



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

TUNEL NA TRASE RYCHLÉ ŽELEZNICE

THE TUNNEL ON THE FAST RAILWAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN ZÁVACKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV HORÁK, CSc.

BRNO 2016



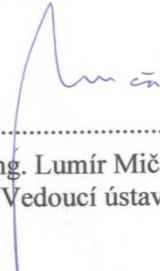
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav geotechniky

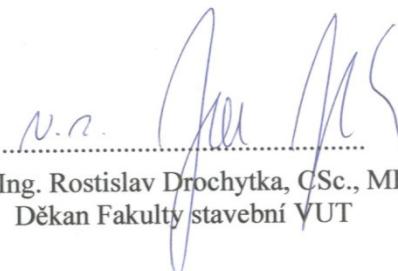
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Martin Závacký
Název Tunel na trase rychlé železnice
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.
Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce 15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015


.....
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Budou předány vedoucím diplomové práce zvlášť.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Na trase rychlé železnice, na obchvatu Přerova, má být vybudován tunel. Diplomová práce se zabývá koncepční studií tohoto podzemního objektu a pro zvolenou variantu řešení provede úvodní návrh.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



.....
doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Témou práce je vytvorenie koncepčnej štúdie tunela na plánovanej vysokorýchlostnej trati s výberom vhodného priečneho usporiadania a metódy razenia s ohľadom na miestne geologické pomery, taktiež návrh primárneho zabezpečenia a technologický postup výstavby.

Klíčová slova

tunel, inžinierska geológia, nová rakúska tunelovacia metóda, metóda konečných prvkov, primárne ostenie

Abstract

The theme of this work is to create a conceptual study of the tunnel on high speed railway. Selection of suitable cross section and tunnelling method with considering of geological conditions of the site. Design of primary support and technological process of construction.

Keywords

tunnel, engineering geology, new austrian tunnelling method, finite elements method, primary lining

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Martin Závacký *Tunel na trase rychlé železnice*. Brno, 2016. 79 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.1.2016

.....
podpis autora
Bc. Martin Závacký

POĎAKOVANIE

Predovšetkým sa musím poďakovať doc. Ing. Vladislavovi Horákovi, CSc. za množstvo času stráveného pri konzultáciách a za jeho odborné rady. Taktiež sa chcem poďakovať všetkým ľuďom, ktorí ma podporili v mojom úsilí pri tvorení tejto práce.

OBSAH

1.	ÚVOD	10
2.	UMIESTNENIE STAVBY	11
3.	INŽINIERSKO-GEOLOGICKÉ, HYDROGEOLOGICKÉ A GEOTECHNICKÉ POMERY	12
3.1	Preskúmanosť.....	12
3.2	Geomorfológia	12
3.3	Geologický popis územia.....	13
3.4	Inžiniersko-geologické zhodnotenie územia	17
3.4.1	<i>Vápence</i>	18
3.4.2	<i>Bridlice</i>	18
3.4.3	<i>Neogénne sedimenty</i>	19
3.4.4	<i>Kvartérne pokryvy</i>	19
3.4.5	<i>Tektonické poruchy a seizmicita</i>	20
3.5	Hydrogeologické pomery	20
3.6	Geotechnické pomery	21
4.	NAVRHOVANÉ RIEŠENIE	22
4.1	Priečne usporiadanie	22
4.2	Technológia razenia.....	23
4.2.1	<i>TBM</i>	23
4.2.2	<i>NRTM</i>	23
4.2.3	<i>Zhodnotenie a výber vhodnej technológie</i>	24
5.	STATICKÝ VÝPOČET	25
5.1	Výber posudzovaných rezov	25
5.2	Metodika výpočtu	25
5.2.1	<i>Predpoklady a zjednodušenia</i>	26
5.2.2	<i>Použité stavebné materiály</i>	27
5.2.3	<i>Postup modelovania</i>	27
5.2.4	<i>Postup výpočtu – fázy budovania</i>	31

5.3	Výstupy z výpočtov	32
5.3.1	<i>MKP modelovanie</i>	32
5.3.2	<i>Posúdenie primárneho ostenia</i>	57
6.	TECHNOLOGICKÝ POSTUP	70
6.1	Razenie - vápence	70
6.2	Razenie - bridlice	71
6.3	Sekundárne ostenie	72
6.4	Geomonitoring	73
7.	TECHNICKÁ SPRÁVA	75
8.	ZÁVER	78
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	79
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	81
	ZOZNAM OBRÁZKOV	83
	ZOZNAM TABULIEK	85
	ZOZNAM VÝKRESOV	86

1. ÚVOD

V České republice sa nachádza 154 železničných tunelov, ktoré sú neodmysliteľnou súčasťou železničnej siete prakticky od jej počiatkov. Prvým z nich bol Třebovický tunel vo východných Čechách, uvedený do prevádzky v roku 1845. V 19. storočí bolo celkovo postavených až 103 tunelov [1]. Naproti tomu 20. storočie postupne prinieslo útlm železničného staviteľstva. V posledných rokoch však opäť badať aktivitu v tomto sektore. Súvisí to s modernizáciou hlavných dopravných koridorov a zámerom budovať úplne nové vysokorýchlostné trate. Ich komfortnejšie trasovanie si vyžaduje výstavbu väčšieho množstva náročných inžinierskych konštrukcií, ako sú mosty a tunely.

Táto diplomová práca si kladie za cieľ vytvoriť na základe dostupných informácií koncepčnú štúdiu tunela na jednej z nových navrhovaných vysokorýchlostných tratí. Nejedná sa o detailný projekt, pretože ide o veľmi komplexnú problematiku, ktorú vždy rieši tím odborníkov s potrebnými skúsenosťami. Predstavuje však cennú možnosť nahliadnuť hlbšie do témy tunelového staviteľstva ako pomerne špecifického odvetvia.

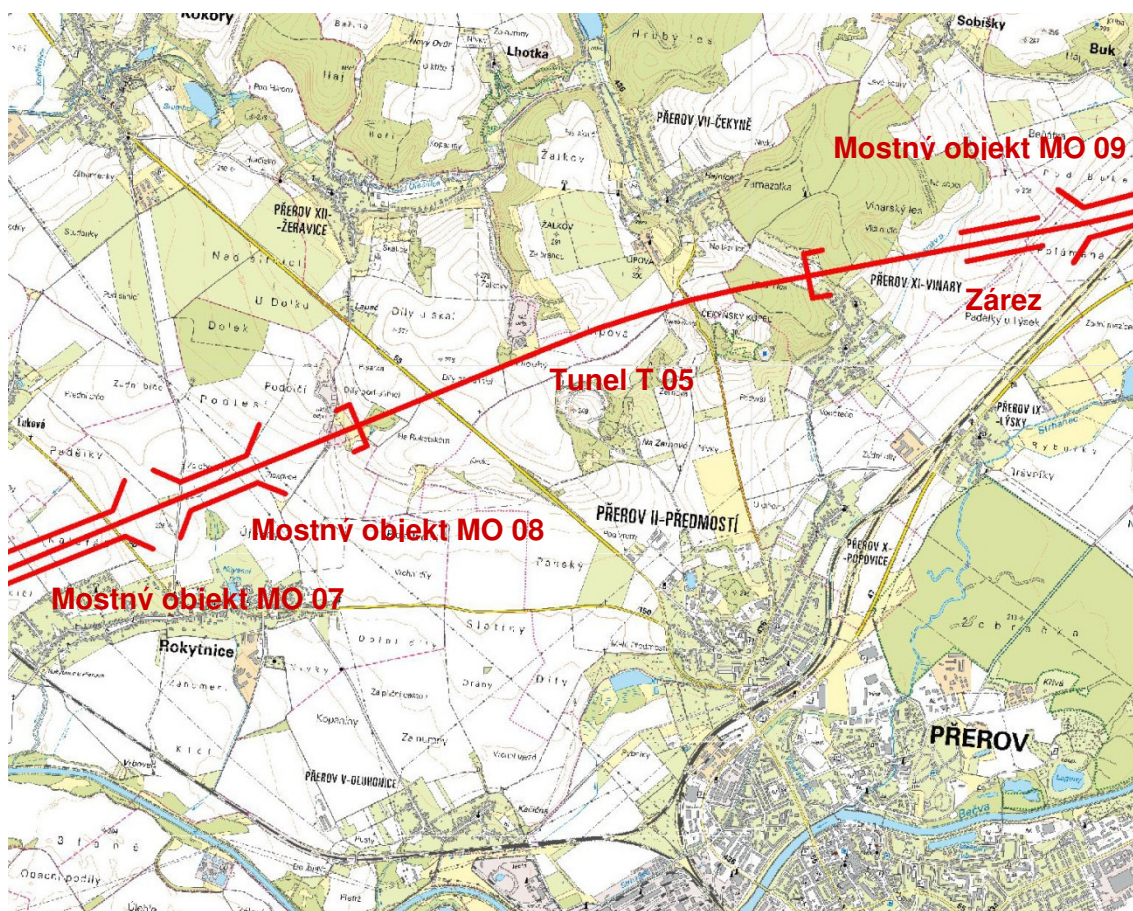
Riešenie sa sústreďuje prevažne na geotechnickú časť problému. Jednak vyhodnotenie daných geologických podmienok, ďalej technické možnosti uskutočnenia samotnej stavby, čiže výber vhodnej tunelovacej metódy a napokon predikcia odozvy horninového masívu a návrh zabezpečenia výrubu.

Diplomant tak má príležitosť rozšíriť si znalosti nad rámec bežne preberaného učiva. To kladie vyššie nároky na spracovanie úlohy, no zároveň je výzvou posunúť hranice svojich schopností a osvojiť si nové vedomosti a zručnosti.

2. UMIESTNENIE STAVBY

Plánovaný tunel sa nachádza na navrhovanej vysokorychlostnej trati RS 1 (Rychlé Spojení) spájajúcej mestá Praha – Brno – Ostrava. Približne uprostred úseku medzi Brnom a Ostravou prechádza severozápadne okolo mesta Přerov. Trasovanie železnice je zvolené s ohľadom na súčasnú a plánovanú dopravnú infraštruktúru (diaľnice, železničná sieť) a samozrejme s čo možno najmenším dopadom na obývané územia.

V tejto lokalite sa nachádza pahorkatina s nadmorskou výškou cca 300 metrov (Čekyňský kopec, 306 m n. m.). To predstavuje prevýšenie terénu oproti okoliu o 50 až 100 metrov. Logické je teda vedenie trasy tunelom. Pod zem vchádza poblíž obce Rokytnice, odkiaľ pokračuje približne 3 km severovýchodným smerom a ústi opäť na povrch v Přerove – v miestnej časti Vinary.



Obr. 2-1: Umiestnenie tunela na obchvate Přerova. [2]

3. INŽINIERSKO-GEOLOGICKÉ, HYDROGEOLOGICKÉ A GEOTECHNICKÉ POMERY

3.1 Preskúmanosť

Doterajšia preskúmanosť – v Geofonde spravovanom archívom ČGS sa nachádzajú správy z prieskumov priamo v záujmovej lokalite. Pochádzajú z viacerých projektov, s rôznym účelom a boli vyhotovené viacerými subjektmi. Pre účely projektovania tunelu je obzvlášť hodnotný nerudný ložiskový prieskum zameraný na vápencový komplex, ktorý sa tu nachádza. Zahŕňa viacero hlbokých vrtov (až 80 metrov), čo zasahuje hlboko pod niveletu plánovanej trate, no nie všetky sa nachádzajú v trase tunela. Niektoré vrty obsahujú aj hydrogeologické údaje.

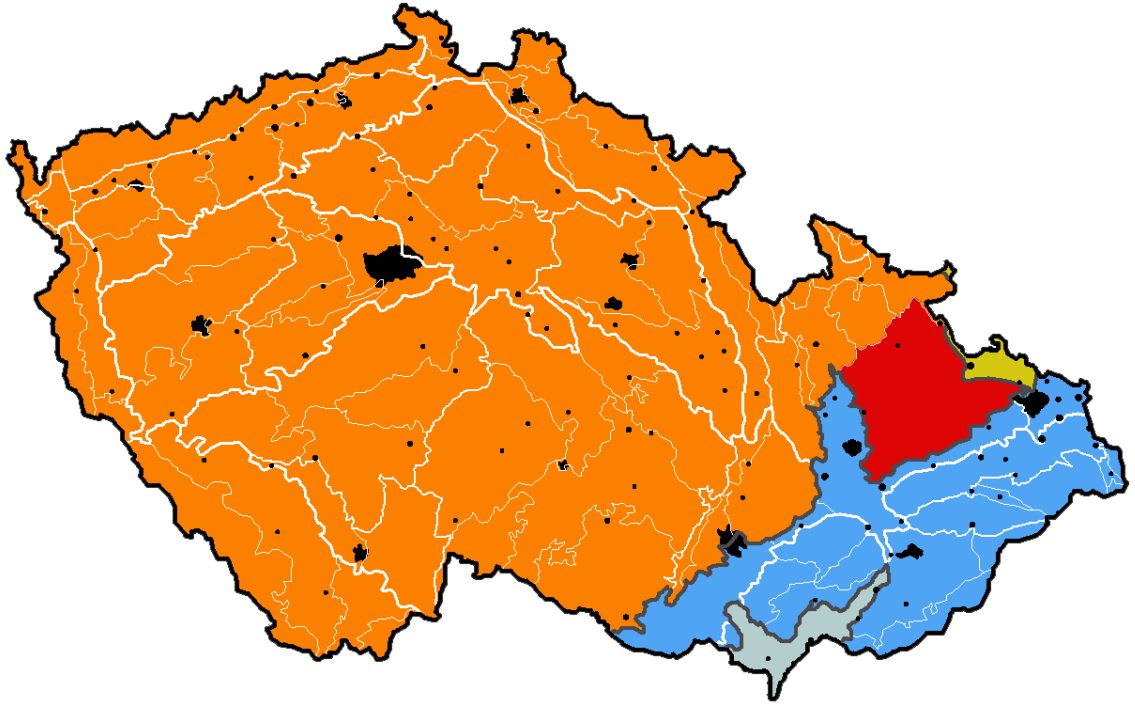
Bolo teda vytypovaných niekoľko najvhodnejších prieskumných diel, ktoré majú pre tento projekt najväčšiu výpovednú hodnotu. Získané popisy vrtných jadier a údaje o podzemnej vode poskytnuté z Geofondu [3] spolu s geologickými mapami sú podkladom pre vytvorenie rámcového obrazu o geotechnických podmienkach, ktoré je možné v lokalite očakávať. Podrobné informácie získané z Geofondu obsahuje výkres 5.

Nové prieskumné práce – zatiaľ neboli v danej lokalite realizované žiadne prieskumné práce priamo súvisiace s projektom vysokorýchlostnej železnice. Práca teda čerpá výhradne z archívnych dát.

3.2 Geomorfológia

Presné geomorfologické zaradenie lokality je nasledovné [4]:

Systém	–	<i>Hercynský systém</i>
Subsystém	–	<i>Hercynské pohoria</i>
Provincia	–	<i>Česká vysočina</i>
Subprovincia	–	<i>Krkonošsko-jesenická</i>
Oblasť	–	<i>Jesenická</i>
Celok	–	<i>Nízky Jeseník</i>
Podcelok	–	<i>Tršická pahorkatina</i>
Okrsok	–	<i>Čekyňská pahorkatina</i>

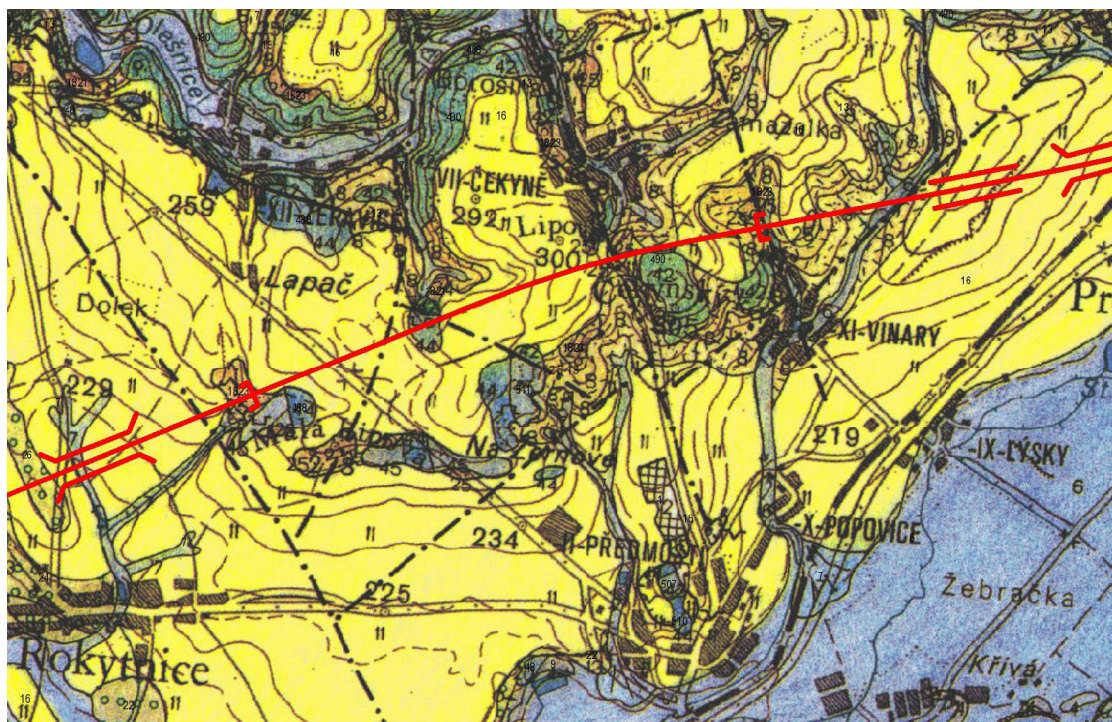


Obr. 3-1: Geomorfologické členenie Českej republiky. Zvýraznený celok Nízky Jeseník. [5]

Dôležité je však poznamenať, že záujmová lokalita sa nachádza blízko rozhrania s celkami *Hornomoravský úval* a *Moravská brána*, ktoré už patria do provincie *Západných Karpát*.

3.3 Geologický popis územia

V rámci daného geomorfologického celku patria horniny predkvartérneho skalného podložia k paleozoickým sedimentom a tvoria dva výrazne odlišné komplexy. Sú to devónske vápence, miestami ležiace pod karbónskymi drobami a druhú časť tvoria súvrstvia karbónskych bridlíc, drôb a prachovcov. Tieto skalné horniny sú väčšinou prekryté neogénnymi morskými sedimentami, prevažne nespevnenými pieskami a štrkami a tiež ílmi. Takmer celá oblasť je pokrytá kvartérnymi útvarmi rôznej mocnosti v podobe sprašových hĺn a deluviálnych uloženín na strmších svahoch.



Obr. 3-2: Výrez z geologickej mapy s vyznačením trasy železnice. [6]

Devónske vápence – komplex v juhozápadnej časti masívu, ohraničený tektonickými zlomami.

Hornina	
Typ horniny:	sediment zpevněný
Hornina:	vápenec, dolomit
Popis:	vápence a dolomity
Textura:	masivní, lavicovitá
Zrnitost:	celistvá
Barva:	tmavě šedá
Geneze:	mělkovodní karbonáty
Chronostratigrafie	
Eratém:	paleozoikum
Útvar:	devon
Oddělení:	devon střední, devon svrchní
Stupeň:	eifel, givet, frasn
Litostratigrafie	
Souvrství:	macošské
Vrstvy:	lažánecké vápence
Regionální zařazení	
Soustava:	Český masiv - krystalinikum a prevariské paleozoikum
Oblast:	moravskoslezská oblast
Region:	moravskoslezské paleozoikum

Tab. 3-1: Devónske vápence [6]

Karbónske droby – tvoria nesúvislé nadložie devónskych vápencov.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment zpevněný
<i>Hornina:</i>	droba
<i>Popis:</i>	<i>droby</i>
<i>Textura:</i>	masivní, lavicovitá, deskovitá
<i>Zrnitost:</i>	jemnozrnná až hrubozrnná
<i>Barva:</i>	šedá, modrošedá
<i>Geneze:</i>	turbidity
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	paleozoikum
<i>Útvar:</i>	karbon
<i>Oddělení:</i>	karbon spodní
<i>Stupeň:</i>	visé
Litostratigrafie	
<i>Souvrství:</i>	moravické
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Český masiv - krystalinikum a prevariské paleozoikum
<i>Oblast:</i>	moravskoslezská oblast
<i>Region:</i>	moravskoslezské paleozoikum
<i>Jednotka:</i>	jesenický kulm

Tab. 3-2: Karbónske droby [6]

Karbónske bridlice, droby, prachovce – nachádzajú sa v severovýchodnej časti masívu.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment zpevněný
<i>Hornina:</i>	břidlice, droba, prachovec
<i>Popis:</i>	<i>jílovité břidlice, prachovce, droby</i>
<i>Textura:</i>	deskovitá, konvolutní
<i>Zrnitost:</i>	drobnozrnná až středně zrnitá
<i>Barva:</i>	šedočerná, zelenošedá
<i>Geneze:</i>	turbidity
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	paleozoikum
<i>Útvar:</i>	karbon
<i>Oddělení:</i>	karbon spodní
<i>Stupeň:</i>	visé
Litostratigrafie	
<i>Souvrství:</i>	moravické
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Český masiv - krystalinikum a prevariské paleozoikum
<i>Oblast:</i>	moravskoslezská oblast
<i>Region:</i>	moravskoslezské paleozoikum
<i>Jednotka:</i>	jesenický kulm

Tab. 3-3: Karbónske bridlice, droby a prachovce [6]

Neogénne piesky a štrky – tvoria nesúvislý pokryv paleozoického skalného podložia premenlivej mocnosti nepresahujúcej 10 m.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment nezpevněný, sediment zpevněný
<i>Hornina:</i>	písek, štěrk
<i>Popis:</i>	<i>klastika - písky, štěrky se zpevněnými polohami pískovce, slepence</i>
<i>Geneze:</i>	marinní
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	kenozoikum
<i>Útvar:</i>	neogén
<i>Oddělení:</i>	miocén
<i>Suboddělení:</i>	miocén střední
<i>Stupeň:</i>	baden
<i>Podstupeň:</i>	baden spodní (morav)
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Karpaty
<i>Oblast:</i>	karpatská předhlubeň

Tab. 3-4: Neogénne piesky a štrky [6]

Neogénne íly – vyskytujú sa lokálne ako výplň hlbších depresií skalného podložia.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment nezpevněný
<i>Hornina:</i>	jíl
<i>Popis:</i>	<i>vápnitý jíl (tégel), místy s polohami písků</i>
<i>Geneze:</i>	marinní
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	kenozoikum
<i>Útvar:</i>	neogén
<i>Oddělení:</i>	miocén
<i>Suboddělení:</i>	miocén střední
<i>Stupeň:</i>	baden
<i>Podstupeň:</i>	baden spodní (morav)
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Karpaty
<i>Oblast:</i>	karpatská předhlubeň

Tab. 3-5: Neogénne íly [6]

Kvartérne sprašové hlíny – tvoria pomerne súvislý pokryv v celej oblasti. Ich hrúbka je značne premenlivá, predpokladá sa nanajvýš 5 až 7 metrov.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment nezpevněný
<i>Hornina:</i>	spraš, sprašová hlína
<i>Popis:</i>	<i>spraš a sprašová hlína</i>
<i>Minerální složení:</i>	křemen + příměsi + CaCO ₃

<i>Textura:</i>	celistvá
<i>Barva:</i>	okrová
<i>Geneze:</i>	eolická
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	kenozoikum
<i>Útvar:</i>	kvartér
<i>Oddelení:</i>	pleistocén
<i>Suboddelení:</i>	pleistocén svrchní
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity
<i>Oblast:</i>	kvartér

Tab. 3-6: Kvartérne sprašové hlíny [6]

Kvartérne deluviálne uložieniny – vyskytujú sa hlavne na strmších svahoch. Môžu obsahovať balvany s priemerom až 1,5 m.

Hornina	
<i>Typ horniny:</i>	sediment nezpevněný
<i>Hornina:</i>	hlína, kameny
<i>Popis:</i>	<i>kamenitý až hlinito-kamenitý sediment</i>
<i>Minerální složení:</i>	pestré
<i>Zrnitost:</i>	kamenitá až hlinito-kamenitá
<i>Barva:</i>	různá
<i>Geneze:</i>	deluviální
Chronostratigrafie	
<i>Eratém:</i>	kenozoikum
<i>Útvar:</i>	kvartér
Regionální zařazení	
<i>Soustava:</i>	Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity
<i>Oblast:</i>	kvartér

Tab. 3-7: Kvartérne deluviálne uložieniny [6]

Podrobnejšiu geologickú mapu aj so zakreslenou trasou železnice obsahuje výkres 2 a geologický rez pozdĺž trasy sa nachádza vo výkrese 3.

3.4 Inžiniersko-geologické zhodnotenie územia

Celý tunel sa nachádza v prostredí paleozoických skalných hornín, čo je sľubným predpokladom úspešnej razby na rozdiel od nespevněných hornín, ktoré pokrývajú masív. Netreba však zabúdať na riziká, ktoré môže horninový masív skrývať. Z geotechnického hľadiska je možné rozčleniť prostredie pozdĺž tunela na dva základné kvázihomogénne celky. Sú to devónske vápence, ktoré tvoria úvodných

približne 40% dĺžky v smere staničenia a zvyšných 60% tvoria súvrstvia karbónskych bridlíc, drôb a prachovcov.

3.4.1 Vápence

Prostredie týchto hornín sa vyznačuje masívnou až lavicovitou štruktúrou hornín, miestami s vložkami tenších vrstiev. Z vrtného jadra archívnej sondy 468872 (V-16) (výkres 5) je zrejmé, že vrchná vrstva podlieha vplyvom zvetrávania, čo je logické. V tomto prípade sa jedná o silné navetrание a zóna navetrания má dosah 5 m. Zatriedenie vápencov sa predpokladá do triedy hornín R4 až R3.

Nepriaznivá je prítomnosť oblastí rôzneho stupňa zhustenia diskontinuit, ktoré sa objavujú nepravidelne, prakticky po celej hĺbke vrtu. V hĺbke 56,1-56,9 m sa dokonca nachádza úplne rozdrvená skala a od 57,5 m bolo navŕtaných 40 cm vápniteho ílu. Dá sa predpokladať, že sa jedná o tektonickú poruchu.

Vápence často podliehajú krasovateniu a tento jav sa pomerne výrazne objavuje aj v skúmanej lokalite. Svedčí o tom prítomnosť až 14 prírodných dutín veľkosti od 0,4 do 1,2 m zdokumentovaných vo vrtnom jadre. Sú rozdelené do dvoch skupín. Plytšia pozostáva z 8 dutín v hĺbke 15 až 28 m a hlbšia v 38 až 47 m so 4 dutinami. Miestami sa objavuje aj výplň hlinou alebo pieskom. Krasové javy teda predstavujú zrejme najväčšie riziko v spojitosti s budovaním podzemného diela vo vápencovej časti horninového masívu.

3.4.2 Bridlice

V druhom kvázihomogénnom celku horninového masívu dominujú spodnokarbónske bridlice, ale v nemalej miere sa tu vyskytujú aj droby a prachovce. Podľa vrtného jadra 470174 (HP-7) (výkres 5) sú tu prítomné aj vrstvy pieskovca a brekcie. Jedná sa teda o veľmi odlišné horninové prostredie s vrstevnatou až bridličnatou štruktúrou, v ktorých je razenie tunela náročnejšie. Na druhej strane ako výhodu možno očakávať jednoduchšie rozpojovanie horniny.

Veľmi dôležitým aspektom pre takéto prostredie je orientácia a sklon bridličnatosti, najmä vzhľadom na vedenie osi a smer razenia tunela. Je to jeden z určujúcich faktorov stability výrubu a taktiež má vplyv na prípadné prítoky podzemnej vody. Z dostupných dát však nie je možné tieto parametre stanoviť. Preto pre vytvorenie

spoľahlivého a relevantného návrhu je nutné doplniť geologický prieskum hlavne o tieto údaje.

V tomto celku sa predpokladá zatriedenie bridlíc do skupiny R4 až R5. Vzhľadom na masívnejšie polohy drôb sú tieto hodnotené ako samostatný horninový typ a to triedy R3.

3.4.3 Neogénne sedimenty

Pokrývajú skalné podložie, ale nezasahujú do veľkých hĺbok, čiže nemajú zásadný vplyv na riešenie tunela ako celku. Výnimku však tvorí depresia juhozápadne od Čekyňského kopca približne v staničení trasy 76,3 km. Je vyplnená *ílom* tuhej až mäkkej konzistencie, podľa vrtu 470168 (HV-2) (výkres 5) až do hĺbky 25 m. To predstavuje značné zníženie skalného nadložia tunelu.

Prevažne sa vyskytujúce *piesky* a *štrky* so spevnenými vložkami pieskocov a zlepcov, ako bolo spomenuté, nezasahujú do veľkých hĺbok. Predpokladá sa maximálne okolo 10 m. Význam naberajú v portálových oblastiach, kde je nutné zahrnúť ich do stabilitnej analýzy. Ich vlastnosti však nie sú zatiaľ podrobnejšie známe, preto je potrebné doplniť ich ďalším prieskumom.

3.4.4 Kvartérne pokryvy

Pokrývajú takmer celú oblasť, avšak v relatívne malých hrúbkach, preto tiež nemajú okrem portálových oblastí markantný vplyv na riešenie tunela. Dajú sa rozdeliť do dvoch základných skupín: *spraše* – prevažne eolické zeminy a *deluviálne uložieniny*.

Spraše a sprašové zeminy sa vyskytujú väčšinou v rovinatejších miestach. Sú eolického pôvodu a mocnosť týchto pokryvov sa odhaduje na maximálne 5 až 7 m. Naproti tomu deluviálne uložieniny dominujú na strmších svahoch prevažne juhovýchodnej orientácie v okolí Čekyňského kopca. Obsahujú rôzny materiál od sprašových hlín cez štrk až po 1,5 m veľké balvany. Na svahoch majú menšiu hrúbku, ale bližšie k úpätiu, čiže už v oblasti prolúvia sa hromadia vo väčších mocnostiach a vyskytujú sa až do hĺbky 10 m.

3.4.5 Tektonické poruchy a seizmicita

Tunel vo svojej trase prekonáva tri tektonické poruchy. Prvá sa nachádza v oblasti vápencov v staničení cca 74,8 km, druhá v staničení 75,3 km tvorí rozhranie medzi vápencami a bridlicami a tretia v staničení 76,4 km sa nachádza v bridlicovom masíve. Tieto tektonické zlomy sú určené na základe geologických máp a ich presný sklon ani charakter ich plochy nie sú bližšie známe. Je teda na ďalšom geologickom prieskume, aby podrobne doplnil tieto údaje, keďže sa jedná o rizikové miesta pri razení tunelu.

Tretí zo spomínaných zlomov sa nachádza vo výraznejšom údolí, ktoré je do veľkej hĺbky vyplnené neogénnym ílom, pod ktorým sa nachádza droba. V tejto oblasti sú umiestnené dva prieskumné vrty zasahujúce do väčšej hĺbky a poukazujú na veľmi heterogénne podložie. Preto geologický rez (výkres 4) zostavený priečne na os železnice v staničení 76,35 km je možné brať len veľmi orientačne. Nepoznáme presnú hĺbku skalného podložia ani stupeň zvetrania, prípadne tektonického porušenia hornín. Taktiež sa v týchto miestach treba podrobne zamerať na údaje o podzemnej vode, ktorá má významný vplyv na stabilitu horninového masívu.

Podľa mapy seizmických oblastí spadá územie do kategórie IV^o-V^o stupnice makroseizmických účinkov MCS [7]. Riziko spojené so zemetrasením je teda minimálne.

3.5 Hydrogeologické pomery

V okolí plánovaného tunela sa nenachádzajú prakticky žiadne významnejšie pramene a údaje z prieskumných vrtovej tiež napovedajú, že sa jedná o pomerne suchý horninový masív. Ustálená hladina vo vrte 468872 (V-16) vo vápencoch je v hĺbke 61,4 m (226,0 m n. m.), čo je približne 15 m pod plánovanou niveletou trate.

Vo vrte 470174 (HP-7) sa nachádza ustálená hladina v hĺbke 14,2 m (261,9 m n. m.). V prieskumnom vrte 470168 (HV-2) bola narazená hladina podzemnej vody v hĺbke 13,5 m (254,8 m n. m.), pričom ustálená hladina vystúpila na úroveň 5,9 m (262,4 m n. m.). V poslednom spomínanom vrte bola uskutočnená aj čerpacia skúška s dobou trvania 2 dni. Výdatnosť dosiahla 0,0042 l/s a hladina sa znížila o 9,25 m.

Ustálená hladina vo vrtoch HV-2 a HP-7 vzdialených 80 m je v približne rovnakej výške, z čoho sa dá usudzovať, že sa jedná o jeden a ten istý horizont podzemnej

vody. V nepriepustných íloch sa zrejme nachádzajú tenké piesčité vložky, cez ktoré sa sem voda dostáva z okolitého prostredia. Zmiený vodný horizont sa nachádza približne 15,5 m nad niveletou trate v týchto miestach. Z toho vyplýva, že razenie tunela v bridlicovej časti masívu bude sprevádzané prítokmi podzemnej vody, pravdepodobne však nie príliš intenzívnymi.

3.6 Geotechnické pomery

Pre jednotlivé typy hornín a zemín boli určené nasledovné charakteristiky (v súlade s ČSN 73 6133/2010) [8], aby bolo možné určiť odozvu horninového masívu na razenie tunela pomocou modelovania metódou konečných prvkov.

Hornina	Trieda (symbol)	Charakteristiky
Spraš	F5 (MI)	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 30 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 21^\circ$ $\nu = 0,40$ $E = 15 \text{ MPa}$
Íl - tuhý	F7 (MH)	$\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 8 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 17^\circ$ $\nu = 0,42$ $E = 5 \text{ MPa}$
Íl - mäkký	F7 (MH)	$\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 4 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 14^\circ$ $\nu = 0,44$ $E = 3 \text{ MPa}$
Bridlice	R4 až R5	$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 200 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 52^\circ$ $\nu = 0,29$ $E = 550 \text{ MPa}$
Vápence	R3 až R4	$\gamma = 24,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 250 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 55^\circ$ $\nu = 0,28$ $E = 800 \text{ MPa}$
Droby	R3	$\gamma = 25,5 \text{ kN/m}^3$ $c_{ef} = 280 \text{ kPa}$ $\varphi_{ef} = 57-60^\circ$ $\nu = 0,26$ $E = 15 \text{ MPa}$

Tab. 3-8: Geotechnické charakteristiky hornín.

4. NAVRHOVANÉ RIEŠENIE

4.1. Priechne usporiadanie

Čo sa týka priečneho usporiadania, sú prakticky možné dva základné koncepty, a to jeden dvojkolačný tunel, alebo dva jednokolačné. Obe majú svoje špecifiká, nezanedbateľné výhody, ale aj nevýhody.

Dvojkolačný tunel má obvykle menšiu plochu výrubu než dva samostatné tunely celkovo. Taktiež spotreba materiálu na ostenie je menšia [9]. Pohyb vo väčšom priestore je menej obmedzujúci a môže byť výhodou počas výstavby. Naproti tomu hrozia väčšie problémy so stabilitou výrubu, čo predstavuje riziko technicko-ekonomické, ako aj z pohľadu bezpečnosti práce. Nasadenie TBM na dvojkolačný tunel vedie k výraznému zväčšeniu profilu (nutný kruhový prierez), preto sa používa iba zriedka. Pri jednokolačnom tuneli sú však TBM a NRTM z tohto pohľadu rovnocenné technológie.

Ak riešime otázku geometrie trate, v dvojkolačnom tuneli dochádza k minimálnemu zväčšeniu osovej vzdialenosti koľají a umiestnenie koľajových spojok je veľmi jednoduché. Z dopravného hľadiska je toto usporiadanie výhodné. Pri vyšších rýchlostiach je však potrebné zohľadniť aerodynamické javy vznikajúce pri protiúdúcich súpravách, čo môže vyžadovať zväčšenie svetlého prierezu tunela.

V neposlednom rade je potrebné zaoberať sa bezpečnosťou prevádzky, ktorá je v súčasnosti čoraz viac diskutovaná. Pre dvojkolačný tunel je potrebné vybudovanie samostatnej záchranej cesty, napríklad súbežnou štôľňou s prepojkami, čím sa náklady na výstavbu zvyšujú. V prípade dvoch jednokolačných tunelov je možné prepojiť rúry po určitých vzdialenostiach a v prípade nehody využiť druhý tunel ako únikovú cestu.

V Európe je pre dlhé železničné tunely (nad 10 km) jednoznačne preferované smerovo rozdelené riešenie [9]. Tento trend sa čoraz viac uplatňuje aj na kratších tuneloch, hlavne s ohľadom na vyššie traťové rýchlosti. Takto je riešený aj v súčasnosti budovaný tunel Ejovice pri Plzni. Predovšetkým z bezpečnostného hľadiska je zvolené riešenie s použitím dvoch jednokolačných tunelov aj na navrhovanom tuneli pri Pěrove.

4.2. Technológia razenia

4.2.1 TBM

Pre efektívne nasadenie mechanizovaného razenia je základnou požiadavkou dostatočná dĺžka tunela. V tomto prípade je to 2 x 3 km. Všeobecne sa uvažuje, že razenie väčších profilov TBM začína byť rentabilné od dĺžky 1 000 až 2 000 m [10]. Toto však nie je jediná podmienka. Stroj je málo prispôsobivý zmenám prostredia a musí byť od začiatku navrhnutý tak, aby sa s nimi dokázal vysporiadať. Existuje viacero základných typov strojov, z ktorých ako najvhodnejšie by zrejme mohlo byť TBM s jedným štítom a budovaním betónového segmentového ostenia priamo za čelbou. Predovšetkým kvôli rýchlemu zaisteniu výrubu v menej stabilných bridličnatých horninách.

Ako už bolo spomenuté, stroj treba navrhnuť na konkrétne podmienky pozdĺž trasy, čo kladie vyššie nároky na prieskum. Aj pri kvalitnom a podrobnom prieskume je však niekedy potrebné robiť prieskumné vrty pred čelbou tunela, čo spomaľuje postup razenia. Pred čelbou je možné aj zlepšovať nekvalitné horninové prostredie (napr. poruchové zóny a krasové dutiny hroziace v tomto prípade) a zjednodušiť tak priechodnosť stroja. Opäť však vzniká zdržanie a výhoda TBM v podobe rýchlejšieho postupu razenia oproti konvenčným metódam sa tak znižuje. Výskyt slabších hornín na trase je naopak predpokladom pre nižšie opotrebovanie dlát a stroja celkovo, takže čas potrebný na údržbu môže byť kratší. Rovnako tak je výhodou hladký tvar výrubu, ktorý redukuje spotrebu materiálu a teda aj zvýšených nákladov na sanáciu nadvýlomov.

Investícia do raziaceho stroja je značná, a preto sa na daný projekt zrejme oplatí nasadiť len jedno TBM. Výstavba sa tak obmedzí iba na jednu aktívnu čelbu, čo v konečnom dôsledku tiež zhoršuje vyhliadky na rýchlejší priebeh stavby.

4.2.2 NRTM

Skúsenosti s použitím NRTM sú v Českej republike pomerne veľké v porovnaní s veľkoprofilovým mechanizovaným razením. Je to veľmi pružná metóda, ktorá dokáže rýchlejšie reagovať na zmenu geologických podmienok. Je možné tak optimalizovať prvky primárneho zabezpečenia, dĺžky záberu a jednoduchšie sa vysporiadať napríklad s prítomnosťou krasových dutín, ktoré sa v danom prostredí vyskytujú. Taktiež poskytuje širšie možnosti a jednoduchšiu realizáciu zlepšovania prostredia pred čelbou

alebo predháňaného paženia v prípade potreby. Nepriaznivé javy, ktoré sa nepodarilo zachytiť počas geologického prieskumu teda nepredstavujú také riziko ako pri použití TBM.

Istou nevýhodou môže byť potreba trhacích prác (hluk, otrasy, bezpečnosť) na rozpájanie pevných hornín. Taktiež sa dá očakávať pomalší postup cyklického razenia v porovnaní s kontinuálnym. Táto nevýhoda sa však dá redukovať razením na viacerých čelbách súčasne. V prospech tohto riešenia hovorí aj podstatne nižšia cena strojného vybavenia oproti TBM. Pri súbežnom razení oboch tunelových rúr a dobrej organizácii práce je navyše možné dosiahnuť oveľa vyšší stupeň využitia strojov. Ako výhodu je možné uviesť aj jednoduchšiu realizáciu prepojení tunelov, ak to porovnáme s nutným zásahom do segmentového ostenia.

4.2.3 Zhodnotenie a výber vhodnej technológie

Pre tento projekt sa ako vhodnejšie zdá použitie NRTM. Neznamená to však, že mechanizované razenie je nemožné a úplne vylúčené. Pri súčasnom stave poznania horninového masívu je však príliš rizikové. Nevieme, aký je rozsah krasových javov na trase tunela, preto sa nedá vylúčiť zapadnutie stroja, čo je závažný problém. Taktiež poznatky o podmienkach v predpokladaných poruchových zónach sú minimálne.

Vyššie spomínaná flexibilita konvenčného razenia je schopná lepšie reagovať na takéto nepredvídané okolnosti. Ďalší návrh bude teda rozpracovaný s použitím NRTM.

5. STATICKÝ VÝPOČET

Cieľom statického výpočtu je zistenie odozvy horninového masívu na razenie podzemného diela a optimalizácia osovej vzdialenosti tunelových rúr. Taktiež je podkladom pre voľbu konkrétneho členenia výrubu a tým pádom aj technologického postupu. Ďalej spresňuje požiadavky na zabezpečenie výrubu vo fáze výstavby, teda konštrukčné prvky a dimenzie primárneho ostenia.

5.1 Výber posudzovaných rezov

Pre posúdenie sú zvolené tri priečne rezy na trase tunela, umiestnené s ohľadom na celkový význam pre stavbu. Ich podrobnejšie zakreslenie a popis sa nachádza vo výkrese 4. Pre potreby výpočtu boli do modelu zadané zjednodušené geotechnické profily. Tieto úpravy zachovávajú presnosť výsledkov a zároveň prispievajú k rýchlejšiemu riešeniu výpočtov.

Priečny rez v staničení 75,20 km (pracovné ozanč. – V) reprezentuje prostredie vápencovej časti horninového masívu a zároveň sa nachádza v mieste najvyššieho nadložia prislúchajúceho tomuto typu hornín. Mal by tak reprezentovať maximálne účinky horninového tlaku na ostenie tunela.

Druhý priečny rez sa nachádza v staničení 76,35 km (pracovné označ. – Z) v mieste tektonickej poruchy s predpokladanou najhoršou geológiou, čiže technicky zrejme najnáročnejší úsek. Jedná sa teda o dôležité miesto z pohľadu uskutočniteľnosti celej stavby.

Posledný analyzovaný priečny rez je v staničení 76,70 km (pracovné označ. – B). Zastupuje najdlhší úsek razený v karbónskych bridliciach. Zároveň sa nachádza v mieste s celkovo najvyšším nadložíom pre daný tunel.

5.2 Metodika výpočtu

Pre určenie deformácií a napätí v horninovom masíve bolo použité 2D modelovanie metódou konečných prvkov v programe *GEO5-MKP v19.9 Fine s.r.o.* Výstupom z tohto výpočtu sú rovnako aj vnútorné sily v primárnom ostení. Tie boli ďalej použité na návrh výstuže a posúdenie samotného ostenia v programe *FIN EC – Beton v5.11 Fine s.r.o.*

5.2.1 Predpoklady a zjednodušenia

V zjednodušenom 2D modelovaní razenia je vhodné zohľadniť priestorový efekt pôsobenia horninového masívu v blízkosti čelby. Prerozdelenie primárnej napätosti je závislé aj na čase a dĺžke záberu, takže výrub nie je plne zaťažený okamžite. Tento aspekt je zohľadnený vo výpočte tzv. β -metódou, ktorá redukuje primárne horninové tlaky. V použítom programe sa zadáva hodnotou „exkavácie“.

Tunelové ostenie je modelované nosníkovými prvkami, pričom prierez je uvažovaný ako prostý betón. Návrh a posúdenie výstuže je prevedené následne po získaní vnútorných síl z MKP modelu v samostatnom programe. U striekaného betónu sa zohľadňuje nárast pevnosti v čase zadaním redukovanej tuhosti vo fáze po aplikácii a zvýšením tuhosti v ďalších fázach výpočtu.

Ďalším zavedeným zjednodušením je už vyššie spomenuté zjednodušenie geotechnického profilu podložia a zanedbanie vplyvu HPV. Predpokladá sa malá výška vodného stĺpca nad výrubom a nízke prítoky podzemnej vody. Primárne ostenie taktiež nie je vybavené hydroizoláciou, takže sa s ním nepočíta ako s vodotesným. Podzemná voda tak môže byť drénovaná tunelovou rúrou.

Zabezpečenie kaloty svorníkmi je do výpočtu zavedené namodelovaním prekotvenej oblasti nad výrubom v dosahu svorníkov (3 m) ako zlepšenej horniny, konkrétne zvýšením súdržnosti podľa nasledovného vzťahu [11]:

$$c_{h+s} = c_h + c_s \quad [kPa] \quad (5.1)$$

Kde: c_h – súdržnosť horniny [kPa]
 c_s – príspevok k súdržnosti svorníkmi [kPa]

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{ef}}{2 \cdot \cos \varphi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} \quad [kPa] \quad (5.2)$$

Kde: N_u – únosnosť svorníka [kN]
 A_k – plocha pripadajúca na jeden svorník [m²]
 φ_{ef} – uhol vnútorného trenia horniny [°]
 γ_{kc} – súčiniteľ spoľahlivosti kotvenia [-]

5.2.2 Použité stavebné materiály

Rez	Trieda betónu	Hrúbka	Tuhosť striekaného betónu	
			Mladý betón	Vyzretý betón
V	C 20/25	200 mm	E = 3 000 MPa G = 1 250 MPa	E = 30 000 MPa G = 12 500 MPa
Z	C 20/25	250 mm	E = 3 000 MPa G = 1 250 MPa	E = 30 000 MPa G = 12 500 MPa
B	C 30/37	250 mm	E = 3 300 MPa G = 1 375 MPa	E = 33 000 MPa G = 13 750 MPa

Tab. 5-1: Betón v primárnom ostení. (Triedy betónu podľa ČSN EN 1992-1-1 [12])

Pozn.: V – vápenec, Z – zlom, B – bridlice; Mladý betón – striekaný betón krátko po aplikácii, Vyzretý betón – po dosiahnutí 28-dňovej pevnosti.

Betonárska výstuž – oceľ triedy B 550.

Rez	N_u [kN]	A_k [m ²]	φ_{ef} [°]	γ_{kc} [-]	c_s [kPa]	c_{h+s} [kPa]
V	120	2,56	55	1,5	50	300
Z		2,25	57		60	340
B		3,06	52		38	238

Tab. 5-2: Zlepšenie svorníkmi. Pozn.: V – vápenec, Z – zlom, B – bridlice.

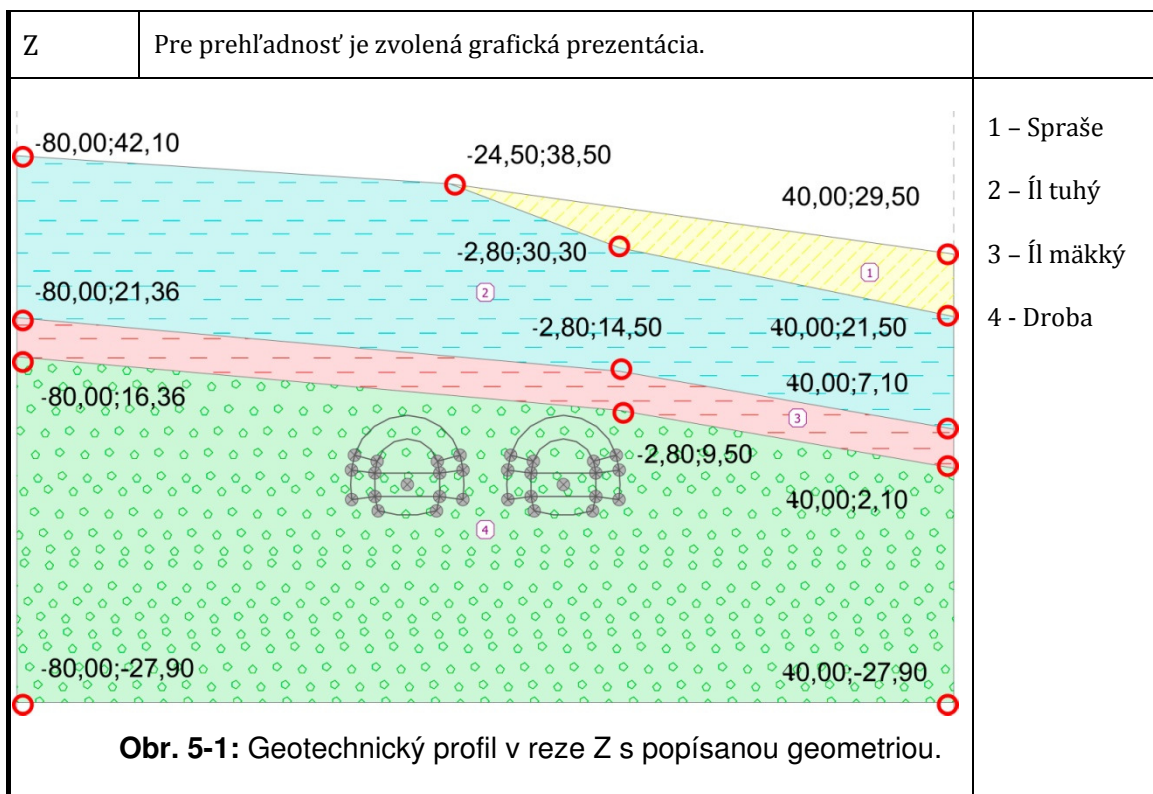
5.2.3 Postup modelovania

a) Nastavenie výpočtu

- Typ úlohy: *Rovinná*
- Typ výpočtu: *Napätosť*
- Spôsob výpočtu primárnej napätosti (1. fáza): *Geostatická napätosť*

b) Geotechnické profily – sú zadané pre jednotlivé rezy nasledovne:

Rez	Šírkový rozsah (súradnica x)	Vrstvy (súradnica z)	Hornina
B	-50,00 m; +70,00 m	+54,00 m; -31,00 m	Bridlica
V	-50,00 m; +70,00 m	+39,50 m; +29,5 m	Droba
		+29,5 m; -30,50 m	Vápenec



Tab. 5-3: Geologické rozhrania v MKP modeli. Pozn.: V – vápence, Z – zlom, B – bridlice.

c) Vlastnosti hornín

Pre všetky typy hornín je uvažovaný materiálový model Mohr-Coulomb. Vlastnosti jednotlivých hornín sú uvedené v tab. 3-8 v podkapitole *Geotechnické pomery*. Výpočet je prevedený s týmito charakteristickými hodnotami, aby výsledné hodnoty deformácií neboli skreslené statickými redukčnými súčiniteľmi.

d) Typy kontaktov

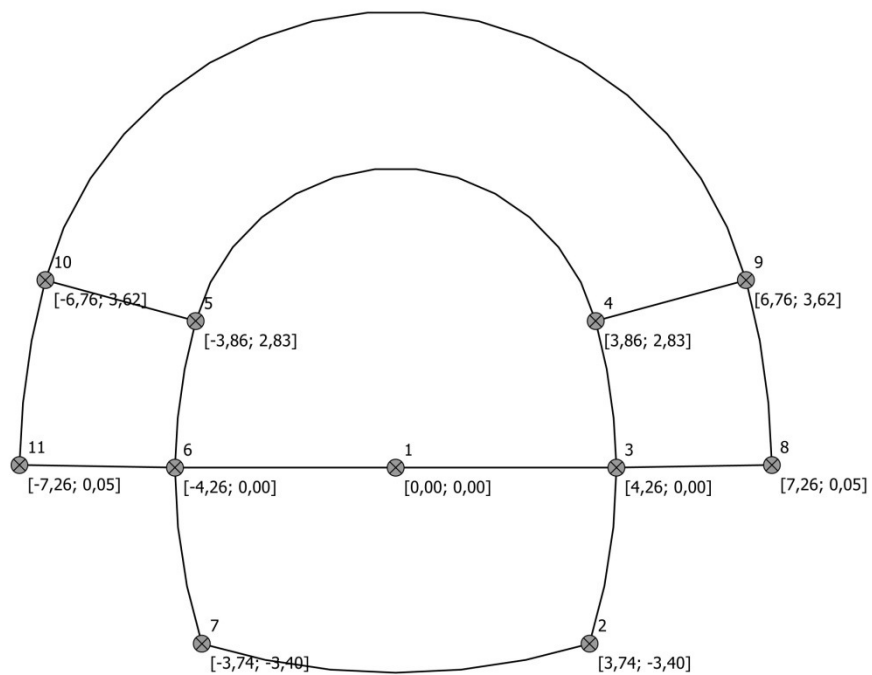
Na rozhraní hornina – tunelové ostenie sú v modeli zadané kontaktné prvky zohľadňujúce spolupôsobenie dvoch vzájomne veľmi odlišných materiálov. Ich hodnoty sú prebraté z návodu poskytnutého k použitému software.

Materiálový model :	Mohr-Coulomb
Smyková tuhosť :	$K_S = 20\,000,00 \text{ kN/m}^3$
Normálová tuhosť :	$K_N = 50\,000,00 \text{ kN/m}^3$
Redukcia c :	$\delta c = 0,80$
Redukcia μ :	$\delta\mu = 0,80$
Úhel dilatance :	$\Psi = 0,00^\circ$
Pevnosť v tahu :	$R_t = 0,000 \text{ kPa}$

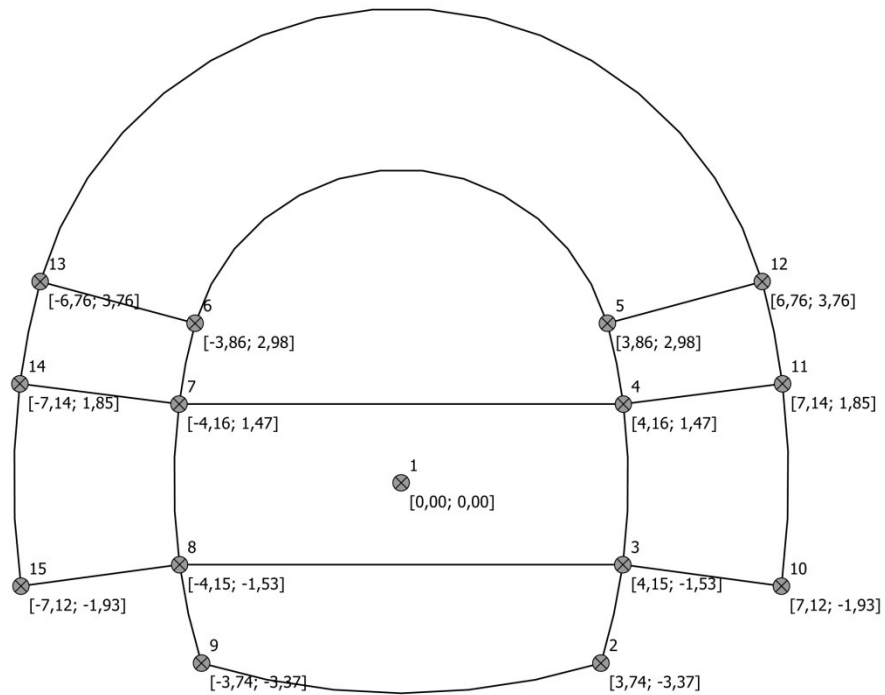
Tab. 5-4: Parametre kontaktných prvkov v MKP modeli [11].

e) Ostenie

Ostenie je modelované spolu s horizontálnym členením výrubu a oblasťou prekotvenou svorníkmi nad kalotou. Línie sú vedené v osi projektovaného primárneho ostenia. Geometria je zhodná pre rezy B a Z, rez V je modelovaný odlišne.



Obr. 5-2: Geometria ostenia tunelu v reze V.



Obr. 5-3: Geometria ostenia tunelu v reze B a Z.

Rez	Ľavá tunelová rúra	Pravá tunelová rúra
V	0,00; 0,00	20,00; 0,00
Z	-30,00; 0,00	-10,00; 0,00
B	0,00; 0,00	20,00; 0,00

Tab. 5-5: Umiestnenie ostenia v MKP modeli podľa bodu 1 [0,00; 0,00].

Pozn.: V – vápence, Z – zlom, B – bridlice

f) Generovanie siete prvkov

Rez	Dĺžka hrany prvkov	Zahustenie siete	
		Dosah	Dĺžka hrany
V	2,00 m	25,00 m	0,50 m
Z	1,50 m	22,00 m	0,50 m
B	2,00 m	25,00 m	0,50 m

Tab. 5-6: Generovanie siete v MKP modeli. *Pozn.: V – vápence, Z – zlom, B – bridlice*

Zahustenie siete podľa uvedených parametrov je okolo stredu každého vloženého ostenia (bod 1 podľa obr. 5-2 a obr. 5-3).

5.2.4 Postup výpočtu – fázy budovania

Výpočet je rozdelený na jednotlivé fázy tak, ako po sebe technologicky nasledujú. Rezy Z a B majú vo výpočte 19 fáz a v reze V sú vynechané fázy 5 až 7 a 14 až 16 z ďalej popísaného postupu, takže posledná fáza má číslo 13. V rezoch V a B je ako pravá razená ľavá tunelová rúra a v reze Z bola ako prvá pravá tunelová rúra. Numerické riešenie prebehlo podľa prednastaveného spôsobu s využitím metódy Newton – Raphson.

a) Fáza 1

- Primárna geostatická napätosť

b) Fáza 2

- Výrub kaloty
- Exkavácia 40%

c) Fáza 3

- Zlepšenie svorníkmi v prekotvenej oblasti
- Inštalácia primárneho ostenia zo striekaného betónu – parametre mladého betónu, na koncoch kĺbové uloženie nosníka, aktivácia kontaktných prvkov ostenie-hornina
- Exkavácia 30%

d) Fáza 4

- Zlepšenie vlastností betónu v ostení – vyzretý betón
- Exkavácia 30%

e) Fáza 5 až 7

Odobratie lávky. Platí pre rez Z a B. Zhodný postup s fázami 2 až 4.

f) Fáza 8

- Odobratie dna

- Exkavácia 40%

g) Fáza 9

- Inštalácia primárneho ostenia zo striekaného betónu – parametre mladého betónu, na koncoch (dno aj opora) kĺbové uloženie nosníka, aktivácia kontaktných prvkov ostenie-hornina
- Exkavácia 30%

h) Fáza 10

- Zlepšenie vlastností betónu v ostení – vyzretý betón
- Exkavácia 30%

i) Fáza 10 až 19

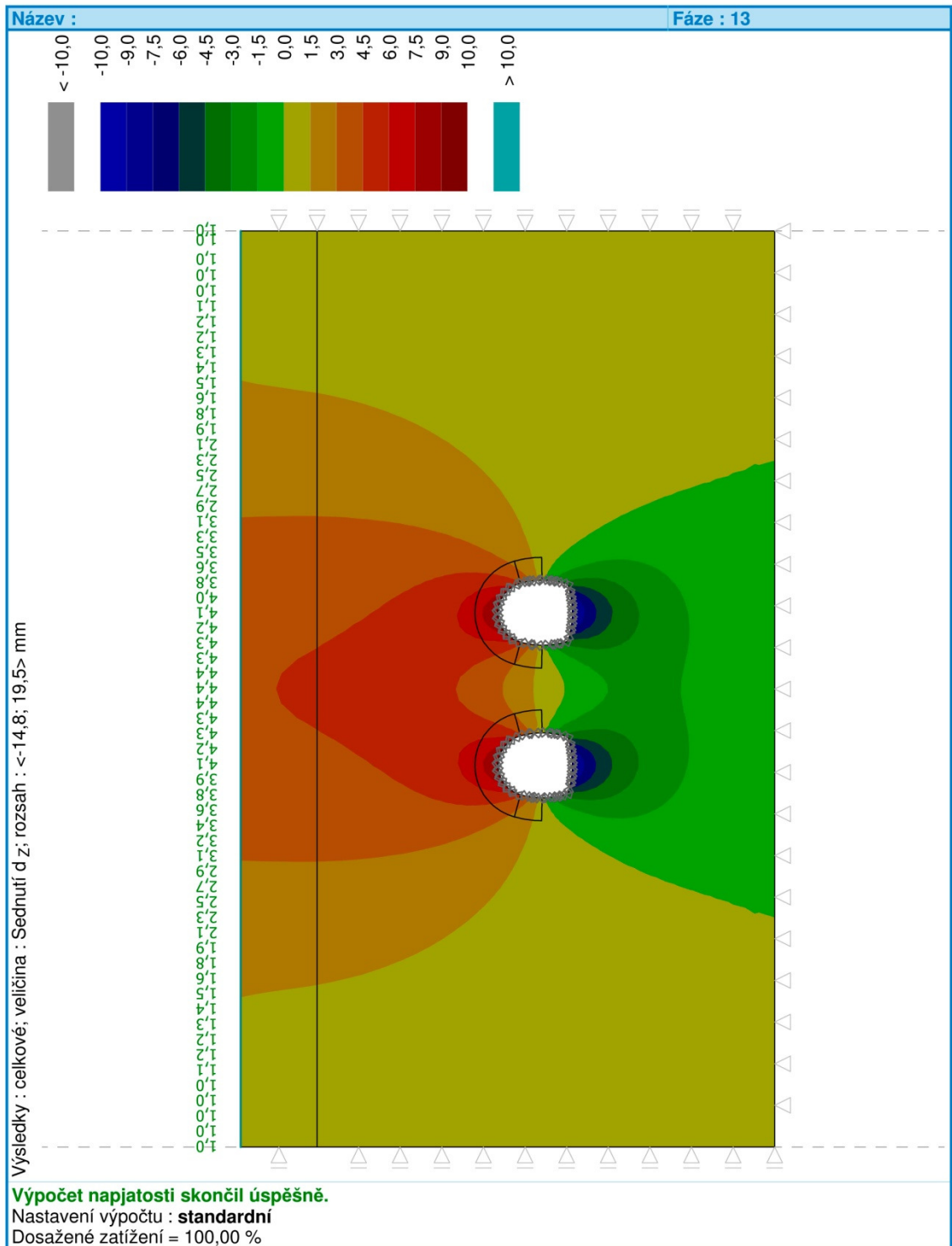
Razenie druhej tunelovej rúry. Postup zhodný s predošlými fázami.

5.3 Výstupy z výpočtov

5.3.1 MKP modelovanie

Prezentované sú nasledovné výstupy, vždy zoskupené k príslušnému rezu (V - vápence, Z - zlom, B - bridlice):

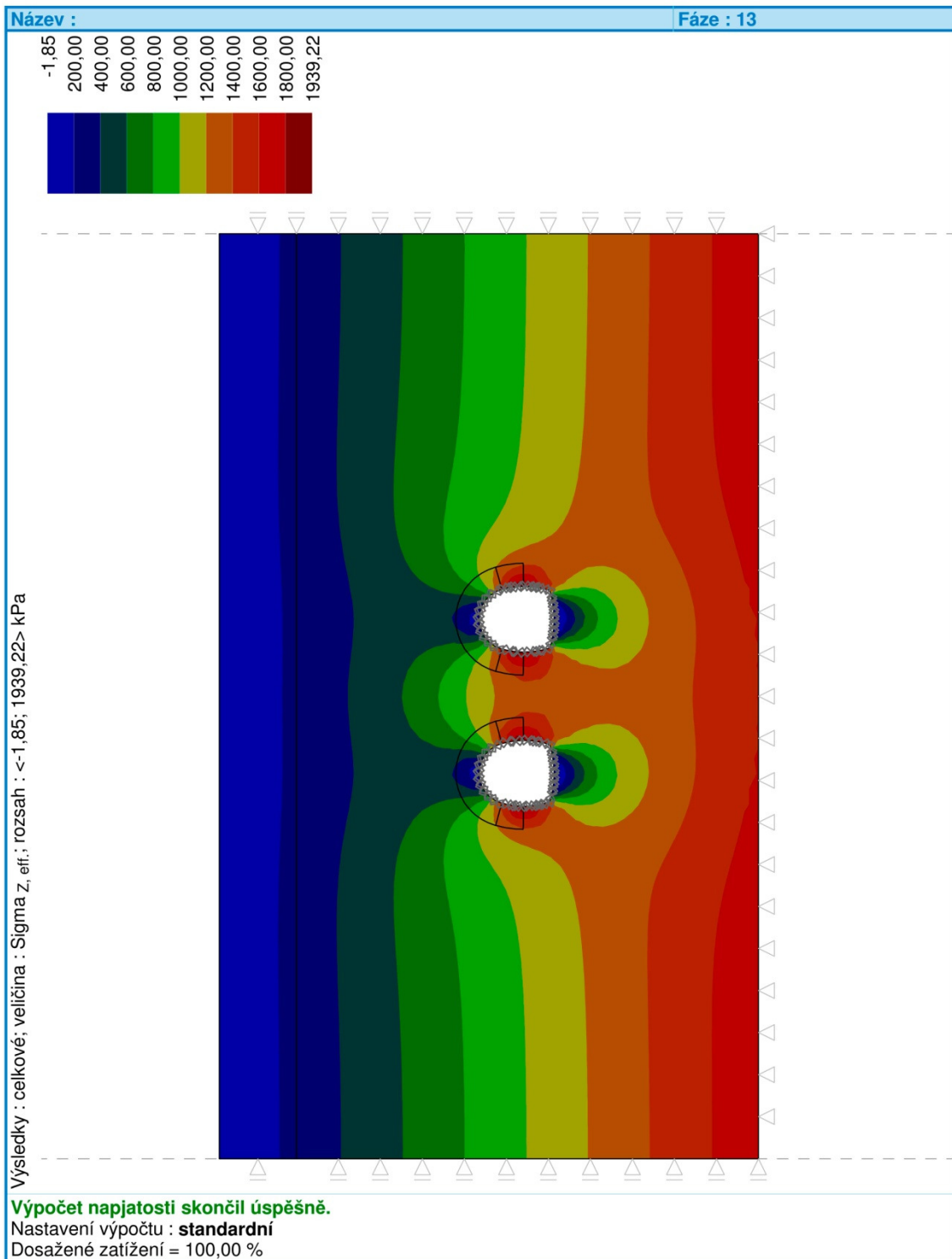
- Zvislé deformácie d_z
- Zvislé geostatické napätie σ_z
- Horizontálne geostatické napätie σ_x
- Ekvivalentné pomerné plastické pretvorenie $\epsilon_{eq,pl}$
- Deformácie a vnútorné sily v ostení
- Grafy so vzájomnými vzťahmi veličín vo významných bodoch v okolí výrubu



Pouze pro nekomerční využití

[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

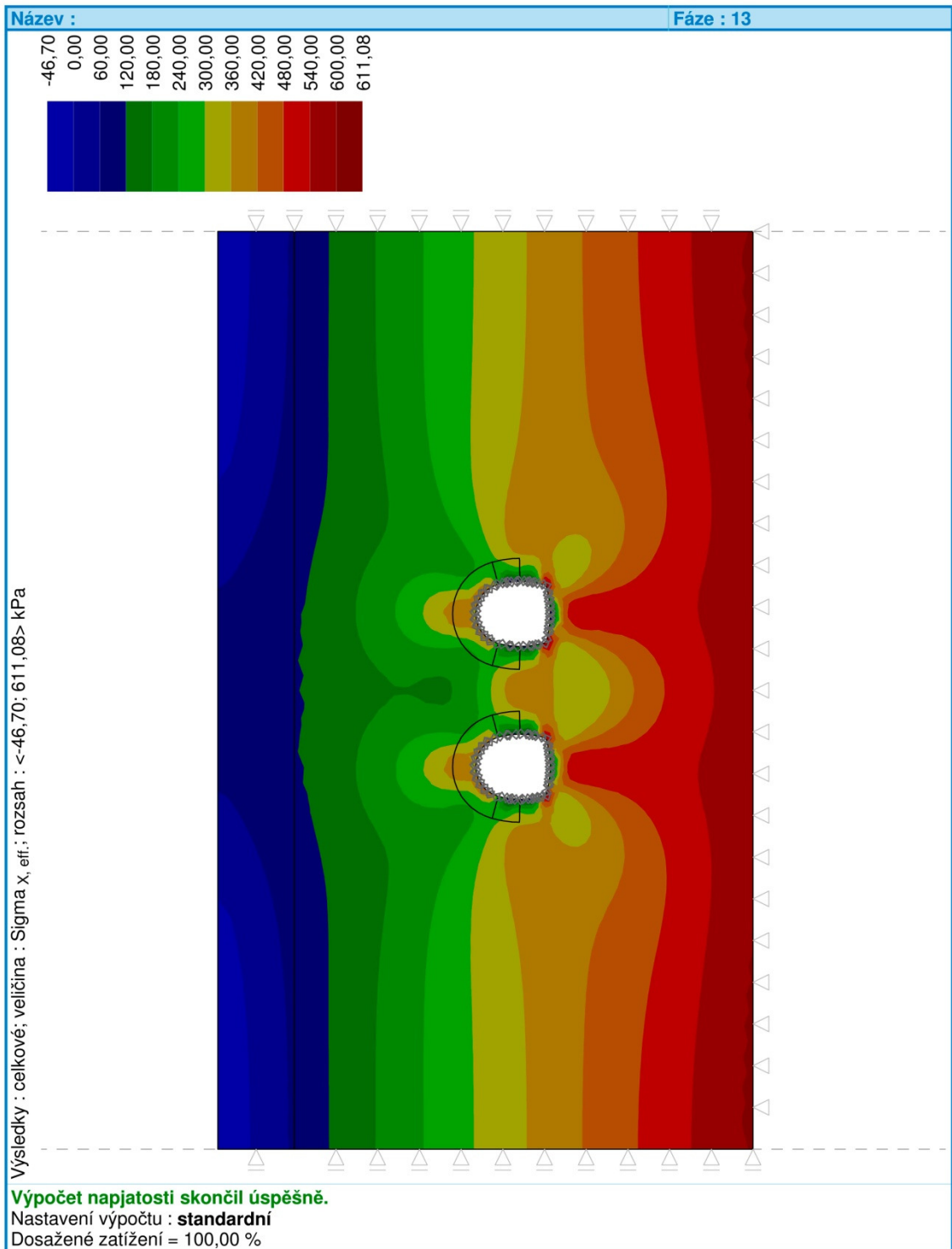
Obr. 5-4: Zvislé deformácie v reze V.



Pouze pro nekomerční využití

[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

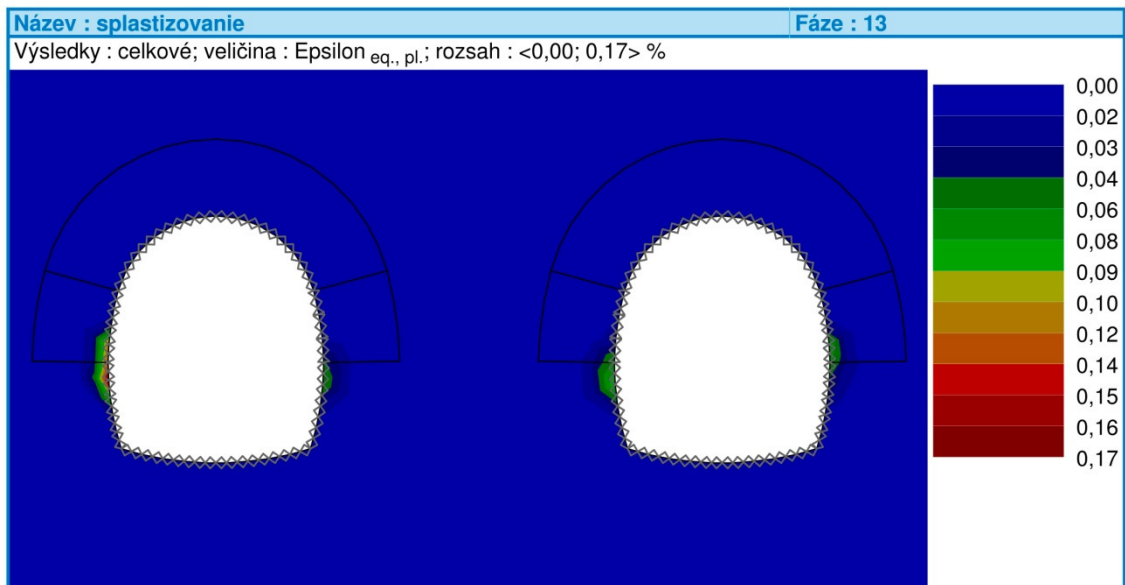
Obr. 5-5: Zvislé geostatické napätie v reze V.



Pouze pro nekomerční využití

[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

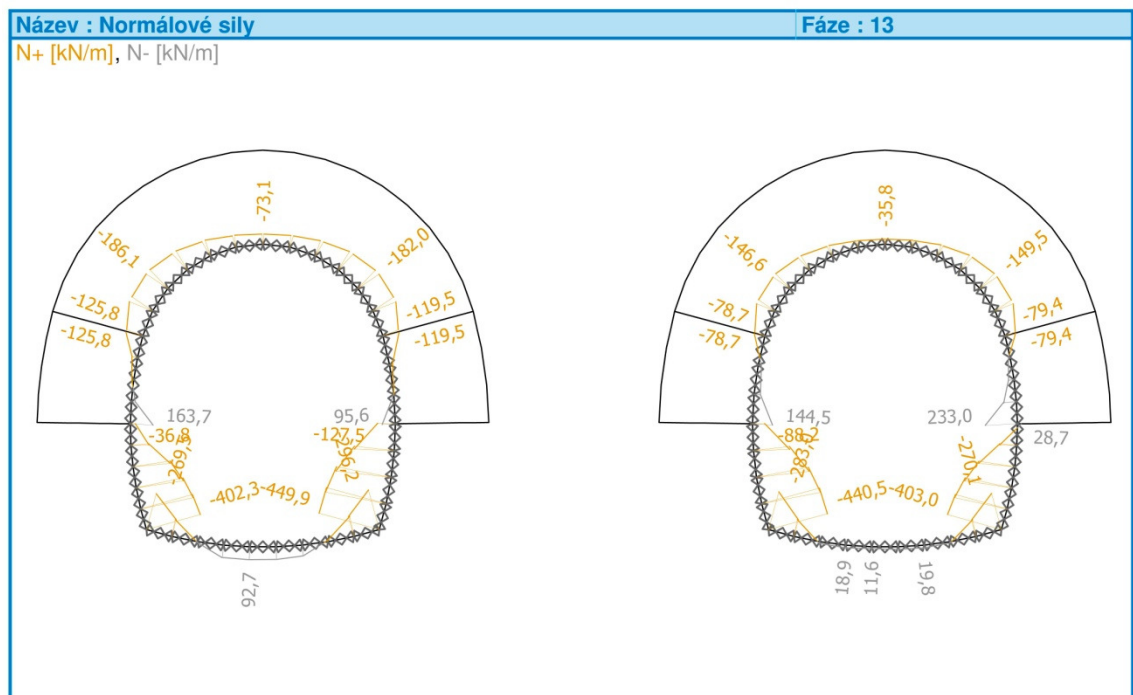
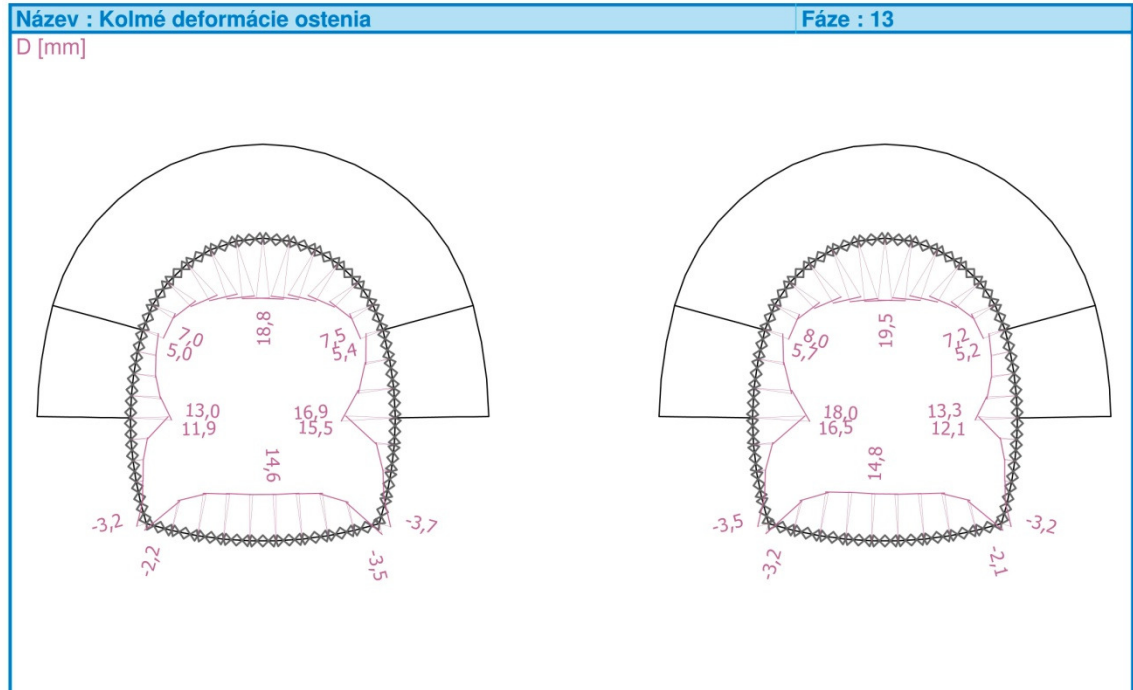
Obr. 5-6: Horizontálne geostatické napätie v reze V.



Obr. 5-7: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze V.

Výrub vo vápencoch je aj napriek členeniu iba na dve časti najstabilnejší, a to aj v mieste s najvyšším nadložíím pre túto geológiu. Konvergencia vychádza podľa výpočtu do 20 mm. Pokles povrchu nad tunelom má najväčšiu hodnotu 4,4 mm a poklesová kotlina má šírku asi 100 m od osi trasy. Dosah poklesovej kotliny však nebol podrobne analyzovaný a táto hodnota je len odhadnutá na základe získaných výsledkov. Nárast zvislého geostatického napätia v horninovom pilieri medzi tunelovými rúrami je približne 40%. K prekročeniu medze elasticity dochádza iba v malej oblasti pri tunelových oporách.

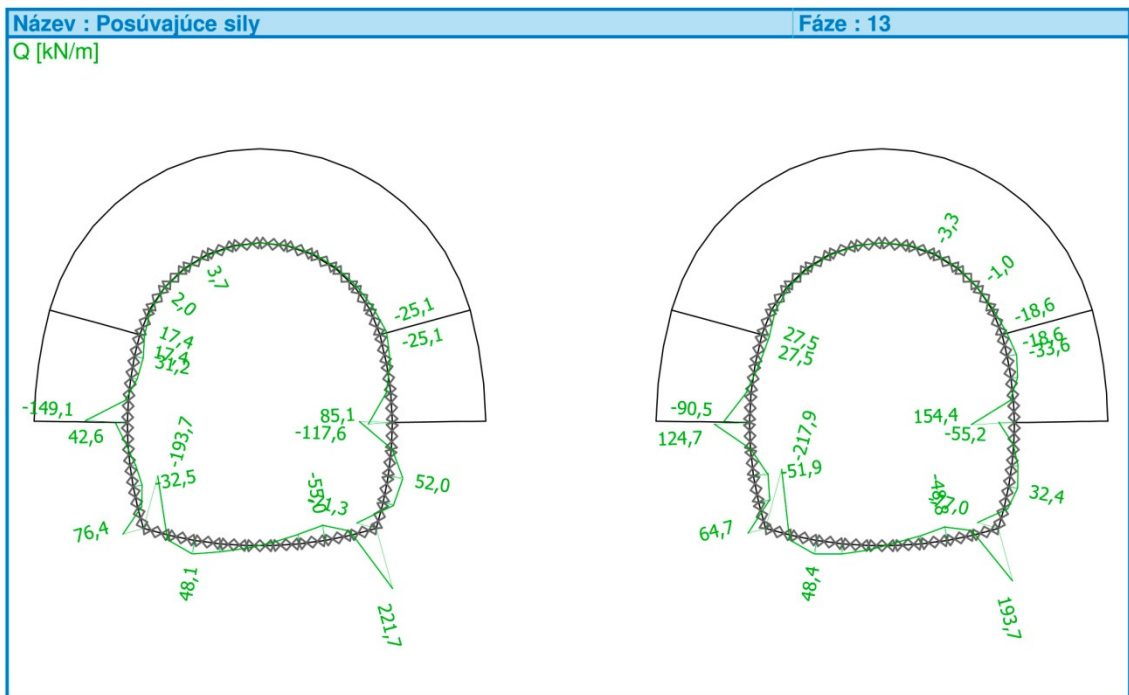
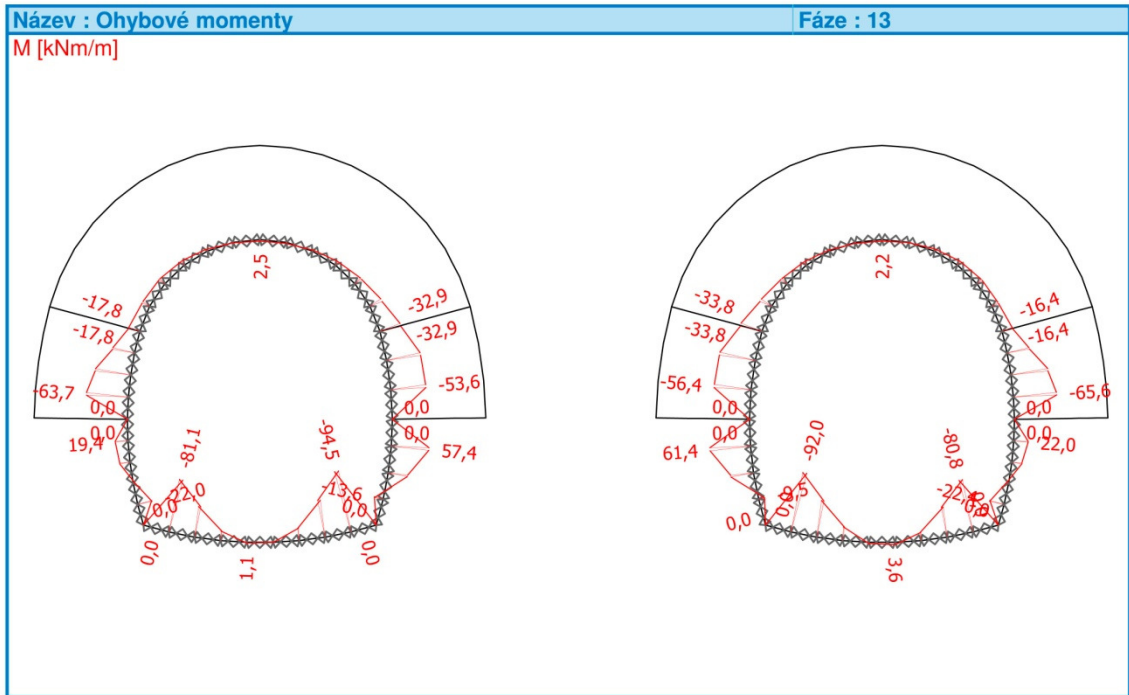
Výsledky (Fáze budování 13)



Pouze pro nekomerční využití

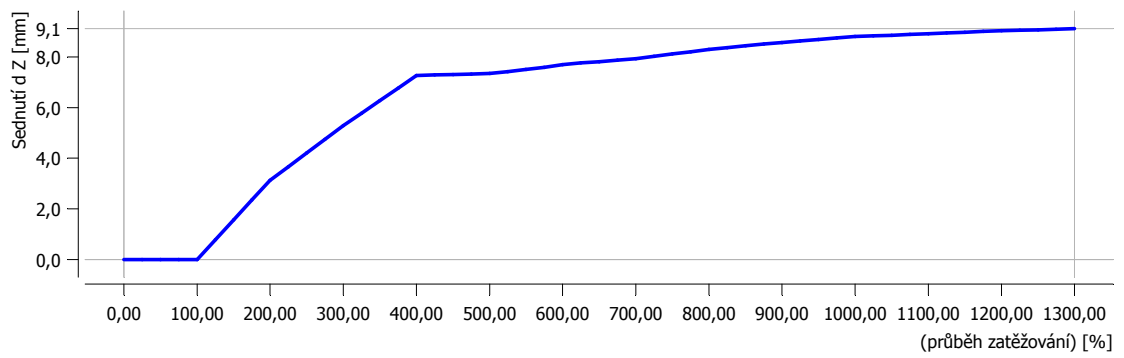


Obr. 5-8: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze V.

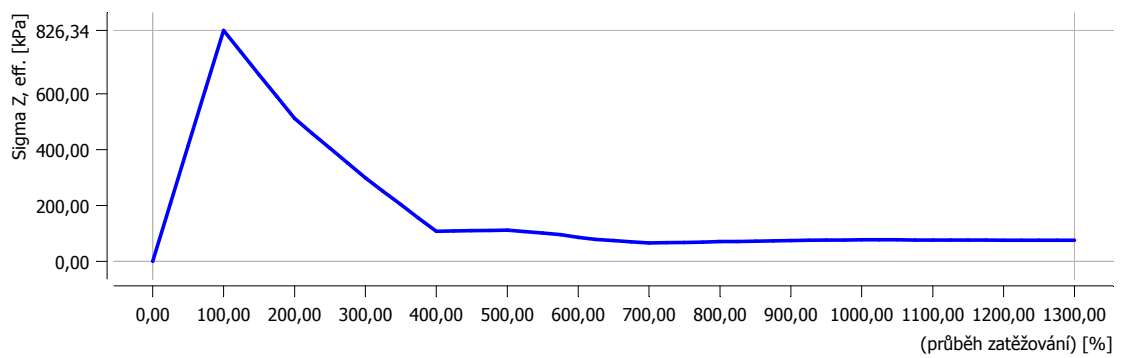


! Pouze pro nekomerční využití !

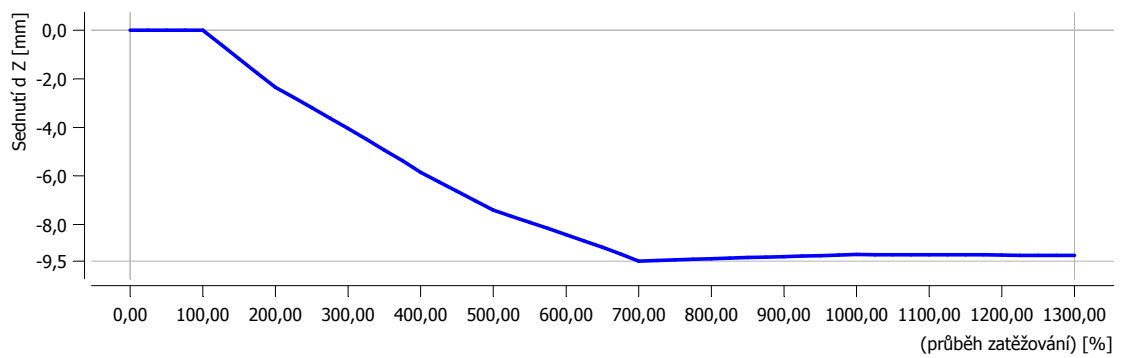
Obr. 5-9: Ohybové momenty a posouvající síly v reze V.



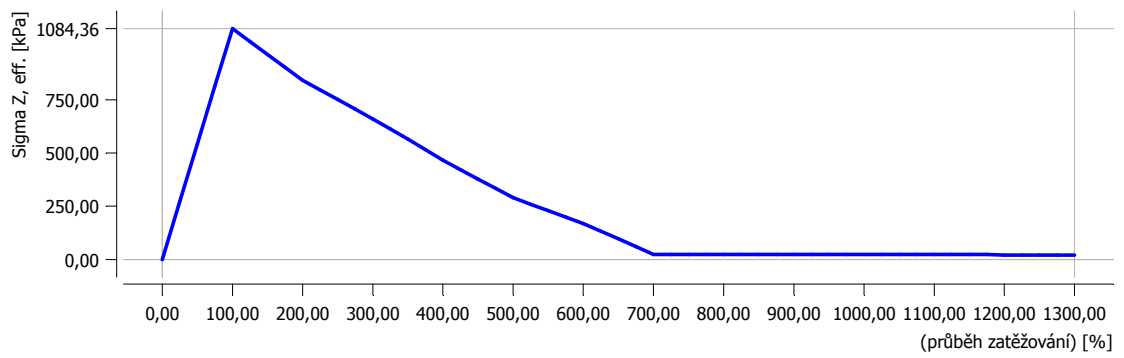
Obr. 5-10: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.



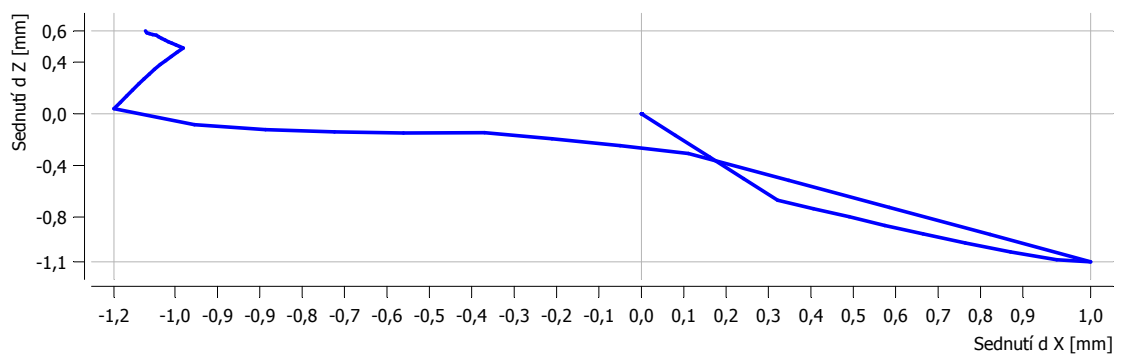
Obr. 5-11: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela.



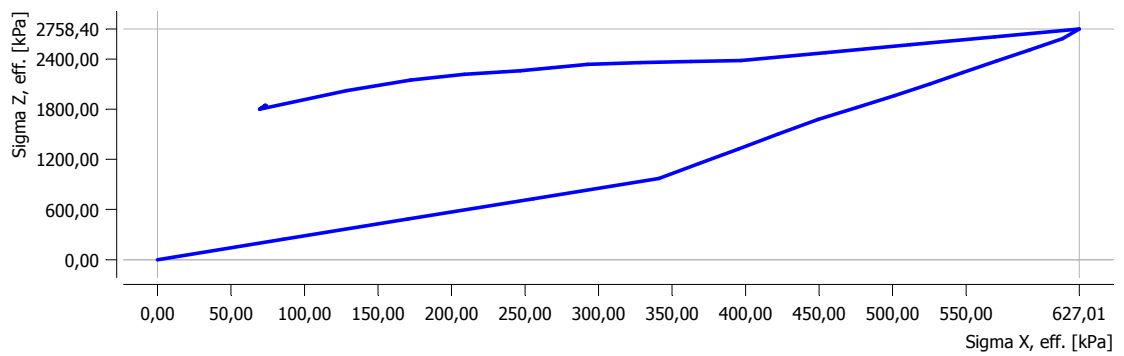
Obr. 5-12: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.



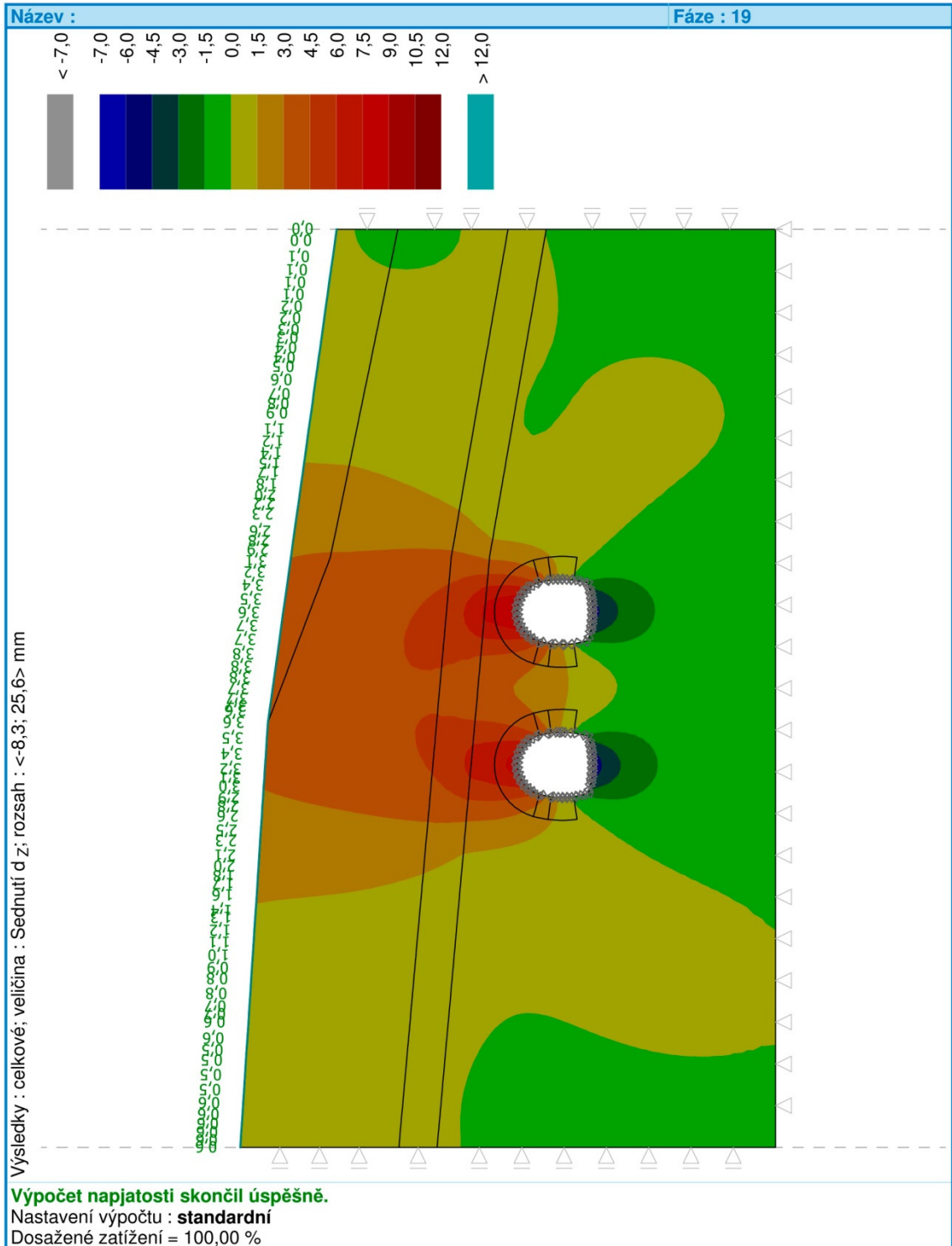
Obr. 5-13: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.



Obr. 5-14: Priebeh posunov v opore prvého tunela v úrovni členenia výrubu.



Obr. 5-15: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v úrovni členenia výrubu.

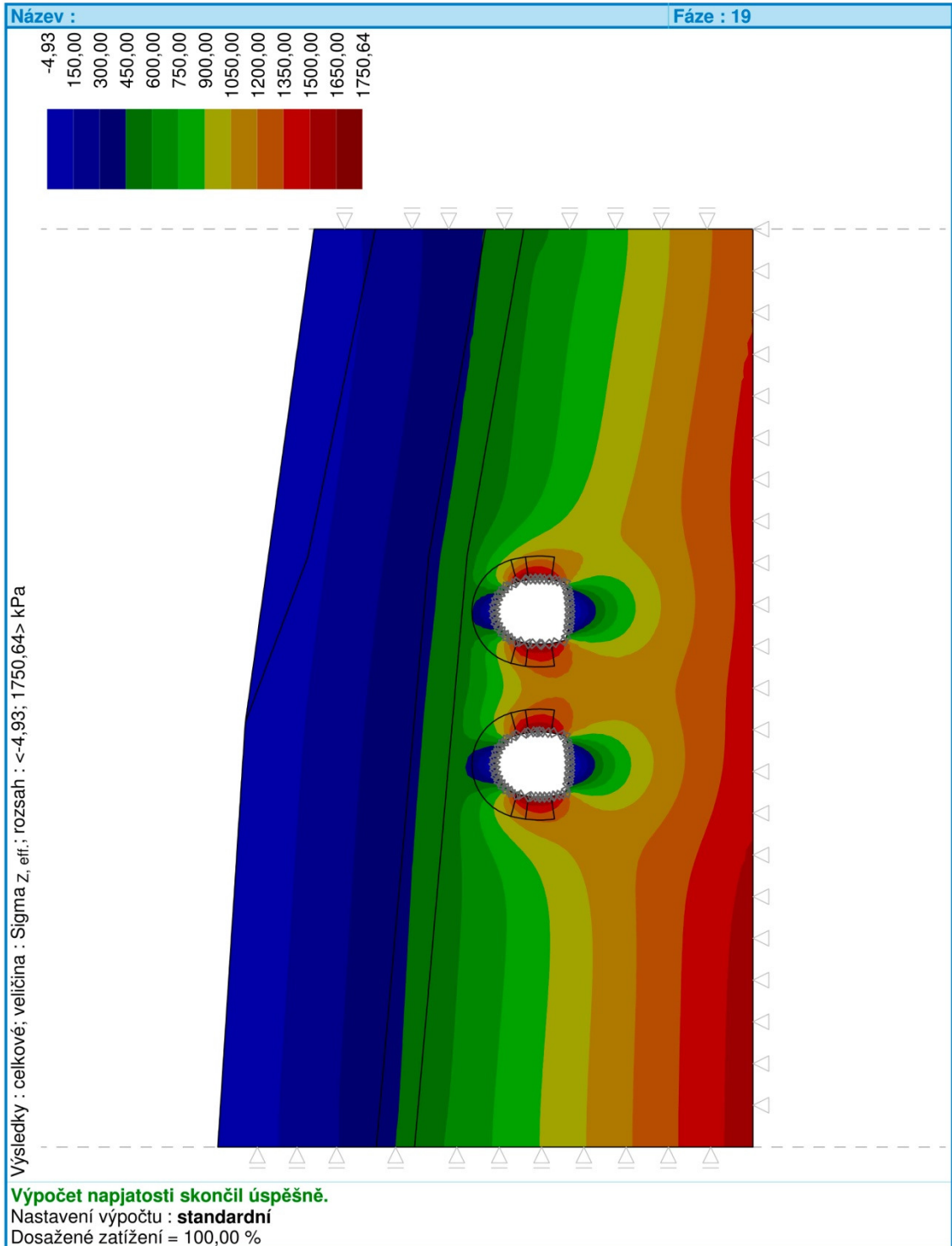


Pouze pro nekomerční využití



[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

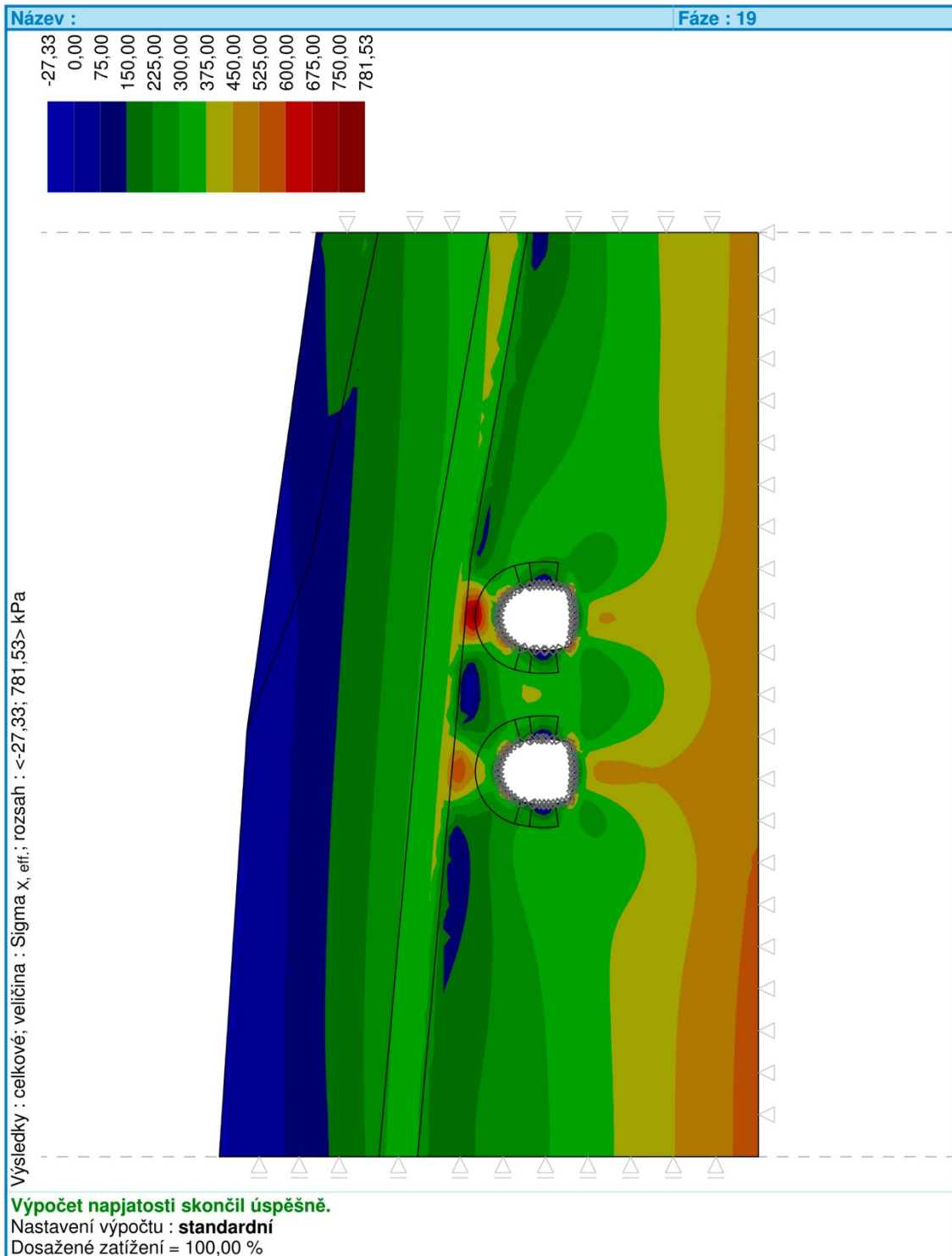
Obr. 5-16: Zvislé deformácie v reze Z.



! Pouze pro nekomerční využití !

[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

Obr. 5-17: Zvislé geostatické napätie v reze Z.

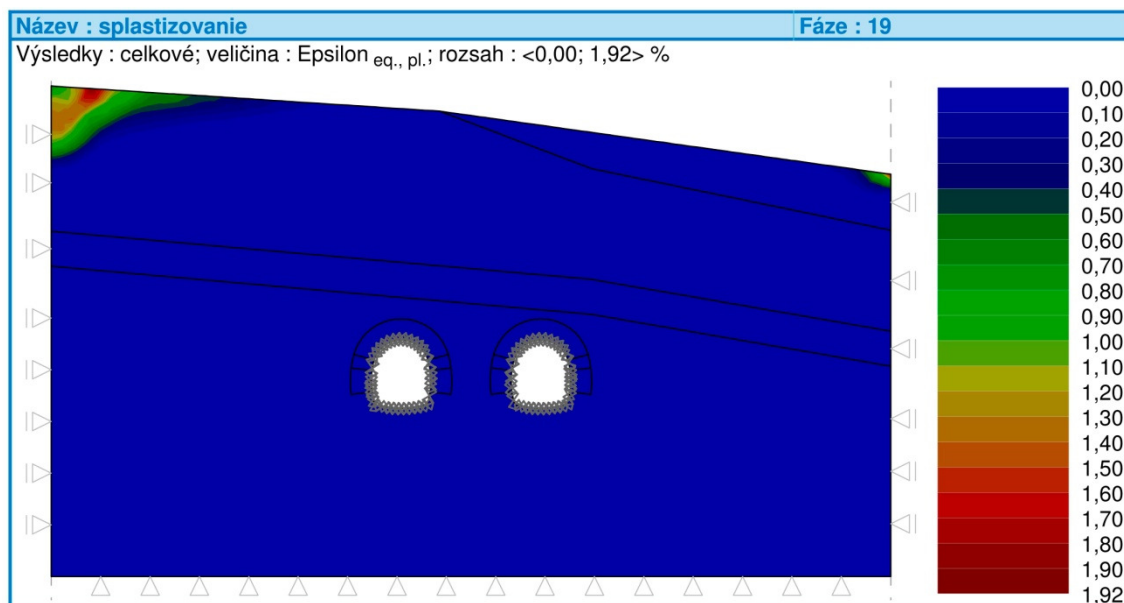


Pouze pro nekomerční využití



[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

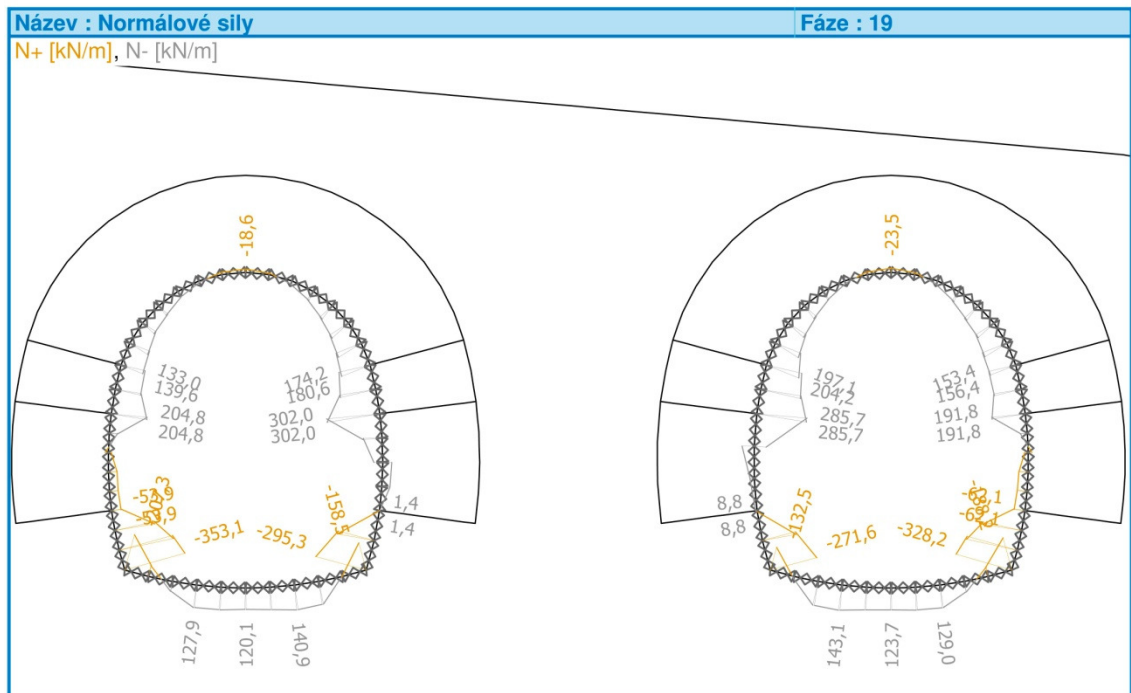
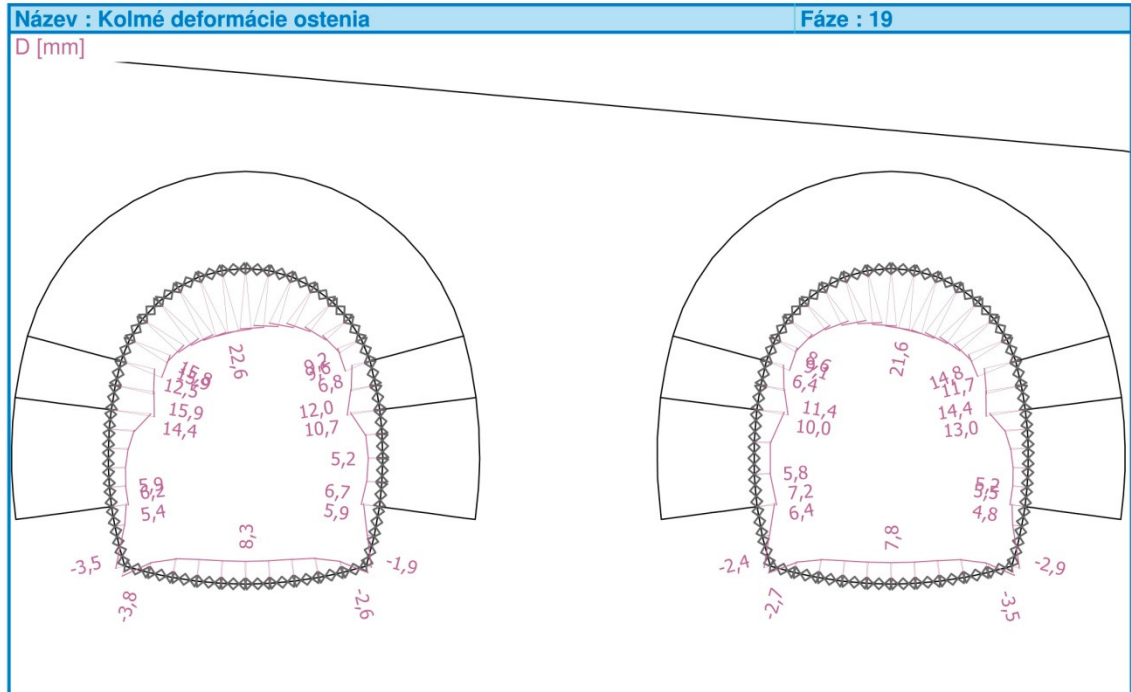
Obr. 5-18: Horizontálne geostatické napätie v reze Z.



Obr. 5-19: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze Z.

V mieste s najnižším skalným nadložitím, v oblasti údolia vyplneného ílmi, vychádzajú relatívne malé deformácie v okolí výrubu a konvergencia len o málo prekračuje 20 mm. Pokles povrchu je maximálne 3,8 mm. Zrejme najviac sa na tom podieľa pomerne kvalitný skalný masív. Je teda nutné overiť tento predpoklad v ďalšom prieskume, pretože zatiaľ je ľahko spochybniteľný. Plastické pretvorenie v okolí výrubu je minimálne ($\epsilon_{eq,pl} < 0,15\%$), ale výpočet vykazuje omnoho väčšie splastizovanie v íloch pri povrchu. To naznačuje možnosť svahovej deformácie v dôsledku poklesov masívu pri razení. Nárast zvislého geostatického napätia v horninovom pilieri je približne 50%, pričom za pozornosť stojí pomerne vysoká koncentrácia vodorovných napätí nad kalotou tunela.

Výsledky (Fáze budování 19)



Pouze pro nekomerční využití

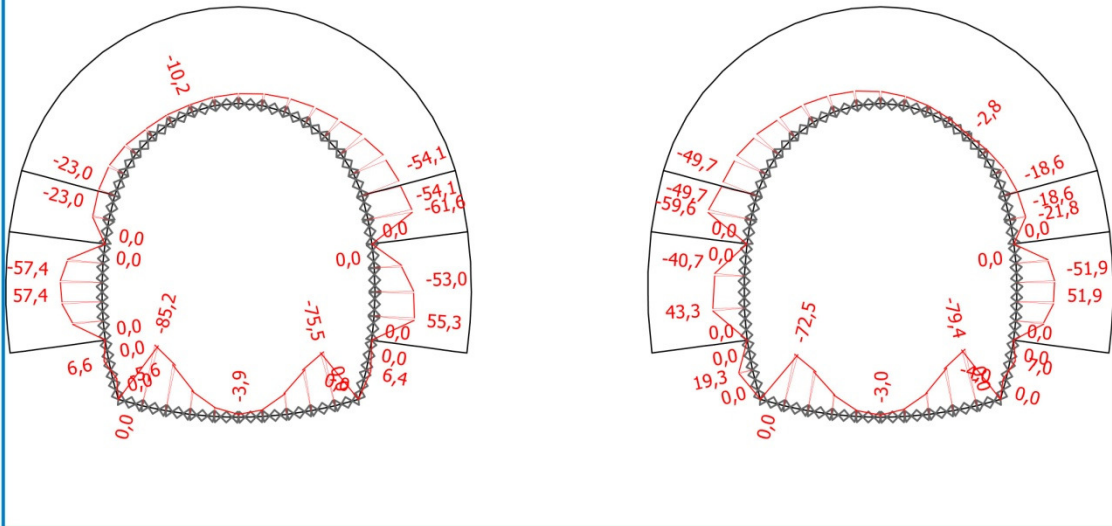


Obr. 5-20: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze Z.

Název : Ohybové momenty

Fáze : 19

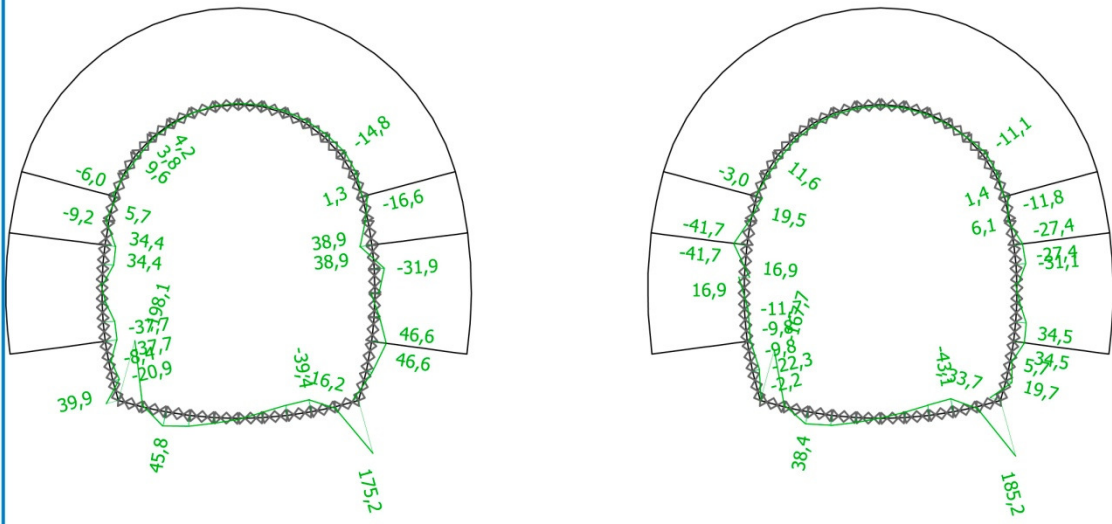
M [kNm/m]



Název : Posouvající síly

Fáze : 19

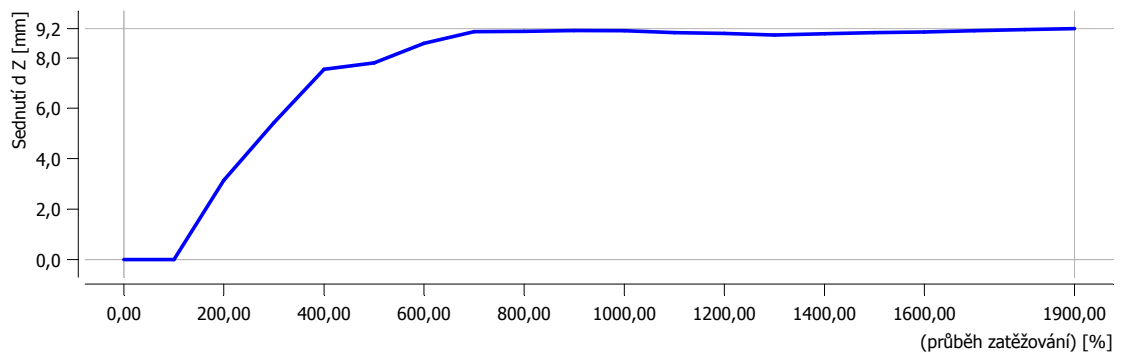
Q [kN/m]



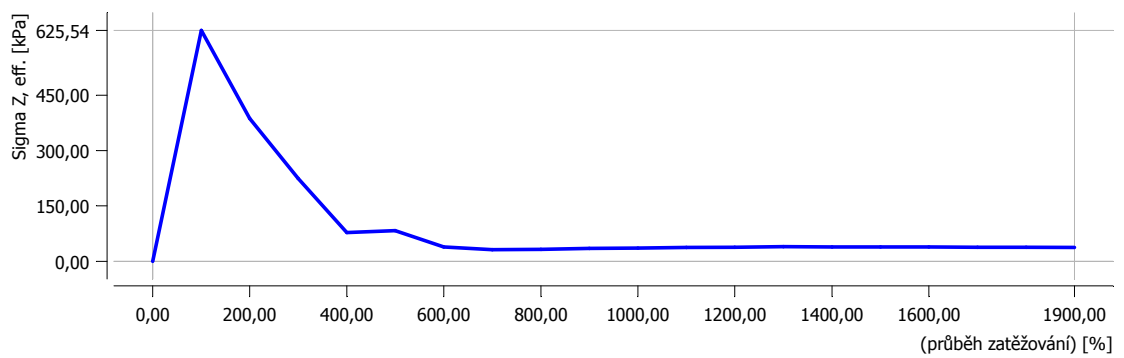
Pouze pro nekomerční využití



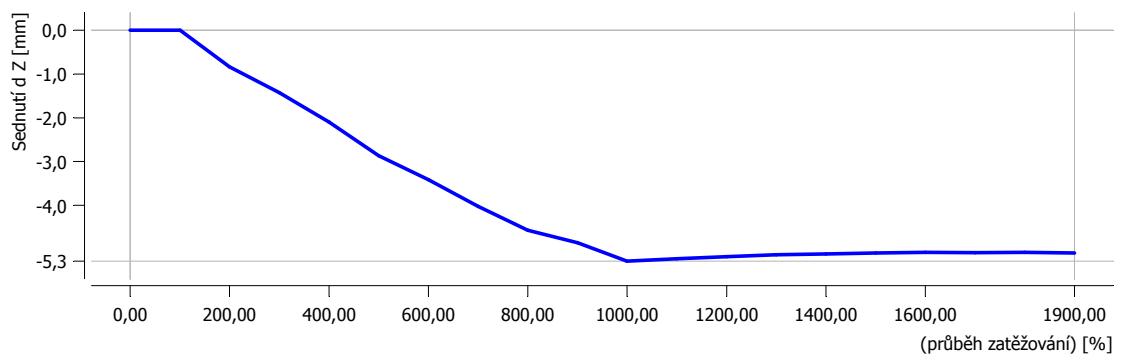
Obr. 5-21: Ohybové momenty a posouvající síly v ostení v reze Z.



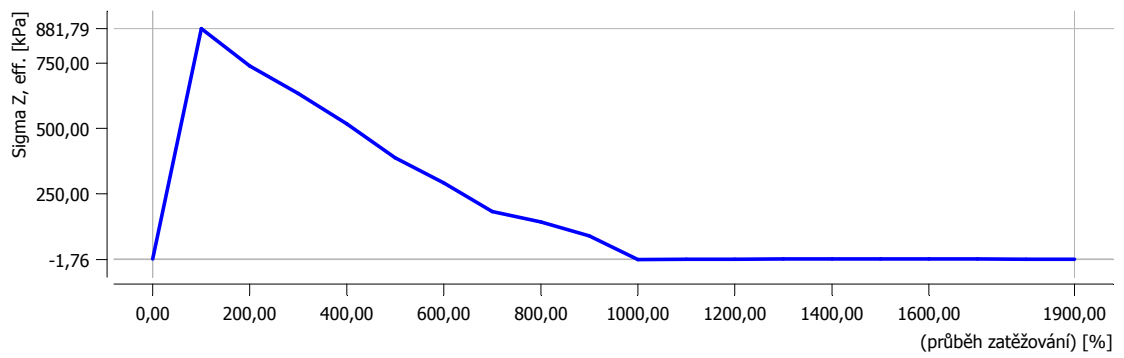
Obr. 5-22: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.



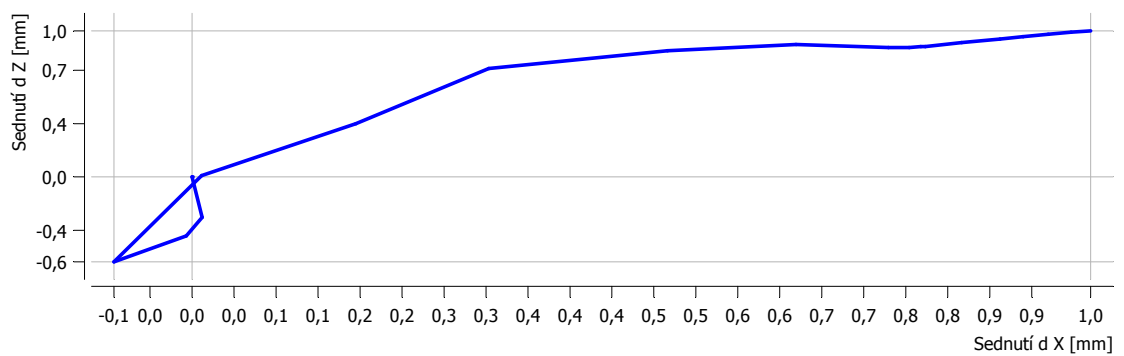
Obr. 5-23: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela.



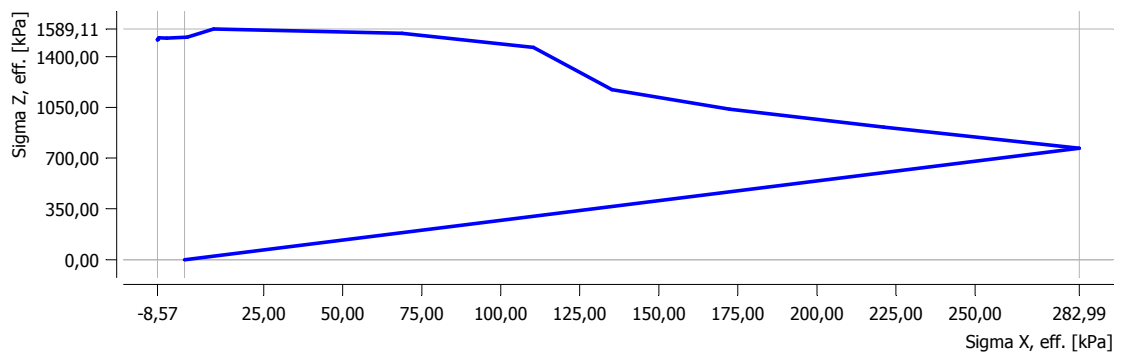
Obr. 5-24: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.



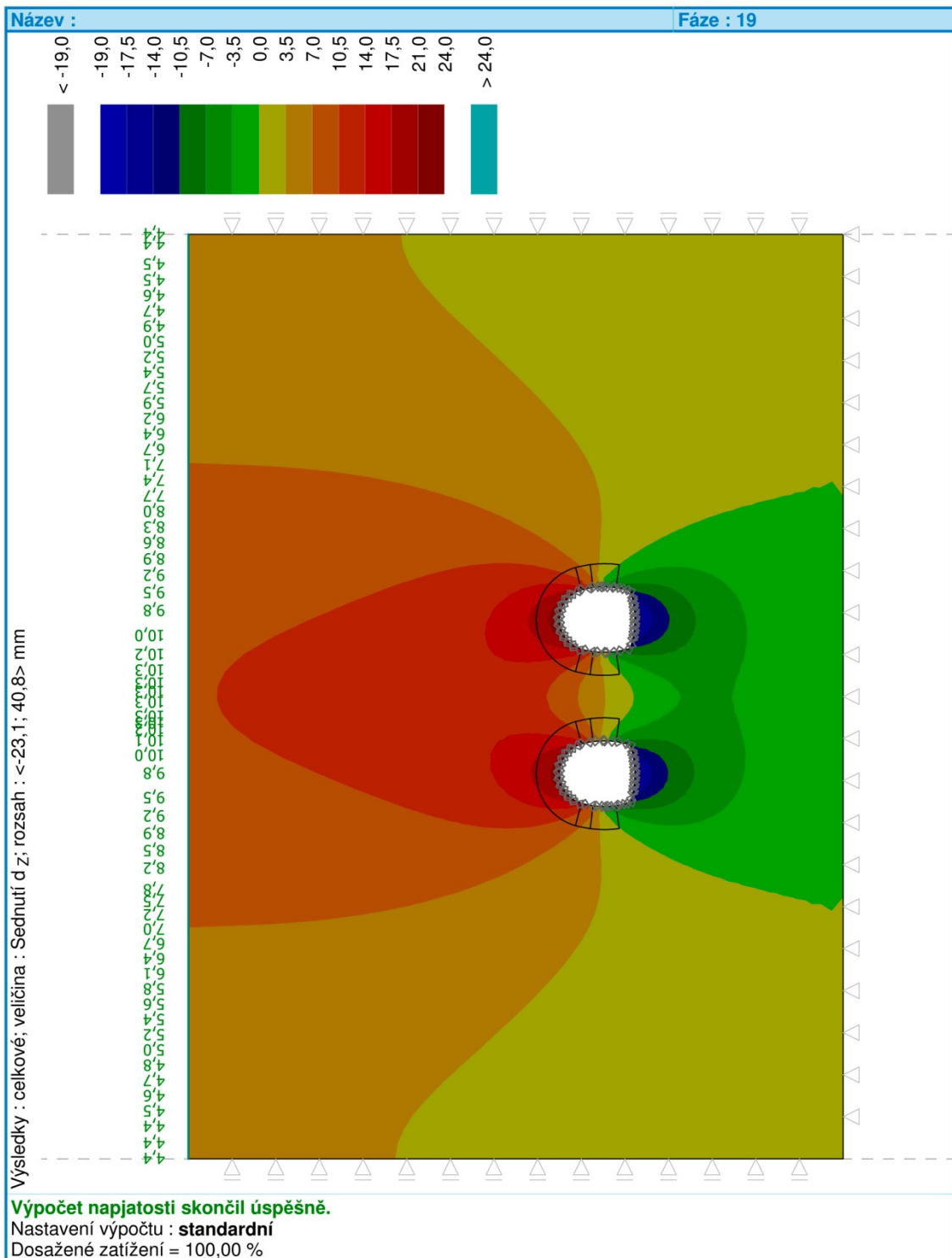
Obr. 5-25: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.



Obr. 5-26: Priebeh posunov v opore prvého tunela v strede výšky lávky.



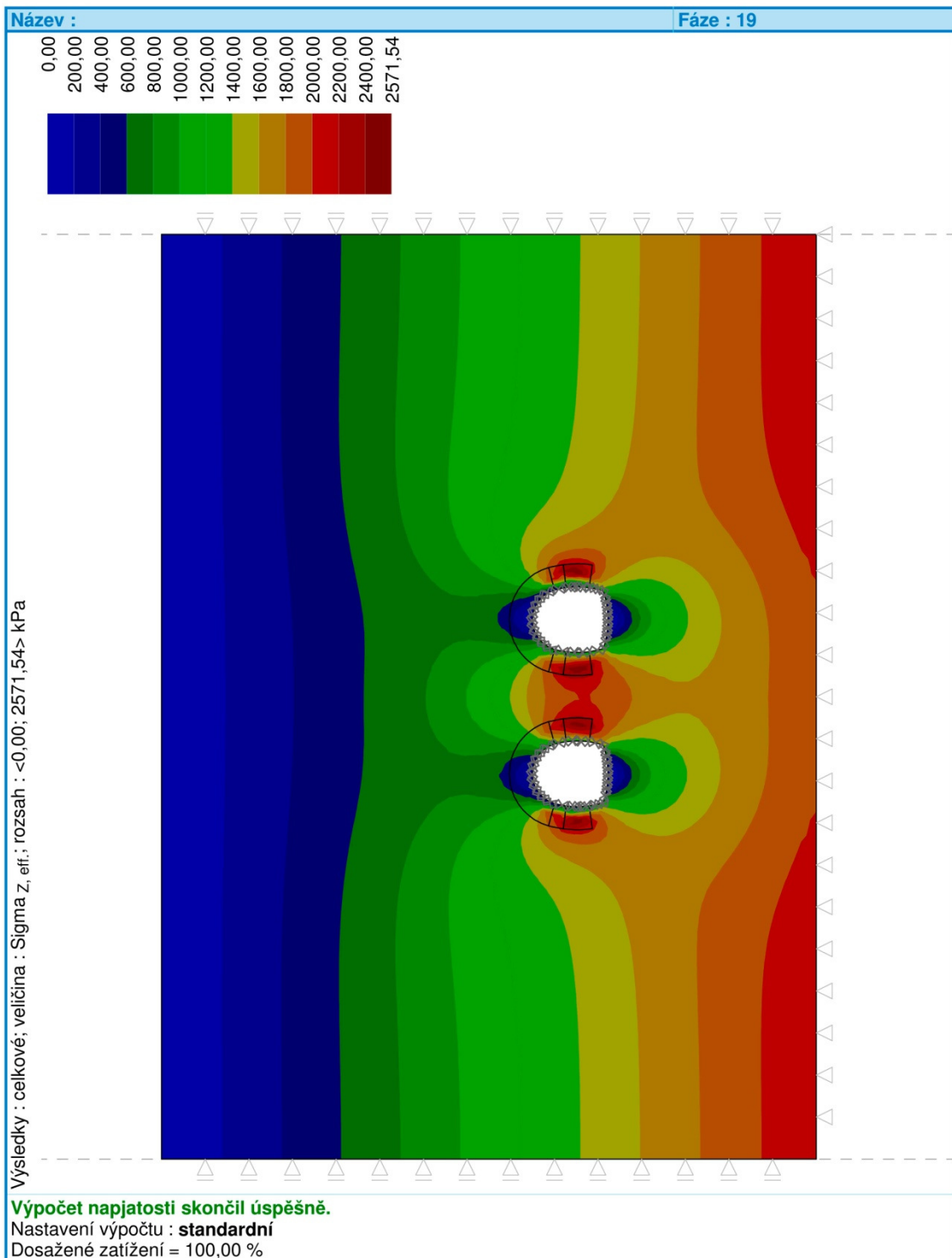
Obr. 5-27: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v strede výšky lávky.



! Pouze pro nekomerční využití !

[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

Obr. 5-28: Zvislé deformácie v reze B.

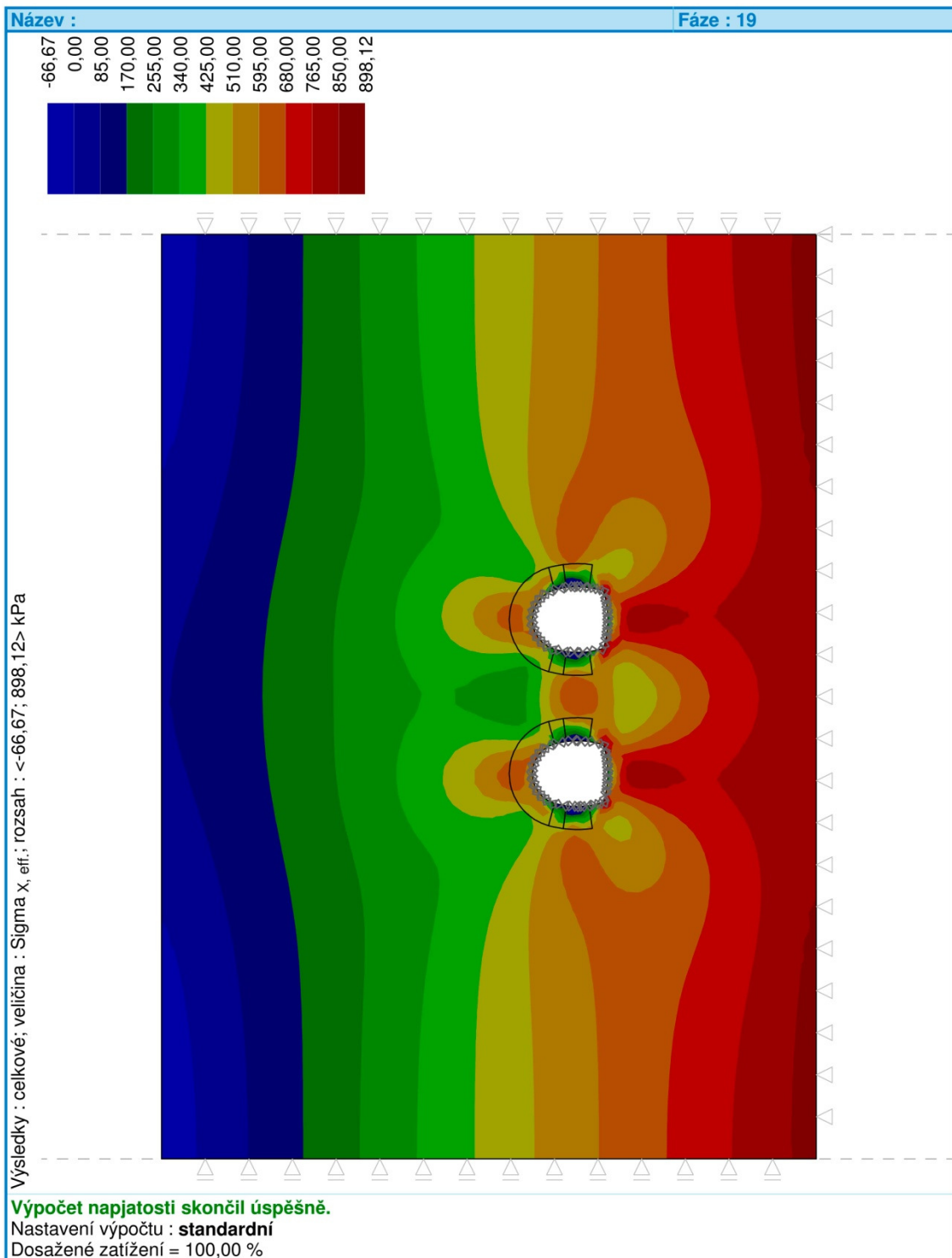


Pouze pro nekomerční využití



[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

Obr. 5-29: Zvislé geostatické napätie v reze B.

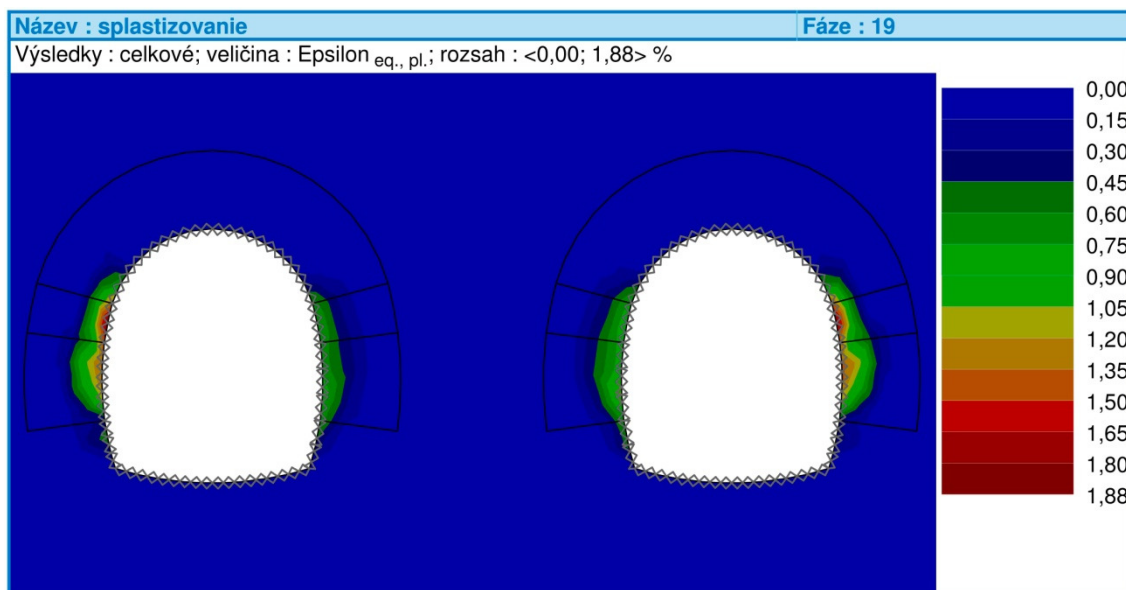


Pouze pro nekomerční využití



[GEO5 - MKP (studentská licence) | verze 5.19.9.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

Obr. 5-30: Horizontálne geostatické napätie v reze B.

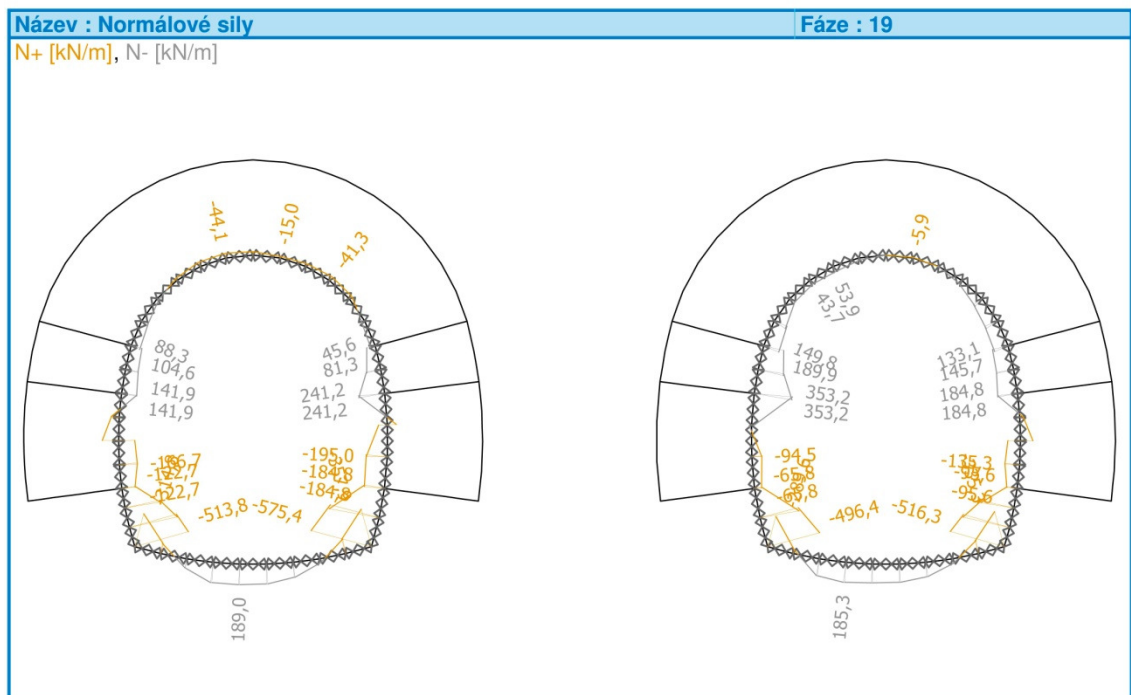
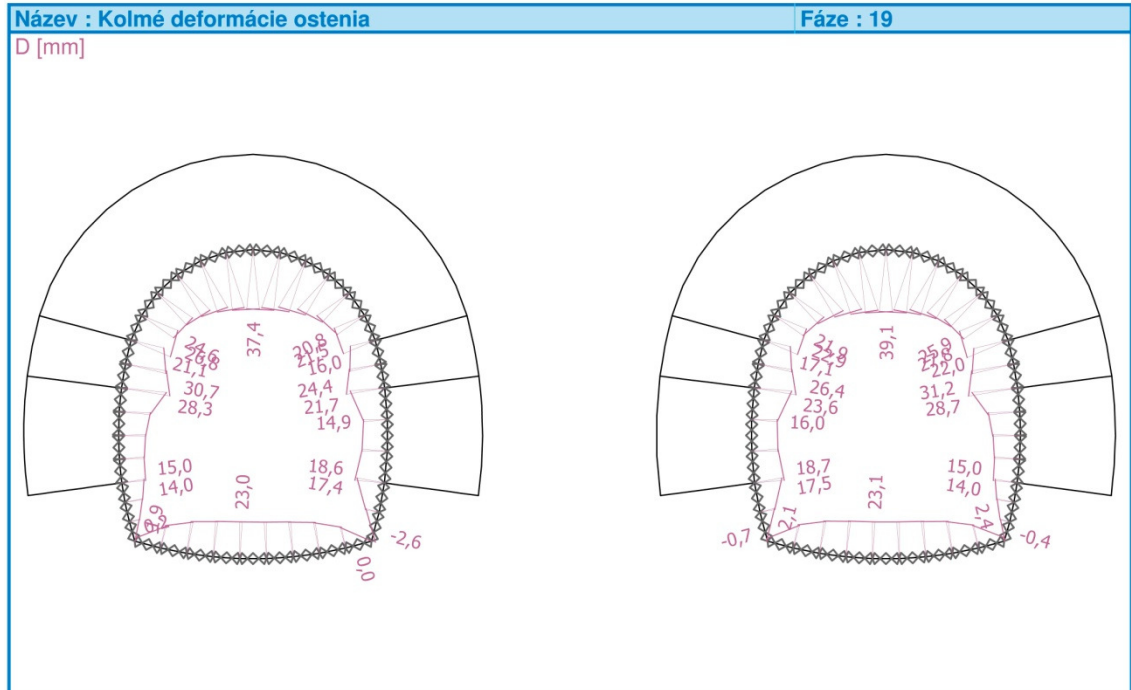


Obr. 5-31: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze B.

Rez B je najkritickejší spomedzi skúmaných miest. Vznikajú tu najväčšie pretvorenia vplyvom kombinácie najvyššieho nadložia a pomerne nízkych deformačných parametrov horninového masívu. S tým súvisí väčšie namáhanie primárneho ostena, ktoré tu muselo byť zosilnené oproti pôvodnému návrhu (zvýšenie triedy betónu). Najväčšia konvergencia vychádza na takmer 40 mm v oblasti kaloty. Maximálny pokles terénu je podľa modelu 10,3 mm a dosah poklesovej kotlíny sa predpokladá 150 m od osi trasy. Ide však o odhad, podobne ako pri reze V. Dochádza tu aj k väčšej miere plastických pretvorení v oblasti opôr tunelových rúr.

Tento rez je rozhodujúci aj z pohľadu určenia šírky horninového piliera medzi tunelmi. Pri osovej vzdialenosti 20 m je šírka horninového piliera 11,2 m, čo predstavuje $1,27 \times B_t$ (B_t – šírka výrubu 8,8 m). Nárast zvislého geostatického napätia je cca 50%, pričom lokálne je to až takmer 100%.

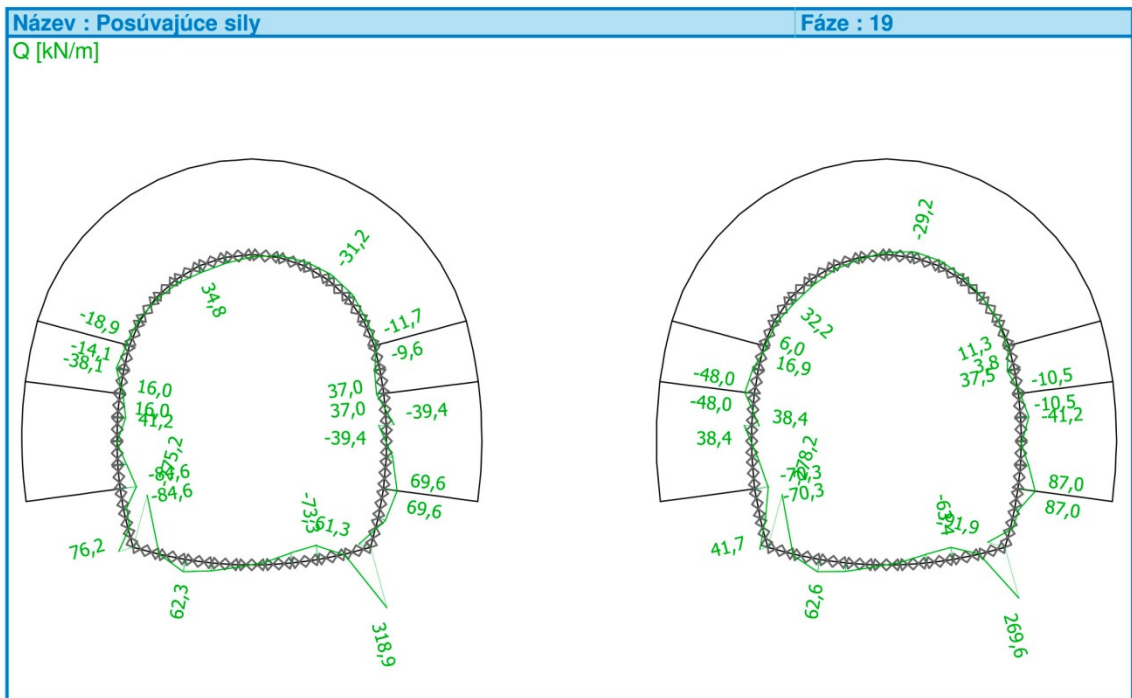
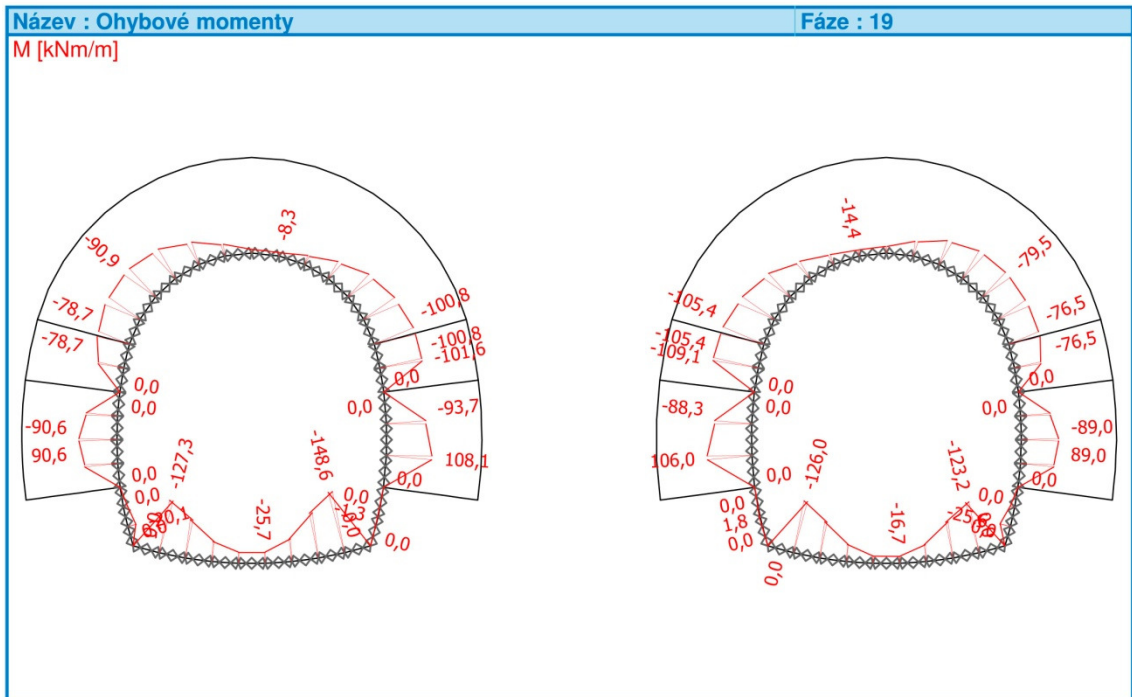
Výsledky (Fáze budování 19)



Pouze pro nekomerční využití

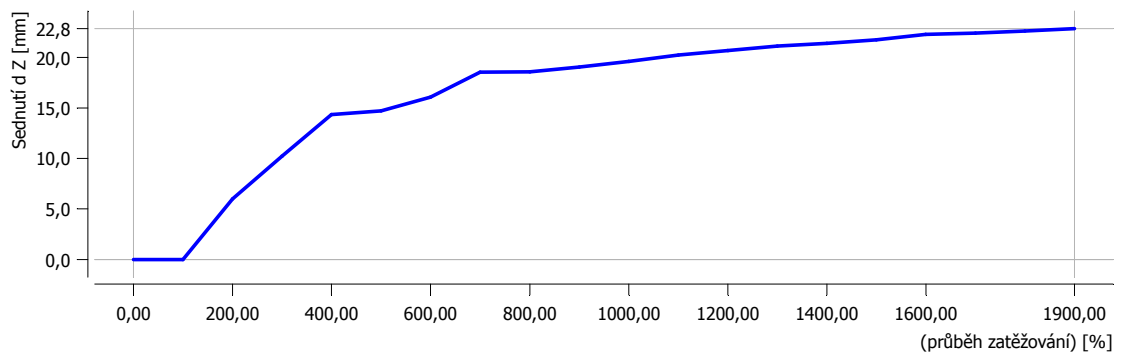


Obr. 5-32: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze B.

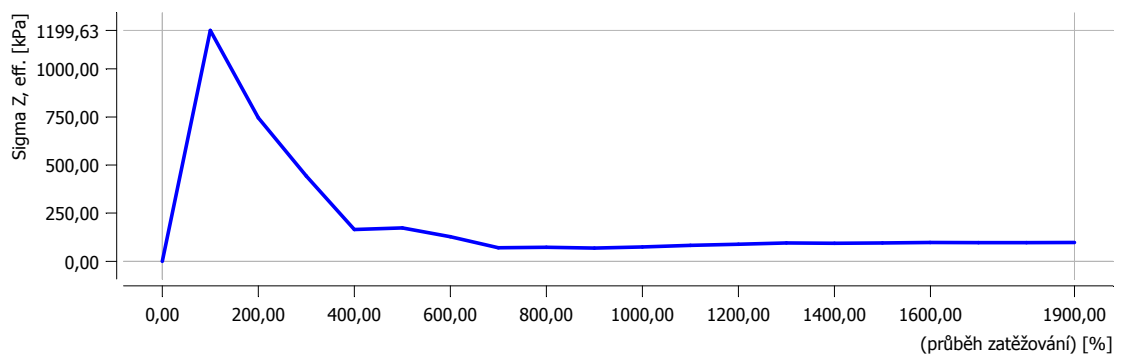


! Pouze pro nekomerční využití !

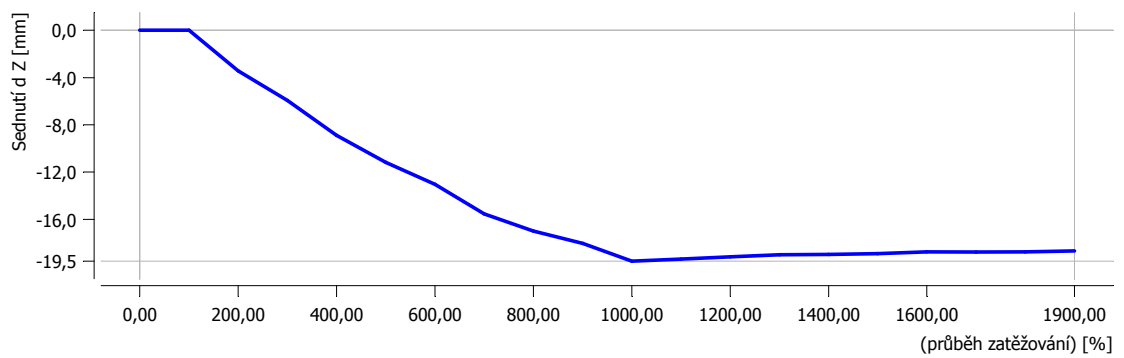
Obr. 5-33: Ohybové momenty a posouvající síly v ostení v reze B.



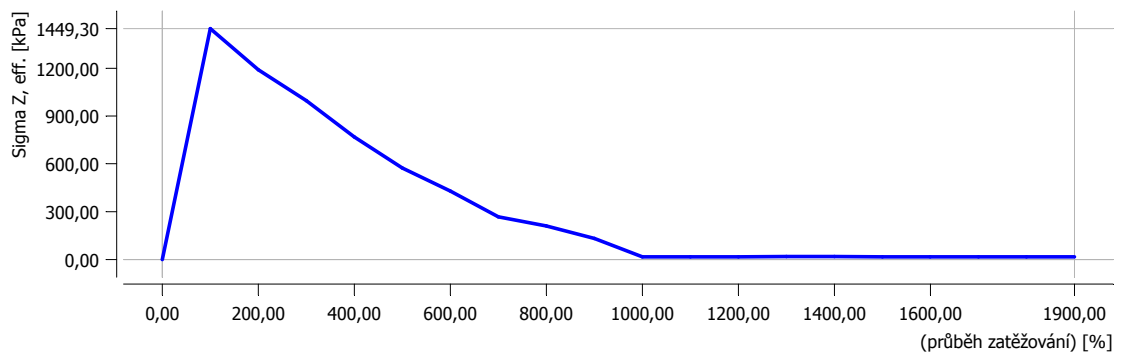
Obr. 5-34: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.



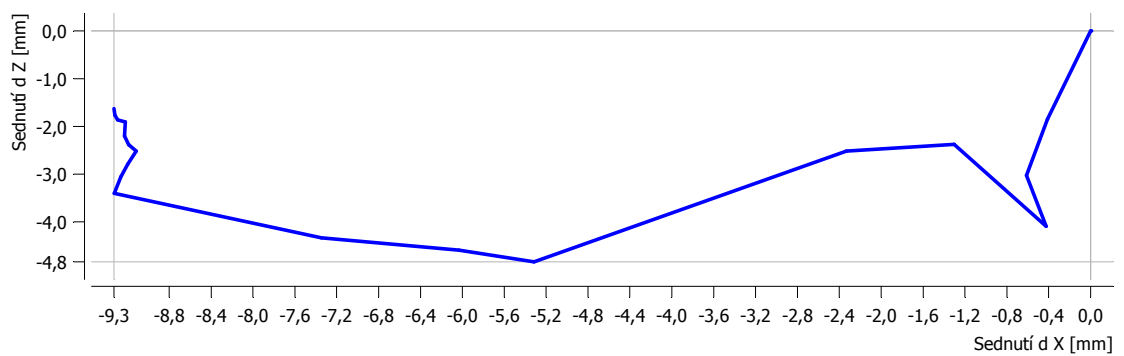
Obr. 5-35: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela.



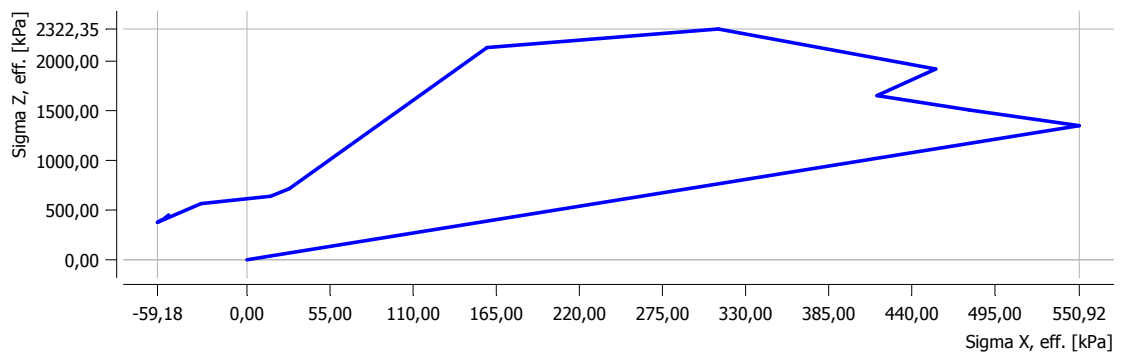
Obr. 5-36: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.



Obr. 5-37: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.



Obr. 5-38: Priebeh posunov v opore prvého tunela v strede výšky lávky.



Obr. 5-39: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v strede výšky lávky.

5.3.2 Posúdenie primárneho ostenia

Posúdené sú najviac namáhané prierezy ostenia v jednotlivých rezoch pre šírku 1 bm. Analyzované sú dva zaťažovacie stavy pre prvý razený tunel: *ZS1 - dokončenie 1. tunela* a *ZS2 - dokončenie 2. tunela*. V interakčnom diagrame je vykreslený vždy iba horší z dvojice prípadov. Spodné vlákna sú vždy orientované dovnútra tunela. Ostenie je rozdelené na klenbu a dno, ktoré majú odlišne vystužené prierezy. Výstuž je podrobnejšie rozkreslená v samostatnom výkrese.

Posúdenie na šmyk je nasledovné – maximálne posúvajúce sily prierez nie je schopný preniesť bez šmykovej výstuže, ktorú však z technologických príčin nie je možné realizovať. Predpokladá sa redistribúcia, takže reálne budú posúvajúce sily menšie, ako vo výstupoch z MKP modelu. Do posudku v programe je zadaná fiktívna sila 1 kN a následne je uvedený výpočet maximálnej únosnosti prierezu.

Vplyv prostredia je zvolený do triedy X0, pretože nie sú dodržané podmienky na minimálne krytie výstuže, čo by program na posúdenie vyhlásil ako chybu. Normové požiadavky na krytie nie je možné všade dodržať z technologického a priestorového hľadiska. Taktiež sa jedná o dočasnú konštrukciu, kde dlhodobé pôsobenie negatívnych vplyvov nie je obzvlášť významné.

Únosnosť betonu - základní kombinace zatížení	γ_C	= 1,500
Únosnosť výstuže - základní kombinace zatížení	γ_S	= 1,150
Únosnosť betonu - mimořádná kombinace zatížení	γ_C	= 1,200
Únosnosť výstuže - mimořádná kombinace zatížení	γ_S	= 1,000
Modul pružnosti betonu	γ_{cE}	= 1,200
Tlaková pevnost betonu	α_{cc}	= 0,850
Tlaková pevnost prostého betonu	$\alpha_{cc,pl}$	= 0,800
Tahová pevnost prostého betonu	$\alpha_{ct,pl}$	= 0,700

Tab. 5-7: Použité súčinitele na posúdenie ŽB prierezu. Norma ČSN EN 1992-2 [13].

Statická analýza ostenia nie je rozpracovaná úplne podrobne, keďže sa jedná o štúdiu. V ďalších fázach projektu je namieste hlbší rozbor vo všetkých fázach budovania a prípadná optimalizácia návrhu s cieľom znížiť množstvo spotrebovaného materiálu alebo zjednodušenia montáže.

Rez V	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_G=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	1	-41,9	1,9	0,2	-56,6	2,6	0,3	2,8
	2	62,9	-63,8	-11	84,9	-86,1	-14,9	83,7
	3	196,1	0	-149,8	264,7	0,0	-202,2	22,5
	4	-252,1	-57,8	3,7	-340,3	-78,0	5,0	62,9
	5	-428,9	0	-68,1	-579,0	0,0	-91,9	55,5
2	1	-73,1	2,5	0,4	-98,7	3,4	0,5	3,4
	2	29,2	-63,7	-10,9	39,4	-86,0	-14,7	81,6
	3	163,7	0	-149,1	221,0	0,0	-201,3	18,8
	4	-289,5	-57,4	4,2	-390,8	-77,5	5,7	61,5
	5	-449,9	0	-71,3	-607,4	0,0	-96,3	58,2

Tab. 5-8: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez V - vápence.

Podrobné posúdenie na šmyk: 3

Použitý model náhradnej priehradoviny

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_C = 0,18 / 1,5 = 0,12$$

$$k = \min(1 + \sqrt{(200 / d)}; 2) = \min(1 + \sqrt{(200 / 169,9)}; 2) = 2$$

$$\rho_l = \min(A_{sl} / (b_w \times d); 0,02) = \min(1\,565 / (1\,000 \times 169,9); 0,02) = 0,00921$$

$$v_{min} = 0,035 \times k^{1,5} \times \sqrt{f_{ck}} = 0,035 \times 2^{1,5} \times \sqrt{20} = 0,443 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \min(-N_{Ed} / A_c; 0,2 \times f_{cd}) = \min(-264,7 / 200,10^3; 0,2 \times 11,33) = -1,323 \text{ MPa}$$

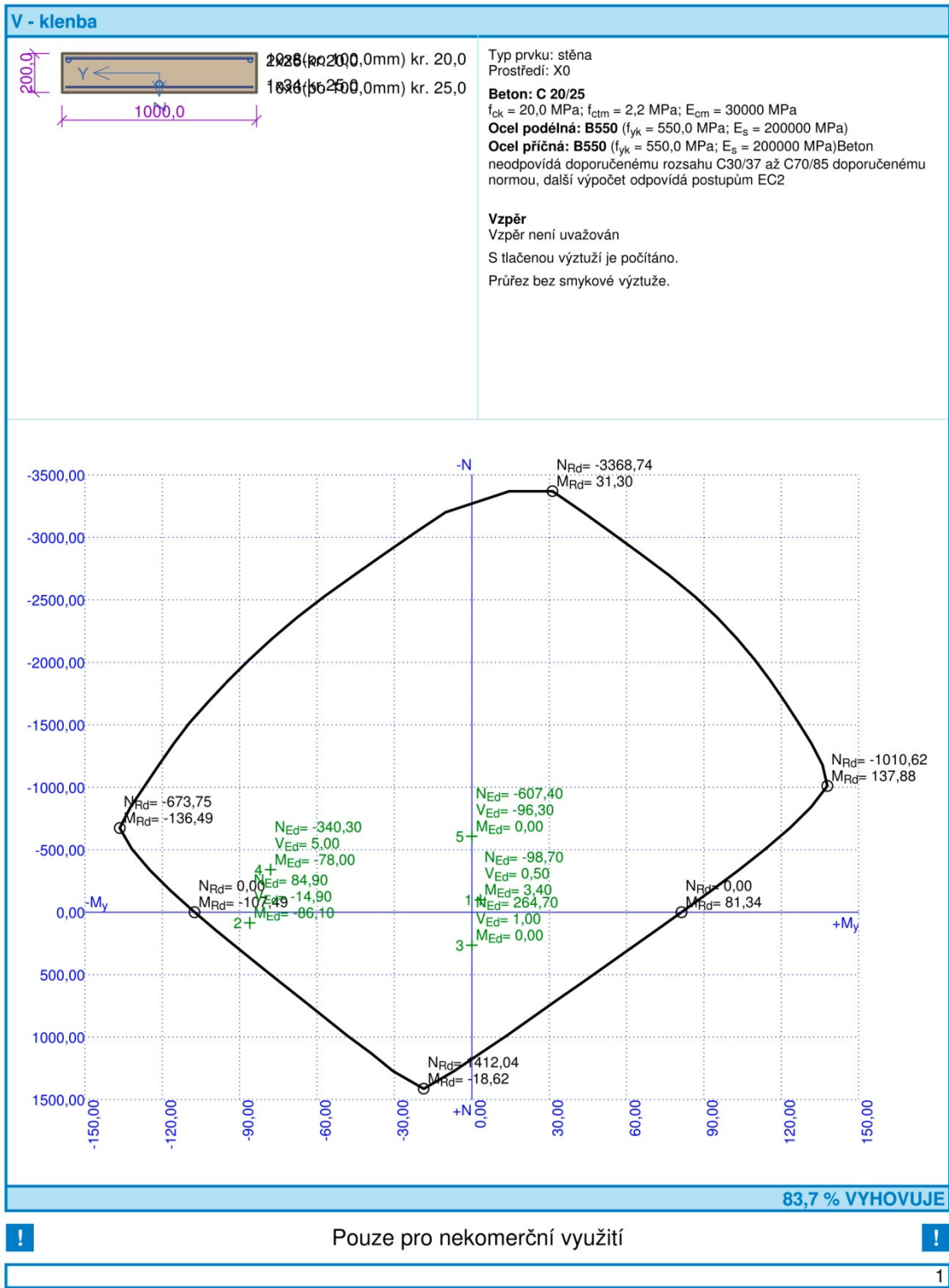
$$V_{Rdc} = (\max(C_{Rd,c} \times k \times \sqrt[3]{(100 \times \rho_l \times f_{ck})}; v_{min}) + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d =$$

$$(\max(0,12 \times 2 \times \sqrt[3]{(100 \times 0,00921 \times 20)}; 0,443) + 0,15 \times (-1,323)) \times 1\,000 \times 169,9 =$$

$$\underline{\underline{73,95 \text{ kN}}}$$

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	1	-98,70	-3358,44	3,40	87,96	0,50	106,92	3,4	Vyhovuje
2	2	84,90	365,05	-86,10	-102,67	-14,90	-96,86	83,7	Vyhovuje
3	3	264,70	1175,97	0,00	63,29	1,00	73,95	22,5	Vyhovuje
4	4	-340,30	-2178,88	-78,00	-124,94	5,00	151,04	62,9	Vyhovuje
5	5	-607,40	-3338,55	0,00	-135,19	-96,30	-165,44	58,2	Vyhovuje

Tab. 5-9: Využitie prierezu V - klenba.



Obr. 5-40: Interakční diagram V - klenba.

Rez V	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_C=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	6	-283,1	0	210,4	-382,2	0,0	284,0	10,5
	7	-137,3	88,9	-16,7	-185,4	120,0	-22,5	94,2
	8	-106,1	77,1	17,3	-143,2	104,1	23,4	83,4
	9	122,9	-1,2	10,5	165,9	-1,6	14,2	16,0
2	6	-296,2	0	221,7	-399,9	0,0	299,3	11,0
	7	-147,7	94,5	-15,9	-199,4	127,6	-21,5	99,5
	8	-124,8	81,1	16,8	-168,5	109,5	22,7	86,7
	9	92,7	1,1	-11,5	125,1	1,5	-15,5	16,5

Tab. 5-10: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez V - vápence.

Podrobné posúdenie na šmyk: 6

Použitý model náhradnej priehradoviny

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_C = 0,18 / 1,5 = 0,12$$

$$k = \min(1 + \sqrt{(200 / d)}; 2) = \min(1 + \sqrt{(200 / 169,9)}; 2) = 2$$

$$\rho_l = \min(A_{sl} / (b_w \times d); 0,02) = \min(1\,696 / (1\,000 \times 167); 0,02) = 0,0102$$

$$v_{min} = 0,035 \times k^{1,5} \times \sqrt{f_{ck}} = 0,035 \times 2^{1,5} \times \sqrt{20} = 0,443 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \min(-N_{Ed} / A_c; 0,2 \times f_{cd}) = \min(-(-399,9) / 200 \cdot 10^3; 0,2 \times 11,33) = 1,999 \text{ MPa}$$

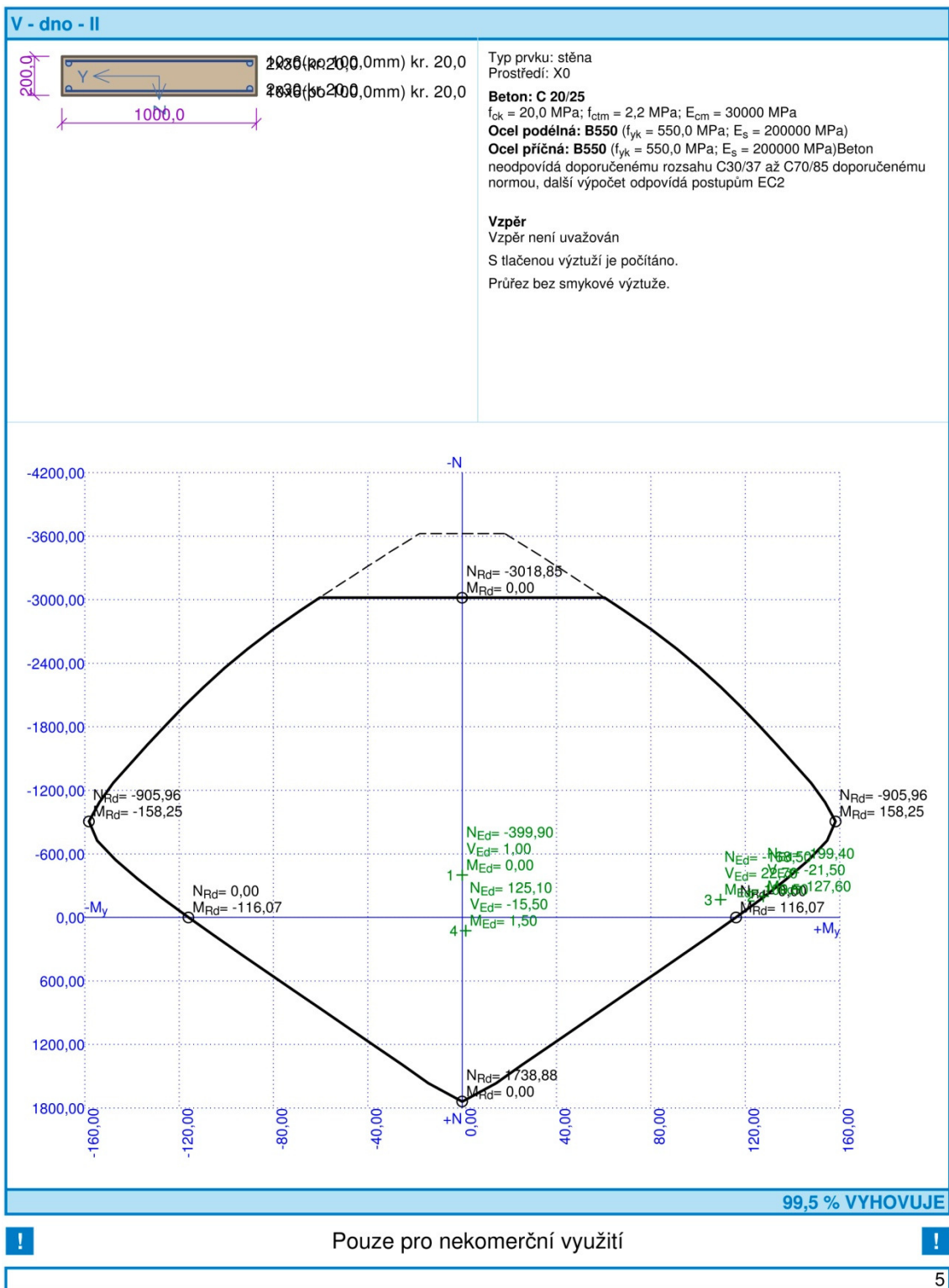
$$V_{Rdc} = (\max(C_{Rd,c} \times k \times \sqrt[3]{(100 \times \rho_l \times f_{ck}); v_{min}}; v_{min}) + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d =$$

$$(\max(0,12 \times 2 \times \sqrt[3]{(100 \times 0,0102 \times 20); 0,443}) + 0,15 \times 1,999) \times 1\,000 \times 167 =$$

159,5 kN

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	6	-399,90	-3623,83	0,00	-139,57	1,00	159,45	11,0	Vyhovuje
2	7	-199,40	-1770,16	127,60	128,20	-21,50	-134,34	99,5	Vyhovuje
3	8	-168,50	-2177,20	109,50	126,37	22,70	130,47	86,7	Vyhovuje
4	9	125,10	1713,27	1,50	108,18	-15,50	-93,70	16,5	Vyhovuje

Tab. 5-11: Využitie prierezu V - dno.



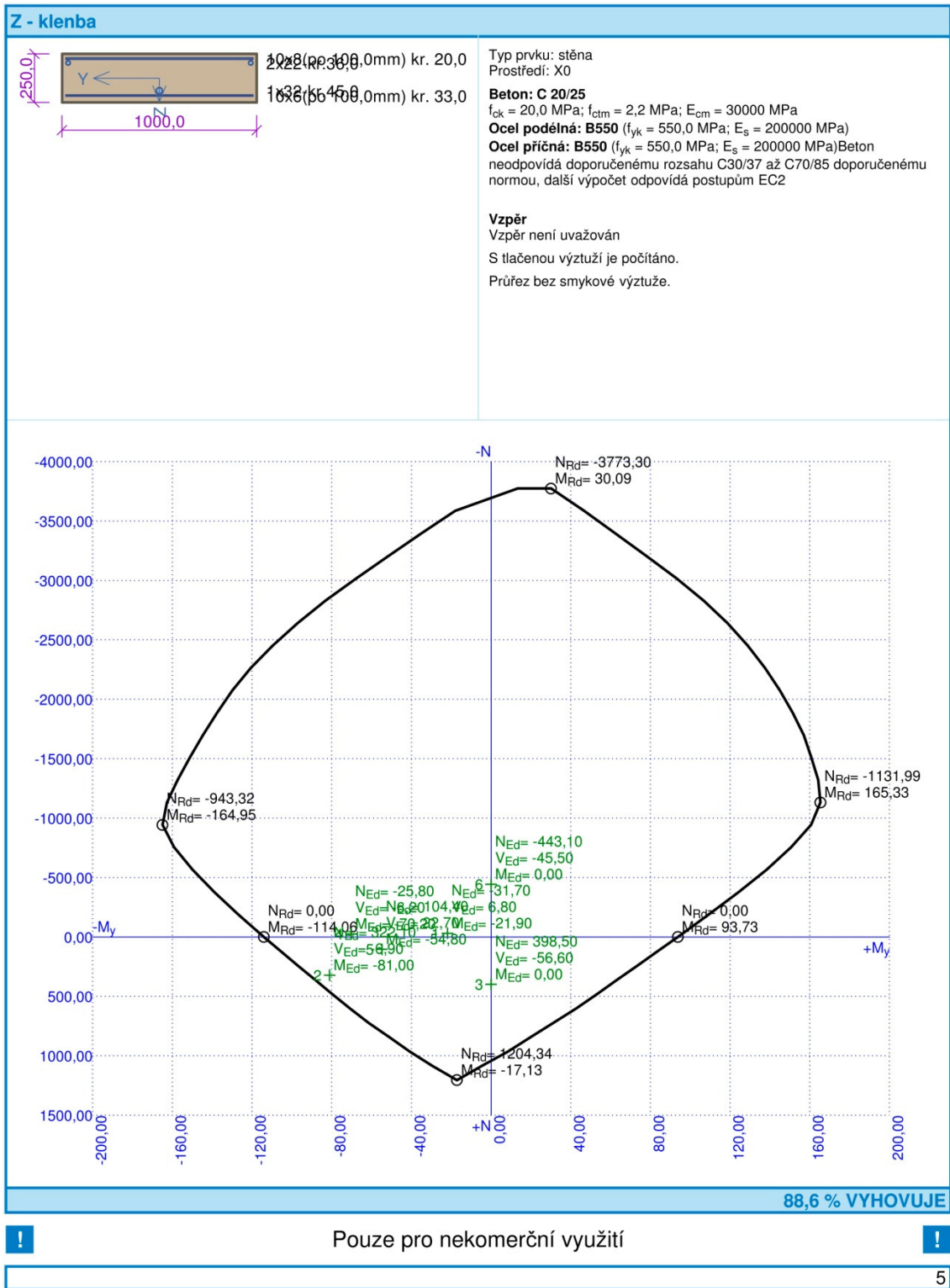
Obr. 5-41: Interakční diagram V - dno.

Rez Z	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_G=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	1	-17,7	-14,9	4	-23,9	-20,1	5,4	17,4
	2	238,6	-60	-5,1	322,1	-81,0	-6,9	88,3
	3	295,2	0	-41,9	398,5	0,0	-56,6	88,6
	4	-19,1	-52	-4,6	-25,8	-70,2	-6,2	60,6
	5	77,3	-40,6	16,8	104,4	-54,8	22,7	50,7
	6	-326,6	0	-32,4	-440,9	0,0	-43,7	25,6
2	1	-23,5	-16,2	5	-31,7	-21,9	6,8	18,9
	2	229,8	-59,6	-4,6	310,2	-80,5	-6,2	86,9
	3	285,7	0	-41,7	385,7	0,0	-56,3	86,0
	4	-19,9	-51,9	-4,6	-26,9	-70,1	-6,2	60,5
	5	67,9	-40,7	16,9	91,7	-54,9	22,8	50,4
	6	-328,2	0	-33,7	-443,1	0,0	-45,5	26,6

Tab. 5-12: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez Z – zlom.

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	1	-31,70	-3543,14	-21,90	-116,26	6,80	118,61	18,9	Vyhovuje
2	2	322,10	461,69	-81,00	-91,09	-6,90	-73,57	88,3	Vyhovuje
3	3	398,50	1044,96	0,00	60,07	-56,60	-63,85	88,6	Vyhovuje
4	4	-25,80	-2987,59	-70,20	-115,85	-6,20	-117,86	60,6	Vyhovuje
5	5	104,40	799,61	-54,80	-106,70	22,70	101,29	50,7	Vyhovuje
6	6	-443,10	-3758,20	0,00	-142,96	-45,50	-170,98	26,6	Vyhovuje

Tab. 5-13: Využitie prierezu Z - klenba.



Obr. 5-42: Interakční diagram Z - klenba.

Rez Z	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_C=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	7	-185,7	0	184,7	-250,7	0,0	249,3	6,6
	8	-49,7	79,2	5,4	-67,1	106,9	7,3	92,5
	9	19,5	70,3	-4,1	26,3	94,9	-5,5	87,7
	10	130,8	2,7	-1,7	176,6	3,6	-2,3	14,8
2	7	-188,2	0	185,2	-254,1	0,0	250,0	6,7
	8	-53,1	79,4	5,4	-71,7	107,2	7,3	92,4
	9	11,4	72,5	-5,2	15,4	97,9	-7,0	89,8
	10	123,7	3	-1,3	167,0	4,1	-1,8	13,9

Tab. 5-14: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez Z - zlom.

Podrobné posúdenie na šmyk: 7

Použitý model náhradnej priehradoviny

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_C = 0,18 / 1,5 = 0,12$$

$$k = \min(1 + \sqrt{(200 / d)}; 2) = \min(1 + \sqrt{(200 / 209,4)}; 2) = 1,977$$

$$\rho_l = \min(A_{sl} / (b_w \times d); 0,02) = \min(1\,043 / (1\,000 \times 209,4); 0,02) = 0,00498$$

$$v_{min} = 0,035 \times k^{1,5} \times \sqrt{f_{ck}} = 0,035 \times 1,977^{1,5} \times \sqrt{20} = 0,435 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \min(-N_{Ed} / A_c; 0,2 \times f_{cd}) = \min(-(-254,1) / 250 \cdot 10^3; 0,2 \times 11,33) = 1,016 \text{ MPa}$$

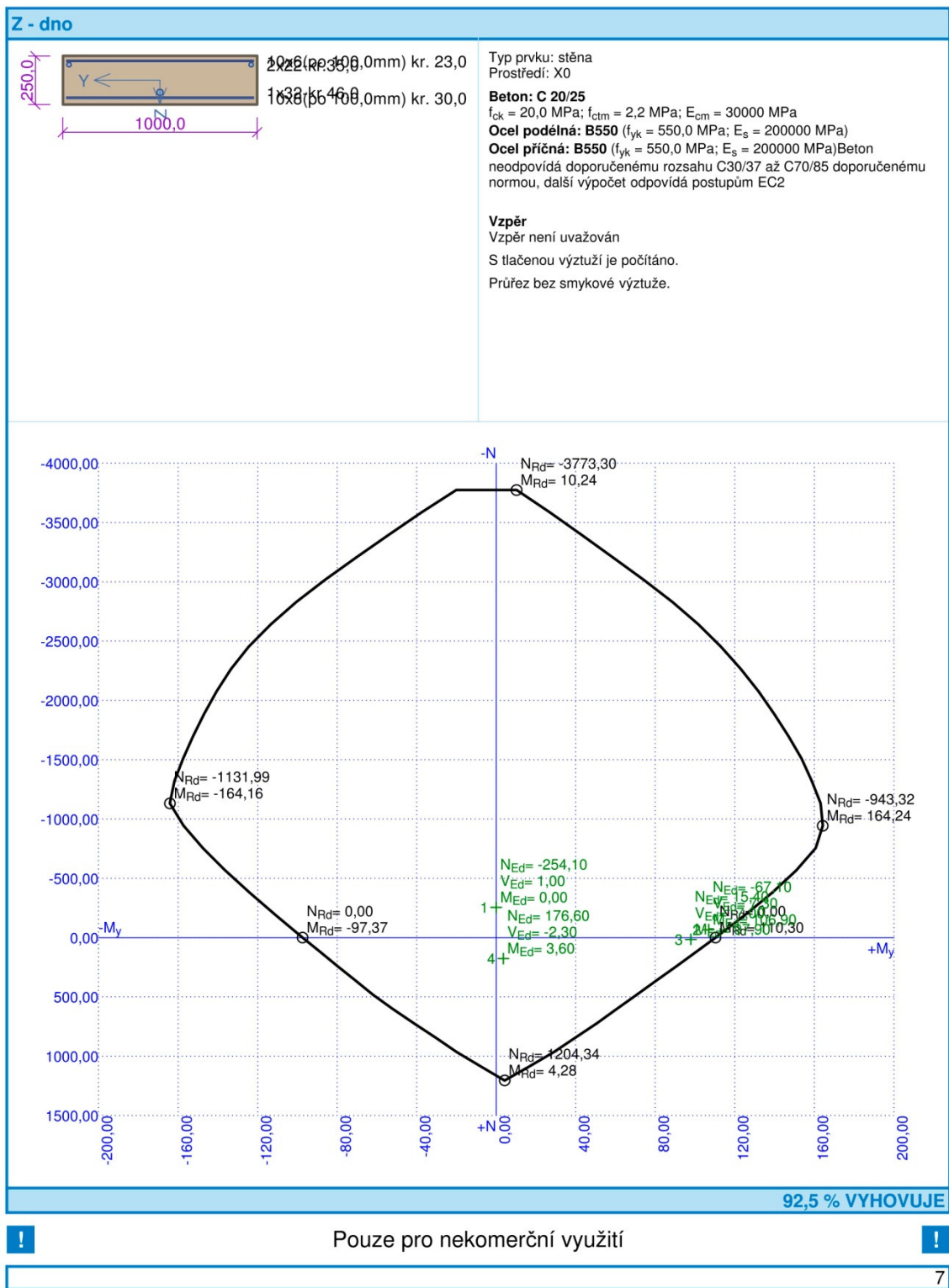
$$V_{Rdc} = (\max(C_{Rd,c} \times k \times \sqrt[3]{(100 \times \rho_l \times f_{ck}); v_{min}}) + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d =$$

$$(\max(0,12 \times 1,977 \times \sqrt[3]{(100 \times 0,00498 \times 20)}; 0,435) + 0,15 \times 1,016) \times 1\,000 \times 209,4 =$$

138,8 kN

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	7	-254,10	-3773,30	0,00	129,96	1,00	138,84	6,7	Vyhovuje
2	8	-67,10	-2557,76	106,90	115,63	7,30	120,61	92,5	Vyhovuje
3	9	15,40	152,66	97,90	109,06	-7,00	-110,77	89,8	Vyhovuje
4	10	176,60	1193,85	3,60	95,93	-2,30	-91,54	14,8	Vyhovuje

Tab. 5-15: Využitie prierezu Z - dno.



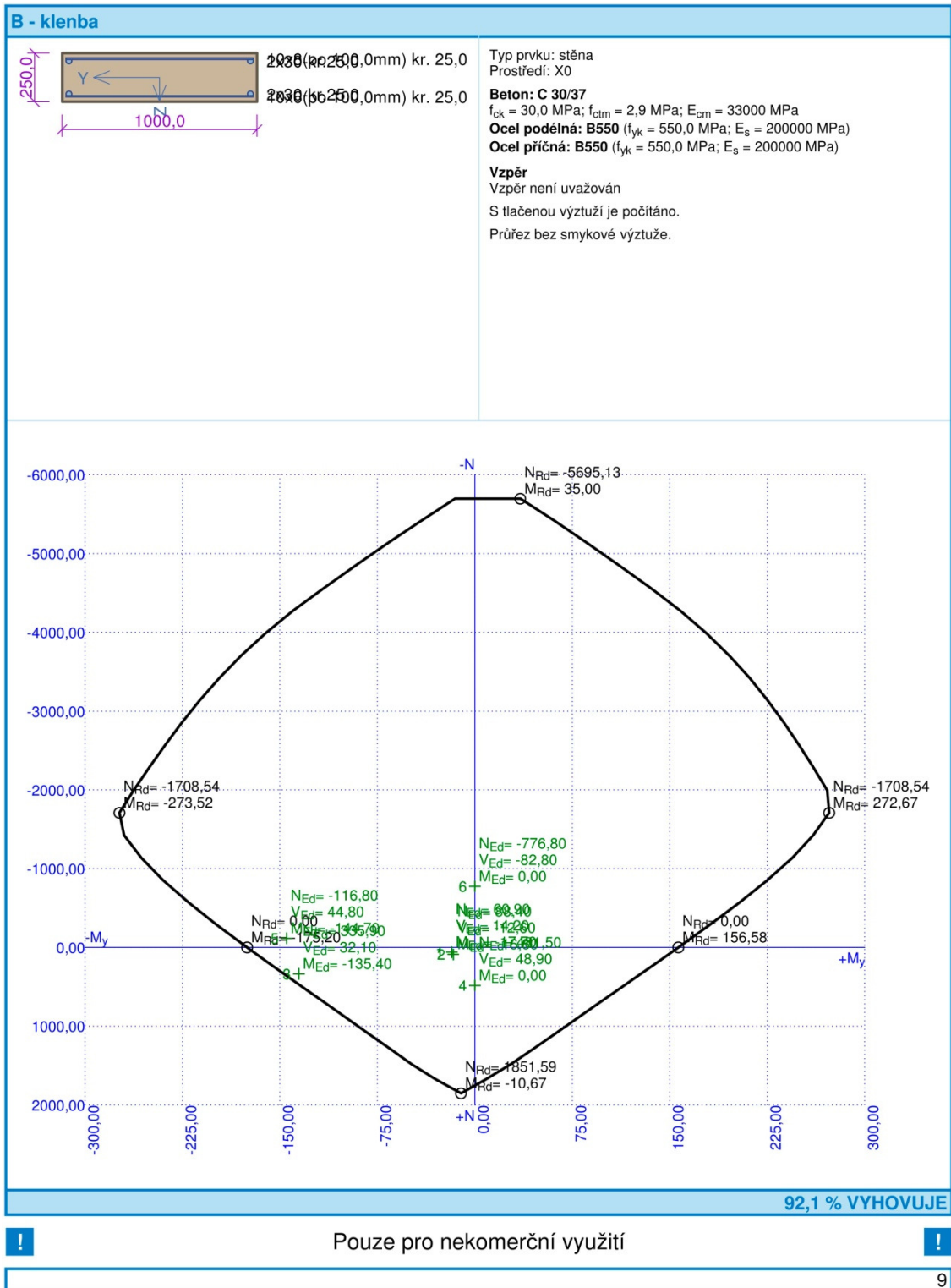
Obr. 5-43: Interakční diagram Z - dno.

Rez B	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_G=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	1	45,1	-13,1	10,5	60,9	-17,7	14,2	10,2
	2	65,5	-12,3	-9,3	88,4	-16,6	-12,6	9,6
	3	248,8	-100,3	23,8	335,9	-135,4	32,1	92,1
	4	356,7	0	36,2	481,5	0,0	48,9	54,7
	5	-86,5	-107,2	33,2	-116,8	-144,7	44,8	78,3
	6	-505,1	0	-49,7	-681,9	0,0	-67,1	28,2
2	1	-33,2	-9,1	11,6	-44,8	-12,3	15,7	10,0
	2	-15	-8,3	-10,2	-20,3	-11,2	-13,8	9,0
	3	133,8	-101,6	-27,2	180,6	-137,2	-36,7	85,6
	4	241,2	0	37	325,6	0,0	50,0	45,7
	5	-195	-108,1	32,6	-263,3	-145,9	44,0	74,2
	6	-575,4	0	-61,3	-776,8	0,0	-82,8	33,1

Tab. 5-16: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez B - bridlice.

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	1	60,90	1775,13	-17,70	-170,12	14,20	143,15	10,2	Vyhovuje
2	2	88,40	1784,14	-16,60	-167,81	-12,60	-139,64	9,6	Vyhovuje
3	3	335,90	469,95	-135,40	-146,86	32,10	108,03	92,1	Vyhovuje
4	4	481,50	1743,14	0,00	115,04	48,90	89,43	54,7	Vyhovuje
5	5	-116,80	-4211,79	-144,70	-184,83	44,80	165,85	78,3	Vyhovuje
6	6	-776,80	-5695,13	0,00	-234,80	-82,80	-250,16	33,1	Vyhovuje

Tab. 5-17: Využitie prierezu B - klenba.



[FIN EC - Beton (studentská licence) | verze 11.5.11.0 | hardwarový klíč 1528 / 1 | Závacký Martin | Copyright © 2015 Fine spol. s r.o. All Rights Reserved | www.fine.cz]

Obr. 5-44: Interakční diagram B - klenba.

Rez B	prierez	Charakteristické hodnoty			Návrhové hodnoty ($\gamma_C=1,35$)			využitie
ZS		N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	N [kN]	M [kNm]	Q [kN]	[%]
1	7	-310,5	0	279,6	-419,2	0,0	377,5	96,0
	8	-92,2	127,4	-3,4	-124,5	172,0	-4,6	81,4
	9	-63,1	114,9	3,4	-85,2	155,1	4,6	74,5
	10	223,6	18,7	11,4	301,9	25,2	15,4	15,0
2	7	-357,9	0	-318,9	-483,2	0,0	-430,5	8,3
	8	-136,9	148,6	4,1	-184,8	200,6	5,5	92,8
	9	-94,6	127,3	-0,9	-127,7	171,9	-1,2	81,3
	10	189	25,7	-13	255,2	34,7	-17,6	17,8

Tab. 5-18: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez B - bridlice.

Podrobné posúdenie na šmyk: 7

Použitý model náhradnej priehradoviny

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_C = 0,18 / 1,5 = 0,12$$

$$k = \min(1 + \sqrt{(200 / d)}; 2) = \min(1 + \sqrt{(200 / 213,6)}; 2) = 1,968$$

$$\rho_l = \min(A_{sl} / (b_w \times d); 0,02) = \min(2\,224 / (1\,000 \times 213,6); 0,02) = 0,0104$$

$$v_{min} = 0,035 \times k^{1,5} \times \sqrt{f_{ck}} = 0,035 \times 1,968^{1,5} \times \sqrt{30} = 0,529 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cp} = \min(-N_{Ed} / A_c; 0,2 \times f_{cd}) = \min(-(-483,2) / 250 \cdot 10^3; 0,2 \times 17) = 1,933 \text{ MPa}$$

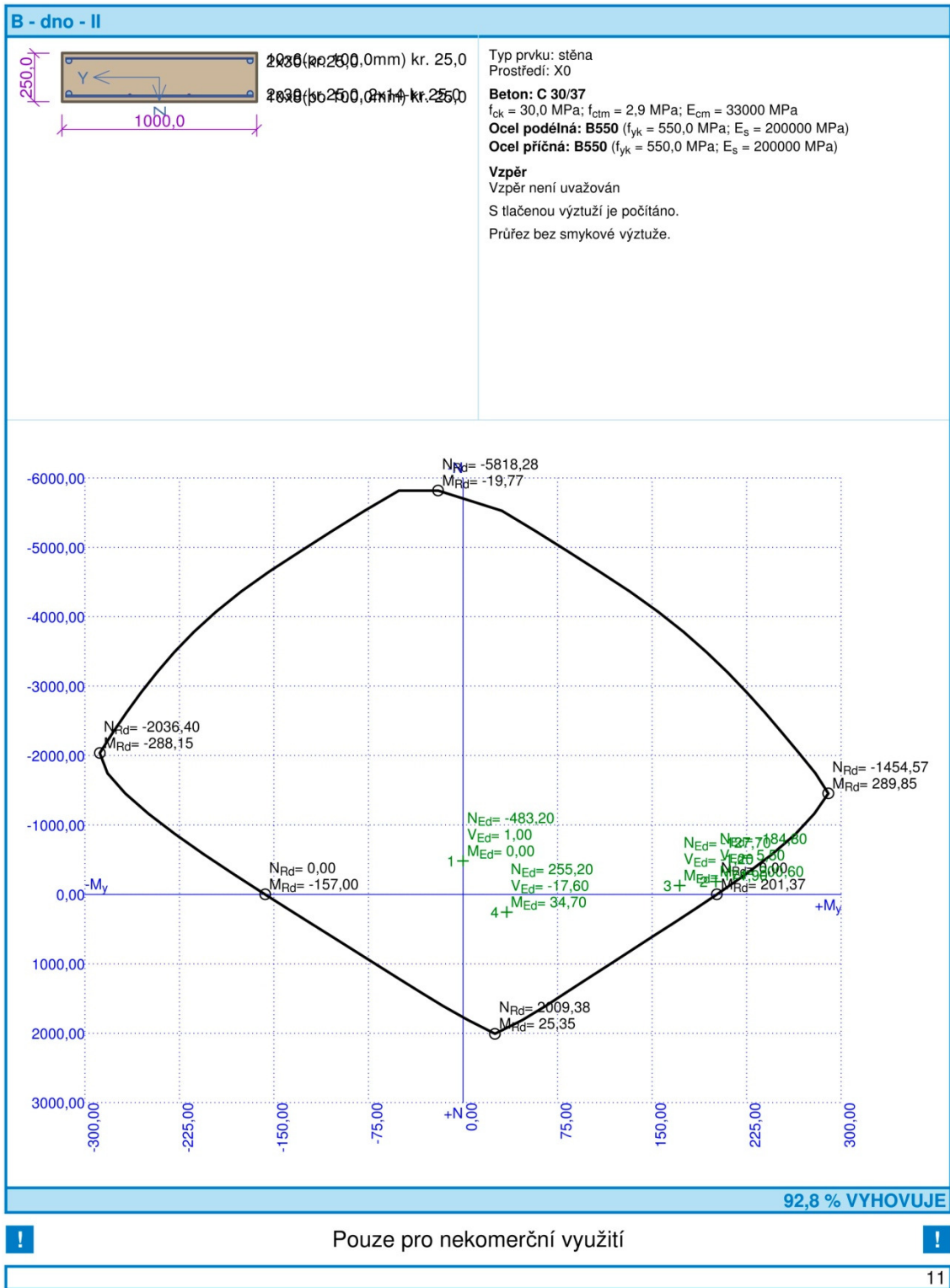
$$V_{Rdc} = (\max(C_{Rd,c} \times k \times \sqrt[3]{(100 \times \rho_l \times f_{ck}); v_{min}}) + k_1 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d =$$

$$(\max(0,12 \times 1,968 \times \sqrt[3]{(100 \times 0,0104 \times 30)}; 0,529) + 0,15 \times 1,933) \times 1\,000 \times 213,6 =$$

220,8 kN

č.	Název	NEd [kN]	NRd [kN]	MEdy [kNm]	MRdy [kNm]	VEdz [kN]	VRdz [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	7	-483,20	-5811,50	0,00	238,49	1,00	220,77	8,3	Vyhovuje
2	8	-184,80	-3364,74	200,60	216,10	5,50	182,52	92,8	Vyhovuje
3	9	-127,70	-3828,05	171,90	211,61	-1,20	-175,21	81,3	Vyhovuje
4	10	255,20	1913,52	34,70	180,34	-17,60	-126,13	17,8	Vyhovuje

Tab. 5-19: Využitie prierezu B - dno.



Obr. 5-45: Interakční diagram B - dno.

6. TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Pre urýchlenie a zefektívnenie postupu sa navrhuje razenie oboch tunelov súbežne a z oboch portálov. Hlavné zariadenie staveniska je vhodné situovať k juhozápadnému portálu, kde je viac priestoru a lepšia dopravná dostupnosť. Samotné razenie by malo začať tiež odtiaľto, pretože sa jedná o dovrchný postup, ktorý je výhodný z pohľadu odvodnenia. Dĺžkový odstup čelieb sa odporúča ponechať minimálne 30 m z dôvodu ochrany čerstvo nastriekaného betónu na ostení pred otrasmi pri trhacích prácach v susednej rúre [10].

Razenie zo severovýchodného portálu urýchli výstavbu, ale je menej priaznivé (postup v úpadnici), a preto je prioritný postup z opačného smeru a prerážka aspoň jednej tunelovej rúry. Vetranie s prívodom čerstvého vzduchu na čelbu sa potom zjednoduší a zefektívni. Prerážka prinesie aj zlepšenie podmienok pre odvodnenie, kedy už nebude potrebné prípadnú priesakovú vodu zo severovýchodných čelieb odčerpávať, ale budú sa dať využiť spádové pomery projektovaného tunela.

Pre zlepšenie obsluhy stavby v podzemí sa navrhuje zväčšenie každého druhého bezpečnostného prepojenia tunelov na profil umožňujúci prejazd strojov medzi tunelovými rúrami.

6.1 Razenie – vápence

Základná dĺžka záberu je uvažovaná jednotne 1 m, ktorú je možné upraviť podľa aktuálnych výsledkov z geomonitoringu. Predpokladaná je trieda výrubu 3 až 4. Postup razenia je nasledovný:

- a) Vrtanie čelby kaloty počítačovo riadeným vrtacím vozom. Predbežný návrh vrtnej schémy je vyhotovený na základe NTNU modelu [14] a nachádza sa vo výkrese 7.
- b) Nabíjanie vrtov a odpal s časovaním uvedeným vo vrtnej schéme.
- c) Odvetranie prachu a škodlivín po odpale prívodom čerstvého vzduchu na čelbu.
- d) Nakladanie rúbaniny lopatovým nakladačom a odvoz na medziskládku mimo tunela.

- e) Profilovanie výrubu a odstránenie uvoľnenej horniny tunelbagrom a očistenie povrchu skaly od prachu prúdom vody.
- f) Montáž priehradových oblúkov a prvej vrstvy výstužných sietí.
- g) Striekanie prvej vrstvy betónu primárneho ostenia v hrúbke 100 mm. Použitie mokrého spôsobu nanášania zmesi s urýchľovačmi tvrdnutia.
- h) Vŕtanie a inštalácia hydraulicky upínaných svorníkov dĺžky 3 m.
- i) Osadenie druhej vrstvy výstužných sietí a zastriekanie druhou vrstvou betónu hrúbky 100 mm.
- j) Geodetická kontrola geometrie.
- k) S odstupom 30 až 50 m obdobným spôsobom, avšak bez inštalácie svorníkov, prebehne dobratie lávky a uzavretie dna protiklenbou zo striekaného betónu. Tu je možné postupovať v dlhších záberoch, ako pri razení kaloty.

Pre lepšiu názornosť je postup zobrazený aj na výkrese 7.

6.2 Razenie – bridlice

Základná dĺžka záberu je uvažovaná jednotne 1 m, ktorú je možné upraviť podľa aktuálnych výsledkov z geomonitoringu. Predpokladaná je trieda výrubu 4 až 5. Postup razenia je nasledovný:

- a) Rozpojovanie hornín v čelbe pomocou výložníkovej frézy. Odporúča sa použitie frézy s otáčaním hlavy okolo pozdĺžnej osi. Súčasne prebieha nakladanie a odvoz rúbaniny dumpermi. Pre zníženie prašnosti je možné kropiť rozpojovanú horninu. V prípade potreby sa môže ponechať oporné jadro z nevyťaženej horniny v kalote na zvýšenie stability výrubu.
- b) Montáž priehradových oblúkov a prvej vrstvy výstužných sietí.
- c) Striekanie prvej vrstvy betónu primárneho ostenia v hrúbke 150 mm. Použitie mokrého spôsobu nanášania zmesi s urýchľovačmi tvrdnutia.
- d) Vŕtanie a inštalácia hydraulicky upínaných svorníkov dĺžky 3 m.
- e) Osadenie druhej vrstvy výstužných sietí a zastriekanie druhou vrstvou betónu hrúbky 100 mm.

- f) Geodetická kontrola geometrie.
- g) S odstupom 30 až 50 m rovnakým spôsobom prebehne dobratie lávky a inštalácia primárneho zabezpečenia. Je možné použiť dlhší záber, než v kalote.
- h) Dobratie lávky a uzavretie dna protiklenbou zo striekaného betónu prebehne s odstupom 30 až 50 m už bez inštalácie svorníkov. Dá sa opäť postupovať v dlhších záberoch.

Pre lepšiu názornosť je postup zobrazený aj na výkrese 7.

6.3 Sekundárne ostenie

Sekundárne ostenie je možné začať budovať ešte pred ukončením razenia. Pri dvoch súbežných tunelových rúrach tento proces nespôsobí príliš veľké obmedzenia v organizácii raziacich prác. Začiatok procesu bude situovaný k juhozápadnému portálu pri hlavnom zariadení staveniska. Použije sa jeden debniaci voz dĺžky 10 m, ktorý sa po prechode jednou tunelovou rúrou presunie na severovýchodnom portáli do druhej rúry, v ktorej sa medzičasom dokončí razenie. Postup budovania je nasledovný:

- a) Vyčistenie a úprava povrchu primárneho ostenia – odstránenie vyčnievajúcich častí a príp. nastriekanie vyrovnávacej vrstvy z jemnozrnného betónu (max. \varnothing 8 mm). Kontrola geometrie.
- b) Umiestnenie drenážnej vrstvy pod hydroizoláciu.
- c) Inštalácia otvoreného systému hydroizolácie zo zváraných fólií a pozdĺžnej drenáže.
- d) Osadenie betonárskej výstuže sekundárneho ostenia.
- e) Umiestnenie a uzavretie debniaceho vozu.
- f) Betonáž a zhutňovanie ukladanej zmesi. Treba dbať na dôkladné odvzdušnenie a vyplnenie priestoru vo vrchole klenby.
- g) Po dostatočnom zatuhnutí betónu oddebnenie a presun vozu na ďalší pás ostenia.

6.4 Geomonitoring

Geotechnický monitoring je nepostrádateľnou súčasťou razenia tunelov NRTM. Slúži na kontrolu správnosti geomechanického modelu a jeho výstupov použitých pri návrhu stavby. Taktiež sa aktuálne výsledky meraní dajú uplatniť pri optimalizácii postupu razenia a prvkov zabezpečenia výrubu. V neposlednom rade je úlohou geomonitoringu včas zachytiť a upozorniť na prípadné problémy v odozve horninového masívu na budovanie tunela a predísť tak havárii. Monitoring je komplexná činnosť, ktorá sa skladá z rôznych úloh. Ďalej budú spomenuté tie, ktoré je vhodné na riešenej stavbe uplatniť.

Dôležitá je inžiniersko-geologická dokumentácia čelby po každom novom zábere. Popisujú sa typy hornín, hlavné plochy nespojitosti a ich vlastnosti, taktiež vývery podzemnej vody, ak sa vyskytujú. K tejto činnosti náleží aj dokumentácia nadvýlomov a zaradenie výrubu do príslušnej technologickej triedy. Niekedy sa odoberajú vzorky hornín na kontrolné skúšky.

V tuneloch sa ďalej merajú konvergenencie. V súčasnosti sa uprednostňuje geodetické meranie pred použitím pásma. Odporúča sa umiestňovať meracie profily v 10 až 15-násobku dĺžky záberu [10], pričom prvé meranie by malo prebehnúť čo najskôr, pretože konvergencia sa objavuje čiastočne už pred čelbou.

Sledovanie pretvorenia horninového masívu sa realizuje extenzometrami zvislo z povrchu, ak je to možné, alebo vejárovito z tunela. Je vhodné použiť jadrové vrty s podrobným popisom a upínať extenzometre aj s ohľadom na vyskytujúce sa diskontinuity [15]. Nadložie tunela nie je príliš vysoké, čo dovoľuje realizáciu meraní z povrchu po väčšine dĺžky. Meracie profily je vhodné osádzať v blízkosti problematických miest (poruchové zóny) a v miestach reprezentujúcich jednotlivé kvázihomogénne celky.

Potrebné je aj meranie napätí na kontakte horninového prostredia s primárnym ostením a vo vnútri primárneho ostenia vo vhodne zvolených rezoch pre kontrolu a porovnanie s výsledkami MKP modelovania. Taktiež geodeticky sledovať sadanie na povrchu a stanoviť reálny dosah a priebeh poklesovej kotliny. Ďalej je vhodné použiť inklinometrické vrty v oblasti terénnej deformácie v staničení 76,35 km, kde je riziko svahových deformácií.

Okrem toho sa odporúča sledovať stabilitu výkopov v oblasti portálov a monitorovať hydrogeologické podmienky v okolí stavby a ich možné zmeny, prípadne sledovať seizmické účinky trhacích prác na horninové prostredie a primárne ostenie [10].

Pre podrobný popis a rozsah všetkých činností a meraní v rámci monitoringu je potrebné vytvoriť samostatný realizačný projekt GTM. Na vyhodnotenie výsledkov monitoringu a na prijímanie rozhodnutí z nich vyplývajúcich je vhodné zostavenie nezávislej rady geomonitoringu so zastúpením investora, dodávateľa, projektanta, dodávateľa GTM a prípadne externých expertov [16].

7. TECHNICKÁ SPRÁVA

Riešený tunel T 05 dĺžky 3 180, 293 m začína v staničení 74,049 169 km a končí v staničení 77,229 462 km. Je navrhnutý ako smerovo rozdelený s dvomi samostatnými jednokoľajnými tunelovými rúrami na traťovú rýchlosť 250 km/h.

Smerové riešenie

Osová vzdialenosť koľají je 4,200 m, ktorá sa v tuneli zväčšuje na 20,000 m. Rozšírenie je realizované inflexným motívom s dvomi protismernými oblúkmi s klotoidovými prechodnicami.

ZÚ 73,700 000 km – priama; ZP 73,738 530 km – začiatok inflexného motívu, smerové oblúky $R = 7\,000$ m, dĺžka krajných prechodníc 132,500 m, dĺžka vnútorných prechodníc pri inflexnom bode 132,874 m, KP 74,359 808 km – koniec inflexného motívu; ZP 75,385 189 km – začiatok pravotočivého smerového oblúku $R = 7\,010$ m (pre koľaj č. 1) so symetrickými klotoidovými prechodnicami dĺžky 132,500 m, KP 76,920 956 km – koniec smerového oblúku; ZP 76,938 802 km – začiatok inflexného motívu zužujúceho osovú vzdialenosť koľají na 4,200 m, geometria zhodná s motívom na vjazde do tunela, KP 77,560 081 km – koniec inflexného motívu; KÚ 77,600 000 km – priama až po koniec úseku.

Výškové riešenie

ZÚ 73,700 000 km – niveleta 236,375 m n.m., stúpanie 3,90 ‰ v dĺžke 3 750,000 m; 77,450 000 km – niveleta 251,000 m n.m., lom sklonu so zaoblením $R_v = 35\,000$ m, klesanie 2,85 ‰ v dĺžke 150,000 m; KÚ 77,600 000 km – niveleta 250,573 m n.m.

Priečny rez

Použitý je prejazdný profil pre jednokoľajný tunel na elektrifikovanej trati v priamej a oblúku $R \geq 300$ m podľa ČSN 73 7508 s kinematickým obrysom pre vozidlá GC [17]. Celková výška prejazdného prierezu s elektrizačným nástavcom je 6 m.

Tvar ostenia je zložený z kružnicových oblúkov. Vonkajší obrys sekundárneho ostenia tvorí v kalote výseč kružnice 150° s polomerom 3,9 m a stredom v osi koľaje 3,9 m nad niveletou koľaje. V opore sa dotýčnicou napája oblúk $r = 11,4$ m a zvierá uhol

32,1°. Dno uzatvára kružnicová protiklenba so vzopätím 0,55 m. Vnútorný obrys sekundárneho ostenia tvorí v kalote výseč kružnice 150° s polomerom 3,5 m a stredom v osi koľaje 4,0 m nad niveletou koľaje. V opore sa dotýčnicou napája oblúk $r = 9,5$ m a zvierá uhol 36,9°. Dno uzatvára kružnicová protiklenba so vzopätím 0,40 m. Rozmery primárneho ostenia sa vždy odvíjajú od vonkajšieho obrysu sekundárneho ostenia a prispôsobujú sa požiadavkam na zabezpečenie výrubu podľa geotechnických podmienok v danom mieste.

Hrúbka sekundárneho ostenia je plynule premenná. Vo vrchole klenby má 300 mm, v oporách (v najširšom mieste tunela) približne 450 mm a v päte opory 700 mm. Hrúbka dna je 450 mm v osi tunela.

Svetlá výška v osi tunela ohraničená sekundárnym ostením je 9,0 m, maximálna šírka 7,41 m (2,45 m nad niveletou koľaje) a celková svetlá plocha 56,78 m². Svetlý profil po zabudovaní vybavenia tunela zmenší na 49,02 m². To predstavuje pomer priečného rezu vlaku (gabarit C) ku priečnemu rezu tunela (tzv. blockage ratio) 31%.

Železničný zvršok

V celej dĺžke tunela sa navrhuje pevná jazdná dráha konštrukčného systému *Rheda 2000* na železobetónovej doske.

Bezpečnostné opatrenia

Navrhujú sa priečne prepojenia tunelových rúr po vzdialenosti 400 m (presné staničenie vo výkrese 1) opatrené dverami rozmerov 1,4 m x 2,0 m v súlade s požiadavkami TSI pre tunely dlhšie ako 1 km [18]. Svetlý priechodný profil v prepojeniach minimálne 1,5 m x 2,5 m podľa ČSN 73 7508. Ďalej táto norma požaduje obojstranný služobný chodník šírky min. 0,5 m a únikovú cestu pozdĺž vlaku rozmerov 1,2 m x 2,2 m [17]. Toto je zahrnuté v prejazdnom profile, na ktorý je tunel navrhnutý. Bezpečnostné výklenky vzhľadom na vysokú rýchlosť prechádzajúcich súprav strácajú účinnosť, preto sa nenavrhujú.

Počas výstavby je potrebné dodržiavať všeobecné zásady a predpisy BOZP a taktiež dbať na špecifické predpisy týkajúce sa práce v podzemí, ako v istom zmysle zvláštnom prostredí, ktoré určuje napríklad ČBÚ.

Výkaz výmer

Nasledujúca tabuľka obsahuje približnú kalkuláciu spotreby použitých základných stavebných materiálov a objemu rúbaniny.

Materiál	Množstvo	Jednotky
Výrub celkový	243 542	m ³
Výrub – vápence	96 225	m ³
Výrub - bridlice	147 317	m ³
Betón liaty (sekundárne ostenie)	78 448	m ³
Betón striekaný	45 542	m ³
HUIS dl. 3 m	27 984	ks
Fóliová hydroizolácia	137 046	m ²
Pevná jazdná dráha (Rheda 2000)	6 360	m

Tab. 7-1: Výkaz výmer.

8. ZÁVER

Cieľom predloženej práce bolo vytvorenie koncepcnej štúdie pre projekt železničného tunela na plánovanej vysokorýchlostnej trati. Vstupné informácie čerpá len z dostupných archívnych údajov starších prieskumov zameraných na iné účely. Aj z tohto dôvodu nebolo možné rozpracovať projekt detailne. Zároveň je potrebné overiť použité predpoklady a z nich vyplývajúce výsledky v prípade ďalšieho pokračovania na príprave tejto stavby.

Za prínos možno považovať zhrnutie doterajších poznatkov o lokalite a získanie rámcového obrazu o geotechnických podmienkach, ktoré je možné očakávať. Po vyhodnotení vstupných informácií boli určené rizikové faktory (krasové javy, poruchové zóny, stabilita výrubu) a vybratá NRTM ako vhodná technológia razenia. Následne bol principiálne navrhnutý technologický postup výstavby a vytipované priečne rezy charakterizujúce geotechnické pomery, na ktorých bola MKP modelovaním overená realizovateľnosť tohto postupu. Výstupy z modelovania boli ďalej použité na návrh primárneho ostenia.

Výsledky práce je možné použiť na prvotný odhad času potrebného na výstavbu, kalkuláciu spotreby materiálu a teda aj objemu financií, ktoré si vyžaduje zvolený variant. Predložená diplomová práca poukazuje na problematické miesta, kam je potrebné sústrediť nové prieskumné práce. Za úvahu však stojí prehodnotenie dĺžky tunela. Takto navrhované riešenie trasy vyplývajúce z podkladov síce umiestňuje portály hlbšie do skalného masívu, kde sa dajú očakávať kvalitnejšie horniny, no na druhej strane si vyžaduje rozsiahle zemné a zabezpečovacie práce na povrchu. Napríklad predĺženie o hĺbené úseky by mohlo byť výhodnejšie nielen technicky a ekonomicky, ale určite aj z pohľadu menšieho zásahu do krajiny.

Celkom na záver zostáva už len vyjadrenie nádeje, že vysokorýchlostné železnice v našich končinách nebudú len na papieri, ale čoskoro sa dočkajú aj svojej realizácie a téma tejto práce sa tak bude dať rozšíriť a prakticky uplatniť.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *Železniční tunely v Česku* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Železniční_tunely_v_Česku.
- [2] ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ. *Základní mapa České republiky 1:25 000* [.tif]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, ©2010.
- [3] Česká geologická služba, Databáze geologicky dokumentovaných objektů. Geologická dokumentácia vrto: 468872, 470168, 470174. Hydrogeologické údaje objektov: M33095DB0275, M33095DB0120.
- [4] HORÁKOVÁ, K. *Geomorfologické poměry Tršicka*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geografie, 2014. 41 s. Vedúci bakalárskej práce doc. RNDr. Irena Smolová, Ph.D.
- [5] *Geomorfologické členenie Česka* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Geomorfologické_členenie_Česka.
- [6] ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. *Geologická mapa 1:50 000* [online]. 2014 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: mapy.geology.cz/geocr_50/.
- [7] DVOŘÁK, Arnošt. *Mapa seismických oblastí a hlavních zemětřesení pozorovaných v ČSSR v období 1756 – 1956*. 1: 1 500 000. Praha: Ústav stavební geologie, 1956. 270 mm × 520 mm.
- [8] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [9] HILAR, M. *Příprava a výstavba dlouhých železničních tunelů*. Praha, 2008. 138 s. Habilitačná práca.
- [10] KLEPSATEL, F.-KUSÝ, P.-MAŘÍK, L. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vydanie. Bratislava: Jaga group, 2003. 215 s. ISBN 80-88905-43-5.

- [11] FINE s.r.o. *Numerické modelování tunelu metodou NRTM* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/inzenyrske-manualy/>.
- [12] ČSN EN 1992-1-1 ed 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 202 s.
- [13] ČSN EN 1992-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 90 s.
- [14] SHOKROLLAH, Z. *Report 2A-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING Blast Design*. Trondheim: NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006. 70 s. ISBN 978-82-471-2839-8.
- [15] ROZSYPAL, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. 1. vydanie. Bratislava: Jaga group, 2001. 198 s. ISBN 80-88905-44-3.
- [16] Členové pracovní skupiny ČTuK pro konvenční tunelování. *Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/ctuk_02.pdf.
- [17] ČSN 73 7508. *Železniční tunely*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 52 s.
- [18] *TSI Bezpečnost v železničných tuneloch (2008/163/ES)* [online]. 7.3.2008 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008D0163&from=EN>.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratky

2D	rovinné riešenie
BOZP	bezpečnosť a ochrana zdravia pri práci
ČBÚ	Český báňský úrad
ČGS	Česká geologická spoločnosť
GTM	geotechnický monitoring
HPV	hladina podzemnej vody
HUIS	Hydraulicky upínaný svorník
MCS	makroseizmická stupnica účinkov zemetrasenia (Mercalli-Cancani-Sieberg)
MKP	metóda konečných prvkov
NRTM	Nová rakúska tunelovacia metóda
NTNU	Nórska prírodovedecká a technická univerzita (Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet)
RS	rychlá stopa (koridor vysokorýchlostnej železnice)
TBM	plnoprofilový tunelovací stroj (Tunnel Boring Machine)
TSI	technické špecifikácie interoperability
ZS	zaťažovací stav

Symbols

A_k	plocha výrubu zaistená jedným svorníkom
bm	bežný meter
B_t	šírka výrubu tunelovej rúry
c_{ef}	efektívna súdržnosť
c_h	súdržnosť horninového masívu
c_{h+s}	súdržnosť horninového masívu zlepšeného svorníkmi
c_s	príspevok k súdržnosti horninového masívu svorníkmi
d_z	zvislé deformácie
E	modul pružnosti
G	šmykový modul
M	ohybový moment
N	normálová sila
N_u	únosnosť svorníku
Q	priečna sila
γ	objemová tiaž
γ_G	bezpečnostný súčiniteľ pre stále zaťaženie
γ_{Kc}	súčiniteľ spoľahlivosti kotvenia
$\epsilon_{eq,pl}$	ekvivalentné pomerné plastické pretvorenie
ν	Poissonovo číslo
σ_x	horizontálne geostatické napätie
σ_z	zvislé geostatické napätie
φ_{ef}	efektívny uhol vnútorného trenia

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2-1: Umiestnenie tunela na obchvate Přerova.....	11
Obr. 3-1: Geomorfologické členenie Českej republiky.....	13
Obr. 3-2: Výrez z geologickej mapy s vyznačením trasy železnice.	14
Obr. 5-1: Geotechnický profil v reze Z s popísanou geometriou.....	28
Obr. 5-2: Geometria ostenia tunelu v reze V.	29
Obr. 5-3: Geometria ostenia tunelu v reze B a Z.	30
Obr. 5-4: Zvislé deformácie v reze V.	33
Obr. 5-5: Zvislé geostatické napätie v reze V.	34
Obr. 5-6: Horizontálne geostatické napätie v reze V.	35
Obr. 5-7: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze V.	36
Obr. 5-8: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze V.	37
Obr. 5-9: Ohybové momenty a posúvajúce sily v reze V.	38
Obr. 5-10: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.	39
Obr. 5-11: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela... 39	
Obr. 5-12: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.....	39
Obr. 5-13: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.....	40
Obr. 5-14: Priebeh posunov v opore prvého tunela v úrovni členenia výrubu.	40
Obr. 5-15: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v úrovni členenia výrubu. 40	
Obr. 5-16: Zvislé deformácie v reze Z.....	41
Obr. 5-17: Zvislé geostatické napätie v reze Z.	42
Obr. 5-18: Horizontálne geostatické napätie v reze Z.....	43
Obr. 5-19: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze Z.	44
Obr. 5-20: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze Z.	45
Obr. 5-21: Ohybové momenty a posúvajúce sily v ostení v reze Z.....	46
Obr. 5-22: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.	47
Obr. 5-23: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela... 47	
Obr. 5-24: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.....	47
Obr. 5-25: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.....	48
Obr. 5-26: Priebeh posunov v opore prvého tunela v strede výšky lávky.	48

Obr. 5-27: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v strede výšky lávky.	48
Obr. 5-28: Zvislé deformácie v reze B.	49
Obr. 5-29: Zvislé geostatické napätie v reze B.	50
Obr. 5-30: Horizontálne geostatické napätie v reze B.	51
Obr. 5-31: Ekvivalentné plastické pretvorenie v reze B.	52
Obr. 5-32: Kolmé deformácie ostenia a normálové sily v reze B.	53
Obr. 5-33: Ohybové momenty a posúvajúce sily v ostení v reze B.	54
Obr. 5-34: Priebeh sadania nad kalotou v osi prvého tunela.	55
Obr. 5-35: Priebeh zvislého geostatického napätia nad kalotou v osi prvého tunela... ..	55
Obr. 5-36: Priebeh sadania dna v osi prvého tunela.....	55
Obr. 5-37: Priebeh zvislého geostatického napätia pod dnom prvého tunela.....	56
Obr. 5-38: Priebeh posunov v opore prvého tunela v strede výšky lávky.....	56
Obr. 5-39: Priebeh zmeny napätosti v opore prvého tunela v strede výšky lávky.	56
Obr. 5-40: Interakčný diagram V - klenba.	59
Obr. 5-41: Interakčný diagram V - dno.....	61
Obr. 5-42: Interakčný diagram Z - klenba.	63
Obr. 5-43: Interakčný diagram Z - dno.....	65
Obr. 5-44: Interakčný diagram B - klenba.	67
Obr. 5-45: Interakčný diagram B - dno.....	69

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 3-1: Devónske vápence	14
Tab. 3-2: Karbónske droby	15
Tab. 3-3: Karbónske bridlice, droby a prachovce.....	15
Tab. 3-4: Neogénne piesky a štrky	16
Tab. 3-5: Neogénne íly	16
Tab. 3-6: Kvartérne sprašové hliny	17
Tab. 3-7: Kvartérne deluviálne uloženiny.....	17
Tab. 3-8: Geotechnické charakteristiky hornín.....	21
Tab. 5-1: Betón v primárnom ostení.....	27
Tab. 5-2: Zlepšenie svorníkmi.....	27
Tab. 5-3: Geologické rozhrania v MKP modeli.....	28
Tab. 5-4: Parametre kontaktných prvkov v MKP modeli.....	29
Tab. 5-5: Umiestnenie ostenia v MKP modeli podľa bodu 1 [0,00; 0,00].	30
Tab. 5-6: Generovanie siete v MKP modeli.	30
Tab. 5-7: Použité súčinitele na posúdenie ŽB prierezu.....	57
Tab. 5-8: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez V - vápence.	58
Tab. 5-9: Využitie prierezu V - klenba.....	58
Tab. 5-10: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez V - vápence.....	60
Tab. 5-11: Využitie prierezu V - dno.	60
Tab. 5-12: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez Z – zlom.....	62
Tab. 5-13: Využitie prierezu Z - klenba.	62
Tab. 5-14: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez Z - zlom.	64
Tab. 5-15: Využitie prierezu Z - dno.....	64
Tab. 5-16: Návrhové vnútorné sily v klenbe pre rez B - bridlice.....	66
Tab. 5-17: Využitie prierezu B - klenba.....	66
Tab. 5-18: Návrhové vnútorné sily v dne pre rez B - bridlice.	68
Tab. 5-19: Využitie prierezu B - dno.	68
Tab. 7-1: Výkaz výmer.	77

ZOZNAM VÝKRESOV

Výkres 1	Situácia	1: 2 500
Výkres 2	Geologická mapa	1: 15 000
Výkres 3	Geologický profil s pozdĺžnym rezom trate	1: 10 000 / 1 000
Výkres 4	Priečne geologické profily	1: 1 000; 1: 500
Výkres 5	Geofond – prieskumné vrty	1: 150
Výkres 6	Priečny rez tunelu	1: 50
Výkres 7	Technologický výkres postupu razenia	1: 150
Výkres 8	Výkres výstuže	1: 10