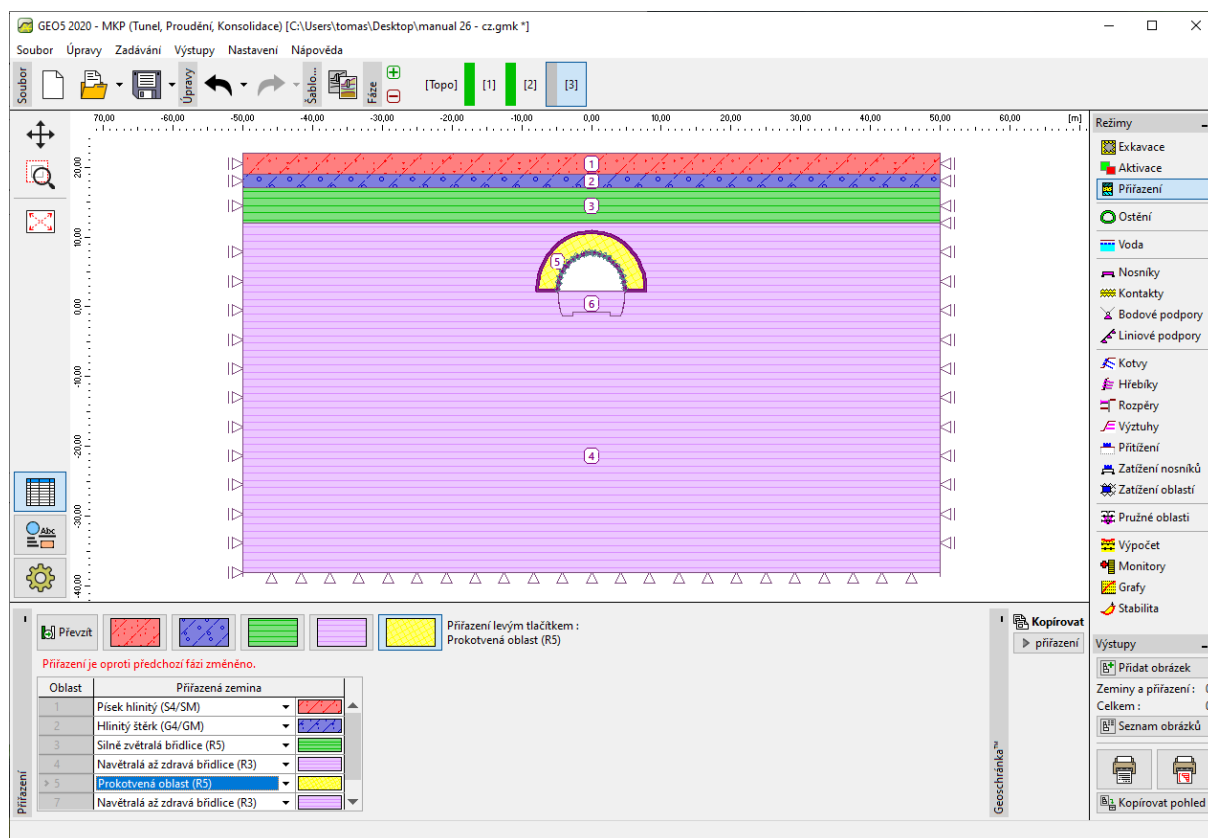


Číslo	Nosník		Umístění	Uložení [m]		Uvažovat vlastní tíhu	Průřez / Degradace v aktuální fázi [%]	Materiál / Aktuální působení nosníku [%]		Kontakty	
	nový	změněný		Začátek	Konec			vlevo	vpravo		
1	Ano		Volná linie č. 1			✓	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; E = 2900,00 MPa; G = 1134	(není zadán)	Mohr-Coulomb	
2	Ano		Volná linie č. 2			✓	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; E = 2900,00 MPa; G = 1134	(není zadán)	Mohr-Coulomb	
3	Ano		Volná linie č. 4			✓	1,00 (b) x 0,20 (h) m	C 20/25; E = 2900,00 MPa; G = 1134	(není zadán)	Mohr-Coulomb	

Zadání primárního ostění kaloty pomocí nových nosníků – Fáze budování 3 (mladý beton)

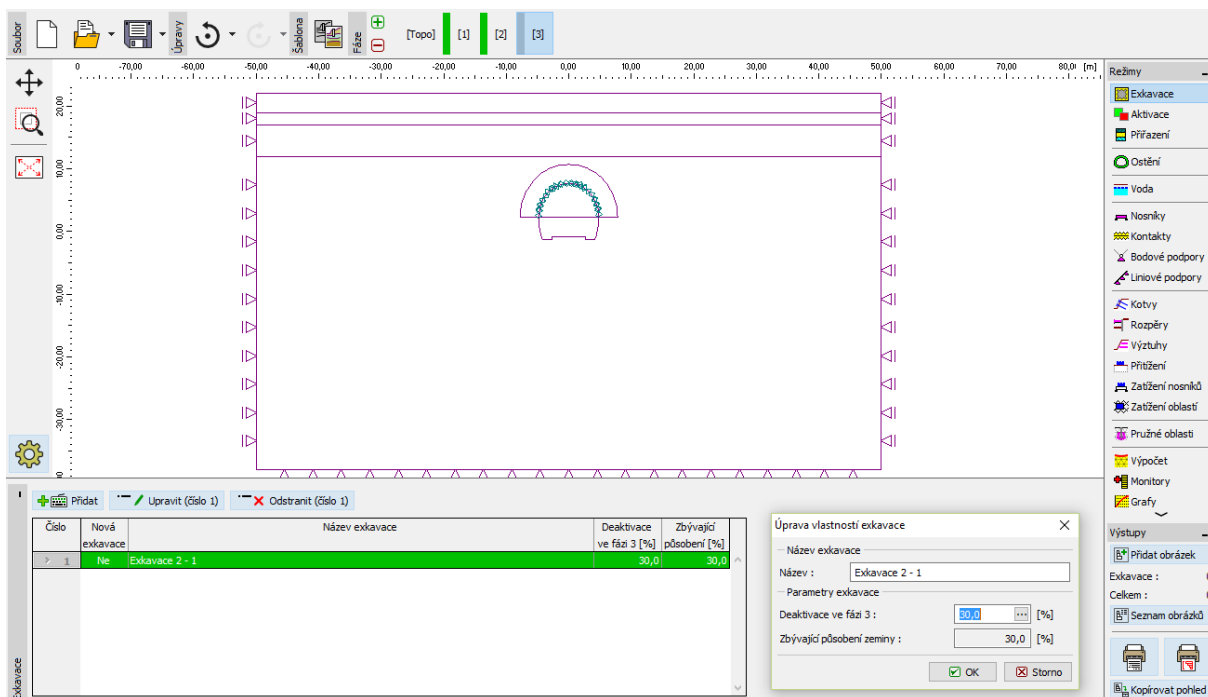
*Poznámka: Uložení konců nosníků uvažujeme jako kloubové, na spodních koncích nosníků je tedy nulový ohybový moment. V některých případech se uložení konců nosníků modeluje pomocí speciálního typu tzv. **patičky**, která zajišťuje stabilitu a konvergenci při výpočtu (více viz Help – F1).*

V rámu „Přiřazení“ změním horninu v oblasti č. 5 (na možnost „prokotvené R5“), ve které budeme uvažovat její prokotvení pomocí hydraulicky upínaných ocelových svorníků (viz obrázek).



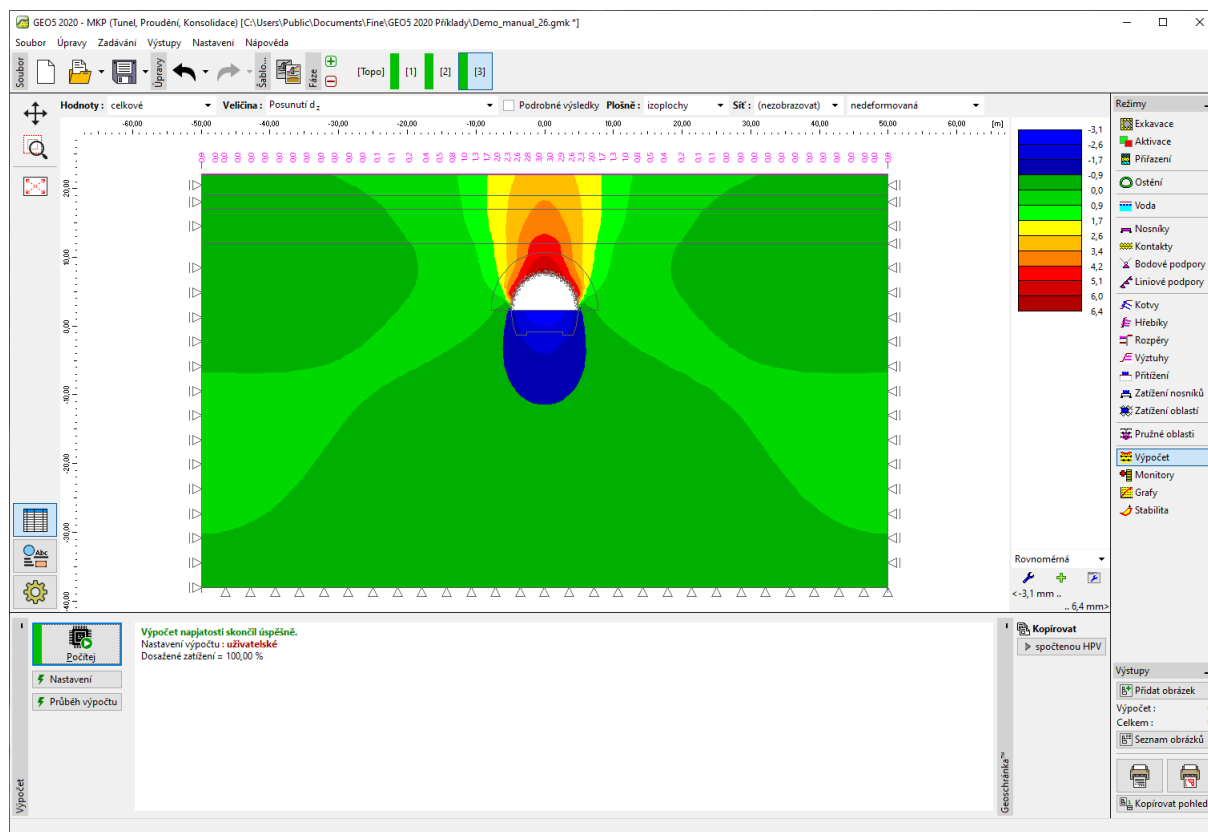
Rám „Přiřazení“ – Fáze budování 3 (prokotvená oblast se svorníky)

Dále přejdeme k aktivaci svorníků v prokotvené oblasti horninového masivu v okolí výrubu kaloty a upravíme vlastnosti exkavace na dalších 30 % zatížení (tlačítkem „Upravit“).



Dialogové okno „Úprava vlastností exkavace“ – Fáze budování 3

Poté znovu provedeme výpočet.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 3 (svislá deformace d_z)

Fáze budování 4: zvýšení materiálových charakteristik již vyztuženého betonu (kalota)

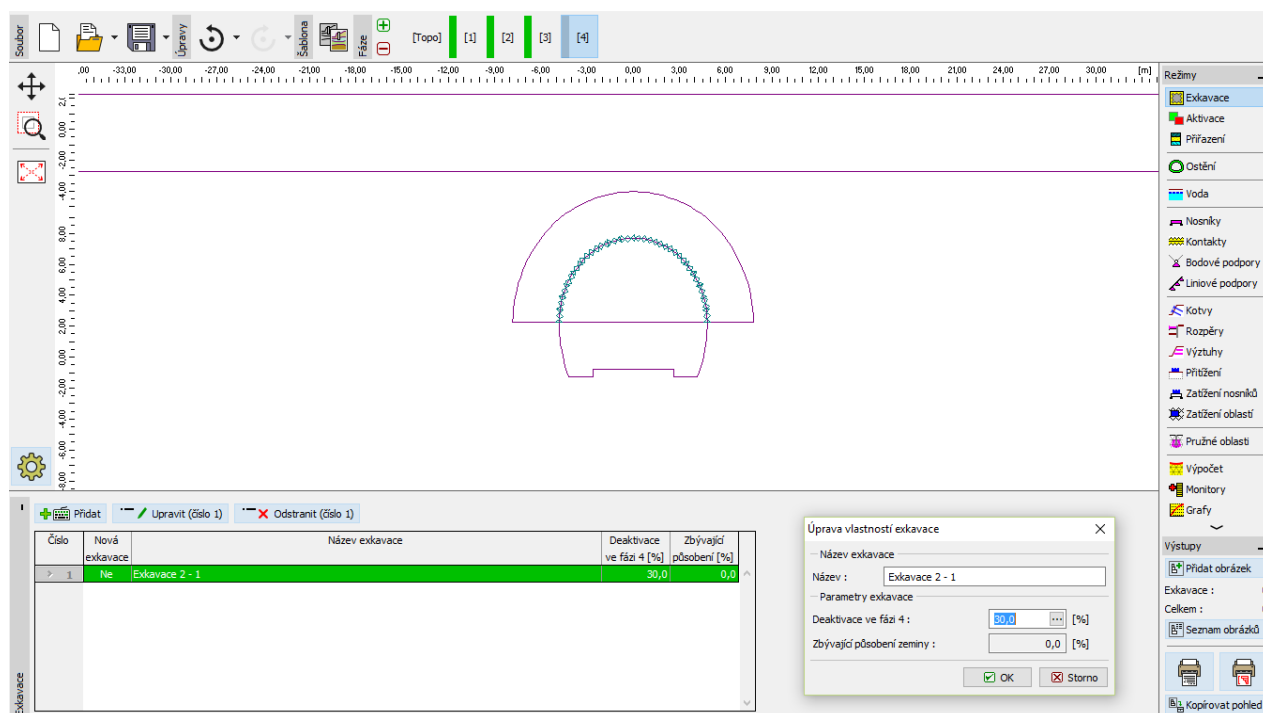
Ve 4. fázi budování zvýšíme materiálové charakteristiky již vyztuženého betonu, který zajišťuje výrub kaloty. V dialogovém okně „Úprava vlastností nosníku“ zvolíme možnost „Zesílení“ a zadáme příslušné hodnoty modulů pružnosti. Ostatní parametry již ponecháme beze změn.

Dialogové okno „Úprava vlastností nosníku“ – Fáze budování 4

Číslo	Nosník	Umístění	Uložení [m]	Uvažovat vlastní tíhu	Průřez / Degradace v aktuální fázi [%]	Materiál / Aktuální působení nosníku [%]	Kontakty (vlevo, vpravo)
1	Ne	Ano	Volná linie č. 1	✓	↑ h = 0,20 m	↑ E = 29000,00 MPa; G = 11340,00 N	(není zadán) Mohr-Coulomb
2	Ne	Ano	Volná linie č. 2	✓	↑ h = 0,20 m	↑ E = 29000,00 MPa; G = 11340,00 N	(není zadán) Mohr-Coulomb
3	Ne	Ano	Volná linie č. 4	✓	↑ h = 0,20 m	↑ E = 29000,00 MPa; G = 11340,00 N	(není zadán) Mohr-Coulomb

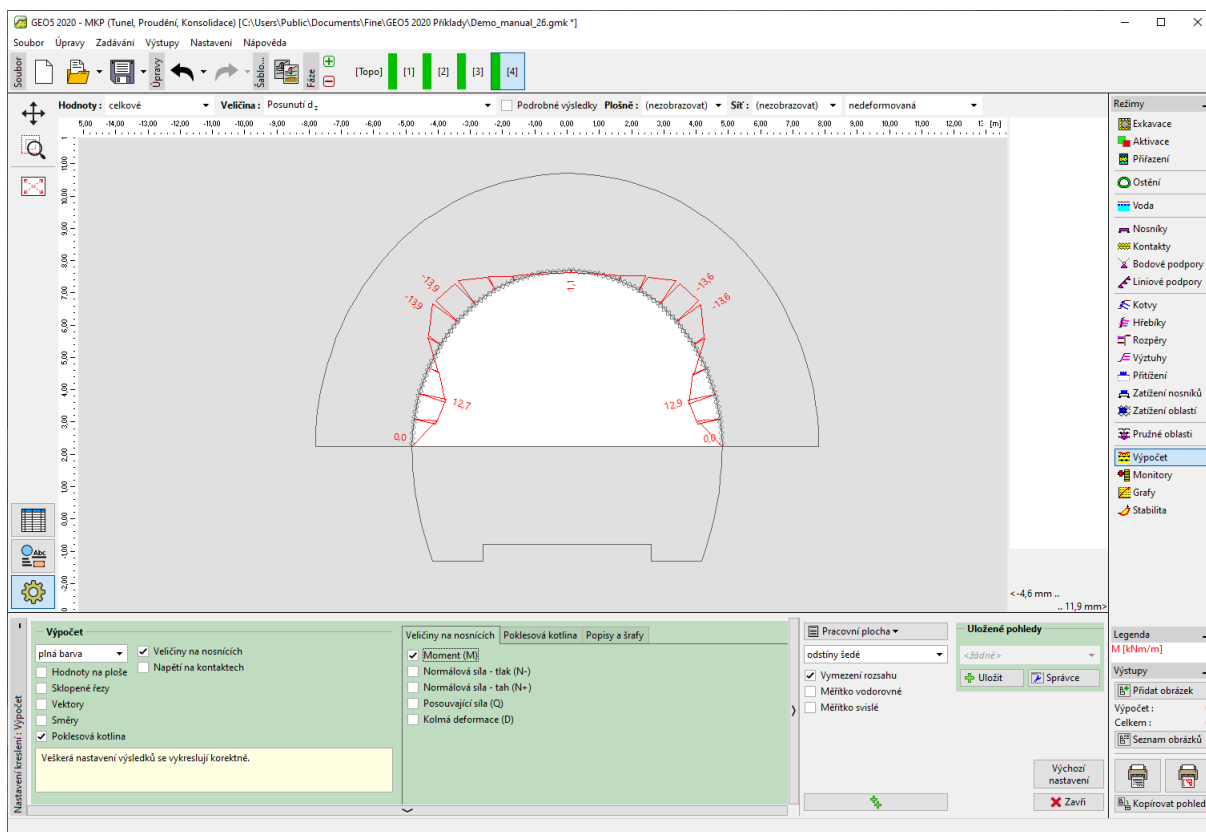
Úprava vlastností primárního ostění kaloty – Fáze budování 4 (vyztužený stříkaný beton)

Provedeme aktivaci zbývajících 30 % zatížení horninového masivu. Způsob úpravy vlastností exkavace je obdobný jako v předchozích fázích budování.



Dialogové okno „Úprava vlastností exkavace“ – Fáze budování 4

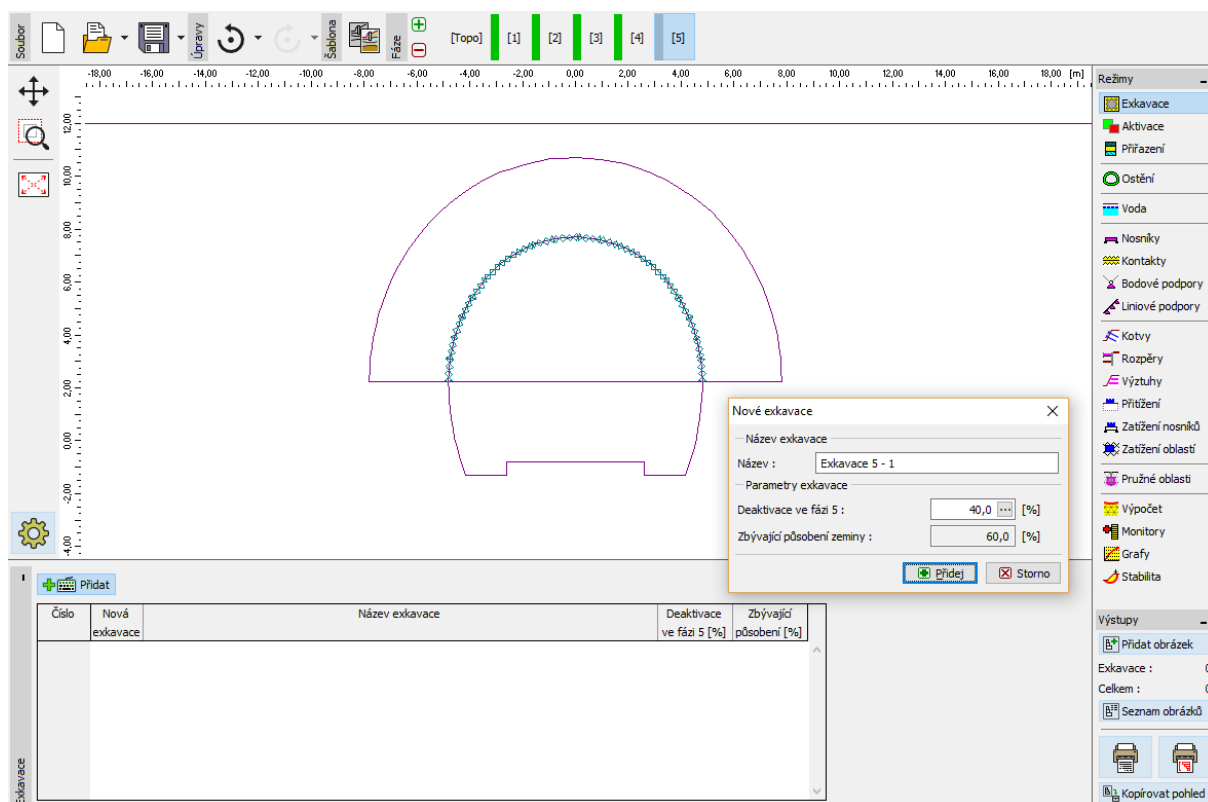
Poté provedeme výpočet a prohlédneme si průběh ohybového momentu na kalotě.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 4 (průběh ohybového momentu M [kNm/m])

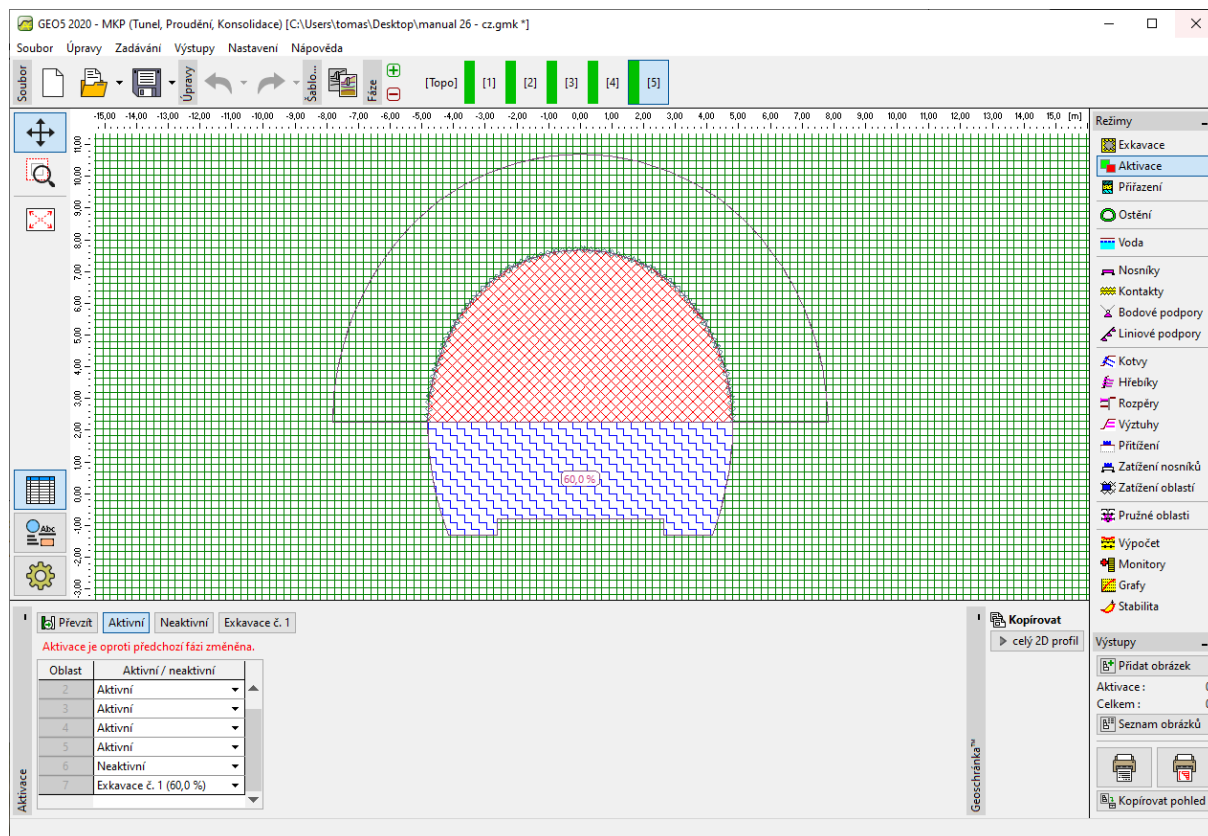
Fáze budování 5: modelování výrubu opěří tunelu, aktivace nevystrojeného výrubu

V dalším kroku přidáme 5. fázi budování. Poté v rámu „Aktivace“ zadáme výrub opěří tunelu jako novou exkavaci pro oblast č. 7 (pomocí tlačítka „Přidat“). V této fázi budování uvažujeme deaktivaci zeminy, resp. působení zatížení o velikosti 40 %. Zbývající působení zeminy, resp. masivu v okolí výrubu opěří tunelu je tedy 60 %.



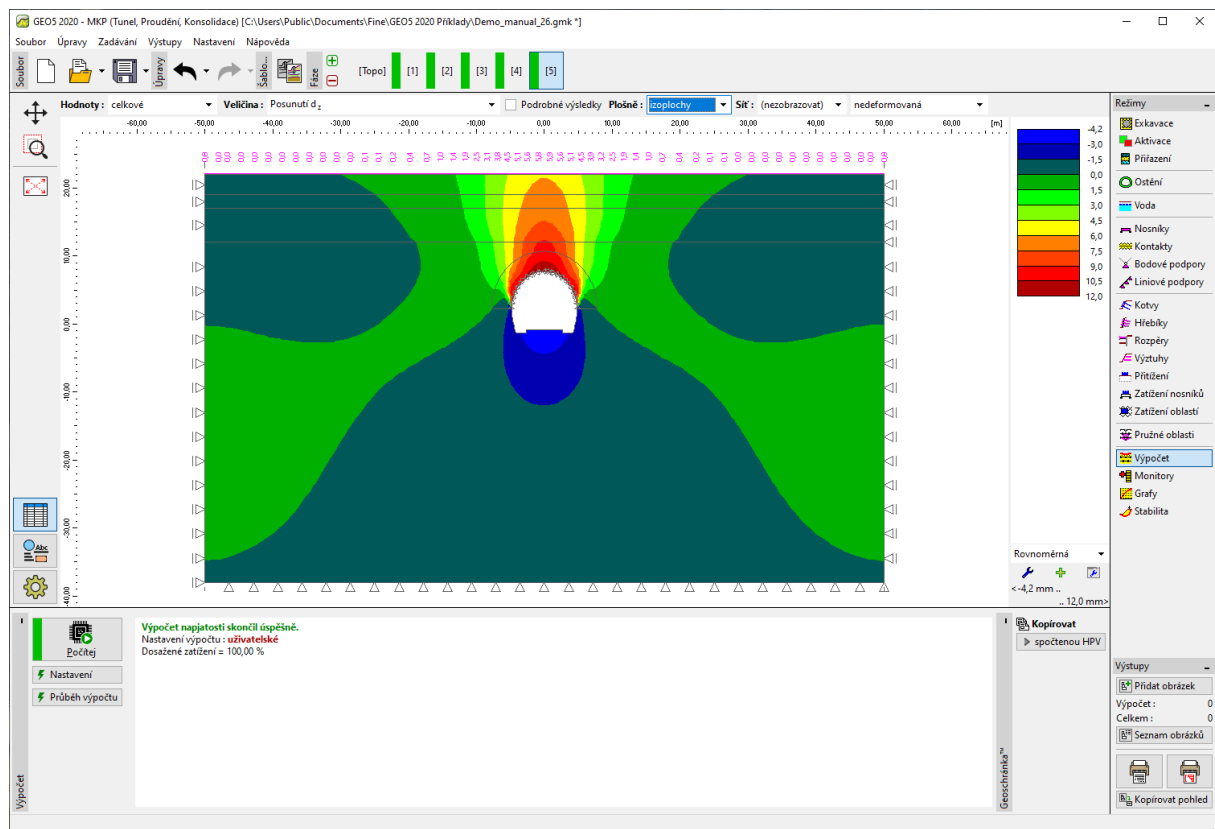
Dialogové okno „Nové exkavace“ – Fáze budování 5

Poznámka: Pro následující fáze budování je postup modelování této úlohy obdobný. Nejprve se provede primární ostění opěří tunelu z mladého stříkaného betonu, poté se aktivuje další procentuální podíl zatížení. V následující etapě se zvýší materiálové charakteristiky již vyzrálého stříkaného betonu a aktivuje se zbývající podíl zatížení.



Rám „Aktivace“ – Fáze budování 5 (aktivace 40 % zatížení na nevystrojený výrub opěří)

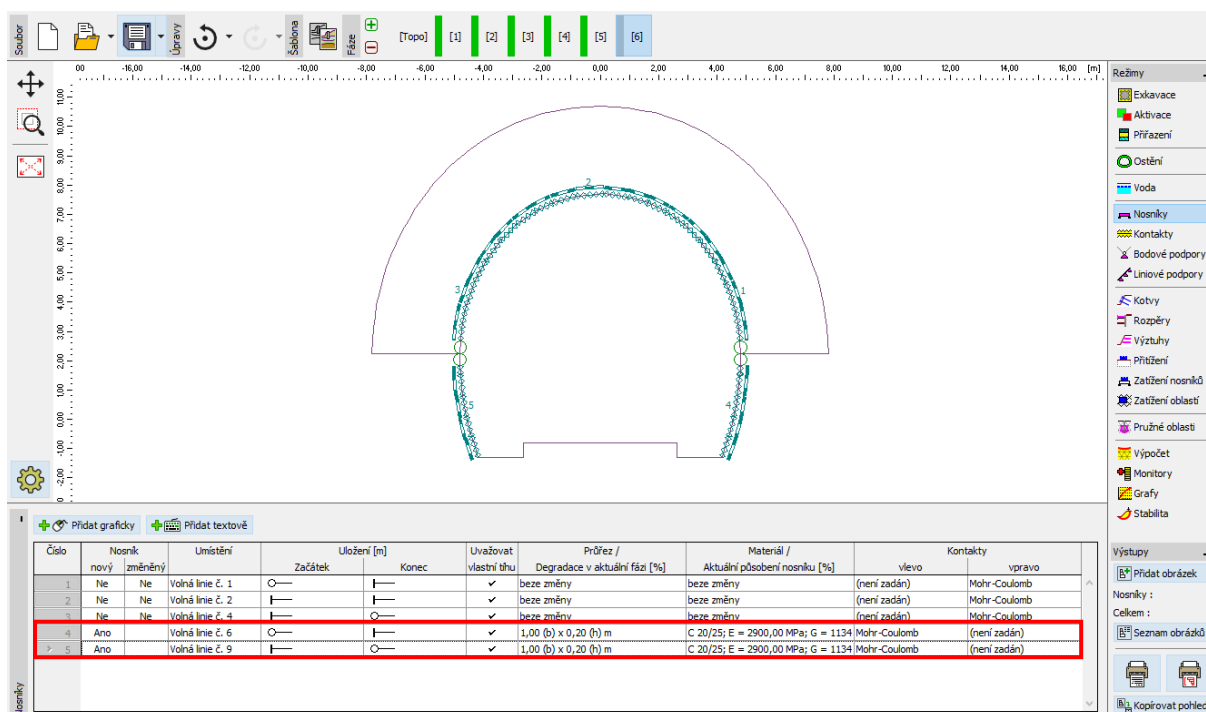
Následně provedeme výpočet.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 5 (svislá deformace d_z s poklesovou kotlinou)

Fáze budování 6: vyztužení stěn opěří tunelu primárním ostěním z mladého betonu

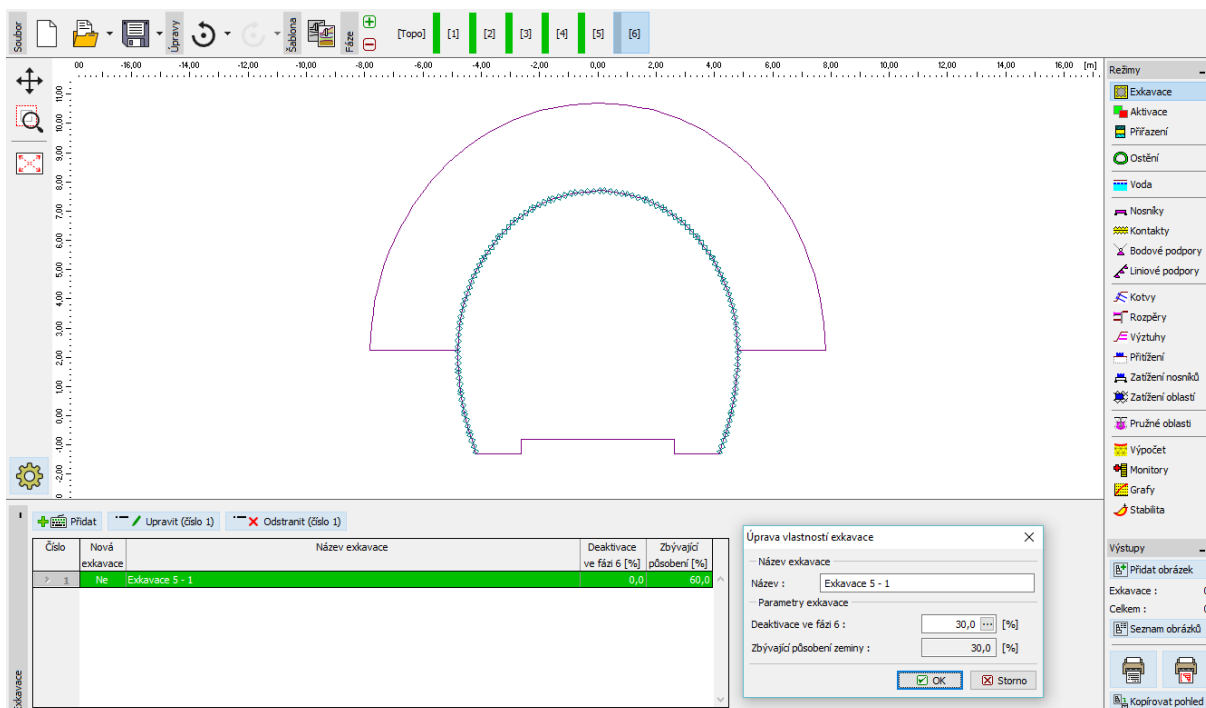
V 6. fázi budování zadáme vyztužení stěn opěří pomocí primárního ostění tloušťky 200 mm z mladého stříkaného betonu. Ostění kaloty zůstává v dalších fázích budování beze změn.



Zadání primárního ostění opěří pomocí nových nosníků – Fáze budování 6 (mladý beton)

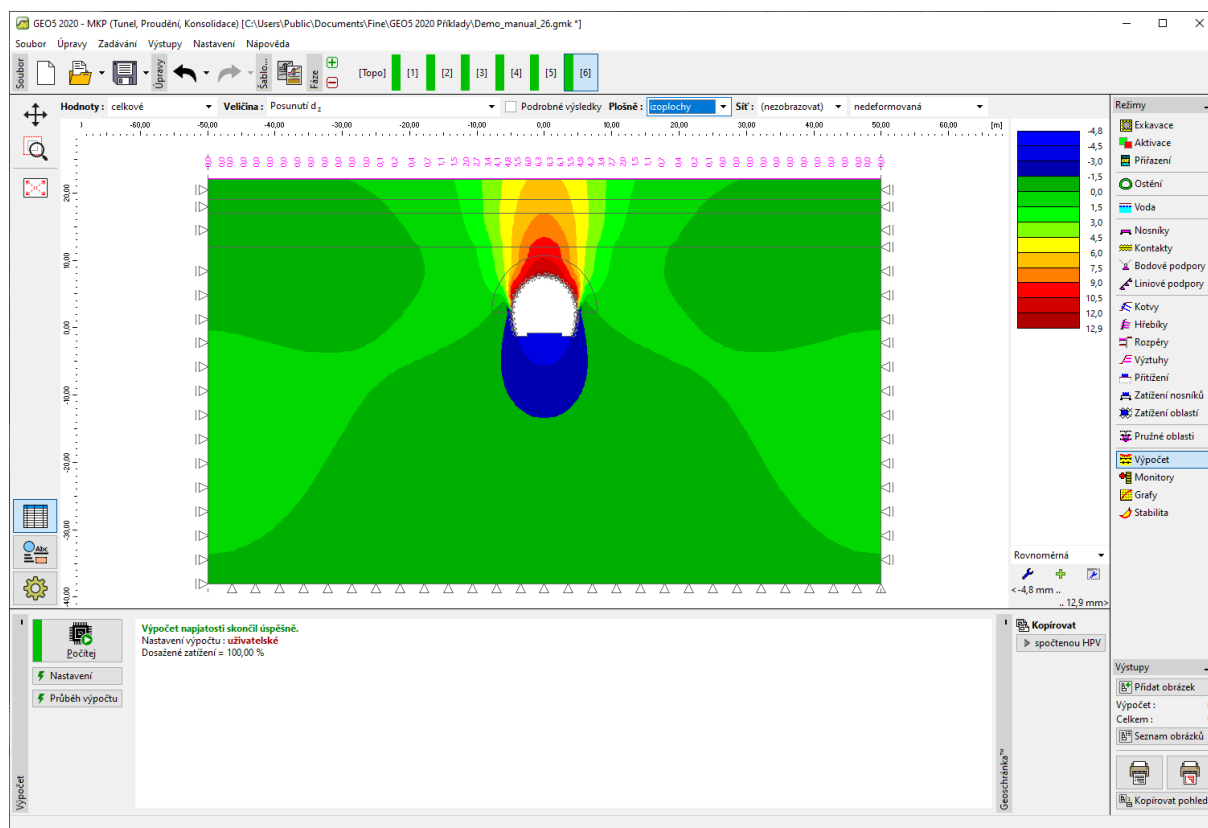
Poznámka: Uložení nosníků konců uvažujeme opět jako kloubové, styk kaloty a opěří není schopný přenášet zatížení ohybovým momentem (nejedná se o plné zmonolitnění styku). Rozměry průřezu opěří jsou stejné jako u stěn kaloty, tj. $b = 1,0$ m, $h = 0,2$ m. Kontakty u nových nosníků však musíme zadat opačně (více viz obrázky), protože orientace nosníků (stěn opěří) je záporná.

V této fázi budování provedeme aktivaci dalších 30 % zatížení horninového masivu.



Dialogové okno „Úprava vlastností exkavace“ – Fáze budování 6

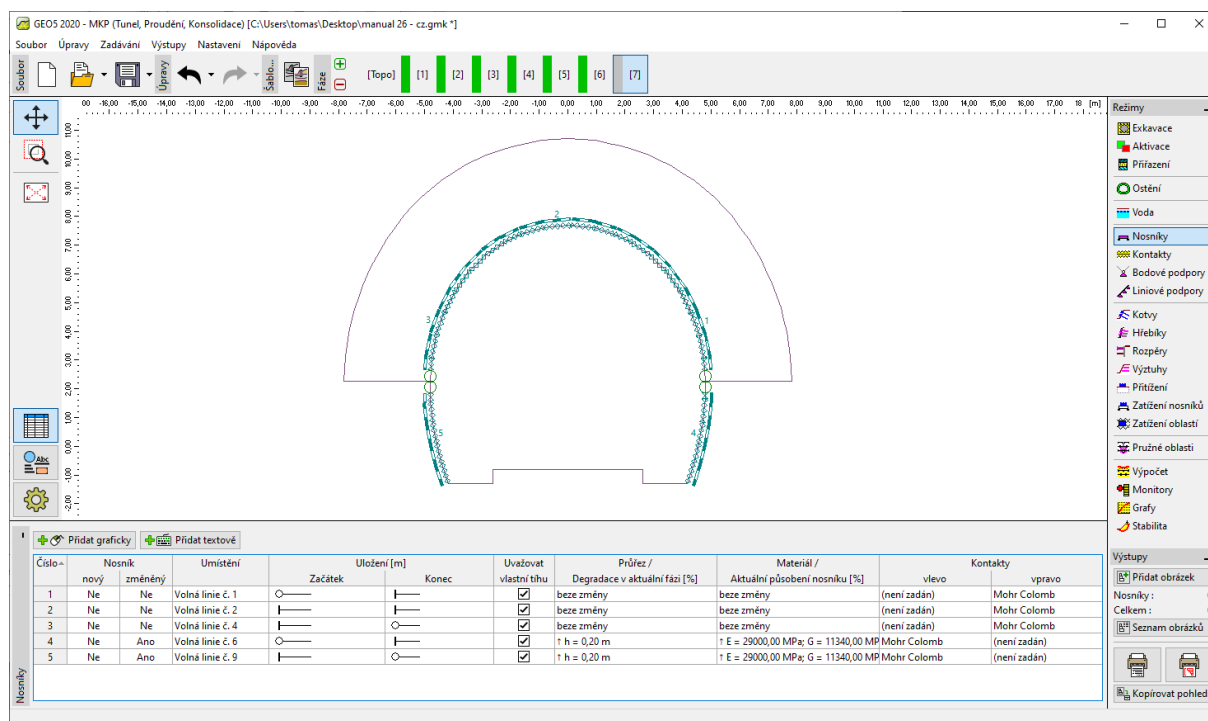
V poslední části této fáze opět provedeme výpočet.



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 6 (svislá deformace d_z s poklesovou kotlinou)

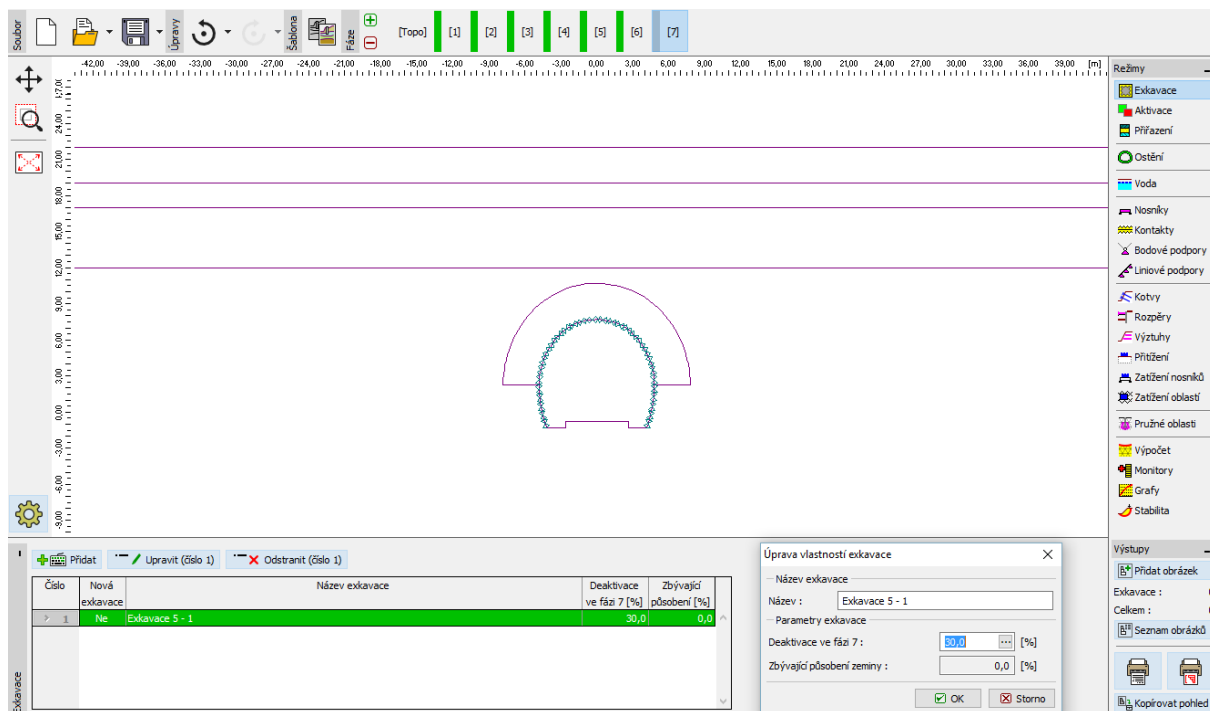
Fáze budování 7: zvýšení materiálových charakteristik již vyzrálého betonu (opěří)

V poslední fázi budování zvýšíme materiálové charakteristiky již vyzrálého betonu, který zajišťuje výrub opěří tunelu.

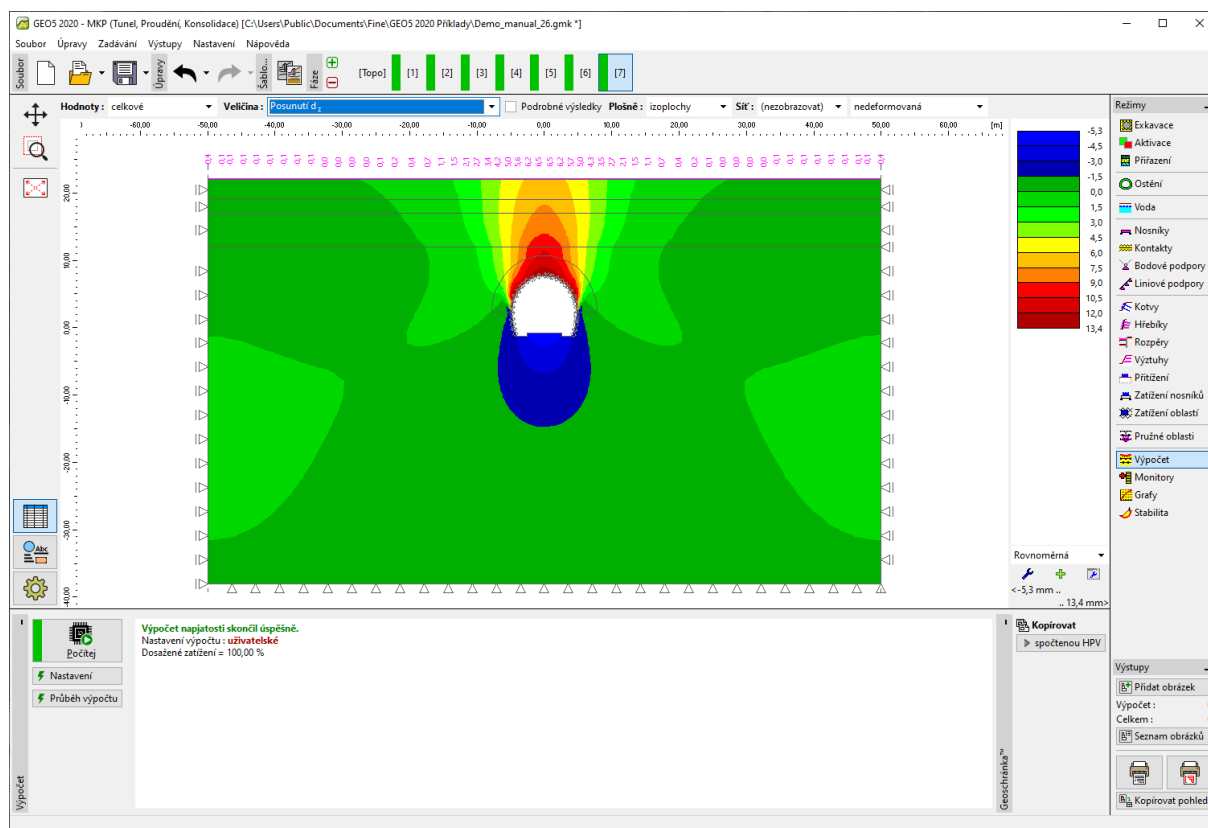


Úprava vlastností primárního ostění opěří – Fáze budování 7 (vyzrálý stříkaný beton)

Postup zadání pro zesílení nosníků je obdobný jako ve 4. fázi budování. Provedeme aktivaci zbývajících 30 % zatížení horninového masivu. Tímto krokem jsme odebrali veškerou zeminu z prostoru výrubu a zatížení na primární ostění tunelu (včetně stěn kaloty a opěří) tedy působí na 100 %. Následně provedeme výpočet poslední fáze budování.

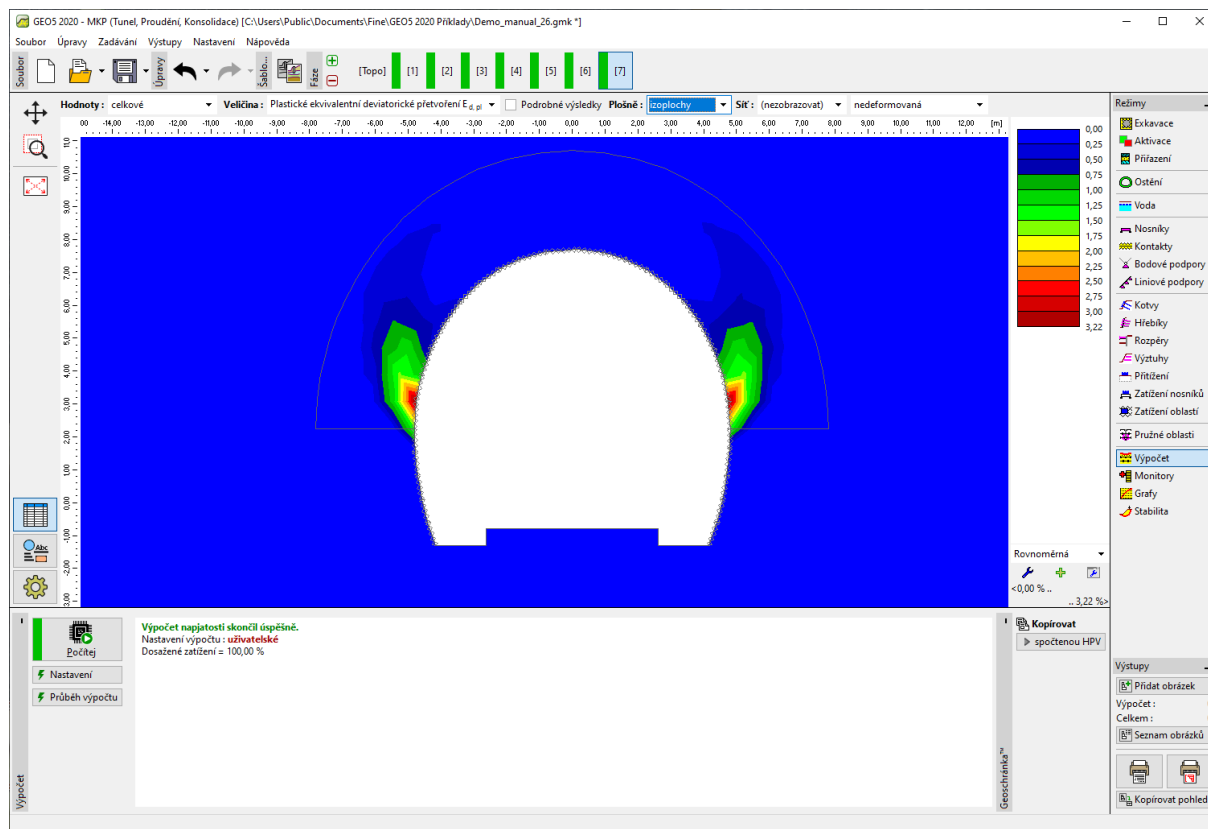


Nyní provedeme výpočet pro poslední fázi budování.

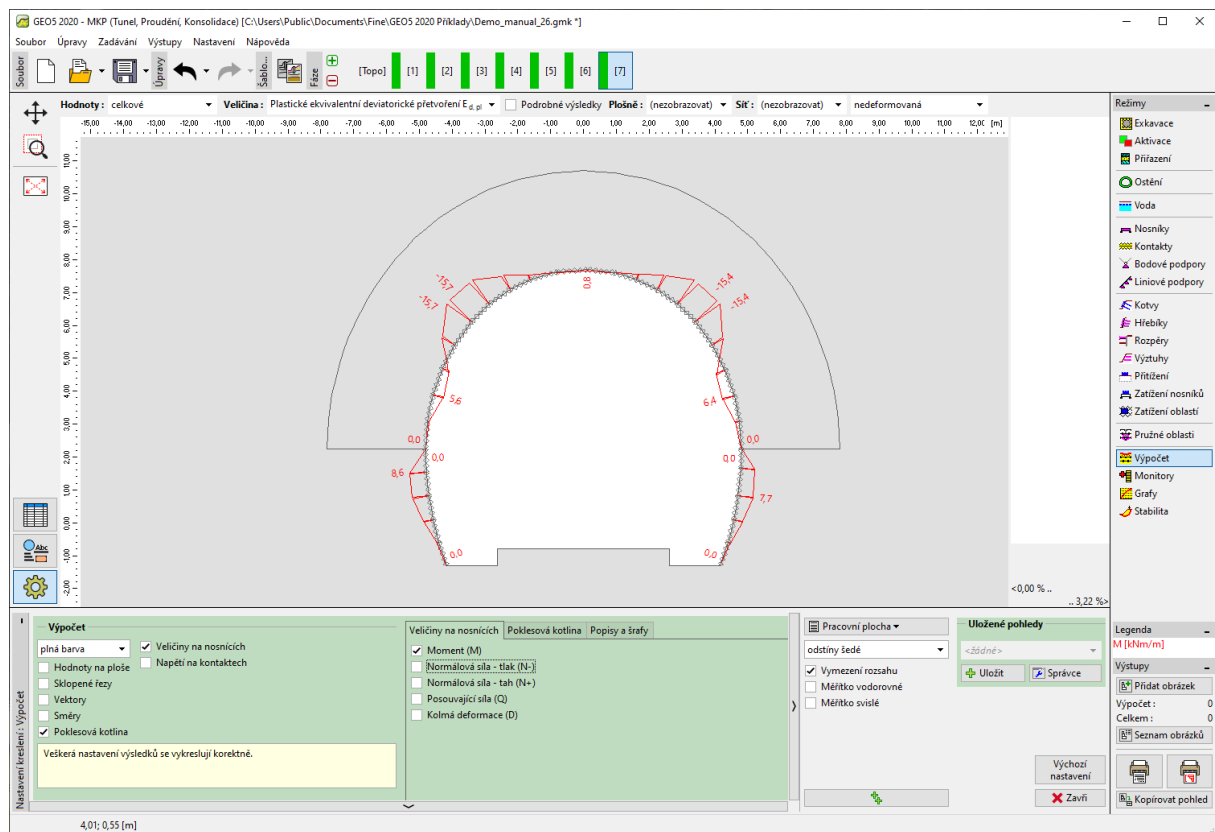


Dále si v této fázi budování zobrazíme ekvivalentní plastické deformace $\varepsilon_{eq,pl}$ a průběhy vnitřních sil pro ohybové momenty a normálové síly. Výsledky poté zaznamenáme do souhrnné tabulky.

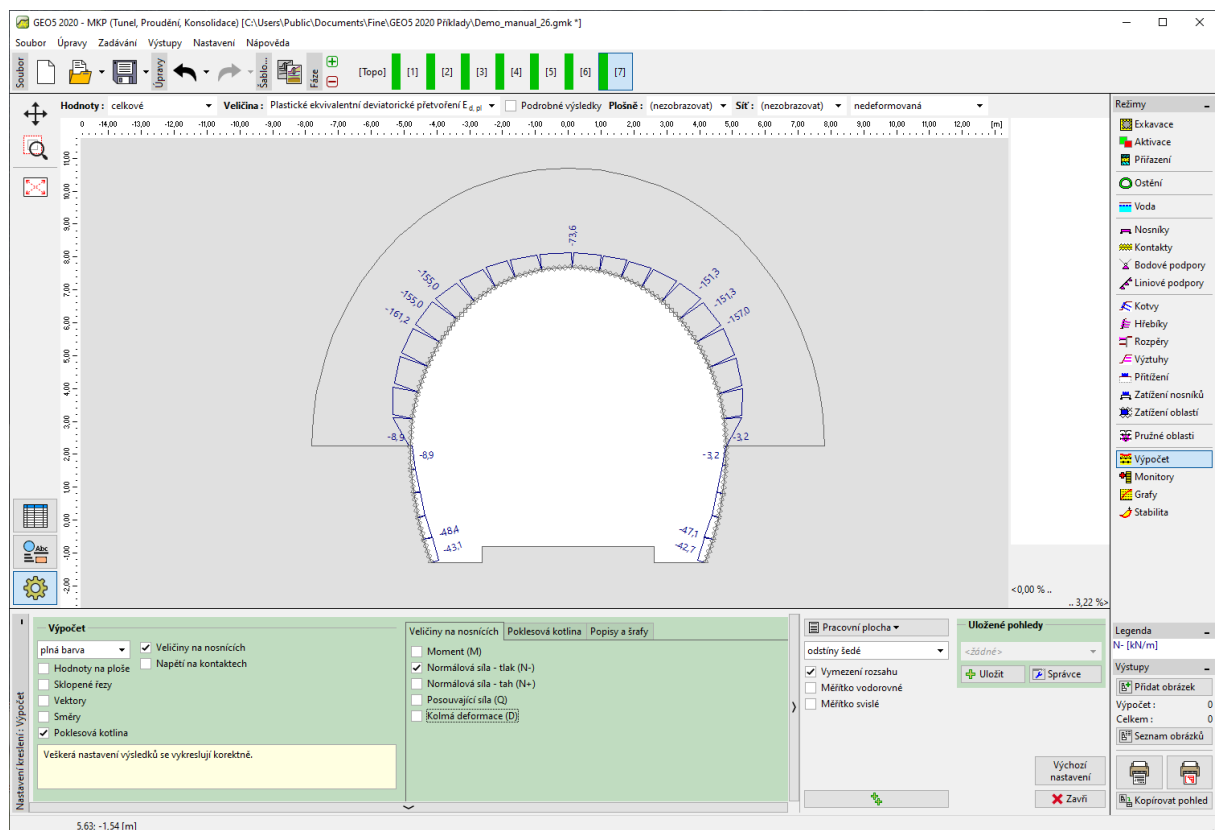
Z následujícího obrázku vyplývá, že ekvivalentní plastické deformace $\varepsilon_{eq,pl}$ nejsou nulové, což odpovídá chování konstrukce dle nelineárního materiálového modelu (Mohr – Coulomb).



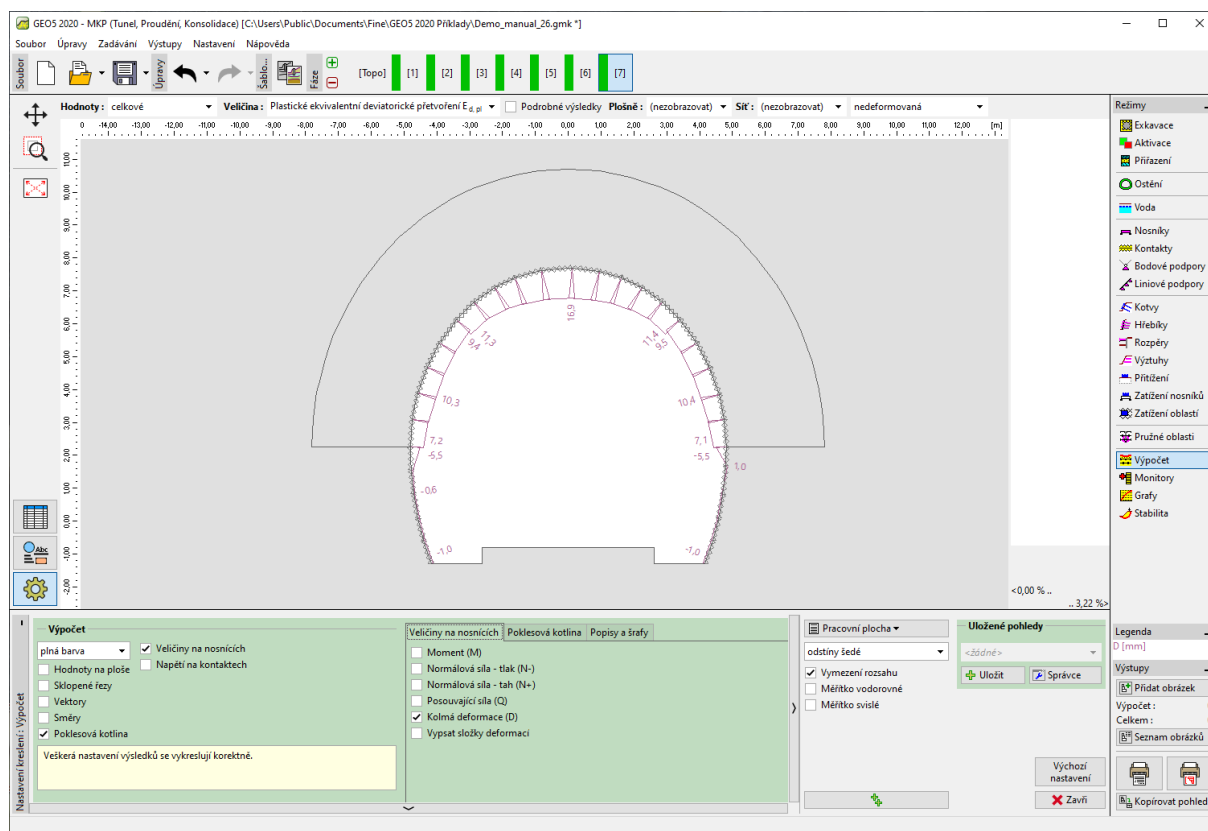
Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (ekvivalentní deformace $\varepsilon_{eq,pl}$ podle MC modelu)



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (průběh ohybového momentu M [kNm/m])



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (průběhy normálových tlakových sil N^- [kN/m])



Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (zobrazení kolmé deformace)

Vyhodnocení výsledků

V následující tabulce jsou zobrazeny hodnoty extrémů vnitřních sil na nosnících (primárním ostění tunelu) pro 7. fázi budování. Jedná se o hodnoty ohybových momentů, posouvajících a normálových sil. Tento výpočet jsme provedli pro plastický materiálový model (Mohr – Coulomb) s lokálním zahuštěním trojúhelníkových prvků.

Materiálový model	Fáze budování 7 – Vnitřní síly		
	N [kN/m]	M [kNm/m]	Q [kN/m]
Mohr – Coulomb	– 161,2	– 15,7	– 1,0
	– 3,2	+ 6,4	+ 16,9

Extrémní hodnoty vnitřních sil na primárním ostění tunelu – Fáze budování 7

V této tabulce jsou zaznamenány celkové hodnoty svislých a vodorovných deformací d_z , d_x [mm] primárního ostění tunelu pro jednotlivé fáze budování.

Fáze budování	Hodnoty celkových deformací d_z , d_x [mm]			
	$d_{z,min}$	$d_{z,max}$	$d_{x,min}$	$d_{x,max}$
1	–	–	–	–
2	– 1,6	+ 1,8	– 0,46	+ 0,46
3	– 3,1	+ 6,4	– 2,8	+ 2,8
4	– 4,6	+ 11,9	– 4,8	+ 4,9
5	– 4,2	+ 12,0	– 5,0	+ 5,1
6	– 4,8	+ 12,9	– 5,5	+ 5,5
7	– 5,3	+ 13,4	– 5,7	+ 5,8

Hodnoty deformací d_z , d_x na primárním ostění tunelu (extrémy) – Fáze budování 1 až 7

Závěr

V této úloze jsme názorně demonstrovali modelování primárního ostění reálného tunelu pomocí metody konečných prvků. Ražba tunelu je provedena pomocí NRTM a probíhá po určitých částech. Při odtěžení zeminy dochází k odlehčení masivu a deformaci zeminy, resp. horniny směrem do výrubu.

Primární ostění je vyztuženo kari sítěmi (svařované sítě z betonářské výztuže) z ocelových prutů s průměrem 8 mm a velikostí oka 150 mm a ocelovými příhradovými žebry o 3 nosných prutech. Zavedení kari sítí do numerického modelu MKP (homogenizace betonu a výztuže) je diskutabilní a většinou se uvažuje až při samostatném posouzení ostění.

Na vypočtené extrémy vnitřních sil by se následně ve statickém programu (např. FIN EC – BETON 2D) posoudila výztuž primárního ostění tunelu jako kombinace namáhání průřezu ohybovým momentem a normálovou silou (podle interakčního diagramu).

Poznámka: Výpočet podzemní konstrukce bez použití nosíkových a kontaktních prvků podle lineárního materiálového modelu (s elastickým chováním) byl popsán v kapitole 23. Namáhání ostění kolektoru (viz <http://www.fine.cz/inzenyrske-manualy/>).