

**ČESKÉ VYSOKÉ ÚČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ  
KATEDRA GEOTECHNIKY**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**NUMERICKÁ ANALÝZA RAŽEB TRASY I.D  
METRA V PRAZE**

**2023**

**ADAM  
HÁJEK**

**VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:  
PROF. ING. MATOUŠ HILAR, MSc., Ph.D., CEng., MICE**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hájek Jméno: Adam Osobní číslo: 494198  
Zadávající katedra: katedra geotechniky - k135  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby


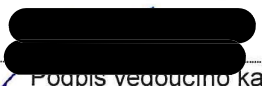
### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Numerická analýza ražeb trasy I.D metra v Praze  
Název bakalářské práce anglicky: Numerical analysis of excavations of the Prague's metro line I.D  
Pokyny pro vypracování:  

- Popis trasy I.D metra v Praze
- Popis realizovaného úseku Pankrác - Olbrachtova
- Popis geologických a geotechnických poměrů
- Vytvoření numerických modelů MKP vybraných příčných řezů
- Analýza dostupných informací z průběhu ražeb
- Porovnání výsledků numerického modelování s výsledky geotechnického monitoringu
- Vyhodnocení výsledků, závěrečné shrnutí

Seznam doporučené literatury:  

- Skripta zaměřená na Podzemní stavby (Barták, Horák, atd.)
- Odborné články a příspěvky o trase I.D metra v Praze (časopis Tunel, konference Podzemní stavby)
- Tunelářské odpoledne 2/2022 - Trasa D pražského metra (prezentace zveřejněné na webu CzTA)

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.  
Datum zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_ Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*  
 Podpis vedoucího práce  
 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

1.3.2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji na svou čest, že jsem tuto bakalářskou práci v celém jejím rozsahu vypracoval samostatně, s využitím konzultací a uvedených podkladů.

V Praze 22.5.2023

Adam Hájek

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Matoušovi Hilarovi, MSc., Ph.D., CEng., MICE za konzultace, ochotu zodpovídat na mé dotazy, rady, připomínky a také za poskytnutí podkladů pro vypracování mé práce.

## Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je numerické modelování dvoukolejného traťového tunelu trasy I.D ve staničeních 42,570 km a 42, 470 km a následné porovnání výsledků numerického modelování s výsledky geotechnického monitoringu. Výstavba posuzovaného tunelu byla realizována pomocí Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) v prostředí bohdaleckých břidlic. Jeden profil byl členěn horizontálně, druhý byl členěn vertikálně. Numerická analýza byla provedena metodou konečných prvků v programu GEO5.

**Klíčová slova:** tunel, NRTM, numerická analýza, metoda konečných prvků

## Abstract

This bachelor's thesis is focused on the numerical modelling of the double-track tunnel of the Prague's metro line I.D in chainages 42,570 km and 42,470 km. Results of numerical modelling are compared with the geotechnical monitoring results. The tunnel excavation was realized using the New Austrian Tunnelling Method (NATM) in the Bohdalec shales. The first modelled tunnel profile was excavated horizontally, the second was excavated vertically. Numerical analysis was realized using the finite element method in the software GEO5.

**Key words:** tunnel, NATM, numerical analysis, finite element method

# Obsah

Použité symboly a zkratky.....	7
Úvod.....	8
1.0 Metro D.....	9
1.1 Historie pražského metra.....	9
1.2 Trasa D.....	11
2.0 Metro I.D.....	17
2.1 Geologický průzkum.....	17
2.1.1 Průzkumné práce na úseku VO-OL.....	18
2.1.2 Průzkumné práce na úseku OL1.....	19
2.2 Geologické poměry.....	20
2.3 Hydrogeologické poměry.....	21
2.4 Nová rakouská tunelovací metoda.....	21
3.0 Numerické modelování.....	25
3.1 Metoda konečných prvků.....	25
3.2 Materiálový model.....	26
3.2.1 Lineární modely.....	26
3.2.2 Nelineární modely.....	28
4.0 Provedené numerické modelování.....	30
4.1 Profil ve staničení 42,570.....	30
4.1.1 Výpočet pro 42,570 km se zohledněním podzemní vody.....	37
4.1.2 Porovnání výsledků v řezu 42,570 km s geotechnickým měřením.....	40
4.1.3 Výpočet pro 42,570 km bez zahrnutí vody.....	43
4.1.3 Porovnání výsledků v řezu 42,570 km bez zahrnutí vody s výsledky geotechnického monitoringu.....	44
4.2 Modelování profilu ve staničení 42,470 km.....	46
4.2.1 Výpočet pro 42,470 km bez vody.....	52
4.2.2 Porovnání výsledků v řezu 42,470 km s výsledky geotechnického monitoringu.....	59
4.2.3 Výpočet pro 42,470 se zahrnutím podzemní vody.....	62
4.2.4 Porovnání výsledků výpočtu s ustáleným prouděním v řezu 42,470 km s výsledky geotechnického monitoringu.....	64
.....	66
4.2.5 Porovnání výsledků sedání v ose kolmo nad tunelem s výsledky Extenzometrického měření.....	66
Závěr.....	69

Seznam příloh.....	70
Seznam obrázků .....	72
Seznam tabulek .....	74

## Použité symboly a zkratky

$E$	Youngův modul pružnosti
$\sigma$	normálové napětí
$\varphi$	úhel vnitřního tření
$c$	soudržnost horniny nebo zeminy
$E_{ur}$	modul pružnosti při odtížení
$E_{def}$	modul přetvárnosti
$\nu$	Poissonovo číslo
$\psi$	úhel dilatace
$\varepsilon$	deformace
NRTM	Nová rakouská tunelovací metoda
MKP	metoda konečných prvků
$\gamma$	objemová hmotnost
$G$	smykové napětí
$d_z$	svislé sedání
RMR	rock mass rating (klasifikace hornin)
QTS	kvalita textura struktura (klasifikace hornin)



## Úvod

V posledních několika letech značně vzrostl zájem o podzemní stavby zejména v odvětví dopravních staveb. Intenzita osobní dopravy stále roste, což je problém hlavně pro rychle se rozšiřující metropole, které nemají na povrchu místo pro výstavbu povrchových komunikací. Jako účinné řešení se jeví výstavba podzemních tunelů, hlavně tunelů metra a silničních tunelů.

Ne jenom velká města mají zájem na výstavbě podzemních komunikací. Výstavby tunelů jsou zásadní pro překonání nepříznivého terénu, zejména při dopravních stavbách většího významu, jako jsou dálnice nebo významné železniční koridory. Jako další důvod pro výstavbu tunelů mimo města jsou zvyšující se požadavky na ekologickou stránku stavby.

Kromě dopravních tunelů se ve městech v rámci podzemních staveb staví také podchody, kolektory, kanalizace nebo například podzemní garáže.

Při realizaci podzemních staveb jsou kladeny vyšší nároky na projektovou i výstavbovou fázi. Stavbu provází nesčetná měření. Jedná se o měření poklesů terénu na povrchu, deformace ostění a další. Poklesy terénu by mohly vést k fatálním deformacím nadzemních objektů. Při porušení ostění by mohlo dojít k lokálnímu propadu nadloží do vyraženého tunelu.

S rozvojem výpočetní techniky se do popředí jako jeden z možných nástrojů pro výpočty chování hornin, zemin a podzemních konstrukcí dostává numerická analýza. Pomocí numerické analýzy lze naprojektovat podzemní díla tak, aby splňovaly všechny potřebné technické a bezpečnostní náležitosti. Nicméně je nutné podotknout, že nejen numerická analýza, ale i další podobné nástroje slouží pouze jako pomůcka a nelze podle nich projektovat bez potřebných znalostí v oblasti geotechniky a geologie. Výsledky z vypočítaných modelů je nutno kontrolovat.

Předmětem bakalářské práce jsou numerické výpočty dvoukolejného traťového tunelu nové trasy I.D metra v Praze mezi stanicemi Pankrác a Olbrachtova.

# 1.0 Metro D

## 1.1 Historie pražského metra

První zmínka o možném vybudování pražského metra vede k návrhu Ladislava Rotta z roku 1898. Rottův návrh počítal se dvěma linkami, z nichž jedna měla propojovat Karlín s Podolím a druhá Malou Stranu s Královskými Vinohrady. Přestupní stanice měla stát u Křižovnického pivovaru na Starém Městě. Tento návrh, ale městská rada zamítla. [1]

Další návrhy metra přišly až za první republiky od autora Bohuslava Vondráčka a návrh od autorů Vladimíra Lista a Bohuslava Belady z roku 1926. Lista a Belada vymysleli systém o 4 trasách, který se velmi blíží dnešní podobě metra. I dnešní 3 přestupní stanice Můstek, Muzeum a Florenc byly v jejich plánech totožné. Dokonce jako první v Čechách použili francouzský název „*Metro*“. V roce 1939 schválená realizace metra, ale musela kvůli 2. světové válce počkat. Po válce to byli zase komunisti ze Sovětského svazu, kdo realizaci metra v Česku nedoporučili. [1]

V 60. letech 20. století došlo v Praze ke značenému zhoršení dopravní situace, ale místo klasického metra se v roce 1966 začala stavět podzemní tramvaj. Výstavba podzemní tramvaje byla ostře kritizována, a proto byla vytvořena nová koncepce klasického metra. Stanice Hlavní nádraží a Muzeum byly, ale už rozestavěné pro podzemní tramvaj, jejich realizace proto probíhala za improvizovaných podmínek. Jako pozůstatek nám zůstala boční nástupiště ve stanici Hlavního nádraží. Za chodu se musely přepracovat plány z podzemní tramvaje na plány pro metro. Stavělo se podle vzoru Moskevského metra i výzdoba se měla podobat. První úsek mezi stanicemi Sokolovská (dnes Florenc) a Kačerov byl slavnostně otevřen 9.5. 1974. Na místo československých vozů R1 se začaly používat sovětské třívozové soupravy Ečs. Zprovoznění prvního úseku metra značně pomohlo dopravní situaci na povrchu. Mnohé linky tramvaje mohli být zrušeny a průvodčí byli nahrazeni automaty. [1]

V 70. letech se postupně vybuďovala linka metra A. Z počátku vedla ze stanice Leninova (dnes Dejvická) do stanice Náměstí míru, ale zanedlouho byla prodloužena až do stanice Želivského. S novou linkou přišel i nový design stanic. Na návrh Jaroslava Otruba byly stanice obložené eloxovaným hliníkem vymodelovaným do konkávních a konvexních tvarů, přičemž každá stanice měla vybranou vlastní barvu pro lepší odlišení jednotlivých stanic, barevné znázornění stanic navrhl grafik Jiří Rathouský. Oproti lince C byly názvy stanic, kromě stanice Leninova, daleko méně ideologické. Většinou se volily jména na základě toho, kde se stanice nacházejí, například stanice Malostranská nebo Hradčanská. Nová linka byla daleko hlouběji založena a většina její trasy byla ražená. Také to byla první linka jejíž tunely vedly pod Vltavou. [1]

V roce 1980 došlo k prodloužení linky C na oba směry. Bylo nutné připojit rychle se rozšiřující Jižní Město. To mělo zajistit vybudování stanic Roztyly, Chodov, Opatov a Háje. Na druhé straně bylo metro protaženo do stanice s dnešním názvem Nádraží Holešovice. Nové stanice linky C byly opět hloubené. [1]

Roku 1985 byla zprovozněna linka B, díky níž byl v centru Prahy vznikl trojúhelník přestupních stanic Muzeum-Můstek-Sokolovská (dnes Florenc). Linka byla ražená a stanice budované jako trojlodní. Také se na lince B zavedl nový design stanic. Stěny se obkládaly skleněnými deskami. Do stanice Černý Most bylo metro prodlouženo až v roce 1998. [1]

Po Sametové revoluci v roce 1989 se mnoho stanic přejmenovalo z propagandistických jmen na jména blíže popisující umístění stanice. Také se ze stanic odstraňovaly umělecká díla. Při povodních v roce 2002 bylo mnoho stanic zaplaveno a uzavřeno i na několik měsíců. Povodně v několika stanicích na lince A zničily do té doby charakteristické osvětlení, které ve stanicích tvořilo původní atmosféru. Linka C vedoucí do Letňan byla dostavěna v roce 2010 a linka A vedoucí do Motola v roce 2015. Při ražbě nového úseku linky A bylo využito metody mechanizované ražby (viz. obr. 1), při níž se využilo plnoprofilových tunelovacích štítů pojmenovaných Tonda a Adéla. Původně neměla linka A končit v Nemocnici Motol, ale plánovalo se, že nový úsek metra povede až na letiště Václava Havla, k čemuž ale tehdy nedošlo. V současnosti se uvažuje o propojení letiště odbočkou z rychlodráhy Praha-Kladno. [1]



Obrázek 1 Traťový tunel metra V.A mezi stanicemi Nemocnice Motol a Petřiny  
vyražený pomocí zeminového štítu [13]

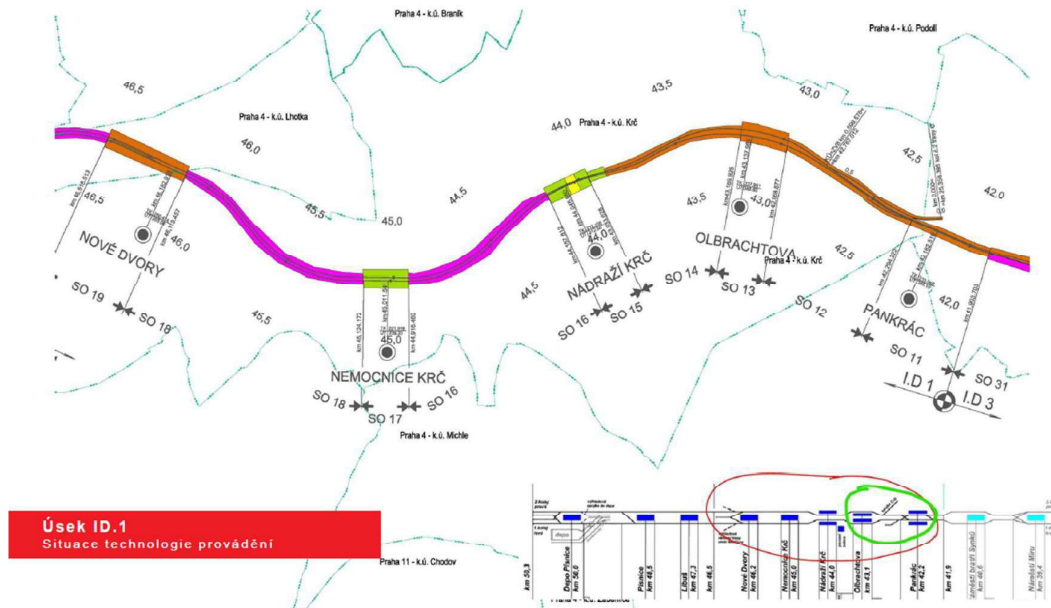
## 1.2 Trasa D

Zájem o výstavbu linky D pražského metra není novinkou. „*Již od 90 let 20. století je prostorově vymezená v Územním plánu města a později i v Zásadách územního rozvoje, jako propojení jižního sektoru Prahy s centrem*“. [2] První úsek trasy D bude mít 10 stanic a celkovou délku 10,6 km. První přestupní stanice bude na Náměstí míru odkud povede přes stanici Náměstí bratří Synků do další přestupní stanice Pankrác. Dále bude metro pokračovat do stanice Olbrachtova, Nádraží Krč, Nemocnice Krč, Nové Dvory, Libuš, Písnice a Depo Písnice. [2]

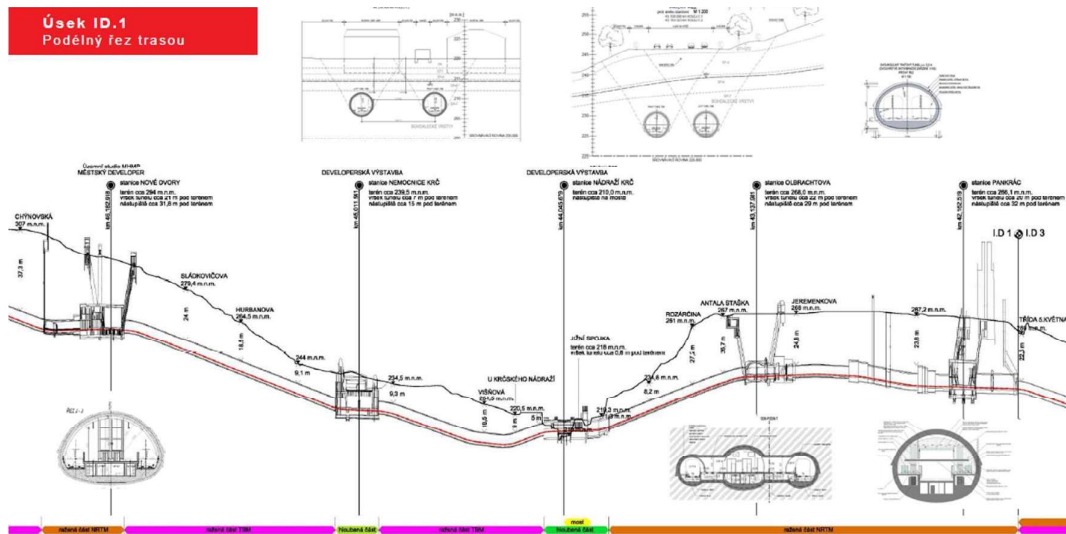
Město si od nové trasy metra slibuje výrazné zlepšení dopravní situace v západní části jižního sektoru města. Vždy byla shoda na tom, že v této části Metropole chybí páteřní trasa veřejné dopravy. Lidé z této části Prahy doposud mohli doposud použít

pouze autobusy. Pro cca 150 000 obyvatel se bude jednat o zásadní zlepšení kvality života. [2]

Provozní délka metra D bude 10,6 km, na kterých budou vyraženy 4 stanice, vyhloubeno 5 stanic a k tomu 1 povrchová stanice. Trasa linky D se bude realizovat ve třech etapách. První etapa povede z Pankráce přes stanice Olbrachtova, Nádraží Krč, Nemocnice Krč do stanice Nové Dvory.

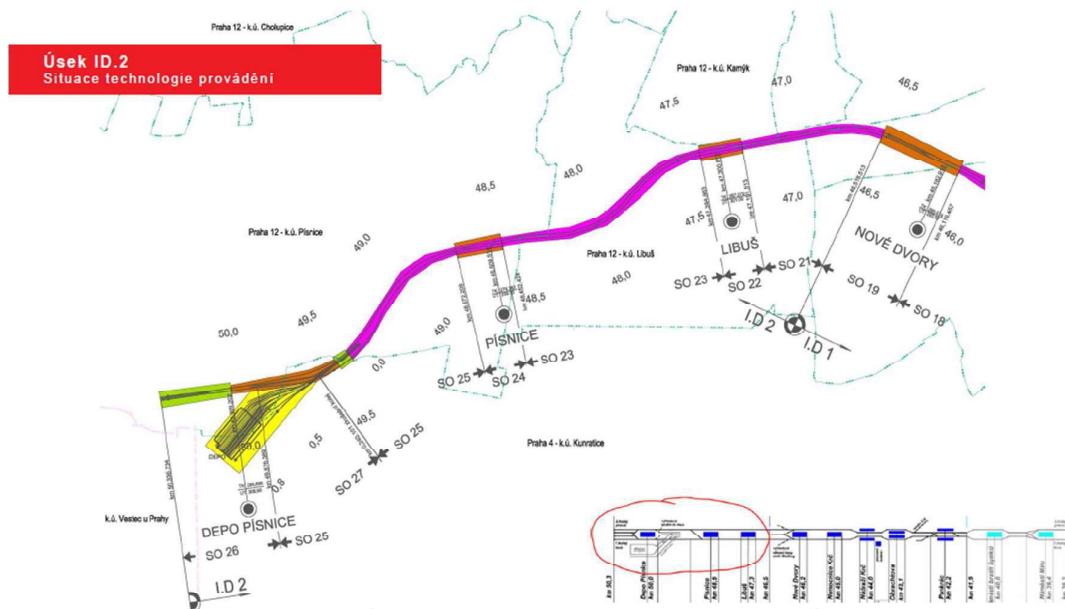


Obrázek 2 Situace 1 etapy linky metra D [11]

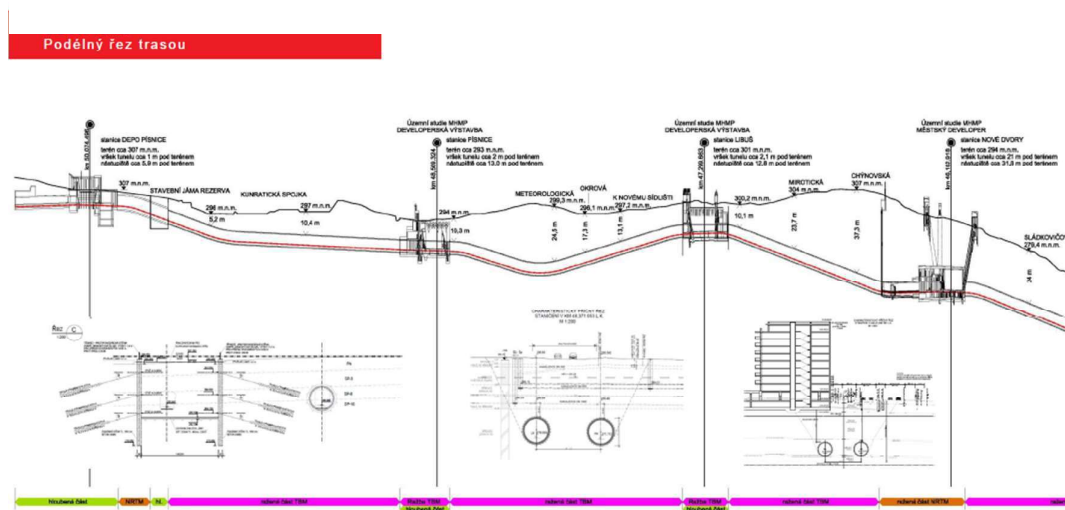


Obrázek 3 Podélný profil 1 etapy linky metra D [11]

Druhá etapa navazuje na zastávku Nové Dvory a pokračuje zastávkami Libuš, Písnice a Depo Písnice

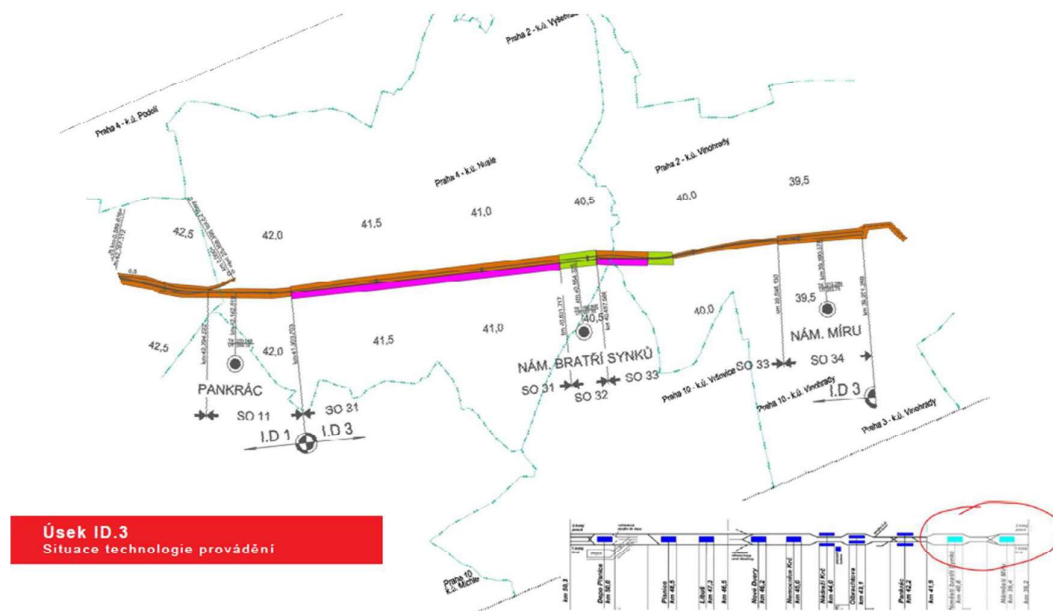


Obrázek 4 Situace 2 etapy linky metra D [11]

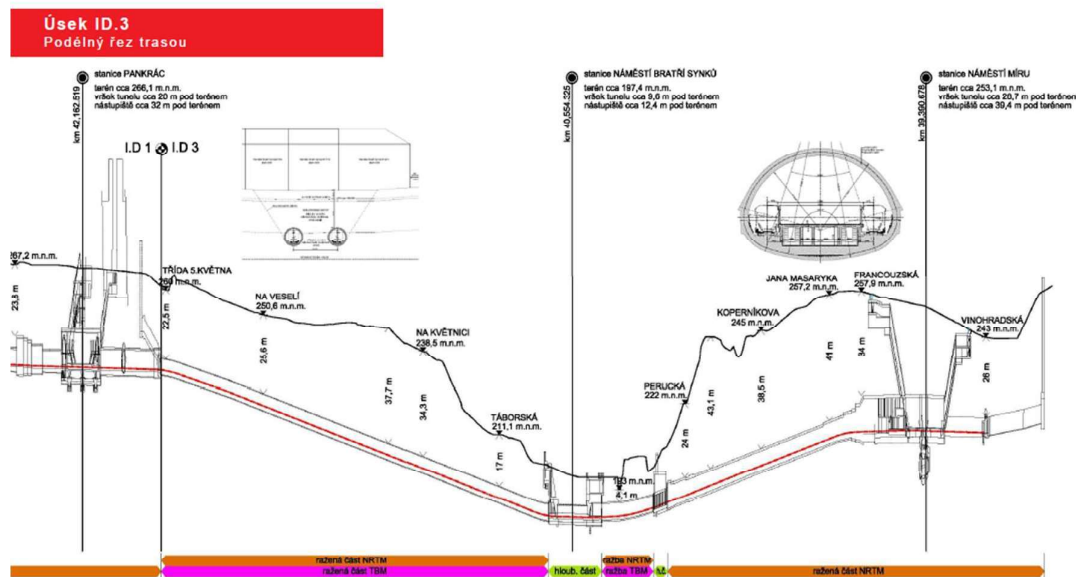


Obrázek 5 Podélný profil 2 etapy linky metra D [11]

Třetí etapa povede ze stanice Pankrác opačným směrem než etapa 1 a to směrem do centra hlavního města. Jedná se pouze o dvě stanice. Stanici Náměstí Bratří Syнкů a přestupní stanici Náměstí Míru.



Obrázek 7 Situační 3 etapy linky metra D [11]



Obrázek 6 Podélný profil 3 etapy linky metra D [11]

Nové metro umožňuje využít příležitost dostat se v úrovni kvality a technologie na podobný stupeň jako modernější metra ve světě. Na lince D by neměl chybět plně automatizovaný provoz bez strojvedoucího, moderní lehké vlakové soupravy, podélně průchozí mezi vozy, bezpečnostní stěny mezi nástupištěm a kolejemi s posuvnými dveřmi a nejmodernější generace zabezpečovacího a řídicího systému CBTC. Město si od nové technologie slibuje především vyšší provozní spolehlivost, výrazně vyšší schopnost operativního přizpůsobení provozu přepravní poptávce, nižší provozní náklady a bezpečnost. Modernější linka sice nebude plně kompatibilní se stávajícími 3 linkami metra, ale v budoucnu by se mohla například linka C, která je momentálně nejvytíženější linkou, modernizovat po vzoru linky D. [2]



Obrázek 8 Vlak metra s automatickým provozem bez strojvůdce (Dubai) [2]





Obrázek 9 Bezpečnostní stěna na nástupišti (design) [2]

*„Městotvorný urbanistický účinek nového komfortního dopravního spojení lze očekávat již během výstavby a vzrůst kvality městského prostředí a veřejného prostoru bezprostředně po jejím dokončení.“* [2] Výstavba nových stanic nepochybně povede i k rozvoji jejich blízkého prostředí a k rozvoji celých čtvrtí. Tento jev už jsme mohli sledovat při stavbě předchozích linek metra u nás nebo i v zahraničí. Přeprava veřejnou dopravou, v našem případě doprava metrem, by měla být dostupná na místech přepravní poptávky, zaručovat komfortní cestování a disponovat co nejjednoduššími přestupními vazbami, mezi nejrůznějšími typy dopravních prostředků. Jedna ze zásad umístění stanice metra, která se nachází mimo centrum a zejména v jižní části Prahy, do intravilánu je umožnit přímý výstup z nástupiště na povrch do otevřeného nekomplikovaného vestibulu. Děje se tak z důvodu ještě nedefinovaného prostředí dané stanice. [2]



Obrázek 10 Nadzemní vestibul stanice Nové Dvory [2]

## 2.0 Metro I.D

První úsek nové trasy metra D je ze všech tří úseků nejproblematictější. Je tomu tak hlavně z důvodů náročného řešení stavby, předpokládaným geotechnickým podmínkám ražby a případným rizikům spojených s vedením stavby pod zastavěným územím. [3]

### 2.1 Geologický průzkum

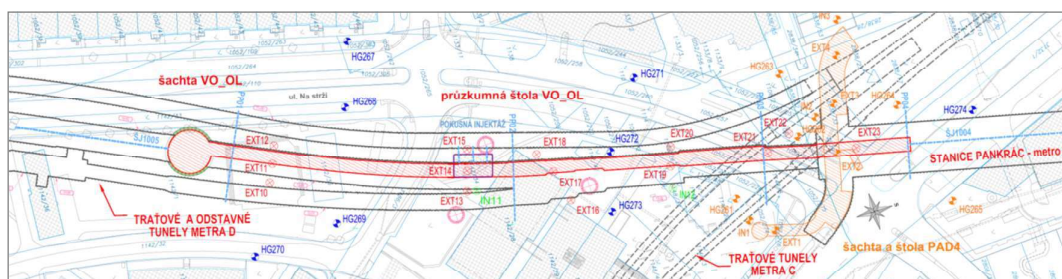
Výstavba metra spadá do 3. geotechnické kategorie. Jedná se o náročné konstrukce ve složitých geologických podmínkách. Ražba bude probíhat pod významnými inženýrskými sítěmi, stávající linkou metra C, bytovou zástavbou. V takových to podmínkách je kladen veliký důraz na minimalizování deformací. [4]

V letech 2010-2017 probíhaly průzkumy horninového podloží společně s projektováním dílčích úseků metra. Jejich četnost a podrobnost se odvozovala od stupně právě vytvářené projektové dokumentace. V roce 2019 se začalo s doplňkovým inženýrskogeologickým průzkumem v oblasti stanic Pankrác a Olbrachtova. Tento

doplňkový průzkum se rozdělil na 4 konkrétní úseky. PAD1, PAD4, VO-OL, OL1. Základním cílem těchto průzkumů bylo ověření dosavadních představ o podloží, založených na předchozích průzkumech. Hlavně ověření inženýrskogeologických a hydrogeologických podmínek. Dále bylo nutné ověřit pevnost, přetvárné a technologické parametry jednotlivých typů hornin a celého horninového masivu. Provedení průzkumu také slouží k ověření kritických míst ražby s možným výskytem tektonických poruchových zón, výskytu bludných proudů a rezistivity horninového prostředí. [5]

### 2.1.1 Průzkumné práce na úseku VO-OL

Průzkumné práce na úseku VO-OL byly z důvodů technické náročnosti řešeny vyhloubením šachty a následným vyražením průzkumné štoly. Samotná štola byla následně využita jako část výrubu tunelu, který vede ze stanice Pankrác do stanice Olbrachtova. Hloubení šachty počalo v srpnu v roce 2019 a dokončena byla v lednu 2020. Pro hodnocení horninového masivu byly využity tunelářské klasifikační metody RMR a QTS. Obzvláštní důraz se kladl na dokumentaci tektonicky porušených oblastí horninového masivu. Charakteristické vzorky byly podrobeny geomechanickým zkouškám a petrografickým rozborům. Dále pro vyhodnocení strukturních prvků se použila základní orientační analýza. [3]



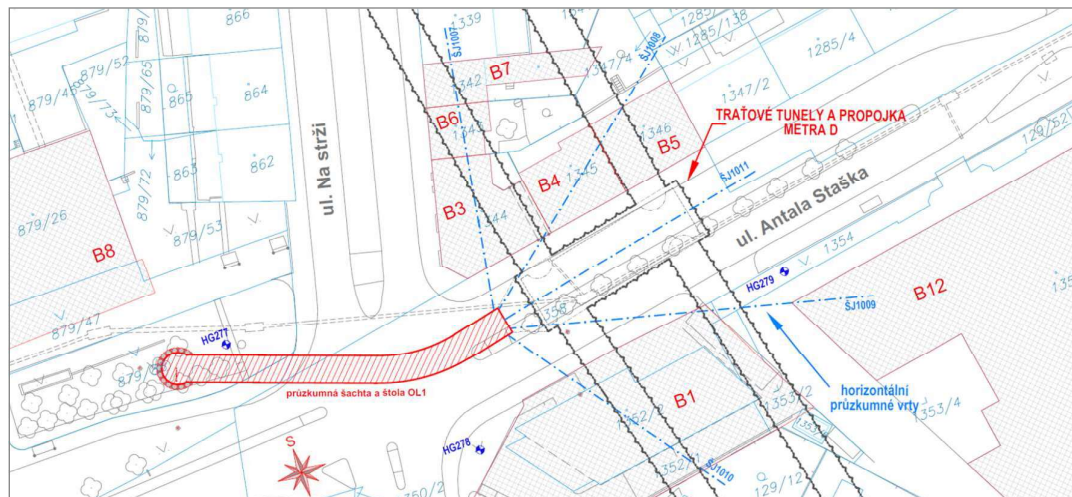
Obrázek 11 Situace průzkumných prací v prostoru úseků VO-OL a PAD4 [3]



Obrázek 12 Hloubení šachty z převrtávaných pilot VO-OL v prostředí břidlic bohdaleckého souvrství [3]

## 2.1.2 Průzkumné práce na úseku OL1

Stejně jak na úseku VO-OL se v případě OL1 zvolil způsob průzkumu šachtou a štolou a byl i zvolen obdobný program průzkumných prací. [3]



Obrázek 13 Situace průzkumných prací v prostoru úseku OL1 (provedená průzkumná štola je označena červeně) [3]

## 2.2 Geologické poměry

Geomorfologicky by se území stavby metra dalo zařadit k Pražské plošině. Povrch je zde převážně plochý, což je zapříčiněno erozí a akumulací činností Vltavy. „Předkvartérní podklad je v předmětném úseku stavby metra I.D tvořen převážně nejmladšími horninami ordoviku v podobě kosovského, královodvorského a bohdaleckého souvrství“. [5] V prostoru stanice Pankrác a tunelové spojky pro eskalátor mezi nástupištěm linky C a linky D se vyskytují i mladší silurské horniny liteňského a kopaninského souvrství, tvořící jádro barrandienské synklinály. Při výstavbě metra došlo k zastižení širokého spektra hornin. „Od tenké vrstevnatých jílovitých břidlic, jílovců a prachovců přes pevnější, ale i křehčí droby, pískovce a křemence až po kompaktní a velmi pevné vápnité břidlice a vápence.“ [5]



Obrázek 14 Bohdalecké břidlice se shluky „*Onnia superba*“ zastižene ve vrtu HG277 vedle šachty OL1 [5]

## 2.3 Hydrogeologické poměry

Atmosférické srážky jsou jediným zdrojem zásob podzemních vod v prostorách stanice Pankrác. Jevu vsakování vody z povrchu do podloží se říká „Infiltrace“, ta je závislá na stupni a charakteru zástavby infiltračního území. Hladina podzemní vody v této oblasti se odvíjí od množství srážek, což vede k velké kolísavosti její nadmořské výšky. Samotný režim podzemní vody je ražbou tunelů a jinou stavební činností nepřetržitě narušován. [6]

I přes rozdílné vlastnosti ordovických a silurských hornin je jejich hydrogeologická funkce hodně podobná. Zmíněné horniny lze zařadit ke hydrogeologickým masivům s puklinovou propustností a volnou nebo jen slabě napjatou hladinou podzemní vody. Hladina podzemní vody se v prostorách stanice Pankrác nachází v hloubce 5-8 m. [6]

## 2.4 Nová rakouská tunelovací metoda

Spojením nových technologií v 60. letech 20. století vznikla Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM). Hlavní rozdíl od původní Rakouské tunelovací metody je v dočasném zajištění výrubu. Kdysi používané výdřevy pro zajištění výrubu byly nahrazeny stříkaným betonem. V současné době se ve světě okolo 50 % tunelů razí právě NRTM (nebo obdobnými konvenčními metodami). V České republice byly pomocí NRTM raženy například tunely Mrázovka, Blanka, Valík, Panenská, Libouchec atd.

NRTM se řadí do skupiny observačních metod. Během celého procesu ražby se provádí monitoring deformací výrubu a ostění – konvergence. Při nepříznivém vývoji deformací je třeba navrhnout příslušná opatření, která by měla nepříznivý vývoj zastavit. Nejčastěji se používají konvergenční metody a nivelace povrchu terénu, lze ale využít i řadu dalších měření (např. extenzometry, inklinometry, piezometry, tenzometry, tlakové podušky, atd.)

Jedná se také o konvenční metodu ražení. Ražba je cyklická a postupuje se po záběrech. Základním principem NRTM je uvažování spolupůsobení horninového masivu s primárním ostěním. Jako primární ostění využíváme armovaný stříkaný beton, obvykle

se svorníky. Beton je stříkán po obvodu tunelu a jeho rychlé tuhnutí zajišťují urychlovače, které se do stříkaného betonu přidávají jako přísady. Po ustálení napětově deformačního stavu v okolí díla se výrub zajišťuje sekundárním definitivním ostěním. Kromě primárního ostění se ke stabilizaci horninového prostředí běžně využívají kotvy. [7]

Pro ražení tunelu se využívá těžké mechanizace, a to výložníkových fréz, tunelbagrů a impaktorů. Ty slouží k rozpojování horniny, jejímu naložení a následnému odvezení z tunelu. Dále se pro ražbu používají trhací práce, které jsou vhodnější pro rychlejší rozpojování pevnějších hornin. Trhavinové náložky se vkládají do vrtů podle vrtného schématu, tak aby jejich odpal byl co nejefektivnější. [7]



Obrázek 15 Tunelová fréza s jedním výložníkem a příčnou hlavou [7]



Obrázek 16 Tunelbagr Terex [7]

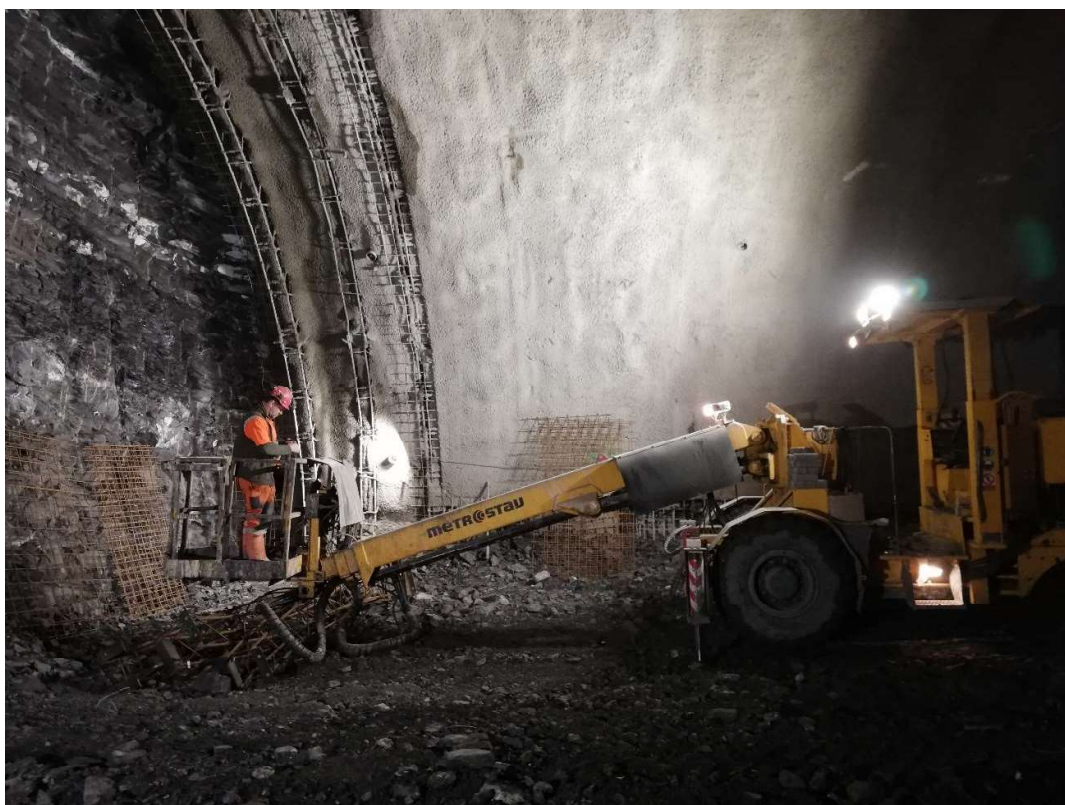


Obrázek 17 Impaktor Caterpillar na pásovém podvozku [7]





Obrázek 18 zařízení staveniště PAD1 na Pankráci



Obrázek 19 čelba raženého tunelu Metro I.D

Profily větších tunelů se zpravidla nerazí vcelku (tj. na plnou čelbu), ale po částečných výrubech. Členění výrubu bývá nejčastěji horizontální (kalota, opěří a dno) nebo vertikální (boční tunely a střední pilíř). V některých případech se používá i jiné členění (např. kombinace uvedených členění).

## 3.0 Numerické modelování

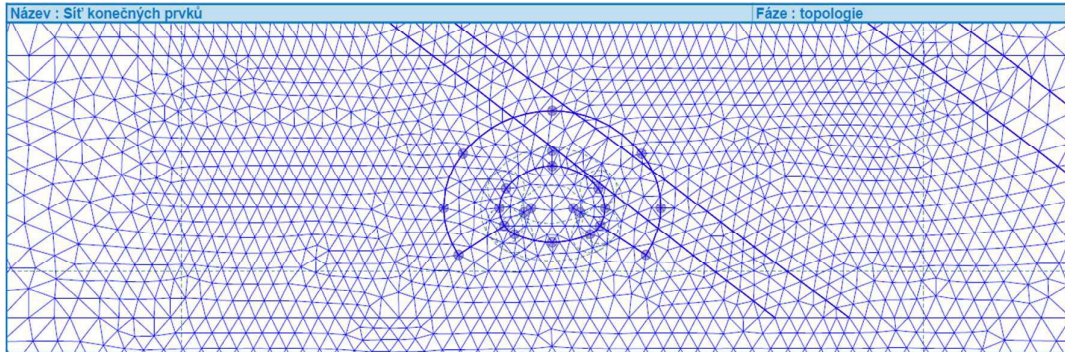
V současné době vyspělé výpočetní techniky se k matematickému modelování využívají různé metody a různé softwary. Při výpočtech v této bakalářské práci bylo využito modelování metodou konečných prvků v programu GEO5 od společnosti Fine spol. s.r.o.

### 3.1 Metoda konečných prvků

Jedná se o nejpoužívanější numerickou metodu v oboru geomechaniky. Její vývoj započal v 50. letech 20. století, ale k plnému využití bylo zapotřebí lepší výpočetní techniky. Metoda konečných prvků (MKP) je přibližná metoda pro řešení problémů popsanych diferenciálními rovnicemi, jejímž základním principem je diskretizace (rozdělení) tělesa (kontinua) na malé části (prvky), které jsou snadno matematicky popsateľné. Přiřadí se jim materiálové vlastnosti a zatížení. Neznámé funkce představující spojité řešení problému pak hledáme přibližně ve formě lineární kombinace předem vhodně zvolených funkcí (tzv. bázových funkcí) a neznámých parametrů řešení. Diskretizace těles je základem tzv. deformační metody, jejímž zobecněním vznikla nejvíce využívaná varianta MKP. Teoretický základem MKP je Lagrangeův variační princip. Ten říká: Těleso je v rovnováze, jestliže celková potenciální deformace soustavy je minimální. Samotná prvková síť u 2D úloh bývá tvořena trojúhelníky nebo čtverci. Sousední obrazce by měly být podobné velikosti a všechny jejich hrany podobně dlouhé. Čím menší obrazce vytvoříme, tím hustší bude naše síť a tím přesnější výsledky dostaneme. Bohužel čím hustší síť máme, tím déle trvá samotný výpočet. [8] [9]

Analytické metody nám jako výsledek dávají závislost mezi vstupními a výstupními veličinami, a to v nekonečně mnoha bodech. U MKP dostaneme výsledek

v konečném počtu bodů (uzlů sítě) a při jakékoliv změně zadaných veličin musíme celý problém vypočítat znovu. Velikou výhodou numerických metod obecně je, že zvládnou vyřešit problémy na daleko složitějších tělesech než analytické metody, které zvládnou spočítat jen tělesa elementární. [9]



Obrázek 20 Geometrie modelu vygenerovaná v programu GEO5

## 3.2 Materiálový model

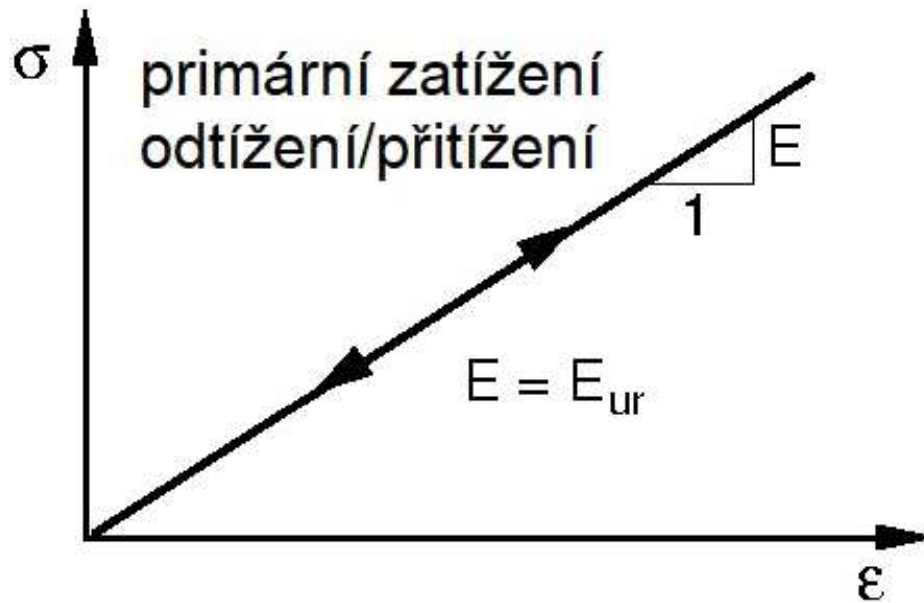
Pro dosažení požadovaných výsledků je za potřebí správně numericky popsat chování materiálu. Teorie pružnosti popisuje mnoho různých modelů, ať už lineárních nebo nelineárních. Hodně z nich lze aplikovat na geotechnické úlohy.

Volba správného modelu spolu s následným zadáním parametrů materiálů (v našem případě horninového masivu) je jednou z nejdůležitějších a zároveň nejproblematičtějších úloh při samotném modelování konstrukce metodou konečných prvků. [10]

### 3.2.1 Lineární modely

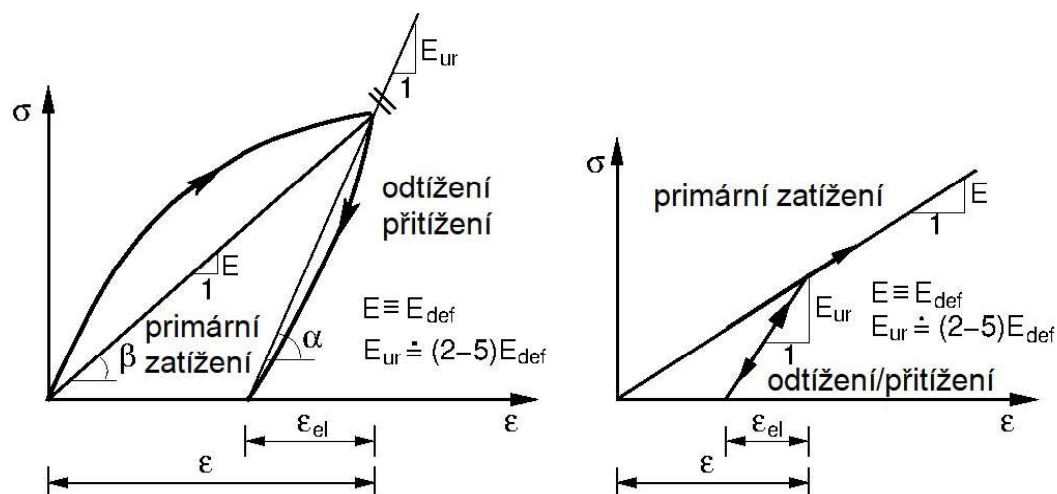
Lineární modely nám jsou schopny poskytnou rychlý, odhad skutečného chování konstrukce. Jsou vhodné v případě, že nás zajímá pouze napjatost nebo deformace masivu, a nikoliv oblast a způsob možného porušení. Lze je také použít v případě, že dochází pouze k lokálnímu porušení, které nemá vliv v globálním měřítku konstrukce. Mezi lineární modely řadíme model elastický a elastický modifikovaný.

**Lineární elastický model** vychází z Hookova zákona, který popisuje za předpokladu jednoosé napjatosti závislost mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\epsilon$  pomocí Youngova modulu pružnosti.



Obrázek 21 Vztah mezi napětím a přetvořením pro LM [10]

**Modifikovaný elastický model** bere v potaz, že samotná linearita u zemin tak úplně neplatí. To můžeme pozorovat u odtížení, kdy vidíme, že pružná deformace tvoří jen malou část z celkové deformace. Pokles tuhosti materiálu na zatěžovací dráze v důsledku plastického přetváření je zohledněn zavedením modulu pružnosti  $E$ . Při odtížení předpokládáme pružné chování materiálu. Model vychází ze vzorce  $E = \tan\beta = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ .  $E_{ur}$  značí modul pružnosti při odtížení [10]



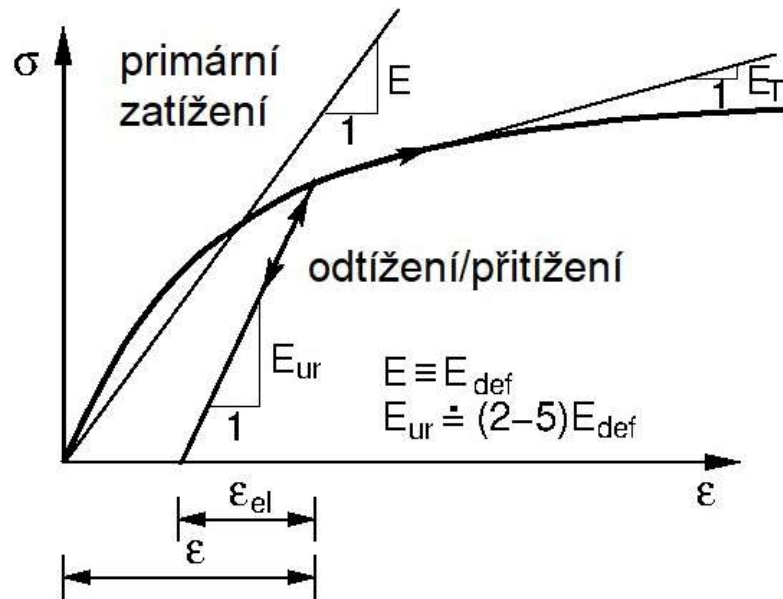
Obrázek 22 (a) Pracovní diagram zeminy, (b) Vztah mezi napětím a přetvořením

[10]

### 3.2.2 Nelineární modely

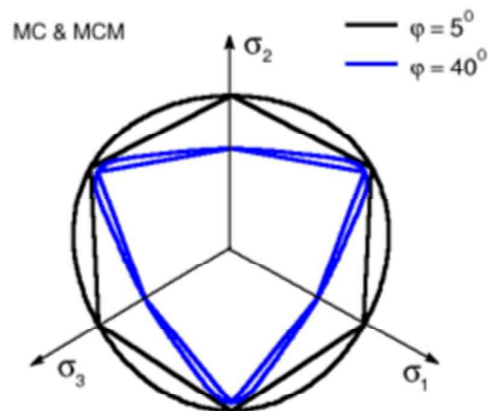
Nelineární modely se dělí do dvou skupin. První skupina vychází z Columbovi podmínky přetvoření, sem řadíme modely Drucker-Prager, Mohr-Columb a modifikovaný Mohr-Columb. Přednost těchto modelů je možnost vymodelovat změkčení i zpevnění. Za předpokladu geostatické napjatosti se tyto modely vyznačují neomezeným elastickým přetvářením. Druhá skupina materiálových modelů vychází z představy kritického stavu zeminy. Do druhé skupiny řadíme modely modifikovaný Cam-Clay, zobecněný Cam-Clay a hypoplastický jíl. [10]

Nelineární modely umožňují podstatně lépe vystihnout nelineární odezvu zemin na vnější zatížení. Hranici mezi lineární (elastickou) a nelineární (plastickou) odezvou tvoří plocha plasticity. Překročení této hranice je popsáno podmínkou porušení a vede k vývoji trvalých plastických deformací. Funkce může být buď konstantní nebo se mění v závislosti na napětí. [10]



Obrázek 23: Vztah mezi napětím a přetvořením pro nelineární modely [9]

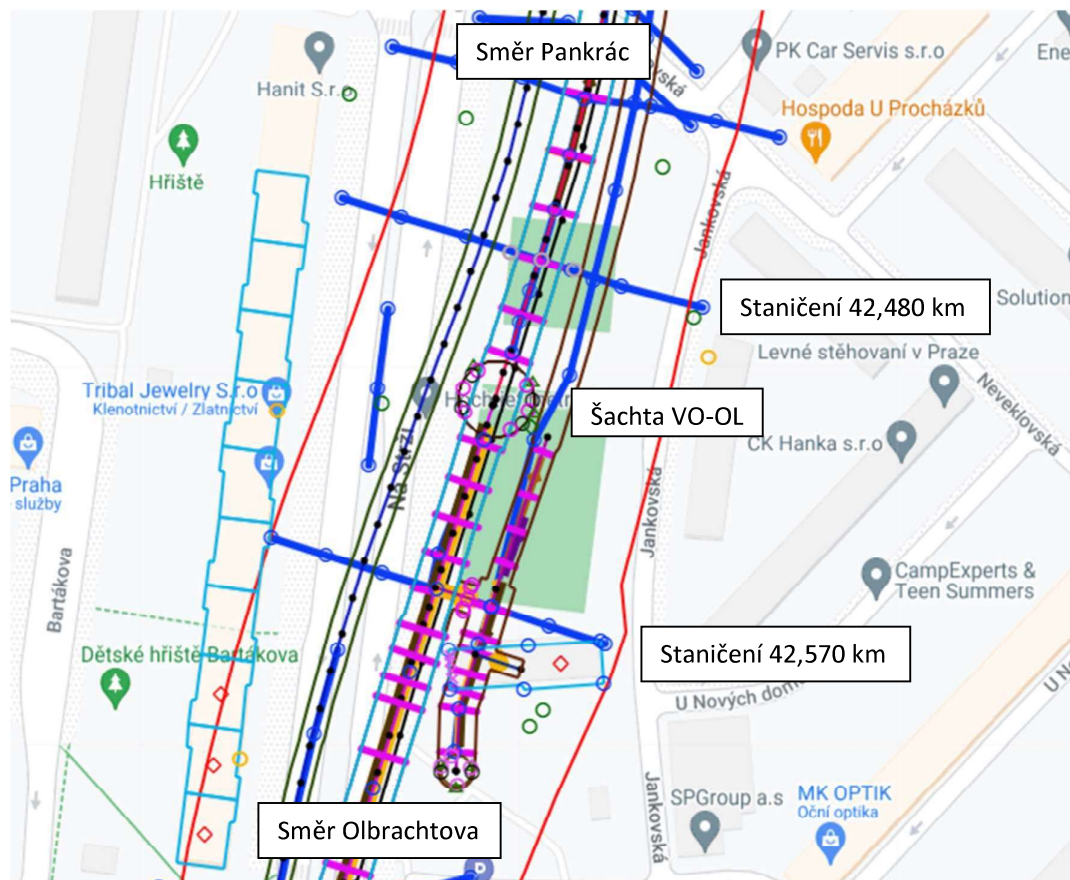
Při modelování obou tunelových profilů jsem zvolil u všech zemin a hornin materiálový model **Mohr-Coulomb modifikovaný (MMC)**. Vstupní parametry tohoto modelu jsou modul pružnosti  $E$ , Poissonovo číslo  $\nu$ , úhel dilatace  $\psi$ , úhel vnitřního tření  $\varphi_{ef}$  a soudržnost zeminy  $C_{ef}$ . Efektivní parametry se používají z důvodu modelování pro ustálený stav po redistribuci pórových tlaků.



Obrázek 24: MCM a MC podmínky plasticity v deviatórské rovině [10]

## 4.0 Provedené numerické modelování

Modelovány budou dva tunelové profily ve staničení 42,470 km směrem do stanice Pankrác ze šachty VO-OL a 42,570 směrem do stanice Olbrachtova ze šachty VO-OL.



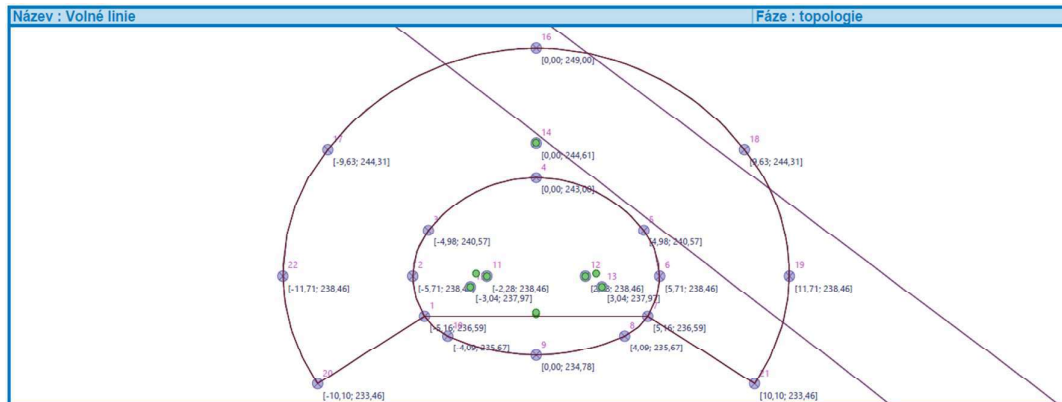
Obrázek 25 Situace části trasy Pankrác-Olbrachtova [12]

### 4.1 Profil ve staničení 42,570

Modelovány byly 2 varianty. První varianta byla bez uvažování podzemní vody a druhá s uvažováním podzemní vody zadaná pomocí výpočtu ustáleného proudění. Obě varianty mají 7 fází výpočtu, stejnou geometrii modelovaného řezu a stejné vstupní geotechnické parametry.

Geometrie tunelu byla sestavená z bodů pospojovaných přímkami a oblouky. Oblouky v kalotě a oblouky ohraničující oblast s radiálními svorníky jsou zadané pomocí počátečního a koncového bodu a bodu třetího. Dva oblouky na dně tunelu spojující body 1-10 a 7-8 jsou zadané pomocí počátečních a koncových bodů a středu.

Body pro vytvoření geometrie tunelu byly odečteny z výkresu „Vzorový příčný řez – Tunel o.v 5,0m“ viz. příloha 1.



Obrázek 26 Topologie, volné body a linie, GEO5

### Rozdělení fází výpočtu

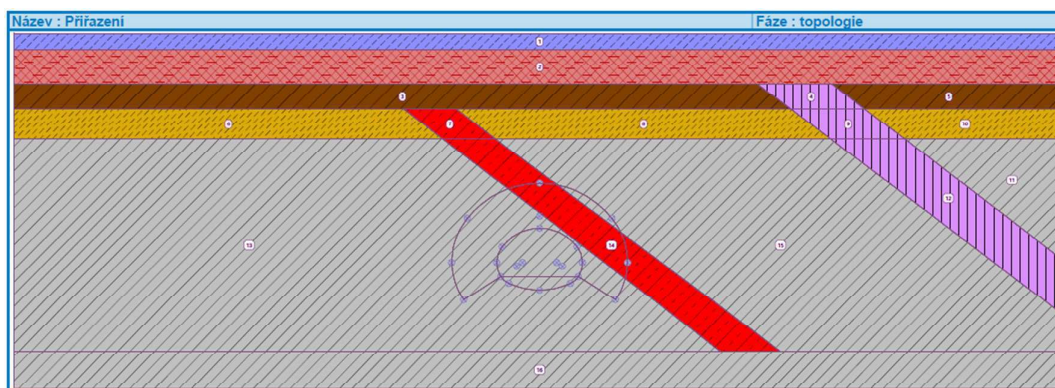
Fáze 1 = Primární napjatost před začátkem ražby profilu

Fáze 2-4 = Vyražení kaloty a aktivace ostění kaloty

Fáze 5-7= Vyražení dna a aktivace ostění dna



Při zadání modelu se také zadávají geotechnické vrstvy a přiřazují se do obrázců rozhraní. Vrstvy hornin a zemin byly odečteny z výkresu charakteristický příčného řezu s geologií viz. příloha 2.



Obrázek 27 Topologie, Přiřazení, GEO5

Modrá barva = Antropogenní navážky

Cihlová barva = Terasovité sedimenty

Hnědá barva = Břidlice zcela až velmi zvětralé

Okrová barva = Břidlice mírně zvětral

Červená barva = Břidlice tektonicky porušené

Růžová barva = Silur mineta

Šedivá barva = Břidlice navětralé až zdravé

#### Vstupní geotechnické parametry:

##### **QT-SOD 12-Terasové sedimenty**

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný	
Objemová tíha :	$\gamma$	= 19,00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$	= 0,30
Modul pružnosti :	$E$	= 15,00 MPa
Biotův parametr :	$\alpha$	= 1,00
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t$	= 0,000012 1/°C
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur}$	= 15,00 MPa
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef}$	= 30,00 °
Soudržnost zeminy :	$c_{ef}$	= 1,00 kPa
Úhel dilatance :	$\psi$	= 0,00 °
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat}$	= 19,00 kN/m <sup>3</sup>

### SP2\_SOD12-Břidlice zcela až velmi zvětralé

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 22,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,35$
Modul pružnosti :	$E = 20,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 40,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 15,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 10,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 23,00 \text{ kN/m}^3$

### SP4\_SOD12-Břidlice mírně zvětralé

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 24,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,28$
Modul pružnosti :	$E = 200,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 400,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 20,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 30,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 25,00 \text{ kN/m}^3$

### SP7Bo-Břidlice navětralé a zdravé

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,24$
Modul pružnosti :	$E = 500,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 800,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 35,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 70,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 5,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 27,00 \text{ kN/m}^3$

### SP7Bo-Břidlice navětralé a zdravé-Kotvené

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,24$
Modul pružnosti :	$E = 625,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 900,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 35,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 301,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 5,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 27,00 \text{ kN/m}^3$

### Antropogení navážky

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 23,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,49$
Modul pružnosti :	$E = 10,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 20,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 0,01^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 10,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 24,00 \text{ kN/m}^3$

### SP7p-Břidlice tektonicky porušené

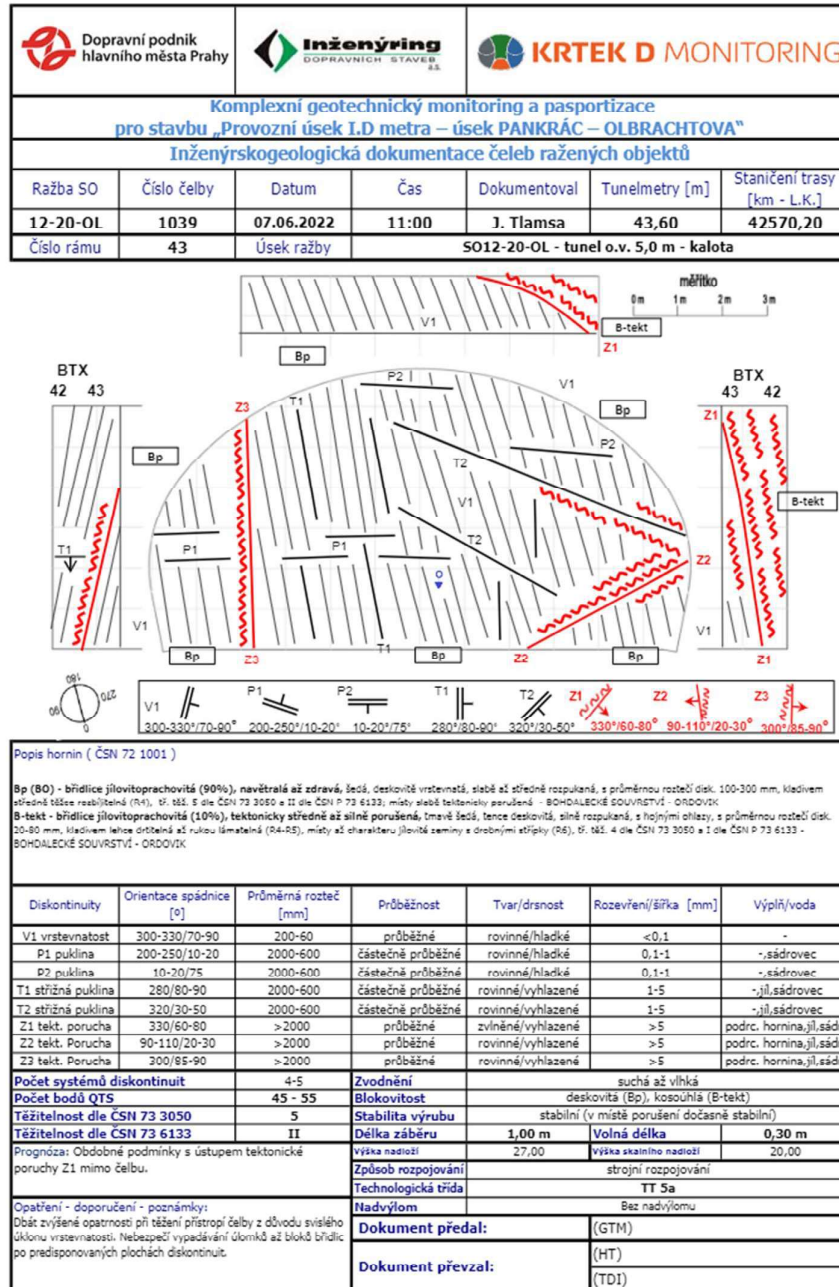
Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 24,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,33$
Modul pružnosti :	$E = 60,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 120,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 20,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 30,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 25,00 \text{ kN/m}^3$

### SP14-silur mineta\_SOD 12

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 27,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,20$
Modul pružnosti :	$E = 800,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 1600,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 55,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 250,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 25,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 28,00 \text{ kN/m}^3$

### SP7p-Břidlice tektonicky porušené kotvené

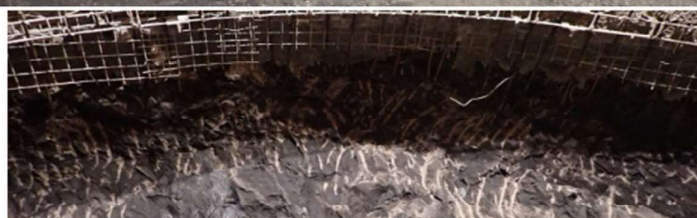
Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,33$
Modul pružnosti :	$E = 75,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 150,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 20,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 202,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 26,00 \text{ kN/m}^3$



Obrázek 28 Dokumentace čelby tunelu ve staničení 42,570 km. [12]

Ražba SO	Číslo čelby	Datum	Čas	Fotografoval	Tunelometry [m]	Staničení trasy [km - L.K.]
12-20-OL	1039	07.06.2022	11:00	J. Tlamsa	43,60	42570,20

**FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE**



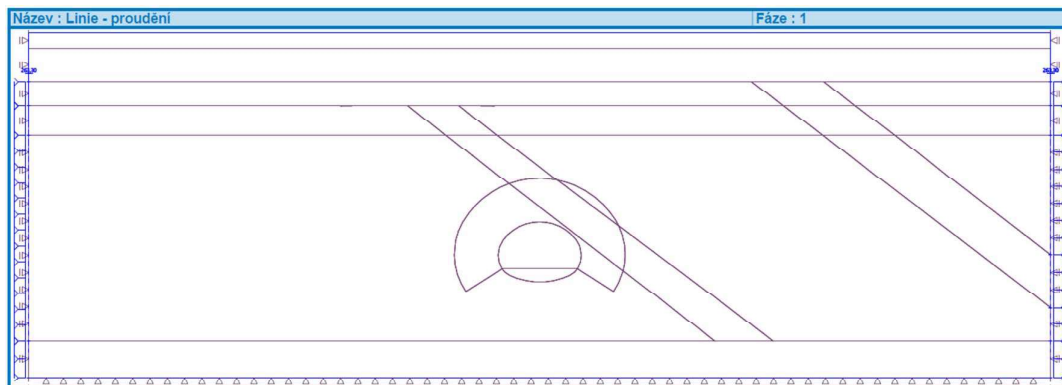
Obrázek 29 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,570 km. [12]

Jak je patrné z uvedených vstupních geotechnických parametrů, radiální svorníky jsou zahrnuty do výpočtu zlepšením parametrů horninového masivu v oblastech, kde se radiální svorníky vyskytují. Modrá barva v obrázku Přiřazení značí antropogenní náložky, tmavě červená je pro terasovité sedimenty, hnědá je pro břidlice zcela až velmi zvětralé, okrová je břidlice mírně zvětralé, fialová silur mineta, červená pro břidlice tektonicky porušené a šedivá je pro břidlice navětralé a zdravé.

Poslední věc řešená při tvorbě modelu je síť pro výpočet metodou konečných prvků. (Viz obrázek č. 18) Obecně je výhodné pro optimalizování rychlosti výpočtu a přesnosti zahustit síť v okolí tunelu, a naopak po okrajích rozhraní mít síť řidší.

#### 4.1.1 Výpočet pro 42,570 km se zohledněním podzemní vody

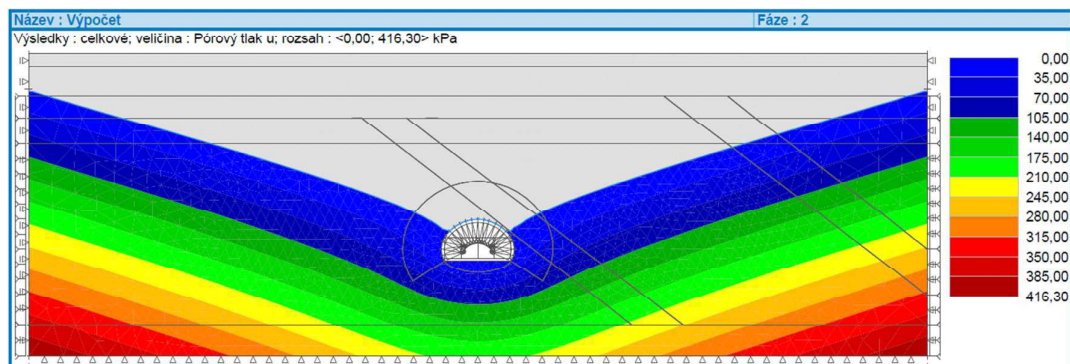
Po zadání modelu následuje 1. fáze výpočtu. V této fázi se snažíme spočítat primární napjatost. Oproti topologii se skoro nic nezadává. Jediné, co se do výpočtu v této fázi přidalo byly linie proudění. Po stranách rozhraní byl zadán pórový tlak až do výše úrovně hladiny podzemní vody. Horní a spodní ohraničení rozhraní bylo definováno jako nepropustné.



Obrázek 30 Fáze 1, Linie-proudění, GEO5

Výpočet probíhá metodou Newton-Raphson. Musíme zadat relaxační faktor výpočtového kroku, maximální počet relaxací výpočtového kroku a maximální počet iterací pro jeden výpočetní krok. Ustálené proudění se též vypočítá metodou Newton-Raphson. Stejné nastavení výpočtu bude použito u všech fází. Úspěšný výpočet nám přinesl očekávané výsledky. Nulové deformace v obou směrech.

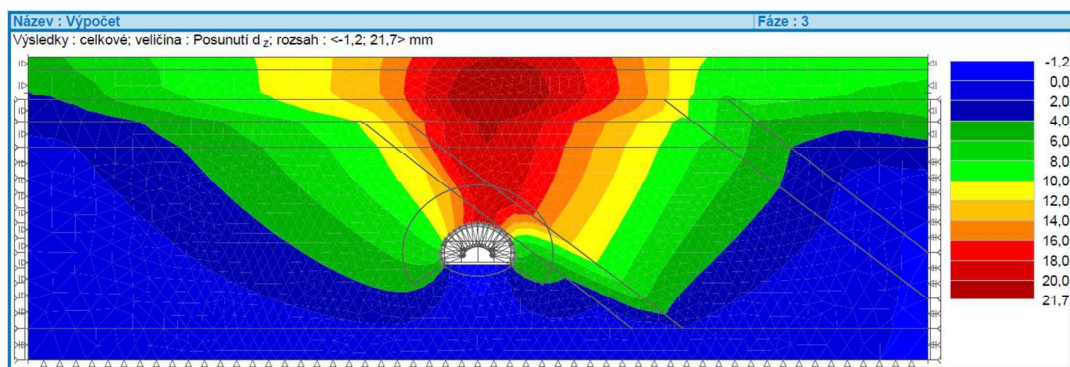
V druhé fázi výpočtu provedeme vyražení kaloty a přidáme exkavaci. Exkavací deaktivujeme část sil, kterými hornina uvnitř výrubu působí na horninu v okolí výrubu. V našem případě bylo zvoleno deaktivovat 70 % těchto sil. Dále musíme vyraženou kalotu v liniích proudění nadefinovat jako průsakovou. Správnost zadání průsakovosti si lze zkontrolovat na vykreslení výsledku pórového tlaku.



Obrázek 31 Fáze 2, pórový tlak, GEO5

Maximální sedání na povrchu ve fázi 2 je spočítáno 18,1 mm, a to nad osou tunelu.

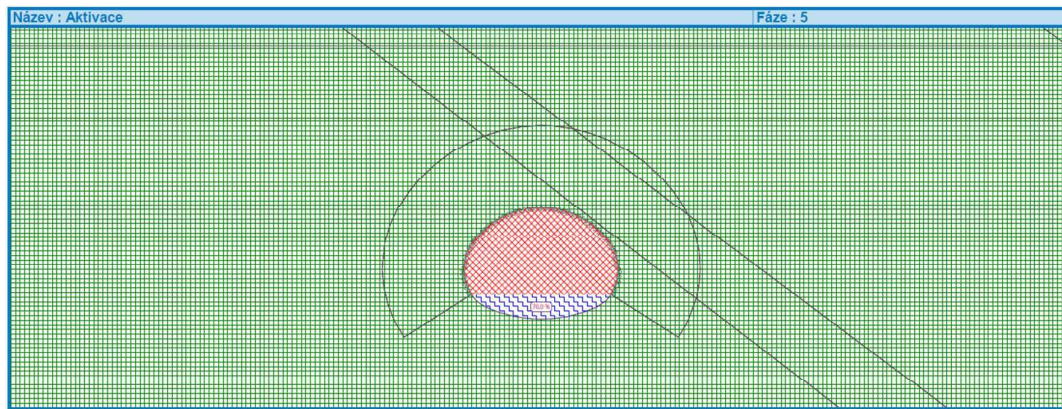
Ve třetí fázi je v kalotě aktivováno ostění ze stříkaného betonu tloušťky 300 mm, modulem pružnosti  $E=14840$  MPa a modulem pružnosti ve smyku  $G=6233$  MPa. Exkavace deaktivuje z původních 70 % už jen 35 %. Poslední změnou ve třetí fázi je přiřazení hornin se zlepšenými vlastnostmi, simulující svorníky. Proudění se v této fázi nijak nemění. Maximální sedání na povrchu změřené funkcí monitoru se z 18,1 mm zvýšilo na 19,7 mm.



Obrázek 32 Fáze 3, Sedání, GEO5

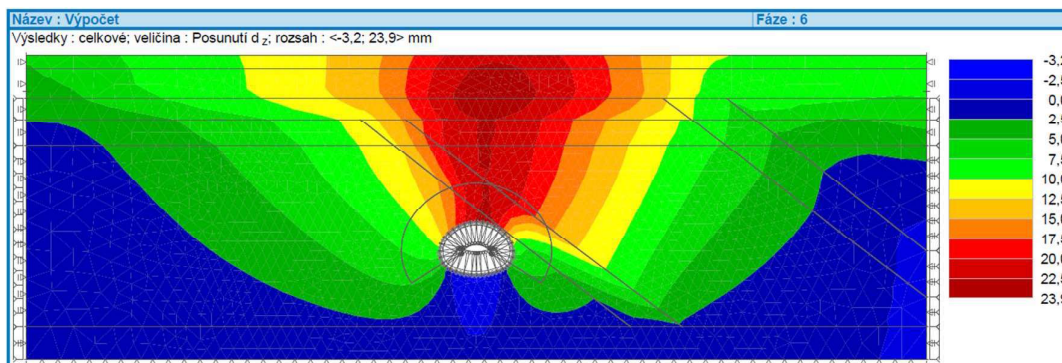
Mezi fází 3 a 4 došlo ke zlepšení parametrů stříkaného betonu. Modul pružnosti teď uvažujeme  $E=18744$  MPa a smykový modul pružnosti  $7872$  MPa. Exkavace ve čtvrté fázi dobíhá na  $0\%$ . Proudění ani přiřazení se v této fázi nijak nemění. Maximální sedání na povrchu opět vzrostlo a to na  $21,4$  mm.

Ve fázi 5 se vyrazí dno tunelu. Přidá se nová exkavace, zase začínající na  $70\%$  a přiřadí se čerstvě vyraženému dnu. Dále se musí upravit způsob proudění. Zanesse se průsakovost i do dna tunelu. Nově vyražená část tunelu je zatím spočítána bez ostění. Maximální deformace na povrchu vzrostla na  $21,6$  mm.



Obrázek 33 Fáze 5, Aktivace, GEO5

V šesté fázi se přidá ostění ze stříkaného betonu na dno tunelu. Parametry mladého stříkaného betonu jsou stejné jako v kalotě ve třetí fázi. Exkavace se opět sníží na  $35\%$ . Linie proudění a přiřazení zůstávají stejné. Maximální sedání na povrchu zůstává stejné.

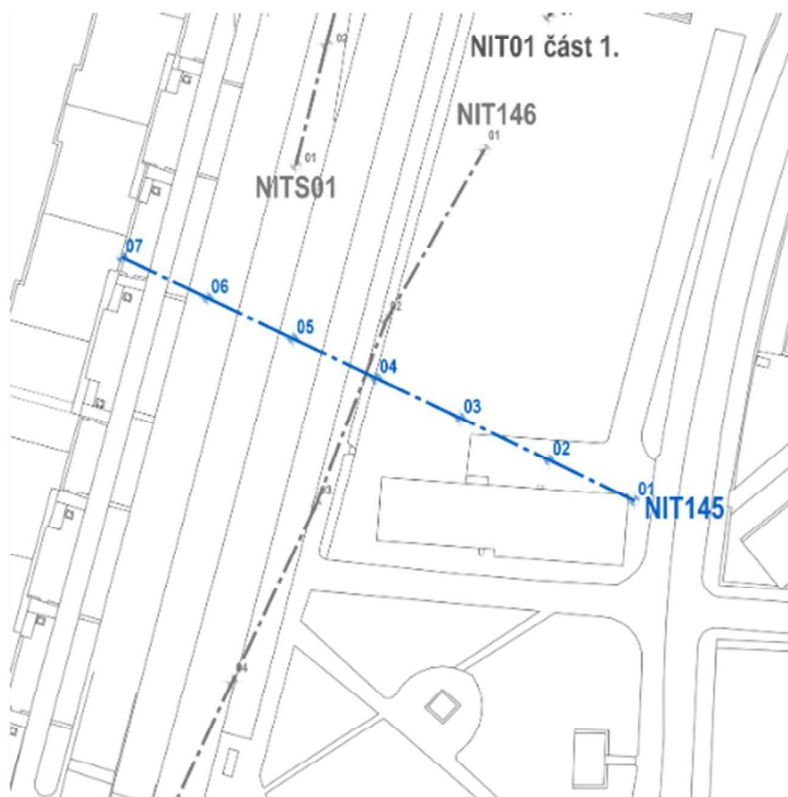


Obrázek 34 Fáze 6, Sedání, GEO5



V poslední 7 fázi výpočtu se stříkanému betonu zlepšily parametry, stejně jako se udělalo u nosníků v kalotě. Exkavace opět dobíhá na 0 %. Proudění a přiřazení se oproti předchozí fázi nemění. Maximální sedání na povrchu zůstává na 21,6 mm.

#### 4.1.2 Porovnání výsledků v řezu 42,570 km s geotechnickým měřením

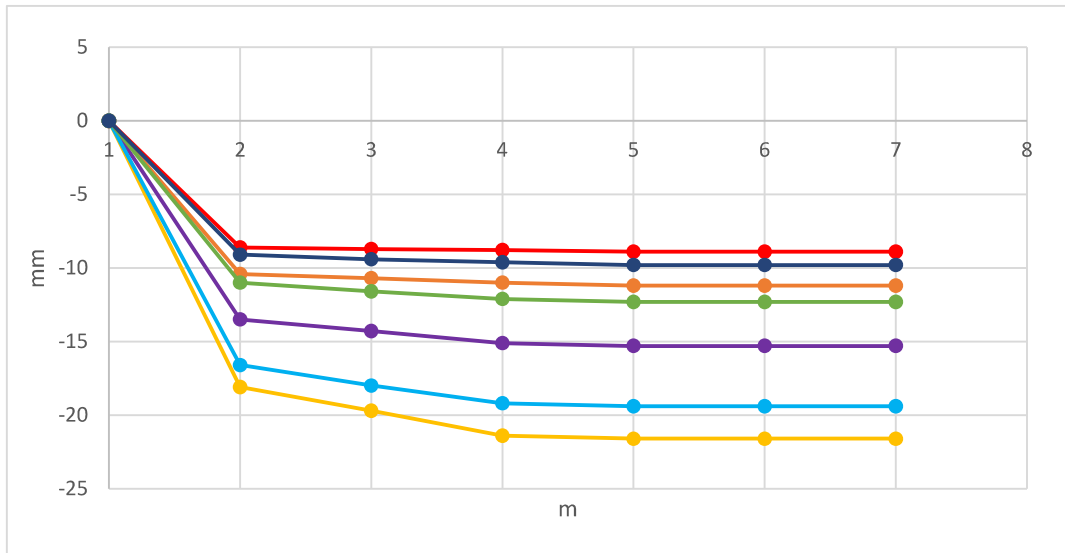


Obrázek 35 Polohy bodů pro měření sedání na povrchu nivelací [12]

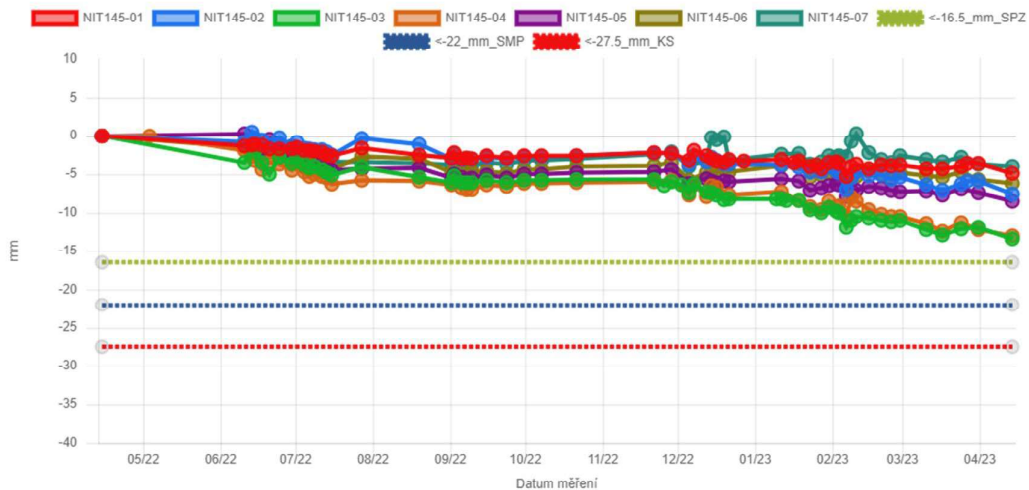
Pro porovnání naměřeného sedání na povrchu s vypočteným sedáním na povrchu v GEO5 byla vytvořena tabulka s grafem.

Tabulka 1 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km s ustáleným prouděním

[mm]	Fáze	1	2	3	4	5	6	7
Body								
7		0	-8,6	-8,7	-8,8	-8,9	-8,9	-8,9
6		0	-10,4	-10,7	-11	-11,2	-11,2	-11,2
5		0	-13,5	-14,3	-15,1	-15,3	-15,3	-15,3
4		0	-18,1	-19,7	-21,4	-21,6	-21,6	-21,6
3		0	-16,6	-18	-19,2	-19,4	-19,4	-19,4
2		0	-11	-11,6	-12,1	-12,3	-12,3	-12,3
1		0	-9,1	-9,4	-9,6	-9,8	-9,8	-9,8



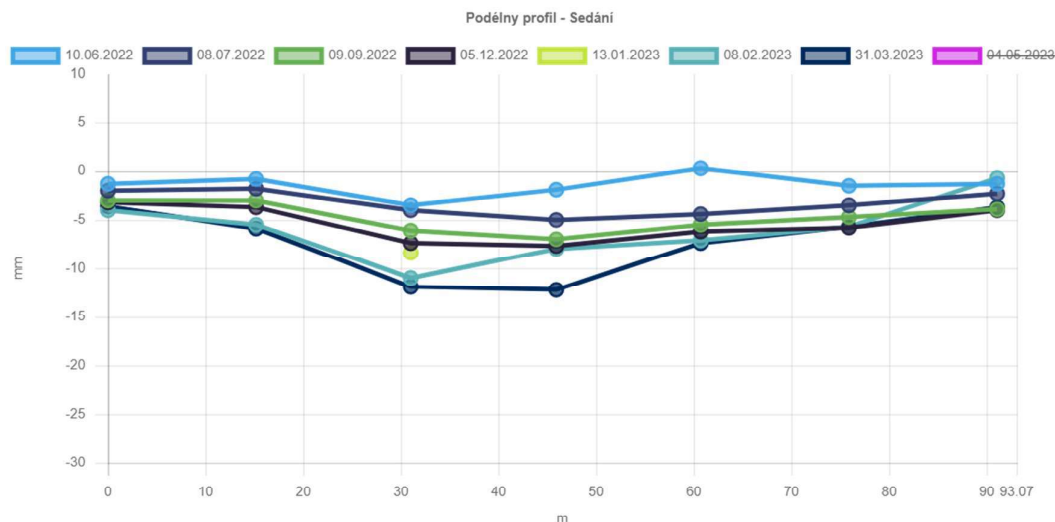
Obrázek 37 Graf sedání v jednotlivých fázích modelování, 42,570 km verze s lineárním prouděním



Obrázek 36 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [12]

Barvy v tabulce korespondují s grafem. Umístění bodů koresponduje s reálným umístěním bodů pro měření. V tabulce je sedm bodů a jejich sedání pro sedm fází výpočtu.

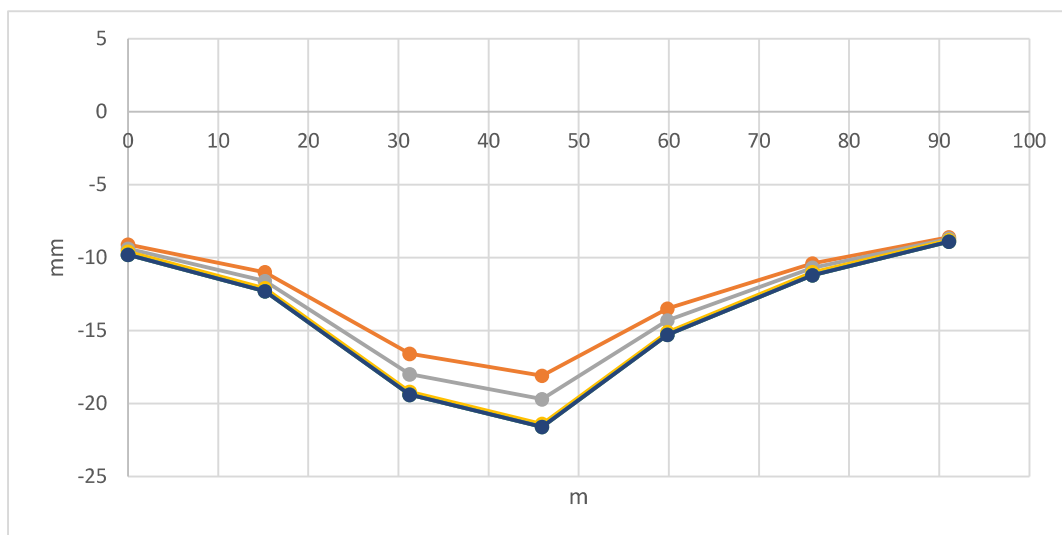
Z grafu je hned zřejmé, že výsledky modelování do jisté míry nadhodnocují sedání povrchu (vypočtené maximální sedání bylo 22 mm, geotechnickým monitoringem naměřeno 14 mm).



Obrázek 38 Podélný profil – sedání [12]

Na grafu z obrázku 38 vidíme naměřené hodnoty sedání geotechnickým monitoringem v bodech 1-7 (viz. situace bodů obrázek 35, nalevo je bod 1, napravo bod 7) v sedmi časech. Z tohoto grafu jde lépe vidět poklesová kotlina na povrchu.

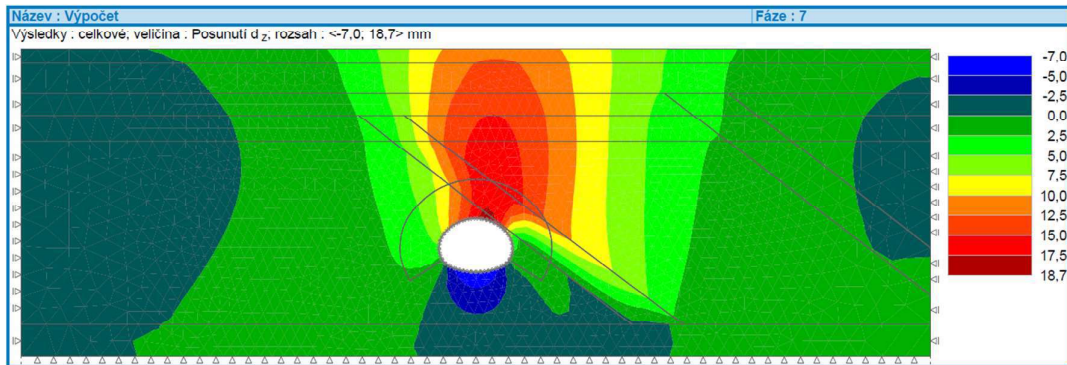
Pro lepší porovnání naměřených hodnot geotechnickým monitoringem a spočtených hodnot ze softwaru byl opět vytvořen graf.



Obrázek 39 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5

### 4.1.3 Výpočet pro 42,570 km bez zahrnutí vody

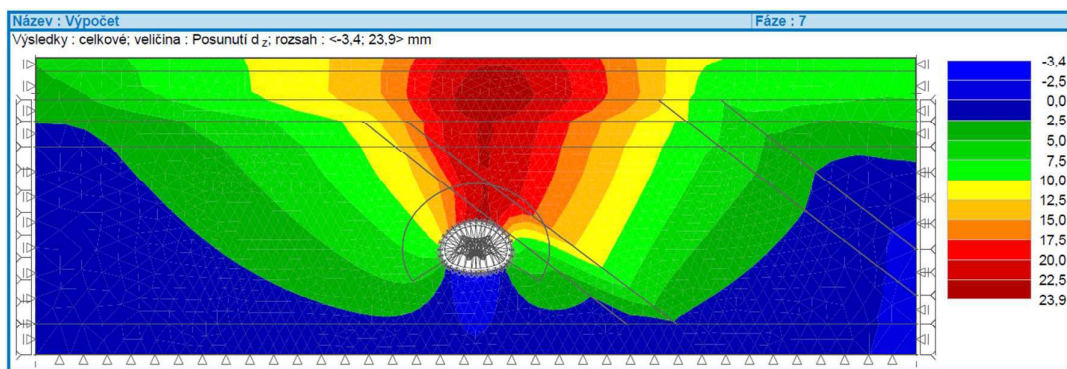
Zadání modelu bez uvažované podzemní vody je velmi obdobné jako u verze s vodou. Ve fázích 1-7 je jediná změna a ta, že výpočet provádíme bez lineárního proudění vody.



Obrázek 40 Fáze 7, sedání-verze bez vody, GEO5

Jak můžeme z výsledů deformace  $d_z$  v poslední fázi výpočtu vidět, hodnoty sedání jsou znatelně nižší.

Rozdíl sedání těsně nad výrubem je 5,2 mm a na povrchu 12 mm, což výrazně lépe koresponduje s naměřenou hodnotou 14 mm. Dále můžeme vidět rozdíl v sedání způsobený vytvořením depresního kužele a následným poklesem hladiny podzemní vody.

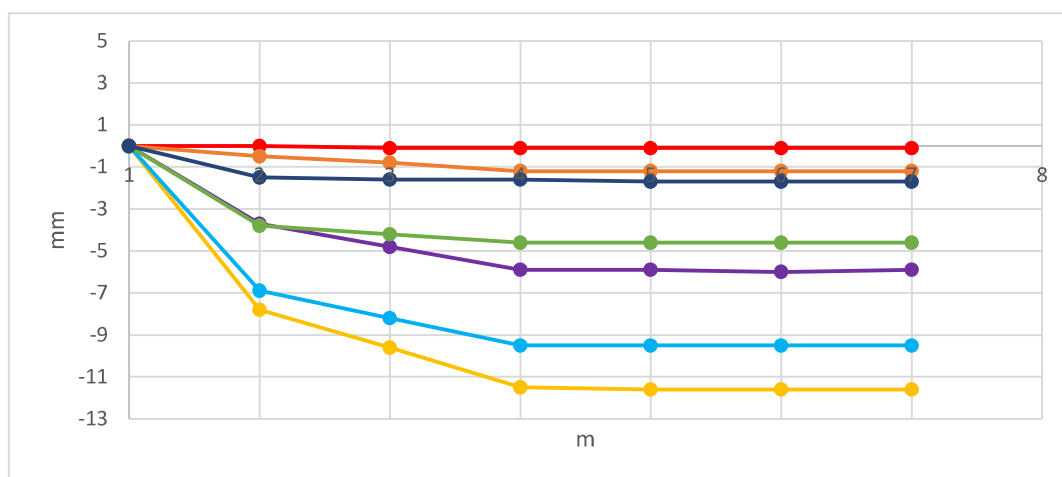


Obrázek 41 Fáze 7, sedání-verze s podzemní vodou, GEO5

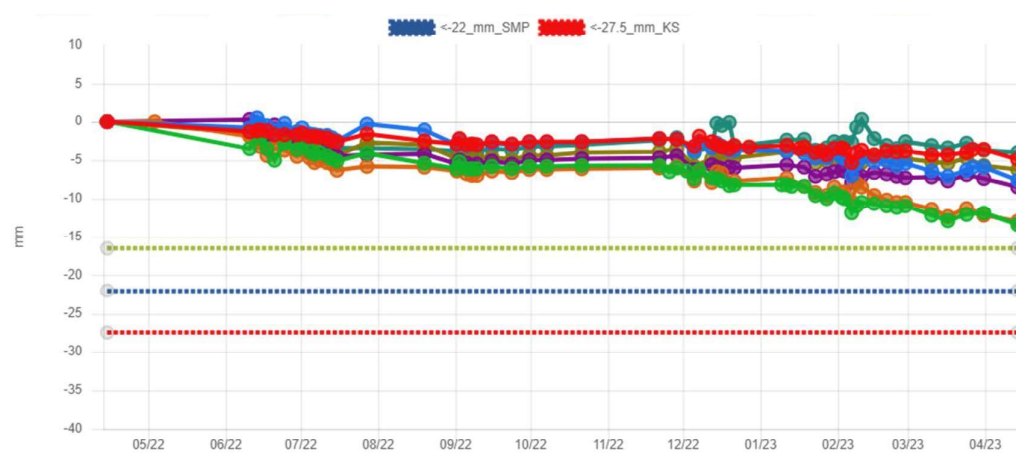
### 4.1.3 Porovnání výsledků v řezu 42,570 km bez zahrnutí vody s výsledky geotechnického monitoringu

Tabulka 2 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km bez vody

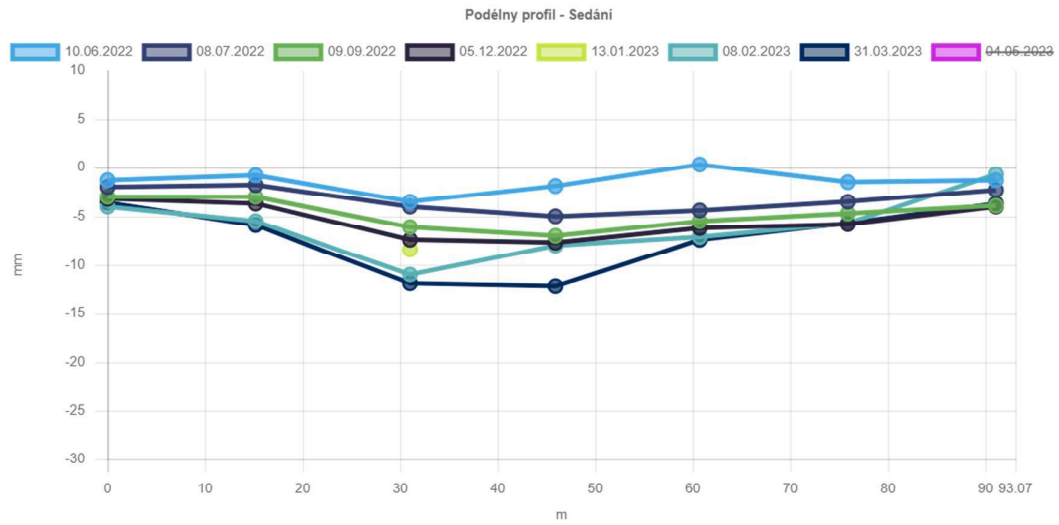
[mm]	Fáze	1	2	3	4	5	6	7
Body								
7		0	0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
6		0	-0,5	-0,8	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
5		0	-3,7	-4,8	-5,9	-5,9	-6	-5,9
4		0	-7,8	-9,6	-11,5	-11,6	-11,6	-11,6
3		0	-6,9	-8,2	-9,5	-9,5	-9,5	-9,5
2		0	-3,8	-4,2	-4,6	-4,6	-4,6	-4,6
1		0	-1,5	-1,6	-1,6	-1,7	-1,7	-1,7



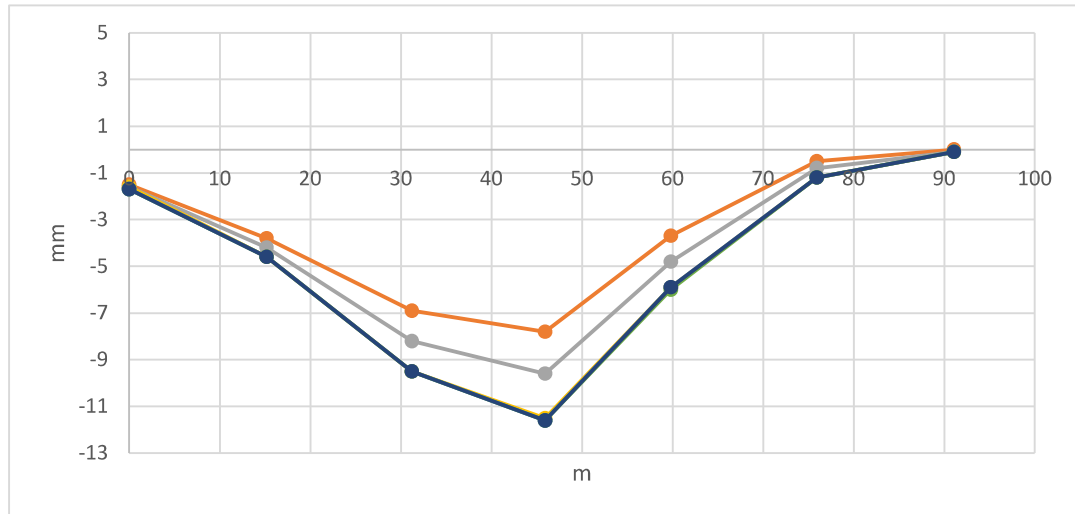
Obrázek 42 Graf sedání v čase, 42,570 km, verze bez vody



Obrázek 43 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [12]



Obrázek 45 Podélný profil – sedání [12]



Obrázek 44 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5

Z grafů na obrázcích 44 a 45 můžeme vidět, že největší rozdíl v sedání mezi naměřenými a spočtenými hodnotami je v ose kolmo nad tunelem.

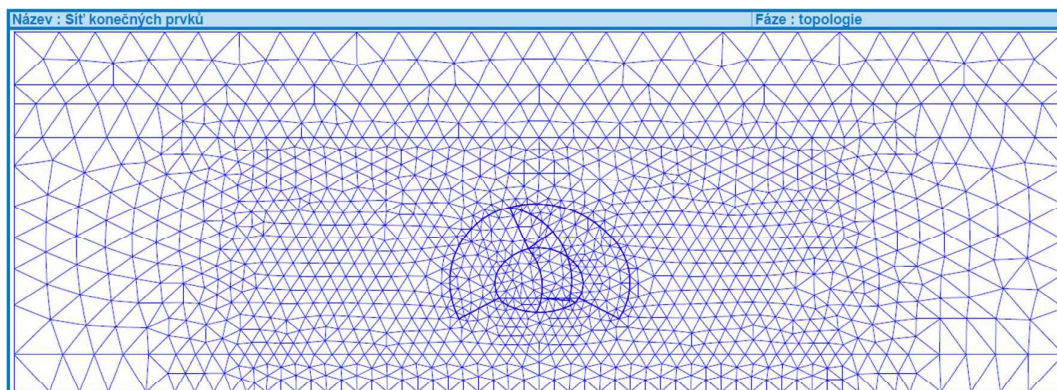
## 4.2 Modelování profilu ve staničení 42,470 km

V tomto profilu byl výrub dvoukolejného tunelu členěn vertikálně na první dílčí výrub (levá část výrubu) a druhý dílčí výrub (pravá část výrubu). Oba dílčí výruby jsou ještě členěny na kalotu a dno

Kvůli rozdělení na dva dílčí výruby budeme mít 14 výpočetních fází. Opět jsou dvě výpočetní verze jedna s uvažováním ustáleného proudění a druhá bez. Všechny ostatní parametry modelu jsou taktéž jako v případě profilu ve 42,570 km stejné.

V nastavení projektu vybereme rovinnou geometrii úlohy a typ výpočtu napjatost. V rozhraní se naznačí vrstvy jednotlivých hornin, dále se přidají do výpočtu horniny a zeminy. Nakonec se vygeneruje prvková síť.

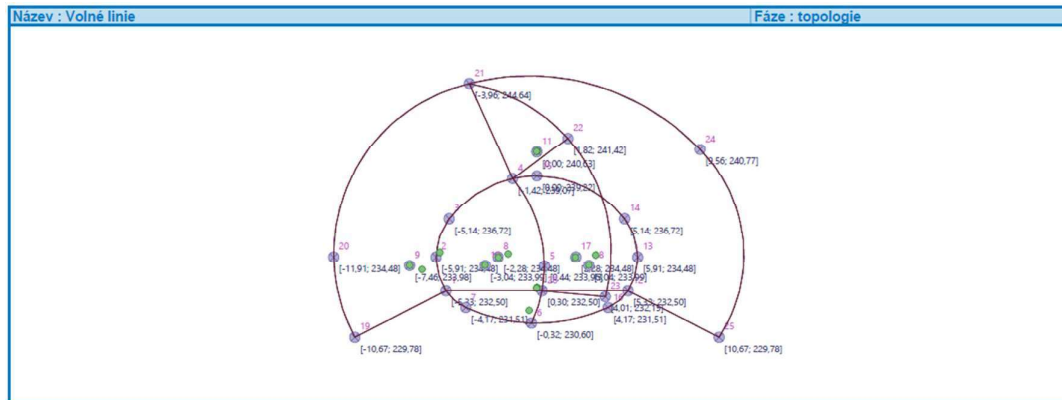
Z volných linií lze poznat členění výrubu. Po obvodu vidíme opět radiální svorníky délky 6 m. V prostoru druhého dílčího výrubu jsou po vyražení štoly svorníky délky pouze 4 m.



Obrázek 46 Geometrie modelu, síť konečných prvků, GEO5

Geometrie tunelu byla sestavená z bodů pospojovaných přímkami a oblouky. Oblouky spojující body 1-3, 4-14 a 14-12, jsou oblouky tvořené pomocí počátečního, koncového a třetího bodu, který leží na oblouku. Všechny ostatní oblouky jsou vytvořené pomocí počátečních a koncových bodů a jejich středů.

Body pro vytvoření geometrie tunelu byly odečteny z výkresu vzorového příčného řezu dvoukolejného tunelu (viz. příloha 3)



Obrázek 47 Geometrie modelu, volné body a linie, GEO5

### Rozdělení fází výpočtu

Fáze 1 = primární napjatost před začátkem ražby profilu

Fáze 2-4 = vyražení kaloty prvního dílčího výrubu a aktivace ostění

Fáze 5-7 = vyražení dna prvního dílčího výrubu a aktivace ostění

Fáze 8 = degradace primárního ostění na kontaktu s druhým dílčím výrubem

Fáze 9-11 = vyražení kaloty druhého dílčího výrubu a aktivace ostění

Fáze 12-14 = vyražení dna druhého dílčího výrubu a aktivace ostění



 Dopravní podnik hlavního města Prahy		 Inženýring DOPRAVNÍCH STAVEB		 KRTEK D MONITORING		
<b>Komplexní geotechnický monitoring a pasportizace pro stavbu „Provozní úsek I.D metra – úsek PANKRÁC – OLBRACHTOVA“</b>						
<b>Inženýrskogeologická dokumentace čeleb ražených objektů</b>						
Ražba SO	Číslo čelby	Datum	Čas	Dokumentoval	Tunelometry [m]	Staničení trasy [km - L.K.]
12-20-PAD	1001-P	14.04.2022	3:00	J. Zemánek	42,70 *)	42469,50'
Číslo rámu	38	Úsek ražby	SO12-20-PAD - tunel o.v. 5,0 m zesílený I - pravá kalota			



Popis hornin (CSN 72 1001)

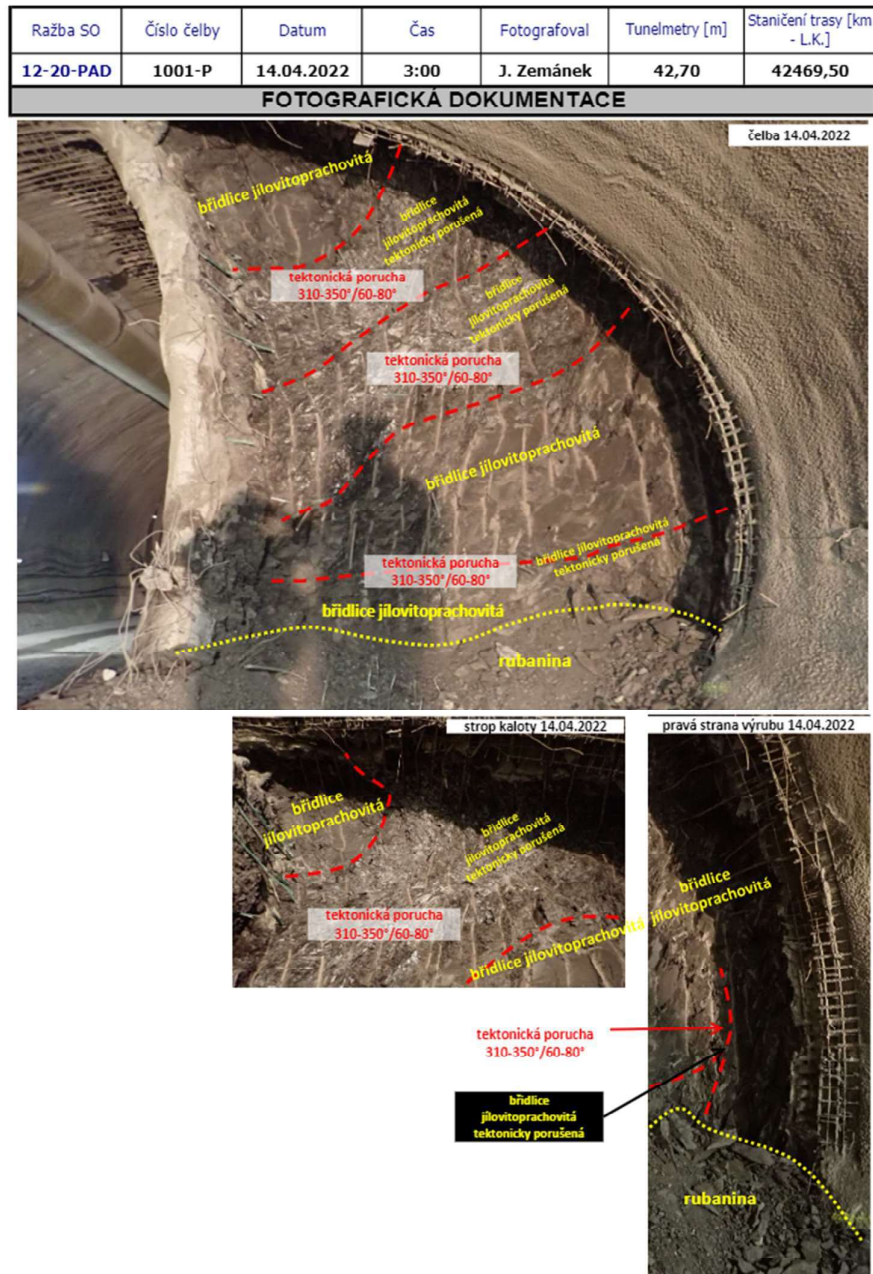
**Bp (B0) - břidlice jílovitoprachovitá (50%), tmavě šedá, deskovitě vrstevnatá, s průměrnou roztečí disk. 60-200 mm, kladivem středně těžce drtitelná, slabě až středně rozpučkaná, tř. R4, tř. těž. 5 dle ČSN 73 3050 a II dle ČSN P 73 1005; místy slabě tektonicky porušená - BOHDALECKÉ SOUVRSTVÍ - ORDOVIK**

**B-tek - břidlice jílovitoprachovitá (50%), tmavě šedá, tektonicky středně až silně porušená, kladivem lehce drtitelná až rukou lámatelná, místy až charakteru jílovité zeminy s drobnými střípkaty, tř. R4-R5 (R6), tř. těž. 4 dle ČSN 73 3050 a I dle ČSN P 73 1005 - BOHDALECKÉ SOUVRSTVÍ - ORDOVIK**

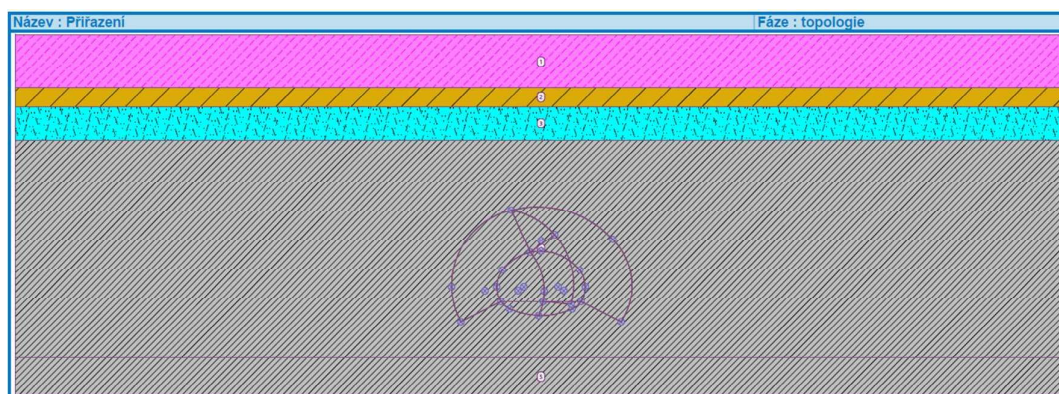
Diskontinuity	Orientace spádnice [°]	Průměrná rozteč [mm]	Průběžnost	Tvar/drsnost	Rozevření/šířka [mm]	Výplň/voda
V1 vrstevnatost	330/65	200-60	průběžné	rovinné/hladké	<0,1	-
P1 puklina	140/60	600-200	průběžné	rovinné/hladké	1-5	sádrovec
P2 puklina	240/60	600-200	část. průběžné	rovinné/hladké	0,1-1	-
P3 puklina	60/75	2000-600	část. průběžné	rovinné/hladké	0,1-1	-
T1 střížná pukl.	320/75	600-200	průběžné	rovinné/vyhlazené	1-5	místy podrc. Hor.
Z1 tekt. porucha	330/70	>2000	průběžné	zvlněné/vyhlazené	>5	podrc. hornina, jíl

<b>Počet systémů diskontinuit</b>	3-4	<b>Zvodnění</b>	nesoustředěné přítoky z čelby, ojedinělé průsaky
<b>Počet bodů QTS</b>	32-36	<b>Blokovitost</b>	deskovitá až tenké deskovitá, kosouhlá
<b>Těžitelnost dle ČSN 73 3050</b>	5	<b>Stabilita výrubu</b>	stabilní (v místě porušení dočasně stabilní)
<b>Těžitelnost dle ČSN 73 6133</b>	II	<b>Délka záběru</b>	1,00 m
		<b>Volná délka</b>	0,40 m
<b>Prognóza:</b> V dalších záhářech TT 5b. <b>Nebezpečí opadů a vyjždění bloků z přístrojů kaloty, ojediněle z čelby.</b>		<b>Výška nadloží</b>	27,00
		<b>Výška skalního nadloží</b>	20,00
<b>Opatření - doporučení - poznámky:</b> *) staničení upřesněno dle geodetického zaměření.		<b>Způsob rozpojování</b>	strojní rozpojování
		<b>Technologická třída</b>	NRT11 5b
		<b>Nadvýlom</b>	A = 0,00 m <sup>2</sup> (0,0 x 0,0 x 0,0)
		<b>Dokument předal:</b>	(GTM)
		<b>Dokument převzal:</b>	(HT)
			(TDI)

Obrázek 48 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,470 km. [12]



Obrázek 49 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,470 km. [12]



Obrázek 50 Geometrie modelu s označením geotechnických vrstev, GEO5

Růžová barva = Bazální terasové náplavy

Okrová barva = Břidlice silně zvětralé

Tyrkysová barva = Břidlice mírně zvětralé

Šedivá barva = Břidlice

Vstupní geotechnické parametry:

**QT1-Bazální terasové náplavy**

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,30$
Modul pružnosti :	$E = 15,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 15,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 28,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 1,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 20,00 \text{ kN/m}^3$

**SP2-Břidlice silně zvětralé**

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,40$
Modul pružnosti :	$E = 18,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 36,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 16,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 10,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 26,00 \text{ kN/m}^3$

#### SP4-Břidlice mírně zvětralé

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,36$
Modul pružnosti :	$E = 75,00 \text{ MPa}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 150,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 16,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 10,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 0,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 26,00 \text{ kN/m}^3$

#### SP7-Břidlice

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,25$
Modul pružnosti :	$E = 150,00 \text{ MPa}$
Změna modulu pružnosti :	$K_d = 1,00 \text{ MPa/m}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 300,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 35,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 55,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 5,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 27,00 \text{ kN/m}^3$

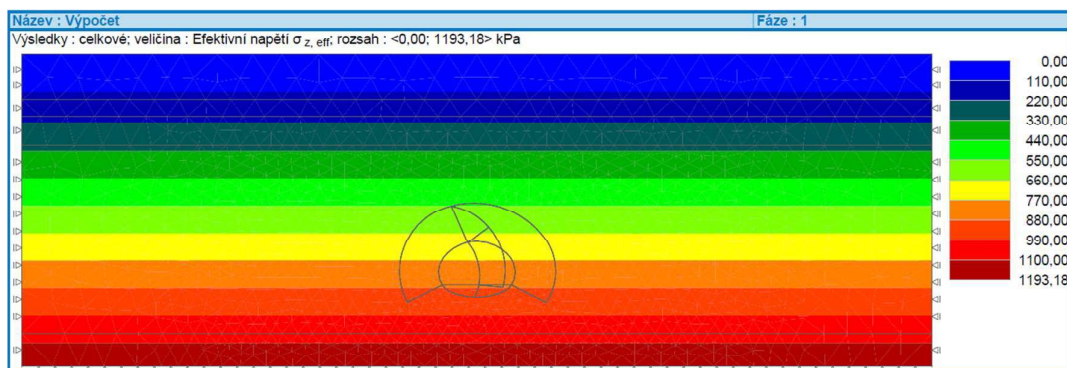
#### SP7-Břidlice-Kotvené

Materiálový model :	Mohr - Coulomb modifikovaný
Objemová tíha :	$\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$
Poissonovo číslo :	$\nu = 0,25$
Modul pružnosti :	$E = 225,00 \text{ MPa}$
Změna modulu pružnosti :	$K_d = 1,00 \text{ MPa/m}$
Biotův parametr :	$\alpha = 1,00$
Souč. teplotní roztažnosti :	$\alpha_t = 0,000012 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modul odtížení / přitížení :	$E_{ur} = 450,00 \text{ MPa}$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 35,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 411,00 \text{ kPa}$
Úhel dilatance :	$\psi = 5,00^\circ$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 27,00 \text{ kN/m}^3$

Tímto jsme obsáhli všechno potřebné v topologii, která je základem našeho výpočtu.

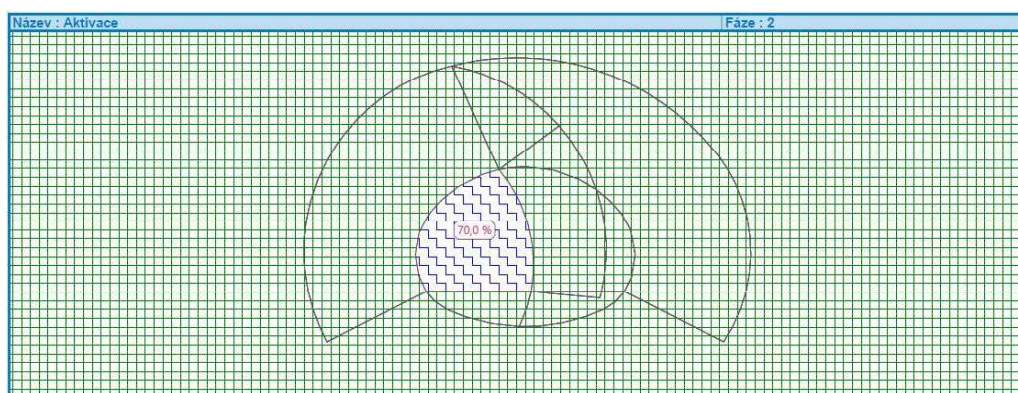
## 4.2.1 Výpočet pro 42,470 km bez vody

V 1. fázi výpočtu uvažujeme horninový masiv v primární napjatosti. Po zadání vstupních parametrů se v této fázi nic nezadá, akorát zahájíme výpočet a zjistíme nulové deformace a lineární nárůst napětí s přibývajícím hloubkou. Tyto výsledky pro nás slouží jako kontrola, že výpočet je správně nastavený.



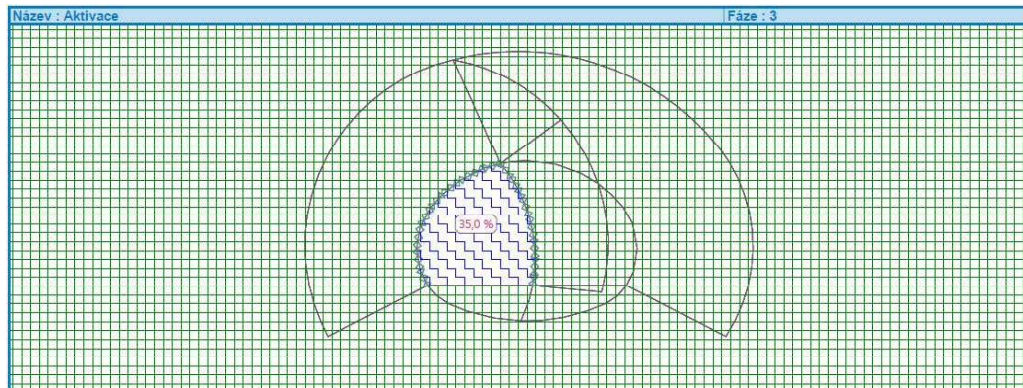
Obrázek 51 Fáze 1, Efektivní napětí  $\sigma_z$ , GEO5

Ve 2. fázi počítáme s vyražením průzkumné štoly, jakožto prvního dílčího výrubu. Tomuto prvnímu výrubu nastavíme exkavaci, a to stejně jak v předchozím profilu 70 %. Přiřazení zůstává stejné a nosíky zatím nepřidáváme. Maximální sedání na povrchu změřené monitorem je 2,2 mm.



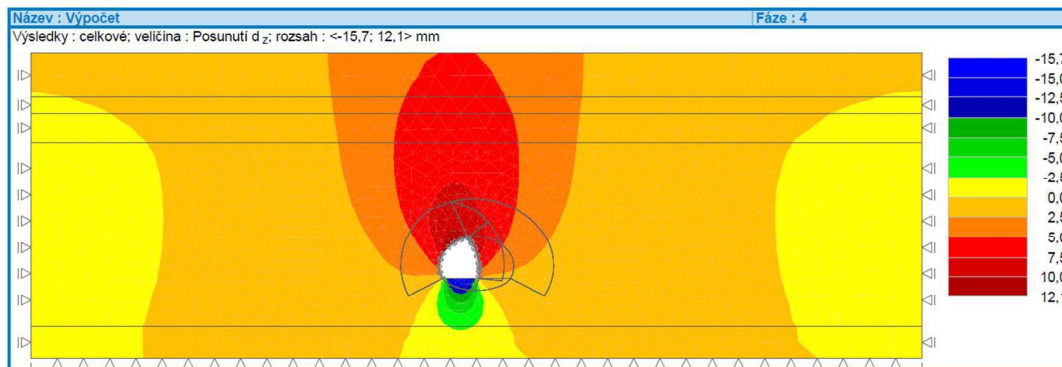
Obrázek 52 Fáze 2, Aktivace, GEO5

Ve 3. fázi výpočtu klesne exkavace na 35 %. Přidáme dva nosníky, které představují stříkaný beton s modulem pružnosti  $E= 14840$  MPa a modulem pružnosti ve smyku  $G= 6233$  MPa. Na spoji těchto nosníků zadáme kloubové spojení a na opačných koních zadáme vetknutí. Dále v přiřazení změňme typ horniny po obvodě výrubu z břidlic na břidlice kotvené, které mají vyšší modul pružnosti, modul přitížení a soudržnost. Maximální sedání na povrchu v této fázi výpočtu je 3,3 mm.



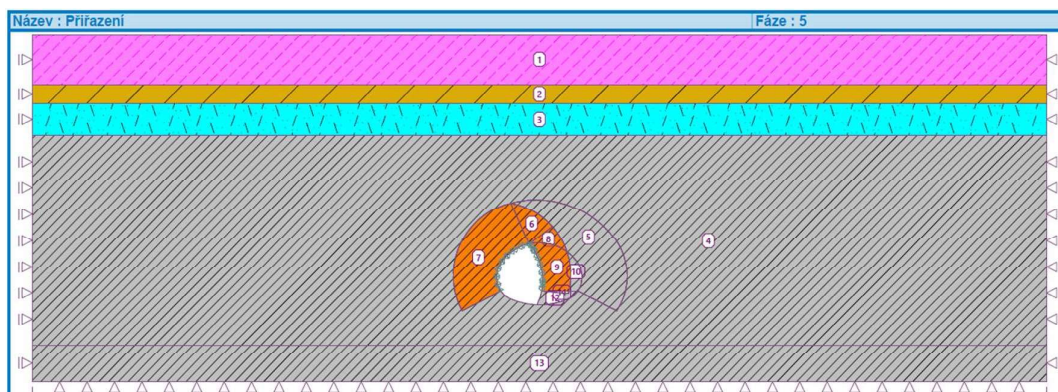
Obrázek 53 Fáze 3, Aktivace, GEO5

Ve 4. fázi výpočtu je exkavace zadaná v druhé fázi rovna nule. Dále uvažujeme lepší vlastnosti stříkaného betonu zvýšením modulu pružnosti na  $E= 18744$  MPa a smykového modulu pružnosti na  $G= 7872$  MPa. Jiné změny v této fázi neprobíhají. Maximální sedání na povrchu je 5,0 mm.



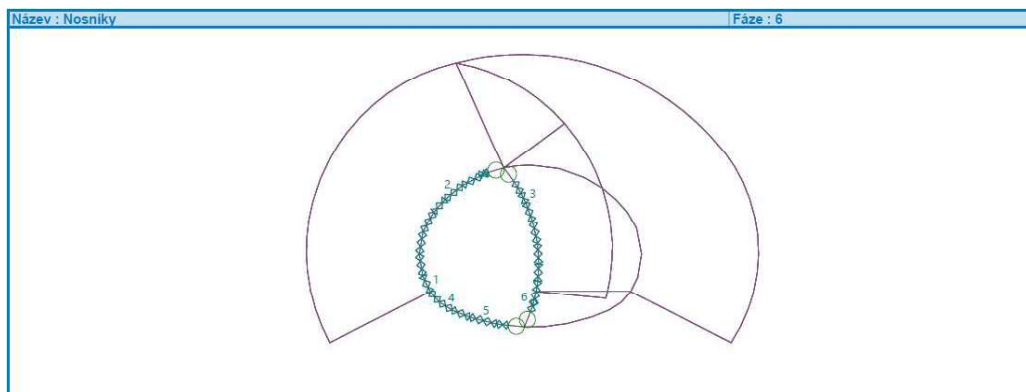
Obrázek 54 Fáze 4, sedání, GEO5

V 5. fázi výpočtu došlo k vyražení dna prvního dílčího výrubu. Opět tedy do výpočtu přidáváme exkavaci 70 %. Jinou změnu v této fázi nezaznamenáváme. Maximální sedání na povrchu je 5,1 mm.



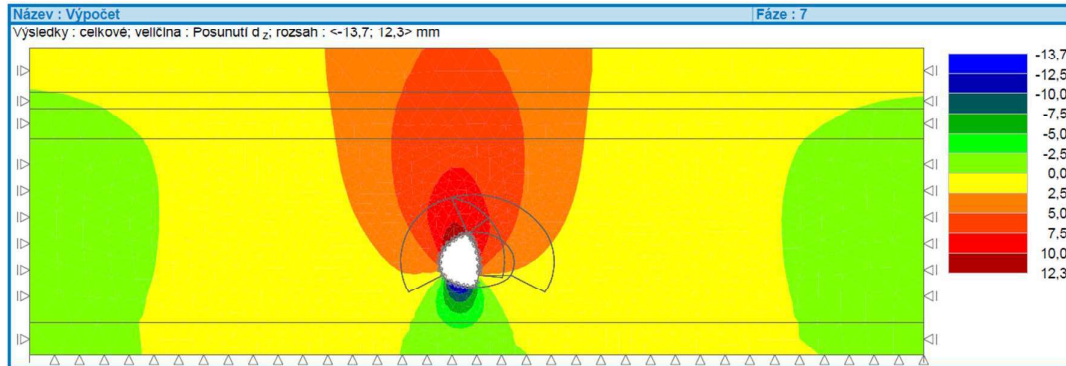
Obrázek 55 Fáze 5, přiřazení, GEO5

V 6. fázi exkavace klesá na 35 %, dnu přiřazujeme ostění značící stříkaný beton s vlastnostmi stejnými jako ve 3. fázi. Na kontaktu ostění opět zavádíme kloubové spojení. Maximální sedání na povrchu je 5,2 mm.



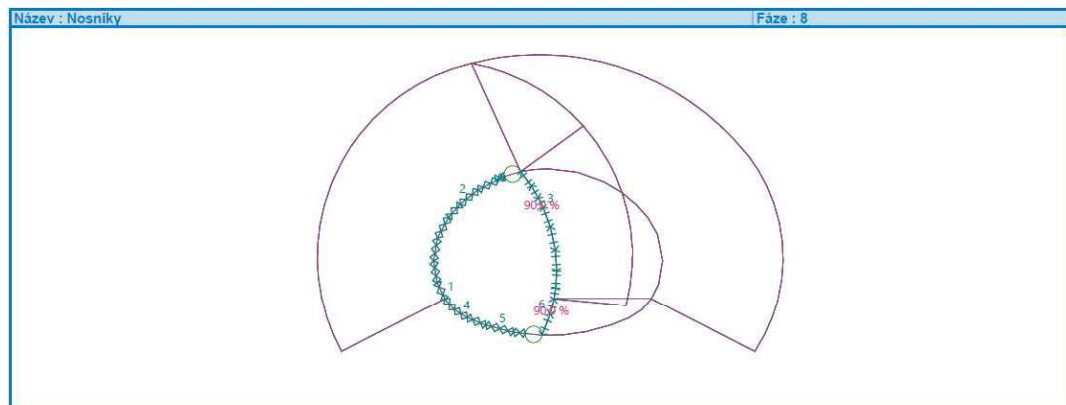
Obrázek 56 Fáze 6, nosníky, GEO5

V 7. fázi exkavace klesá na 0 %. Ostění zesílíme stejně jako ve fázi 4. Maximální sedání na povrchu zůstává 5,2 mm.



Obrázek 57 Fáze 7, sedání, GEO5

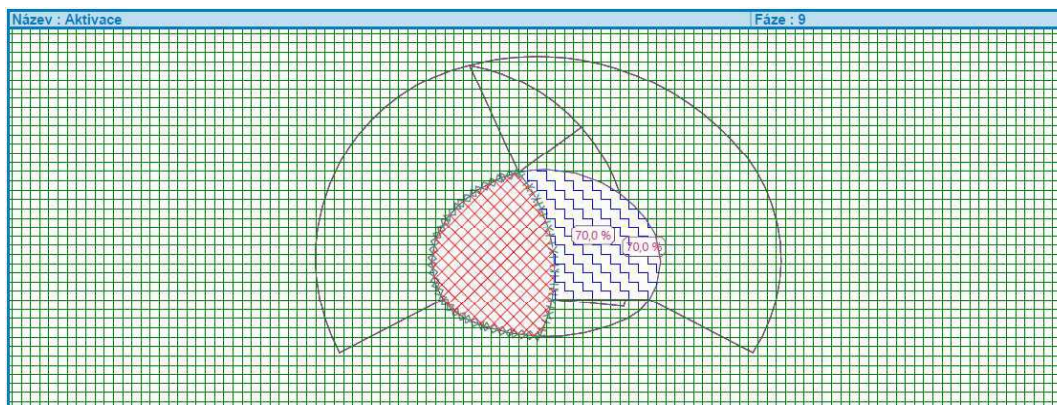
V 8. fázi ve funkci nosníky zavedeme 10 % degradaci ostění, které sousedí s druhým dílčím výrubem. Maximální sedání na povrchu zůstává 5,2 mm.



Obrázek 58 Fáze 8, degradace, GEO5

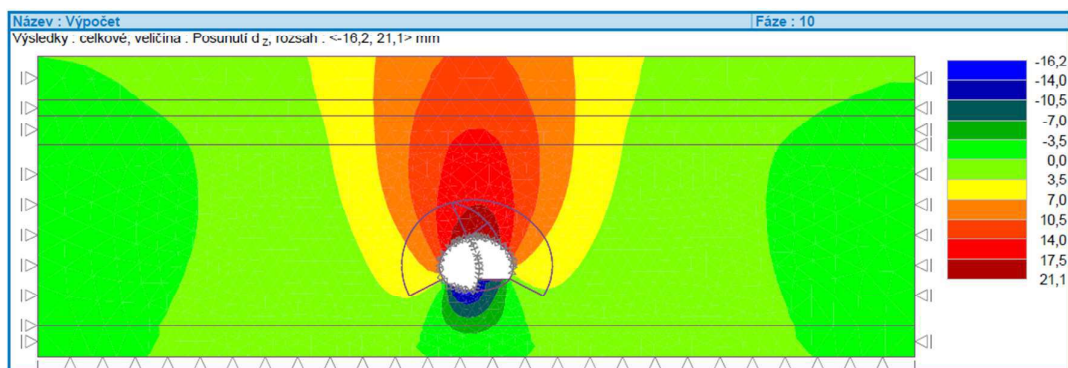
V 9. fázi dojde k vyražení kaloty druhého dílčího výrubu. Do čerstvě vyražené kaloty zavedeme exkavaci 70 %. Maximální sedání na povrchu se zvýší na 8,4 mm.





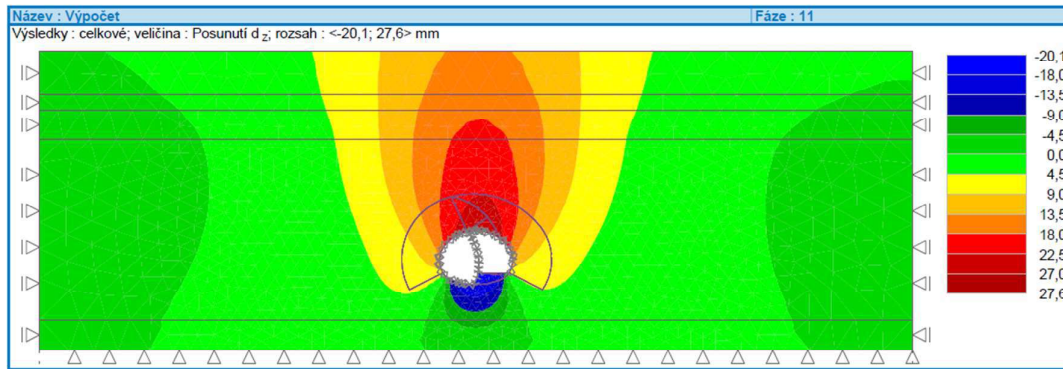
Obrázek 59 Fáze 9, aktivace, GEO5

V 10. fázi postupujeme stejně jako ve fázi 3 při zadávání nosníků. Jedinou změnou je způsob zadaného uložení. Na všech koncích nosníků bylo zadáno vetknutí. Sedání nadloží se zvyšuje hlavně snížením exkavace na 35 %. Maximální sedání na povrchu dosahuje už 11 mm.



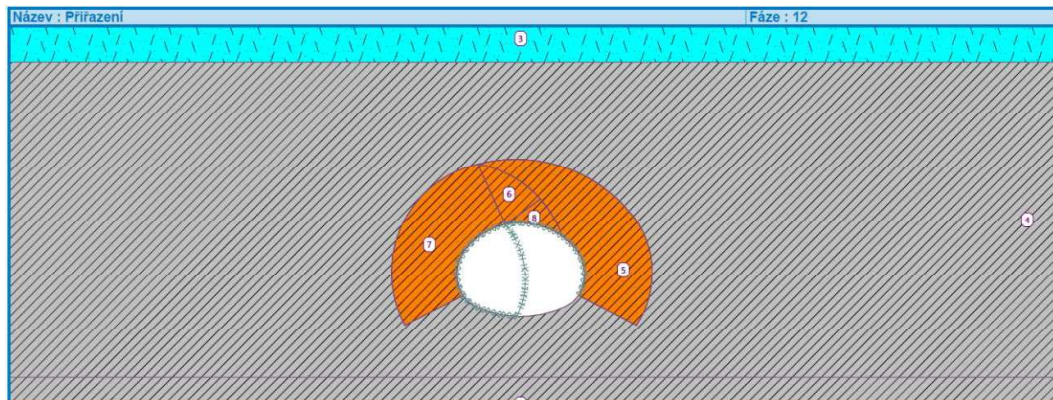
Obrázek 60 Fáze 10, sedání, GEO5

V 11. fázi opakujeme postup se zesílením nosníků neboli uvažujeme vlastnosti stříkaného betonu po 28 dnech. Exkavace klesá na 0 %, čímž opět v prostředí našeho výpočtu roste sedání. Maximální sedání na povrchu roste na 14,3 mm.



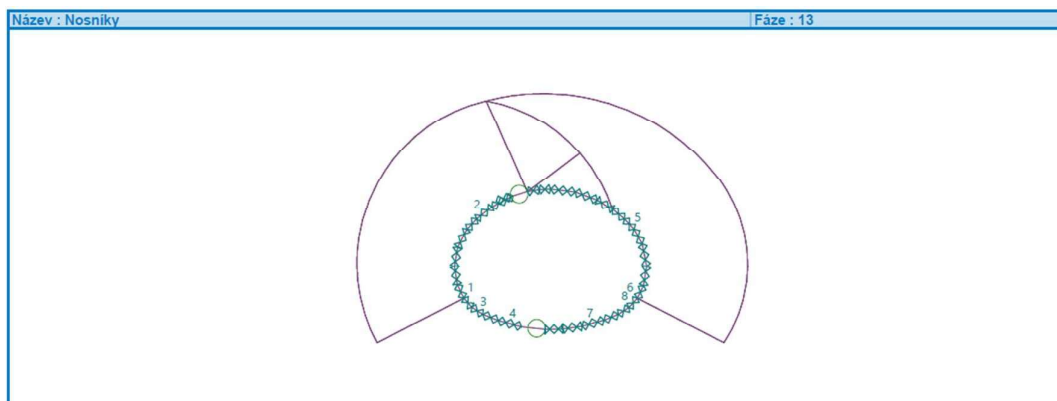
Obrázek 61 Fáze 11, sedání, GEO5

Ve 12. fázi vyrazíme poslední část profilu a přiřadíme jí exkavaci 70 %. Poté v přiřazení zavedeme finální podobu radiálních svorníků. Dále prostřednímu nosníku zadáme 100 %, čímž ho v podstatě odstraníme a v další fázi se nám již nebude zobrazovat. Maximální sedání na povrchu dále roste na 15,5 mm.



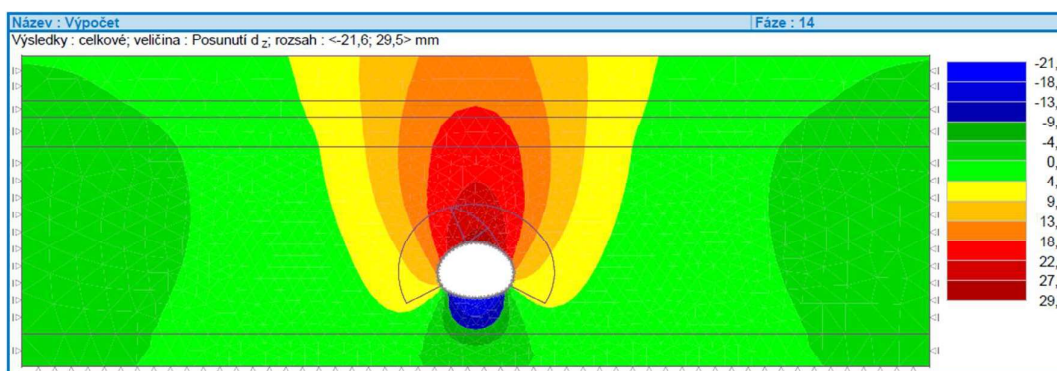
Obrázek 62 Fáze 12, přiřazení, GEO5

Ve 13. fázi opět stejným postupem doděláme poslední nosníky pro dno v druhé části výrubu. Exkavace klesá na 35 %, ale maximální deformace na povrchu již zůstává stejná.

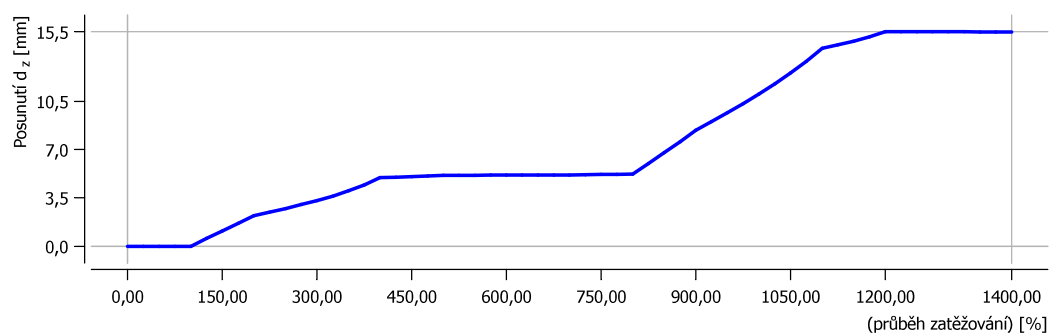


Obrázek 63 Fáze 13, nosníky, GEO5

Ve 14. fázi už jen zesílíme nosníky na parametry stříkaného betonu ve 28 dnech, exkavace dosáhne 0 % a sedání celého nadloží už zůstává v podstatě stejné.

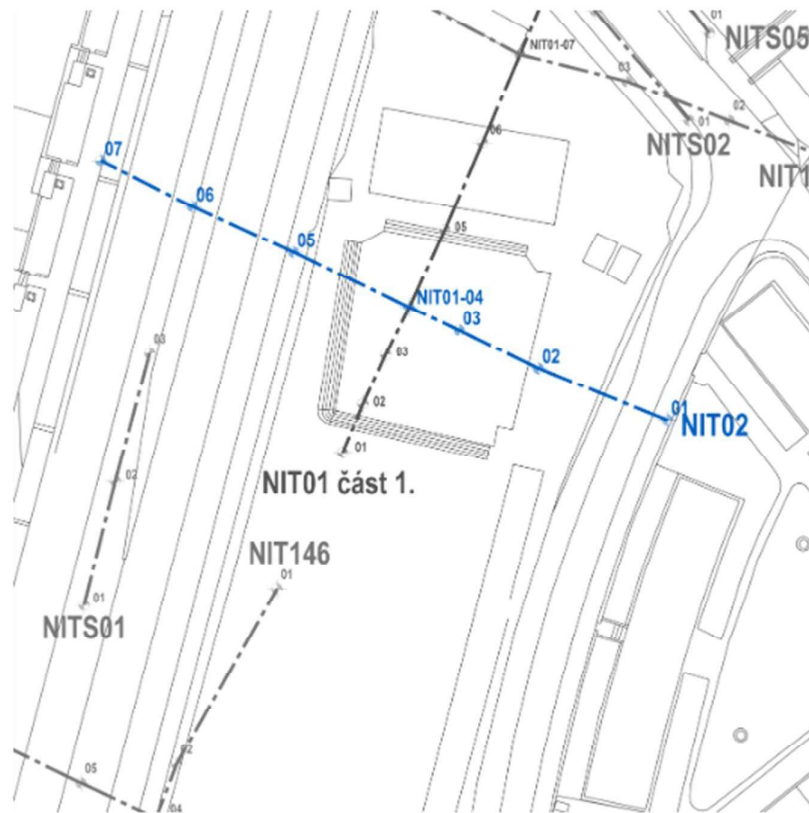


Obrázek 64 Fáze 14, sedání, GEO5

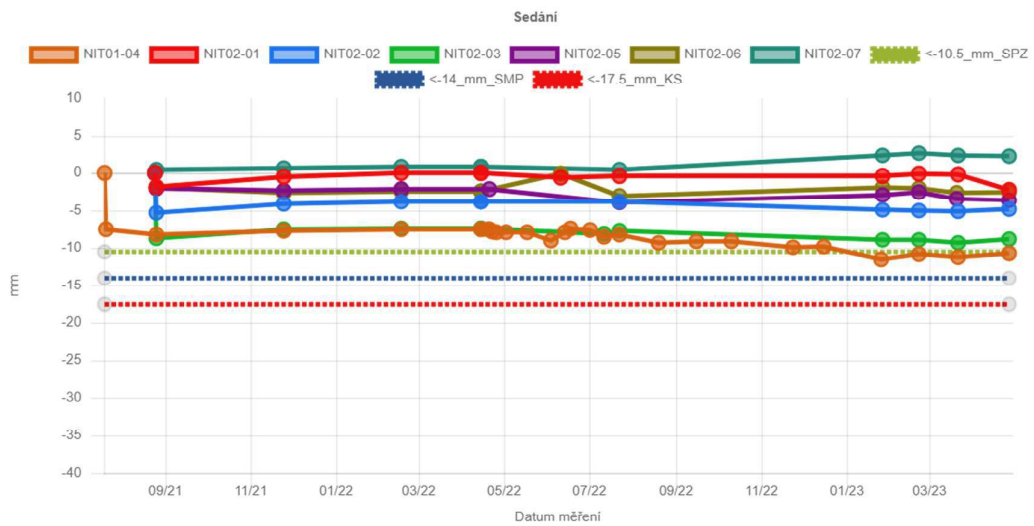


Obrázek 65 Graf sedání na povrchu v čase v bodě kolmo na střed tunelu

## 4.2.2 Porovnání výsledků v řezu 42,470 km s výsledky geotechnického monitoringu



Obrázek 66 Polohy bodů pro měření sedání na povrchu nivelací [12]

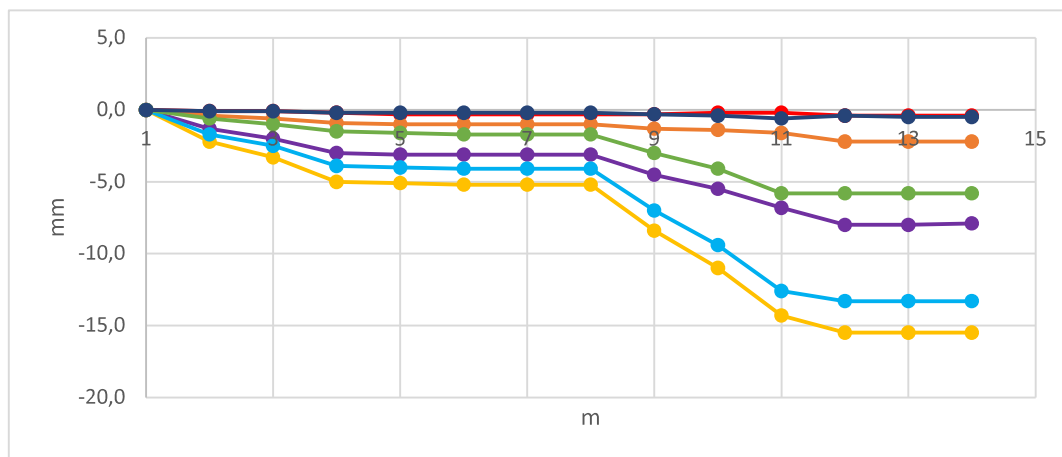


Obrázek 67 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [12]

Tabulka 3 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km bez vody

[mm]	Fáze	1	2	3	4	5	6
Body							
7		0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3
6		0,0	-0,4	-0,6	-0,9	-1,0	-1,0
5		0,0	-1,3	-2,0	-3,0	-3,1	-3,1
4		0,0	-2,2	-3,3	-5,0	-5,1	-5,2
3		0,0	-1,7	-2,5	-3,9	-4,0	-4,1
2		0,0	-0,6	-1,0	-1,5	-1,6	-1,7
1		0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2

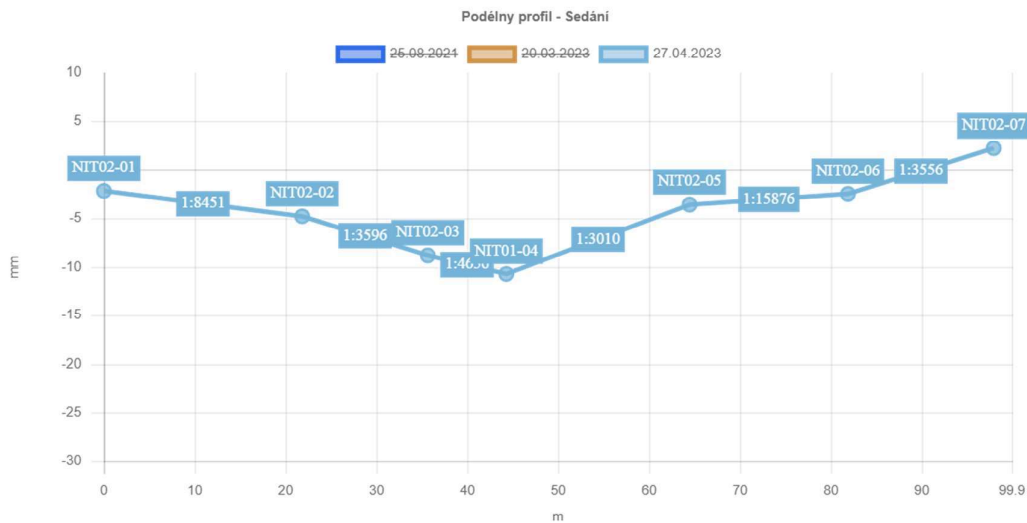
7	8	9	10	11	12	13	14
-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,4
-1,0	-1,0	-1,3	-1,4	-1,6	-2,2	-2,2	-2,2
-3,1	-3,1	-4,5	-5,5	-6,8	-8,0	-8,0	-7,9
-5,2	-5,2	-8,4	-11,0	-14,3	-15,5	-15,5	-15,5
-4,1	-4,1	-7,0	-9,4	-12,6	-13,3	-13,3	-13,3
-1,7	-1,7	-3,0	-4,1	-5,8	-5,8	-5,8	-5,8
-0,2	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,4	-0,5	-0,5



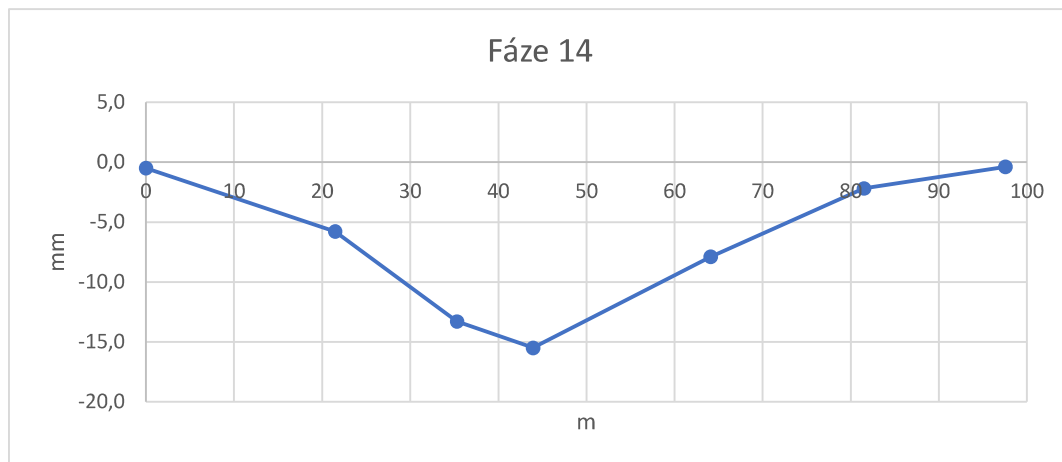
Obrázek 68 Graf sedání v čase, 42,470 km, verze bez vody

Při porovnání obou grafů vidíme, že u reálně naměřených hodnot sedání v čase přibývá jen pomalu a pro bod 4 začíná oscilovat okolo 10 mm. Výsledky z GEO5 nám

z počátku dávají menší hodnoty sedání a na konci výpočtu naopak větší hodnoty (15,5 mm).



Obrázek 69 Podélný profil – sedání [12]

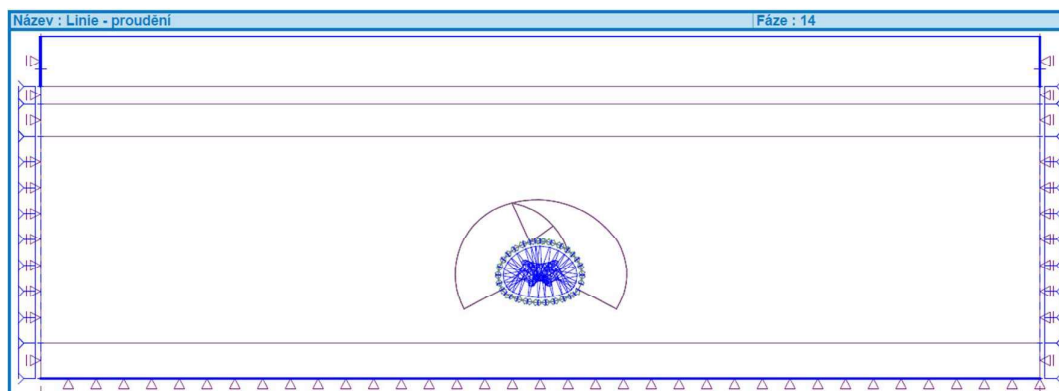


Obrázek 70 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5

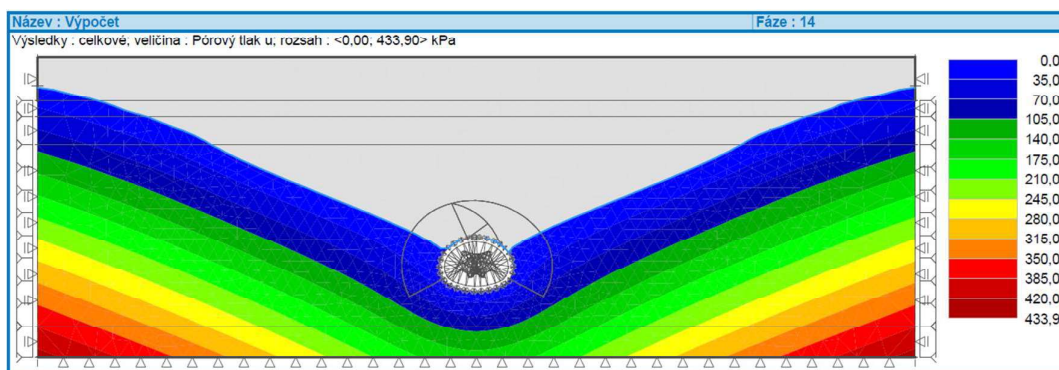
Kvůli malému počtu dat z měření geotechnického monitoringu v tomto staničení v grafech porovnáváme pouze stav po dokončení ražeb v našem staničení. Porovnáváme tedy měření z 27.4.2023 s 14 fází výpočtu.

### 4.2.3 Výpočet pro 42,470 se zahrnutím podzemní vody

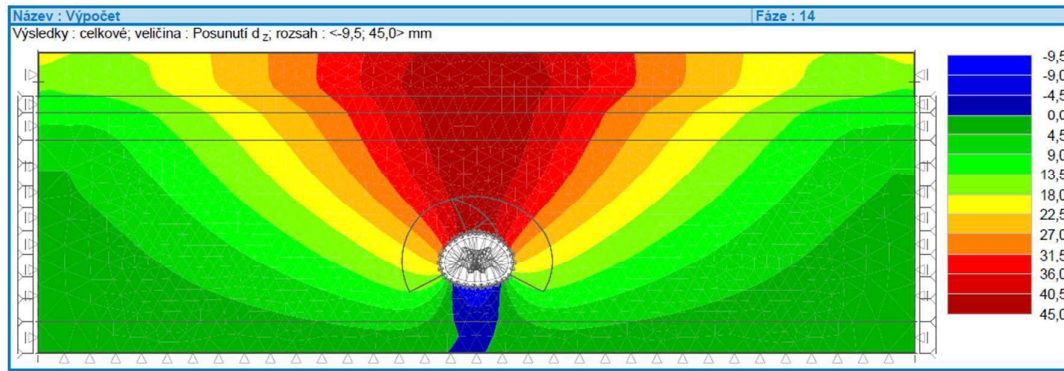
Už do hotového výpočtu bez zahrnutí vody přidáme ustálené proudění. To znamená, že topologie s nastavením výpočtu je totožná s výpočtem bez vody. Při označování linií proudění postupujeme totožně, jako v profilu ve staničení 42,570 km. Po stranách rozhraní (pravá a levá strana) zadáme pórový tlak, jehož velikost se odvíjí od hladiny podzemní vody, v našem případě 263,39 m.n.m. Horní a spodní hrany rozhraní jsou definované jako nepropustné. Tunel je definován jako průsakový.



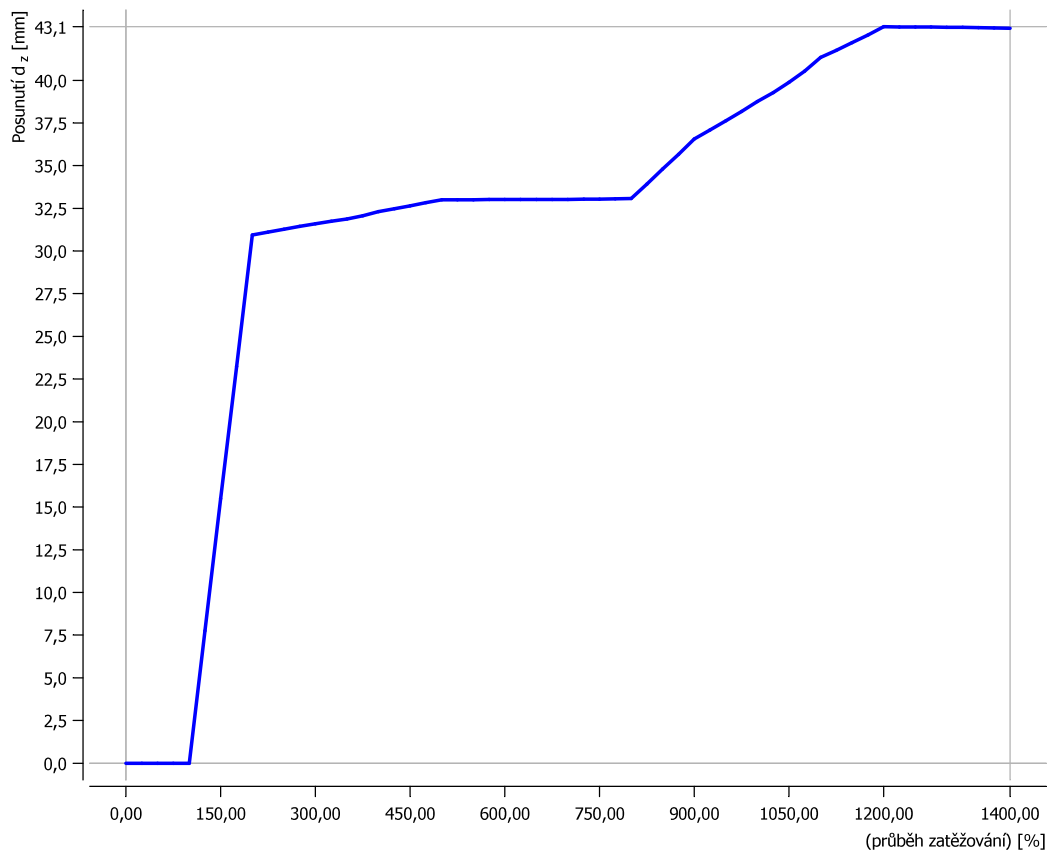
Obrázek 71 Fáze 14, linie proudění, GEO5



Obrázek 72 Fáze 14, pórový tlak, GEO5



Obrázek 74 Fáze 14, sedání, GEO5



Obrázek 73 Graf sedání na povrchu v čase v bodě kolmo na střed tunelu  
(maximální sedání na povrchu)



## 4.2.4 Porovnání výsledků výpočtu s ustáleným prouděním v řezu

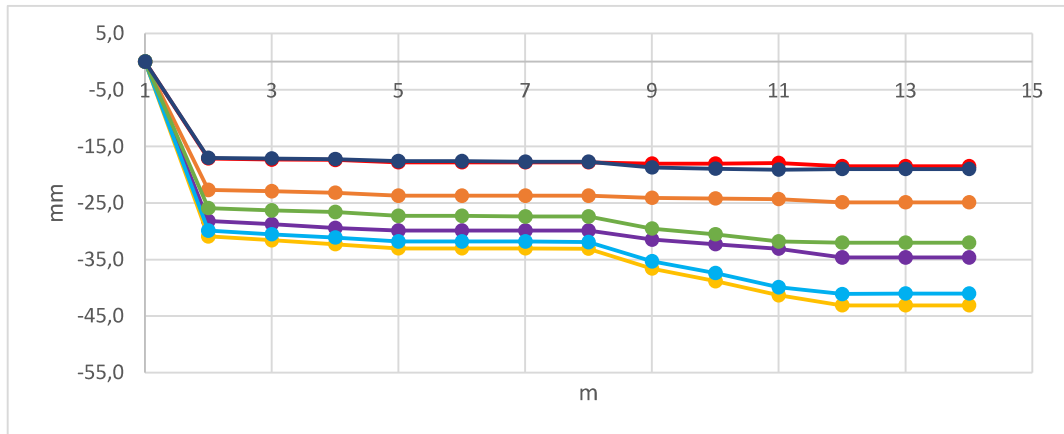
### 42,470 km s výsledky geotechnického monitoringu

Jak už je z grafů na obrázcích 75 a 76 patrné, výsledky se s výpočtem bez ustáleného proudění zásadně liší. Celkové sedání v čase je dle výpočtu skoro trojnásobné. Při porovnání s reálně naměřeným sedáním je sedání více jak čtyřikrát větší. (maximální sedání v modelu bylo 43 mm, naměřené maximální sedání bylo 10 mm).

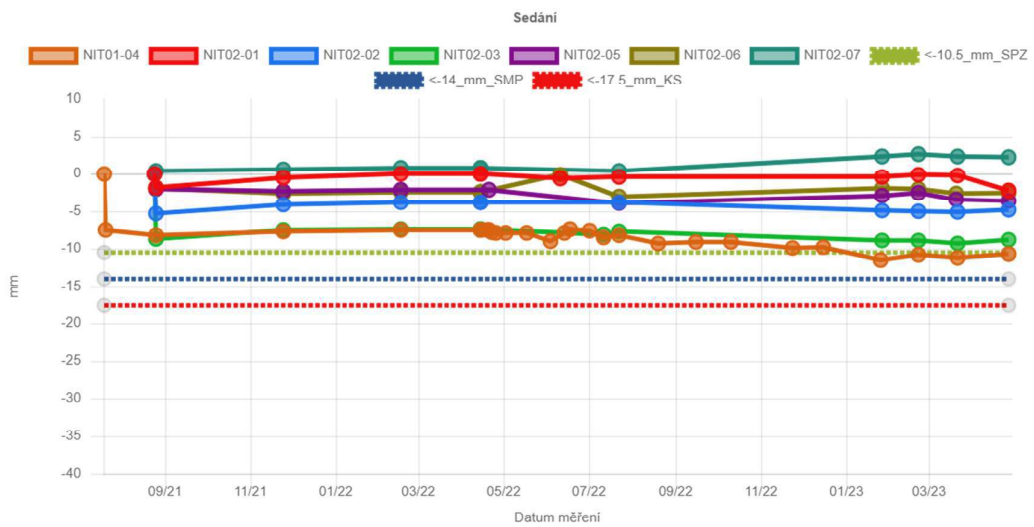
Tabulka 4 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km s ustáleným prouděním

[mm]	Fáze	1	2	3	4	5	6
Body							
7		0,0	-17,1	-17,3	-17,4	-17,8	-17,8
6		0,0	-22,7	-22,9	-23,2	-23,7	-23,7
5		0,0	-28,2	-28,7	-29,4	-29,9	-29,9
4		0,0	-30,9	-31,6	-32,3	-33,0	-33,0
3		0,0	-29,9	-30,5	-31,1	-31,8	-31,8
2		0,0	-25,9	-26,3	-26,6	-27,3	-27,3
1		0,0	-17,0	-17,1	-17,2	-17,6	-17,6

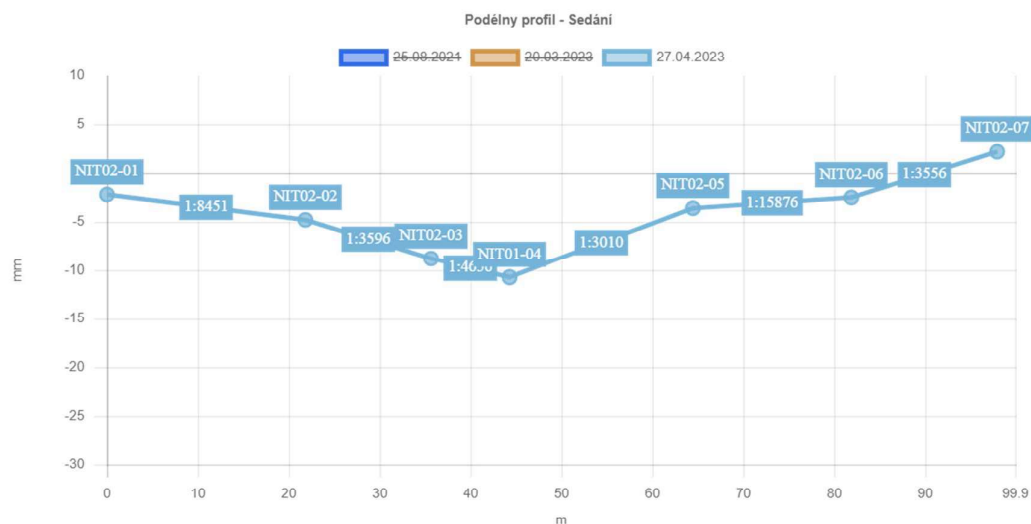
7	8	9	10	11	12	13	14
-17,8	-17,8	-18,0	-18,0	-17,9	-18,5	-18,5	-18,5
-23,7	-23,7	-24,1	-24,2	-24,3	-24,9	-24,9	-24,9
-29,9	-29,9	-31,5	-32,3	-33,1	-34,6	-34,6	-34,6
-33,0	-33,1	-36,6	-38,8	-41,3	-43,1	-43,1	-43,1
-31,8	-31,9	-35,3	-37,4	-39,9	-41,1	-41,0	-41,0
-27,4	-27,4	-29,5	-30,5	-31,8	-32,0	-32,0	-32,0
-17,7	-17,7	-18,7	-18,9	-19,1	-19,0	-19,0	-19,0



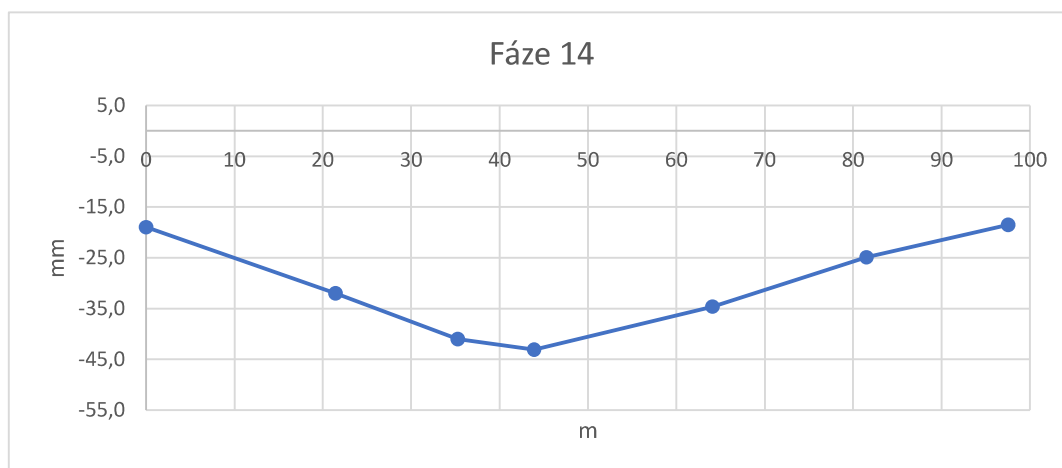
Obrázek 75 Graf sedání v čase, 42,470 km, verze s ustáleným prouděním



Obrázek 76 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [12]



Obrázek 78 Podélný profil – sedání [12]



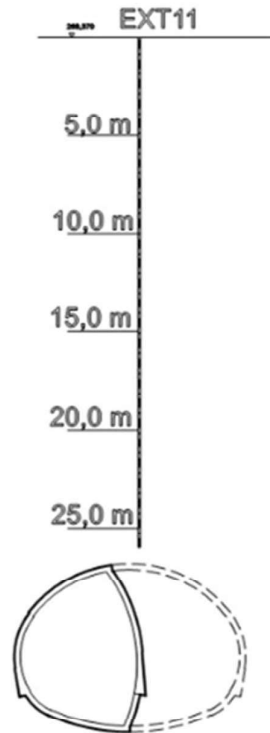
Obrázek 77 Podélný profil - sedání, GEO5

Z porovnání grafů na obrázcích 1 a 1 můžeme asi nejlépe vidět zásadní rozdílnosti výpočtu s uvažováním podzemní vody a výsledky geotechnického monitoringu.

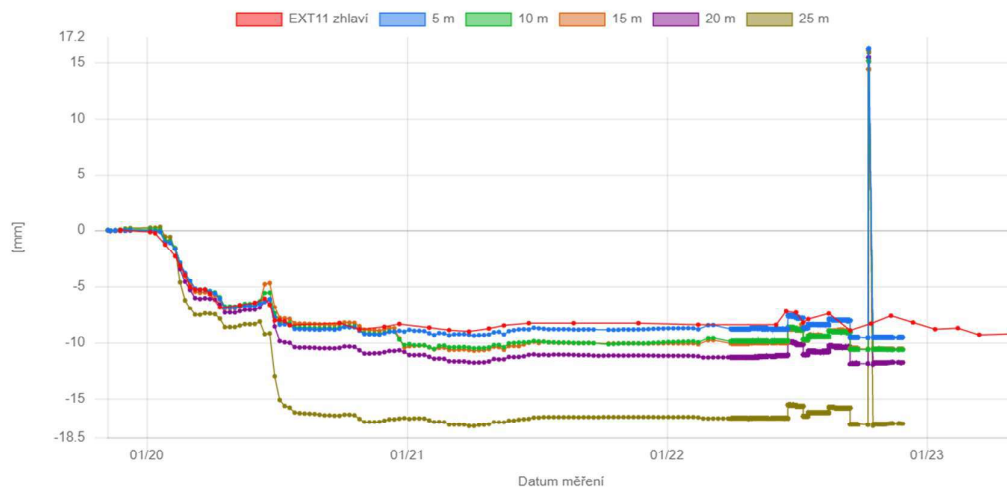
#### 4.2.5 Porovnání výsledků sedání v ose kolmo nad tunelem s výsledky Extenzometrického měření

Ve staničení 42,481 km proběhl kromě měření sedání na povrchu také měření pomocí extenzometrů. Toto měření geotechnického monitoringu porovnáme s výsledky z vymodelovaného profilu ve staničení 42,470 km bez vody.

Pro účel porovnání výsledků byla vytvořena tabulka sedání v jednotlivých výškách nad tunelem.



Obrázek 79 Umístění měřených bodů

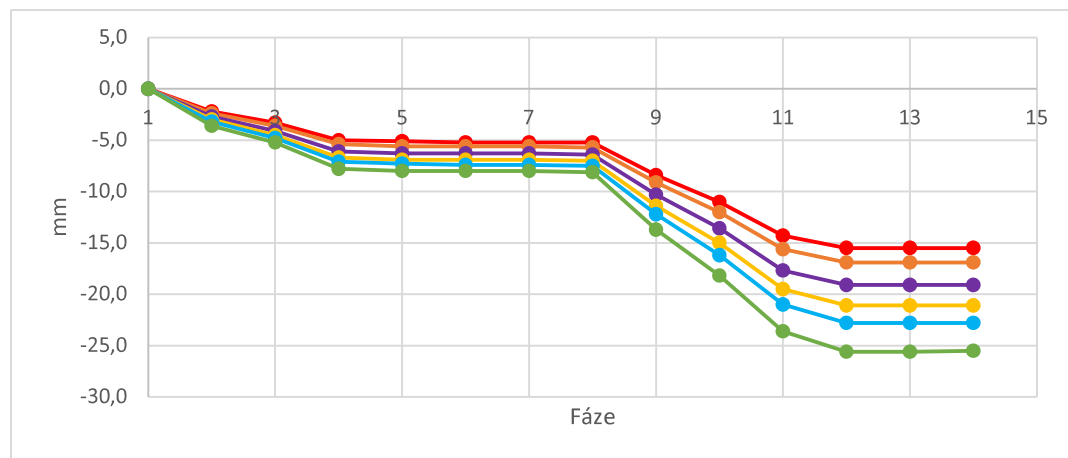


Obrázek 80 Výsledky geotechnického monitoringu

Tabulka 5 Hodnoty numericky spočteného sedání horninového masivu 42,470 km

[mm]	Fáze	1	2	3	4	5	6
Body							
EXT 11		0,0	-2,2	-3,3	-5,0	-5,1	-5,2
5 m		0,0	-2,4	-3,6	-5,4	-5,6	-5,6
10 m		0,0	-2,7	-4,1	-6,1	-6,3	-6,3
15 m		0,0	-3,0	-4,5	-6,7	-6,9	-6,9
20 m		0,0	-3,2	-4,8	-7,1	-7,3	-7,4
25 m		0,0	-3,6	-5,2	-7,8	-8,0	-8,0

7	8	9	10	11	12	13	14
-5,2	-5,2	-8,4	-11,0	-14,3	-15,5	-15,5	-15,5
-5,6	-5,7	-9,1	-12,0	-15,6	-16,9	-16,9	-16,9
-6,3	-6,4	-10,3	-13,6	-17,7	-19,1	-19,1	-19,1
-6,9	-7,0	-11,4	-15,0	-19,5	-21,1	-21,1	-21,1
-7,4	-7,5	-12,2	-16,2	-21,0	-22,8	-22,8	-22,8
-8,0	-8,1	-13,7	-18,2	-23,6	-25,6	-25,6	-25,5



Obrázek 81 Graf sedání bodů nad osou tunelu

Z grafů můžeme vidět, že extenzometr 25 m pod povrchem se nejvíce blíží numericky spočteným výsledkům, i když finální rozdíl je pořád někde okolo 7 mm. V ostatních výškách je extenzometry naměřeno cca o 10 mm méně.

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření numerických modelů, které by vystihovaly deformační chování horninového masivu nad raženým dvoukolejným traťovým tunelem trasy I.D pražského metra. Pro ražbu tunelu byla zvolena Nová rakouská tunelovací metoda. Numerické modelování vybraných řezů ve staničení 42,570 km a 42,470 km bylo provedeno pomocí metody konečných prvků v programu GEO5. Numericky vypočtené sedání na povrchu bylo následně porovnáno s výsledky naměřenými geotechnickým monitoringem.

Při numerickém modelování byly vymodelovány dvě varianty pro každý řez. Jedna varianta zahrnující účinky vody pomocí funkce ustáleného proudění a druhá varianta, která účinky podzemní vody nezohledňovala. Výsledkům geotechnického monitoringu se nakonec více přiblížily varianty zohlednění podzemní vody. U variant se zohledněním podzemní vody vyšly výsledky sedání na povrchu výrazně vyšší.

Výsledky numerického modelování korespondují se skutečnostmi zjištěnými během ražby dvoukolejného tunelu. Úroveň hladiny podzemní vody sice byla zjištěna relativně blízko povrchu terénu. Vzhledem k používání předstihových injektáží pomocí čelbových kotev a pomocí deštníků z IBO svorníků však během ražby nedošlo k poklesu hladiny podzemní vody, což mělo příznivý vliv na sedání povrchu terénu zjištěného pomocí geomonitoringu. Použití injektáží patrně bylo hlavním důvodem velmi příznivého deformačního chování horninového masivu zjištěného geotechnickým monitoringem při ražbě modelovaných řezů, ale i v dalších úsecích dosavadních ražeb úseku trasy I.D mezi stanicemi Pankrác D a Olbrachtova.

## Seznam příloh

příloha č.1 = vzorový příčný řez ve pro staničení 42,570 km

příloha č.2 = charakteristický příčný řez ve pro staničení 42,570 km

příloha č.3 = vývoj deformace ve fázích 1-7 pro staničení 42, 570 km verze s vodou

příloha č.4 = vývoj deformace ve fázích 1-7 pro staničení 42, 570 km verze bez vody

příloha č.5 = vzorový příčný řez ve pro staničení 42,470 km

příloha č.6 = charakteristický příčný řez ve pro staničení 42,470 km

příloha č.7 = vývoj deformace ve fázích 1-7 pro staničení 42, 470 km verze bez vody

příloha č.8 = vývoj deformace ve fázích 1-7 pro staničení 42, 470 km verze s vodou

## Citovaná literatura

- [1] CHARVÁT, Štěpán. Historie pražského metra. In: *Metroart.cz* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <http://metroart.cz/Historie.html>
- [2] KRÁSA, David a Libor MARTÍNEK. Trasa D - Kdy se začne stavět čtvrtá linka pražského metra?. *Tunel*. 2019, **28**(12019), 9.
- [3] TLAMSA, Jiří, Jan ZEMÁNEK a Radek ONYSKO. *Metro I.D - Doplnkový inženýrskogeologický průzkum na úsecích VO-OL a OL1*. Praha: SG Geotechnika a.s.
- [4] KOZUBÍK, Radek. *Doplnkový geologický průzkum ID1a úsek VO OL* [online]. 2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: [https://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2022/to\\_2\\_22/kozubik-realizace-pruzkumnych-del.pdf](https://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2022/to_2_22/kozubik-realizace-pruzkumnych-del.pdf)
- [5] TLAMSA, Jiří, Radek ONYSKO a Jan ZEMÁNEK. Metro I.D: Současný stav geologických průzkumných prací na úsecích VO-OL a OL1. *Tunel*. 2020, **29**(42020), 10.
- [6] KOCHÁNEK, Miroslav. METROPROJEKT. *Doplnkový geologický průzkum úseku ID1 a Úsek VO-OL -20\_Stavební část: 2.etapa - Ražba prvního dílčího profilu o.v. 5,0 - Technická zpráva*. 1. 2019.
- [7] BUTOVIČ, Alexandr a Jiří BARTÁK. *Podzemní stavby: 3. část*. Praha, 2022.
- [8] Metoda konečných prvků. In: *Dspace.tul* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/49431/%5B33%5D.pdf?sequence=18>
- [9] VRBKA, Martin a Michal VEVERKA. Metoda konečných prvků. In: *Shigley.cz* [online]. Brno: Ústav konstruování, FSI VUT, 2010 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [10] Materiálové modely. In: *Fine.cz* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/materialove-modely-01/>
- [11] MARTÍNEK, Libor. *Trasa D: ZÁKLADNÍ PŘEHLED A ROZSAH PODZEMNÍCH DĚL aneb JAK TO VLASTNĚ UDĚLÁME? 3(4) etapy – 10 stanic* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ita-aites.cz/cz/seminare/2022/>
- [12] *Siisel* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://siisel.cz/>
- [13] GROH, Jan. Traťový tunel metra V.A mezi stanicemi Nemocnice Motol a Petřiny vyražený metodou TBM. In: *Wikipedia* [online]. San Francisco, 2022 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/TBM#/media/Soubor:DOD\\_metro\\_Vypich,\\_tra%C5%A5ov%C3%BD\\_tunel,\\_sm%C4%9Br\\_Pet%C5%99iny.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/TBM#/media/Soubor:DOD_metro_Vypich,_tra%C5%A5ov%C3%BD_tunel,_sm%C4%9Br_Pet%C5%99iny.jpg)



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Traťový tunel metra V.A mezi stanicemi Nemocnice Motol a Petřiny vyražený pomocí zeminového štítu [11] .....	11
Obrázek 2 Situace 1 etapy linky metra D [9] .....	12
Obrázek 3 Podélný profil 1 etapy linky metra D [9] .....	12
Obrázek 4 Situace 2 etapy linky metra D [9] .....	13
Obrázek 5 Podélný profil 2 etapy linky metra D [9] .....	13
Obrázek 6 Podélný profil 3 etapy linky metra D [9] .....	14
Obrázek 7 Situace 3 etapy linky metra D [9] .....	14
Obrázek 8 Vlak metra s automatickým provozem bez strojvůdce (Dubai) [2].....	15
Obrázek 9 Bezpečnostní stěna na nástupišti (design) [2] .....	16
Obrázek 10 Nadzemní vestibul stanice Nové Dvory [2] .....	17
Obrázek 11 Situace průzkumných prací v prostoru úseků VO-OL a PAD4 [3].....	18
Obrázek 12 Hloubení šachty z převrtávaných pilot VO-OL v prostředí břidlic bohdaleckého souvrství [3].....	19
Obrázek 13 Situace průzkumných prací v prostoru úseku OL1 (provedená průzkumná štola je označena červeně) [3] .....	19
Obrázek 14 Bohdalecké břidlice se shluky „Onnia superba” zastižene ve vrtu HG277 vedle šachty OL1 [5].....	20
Obrázek 15 Tunelová fréza s jedním výložníkem a příčnou hlavou [7].....	22
Obrázek 16 Tunelbagr Terex [7].....	23
Obrázek 17 Impaktor Caterpillar na pásovém podvozku [7].....	23
Obrázek 18 zařízení staveniště PAD1 na Pankráci.....	24
Obrázek 19 čelba raženého tunelu Metro I.D .....	24
Obrázek 20 Geometrie modelu vygenerovaná v programu GEO5.....	26
Obrázek 21 Vztah mezi napětím a přetvořením pro LM [8].....	27
Obrázek 22 (a) Pracovní diagram zeminy, (b) Vztah mezi napětím a přetvořením [8] .....	28
Obrázek 23: Vztah mezi napětím a přetvořením pro nelineární modely [9] .....	29
Obrázek 24: MCM a MC podmínky plasticity v deviátorské rovině [8].....	29
Obrázek 25 Situace části trasy Pankrác-Olbrachtova [10] .....	30
Obrázek 26 Topologie, volné body a linie, GEO5 .....	31
Obrázek 27 Topologie, Přiřazení, GEO5 .....	32
Obrázek 28 Dokumentace čelby tunelu ve staničení 42,570 km. [10].....	35
Obrázek 29 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,570 km. [10] .....	36
Obrázek 30 Fáze 1, Linie-proudění, GEO5.....	37
Obrázek 31 Fáze 2, pórový tlak, GEO5 .....	38
Obrázek 32 Fáze 3, Sedání, GEO5.....	38
Obrázek 33 Fáze 5, Aktivace, GEO5.....	39
Obrázek 34 Fáze 6, Sedání, GEO5.....	39
Obrázek 35 Polohy bodů pro měření sedání na povrchu nivelací [10] .....	40
Obrázek 36 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [10] .....	41
Obrázek 37 Graf sedání v jednotlivých fázích modelování, 42,570 km verze s lineárním prouděním .....	41
Obrázek 38 Podélný profil – sedání [10] .....	42
Obrázek 39 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5 .....	42
Obrázek 40 Fáze 7, sedání-verze bez vody, GEO5.....	43

Obrázek 41 Fáze 7, sedání-verze s podzemní vodou, GEO5 .....	43
Obrázek 42 Graf sedání v čase, 42,570 km, verze bez vody .....	44
Obrázek 43 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [10].....	44
Obrázek 44 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5 .....	45
Obrázek 45 Podélný profil – sedání [10] .....	45
Obrázek 46 Geometrie modelu, síť konečných prvků, GEO5.....	46
Obrázek 47 Geometrie modelu, volné body a linie, GEO5 .....	47
Obrázek 48 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,470 km. [10].....	48
Obrázek 49 Čelba vyraženého tunelu ve staničení 42,470 km. [10].....	49
Obrázek 50 Geometrie modelu s označením geotechnických vrstev, GEO5 .....	50
Obrázek 51 Fáze 1, Efektivní napětí $\sigma_z$ , GEO5 .....	52
Obrázek 52 Fáze 2, Aktivace, GEO5 .....	52
Obrázek 53 Fáze 3, Aktivace, GEO5 .....	53
Obrázek 54 Fáze 4, sedání, GEO5.....	53
Obrázek 55 Fáze 5, přiřazení, GEO5.....	54
Obrázek 56 Fáze 6, nosníky, GEO5.....	54
Obrázek 57 Fáze 7, sedání, GEO5.....	55
Obrázek 58 Fáze 8, degradace, GEO5 .....	55
Obrázek 59 Fáze 9, aktivace, GEO5.....	56
Obrázek 60 Fáze 10, sedání, GEO5.....	56
Obrázek 61 Fáze 11, sedání, GEO5.....	57
Obrázek 62 Fáze 12, přiřazení, GEO5 .....	57
Obrázek 63 Fáze 13, nosníky, GEO5.....	58
Obrázek 64 Fáze 14, sedání, GEO5.....	58
Obrázek 65 Graf sedání na povrchu v čase v bodě kolmo na střed tunelu.....	58
Obrázek 66 Polohy bodů pro měření sedání na povrchu nivelací [10] .....	59
Obrázek 67 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [10].....	59
Obrázek 68 Graf sedání v čase, 42,470 km, verze bez vody .....	60
Obrázek 69 Podélný profil – sedání [10] .....	61
Obrázek 70 Podélný profil - sedání, hodnoty z GEO5 .....	61
Obrázek 71 Fáze 14, linie proudění, GEO5.....	62
Obrázek 72 Fáze 14, pórový tlak, GEO5 .....	62
Obrázek 73 Graf sedání na povrchu v čase v bodě kolmo na střed tunelu (maximální sedání na povrchu) .....	63
Obrázek 74 Fáze 14, sedání, GEO5.....	63
Obrázek 75 Graf sedání v čase, 42,470 km, verze s ustáleným prouděním.....	65
Obrázek 76 Graf naměřeného sedání reálných bodů 01-07 v čase [10].....	65
Obrázek 77 Podélný profil - sedání, GEO5 .....	66
Obrázek 78 Podélný profil – sedání [10] .....	66
Obrázek 79 Umístění měřených bodů .....	67
Obrázek 80 Výsledky geotechnického monitoringu .....	67
Obrázek 81 Graf sedání bodů nad osou tunelu .....	68

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km s ustáleným prouděním .....	40
Tabulka 2 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km bez vody .....	44
Tabulka 3 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km bez vody .....	60
Tabulka 4 Hodnoty numericky spočteného sedání v 42,470 km s ustáleným prouděním .....	64
Tabulka 5 Hodnoty numericky spočteného sedání horninového masivu 42,470 km .....	68

## **Příloha č. 1:**

Vzorový příčný řez ve staničení 42,570 km

M 1:50

(převzato od METROPROJEKT Praha a.s.)

TUNEL o.v. 5,0 m  
PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ - TEORETICKÝ VÝRUB

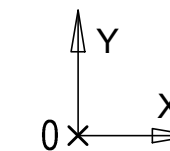
TUNEL o.v. 5,0 m  
PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ - NADVÝŠENÝ VÝRUB O 100mm

VYTYČOVACÍ BODY PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ

OZN.	X	Y
1	-5158	-390
2	-5713	1482
3	-4984	3597
4	0	6024
5	4984	3597
6	5713	1482
7	5158	-390
8	4090	-1310
9	0	-2201
10	-4090	-1310

VYTYČOVACÍ BODY STŘEDŮ OBLOUKŮ OSTĚNÍ

OZN.	X	Y
11	-2283	1482
12	0	-306
13	2283	1482
14	3038	991
15	0	7633
16	-3038	991



KONCEPT 25.2.2022

Změna:	Název změny:	Datum:	Provedl:	Podpis:
--------	--------------	--------	----------	---------

Investor: Dopravní podnik hl.m.Prahy a.s. Sokolovská 217/42 190 22 Praha 9	Objednatel: Sdružení Metro I.D Subterra a.s., HOCHTIEF CZ a.s., STRABAG a.s. zastoupená vedoucím společníkem Sdružení Subterra a.s. Koželužská 2246/5 Libeň, 180 0 Praha 8	Inženýrská činnost: Inženýring dopravních staveb a.s. Branická 514/140 147 00 Praha 4
---	---	--

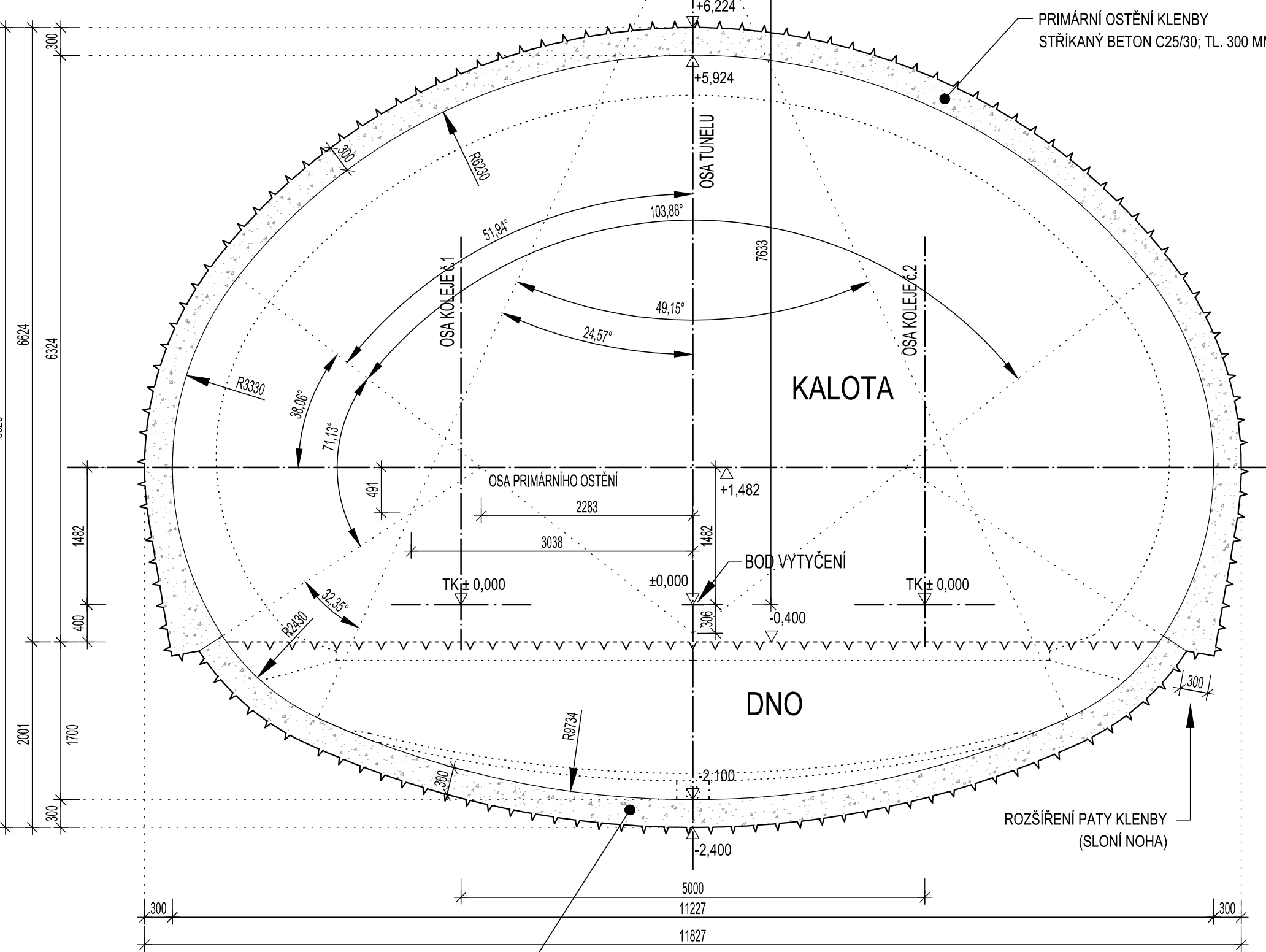
METROPROJEKT Praha a.s. Argentinská 1621/36 170 00 Praha 7 generální ředitel: Ing.David Krása tel: +420 296 154 105 www.metroprojekt.cz info@metroprojekt.cz		Souprava číslo:
--	--	-----------------

HIP: tel.: 296 154 504 e-mail: martinek@metroprojekt.cz	Podpis: <i>Martinek</i>	Název a účel díla: Výstavba trasy I.D metra v Praze - úsek ID1a Pankrác - Olbrachtova. Stavebně technologická část
---	-------------------------	--

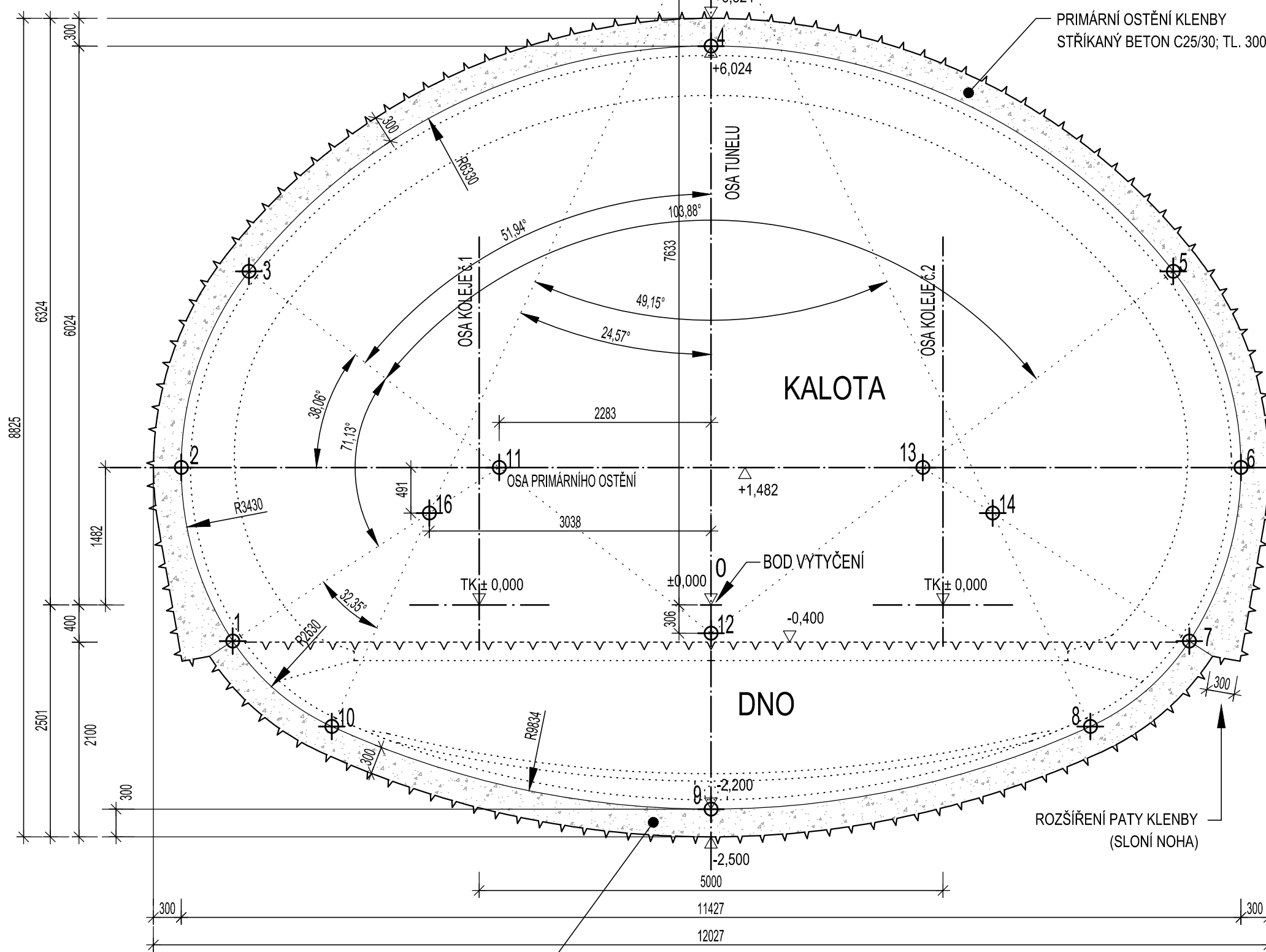
Stupeň: RDS Realizační dokumentace stavby	Stavební oddíl: 12 - TÚ Pankrác-Olbrachtova
--	--

Odpovědný projektant: Ing. Miroslav Kochánek tel.: 296 154 205 e-mail: kochanek@metroprojekt.cz	Podpis: <i>Kochanek</i>	Stavební objekt (podobjekt): 12-20-Ražený dvoukolejný tunel a rozplet do odstavu Část dokumentace (nepovinné): 12-20/01-Tunel o.v.5,0 m; směr OL celý, směr PA druhý výrub - 1.část
--	-------------------------	--

Vypracoval: Petr Višňák tel.: 296 154 146 e-mail: visnak@metroprojekt.cz	Podpis: <i>Višňák</i>	Část dokumentace (nepovinné): Název přílohy: Vzorový příčný řez - Tunel o.v 5,0m	Změna: -
Skart. znak: V20/2043 Počet formátů: 4x A4	Datum: 01/2022 Měřítka: 1:50	IČD: 22-8202-001 51 12 20 01 00 00 00	Číslo příl.: 009



TEORETICKÝ VÝRUB	
KALOTA	65,31 m <sup>2</sup>
DNO	15,76 m <sup>2</sup>
CELKEM	81,07 m <sup>2</sup>



NADVÝŠENÝ VÝRUB	
KALOTA	67,65 m <sup>2</sup>
DNO	16,95 m <sup>2</sup>
CELKEM	84,60 m <sup>2</sup>

STŘÍKANÝ BETON C25/30  
VÝZTUŽ B 500B  
OCEL S235

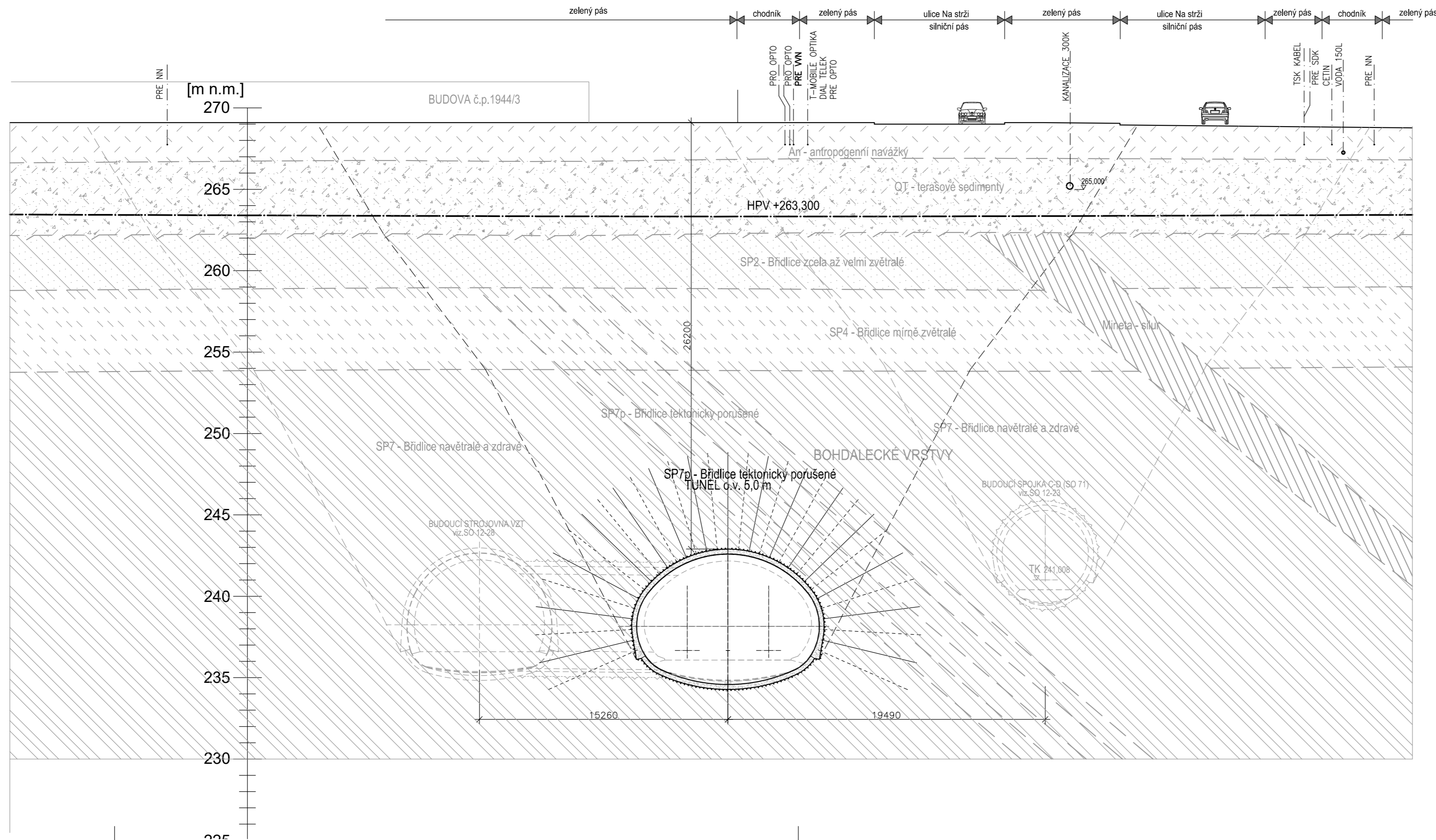
## **Příloha č. 2:**

Charakteristický příčný řez ve staničení 42,570 km

M 1:200

(převzato od METROPROJEKT Praha a.s.)

**PŘÍČNÝ ŘEZ O-O**  
M 1:200 po směru ražeb  
42, 570.860 km KOLEJ č.1  
42, 570.812 km KOLEJ č.2



**KONCEPT 25.2.2022**

Změna:		Název změny:	Datum:	Provedl:	Podpis:				
Investor:	Dopravní podnik hl. m. Prahy a.s. Sokolovská 217/42 190 22 Praha 9	Objednatel:	Sdružení Metro I.D Subterra a.s., HOCHTIEF CZ a.s., STRABAG a.s. zastoupená vedoucím společníkem Sdružení Subterra a.s. Koželužská 2246/5 Libeň, 180 0 Praha 8	Inženýrská činnost:	Inženýring dopravních staveb a.s. Branická 514/140 147 00 Praha 4				
METROPROJEKT Praha a.s. Argentinská 1621/36 170 00 Praha 7 generální ředitel: Ing. David Krása tel.: +420 296 154 105 www.metroprojekt.cz info@metroprojekt.cz				Souprava číslo:					
HIP:	Ing. Libor Martinek tel.: 296 154 504 e-mail: martinek@metroprojekt.cz	Podpis:	Název a účel díla: Výstavba trasy I.D metra v Praze - úsek Pankrác-Depo Písnice Doplňkový geologický průzkum úseku ID1a						
Stupeň: RDS Realizační dokumentace stavby	Stavební oddíl: 12 - TÚ Pankrác-Olbrachtova								
Odpovědný projektant:	Ing. Miroslav Kochánek tel.: 296 154 205 e-mail: kochanek@metroprojekt.cz	Podpis:	Stavební objekt (podobjekt): 12-20-Ražený dvoukolejný tunel a rozplet do odstavu Část dokumentace (nepovinné): 12-20/01-Tunel o.v.5,0 m; směr OL celý, směr PA druhý výrub - 1.část						
Vypracoval:	Petr Višňák tel.: 296 154 146 e-mail: visnak@metroprojekt.cz	Podpis:	Část dokumentace (nepovinné): Název přílohy: Charakteristický příčný řez O-O s geologií						
Skart. znak: V20/2043	Datum: 03/2022	Změna: -			Číslo příl.: 006				
Počet formátů: 4x A4	Měřítko: 1:200	IČD: 22-8202-001	51	12	20	01	00	00	00

### **Příloha č. 3:**

Sedání ve fázích 1-7 pro výpočet s vodou ve staničení 42,570 km

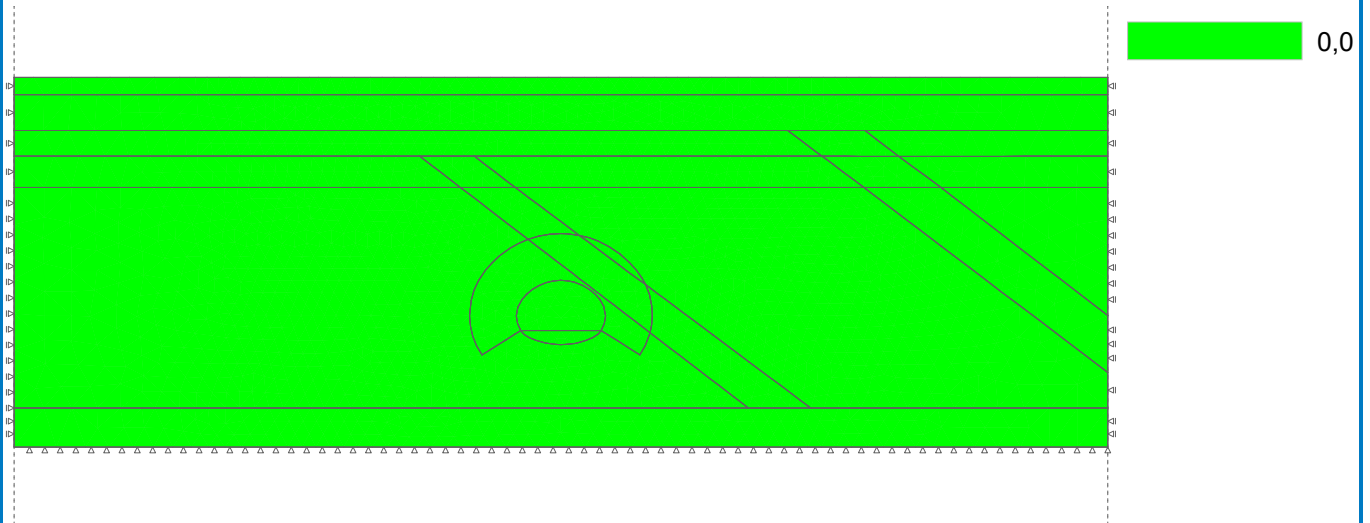
(vytvořeno ve softwaru GEO5)



Název : Výpočet

Fáze : 1

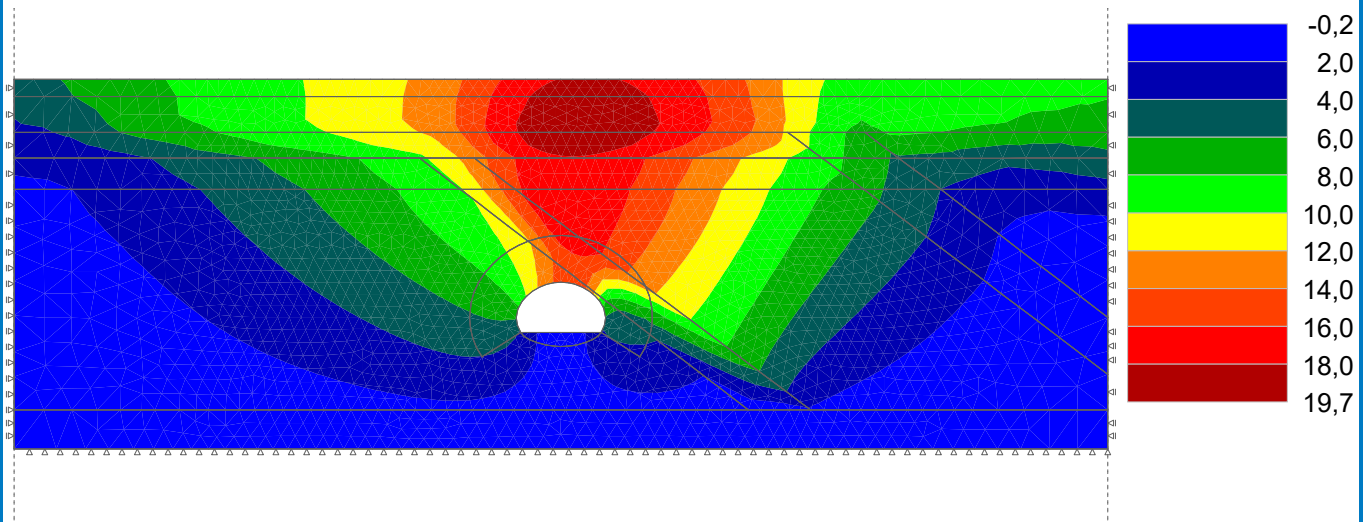
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 0,0> mm



Název : Výpočet

Fáze : 2

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-0,2; 19,7> mm



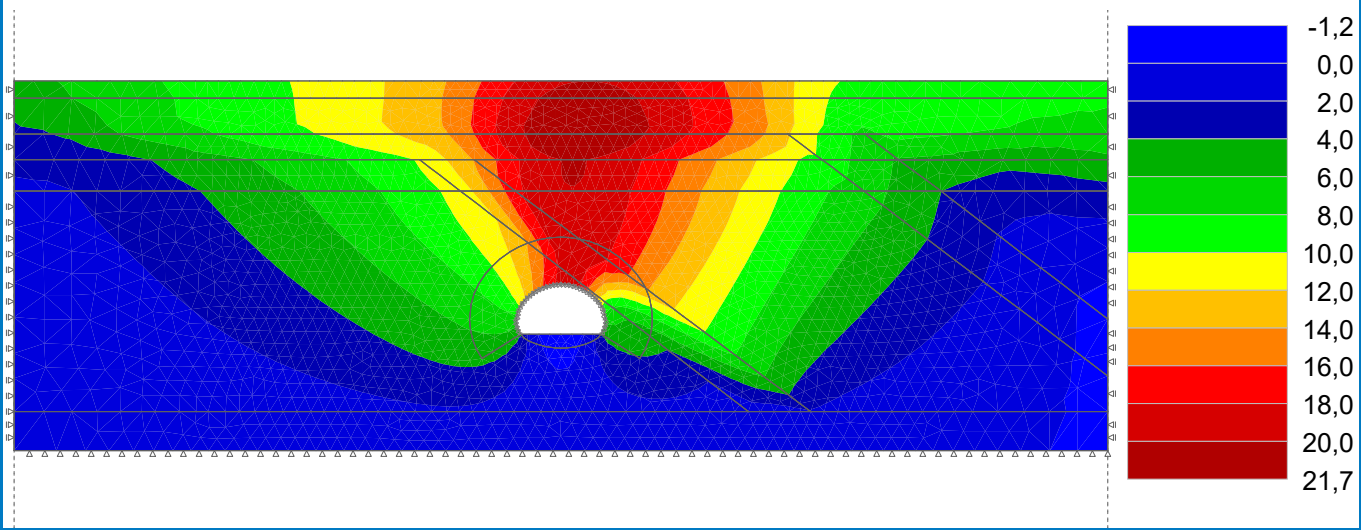
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 3

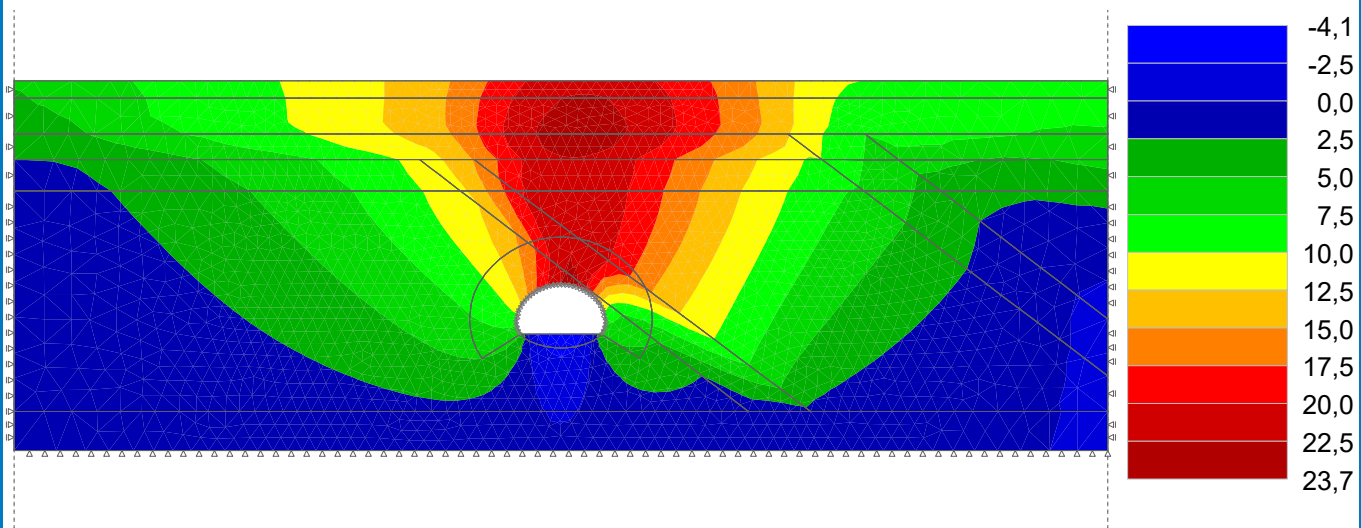
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-1,2; 21,7> mm



Název : Výpočet

Fáze : 4

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-4,1; 23,7> mm



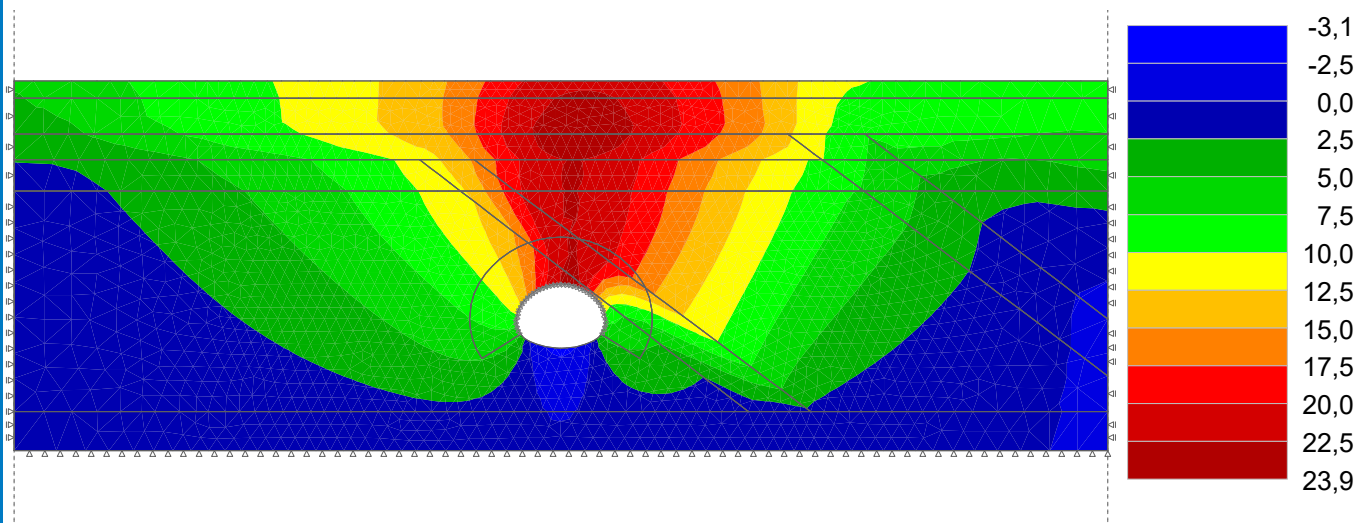
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 5

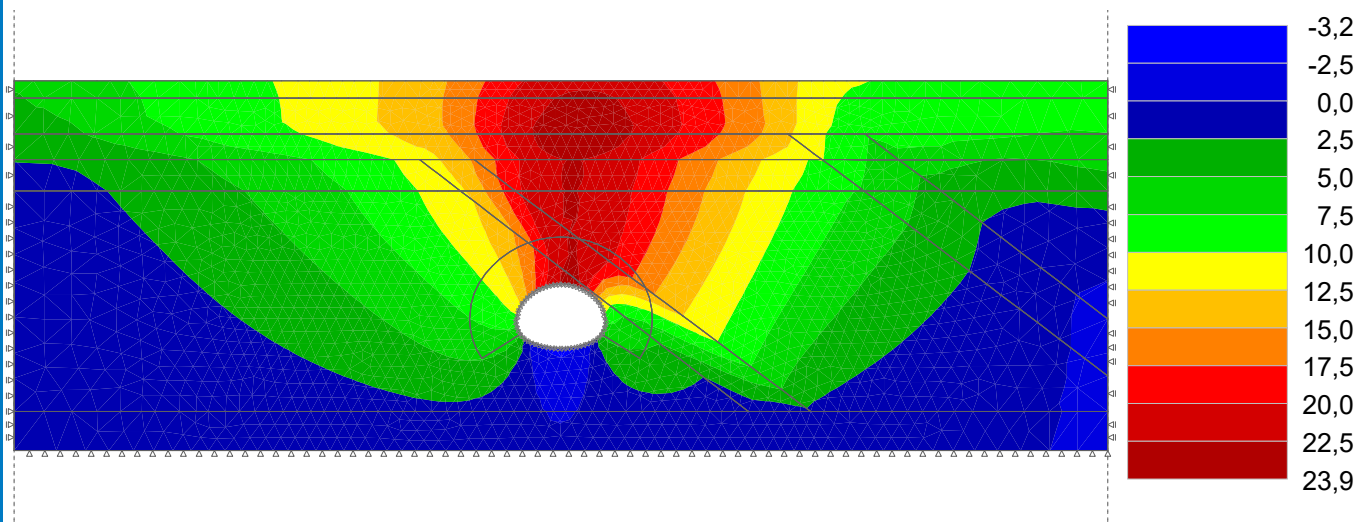
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-3,1; 23,9> mm



Název : Výpočet

Fáze : 6

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-3,2; 23,9> mm



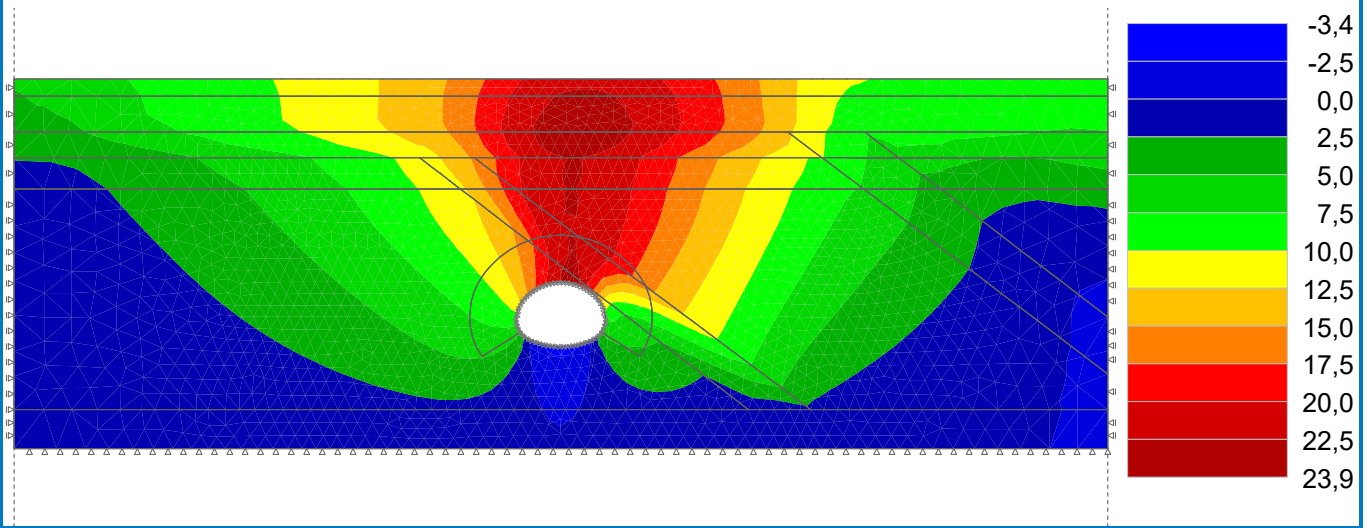
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 7

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-3,4; 23,9> mm



Pouze pro nekomerční využití



## **Příloha č. 4:**

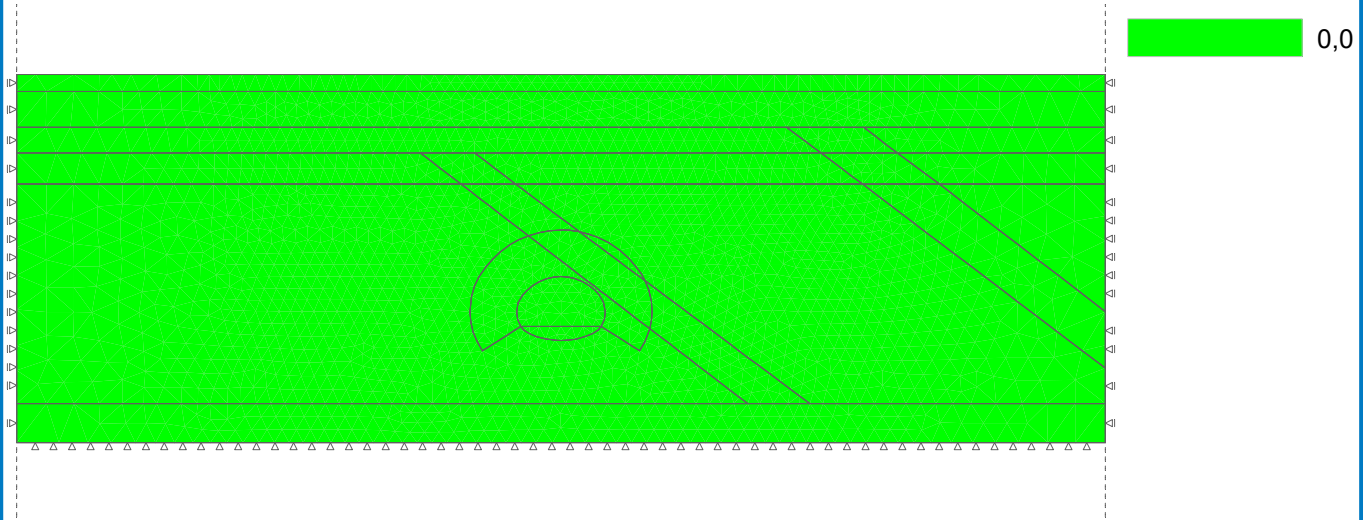
Sedání ve fázích 1-7 pro výpočet bez vody ve staničení 42,570 km

(vytvořeno ve softwaru GEO5)

Název : Výpočet

Fáze : 1

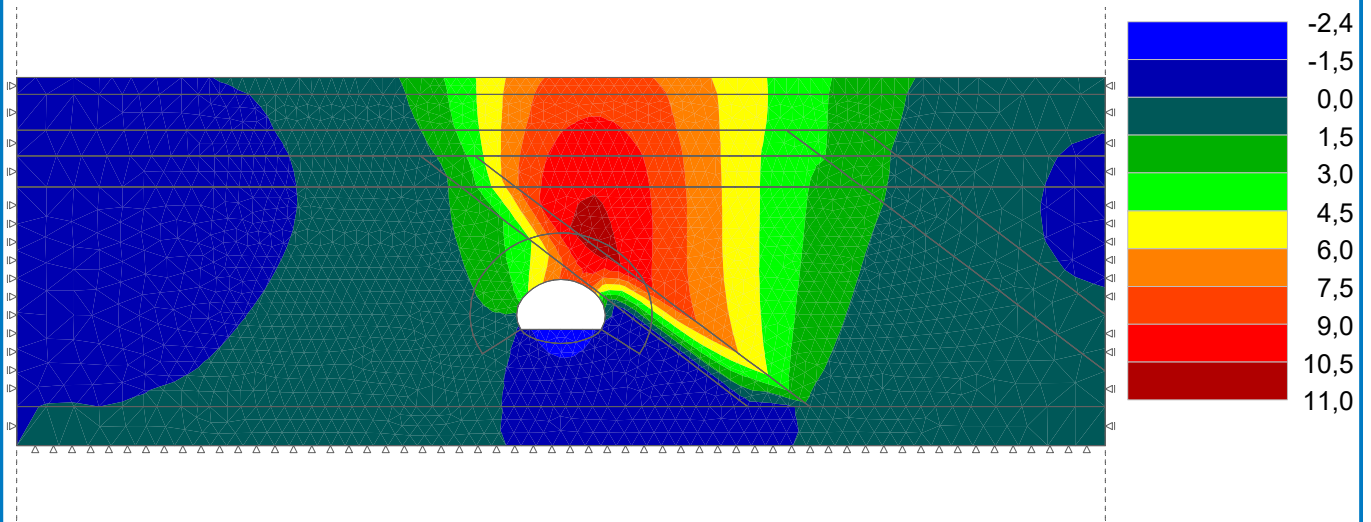
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 0,0> mm



Název : Výpočet

Fáze : 2

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-2,4; 11,0> mm



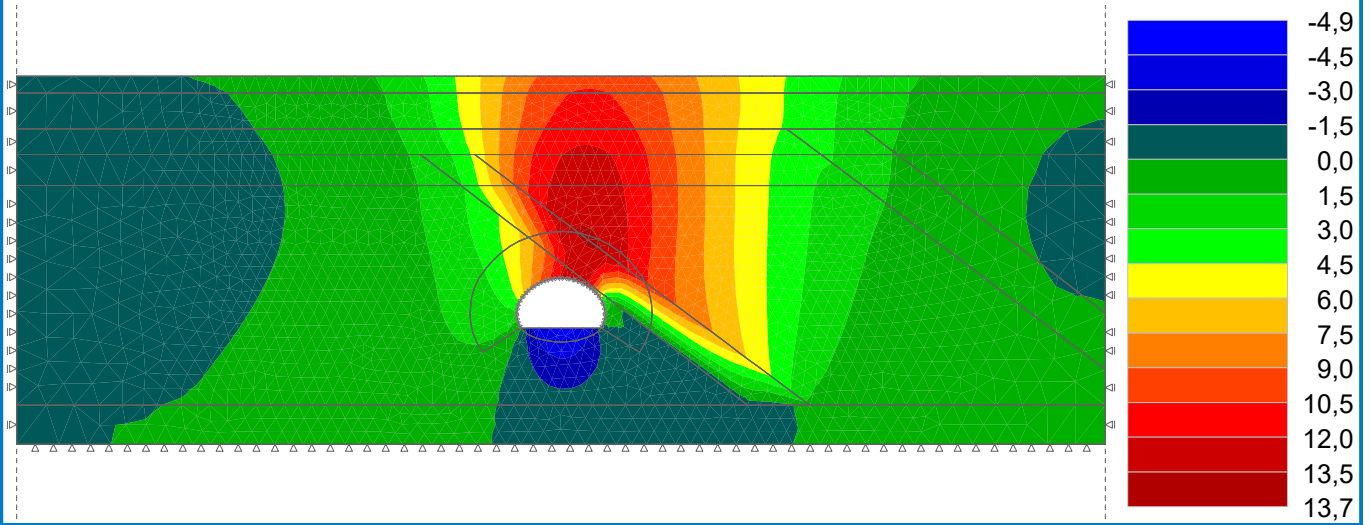
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 3

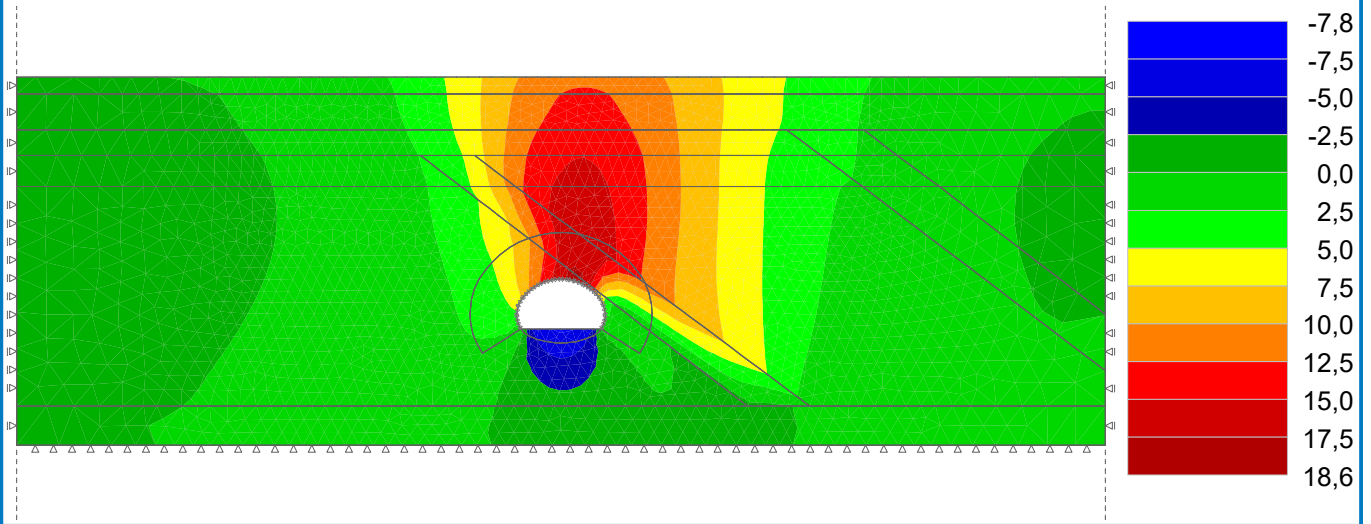
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-4,9; 13,7> mm



Název : Výpočet

Fáze : 4

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-7,8; 18,6> mm



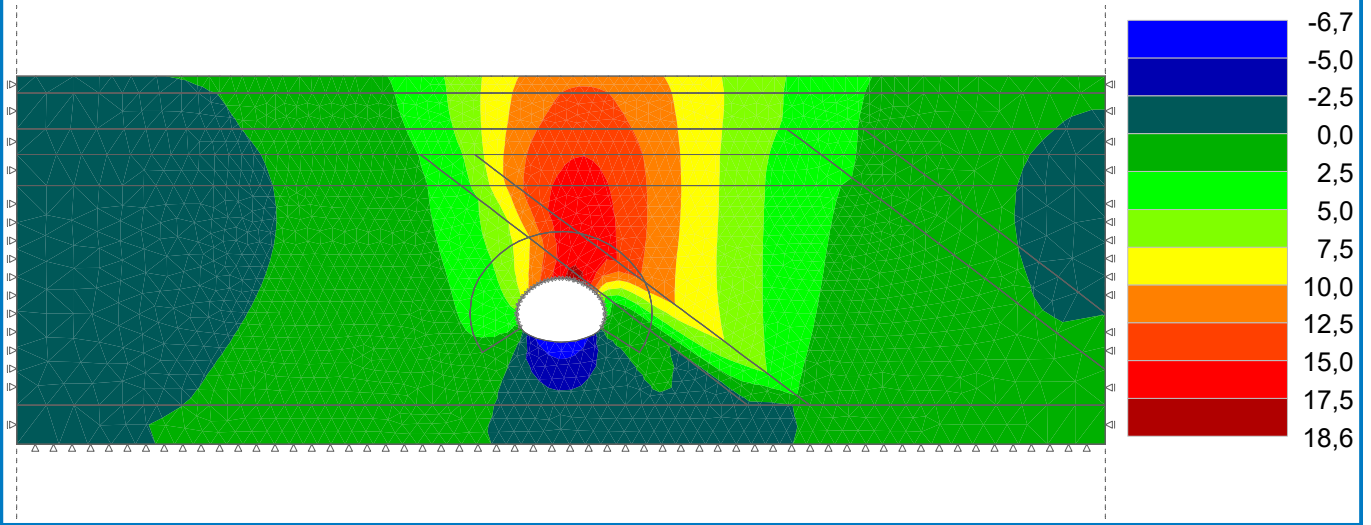
Pouze pro nekomerční využití



**Název : Výpočet**

**Fáze : 5**

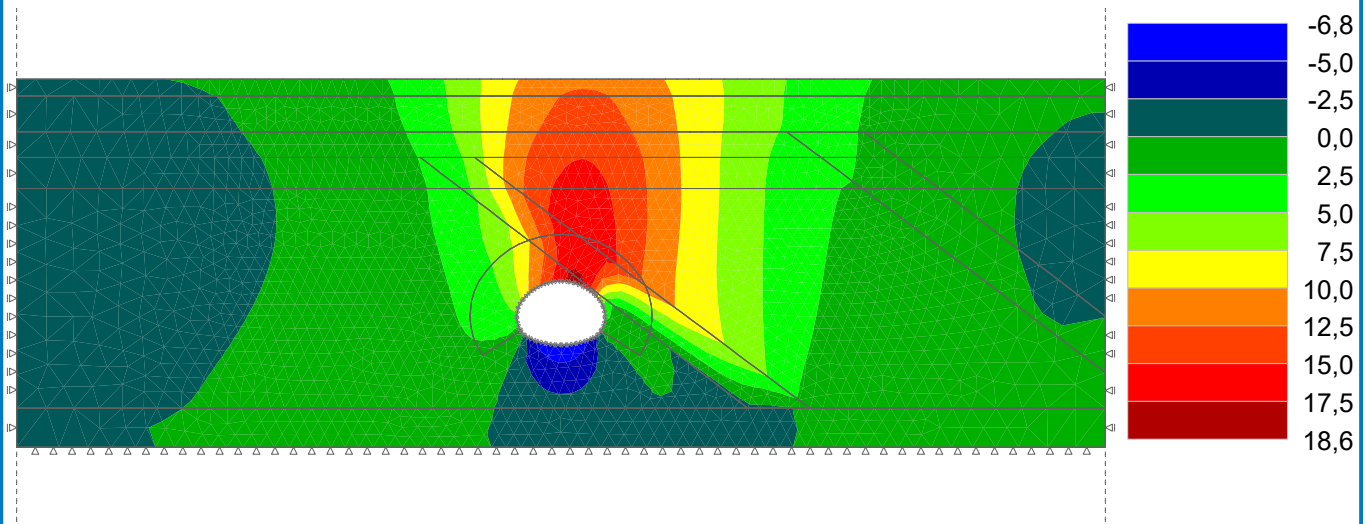
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-6,7; 18,6> mm



**Název : Výpočet**

**Fáze : 6**

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-6,8; 18,6> mm



Pouze pro nekomerční využití

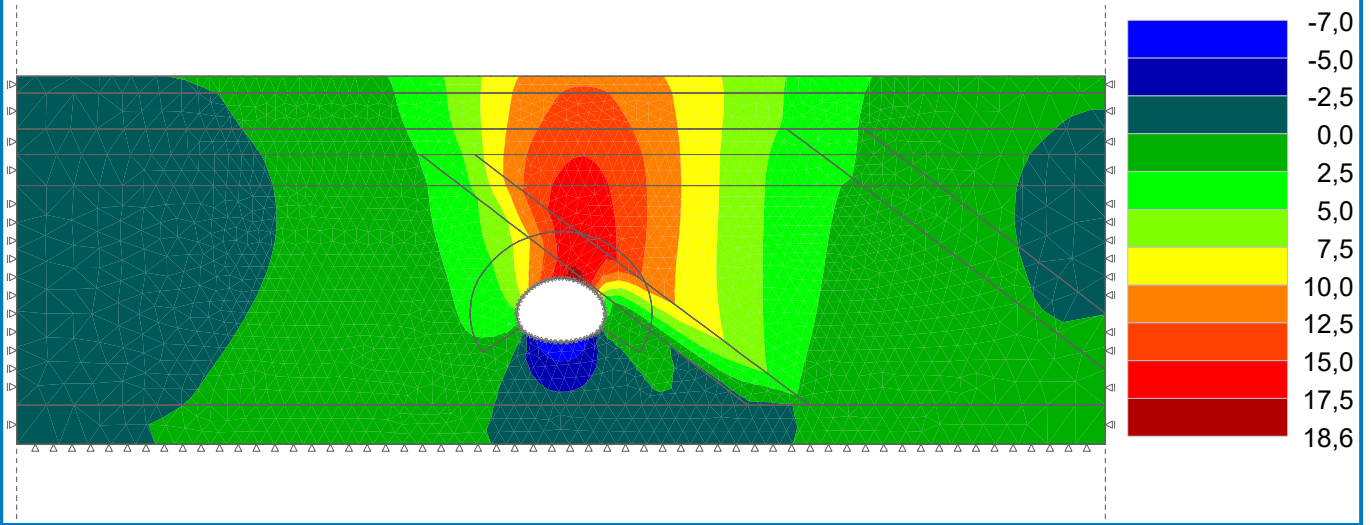




Název : Výpočet

Fáze : 7

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-7,0; 18,6> mm



Pouze pro nekomerční využití



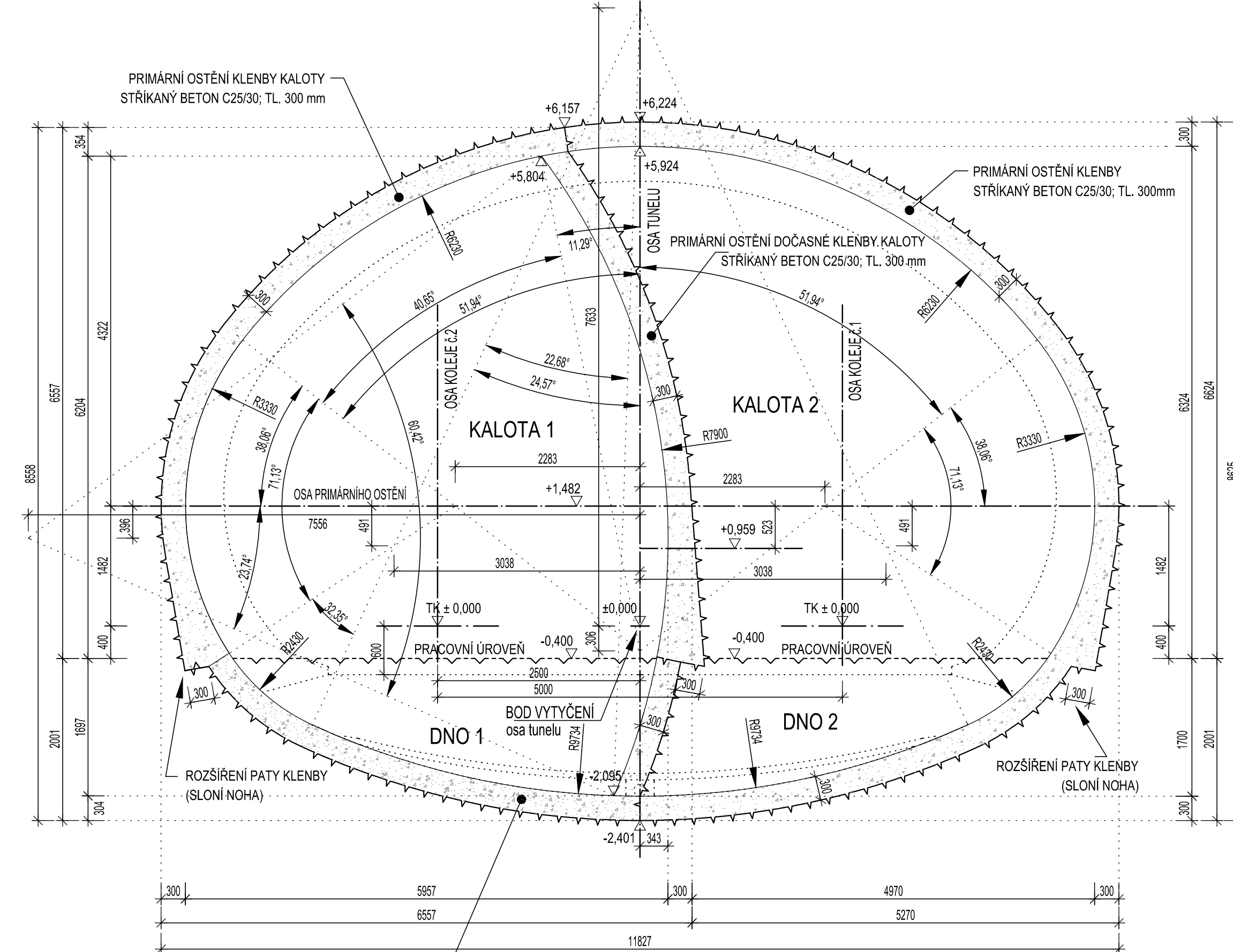
## **Příloha č. 5:**

Vzorový příčný řez ve staničení 42,470 km

M 1:50

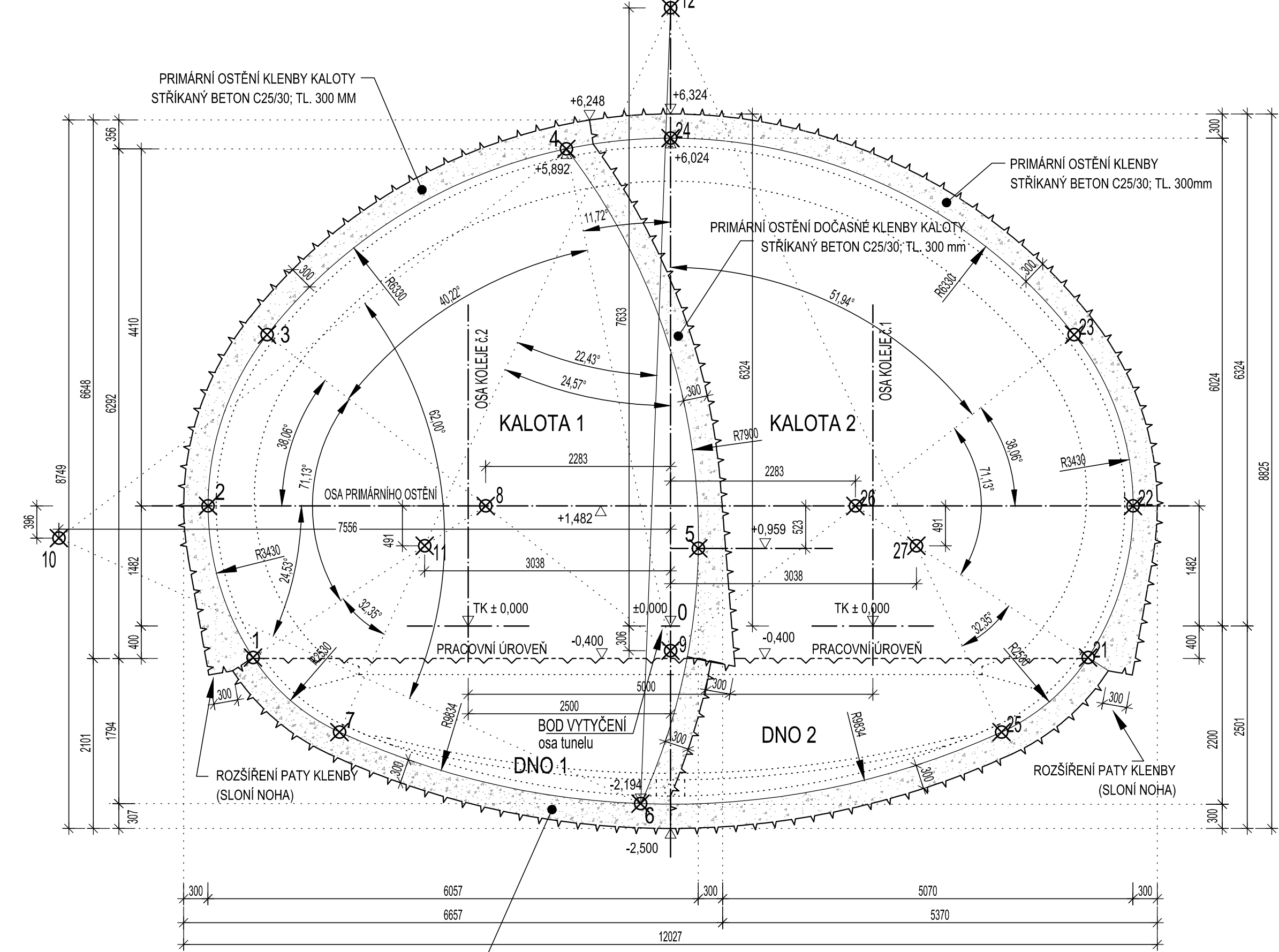
(převzato od METROPROJEKT Praha a.s.)

PRVNÍ DÍLČÍ VÝRUB - TUNEL o.v.5,0  
 ŘEZ PO SMĚRU RAŽEB (proti staničení)  
 PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ - TEORETICKÝ VÝRUB



TEORETICKÝ VÝRUB	
KALOTA 1	34,20 m <sup>2</sup>
DNO 1	8,38 m <sup>2</sup>
KALOTA 2	31,11 m <sup>2</sup>
DNO 2	7,38 m <sup>2</sup>
<b>CELKEM</b>	<b>81,07 m<sup>2</sup></b>

PRVNÍ DÍLČÍ VÝRUB - TUNEL o.v.5,0  
 ŘEZ PO SMĚRU RAŽEB (proti staničení)  
 PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ - NADVÝŠENÝ VÝRUB O 100mm



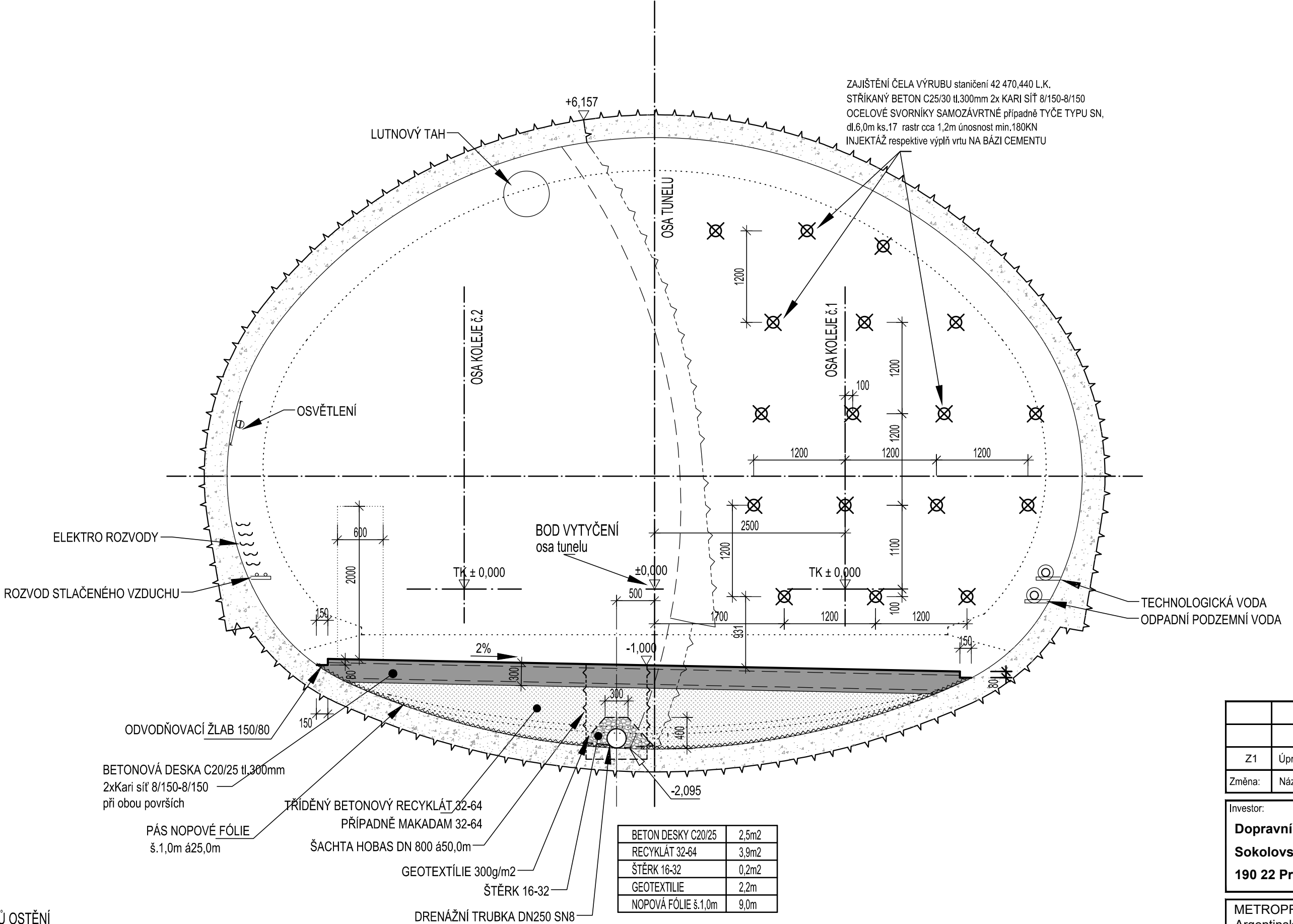
NADVÝŠENÝ VÝRUB	
KALOTA 1	35,1 m <sup>2</sup>
DNO 1	8,97 m <sup>2</sup>
KALOTA 2	32,3 m <sup>2</sup>
DNO 2	8,0 m <sup>2</sup>
<b>CELKEM</b>	<b>84,37 m<sup>2</sup></b>

VYTÝČOVACÍ BODY PRIMÁRNÍHO OSTĚNÍ		
OZN.	X	Y
0	0	0
1	-5158	-390
2	-5713	1482
3	-4984	3597
4	-1286	5892
5	343	959
6	-369	-2194
7	-4090	-1310

VYTÝČOVACÍ BODY STŘEDŮ OBLOUKŮ OSTĚNÍ		
OZN.	X	Y
8	-2283	1482
9	0	-306
10	-7556	1086
11	-3038	991
12	0	7633

OZN.	X	Y
21	5158	-390
22	5713	1482
23	4984	3597
24	0	6024
25	4090	-1310

PRVNÍ DÍLČÍ VÝRUB - TUNEL o.v.5,0  
 ŘEZ PROTI STANIČENÍ  
 VYSTROJENÍ TUNELU



BETON DESKY C20/25	2,5m <sup>2</sup>
RECYKLÁT 32-64	3,9m <sup>2</sup>
ŠTĚRK 16-32	0,2m <sup>2</sup>
GEOTEXTILIE	2,2m
NOPOVÁ FÓLIE š.1,0m	9,0m

STŘÍKANÝ BETON C25/30  
 VÝZTUŽ B 500B  
 KARI SÍŤ 150/8-150/8 přesahy 2 oka  
 OCEL S235

Změna:	Název změny:	Datum:	Provedl:	Podpis:
Z1	Úpravy dle dodatku č. 1 SOD	05/2020	Višňák	<i>Višňák</i>

Investor:	Objednatel:	Inženýrská činnost:
Dopravní podnik hl. m. Prahy a.s. Sokolovská 217/42 190 22 Praha 9	HOFTIEF CZ a.s. Pízeňská 16/3217 150 00 Praha 5	Inženýring dopravních staveb a.s. Braničská 514/140 147 00 Praha 4

METROPROJEKT Praha a.s.  
 Argentinská 1621/36  
 170 00 Praha 7  
 generální ředitel: Ing. David Krása  
 tel.: +420 296 154 105  
 www.metroprojekt.cz  
 info@metroprojekt.cz

**METROPROJEKT**

Supravna číslo:

HIP: **Ing. Libor Martinek** *Martinek* Podpis: *Martinek* **Název a účel díla:**  
**Výstavba trasy I.D metra v Praze - úsek Pankrác-Depo Pístitute**  
 tel.: **296 154 504**  
 Stupeň: **RDS**

Odpovědný projektant: **Ing. Miroslav Kochánek** *Kochánek* Podpis: *Kochánek **Název přílohy:**  
**Rozšíření průzkumné štolý na plný**  
**Doplňkový geologický průřez úseku ID1a**  
**Úsek VO-OL - 20\_ Stavební část**  
 Vypracoval: **Petr Višňák** *Višňák* Podpis: *Višňák*  
 Rozšíření průzkumné štolý na plný  
 profil dvoukolejného tunelu  
 Vzorový příčný řez - Tunel o.v. 5,0m*

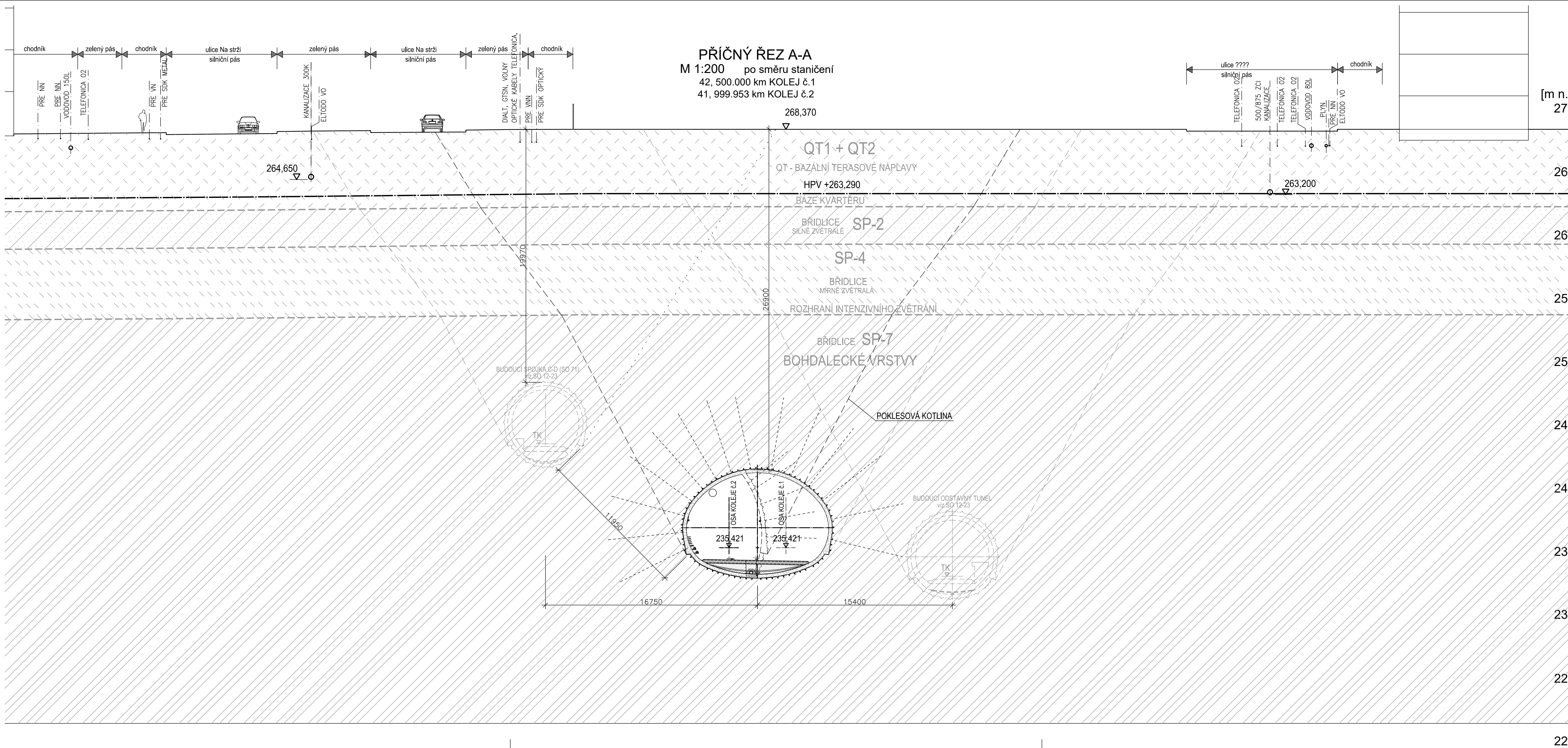
Start: **V20/2041** Datum: **05/2020**  
 Počet: **6x44** Měřítko: **1:50** IČD: **19 7667 002 20 01 00 - 007**

## **Příloha č. 6:**

Charakteristický příčný řez ve staničení 42,470 km

M 1:200

(převzato od METROPROJEKT Praha a.s.)



**PŘÍČNÝ ŘEZ A-A**  
 M 1:200 po směru staničení  
 42, 500.000 km KOLEJ č.1  
 41, 999.953 km KOLEJ č.2

Z1	Úpravy dle dodatku č. 1 SOD	05/2020	Višňák	<i>Višňák</i>
Změna:	Název změny:	Datum:	Provedl:	Podpis:
Investor:	Dopravní podnik hl. m. Prahy a.s. Sokolovská 217/42 190 22 Praha 9	Objednatel:	HOFTIEF CZ a.s. Pížeňská 16/3217 150 00 Praha 5	Inženýrská činnost:
METROPROJEKT Praha a.s. Argentinská 1621/36 170 00 Praha 7 generální ředitel: Ing. David Krása tel.: +420 296 154 105 www.metroprojekt.cz info@metroprojekt.cz				Souprava číslo:
HIP:	Ing. Libor Martinek tel.: 296 154 504	Podpis:	Název a účel díla: Výstavba trasy I.D metra v Praze - úsek Pankrác-Depo Písnice Doplňkový geologický průzkum úseku ID1a <b>Úsek VO-OL - C.Stavební část</b>	
Stupeň:	RDS	Odpovědný projektant:	Podpis:	Název přílohy:
Stupeň:	RDS	Ing. Miroslav Kochánek	<i>Kochánek</i>	Roziřování průzkumné štoly na plný profil dvoukolejného tunelu
Skart. znak:	V20/2041	Datum:	05/2020	Charakteristický příčný řez A-A s geologií
Počet formátů:	4xA4	Měřítko:	1:200	IČD: 19 7667 002 20 02 00 -
				Změna:
				-
				Číslo příl.:
				005

## **Příloha č. 7:**

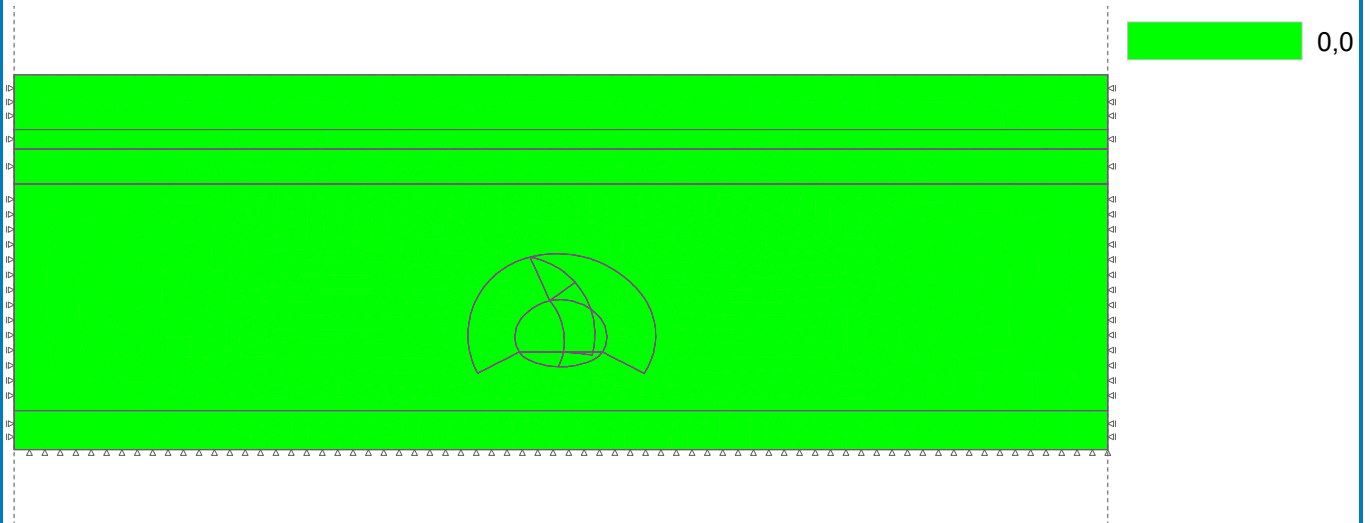
Sedání ve fázích 1-14 pro výpočet bez vody ve staničení 42,470 km

(vytvořeno ve softwaru GEO5)

Název : Výpočet

Fáze : 1

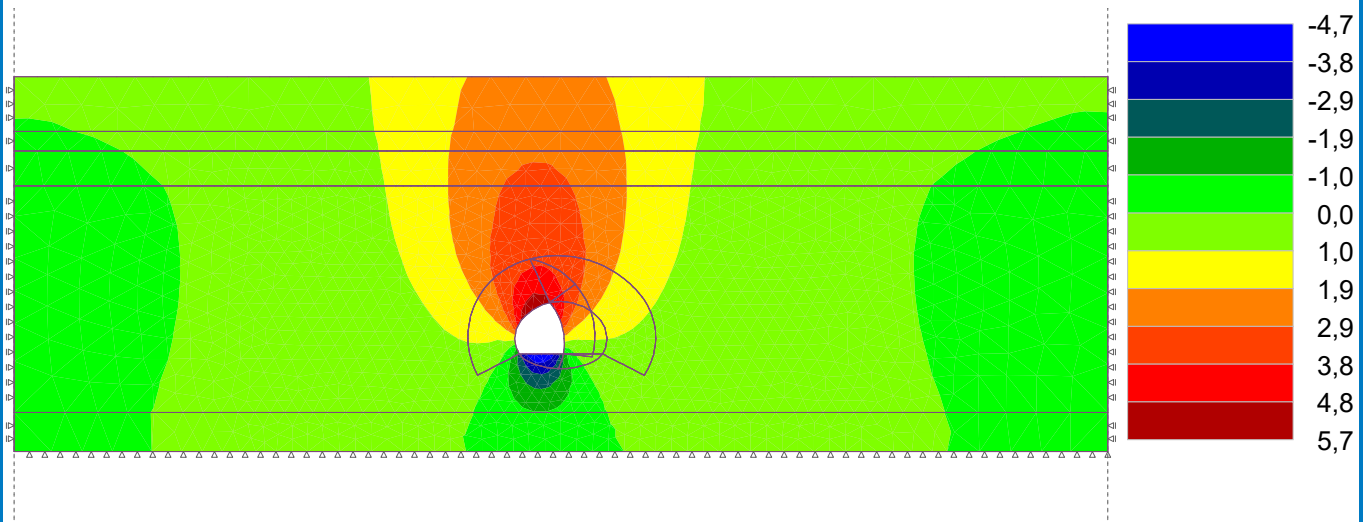
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 0,0> mm



Název : Výpočet

Fáze : 2

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-4,7; 5,7> mm



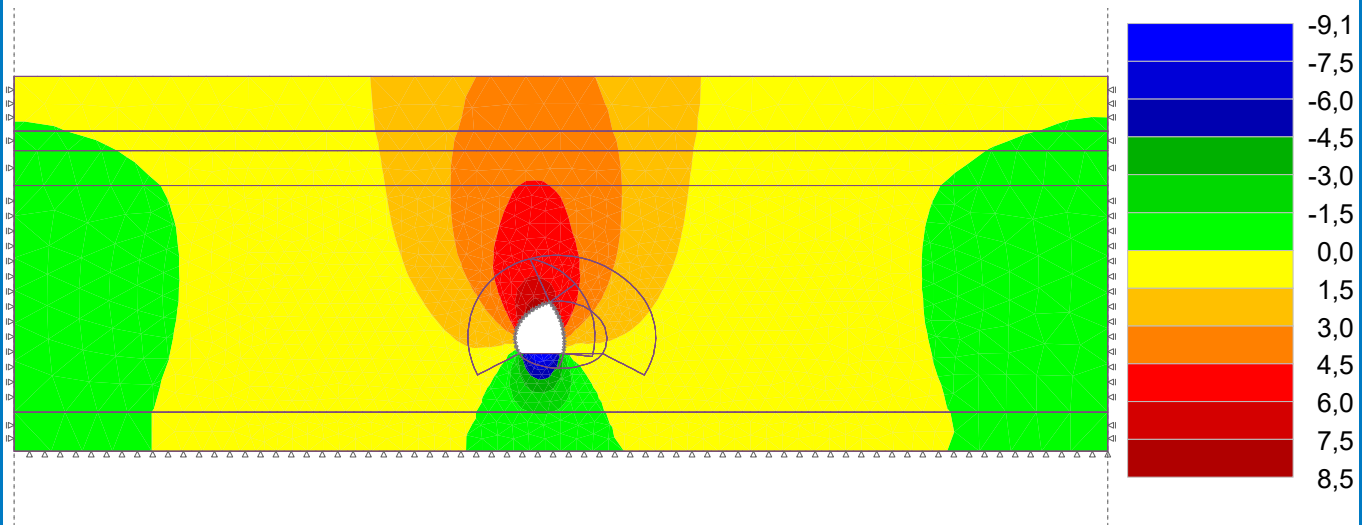
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 3

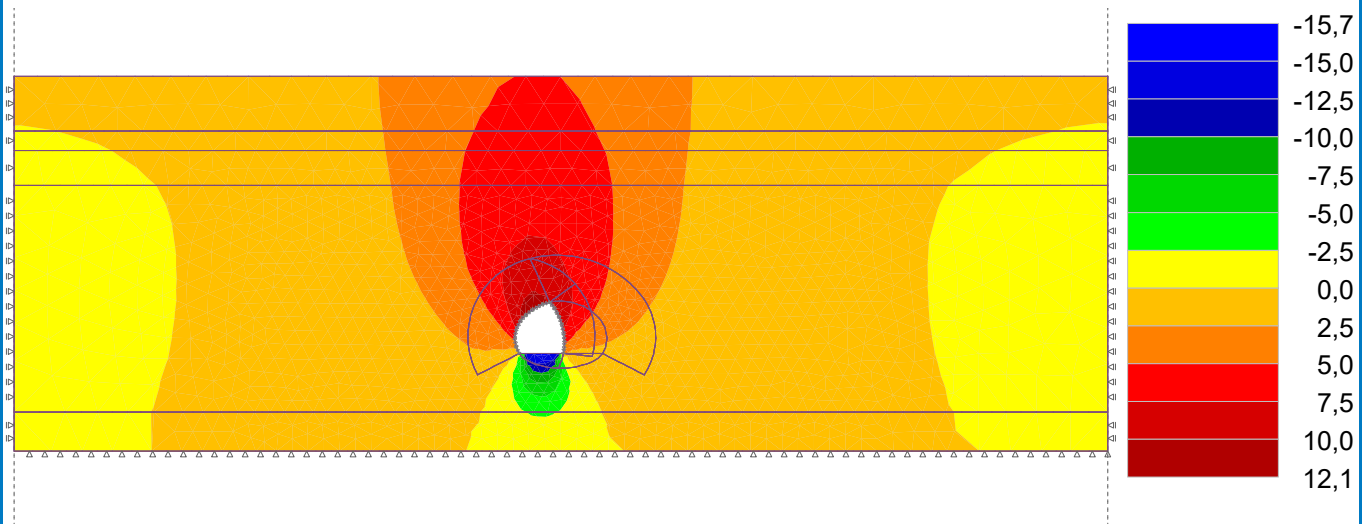
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-9,1; 8,5> mm



Název : Výpočet

Fáze : 4

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-15,7; 12,1> mm



Pouze pro nekomerční využití

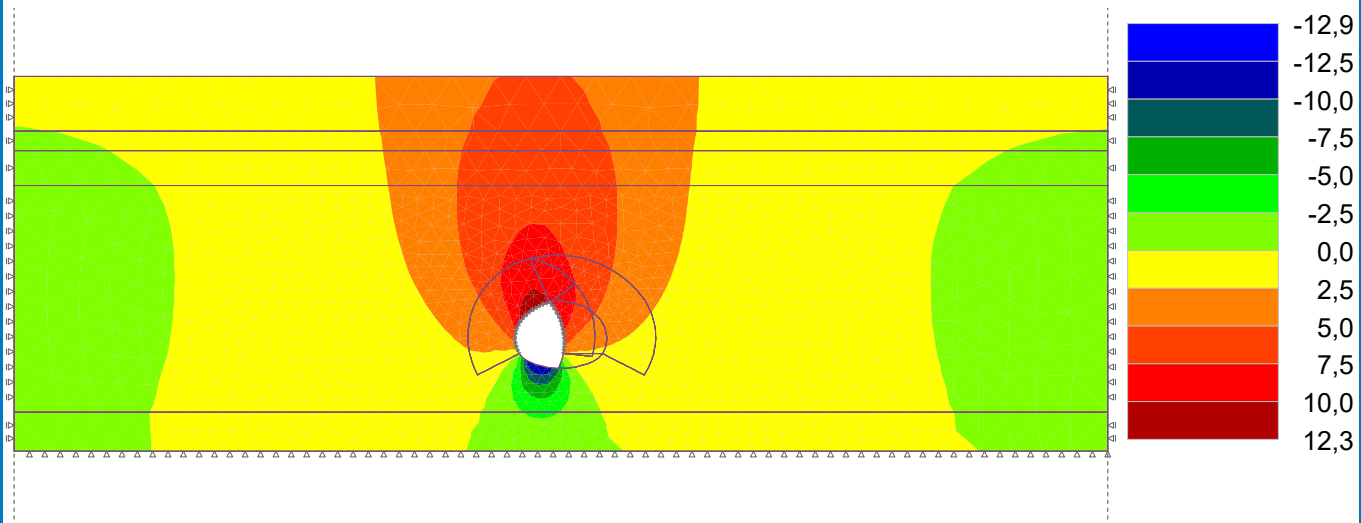




Název : Výpočet

Fáze : 5

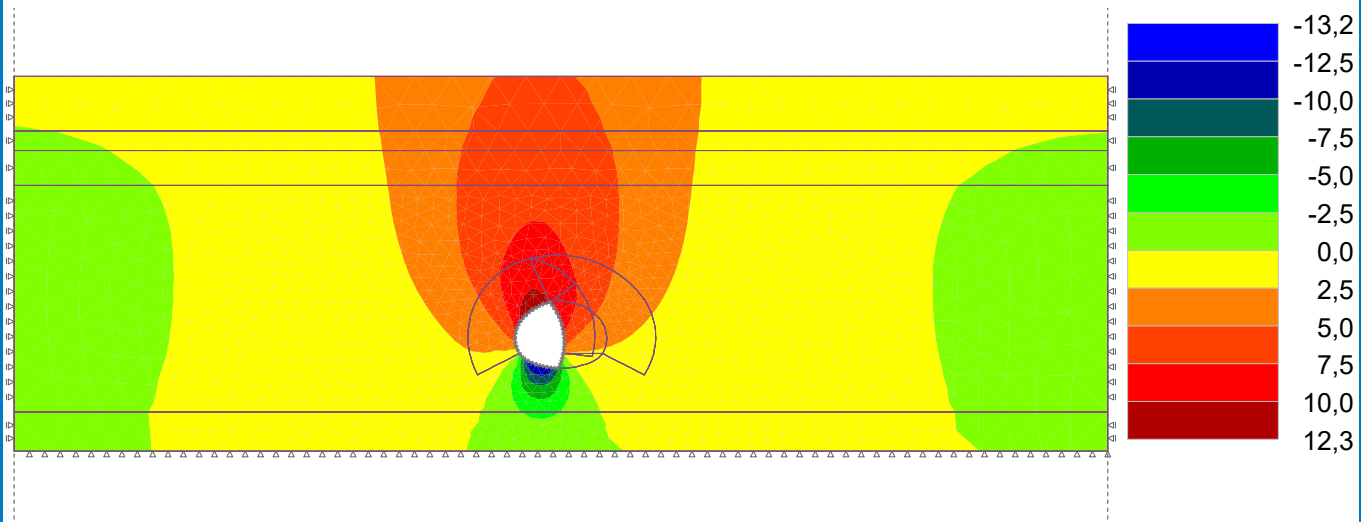
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí d<sub>z</sub>; rozsah : <-12,9; 12,3> mm



Název : Výpočet

Fáze : 6

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí d<sub>z</sub>; rozsah : <-13,2; 12,3> mm



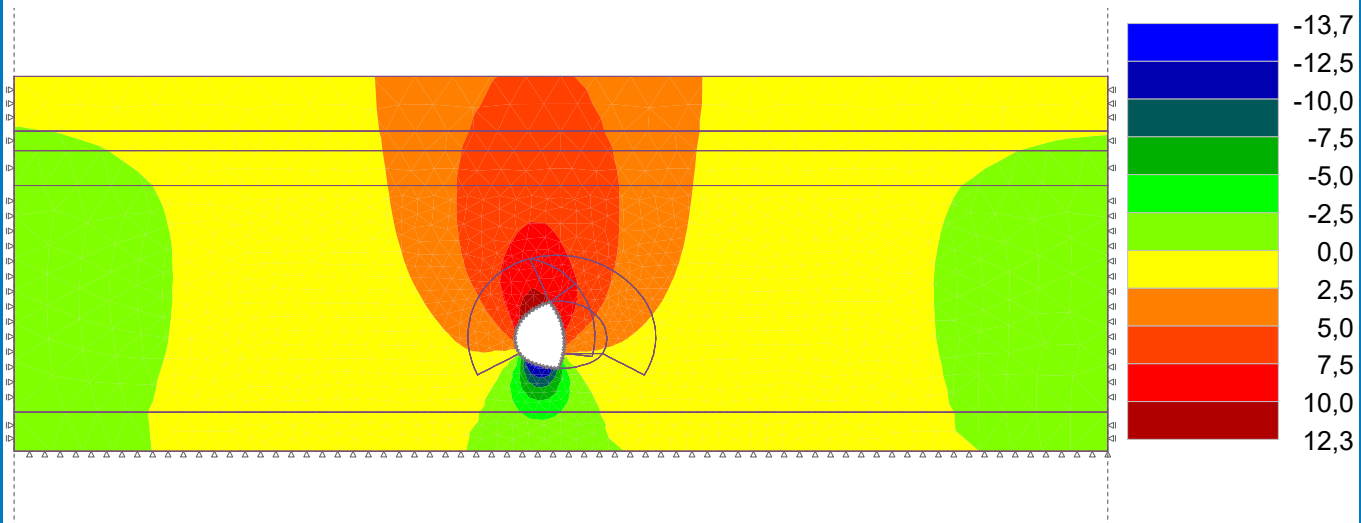
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 7

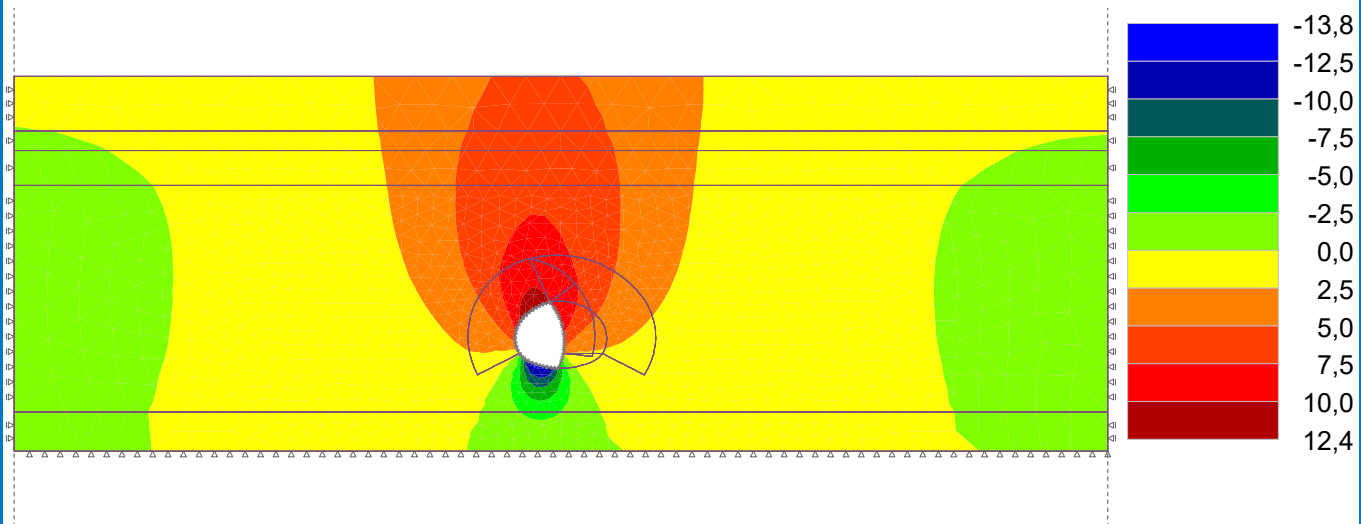
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-13,7; 12,3> mm



Název : Výpočet

Fáze : 8

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-13,8; 12,4> mm



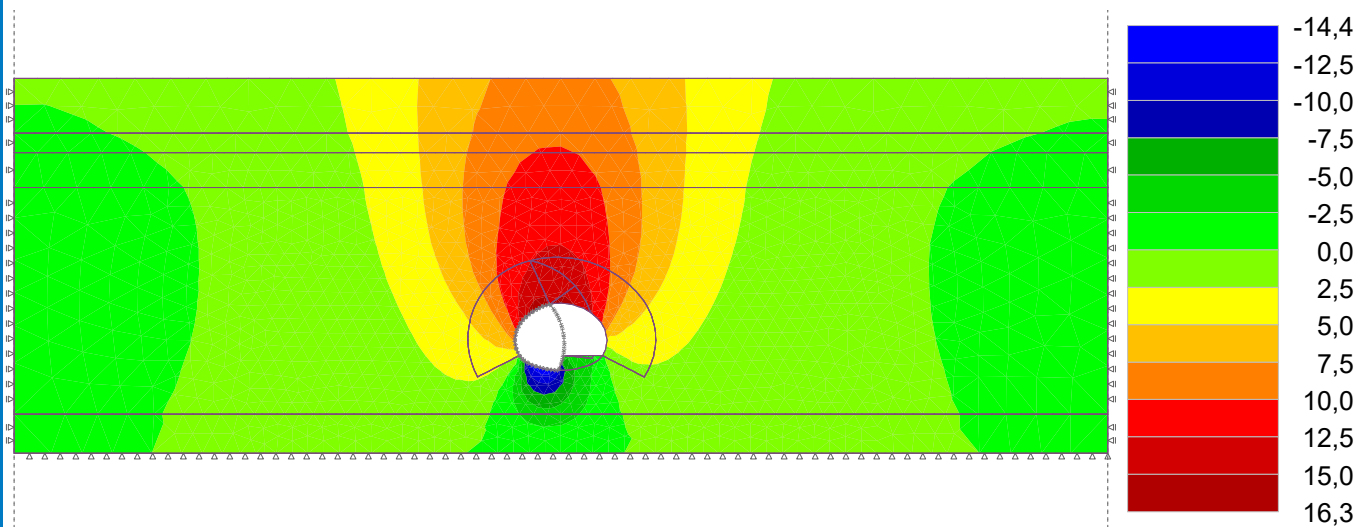
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 9

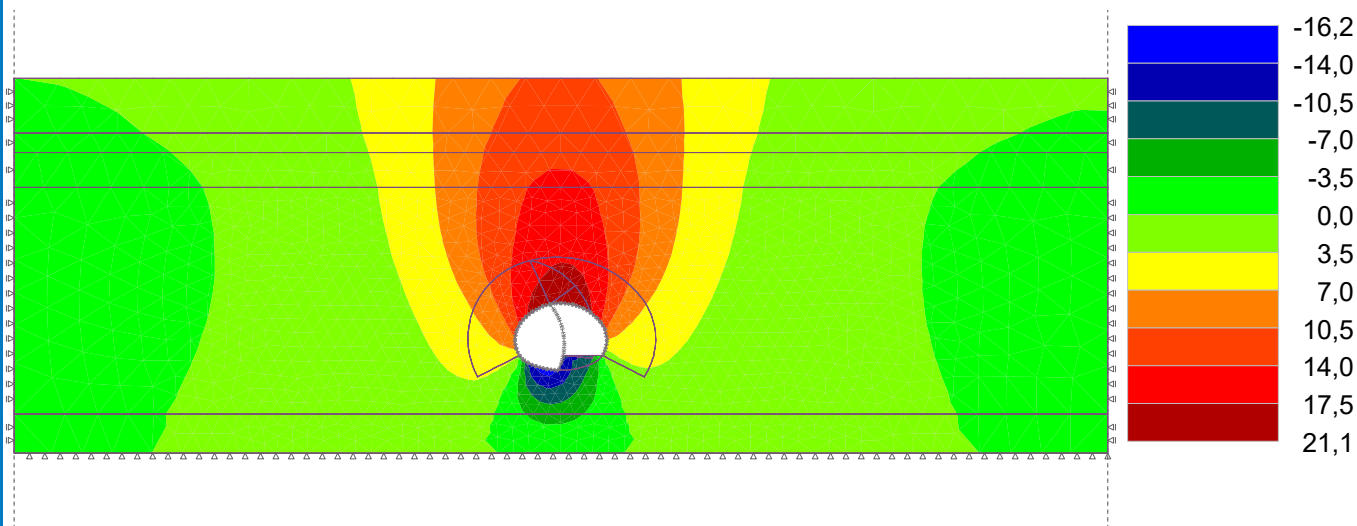
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-14,4; 16,3> mm



Název : Výpočet

Fáze : 10

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-16,2; 21,1> mm



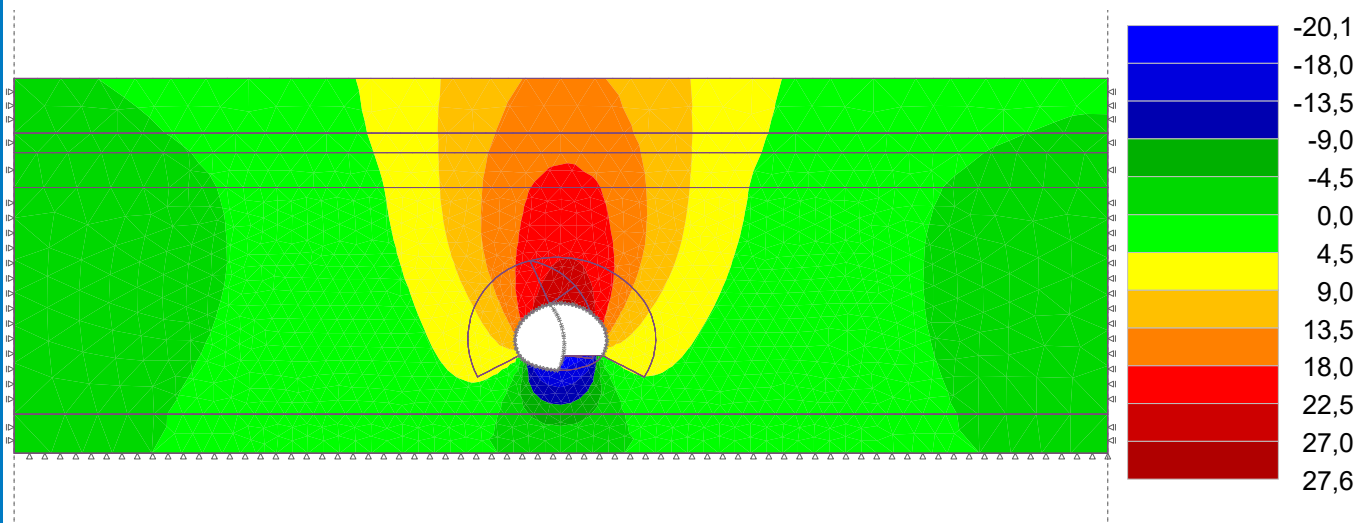
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 11

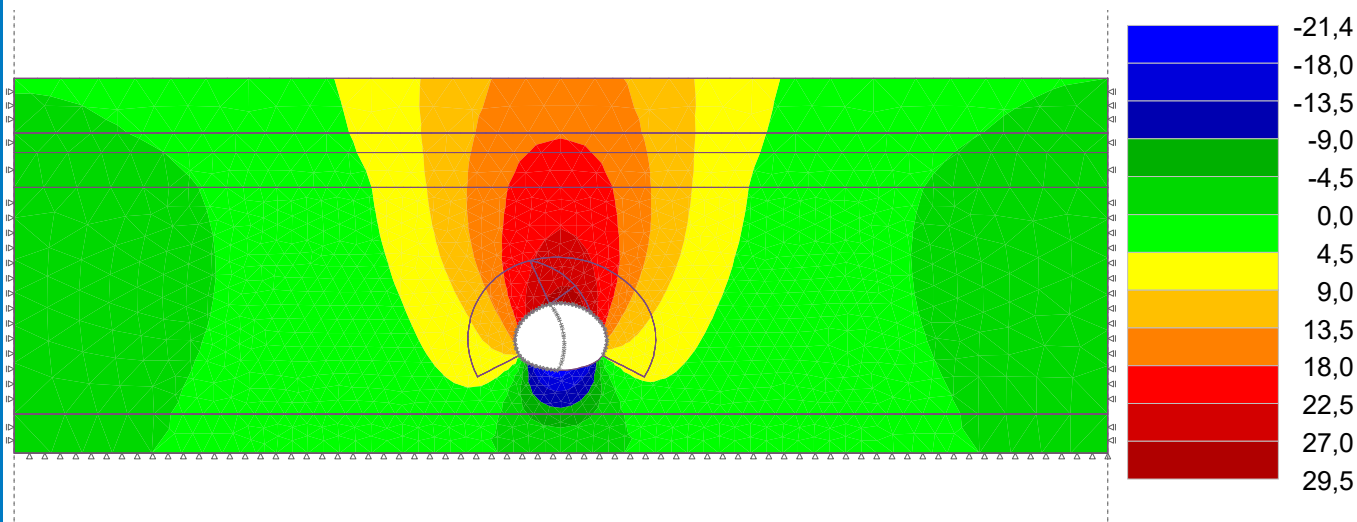
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-20,1; 27,6> mm



Název : Výpočet

Fáze : 12

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-21,4; 29,5> mm



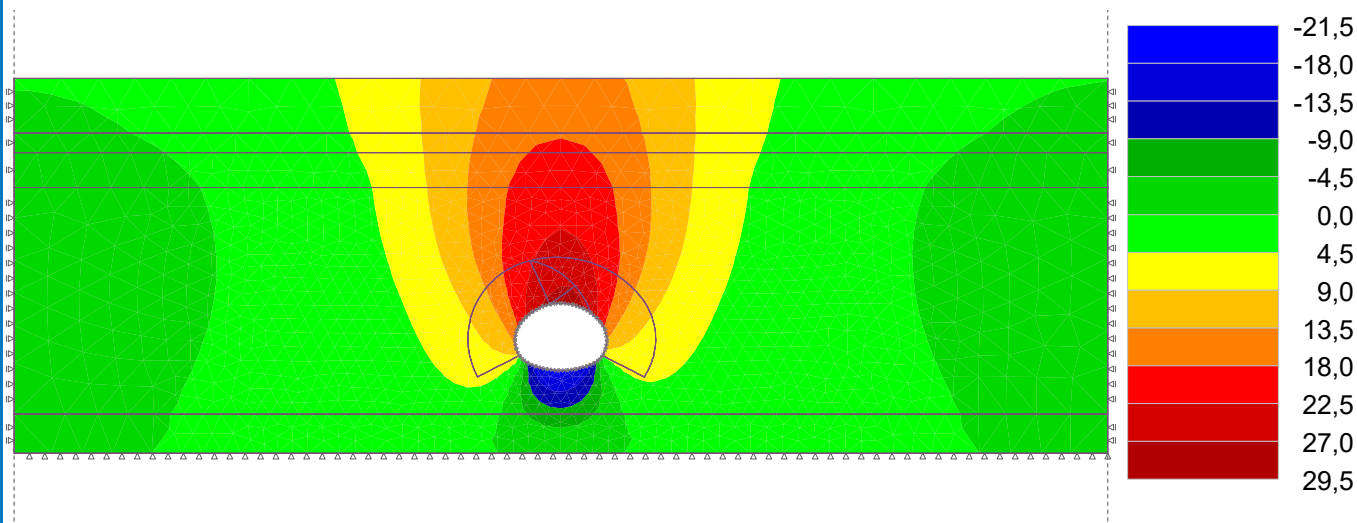
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 13

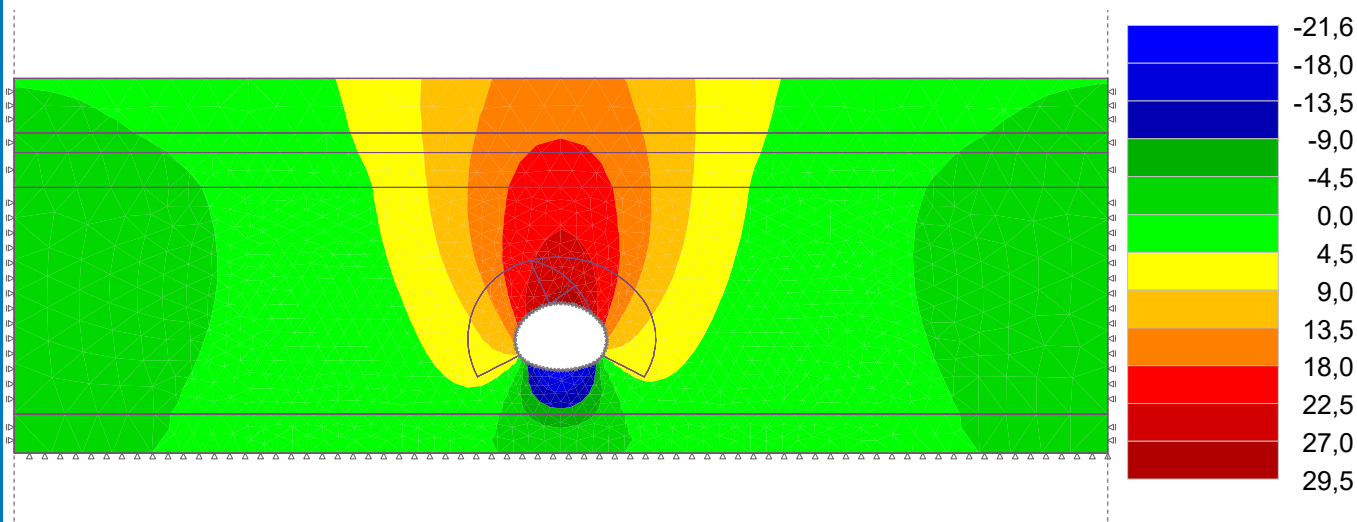
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-21,5; 29,5> mm



Název : Výpočet

Fáze : 14

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-21,6; 29,5> mm



Pouze pro nekomerční využití



## **Příloha č. 8:**

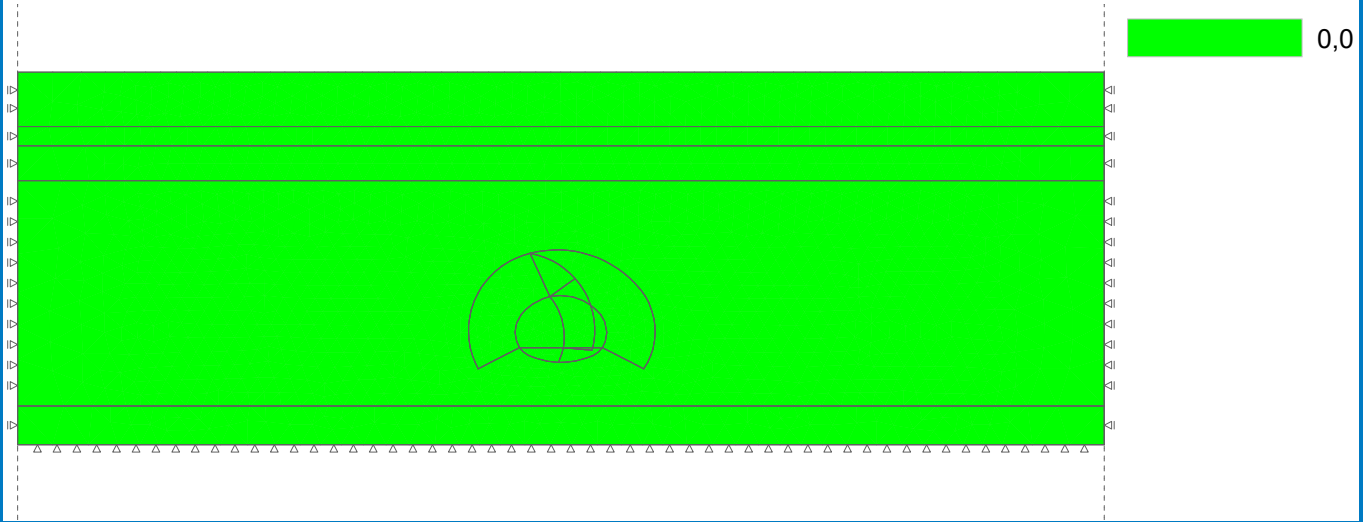
Sedání ve fázích 1-14 pro výpočet s vodou ve staničení 42,470 km

(vytvořeno ve softwaru GEO5)

Název : Výpočet

Fáze : 1

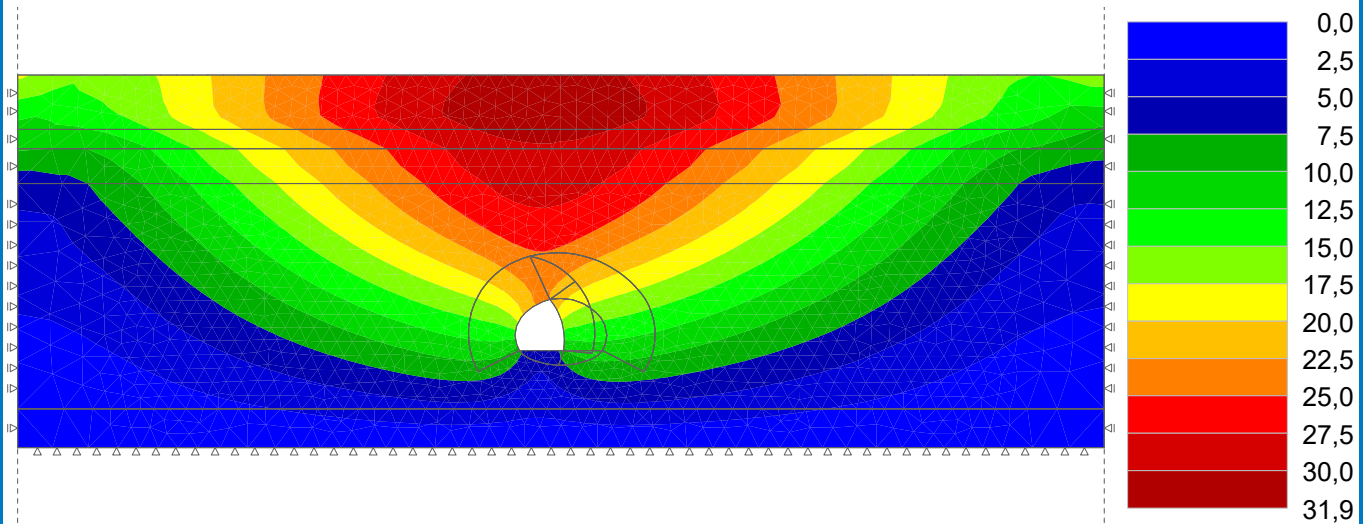
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 0,0> mm



Název : Výpočet

Fáze : 2

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 31,9> mm



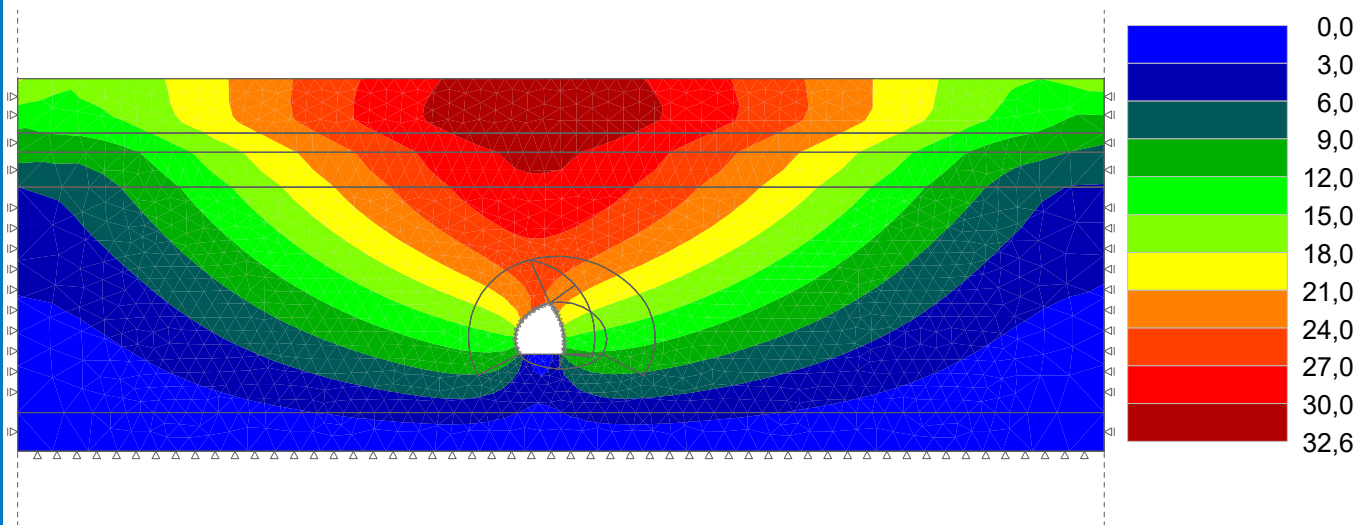
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 3

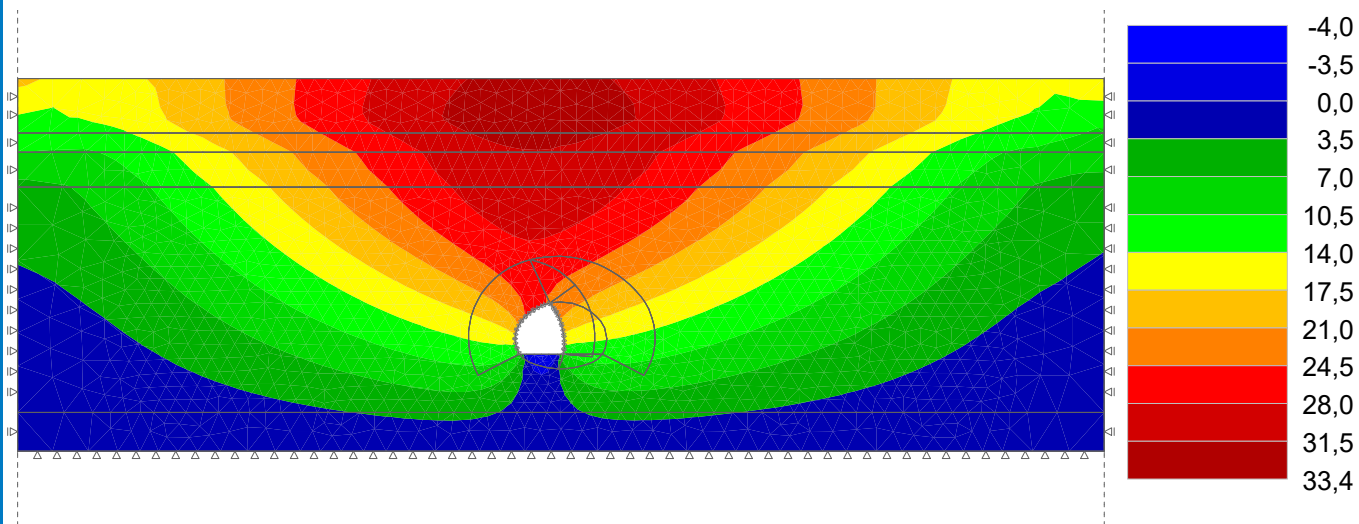
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <0,0; 32,6> mm



Název : Výpočet

Fáze : 4

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-4,0; 33,4> mm



Pouze pro nekomerční využití

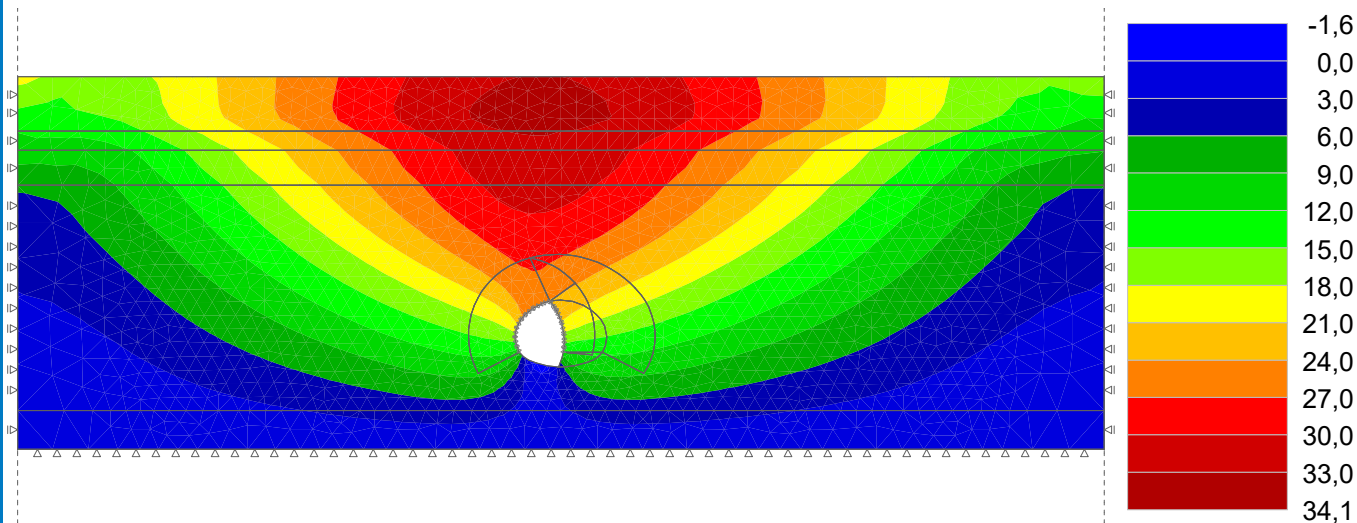




Název : Výpočet

Fáze : 5

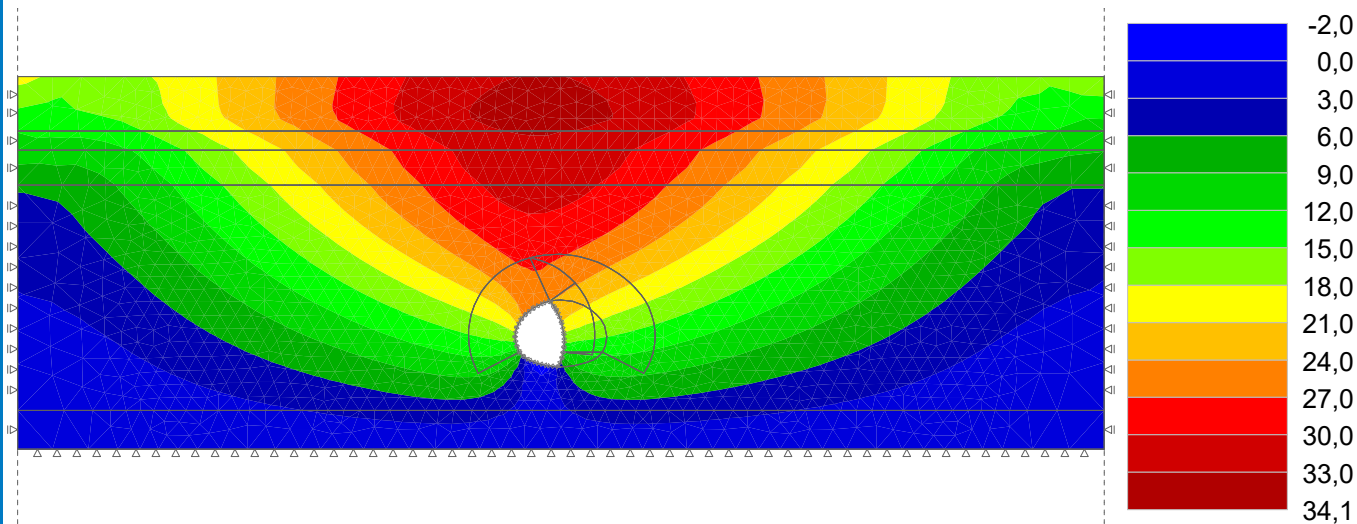
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-1,6; 34,1> mm



Název : Výpočet

Fáze : 6

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-2,0; 34,1> mm



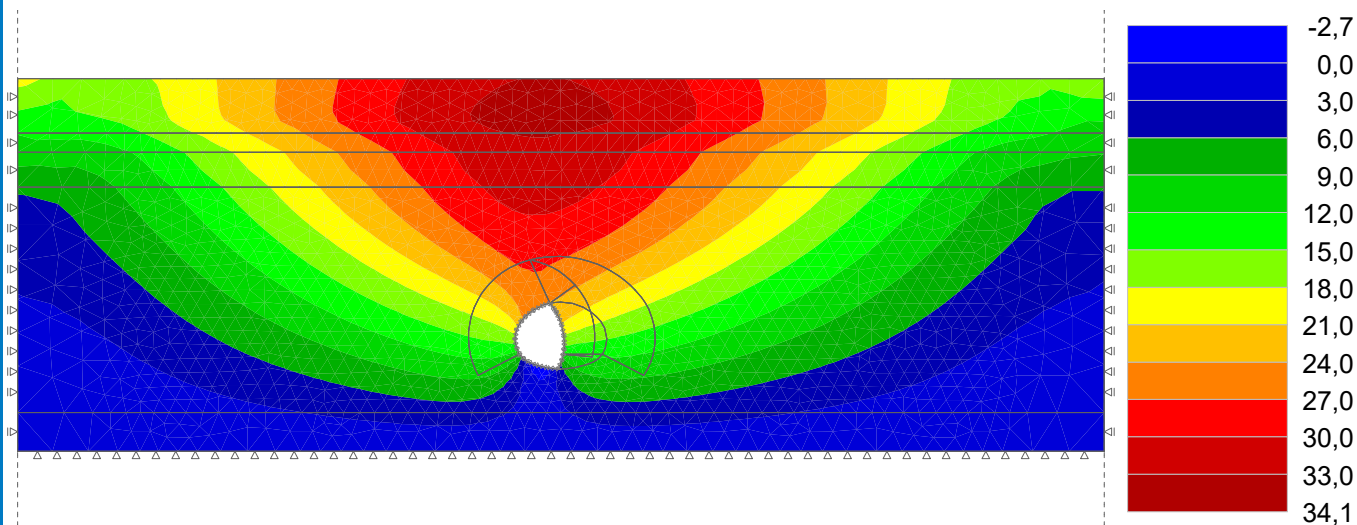
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 7

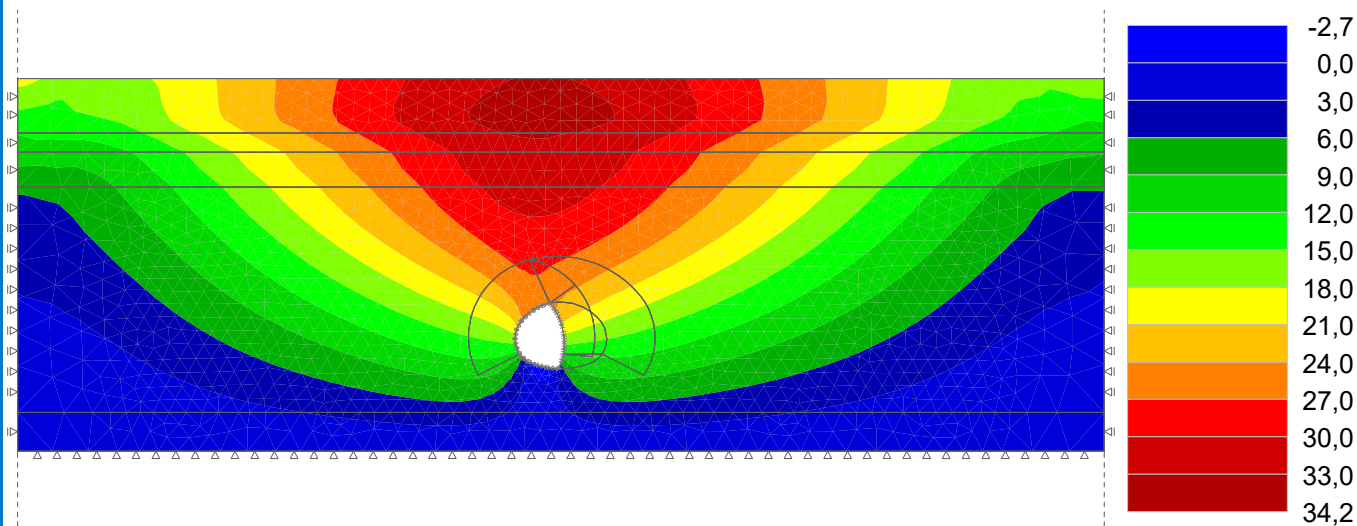
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-2,7; 34,1> mm



Název : Výpočet

Fáze : 8

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-2,7; 34,2> mm



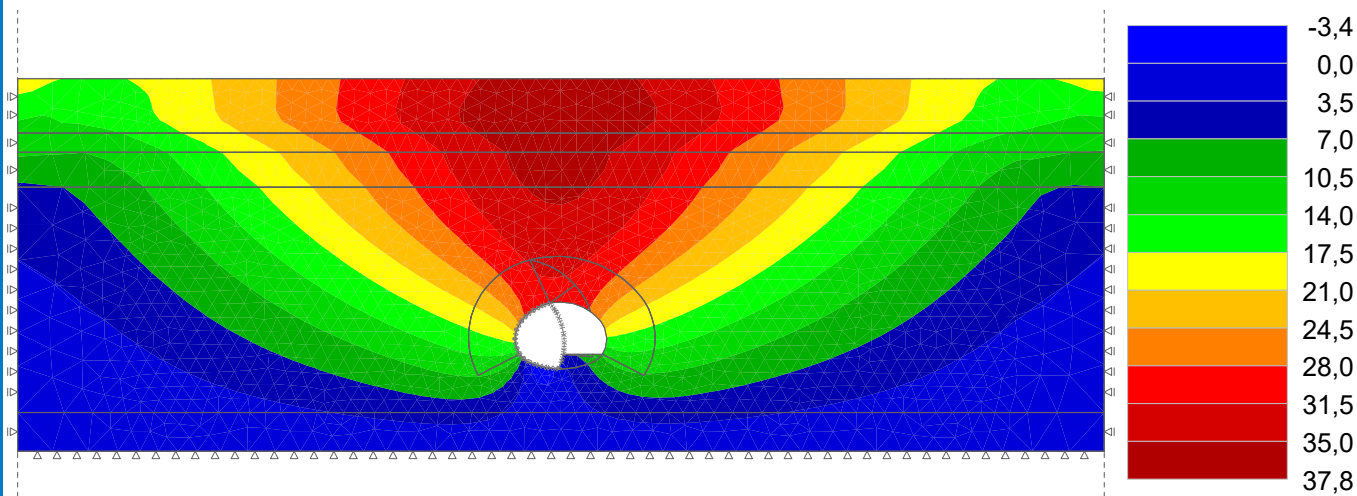
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 9

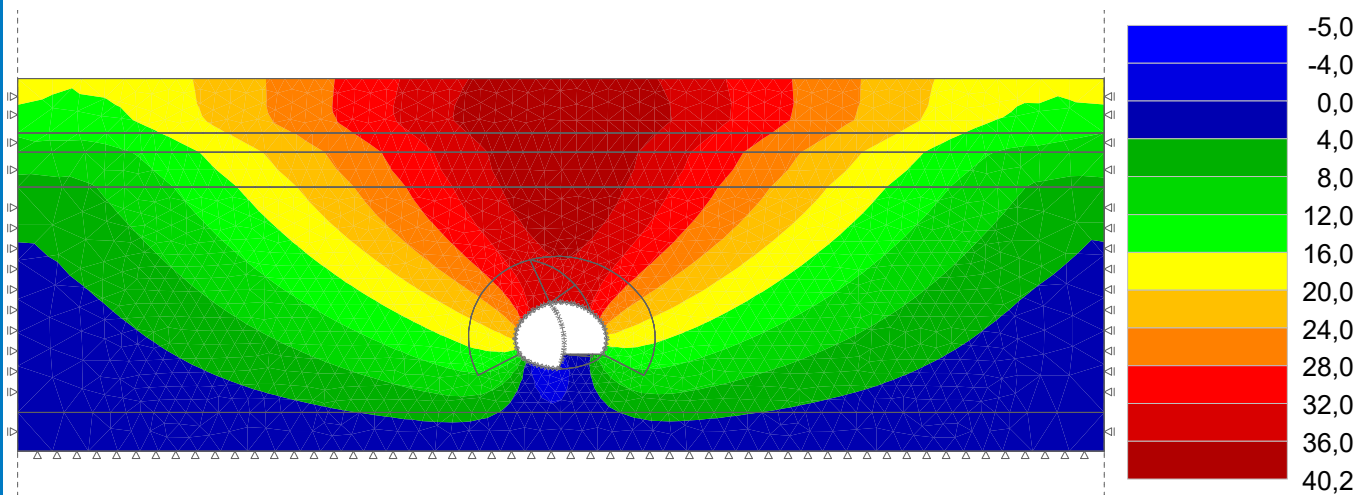
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-3,4; 37,8> mm



Název : Výpočet

Fáze : 10

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-5,0; 40,2> mm



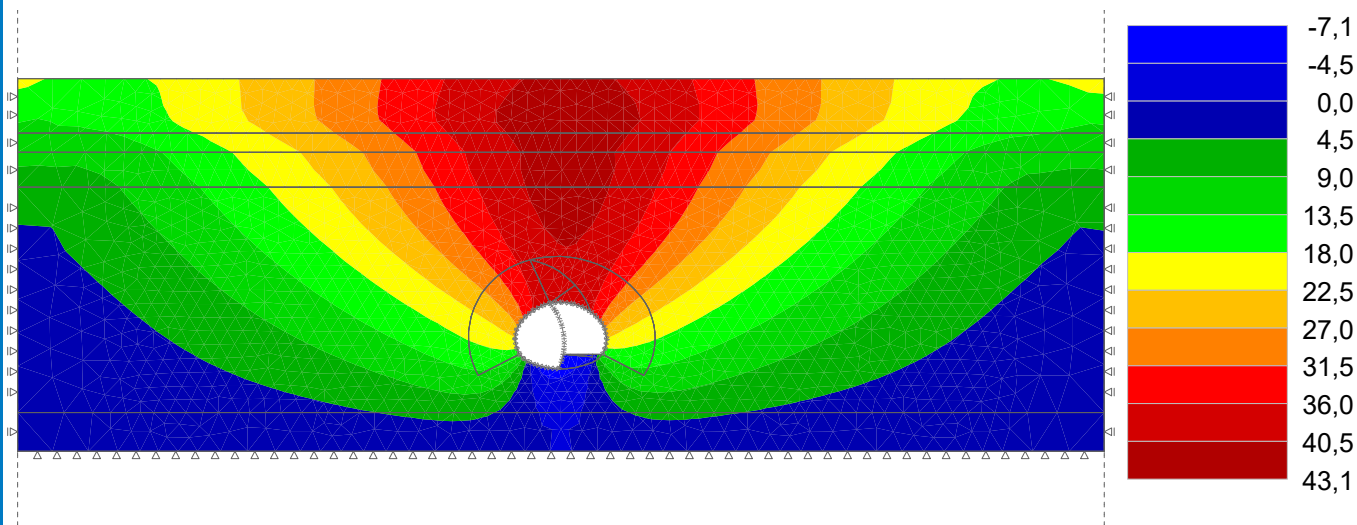
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 11

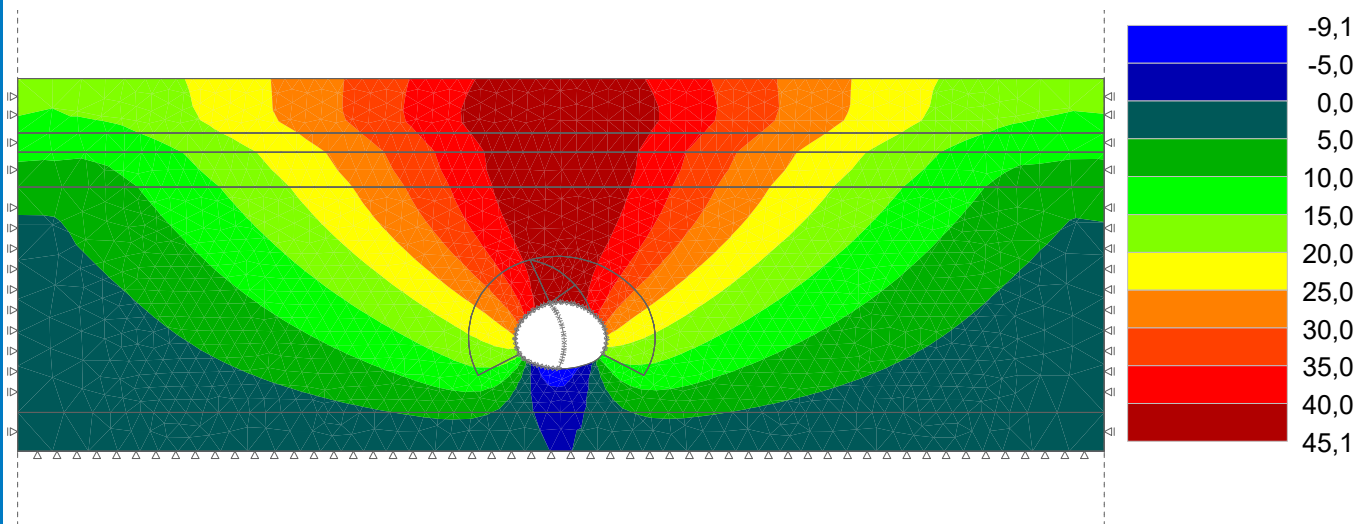
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-7,1; 43,1> mm



Název : Výpočet

Fáze : 12

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-9,1; 45,1> mm



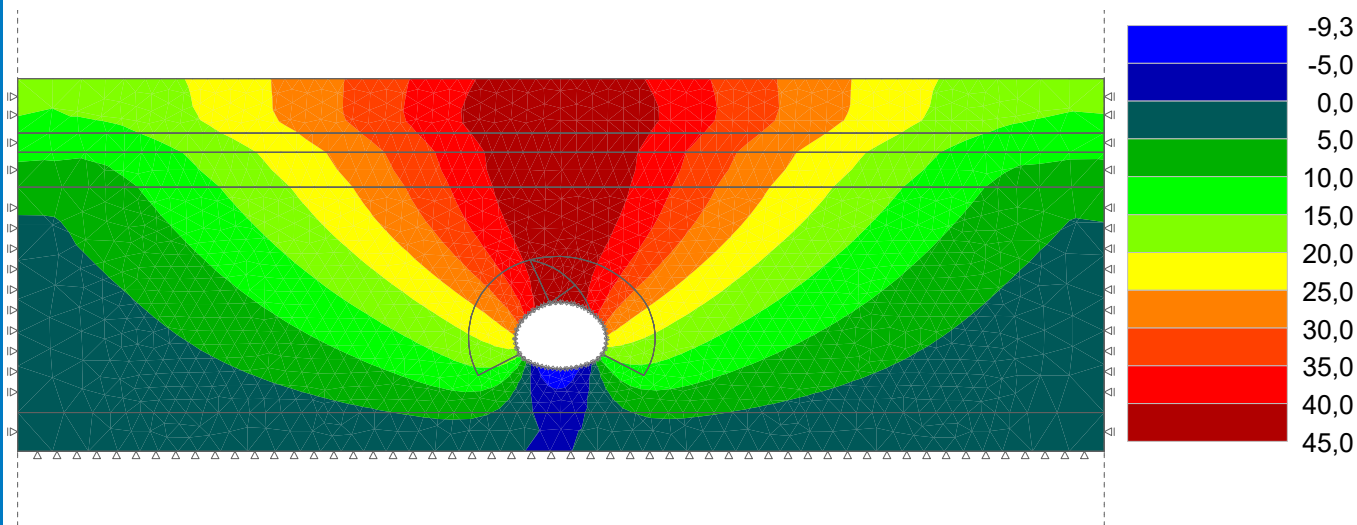
Pouze pro nekomerční využití



Název : Výpočet

Fáze : 13

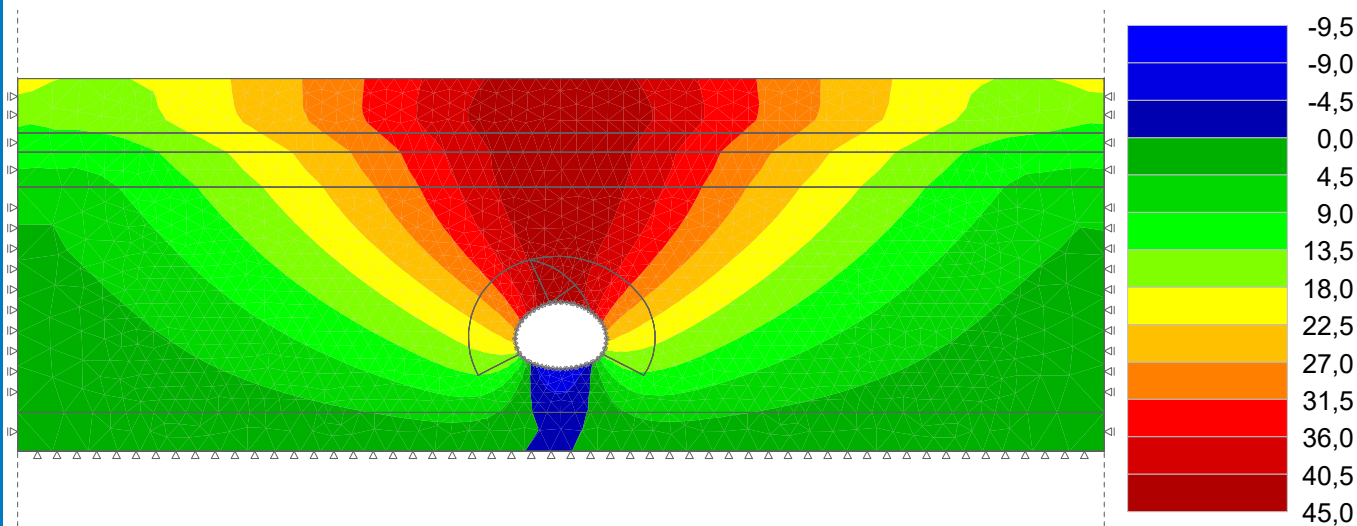
Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-9,3; 45,0> mm



Název : Výpočet

Fáze : 14

Výsledky : celkové; veličina : Posunutí  $d_z$ ; rozsah : <-9,5; 45,0> mm



Pouze pro nekomerční využití

