

Numerické modelování tunelu metodou NRTM

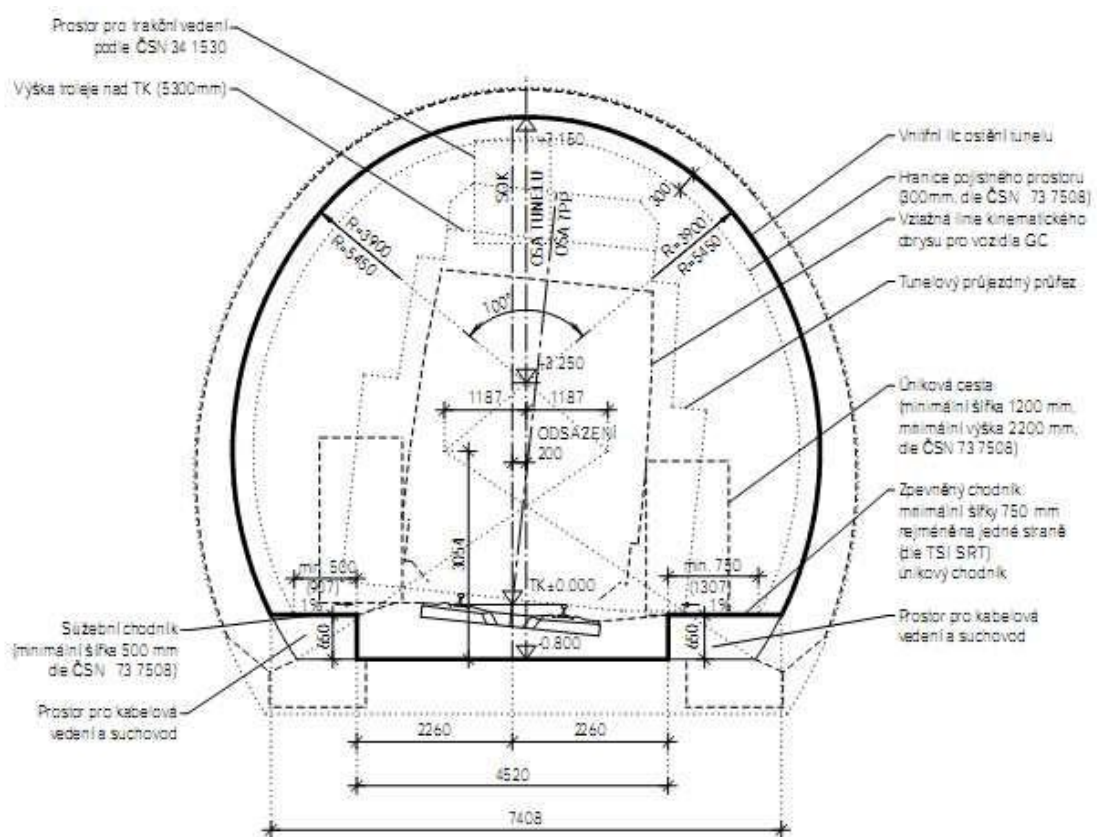
Program: MKP - Tunel

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]	E_{ur} [MPa]	K_0 [–]	γ_{sat} [kN/m ³]
Písek hlinitý (S4 / SM)	0 – 3	19	29	10	0,3	10	10	30	0,5	19
Hlinitý štěrk (G4 / GM)	3 – 5	19	33	8	0,3	70	70	210	0,5	19
Silně zvětralá břidlice (R5)	5 – 19,75	20	29	30	0,33	45	45	135	0,5	20
Navětralá až zdravá břidlice (R3)	19,75 a více	22	38	250	0,25	350	350	1050	0,35	22
Prokotvená oblast (R5)	–	20	29	63	0,33	45	45	135	0,5	20

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

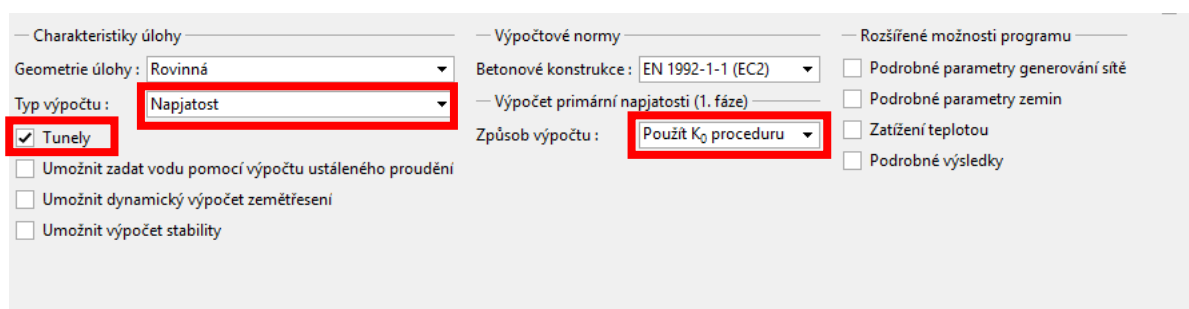
- Fáze budování 6: vyztužení stěn opěrů primárním ostěním z mladého betonu
- Fáze budování 7: zvýšení materiálových charakteristik již vyzrálého betonu (opěrů)
- Výsledky, závěr: poklesová kotlina povrchu terénu, přetvoření horninového masivu, průběhy vnitřních sil a deformace primárního ostění tunelu, 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

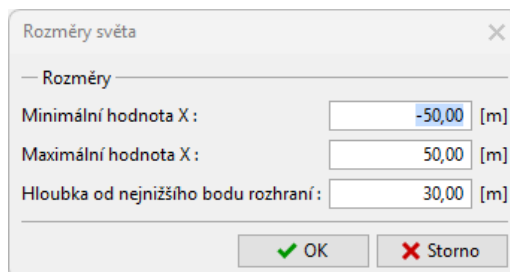
V rámu „Nastavení“ nastavíme způsob výpočtu 1. fáze budování jako K_0 proceduru. Typ výpočtu je „Napjatost“. Dále zde zapneme režim „Tunely“, který nám umožňuje modelovat reálný průběh výstavby primárního ostění tunelu.



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).

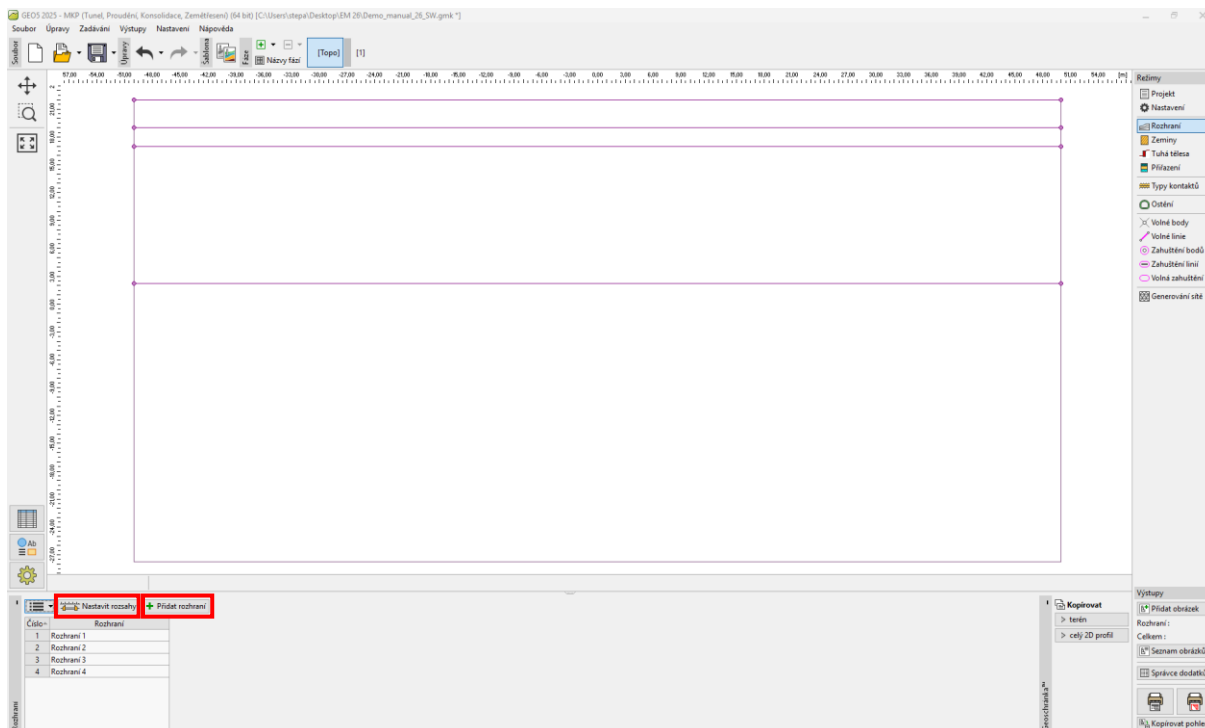
Dále v rámu „Rozhraní“ přes tlačítko „Nastavit rozsahy“ zadáme velikost numerického modelu řešené úlohy a rozhraní vrstev přes tlačítko „Přidat rozhraní“. Pro tuto úlohu zvolíme rozměry modelu $(-50\text{ m}; 50\text{ m})$, vyšetřovanou hloubku vrstvy zadáme 30 m, rozhraní vrstev viz. Seznam bodů.



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	2,25
50,0	22,0	50,0	19,0	50,0	17,0	50,0	2,25

Seznam bodů pro jednotlivá rozhraní vrstev zemin a hornin



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).

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:

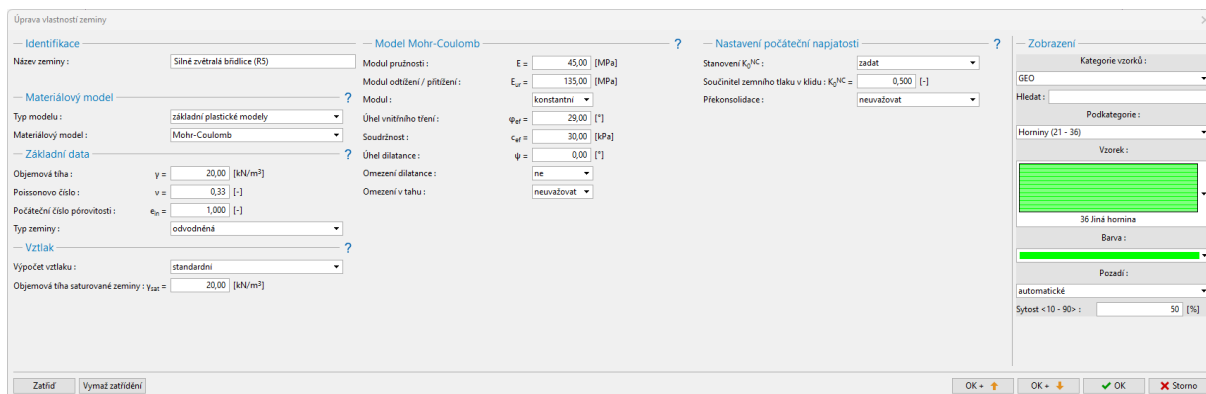
N_u	únosnost svorníku [kN],
A_k	plocha připadající na jeden svorník [m^2],
ϕ_{ef}	úhel vnitřního tření horniny [$^\circ$],
γ_{kc}	součinitel spolehlivosti kotvení [—].

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 $E = E_{def}$. Modul odtížení je následně uvažován jako $E_{ur} = 3E$

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



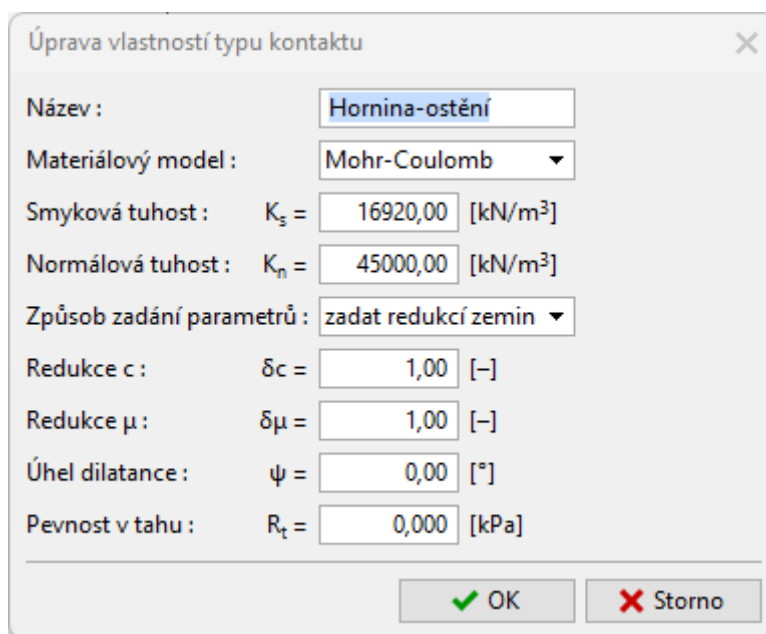
Dialogové okno „Přidání nových zemín“



Rám „Přiřazení“

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: $K_s = 16\,920 \text{ kN/m}^3$,
- Normálová tuhost: $K_n = 45\,000 \text{ kN/m}^3$,
- Redukce zemin: $\delta c = \delta \mu = 1,0$.



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 paží 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.

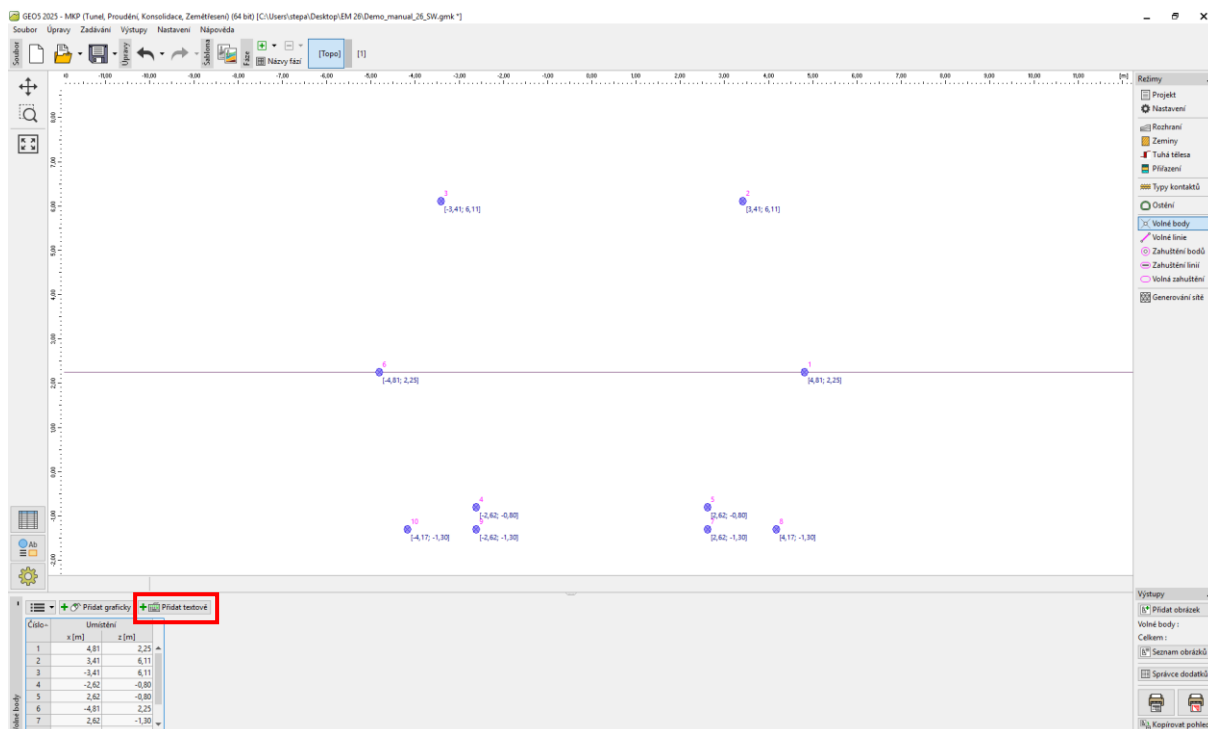
Topologie (část 2): modelování ostění a oblasti prokotvené svorníky

Přejdeme do rámu „Vlné body“ a pomocí tlačítka „Přidat textově“ zadáme body výrubu.

Tvar výrubu je zadán pomocí deseti volných bodů (viz *tabulka 2*).

Tabulka 2 – Vlné 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

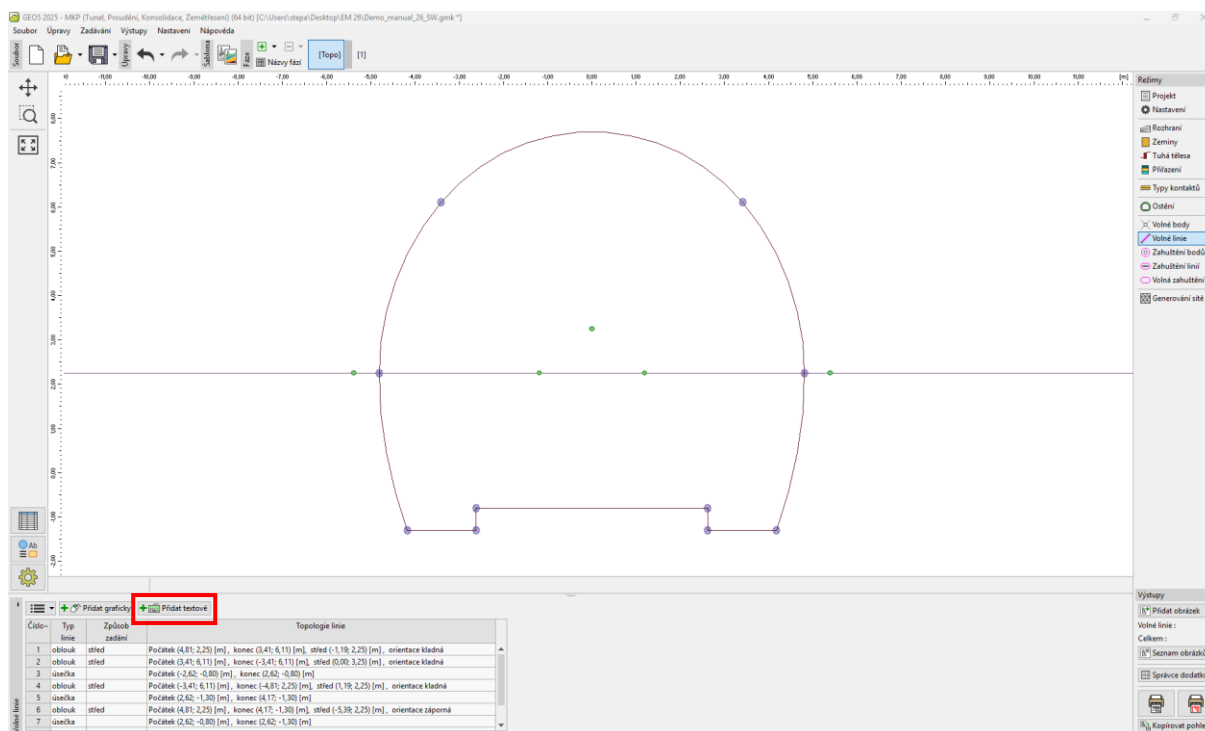
Poté přejdeme do rámu „Vlné linie“, kde pomocí úseček a oblouků viz. Tabulka 3 propojíme jednotlivé body.

Tabulka 3 – Vlné 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

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*).

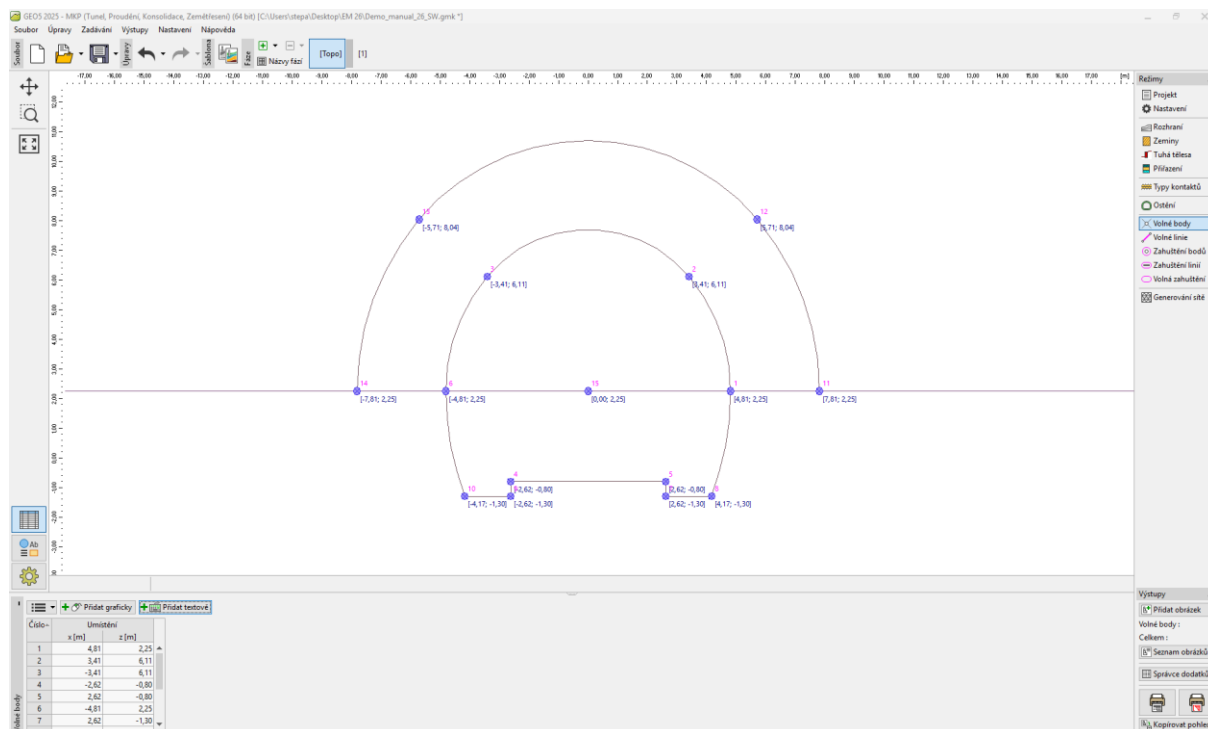
Tabulka 4 – Volné body v oblasti vyztužené svorníky

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
11	oblouk	poloměr	Počátek – bod 14, konec – bod 13 Poloměr – 9,0 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý
12	oblouk	poloměr	Počátek – bod 13, konec – bod 12 Poloměr – 7,45 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý
13	oblouk	poloměr	Počátek – bod 12, konec – bod 11 Poloměr – 9,0 m, orientace – záporná Sevřený úhel – ostrý

Nakonec v rámu „Vолné body“ 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

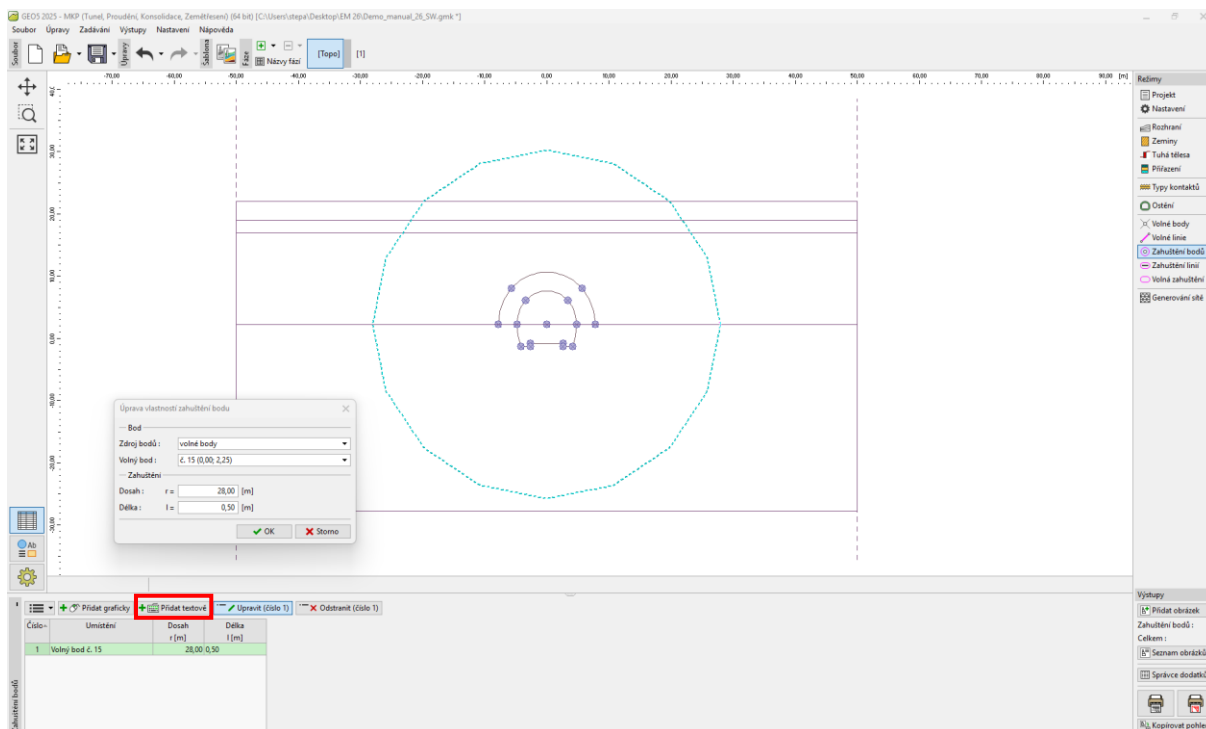
V poslední části zadávání topologie konstrukce přejdeme k vygenerování a zahuštění sítě konečných prvků.

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 $r = 28 \text{ m}$.

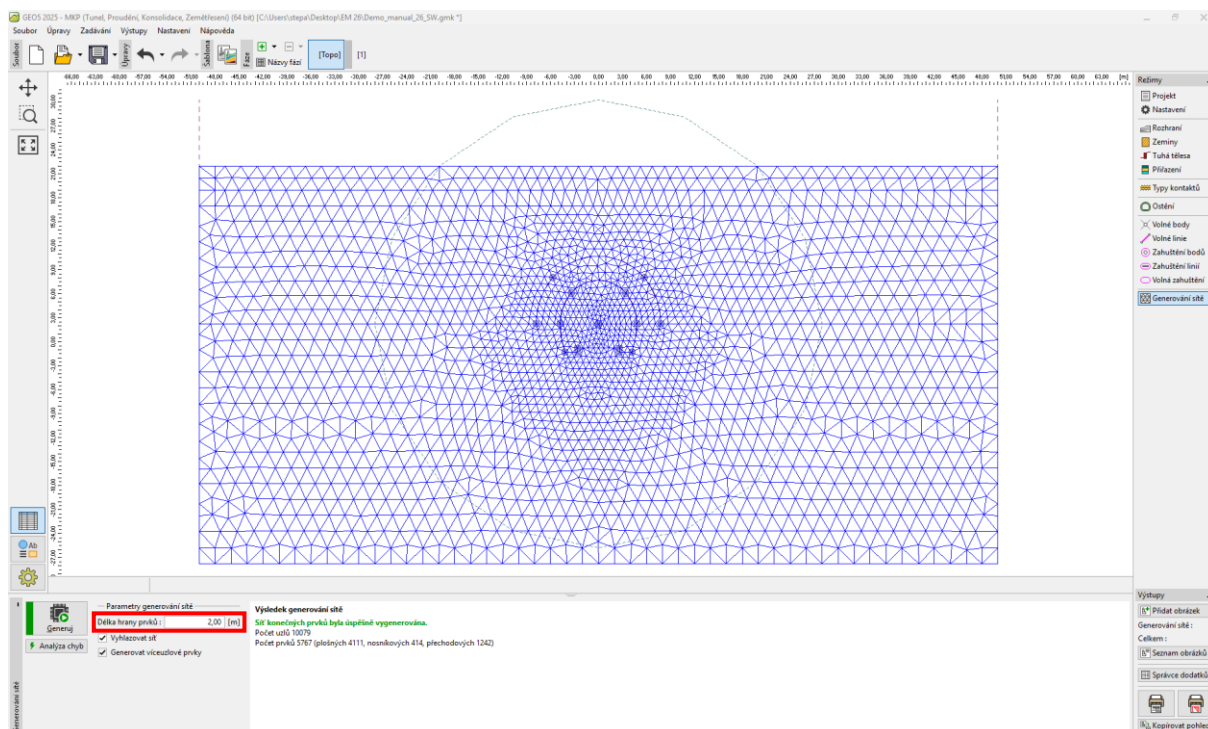
To provedeme v rámu „Zahuštění bodů“ přes tlačítko „Přidat graficky“ nebo „Přidat textově“ – vybereme bod č. 15 a zadáme $r = 28 \text{ m}$ a $l = 0,5 \text{ m}$.

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/inzenyrské-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 navrhujeme 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

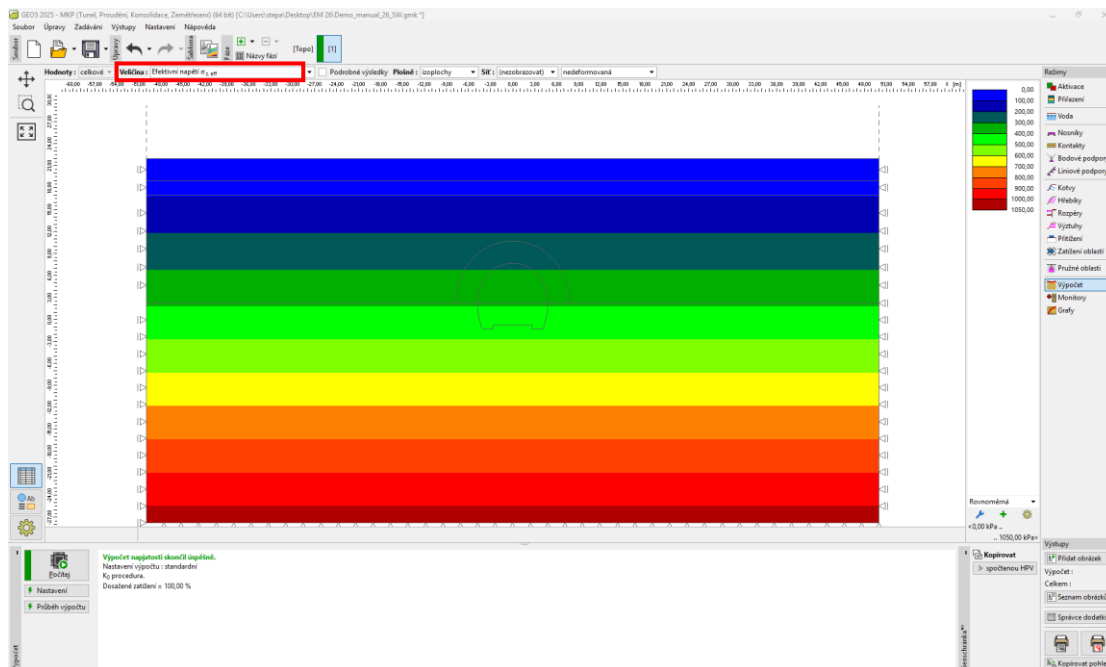
Poznámka: Ražba tunelu je modelována jako rovinný model, který plně nezohledňuje prostorové změny napjatosti horninového masivu probíhající během ražby v oblasti čelby. Při ražbě je dočasně nevystrojený výrub podporován horninovým masivem před čelbou (podélná, resp. příčná horninová klenba) a dříve vystrojenou 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

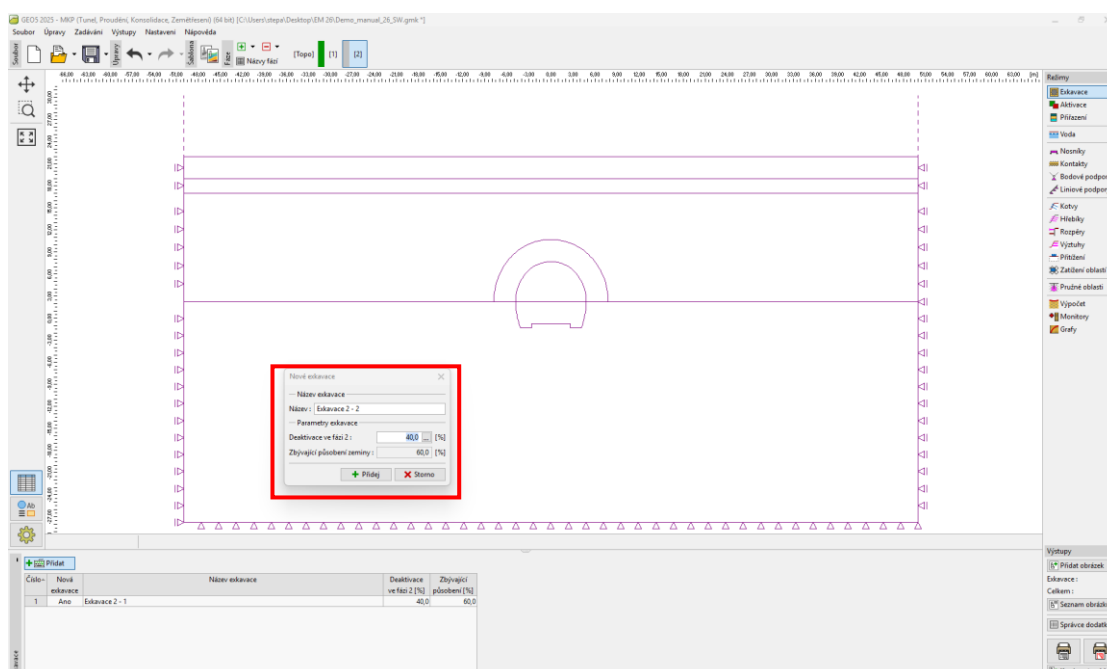
Po vygenerování sítě KP přepneme do 1. fáze budování a poté provedeme výpočet primární geostatické napjatosti masivu. Nastavení výpočtu ponecháme pro všechny fáze budování jako „Standardní“ (více viz Help – F1).



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. V rámu „Aktivace“ přiřadíme nastavenou exkavaci „Exkavace č.1 (60%)“ k oblasti č. 5 (kalota tunelu).



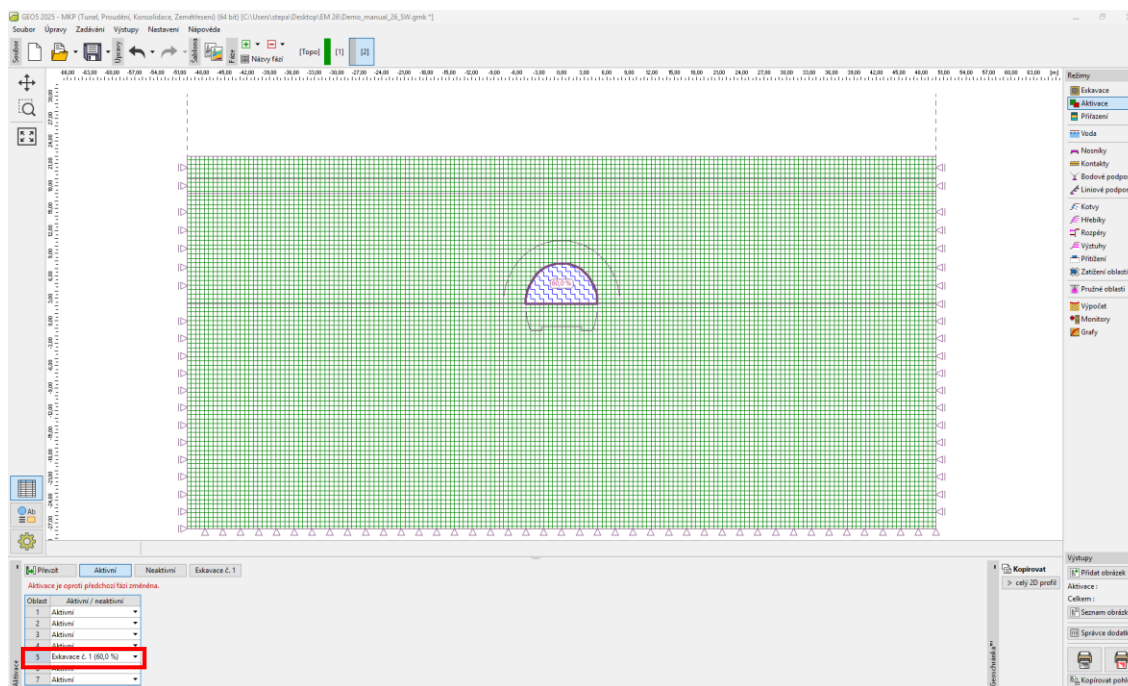
Dialogové okno „Nové exkavace“ – Fáze budování 2

Poznámka: V inženýrské praxi se členění čelby (jednotlivé exkavace výrubu) provádí pomocí procentuálního poměru deaktivace zeminy ke zbývajícimu 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 %.

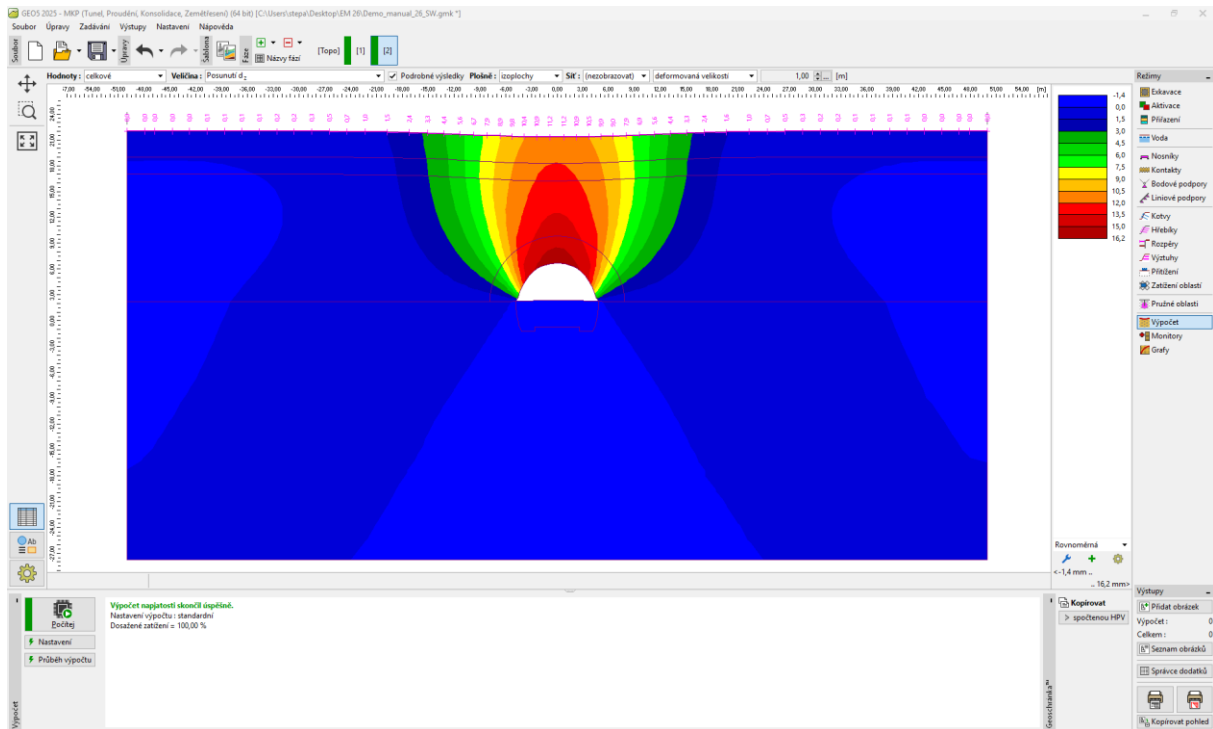
- modelování výrubu opěří tunelu, aktivace nevystrojeného výrubu: 40 % / 60 %,
- vyztužení stěn opěří primárním ostěním z mladého betonu: 30 % / 30 %,
- zvýšení materiálových charakteristik vyzrálého betonu (opěří): 30 % / 0 %.

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 ($E=2900$ MPa, $G = 1134$ MPa), přes tlačítko „Přidat graficky“, postupně vybereme jednotlivé části ostění a zadáme mu parametry.

Úprava vlastností nosníku

Topologie

Umístění: volná linie

Volná linie: Volná linie č. 1

Parametry

☒ Uvažovat vlastní tíhu

Průřez a materiál

Typ průřezu: obdélníková stěna

Výška průřezu: $h = 0,20$ [m]

Šířka průřezu: $b = 1,00$ [m]

Typ materiálu: beton

Název: C 20/25

$I_y = 6,67E-04$ m⁴/m; $A = 2,00E-01$ m²/m; $E = 2900,00$ MPa; $G = 1134,00$ MPa

Kontakty

☐ Uvažovat kontakt vlevo

☒ Uvažovat kontakt vpravo

Typ kontaktu: Hornina-ostění

OK +

OK

Storno

Editor materiálu - Beton

Popis materiálu

Název: C 20/25

Charakteristiky materiálu

Základní materiálové charakteristiky

Modul pružnosti	$E_{cm} = 2900,00$ MPa
Modul pružnosti ve smyku	$G = 1134,00$ MPa
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha_t = 0,000010$ 1/K
Měrná tíha	$\gamma = 25,00$ kN/m ³

Speciální materiálové charakteristiky

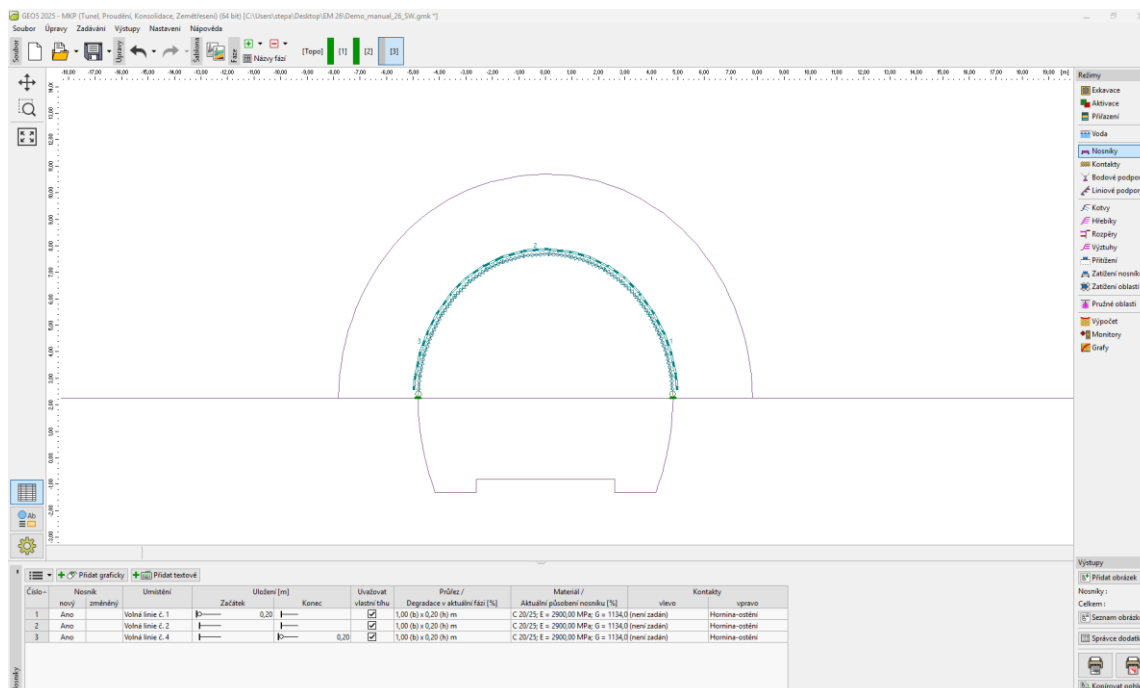
Válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 20,00$ MPa
Pevnost v tahu	$f_{ctm} = 2,20$ MPa

☐ Přepočítávat hodnoty

Třída cementu: ☐ S ☒ N ☐ R

OK

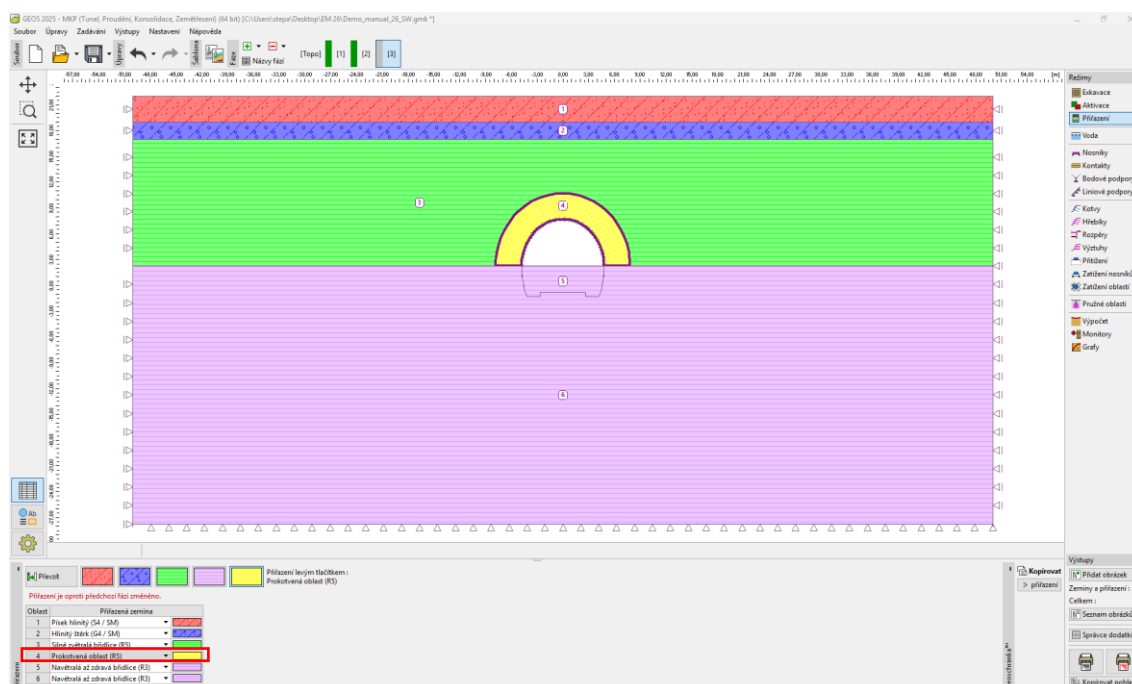
Storno



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

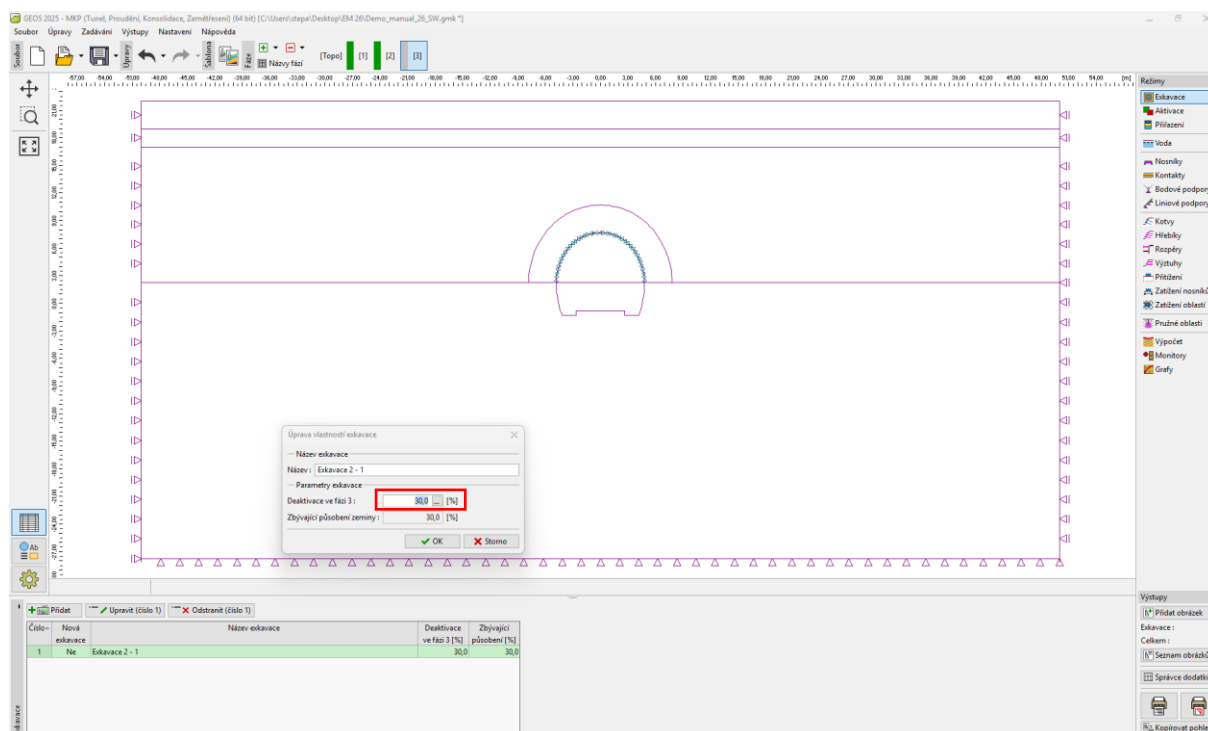
Poznámka: Uložení konců nosníků uvažujeme jako patičku, na spodních koncích nosníků je tedy nulový ohybový moment. Patička je speciální typ uložení, který oproti kloubovému zajišťuje lepší stabilitu a konvergenci při výpočtu. (více viz Help – F1).

V rámu „Přiřazení“ změníme horninu v oblasti č. 4 (na možnost „prokotvené R5“), ve které budeme uvažovat její prokotvení pomocí hydraulicky upínaných ocelových svorníků (viz obrázek).



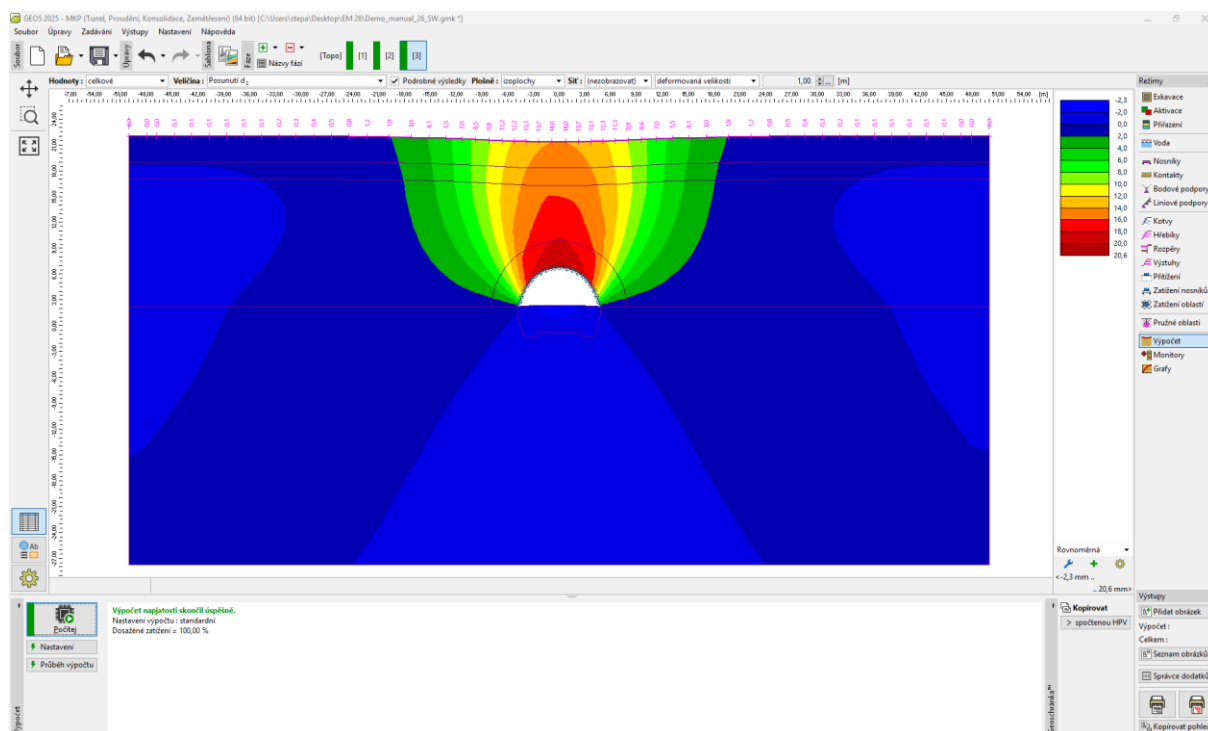
Rám „Přiřazení“ – Fáze budování 3 (prokotvená oblast se svorníky)

Dále přejdeme v rámu „Exkavace“ 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

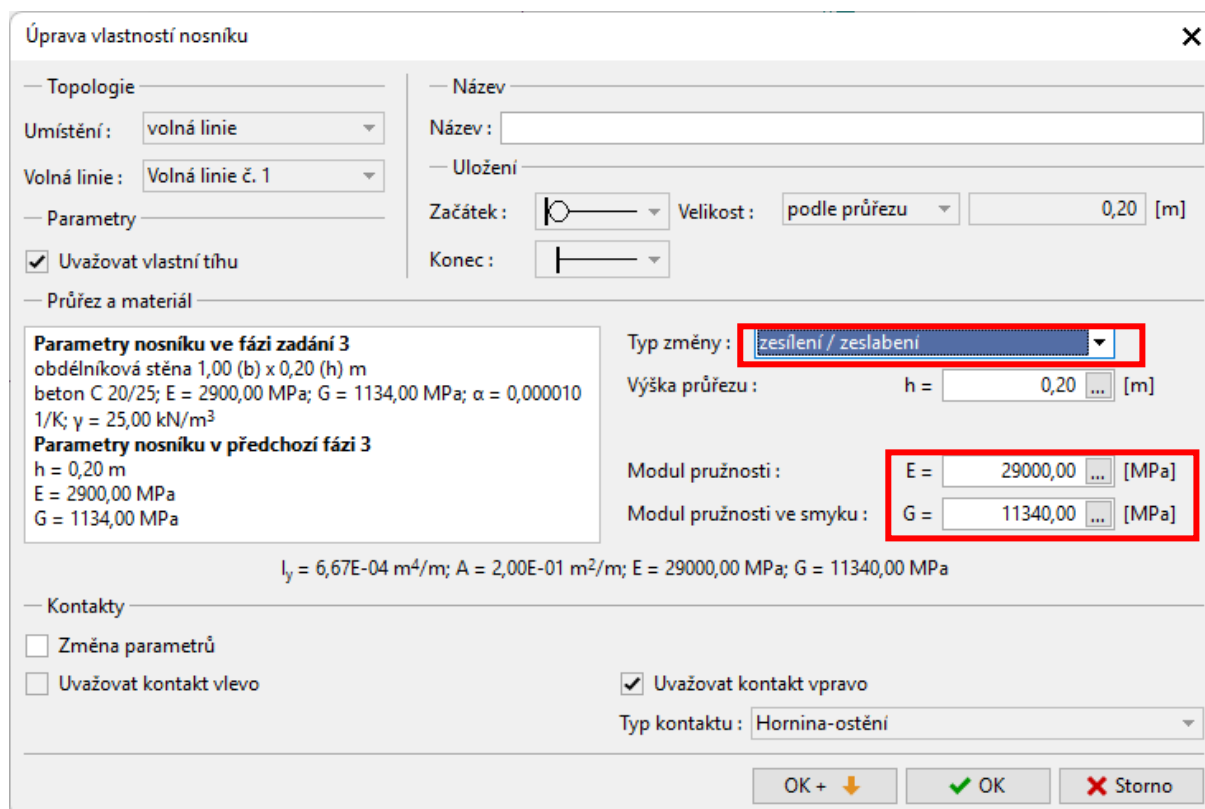
Poté znovu provedeme výpočet.



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

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

Ve 4. fázi budování zvýšíme materiálové charakteristiky již vyzrálého betonu, který zajišťuje výrub kaloty. V rámu „Nosníky“ upravíme jednotlivé části ostění přes tlačítko „Upravit“ a v dialogovém okně „Úprava vlastností nosníku“ zvolíme možnost „Zesílení“ a zadáme příslušné hodnoty modulů pružnosti ($E = 29000 \text{ MPa}$, $G = 11340 \text{ MPa}$). Ostatní parametry již ponecháme beze změn.



Úprava vlastností nosníku

— Topologie —
Umístění: volná linie
Volná linie: Volná linie č. 1

— Parametry —
☒ Uvažovat vlastní tíhu

— Průřez a materiál —

Parametry nosníku ve fázi zadání 3
obdélníková stěna 1,00 (b) x 0,20 (h) m
beton C 20/25; $E = 29000,00 \text{ MPa}$; $G = 11340,00 \text{ MPa}$; $\alpha = 0,000010$
 $1/K$; $\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$

Parametry nosníku v předchozí fázi 3
 $h = 0,20 \text{ m}$
 $E = 29000,00 \text{ MPa}$
 $G = 11340,00 \text{ MPa}$

Typ změny: **zesílení / zeslabení**

Výška průřezu: $h = 0,20 \text{ [m]}$

Modul pružnosti: **$E = 29000,00 \text{ [MPa]}$**

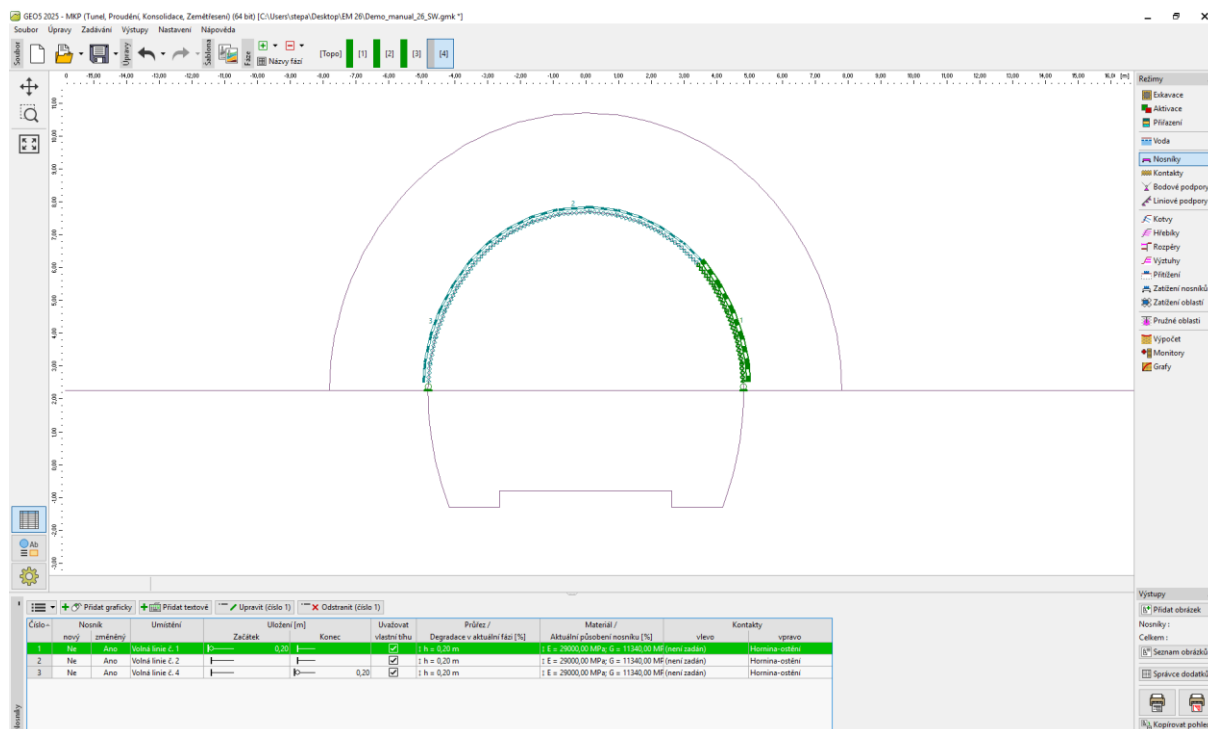
Modul pružnosti ve smyku: **$G = 11340,00 \text{ [MPa]}$**

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

— Kontakty —
☐ Změna parametrů
☐ Uvažovat kontakt vlevo
☒ Uvažovat kontakt vpravo
Typ kontaktu: Hornina-ostění

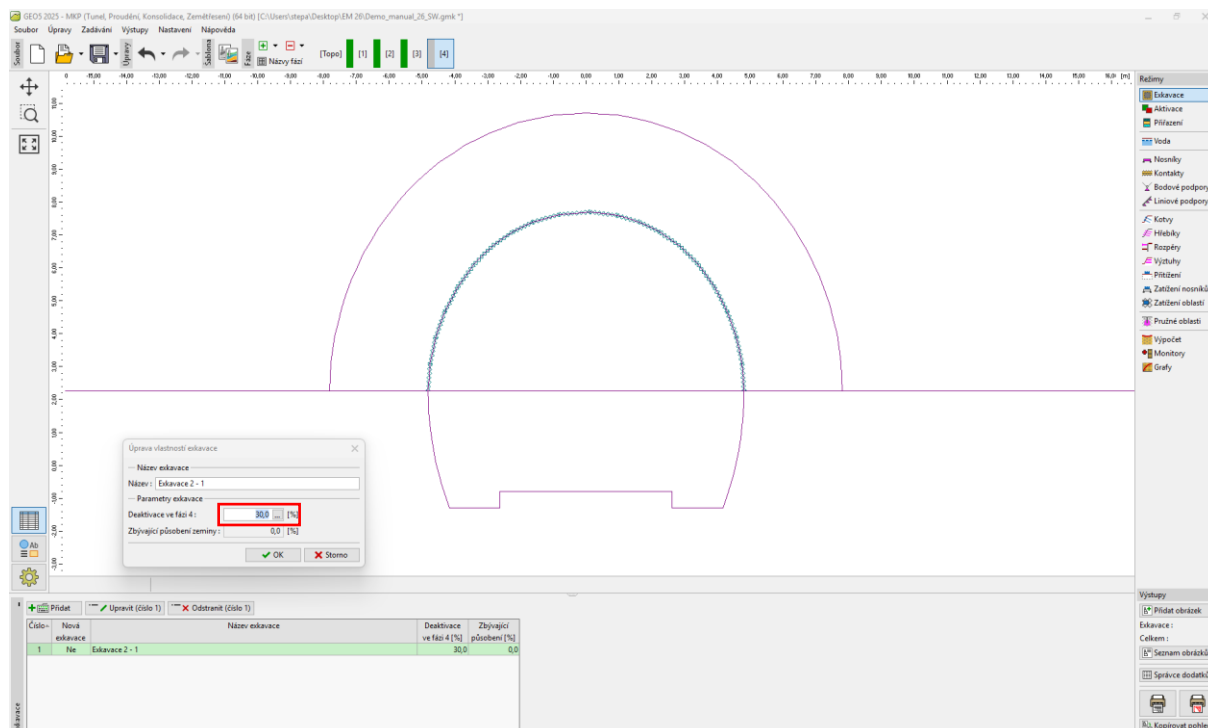
OK +   OK  Storno

Dialogové okno „Úprava vlastností nosníku“ – Fáze budování 4



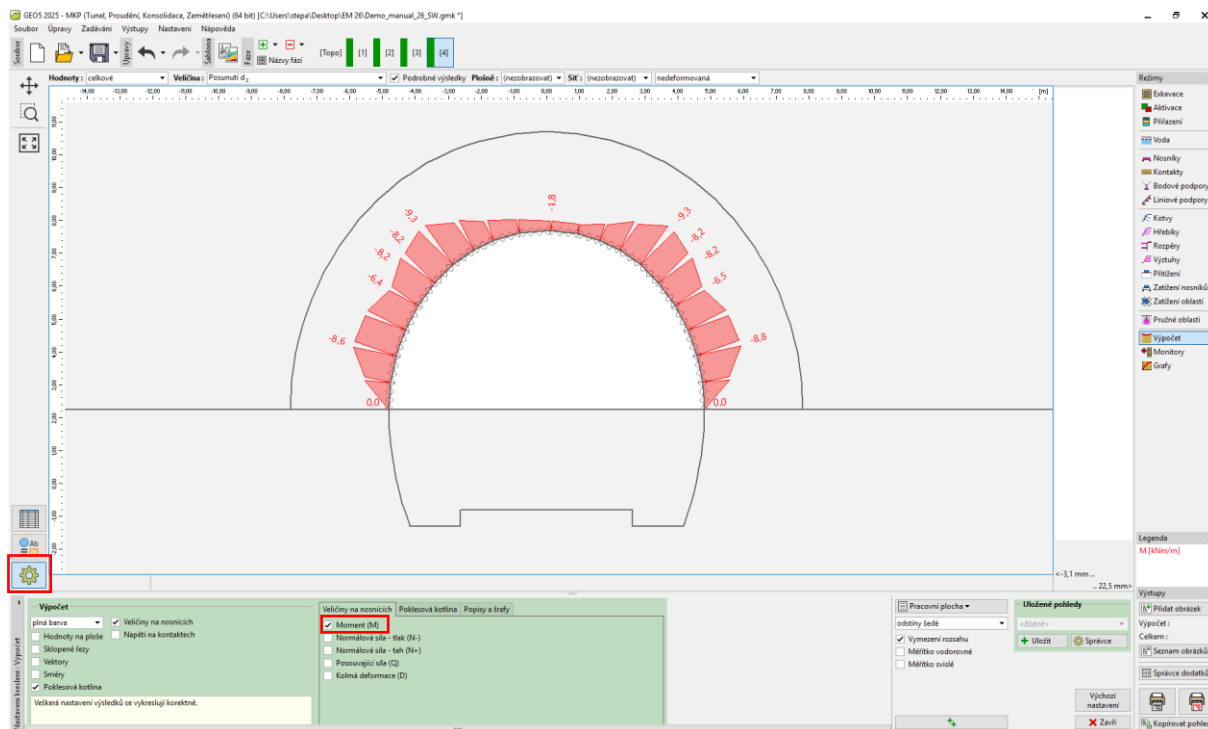
Úprava vlastností primárního ostění kaloty – Fáze budování 4 (vyzrálý stříkaný beton)

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

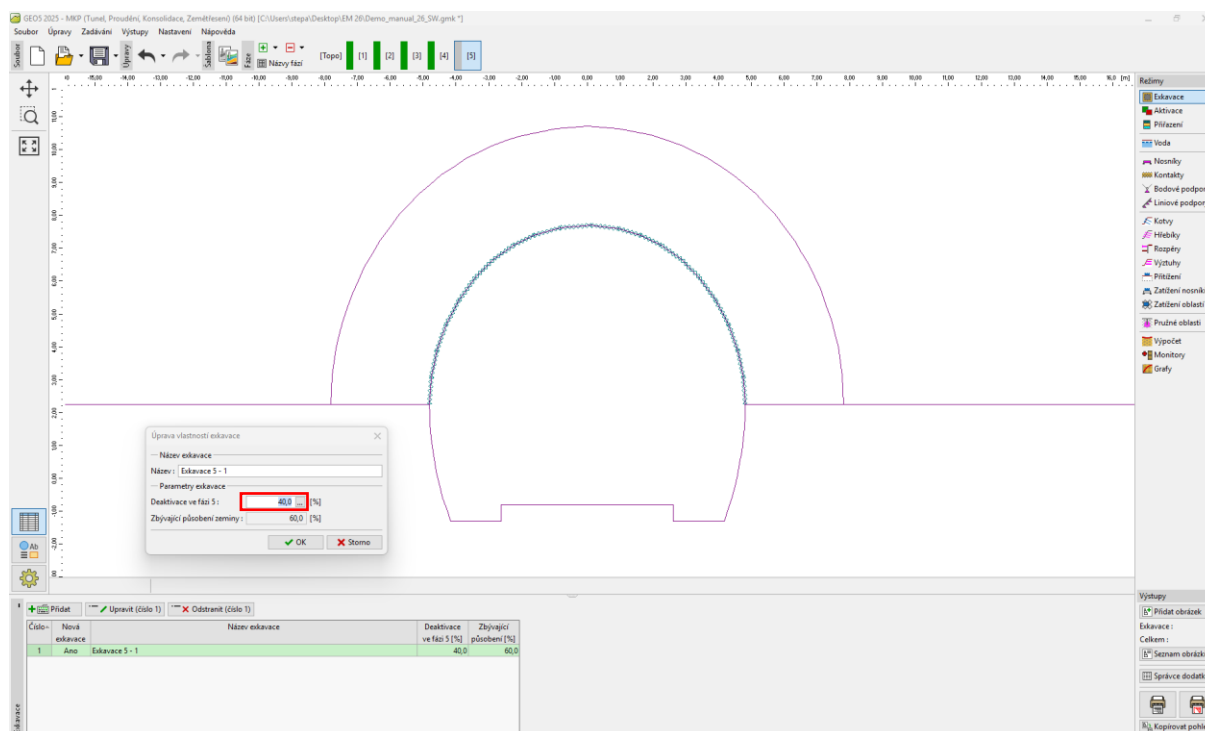
Poté provedeme výpočet a prohlédneme si průběh ohybového momentu na kalotě.



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

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

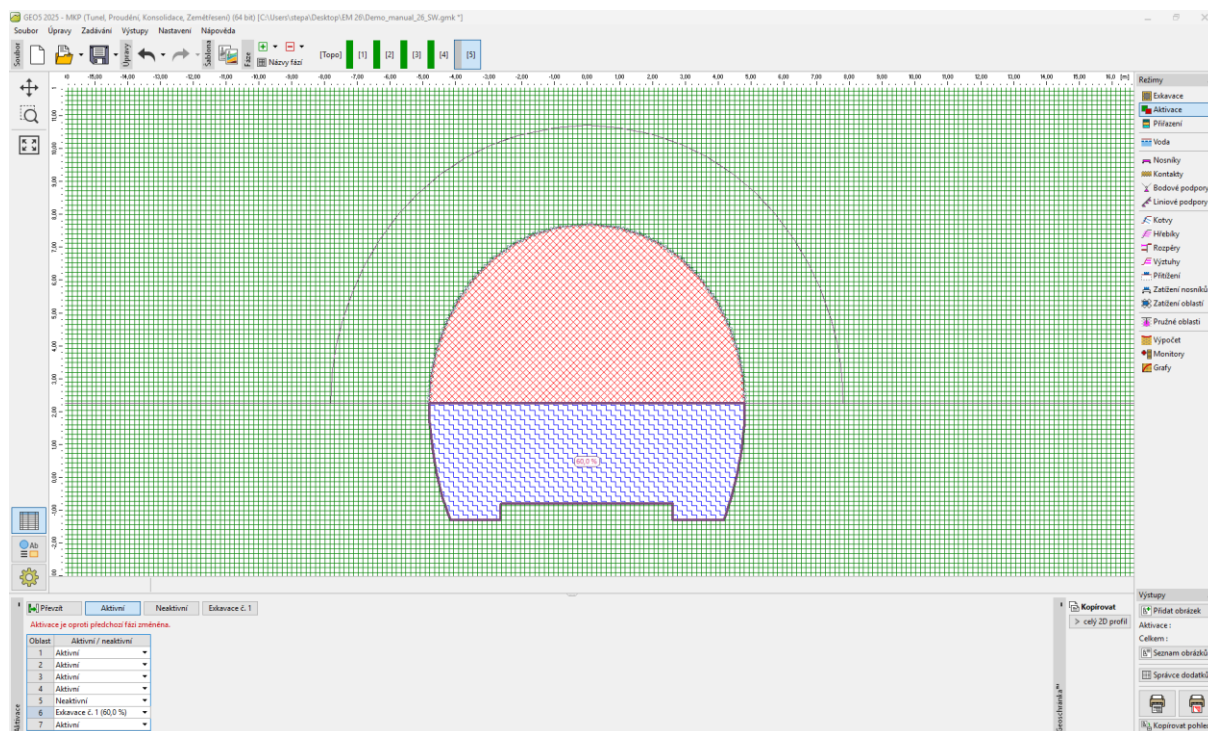
V dalším kroku přidáme 5. fázi budování. Poté v rámu „Exkavace“ zadáme pro výrub opěří tunelu novou exkavaci (pomocí tlačítka „Přidat“). V této fázi budování uvažujeme deaktivaci zeminy, resp. působení zatížení o velikosti 40 %. Zbývající působení zeminy, resp. masivu v okolí výrubu opěří tunelu je tedy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



Dialogové okno „Nové exkavace“ – Fáze budování 5

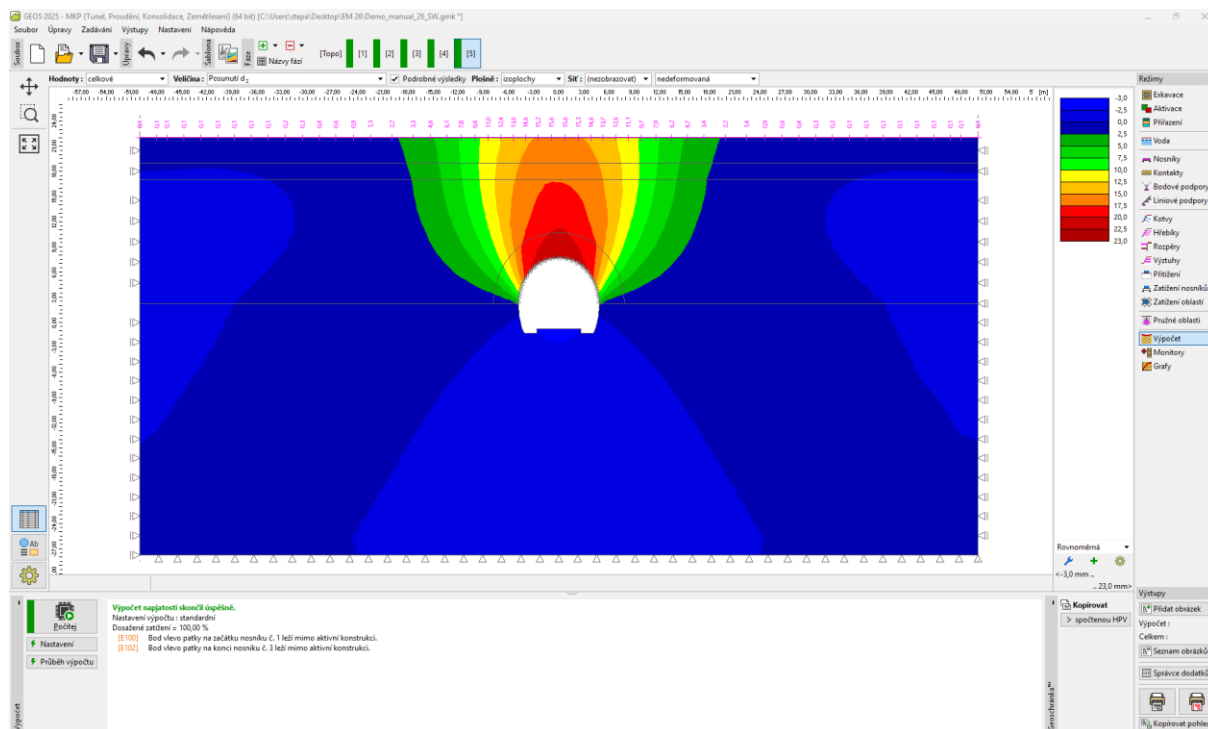
Poznámka: Pro následující fáze budování je postup modelování této úlohy obdobný. Nejprve se provede primární ostění opěří tunelu z mladého stříkaného betonu, poté se aktivuje další procentuální podíl zatížení. V následující etapě se zvýší materiálové charakteristiky již vyzrálého stříkaného betonu a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

V rámu „Aktivace“ vybereme oblast č. 6 (opěří tunelu) a přiřadíme zadanou exkavaci „Exkavace č.1 (60%)“.



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

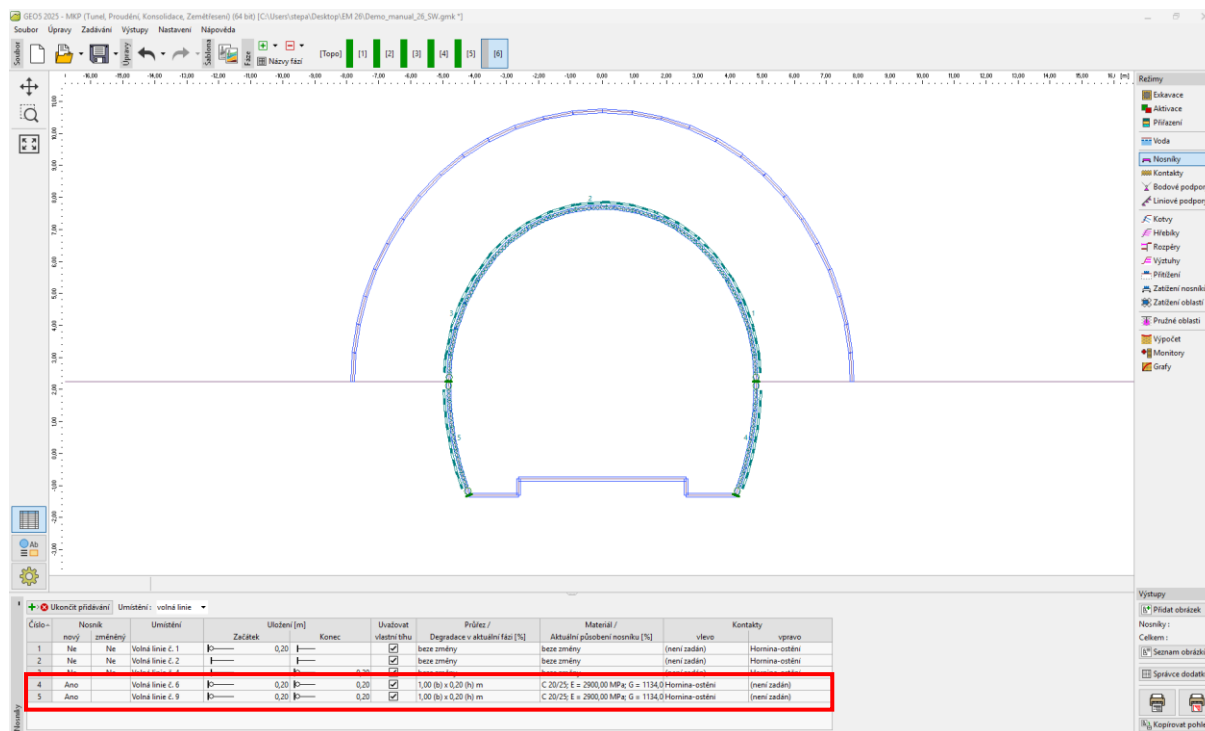
Následně provedeme výpočet.



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

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

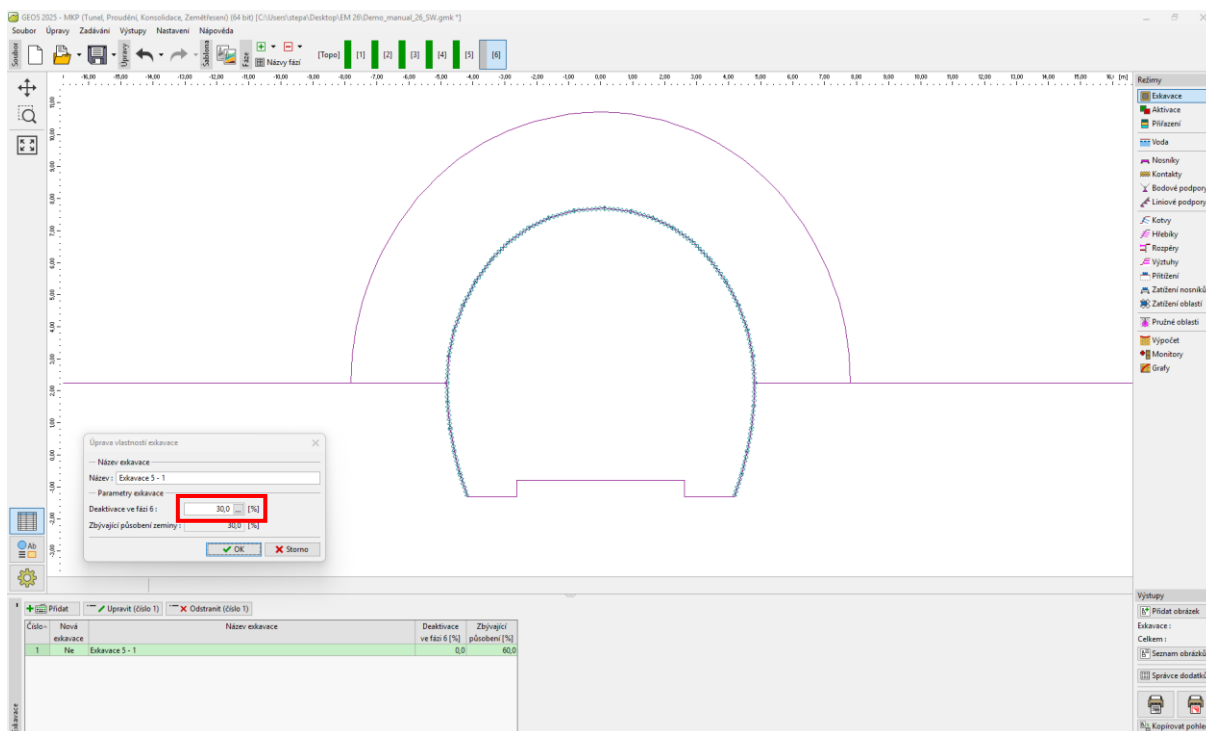
V 6. fázi budování zadáme vyztužení stěn opěří pomocí primárního ostění tloušťky 200 mm z mladého stříkaného betonu. Ostění kaloty zůstává v dalších fázích budování beze změn.



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

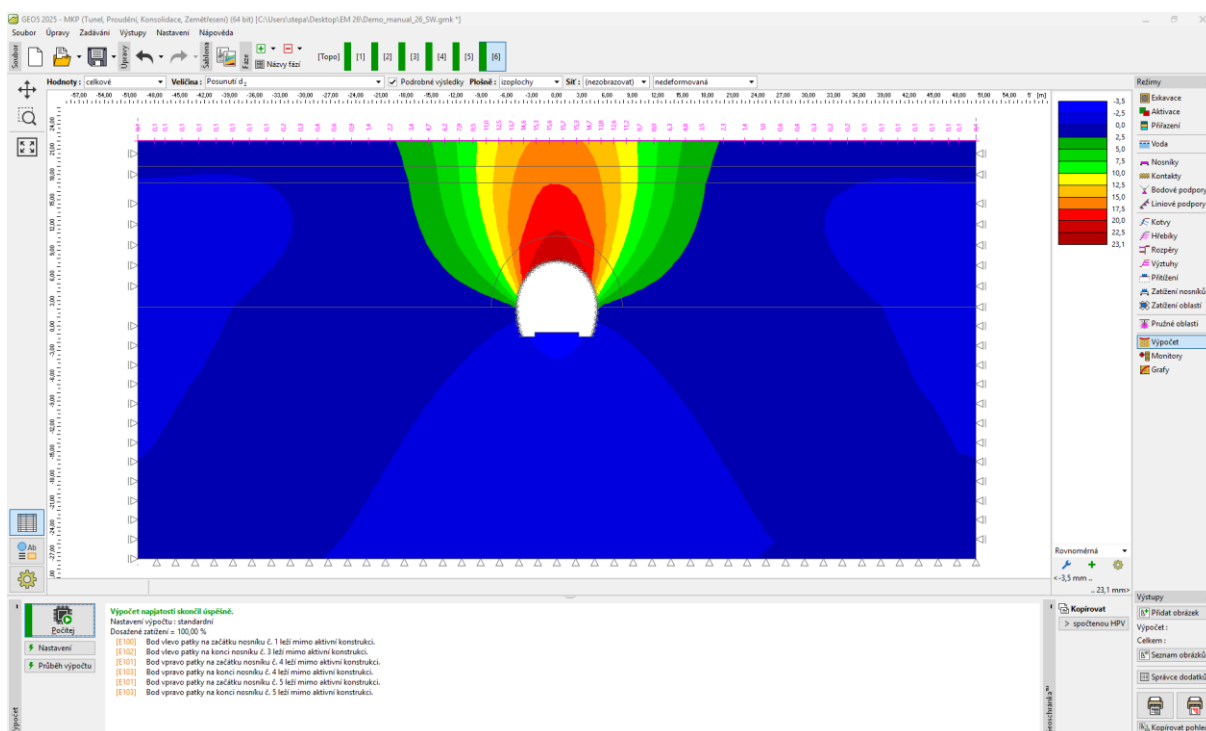
Poznámka: Uložení nosníků konců uvažujeme opět jako patičku, styk kaloty a opěří není schopný přenášet zatížení ohybovým momentem (nejedná se o plné zmonolitnění styku). Rozměry průřezu opěří jsou stejné jako u stěn kaloty, tj. $b = 1,0$ m, $h = 0,2$ m. Kontakty u nových nosníků však musíme zadat opačně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

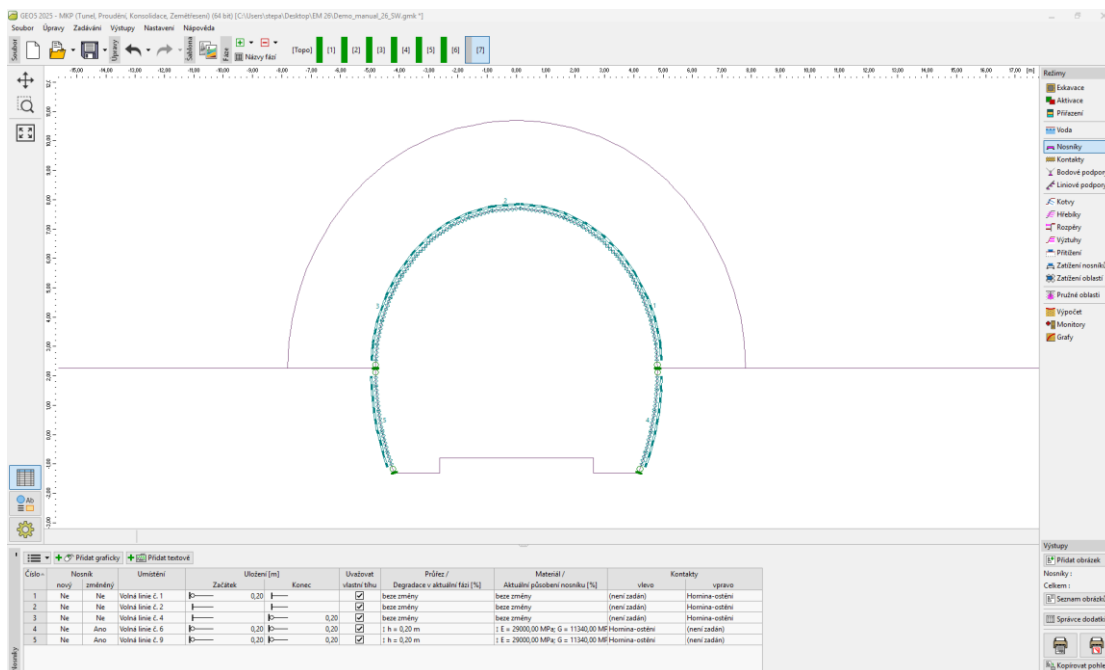
V poslední části této fáze opět provedeme výpočet.



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

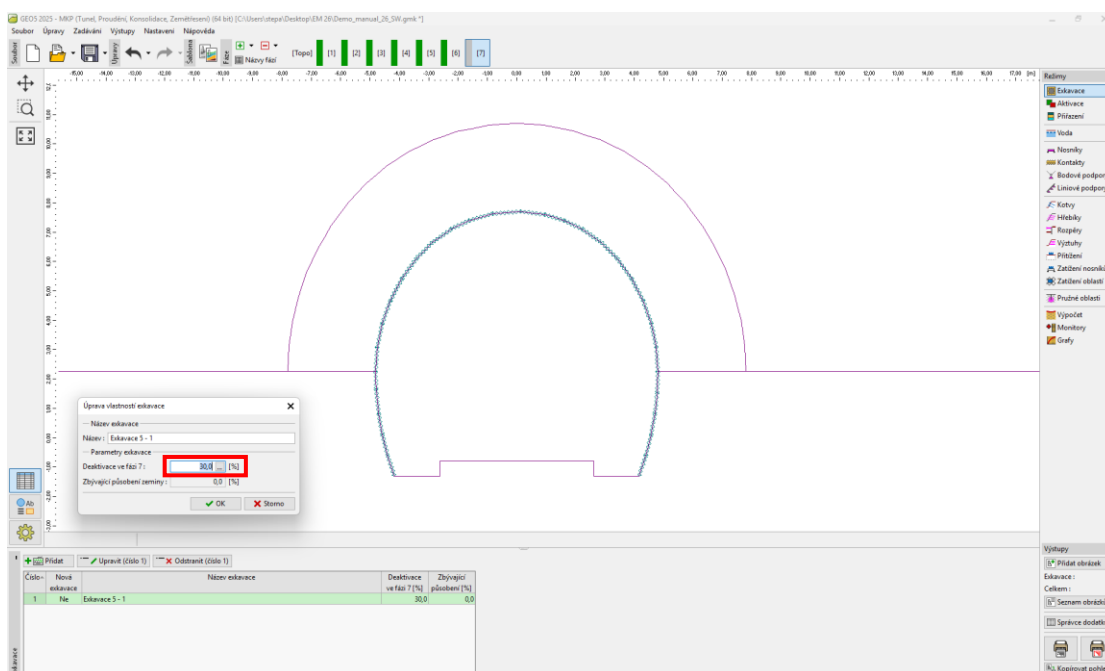
Fáze budování 7: zvýšení materiálových charakteristik již vyzrálého betonu (opěří)

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



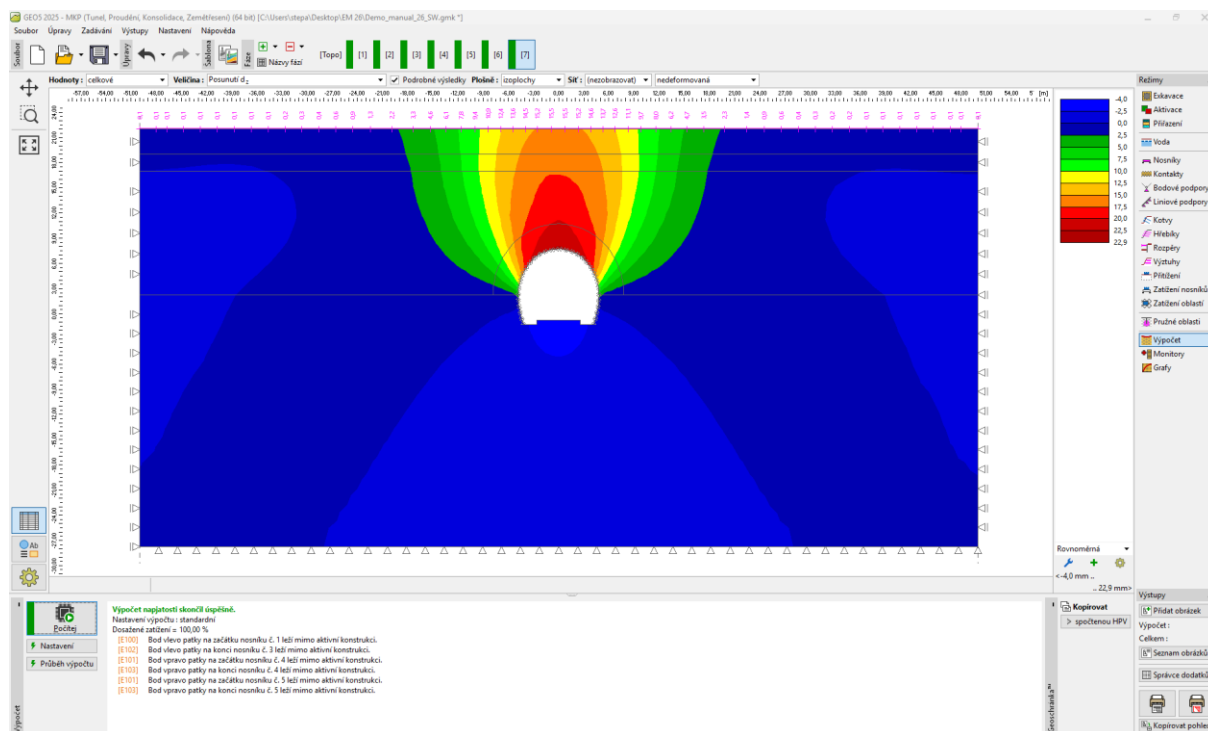
Úprava vlastností primárního ostění opěří – Fáze budování 7 (vyzrálý stříkaný beton)

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%.



Dialogové okno „Úprava vlastností exkavace“ – Fáze budování 7

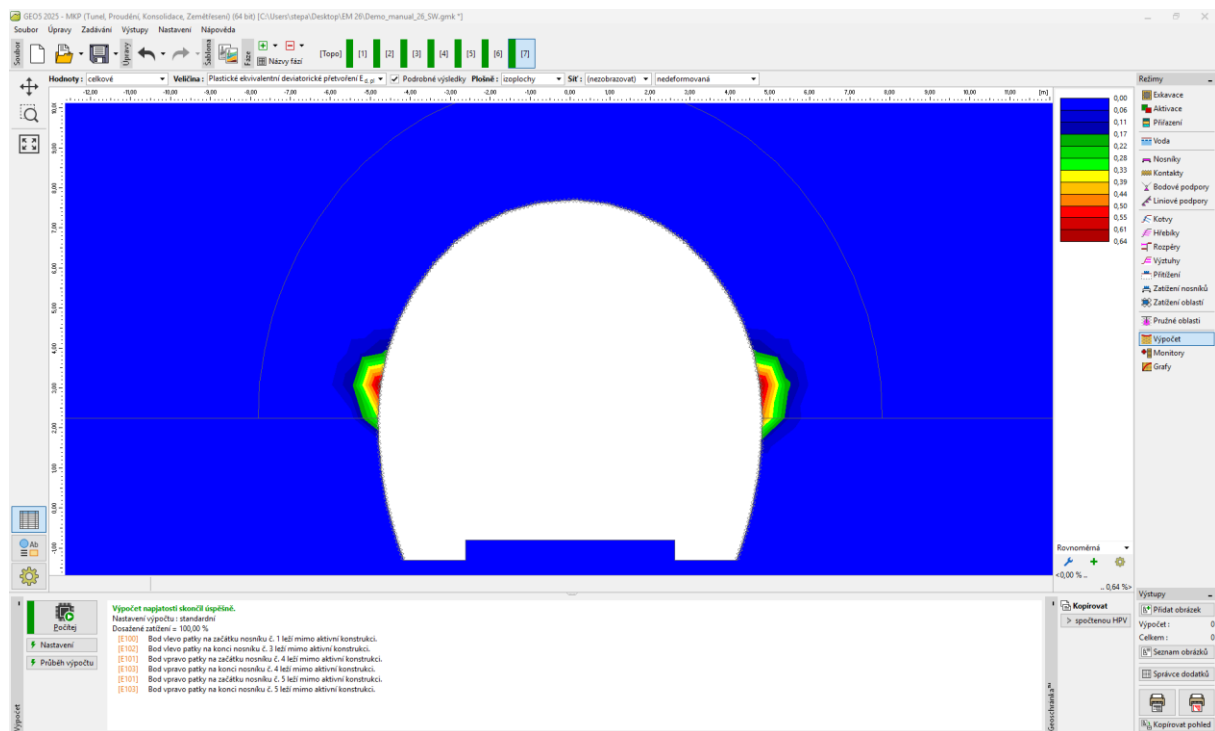
Nyní provedeme výpočet pro poslední fázi budování.



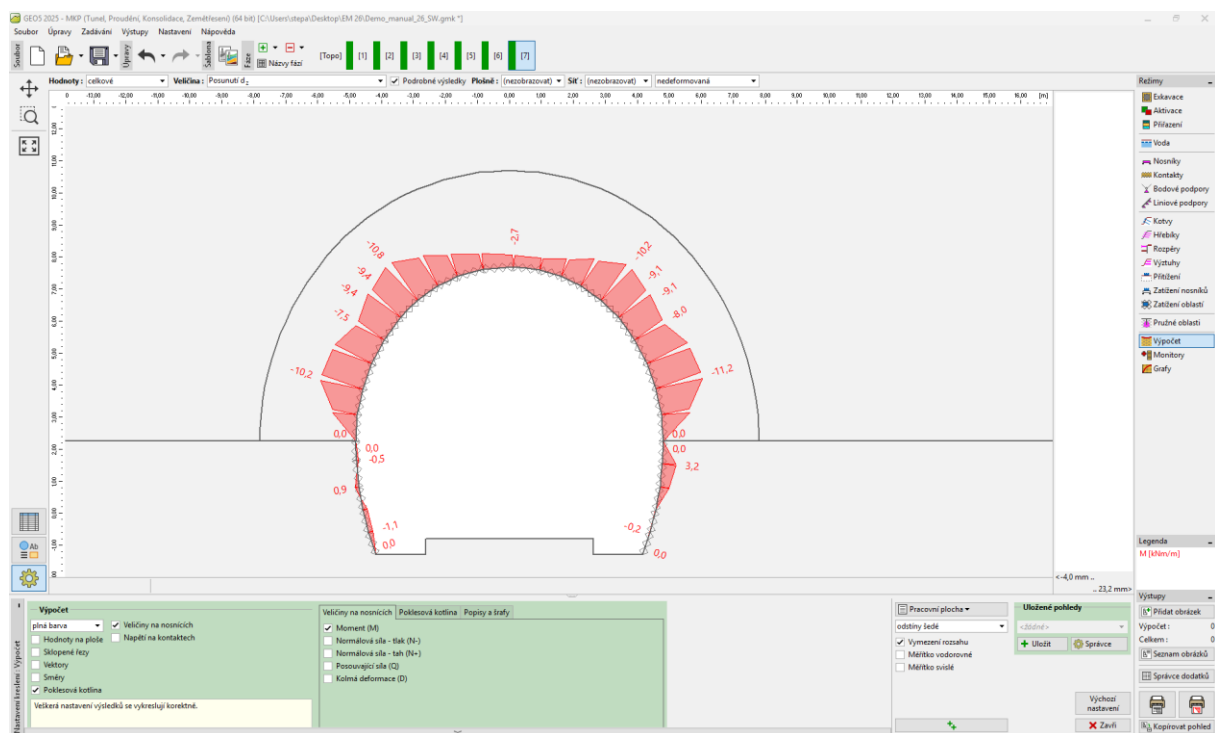
Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (svislá deformace d_z s poklesovou kotlinou)

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.

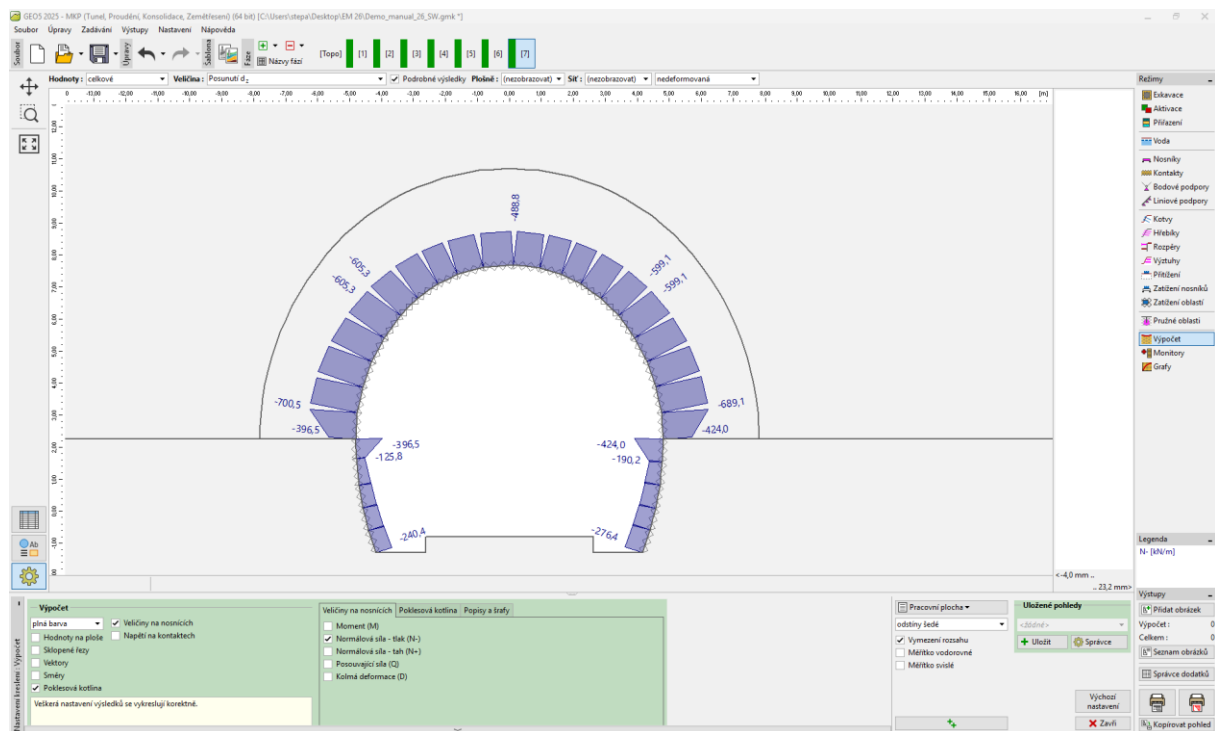
Z následujícího obrázku vyplývá, že ekvivalentní plastické deformace $\varepsilon_{eq,pl}$ nejsou nulové, což odpovídá chování konstrukce dle nelineárního materiálového modelu (Mohr – Coulomb).



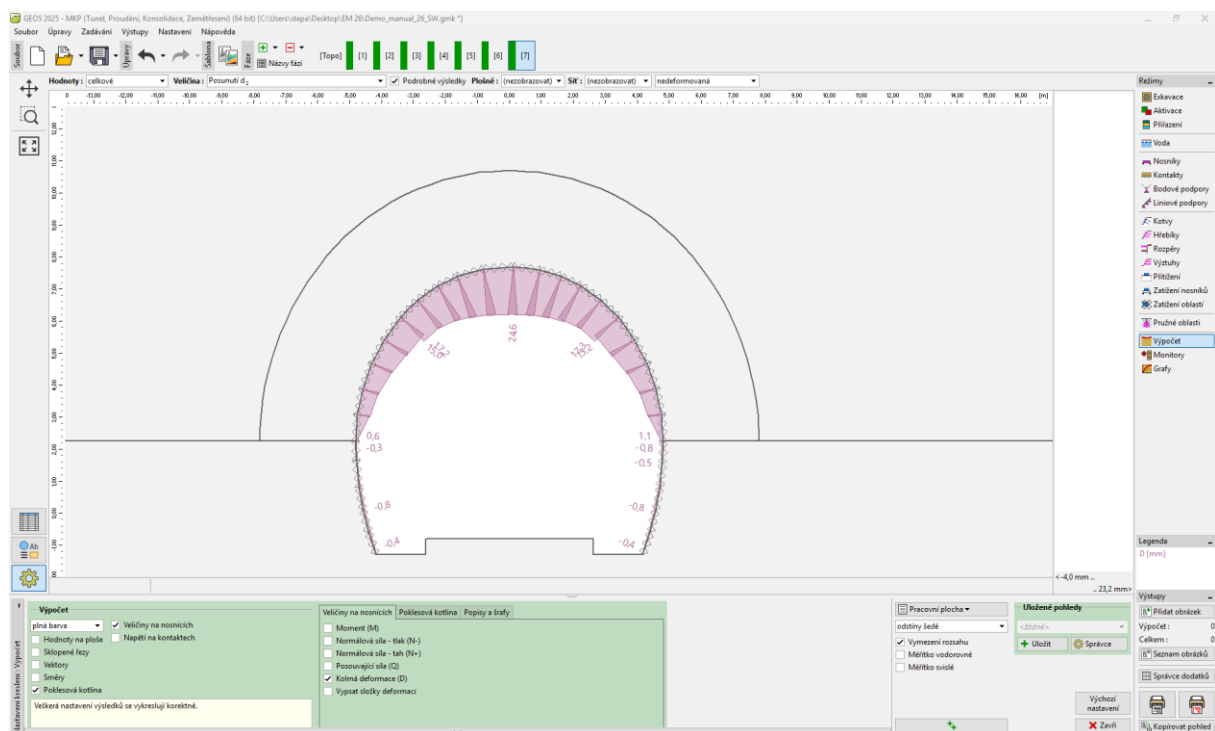
Rám „Výpočet“ – Fáze budování 7 (ekvivalentní deformace $\varepsilon_{eq,pl}$ podle MC modelu)



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	– 700,5	– 11,2	– 13,7
	– 125,8	+ 3,2	+ 9,6

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	-1,4	16,2	-4,8	+4,8
3	-2,3	+20,6	-6,1	+6,1
4	-3,2	+22,5	-6,7	+6,7
5	-3,0	+23,1	-6,9	+7,0
6	-3,5	+23,3	-6,9	+7,0
7	-4,0	+23,2	-6,9	+7,0

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/>).

Poznámka: Příklad s touto úlohou (Demo_manual_26.gmk) lze nalézt v [Online příkladech](#).