



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

PŘEDSTUDIE KONSTRUKCE TRAMVAJOVÉHO TUNELU V BRNĚ

PRELIMINARY STUDY OF THE CONSTRUCTION OF A TRAM TUNNEL IN BRNO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Kuhajdik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV HORÁK, CSc.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Adam Kuhajdik
Název	Předstudie konstrukce tramvajového tunelu v Brně
Vedoucí práce	doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Budou předány vedoucím Bakalářské práce zvlášť.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Obsahem bakalářské práce je předběžný návrh technologie výstavby tramvajového tunelu v Brně. Zvolená varianta výstavby bude doplněná (parametrickou) studií vybraného prvku konstrukce tunelu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Výber vhodnej technológie tunelovania v intraviláne, má zásadný vplyv pre správanie sa okolitých stavieb. V práci sú predstavené základné použiteľné metódy. Vybraná metóda je nasimulovaná v matematickom modeli, ktorého vstupné parametre sú definované podľa geotechnického prieskumu a prepočtom zo statickej penetračnej skúšky. Práca sa ďalej venuje parametrickým porovnaním konštrukčného prvku pri dimenzovaní, horizontálnym a vertikálnym posunom tohto prvku a zjednodušenému porovnaniu cien ocele a betónu pre jednotlivé rozmery prvku. Obsahom tejto práce je aj spätné porovnanie chovania sa konštrukcie v modeli s reálnymi deformáciami, ktoré sú merané inklinometrom in – situ.

KLÚČOVÉ SLOVA

Tunel, metódy tunelovania, podzemné konštrukčné steny, statická penetračná skúška, numerické modelovanie, Plaxis 2D, parametrické porovnanie

ABSTRACT

The selection of a suitable tunneling technology within the territory of the town has an essential impact on behaviour of surrounding buildings. The thesis presents basic applicable methods. The selected method is simulated in a mathematical model whose input parameters are defined according to geotechnical investigation and by calculating from cone penetration test. Furthermore, the thesis deals with parametric comparisons of a constructional element in dimensioning, horizontal and vertical shift of this element and simplified comparison of steel and concrete prices. This thesis also contains re – comparison of construction behaviour within a model with real deformations which are measured using an inclinometer in situ.

KEYWORDS

Tunnel, tunneling methods, diaphragm walls, cone penetration test, numerical modelling, Plaxis 2D, parametric comparison

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Adam Kuhajdik *Předstudie konstrukce tramvajového tunelu v Brně*. Brno, 2022.
66 s., 32 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Předstudie konstrukce tramvajového tunelu v Brně* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2022

Adam Kuhajdik
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Předstudie konstrukce tramvajového tunelu v Brně* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2022

Adam Kuhajdik
autor práce

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Vladislavovi Horákovi, CSc. za odborné rady, poskytnuté podklady a pripomienky pri spracovaní záverečnej práce. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. a Ing. Janovi Koláčkovi, Ph.D. za konzultácie v priebehu spracovania predloženej práce. Veľká vďaka patrí firme Zakládání staveb, a. s. za absolvovanie odbornej stáže a firme GEOTest Brno a.s. za poskytnuté podklady. V neposlednom rade by som sa chcel poďakovať rodine a priateľom za podporu počas celého štúdia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Situácia.....	11
3	Smerové a výškové vedenie trate v tuneli.....	11
4	Prírodné pomery	13
4.1	Geomorfológia.....	13
4.2	Geológia	13
4.3	Hydrológia, hydrogeológia	15
4.4	Geotechnické vlastnosti	15
5	Požiadavky na navrhovaný tunel.....	18
6	Použiteľné metódy pre výstavbu tunela.....	19
6.1	Razené tunely.....	20
6.1.1	Metóda SCL (SPRAYED CONCRETE LINING).....	20
6.1.2	Lasershell™.....	21
6.1.3	Jadrová metóda (Kernbauweise)	22
6.1.4	Zeminový štít (EPB – Earth pressure ballance).....	23
6.2	Hĺbené tunely.....	24
6.2.1	Otvorená stavebná jama – CUT & COVER (C&C)	24
6.3	Kombinované metódy tunelovania.....	26
6.3.1	TOP – DOWN (Modifikovaná Milánska metóda).....	26
6.3.2	Metóda „Želva“	27
6.4	Špeciálne metódy tunelovania.....	29
6.4.1	Hydraulické pretláčanie.....	29
6.4.1.1	Pretláčanie bez zmenšovania trenia.....	30
6.4.1.2	Pretláčanie so zmenšovaním trenia.....	30
6.4.2	Obvodový vrub (PERFOREX).....	31
6.5	Zhrnutie a výber najvhodnejšej tunelovacej metódy pre predĺženie TT	32
7	Teoretické princípy výpočtu.....	34
8	Výpočtový model.....	38
8.1	Geometria matematického modelu	38
8.2	Výpočtové fázy.....	40
8.3	Hodnoty vstupných parametrov.....	42
9	Príprava a postup výpočtu.....	44
9.1	Dimenzovanie vybraného konštrukčného prvku.....	44

9.2	Posuny vybraného konštrukčného prvku.....	45
9.3	Porovnanie matematického modelu so skúškami in – situ	45
9.4	Zjednodušené parametrické porovnanie cien PKS	45
10	Výsledky výpočtu a parametrické porovnanie.....	46
10.1	Výpočet I. dimenzovanie PKS hr. 600 mm	46
10.2	Výpočet II. dimenzovanie PKS hr. 800 mm	48
10.3	Výpočet III. dimenzovanie PKS hr. 1000 mm	50
10.4	Parametrické porovnávanie horizontálnych a vertikálnych posunov.....	52
10.5	Kontrola modelu skúškami IN – SITU.....	53
10.6	Zjednodušené parametrické porovnanie cien PKS	55
11	Záver	57
12	Zoznam použitej literatúry	58
13	Zoznam obrázkov	61
14	Zoznam tabuliek	62
15	Zoznam grafov.....	63
16	Skratky a symboly.....	64
17	Prílohy.....	66
17.1	Zoznam priložených príloh.....	66
17.2	Zoznam samostatných príloh	66
	Príloha P7.1 – Výpočet neodvodnenej šmykovej pevnosti.....	67
	Príloha P7.2 – Stanovenie maximálneho prekonsolidačného napätia v minulosti	68
	Príloha P7.3 – Stanovenie efektívneho modulu tuhosti pri odľahčení a opätovnom priťažení.....	69
	Príloha P7.4 – Stanovenie vlastnosti parametrov zemín do modelu MKP	70
	Príloha P10.1 – Interakčný diagram PKS hr. 600 mm	71
	Príloha P10.2 – Interakčný diagram PKS hr. 800 mm	77
	Príloha P10.3 – Interakčný diagram PKS hr. 1000 mm	83

1 Úvod

Bakalárska práca sa zaoberá predbežným návrhom technológie výstavby a konštrukcie trate pre električky z ulice Osová ku Kampusu Masarykovej Univerzity (MU) v Brne - Bohuniciach. V bakalárskej práci sú predstavené základné typy použiteľných technológií výstavby.

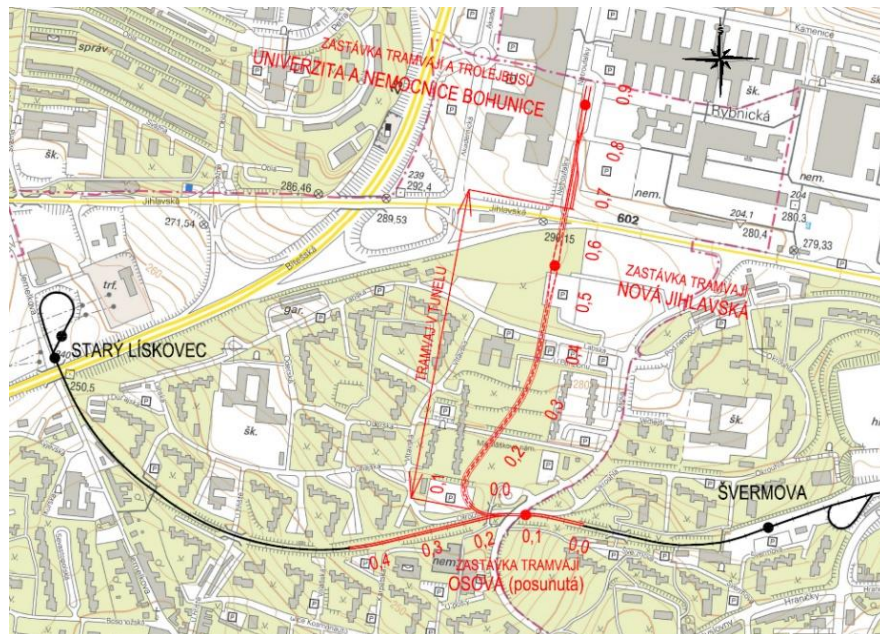
Cieľom predloženej práce je pre zvolený variant výstavby zostaviť matematický model v programe Plaxis 2D. Pre správne simulovanie modelu konštrukcie je potrebné zvoliť vhodné vstupy jednotlivých zemín v danej lokalite. Pre určenie vstupov je využitý podrobný geotechnický prieskum, ktorý bol vykonaný. Následne sú realizované parametrické porovnania.

V prvej časti tejto práce je predstavená rešerš použiteľných metód pre výstavbu tunela v daných podmienkach. Na základe výhod a nevýhod jednotlivých technológií je vybraná najefektívnejšia. V druhej časti sú opísané korelačné princípy stanovenia tuhosti neogénnych ílov zo statickej penetračnej skúšky. Posledná, tretia, časť parametricky porovnáva vybraný konštrukčný prvok z vytvoreného modelu. Porovnávanie sa týka dimenzovania, horizontálnych a vertikálnych posunov, chovanie modelu vs. inklinometrické meranie in – situ a v neposlednej rade aj odhadu jednotkovej ceny.

2 Situácia

Predĺženie trate električky z ulice Osové (začiatok tunela) pokračuje severným smerom medzi vysokými panelovými bytovkami. Následne dráha prechádza popod Mikuláškovú námestí, ulicu U Penziónu, cestu II. triedy Jihlavskou a vychádza paralelne s ulicou Netroufalky medzi Kampusom MU a Fakultnou nemocnicou Brno – Bohunice. V tuneli sa predpokladá vybudovanie zastávky pracovne pomenovanej „Nová Jihlavská“; konečná zástavka bude „Nemocnice Bohunice“.

Táto trasa električky má za úlohu posilniť veľmi zaťaženú dopravnú cestu. Na Univerzitný Kampus MU a do Nemocnice Bohunice smeruje denne viac ako 40 tisíc ľudí a práve predĺženie trate električky má umožniť rýchlejší a ľahší presun do tejto lokality. Vedenie a základné napojenia MHD vid'. Obr. 1. [1, 2]



Obr. 1 Situácia tunela pre električky na trati Osová – Kampus MU [3]

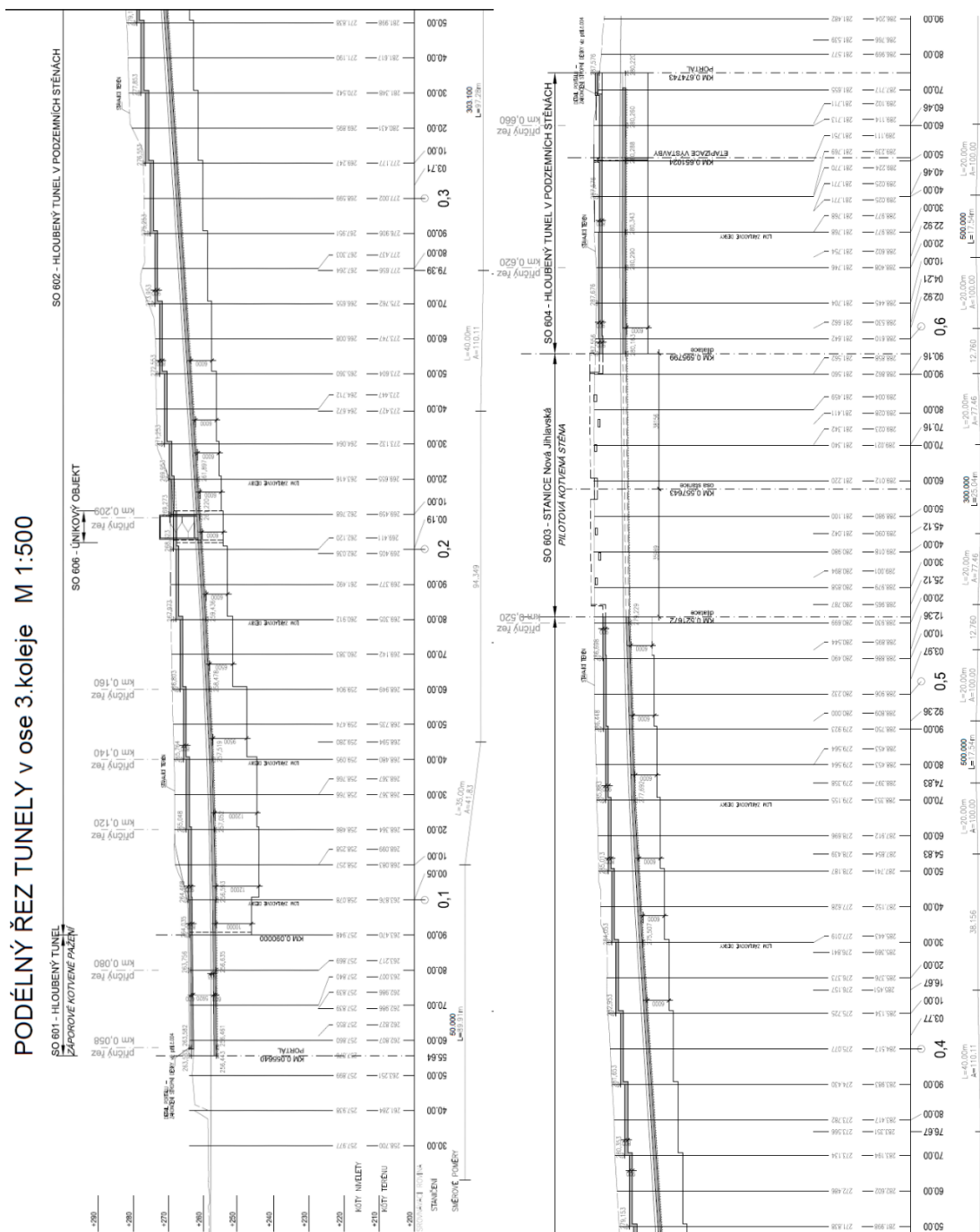
3 Smerové a výškové vedenie trate v tuneli

Popis smerového a výškového vedenia trasy je prevzatý z [4].

Trať sa odpojí v stanici Osová od stávajúcej trate. Ďalej bude vedená v tuneli severným smerom na Kampus MU v približnej dĺžke úseku 670 m. Pri vstupnom portáli začína prudším pravotočivým oblúkom s polomerom iba $R=50,00$ m, po tristo metroch nasleduje ľavotočivý oblúk $R=303,10$ m. Takmer 30 m pred navrhovanou zástavkou „Nová Jihlavská“ bude pravotočivý oblúk $R=500,00$ m, v osi stanice sa

smerové vedenie mení ľavotočivým oblúkom R= 300,00 m a na záver v staničení 0,622 92 km bude jemný pravotočivý oblúk R= 500,00 m.

Tunel začína v nadmorskej výške 256,443 m. n. m. a končí v nadmorskej výške 279,229 m. n. m. Celkovo dráha prekonáva prevýšenie 22,789 m. Priemerný pozdĺžny sklon od južného portálu po plánovaný koniec stanice Nová Jihlavská je 44,38 ‰. Trať pokračuje až po severný portál pozdĺžnym sklonom 0,67 ‰. [4]

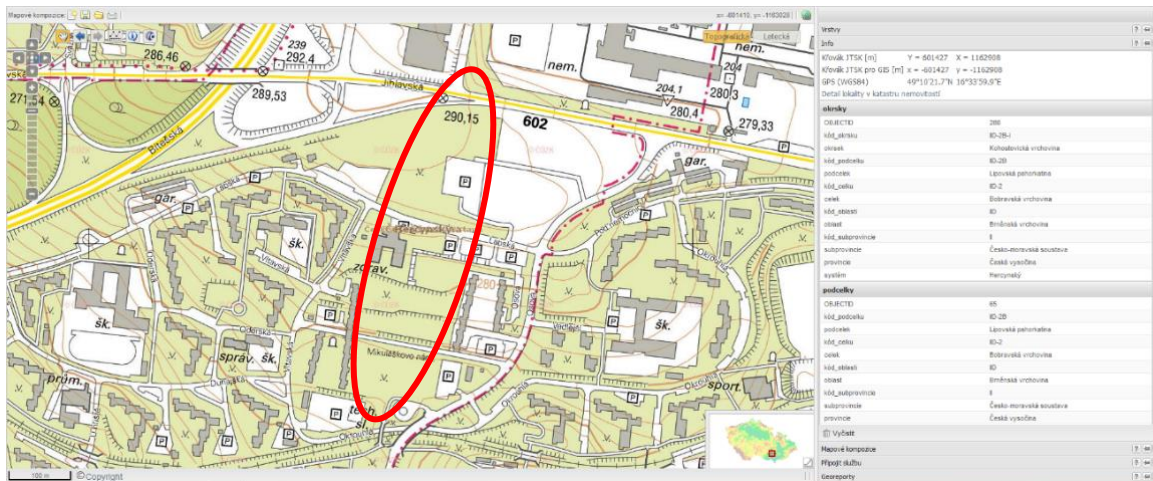


Obr. 2 Pozdĺžny profil predĺženia trate električky [4]

4 Prírodné pomery

4.1 Geomorfológia

Lokalita, v ktorej bude postavený tunel, sa geomorfologicky nachádza na východnom okraji Bobravskej vrchoviny. Trasa tu prebieha kuloárovou zníženinou medzi dvomi komplexnými vyvýšeninami (Baba – Červený kopec) vid'. Základní tvary reliéfu Brněnského prostoru - Ján Krajčí.



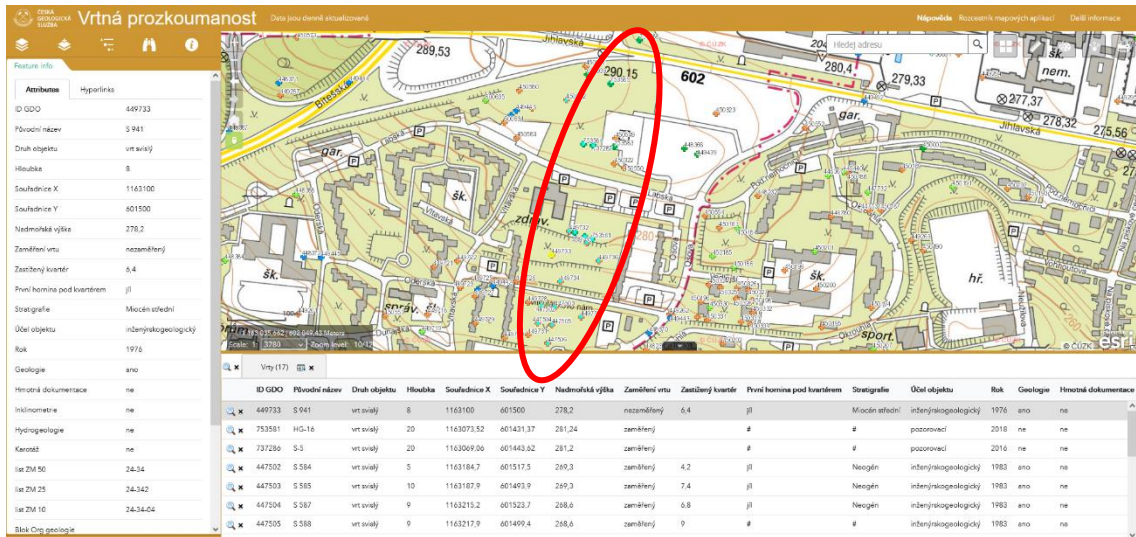
Obr. 3 Geomorfologická mapa [5]

4.2 Geológia

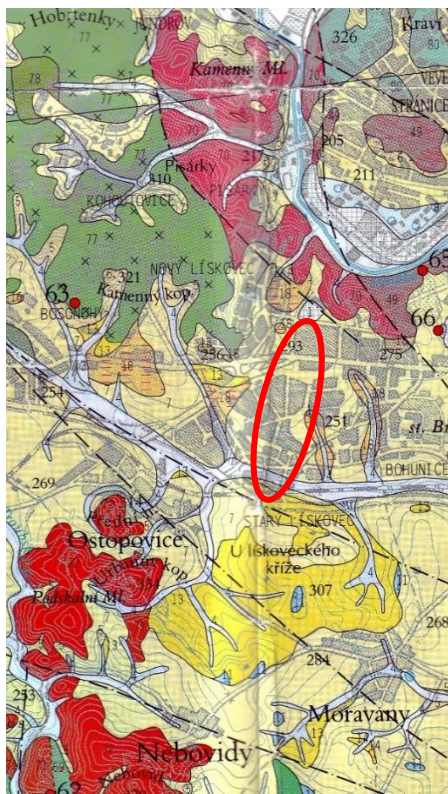
Územie v okolí tunela je veľmi dobré preskúmané vid'. Obr. 4. Mapa vrtnej preskúmanosti. Tieto vrtné prieskumy boli robené prevažne v 80. a 90. rokoch XX. storočia.

Kvôli plánovanému predĺženiu trate spoločnosť GEOtest, a. s. realizovala v roku 2018 podrobný geotechnický prieskum tejto lokality. Tento prieskum ukázal, že v oblasti sa nachádzajú mohutné vrstvy súdržných zemín. Povrch v lokalite je krytý súvislou vrstvou kvartérnych eolických – sprašových hĺn mocnosti 4 až 8 metrov. Tieto zeminy boli zaradené do triedy F6 - C1, hlina so strednou plasticitou, tuhej až pevnej konzistencie. Geologické podložie je v celej lokalite budované miocénnymi morskými ílmi, zatriedenými ako F8 – CH. Íly majú vysokú až veľmi vysokú plasticitu a sú pevnej až tvrdej konzistencie. V íloch sa vyskytujú lamíny a preplástky piesku.

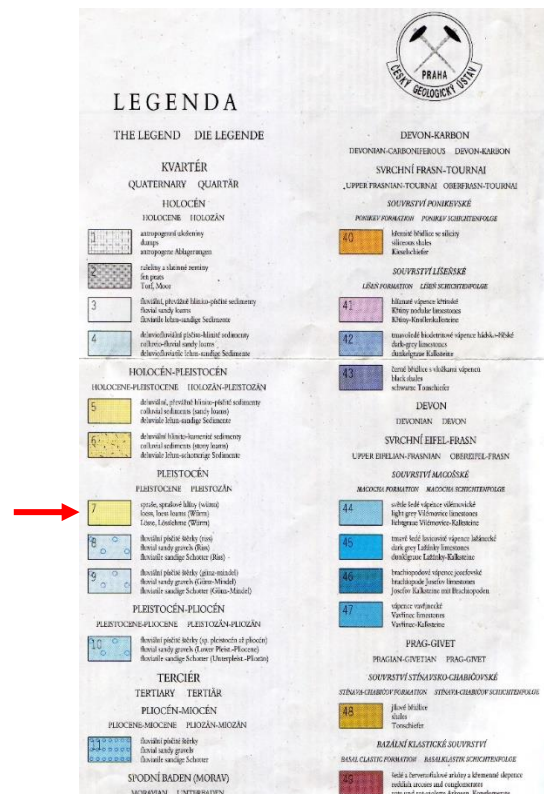
Postupný prechod nadožšia zo sprašových hĺn do podložia neogénnych ílov tvoria vrstvy fosílnych pôd s mocnosťou cca 2 metre. Triedy zemín sú určené podľa normy ČSN 73 6133. Miocénne morské íly reprezentujú stratigrafické stupne Karpát a Ottang. [1]



Obr. 4 Mapa vrtnej preskúmanosti [6]



Obr. 5 Výrez z geologickej mapy Brno-Bohunice [7]



Obr. 6 Legenda geologickej mapy Brno – Bohunice [7]

Geologické pomery a realizované prieskumné vrty sú zrejmé zo samostatných príloh:

Príloha P4.1 – SITUÁCIA SKÚŠOK, IG VRTOV A REZOV

Príloha P4.2 – IG REZ č.1

Príloha P4.3 – IG REZ č.2

Príloha P4.4 – IG REZ č.3

4.3 Hydrológia, hydrogeológia

Nedáľeko južného portálu pri ulici Osová približne (600 m) preteká riečka Leskava.

Z hydrogeologického hľadiska nebola v území zastihnutá súvislá hladina podzemnej vody. Lokálne staticky zvodnelé sú iba izolované lamíny a preplástky piesku v íloch.

4.4 Geotechnické vlastnosti

V oblasti tunela boli realizované prieskumné vrty a odobrané vzorky zemín. Tieto vzorky boli skúšané v akreditovaných laboratóriách firmy GEOTest, a.s. pre stanovenie indexových, fyzikálnych a mechanických vlastností. Tie budú čiastočne použité vo výpočte vid' Tabuľka 4.4- 1.

V prieskume boli zastihnuté zeminy rozdelené do troch hlavných geotechnických typov podľa svojich vlastností a do šiestich podkategórií na základe veku a genézy. [8]

Tabuľka 4.4- 1 Prehľad geotechnických typov [8]

Stratigrafické zaradenie		Genetický pôvod sedimentov	Geotechnický typ	Stručný litologický popis	Zatriedenie podľa ČSN 73 6133
Antropogén (recent) a Holocén		Antropogénne	1a	konštrukčné vrstvy komunikácií, zásypy inžinierskych sietí, zmesné navážky	Y
		Deluvio-antropogénne	1b	humózne hliny s trávny m drnom, parkové úpravy povrchu	Y/F5 MI Y/F6 CI
Kvartér	Pleistocén	Eolický a deluvioeolický	2a	spraše, sprašové hliny, prachovité íly a íly	F6 CI F8 CH
		Deluvioeolický	2b	fosíln e pôdy	F6 CI F8 CH
		Fluviálny a deluviofluviálny	2c	štrkovité hliny a hlinité štrky	F1 MG G4 GM
Terciér	Neogén (miocén)	Marínny eventuálne lakustrinný	3a	íly prachovité	F8 CH, F8 CV F6 CI
			3b	piesky ílovité, prachovité	F4 CS S5 SC
			3c	pieskovce	R2 – R3
			3d	ílovce (lamíny)	R5

Tabuľka 4.4- 2 Geotechnické charakteristiky spraší, sprašovitých a ílovitých hlín Gtypu 2a [8]

Geotechnická normová skúška	symbol	jednotky	Štatistické charakteristiky vlastností geotechnického typu
Zrnitostné zloženie geotechnického typu	cl	%	36 ^{25/33} (22-35)
	si		58 ^{25/20} (36-59)
	sa		6 ^{25/44} (2-6)
	gr		0
vlhkosť zeminy	w	%	18,8 ^{25/26} (9,3-27,4)
medza tekutosti	w _L	%	47 ^{25/19} (36-62)
medza plasticity	w _P	%	20 ^{25/9} (17-23)
index plasticity	I _P	%	27 ^{25/31} (17-41)
stupeň konzistencie redukovaný	I _{CR}	1	1,05 ^{25/22} (0,58-1,68)
priepustnosť z krivky zrnitosti	k	m.s ⁻¹	<3,0E-8
objemová hmotnosť	r	Mg.m ⁻³	1,98 ^{12/6} (1,70-2,10)
hustota pevných častíc	r _s	Mg.m ⁻³	2,71 ^{15/1} (2,63-2,73)
pórovitosť	n	%	39 ^{12/8} (35-43)
stupeň nasýtenia	S _r	%	84 ^{12/25} (34-100)
napučiavací tlak	σ _s	kPa	104 ^{5/66} (60-225)
TOTÁLNE parametre podľa ČSN 72 1031	c _u	kPa	0*
	φ _u	°	80*
EFEKTÍVNE parametre podľa ČSN CEN ISO/TS 17892-10	c _{ef}	kPa	17 ^{8/55} (8-29)
	φ _{ef}	°	24 ^{8/11} (21-29)
Edometrický modul pretvárnosti (laboratorní stanovení)	E _{oed} [MPa]	0,06-0,1	6,1 (3,7-11,2)
		0,1-0,2	4,3 (4,0-8,6)
		0,2-0,4	6,4 (4,3-8,6)
		0,4-0,6	17,8 (jedno stanovení)
Modul pretvárnosti (penetračné meranie alebo odborný odhad)	E _{def}	MPa	6*
Poissonovo číslo*	ν	-	0,40
zhutiteľnosť podľa ČSN EN 13286-2, príl. NB	σ _{dmax}	kg.m ⁻³	1 753 (1 713-1 753)
	w _{opt}	%	17,3 (15,6-18,9)
zhutiteľnosť podľa ČSN EN 13286-2, príl. NB po pridaní vápna - uvedené percenta	σ _{dmax}	kg.m ⁻³	1 676-1%, 1 645-2%
	w _{opt}	%	19,8-1%, 21,1-2%
CBR podľa ČSN EN 13286-47 po nasýtenie		%	4
CBR podľa ČSN EN 13286-47 po nasýtení a po pridaní vápna- uvedené percenta		%	28-1%, 58-2%
CBR podľa ČSN EN 13286-47		%	15
IBI podľa ČSN EN 13286-47		%	15
* odborný odhad; priemerná hodnota ^{a/b} počet stanovení/koefficient variácie (rozptyl hodnôt); u menej ako štyroch stanovení uvedená iba priemerná hodnota a rozsah; **			

Tabuľka 4.4- 3 Geotechnické char. neogénnych ílov prachovitých, slabo piesčitých Gtypu 3a [8]

Geotechnická normová skúška	symbol	jednotky	Štatistické charakteristiky vlastností geotechnického typu
Zrnitostné zloženie geotechnického typu	cl	%	49 ^{54/22} (13-72)
	si		43 ^{54/18} (23-60)
	sa		8 ^{54/144} (0-55)
	gr		0
vlhkosť zeminy	w	%	20,2 ^{54/18} (10,9-28,1)
medza tekutosti	w _L	%	63 ^{54/20} (30-79)
medza plasticity	w _P	%	22 ^{54/17} (14-29)
index plasticity	I _P	%	41 ^{54/23} (11-53)
stupeň konzistencie redukovaný	I _{CR}	1	1,05 ^{53/6} (0,90-1,05)
priepustnosť z krivky zrnitosti	k	m.s ⁻¹	<3,0E-8
objemová hmotnosť	r	Mg.m ⁻³	2,08 ^{21/6} (2,02-2,15)
hustota pevných častíc	r _s	Mg.m ⁻³	2,71 ^{15/1} (2,71-2,83)
pórovitosť	n	%	37 ^{21/1} (35-43)
stupeň nasýtenia	S _r	%	97 ^{21/3} (92-100)
bobtnací tlak	σ _s	kPa	361 ^{12/56} (110-850)
TOTÁLNE parametre podľa ČSN 72 1031	c _u	kPa	5*
	φ _u	°	80*
EFEKTÍVNE parametre podľa ČSN CEN ISO/TS 17892-10	c _{ef}	kPa	35 ^{11/30} (18-51)
	φ _{ef}	°	17 ^{11/24} (12-25)
Edometrický modul pretvárnosti (laboratórne stanovenie)	E _{oed} [MPa]	0,1-0,2	21,6 (15,6-27,5)
		0,2-0,4	18,2 ^{7/34} (10,6-26,6)
		0,4-0,6	22,8 ^{9/26} (15,5-34,0)
		0,6-0,8	24,1 ^{6/23} (18,3-32,2)
Modul pretvárnosti (penetrační meranie neodborný odhad)	E _{def}	MPa	7*
Poissonovo číslo*	v	-	0,42
zhutiteľnosť podľa ČSN EN 13286-2, príl. NB	σ _{dmax}	kg.m ⁻³	1 664 ^{4/4} (1 594-1 721)
	w _{opt}	%	20,3 ^{4/6} (19-21,6)
zhutiteľnosť podľa ČSN EN 13286-2, príl. NB po pridaní vápna uvedené percenta	σ _{dmax}	kg.m ⁻³	1 556-1%, 1 650-2%
	w _{opt}	%	24,0-1%, 21,4-2%
CBR podľa ČSN EN 13286-47 po nasýtení		%	2(1-3)
CBR podľa ČSN EN 13286-47 po nasýtení a po pridaní vápna - uvedené percenta		%	3,5-1%, 38-2%
CBR podľa ČSN EN 13286-47		%	14 (13-15)
IBI podľa ČSN EN 13286-47		%	12 (11-13)
CBR podľa ČSN EN 13286-47 po pridaní vápna		%	16-1%, 26-2%
IBI podľa ČSN EN 13286-47 po pridaní vápna		%	16-1%, 30-2%
* odborný odhad; priemerná hodnota a/b počet stanovení/koefficient variácie (rozptyl hodnôt); u menej než štyroch stanovení uvádzaná iba priemerná hodnota a rozsah; **			

5 Požiadavky na navrhovaný tunel

Podzemná časť predĺženia dvojkolajnej trate električky vedie v intraviláne medzi panelovými bytovkami. Jeden z hlavných dôvodov paženia stavebnej jamy je zaistenie okolitých výškových obytných objektov.

Tunel musí byť navrhnutý tak, aby splnil funkcie dlhodobej konštrukcie dopravnej stavby. Ďalšou požiadavkou projektu je, aby obsahoval medzilahlú zastávku pre cestujúcich.

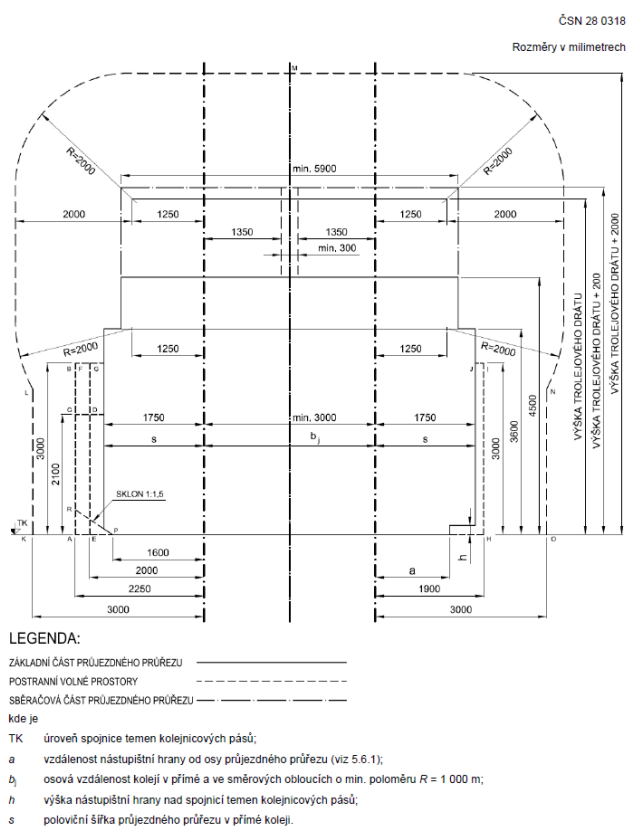
Výška nadložia je premenná a dosahuje v staničení 0,320 00 km maximálnej hodnoty približne 3,9. Najvyšší sklon trate v tuneli je 44,38 ‰.

Prierez tunela musí byť navrhnutý podľa ČSN 28 0318 (Průjezdny průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových dráhach) s použitím rozmerov prejazdného prierezu dvojkolajnej trate vid'. Obr. 7.[9]

Zvolený prejazdny prierez je zobrazený v samostatných prílohách:

Príloha P5.1 – KONŠTRUKCIA TUNELA, PREJAZDNÝ PRIEREZ

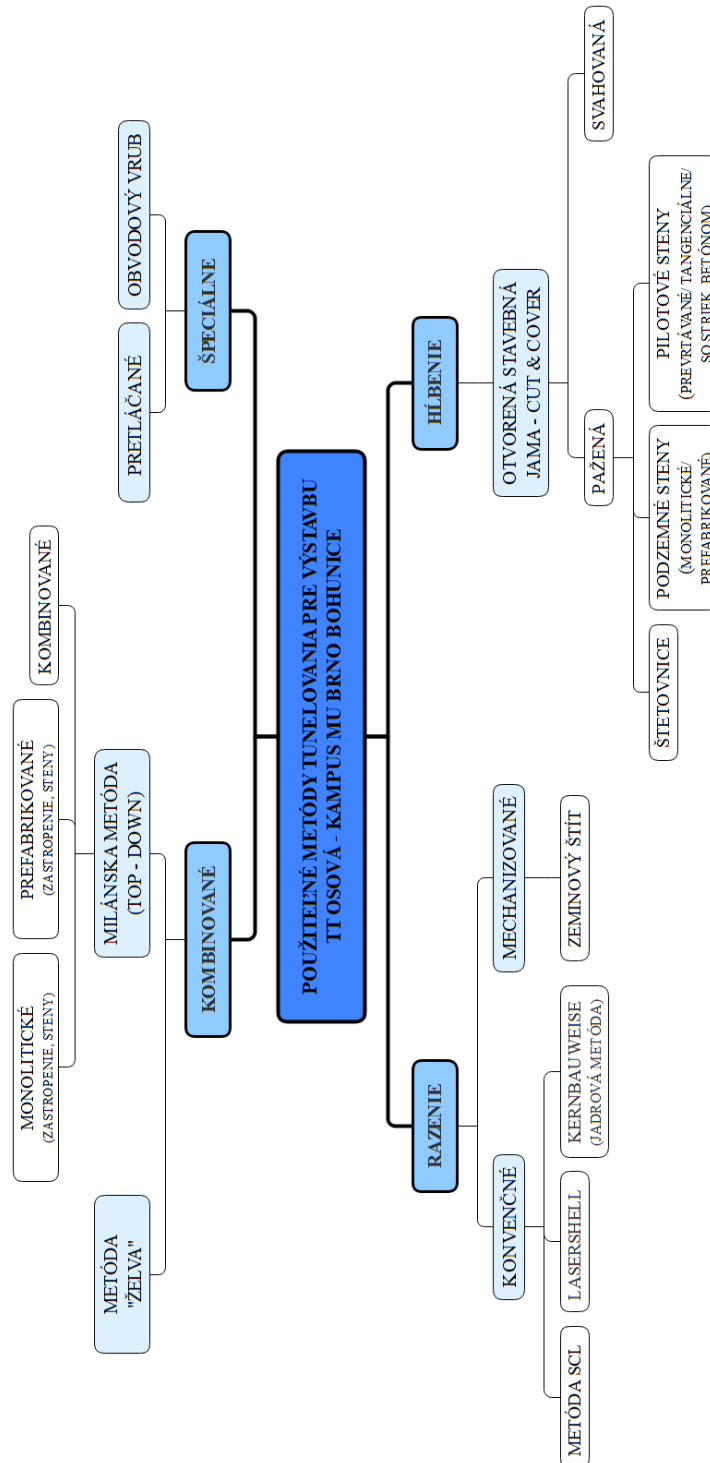
Príloha P5.2 – ZOBRAZENIE KONŠTRUKCIE VO VYBRANOM REZE



Obr. 7 Prejazdny prierez dvojkolajnej trate pre električky [9]

6 Použitelné metody pre výstavbu tunela

Bakalárska práca sa bude primárne zaoberať plytkými tunelmi, ktoré sú hĺbené a môžu byť realizované pri nízkej výške nadložia a následne bude vybraná najefektívnejšia metóda. Tieto druhy tunelov sú budované z povrchu alebo aj na povrchu.



Obr. 8 Schéma použitelných metod pre výstavbu tunela

6.1 Razené tunely

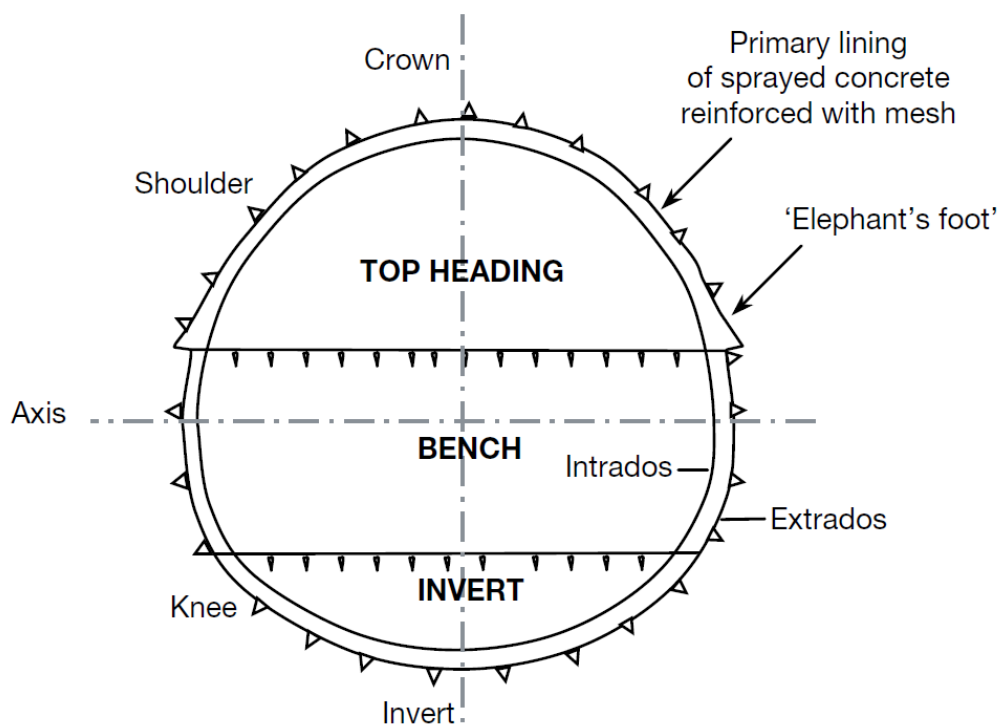
6.1.1 Metóda SCL (SPRAYED CONCRETE LINING)

Technológia SCL vznikla modifikáciou Novej rakúskej tunelovacej metódy. Začala byť používaná vo Veľkej Británii (U.K.) od roku 1994 po prepadnutí nadložia pri budovaní podzemnej dráhy pomocou NRTM v íloch. [10]

Podstatou metódy je uzavrieť celý profil čo najbližšie ku klenbe, aby bola obmedzená deformácia na povrchu. Primárne ostenie je tvorené striekaným betónom, ktoré je neskôr spevnené sekundárnym ostením z monolitického betónu (vid'. Obr. 9). Pri projektovaní je veľkou výhodou tvarová flexibilita. [11]

Pri SCL je rozpájanie horniny zabezpečené strojmi a výrub je členený. Presnosť výrubu je veľká až veľmi veľká. Striekaný betón je používaný v kombinácii s kari sieťami a rámami. Medzi primárne a sekundárne ostenie je aplikovaná hydroizolácia.

SCL je stále aktuálne využívaná metóda pri výstavbe tunelov s nízkym nadložím v zeminách v U.K. [10]



Obr. 9 Rez tunela budovaného SCL metódou v mäkkých zeminách [7]

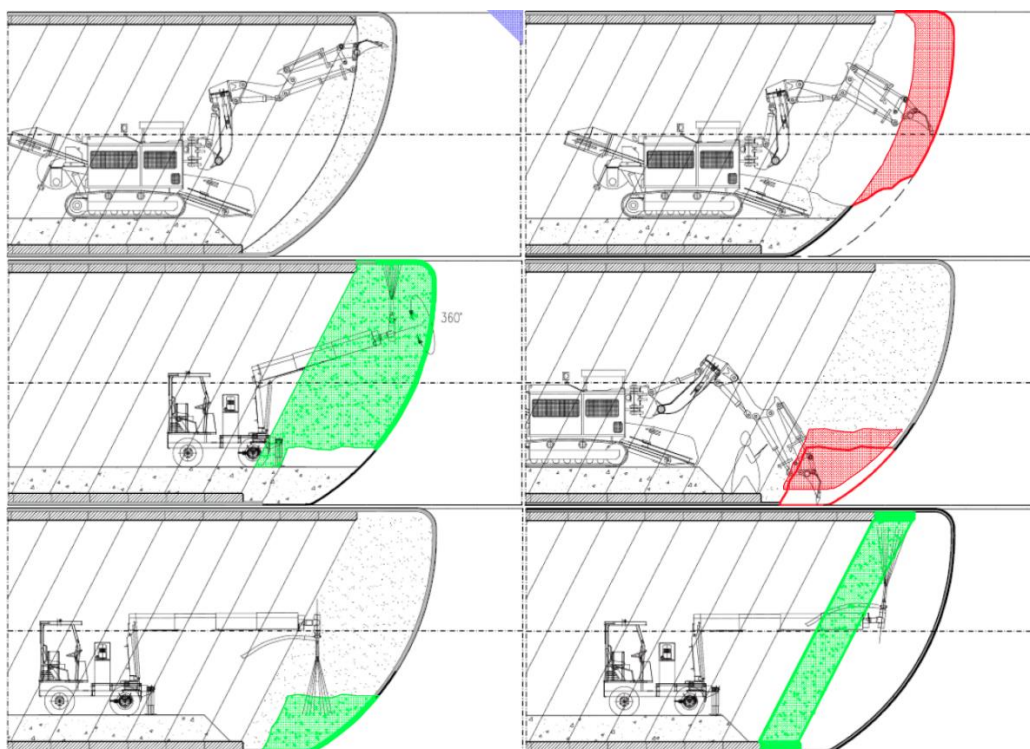
6.1.2 Lasershell™

Metóda, ktorá bola podobne ako SCL vyvinutá vo Veľkej Británii po kolapse troch tunelov, ktoré boli razené NRTM smerom na letisko Heathrow v Londýne. [12]

Razenie prebieha na plný profil, ktorý musí byť rýchlo uzavretý a je možné raziť do priemeru 5 m v íloch. Výrub a ostenie je kontrolované laserovým meračom „TunnelBeamer“. Sklonená čelba zabezpečuje väčšiu stabilitu výrubu a menšie deformácie nadložia. [10]

Ostenie sa skladá z troch vrstiev. Prvá vrstva slúži na zaistenie výrubu. Pri jeho zaistení nie je použitý klasický striekaný betón, ocelové sieťoviny ani rámy ale drátkobetón. Touto technológiou je zaistená väčšia bezpečnosť pracovníkov, keďže nie je potrebné ísť osobne pod čerstvý výrub. Druhá (štruktúrna) vrstva plní trvalú nosnú funkciu a má hrúbku približne 175 – 250 mm. Betón vo finálnej (dokončujúcej) vrstve neobsahuje ocelové vlákna a je upravovaný ručne pre zaistenie hladkosti povrchu o približnej hrúbke 50 mm. [12]

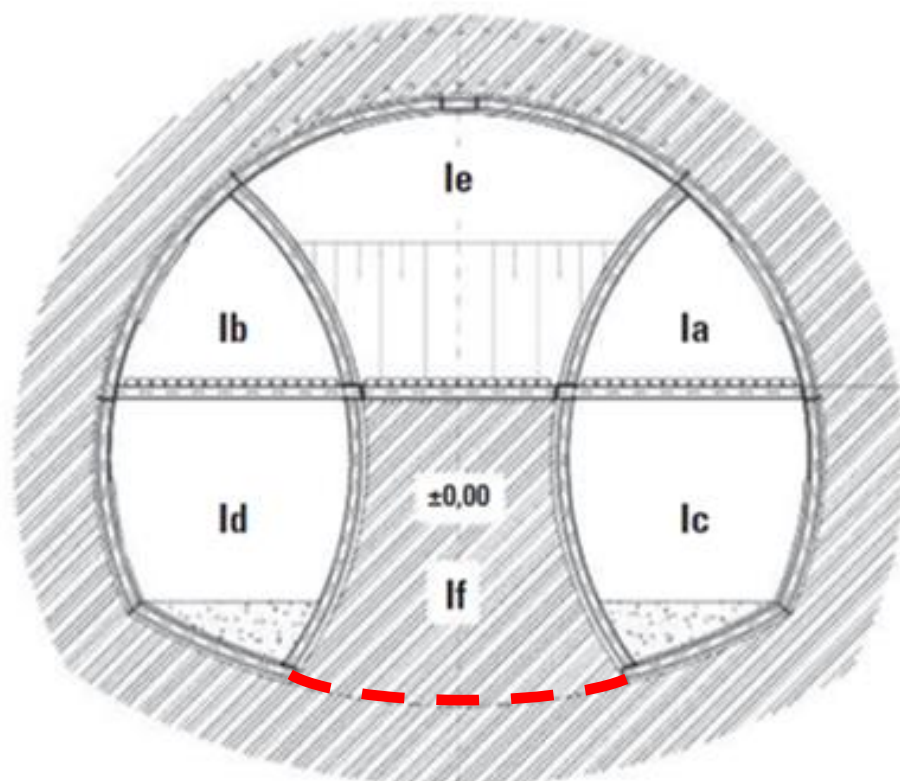
POSTUP VÝSTAVBY:



Obr. 10 1. Razenie kaloty 2. Razenie lavice 3. Zaistenie výrubu prvou vrstvou 4. Razenie protiklenby 5. Zaistenie protiklenby prvou vrstvou 6. Aplikácia nosnej a dokončujúcej vrstvy [12]

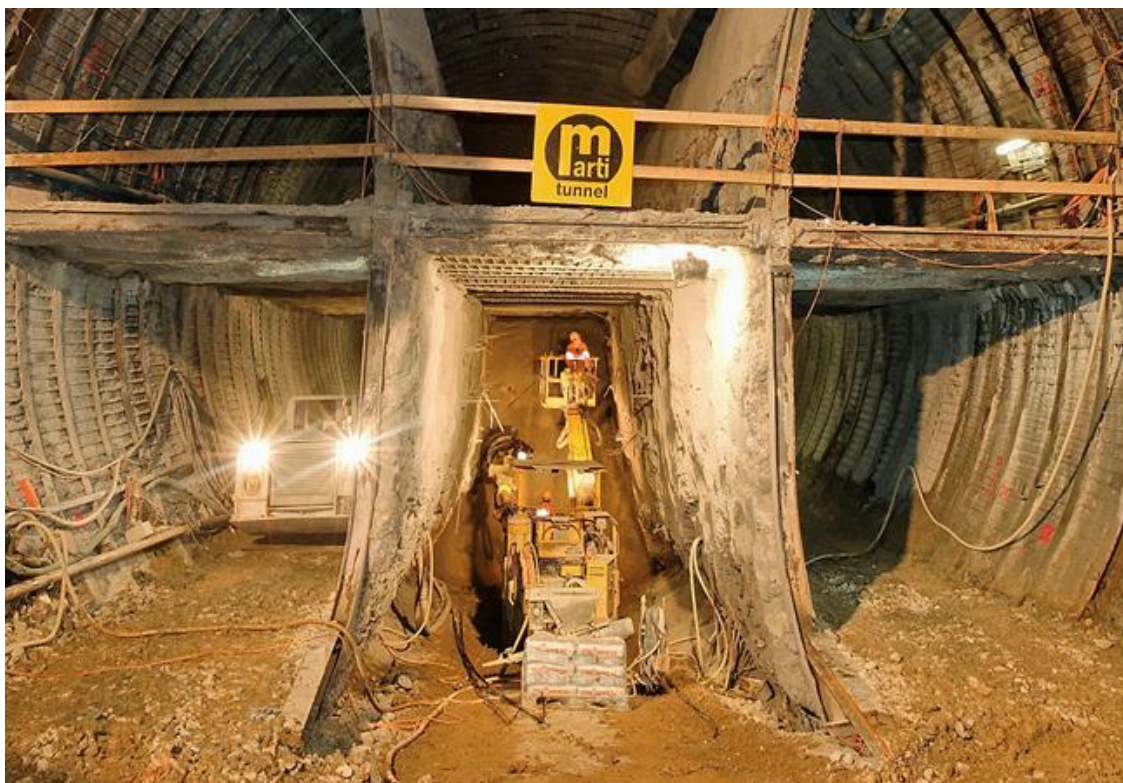
6.1.3 Jadrová metóda (Kernbauweise)

Švajčiarska jadrová metóda je vytvorená modifikáciou metódy Spritzbetonbauweise, ktorá zvislo členila výrub a je podobná NRTM. Je vhodná pre veľkoprofilové tunely, ktoré sú členené konštrukčne vertikálne a technologicky horizontálne. Využíva sa v poloskálných a tlačivých horninách, poprípade v zeminách, kde predpokladáme malé spolupôsobenie horninového prostredia s kombináciou nízkeho nadložia, ak je potrebné obmedziť vznik poklesovej kotliny a jej zväčšovanie popri razení tunela. Prierez sa delí na menšie zábery vid'. Obr. 11.



Obr. 11 Kernbauweise – postup vyrazenia a rozoprenia záberu: (la, lb) – razenie a inštalácia vodorovnej rozpery, (lc, ld) – dokončenie oporných tunelov, (le) – dokončenie kaloty, skompletizovanie vodorovnej rozpery, (lf) – dobratie jadra [10]

Rozpojenie zeminy prebieha tunelbagrom, nikdy nie odstrelom, kvôli eliminovaniu otrasov. Veľkosť strojov je obmedzená podľa plochy jednotlivých výrubov. Počas celej doby výstavby je profil postupne vodorovne rozopieraný, aby bol výrub stabilizovaný a zachytil bočné tlaky, kým nie je primárne ostenie hotové. Rozpery tiež tvoria dočasnú pracovnú plošinu. V takomto type tunela nedochádza k aktivácií horninového prstenca ako pri NRTM.



Obr. 12 Tunel Moutier (CH)- Jadrová metóda [13]

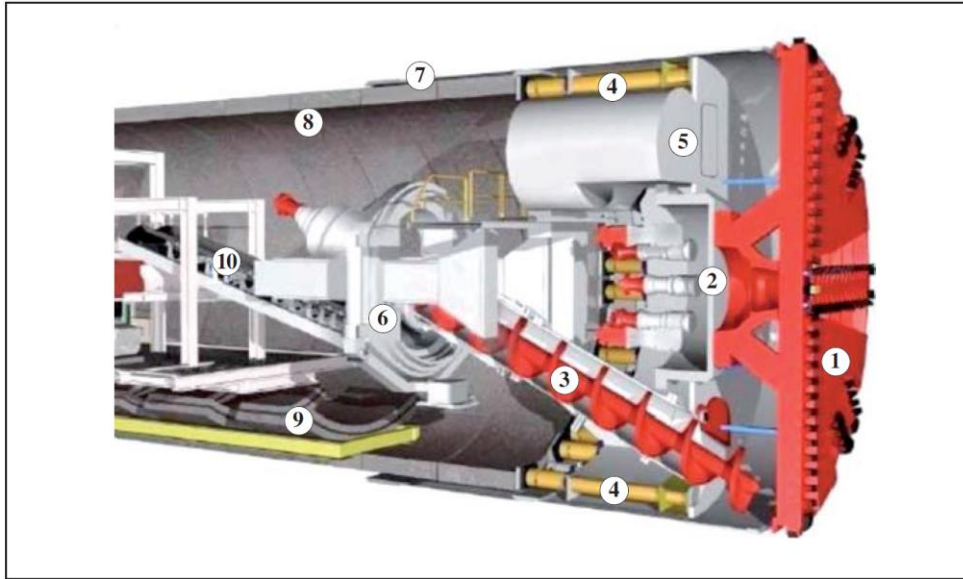
Konštrukcia primárneho ostenia následne prenáša veľké vnútorné sily. Primárne ostenie sa skladá zo striekaného betónu a valcovaných alebo zvarovaných ocelových prvkov. Proti poklesu nadložia sa môžu používať kompenzačné injektáže, kotvenie čela, ochranné prvky medzi tunelom a ohrozenými objektmi, ktoré pomáhajú zachytiť pohyb nadložia. [10]

6.1.4 Zeminový štít (EPB – Earth pressure ballance)

Technológia mechanizovaného tunelovania, pri ktorej je čelba aktívne podopieraná rozvrtanou zeminou. Používa sa väčšinou v súdržných zeminách aj mäkkej konzistencie a v poloskalných horninách.

Princíp zeminového štítu vychádza z rozdielu veľkosti zemných tlakov. Zemina rozpojená raziacou hlavou vyplní čelnú tlakovú komoru. Môže byť premiešaná s vodou a so stlačeným vzduchom, aby bola vytvorená kašovitá konzistencia. Pomocou šnekového dopravníka sa koriguje množstvo rozpojenej zeminy v tlakovej komore, ktorá je podľa potrebného tlaku na čelbu odoberaná - takzvaná „tlaková kontrola na čelbe“. [14]

Prierez zeminového štítu a jeho dôležité časti sú znázornené na (Obr. 13).



Obr. 13 Schéma zeminového štítu: 1 – raziaca hlava, 2 – tlakotesná prepážka, 3 – šnekový dopravník, 4 – štítové lisy, 5 – prístupová tlaková komora, 6 – kruhový erektor, 7 – plášť štítu, 8 – ostenie, 9 – prefabrikované dielce ostenia, 10 – dopravník [14]

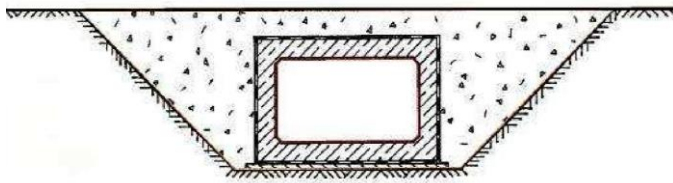
V prípade takejto technológie môžeme uvažovať veľké prierezy až do 19 m. Do rozpojenej zeminy môžu byť pridávané chemické prísady (polyméry, peny/lubrikanty, dispergátory a iné) pre zhomogenizovanie, zníženie trenia a lepidlosti zeminy. [15]

Je možné technológiu vylepšiť kombináciou zeminového štítu s bentonitovým štítom, ktorej premena je celkom rýchla. Pri takejto zmene nastavenia štítu sa musí šnek stiahnuť a predkomora zaplniť bentonitovou suspenziou. Tá je premiešavaná so zeminou, aby bola možná doprava materiálu potrubím.

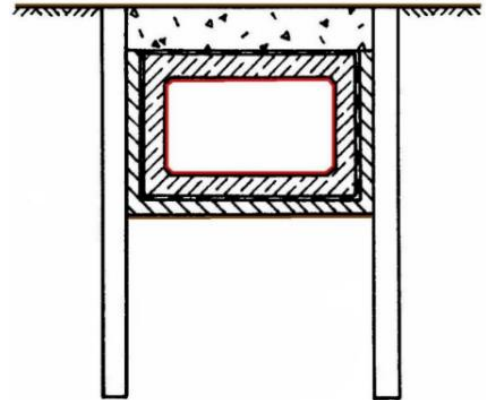
6.2 Hĺbené tunely

6.2.1 Otvorená stavebná jama – CUT & COVER (C&C)

Jednoduchá metóda budovania tunelov z povrchu pri nízkom nadloží alebo mäkkých horninách/zeminách. Môže byť rozdelená podľa spôsobu realizácie pri zaistení stavebnej jamy na svahovanú alebo paženú. Konštrukcia tunela realizovaná metódou C&C môže byť monolitická, montovaná, kombinovaná alebo z tenkostenných oceľových dielcov Hamco/ Tubosider. Po osadení konštrukcie tunela je výrez s konštrukciou podzemnej stavby presypaný. Pri hutnení presýpanej zeminy je nutné dávať pozor na nosnosť konštrukcie. Zasypávanie musí byť riadené a obozretné. [16, 17]



Obr. 14 Uloženie prefabrikovaného/ monolitického alebo kombinovaného tunela do svahovanej stavebnej jamy [15]



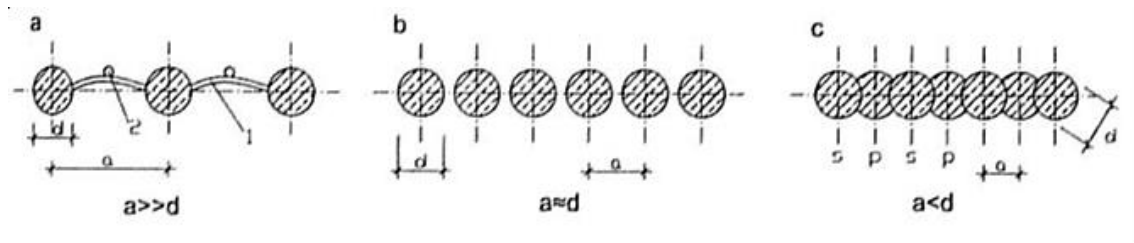
Obr. 15 Uloženie prefabrikovaného/ monolitického alebo kombinovaného tunela do svahovanej stavebnej jamy [17]

Svahovaná stavebná jama zaisťuje dočasnú stabilitu a je rýchla, jednoduchá a lacná metóda budovania tunela. Väčšinou sa s ňou stretávame pri realizácii podzemnej stavby v extraviláne alebo kde je dostatok priestoru na jej vybudovanie.

Pažená stavebná jama má výhody použitia v blízkosti povrchovej zástavby, dopravnej infraštruktúry kde je potrebné zaisťiť tieto objekty. Často využívaná metóda pri nedostatku priestoru alebo kvôli požiadavkám vodotesnosti na stavebnú jamu. [17]

Typy pažiacich konštrukcií: [18]

- Podzemné steny (prefabrikované, monolitické)
- Pilótové steny ((a) s veľkou osovou vzdialenosťou, (b) tangenciálne, (c) prevrtavané)
- Larzény



Obr. 16 Rozdelenie pilótových stien podľa osových vzdialeností [19]

6.3 Kombinované metódy tunelovania

6.3.1 TOP – DOWN (Modifikovaná Milánska metóda)

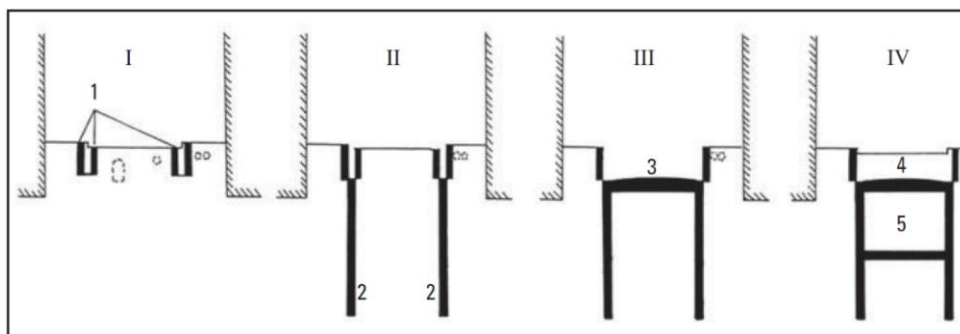
Prvé použitie Milánskej metódy je zaznamenané v roku 1956 v Miláne pri realizácii zložitej časti podzemnej dráhy. Dodnes sa používajú rôzne modifikácie tejto technológie. Pri takomto type konštrukcie hovoríme o trvalom pažení. [20]

Pri súdržných zeminách pažiaca suspenzia zabezpečí paženie, je vhodné použiť monolitické podzemné steny, ktoré sú po odkopaní hladké. Ak podmienky nie sú ideálne, je potrebné prehodnotiť použitie prefabrikovaných podzemných stien. [21]

Charakterizuje podzemné stavby, ktoré sa nachádzajú v intraviláne ale aj extraviláne, kde je obmedzený priestor pre stavebné jamy a je potrebné postaviť oporu pre vybudované stavby v okolí. Zvislé nosné prvky môžu byť vytvorené podzemnými konštrukčnými stenami alebo z prevrtavanej pilótovej steny po vybudovaní oporných múrikov pre správnu navigáciu zakladania. Na zrovnanom povrchu respektíve do debnenia je vybetónovaná monolitická alebo položená prefabrikovaná stropná doska. Po vybudovaní stropnej konštrukcie môžu práce súčasne prebiehať na povrchu (zasypávanie stropnej konštrukcie a definitívna úprava) a v podzemí (ťažba horniny). [10, 17]

Postup výstavby Milánskej metódy [10]:

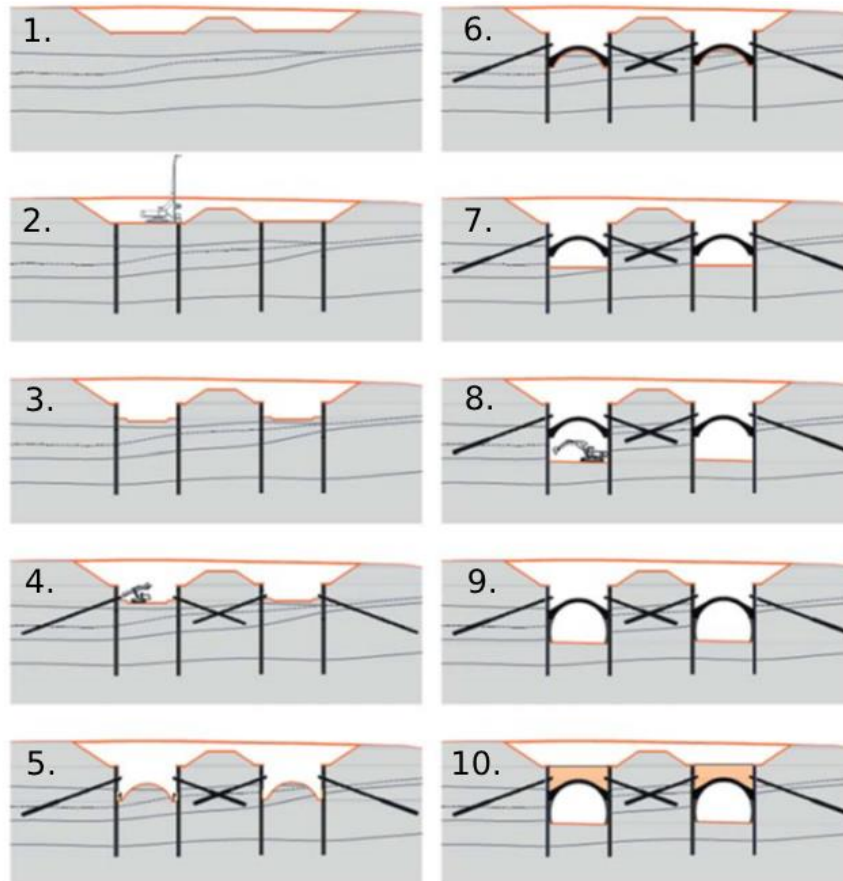
1. Vybudovanie vodiacich múrikov pre správne navedenie strojnej mechanizácie pri budovaní podzemnej pažiacej a nosnej konštrukcie
2. Samotné vybudovanie podzemnej pažiacej a nosnej konštrukcie
3. Vytvorenie stropnej konštrukcie, ktorá má súčasne funkciu rozpery
4. 5. Obnova pôvodného terénu na povrchu prebieha zároveň s ťažbou zeminou pod ochranou podzemných stien a stropnej konštrukcie



Obr. 17 Schéma postupu Milánskej metódy (TOP – DOWN) [10]

6.3.2 Metóda „Želva“

Modifikácia metódy TOP – DOWN, ktorej hlavným znakom je budovanie nosnej stropnej konštrukcie klenbového tvaru z povrchu. Po dokončení je možné začať raziť so stropnou ochranou. Využíva sa pri nekvalitných geotechnických podmienkach alebo nízkom nadloží. Touto metódou realizujeme celý úsek tunela alebo iba portálové časti. Technológia rozpojovania zeminy/horniny záleží iba na jej kvalite. Môžu byť použité stroje alebo obmedzené trhacie práce. [10]



Obr. 18 Postup výstavby razeného tunela metódou želva [10]

Postup výstavby:

1. 2. Predkopanie stavebnej jamy, ktorej bočné strany sú buď svahované alebo pažené na základe kvality zeminy alebo priestorových podmienok.
3. 4. Po odťažení zeminy na úroveň kaloty je dno stavebnej jamy presne vytvarované striekaným betónom a vystužené oceľovou sieťovinou.
5. Na upravený povrch sa nainštaluje oddeľovacia fólia a geotextília, pomocou ktorej sa pri razení tunela ľahšie uvoľní vyrovnávacia vrstva betónu.

6. Dno stavebnej jamy je takto pripravené na výstavbu železobetónovej konštrukcie po kratších úsekoch približnej dĺžky 5-6m.
7. – 10. Po dosiahnutí požadovanej pevnosti betónu je možné stropnú konštrukciu opäť zasypať a vrátiť oblasť do požadovaného stavu. Pre urýchlenie procesu je možné použiť betón vyššej pevnostnej triedy a fáza razenia môže prebiehať zároveň so zasypávaním.

Dĺžky záberu sú závislé na geotechnických podmienkach, ktoré sú priebežne sledované. Ak sú podmienky náročné a stabilita stropnej konštrukcie je ohrozená, je potrebné zabezpečiť spevňujúce podpory v podobe mikropilót alebo tryskovej injektáže, v krajných prípadoch sú použité podzemné steny alebo veľkopriemerové pilóty. [10]



Obr. 19 Ukážka separačnej vrstvy a montáž výstuže, vyrazenie opery pod želvou a prestriekanie jej podpôr primárnym ostením, tunel Považský Chlmec D3 [22]

6.4 Špeciálne metódy tunelovania

6.4.1 Hydraulické pretláčanie

Princíp metódy spočíva v zatlačovaní rúry alebo nekrhového ostena s priechodným alebo prielezným priemerom väčším ako 1000 mm do zemín. V minulosti bolo pretláčanie určené iba k prekonávaniu krátkych úsekov do niekoľko desiatok metrov. Metóda pretláčania prešla dlhým vývojom, v súčasnosti je možná realizácia dlhších úsekov. [21]

Zatláčanie rúry zabezpečujú výkonné hydraulické valce, ktoré sú umiestnené v pracovnej šachte, a nazývajú sa „hlavné tlačné stanice“. Oporná stena, ktorá je vybudovaná v pracovnej šachte, zaisťuje roznášanie zatlačujúcej sily do zeminového masívu pasívnym tlakom. V čelbe sa zemina rozpojuje a následne je nakladaná a vyvážaná do pracovnej šachty a von z nej. [23]

Rozdelenie podľa spôsobu rozrušovania zeminy: [24]

- Mechanické rozpojovanie tunelbagrom pre malé profily
- Manuálne rozpojovanie zeminy robotníkom a vyvážanie zeminy dopravníkovým pásom alebo koľajovou drážkou (potrebné vetranie pri dlhých úsekoch)



Obr. 20 Podchod pre chodcov a cyklistov, Bratislava – pretláčanie pravouhlého železobetónového monobloku tunelovej rúry z úrovne terénu bez pracovnej šachty [24]

Tlačné stanice musia dokázať vyvinúť minimálnu silu 6 000 kN, pričom obvykle pri pretláčaní dlhých úsekov tieto stanice dosahujú tlačnú silu od 10 000 kN do 20 000 kN. Je možné použiť vyšší počet slabších hydraulických valcov s nižšou silou, ktoré sú bežne dostupné. Slabá stránka tejto alternatívy je zložitá montáž a demontáž súpravy, pričom môže dôjsť k úniku tlačenej kvapaliny. Pri použití

silnejších hydraulických valcov s vyššou silou stačí na dosiahnutie požadovanej tlačnej sily menší počet valcov. Ich dostupnosť je obmedzená a sú vyrábané na zákazku kvôli vysokým nákladom. Pri menšom počte hydraulických valcov sú jednoduchšie aj hydraulické rozvody. Pri montáži a demontáži dochádza k zredukovaniu nebezpečenstva porúch a netesností. Pre zníženie vysokých sústredných tlakov na čelo rúry sa naň nasadí mohutný roznášajúci prstenec. [23]

Pretláčanie sa dá realizovať jedným z nasledujúcich postupov:

- Pretláčanie bez zmenšovania trenia
- Pretláčanie so zmenšovaním trenia
- Pretláčanie s tlačnými medzistanicami
- Špeciálne metódy pretláčania

6.4.1.1 Pretláčanie bez zmenšovania trenia

Postup sa používa pri kratších úsekoch. Použitie jednoduchších súprav ale veľkosť sily na zatláčanie stále závisí na tlaku zeminy, ktorý pôsobí na pretláčaný prvok. Zemina postupne na pretláčaný prvok dosadá a tým narastá potrebná zatlačacia sila. V lepkavých zeminách by sa malo obmedziť zastavenie procesu na dlhšiu dobu, aby sa zemina nenalepila na pretláčaný prvok. Na opätovné uvedenie prvku do pohybu by bola potrebná niekoľkonásobne väčšia sila.

Rozpojovanie čelby je väčšinou realizované ručne, nie je mechanizované. Kvôli bezpečnosti musí byť robotník v čelbe vždy chránený pomocou štítu. Robotník na povrchu kontroluje tlaky tlačnej stanice. Zatláčanie je potrebné zastaviť, keby dochádzalo k zvýšeniu tlakov, pravdepodobný náraz na prekážku – možné poškodenie štítu. [23]

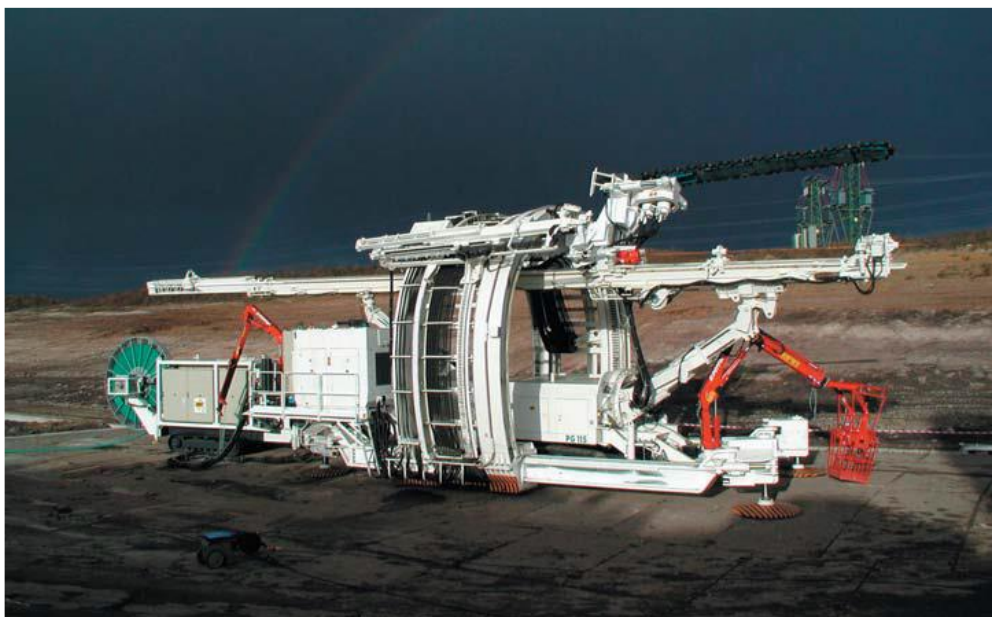
6.4.1.2 Pretláčanie so zmenšovaním trenia

Požadovaná pretlačacia sila je obmedzená tlačnou kapacitou konštrukcie, ktorá je pretláčaná a odolnosti zeminového masívu za opornou stenou. Pri pretláčaní dlhších úsekov je nutné overiť výpočtom nevyhnutnú pretlačaciu silu. Ak je potrebná enormná sila na pretlačenie konštrukcie, tak nie je možné vykonať pretláčanie „na sucho“ ale je nutné aplikovať mazacie injekčné, aby sa plášťové trenie

nezväčšovalo po dĺžke. V súčasnosti je k znižovaniu odporu pri zatláčaní používaná bentonitová suspenzia. Suspenzia je tlačaná do britom vytvoreného nadvýlomu a musí spĺňať dané požiadavky. Takouto technológiou je možné pretláčať až niekoľko stoviek metrov. [23]

6.4.2 Obvodový vrub (PERFOREX)

Medzi hlavné znaky metódy Perforex patrí vytvorenie predklenby vrubovaním po obvod prierezu. Vrub je vyrezaný reťazovou pílou. Po vyrezaní sa vrub vyplňuje striekaným betónom alebo drátkobetónom. Po rýchlom náraste pevnosti výplň slúži ako primárne ostenie. Čelba je dodatočne otvorená klasickou metódou. Kvôli zvýšeniu bezpečnosti pri práci môžu byť do čelby navrtané sklolaminátové kotvy so striekaným betónom. Dno sa odkope a vytvorí sa železobetónová doska, po ktorej sa mechanizovaný stroj s vrubovacou pílou posúva pomocou hydraulických nôh. [25]



Obr. 21 Raziaci stroj – Perforex 3715 S [10]

Na základe kvality horniny alebo zeminy je určená dĺžka predklenby, ktoré sa navzájom prekrývajú. Razenie zvyčajne prebieha na plný profil tunela a hornina je rozpojovaná pomocou impaktorov alebo tunelbagrov. Pri nevhodných geotechnických podmienkach sa pre zvýšenie stability môžu vkladať do predklenby výstužné rámy a radiálne svorníky. Sekundárne monolitické ostenie je tvorené s odstupom od čelby. Jeho vzdialenosť závisí na geotechnických podmienkach prostredia. [10]

6.5 Zhrnutie a výber najvhodnejšej tunelovacej metódy pre predĺženie TT

✓ – použiteľná, podmiennečne použiteľná metóda (výhody)

✗ – nepoužiteľná metóda (nevýhody)

<u>METÓDA</u>	✓/✗
SCL	<p>✓ – Obmedzenie deformácií na povrchu sa zaisťuje rýchlym uzatváraním profilu čo najbližšie ku klenbe.</p> <p>✗ – Metóda, ktorá sa využíva v súčasnosti, ale iba v typických íloch v U.K.</p>
Laserehell	<p>✓ – Stabilita výrubu je zabezpečená sklonenou čelbou. Vhodná metóda do zeminového prostredia.</p> <p>✗ – Menej vhodná metóda do nižšieho nadložia. Razenie hlavne menších prierezov do 5 m, bolo by nutné raziť dve tunelové rúry.</p>
Jadrová (Kernbauweise)	<p>✓ – Stabilita výrubu je zabezpečená, vhodná pre veľký profil.</p> <p>✗ – Veľmi nízke nadložie na použitie jadrovej metódy, razenie v zeminách a blízka zástavba.</p>
Zeminový štít	<p>✓ – Pre razený tunel technicky najsprávnejšia voľba.</p> <p>✗ – Mimoriadne vysoká obstarávacía cena zeminového štítu pre veľký prierez dvojkoľajného tunelu.</p>
(C&C) Otvorená stavebná jama	<p>✓ – Zrejme najlacnejšia metóda.</p> <p>✗ – Pri svahovanej stavebnej jame spočíva nevýhoda tejto technológie vo veľkej šírke priestoru, ktorá by bola obmedzujúca pri zariadení staveniska. Pri dočasnom pažení stavebnej jamy môžeme hovoriť o neekonomickom využití pažiacej konštrukcie.</p>

- Top – Down** ✓ – Veľmi bezpečná a osvedčená metóda. Rýchla obnova prevádzky a úprava povrchu po vybudovaní zastropenia. Vhodná do zemín s nízkym nadložím.
Poznámka: Aktuálne využívaná technológia.
- „Želva“** ✓ – Použiteľná metóda.
- Hydraulické pretláčanie** ✗ – Veľký a špecifický profil tunela. Nutnosť pretláčať pridlhými úsekmi. Náročné udržanie smerového a výškového vedenia.
Poznámka: Maximálny pozdĺžny sklon navrhovanej TT je 4,438%, maximálny sklon použiteľnosti technológie je 5%.
- Obvodový vrub** ✓ – Použiteľnosť v danom prostredí, jednoduchosť vyrezávania ryhy, zaisťovanie stability v predstihu.
✗ – Nutná výroba špeciálneho vrubovacieho stroja na zákazku.
Zlá skúsenosť pri výstavbe Březenského tunela.

Na základe vyššie uvedených výhod a nevýhod daných technológií bola zvolená metóda TOP – DOWN. Postup výstavby sa bude skladať z vyhlbenia svažovanej stavebnej jamy na úroveň pracovnej plošiny pre ťažkú stavebnú mechanizáciu. Hĺbka pracovnej plošiny od pôvodného terénu bude premenlivá, približne 3 m. Na tejto úrovni budú zhotovené vodiace múriky pre správnu navigáciu strojnej mechanizácie s drapákom pre vybudovanie podzemných konštrukčných stien (PKS). Ďalším krokom je odkop zeminy medzi PKS 2,2 m pod úroveň vrchnej hrany stien. Na tejto úrovni budú osadené podpery pod debnenie, do ktorého bude vybetónovaná stropná konštrukcia, táto bude mať funkciu rozpery medzi PKS. Po zhotovení stropnej konštrukcie môže začať razenie pod zastropením a postupná obnova pôvodného terénu nad konštrukciou.

7 Teoretické princípy výpočtu

Numerická simulácia správania sa konštrukcie tunela, bola vytvorená v Programe Plaxis 2D (V21). Program Plaxis 2D je založený na metóde konečných prvkov (MKP) a pracuje s celou skúmanou oblasťou, ktorú delí na jednotlivé časti – konečné prvky.

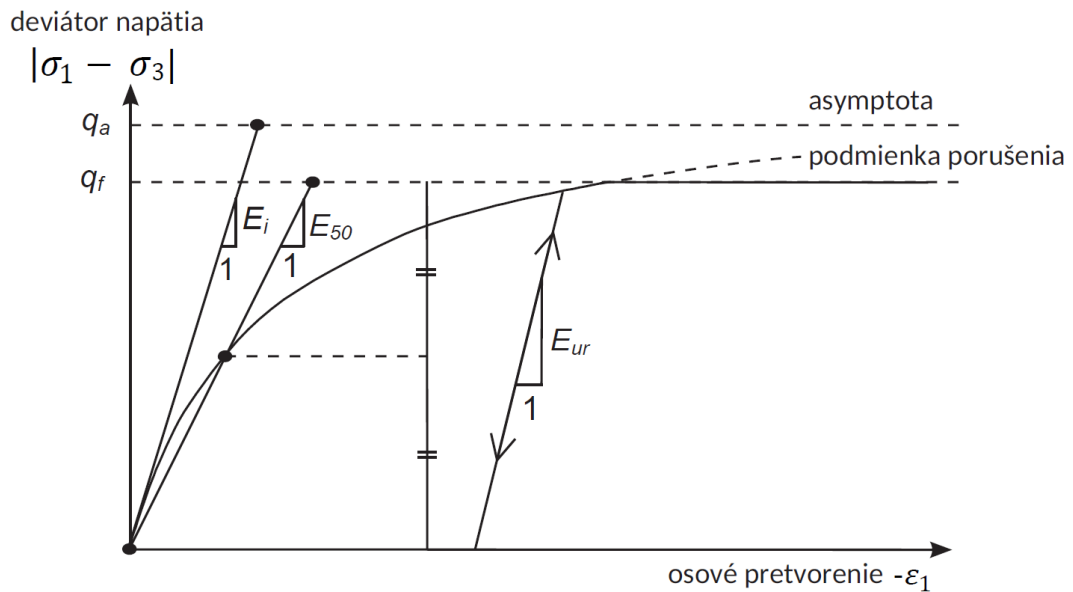
Pri matematickom modelovaní je dôležité použitie vhodných materiálových modelov s relevantnými vstupmi. V predkladanej práci sú použité dva materiálové modely Hardening soil model (HS model) a Hardening soil model with small strain stiffness (HSs model).

HS model je pokročilý matematický model na simuláciu správania sa zeminy. Skladá sa z hyperbolického pracovného diagramu s Mohr – Coulombovou podmienkou porušenia. Vznikajú tu plastické deformácie a je nutné definovať plochu plasticity, na rozdiel od nelineárneho hyperbolického modelu. Materiálový model vychádza z dvoch typov spevňovania – šmykové a kompresné spevňovanie. Pre modelovanie inverzibilných deformácií z prvotného deviátorového zaťaženia sa používa šmykové spevnenie. Kompresné spevnenie je používané pri modelovaní plastických deformácií, ktoré sú spôsobené primárnou kompresiou pri izotropnom zaťažovaní a edometrickom zaťažovaní. [26]

Vstupné parametre pre HS model [26]:

- Pevnostné parametre:
 - Uhol vnútorného trenia φ'
 - Súdržnosť c'
 - Uhol dilatancie ψ
- Deformačné parametre:
 - Sečnicový referenčný modul z triaxiálnej skúšky E_{50}^{ref}
 - Dotyčnicový referenčný modul z edometrickej skúšky E_{oed}^{ref}
 - Odťažovací a opäť pritažovací modul pružnosti E_{ur}^{ef}
 - Poissonovo číslo pre odťaženie a opätovné pritaženie ν_{ur}
- Ostatné parametre:
 - Exponent riadiaci závislosť deformačných charakteristík na napätí m
 - Referenčné napätie p_{ref} al. $\sigma_3^{ref} - 100$ kPa

- Súčiniteľ zemného tlaku pre normálnu konsolidáciu k_0^{NC}
- História zaťažovania **OCR** a **POP**



Obr. 22 Hyperbolický pracovný diagram s Mohr – Coulombovou podmienkou porušenia [26]

HSs model vychádza z HS modelu a obsahuje všetky vlastnosti tohto materiálového modelu. Okrem nich zohľadňuje zvýšenú tuhosť pôdy pri malých až veľmi malých pretvoreniach a ich nelineárnu závislosť od amplitúdy deformácie. Hss model je doplnený o dva parametre pre opísanie zmeny tuhosti s napätím [26]:

- Počiatočný šmykový modul alebo šmykový modul pri veľmi malých pretvoreniach G_0^{ref}
- Šmykové pomerné pretvorenie $\gamma_{0,7}$, pri ktorom klesne G_0 na 70% pôvodnej hodnoty

V tejto práci sú použité korelačné princípy pre stanovenie vstupných hodnôt tuhosti neogénnych ílov do materiálového modelu **HS** a **HSs**.

Prvý vzťah vychádza zo závislosti q_c (odpor na hrote CPT skúšky) a s_u (neodvodnená šmyková pevnosť). Pri neodvodnenom šmykaní materiálu je podmienka porušenia vodorovná, kde $\varphi_u = 0^\circ$ a pevnosť s_u je definovaná neodvodnenou šmykovou pevnosťou. Podľa korelácií je q_c definované nasledovne podľa korelačného vzťahu rovnica 7.1 [27]:

$$q_c = N_k \cdot s_u + \sigma_{v0} \quad (7.1)$$

ekvivalentnou úpravou získame rovnicu 7.2:

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (7.2)$$

kde σ_{v0} je totálne geostatické napätie a N_k označuje nosný faktor kužela, ktorý sa pohybuje v rozmedzí 15 ~ 20 [28].

Výpočet je zobrazený v **prílohe P7.1**.

Druhá korelácia, ktorá je využitá v predloženej práci, vychádza z prekonsolidácie ílu. Je nutné vyčíslieť σ_p (maximálne prekonsolidačné napätie) podľa rovnice 7.3 [29]:

$$\sigma_p = 0,29 \cdot q_c \quad (7.3)$$

Po stanovení σ_p je možné určiť tlak pred zaťažením (**POP**) rovnicou 7.4:

$$POP = \sigma_p - \sigma'_{or} \quad (7.4)$$

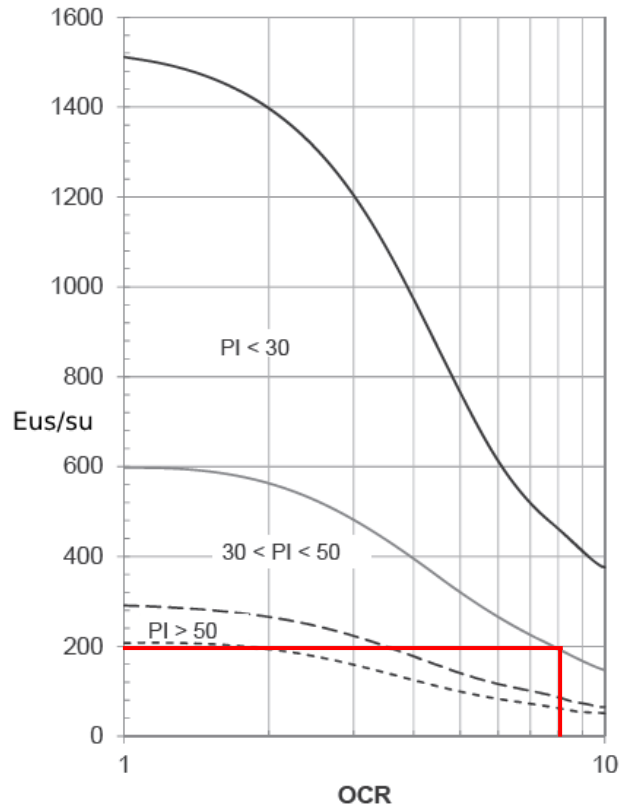
a stupeň prekonsolidácie (**OCR**) rovnicou 7.5:

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{or}} \quad (7.5)$$

kde σ'_{or} je totálne geostatické napätie.

Výpočet je zobrazený v **prílohe P7.2**.

Odvođenje zatiaľ neodvodneného modulu E_u na základe nameraného odporu na hrote z CPT skúšky (q_c) vid' Obr. 23. Na vodorovnej osi je **OCR** a na zvislej osi je podiel E_u/s_u . Závisí na indexe plasticity. [30]



Obr. 23 Závislosť E_{us}/s_u na OCR (8,25) a PI (41%) [30]

Po získaní modulu tuhosti $E_{u,ur}$ je potrebné tento modul previesť na efektívny modul tuhosti E'_{ur} a je následne zadávaný do vstupných hodnôt matematického modelu. Tento prevod je vyčíslený rovnicou 7.6:

$$\frac{E_{u,ur}}{E'_{ur}} = \frac{3}{2 \cdot (1 + \nu'_{ur})} \quad (7.6)$$

kde ν'_{ur} je Poissonovo číslo po odľahčení a opätovnom priťažení, uvažujeme s hodnotou $\nu'_{ur} = 0,15$.

Výpočet je zobrazený v **prílohe P7.3**.

Na základe vypočítania všetkých potrebných hodnôt je možné zostaviť priebeh efektívneho modulu tuhosti v závislosti na hĺbke (napätia), z ktorého je

získaný referenčný modul tuhosti E_{ur}^{ref} a exponent riadiaci závislosť deformačných charakteristík na napätí (m) podľa rovnice 7.7.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_{3,ref}} \right)^m \quad (7.7)$$

Kde c' je efektívna súdržnosť, φ' je efektívny uhol vnútorného trenia, σ_3' je geostatické napätie a $\sigma_{3,ref}$ je referenčná hodnota napätia $\sigma_{3,ref} = 100\text{kPa}$

Z hodnoty E_{ur}^{ref} sú prepočítane dva zvyšné vstupné parametre do výpočtového modelu – sečnicový referenčný modul z triaxiálnej skúšky E_{50}^{ref} a dotyčnicový referenčný modul z edometrickej skúšky E_{oed}^{ref} podľa rovnice 7.8.

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} = 3E_{oed}^{ref} \quad (7.8)$$

Výpočet je zobrazený v prílohe P7.4.

8 Výpočtový model

Model v predloženej bakalárskej práci bol vytvorený v dvojrozmernom prostredí (2D) a využíva 15 – uzlové trojuholníkové konečné prvky.

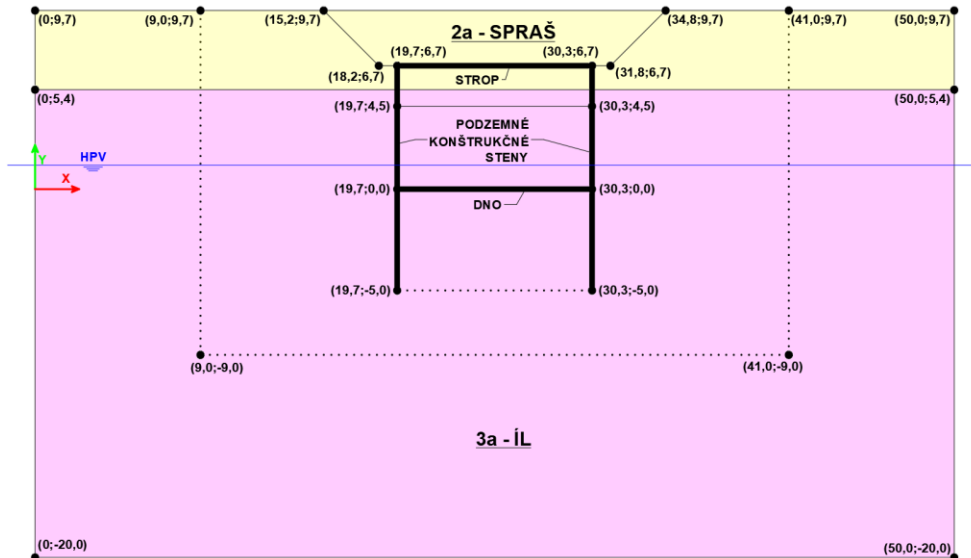
8.1 Geometria matematického modelu

Rozmery vytvoreného modelu sú nasledujúce – 50 m šírka a 29,7 m výška. Modelovaná konštrukcia je líniová stavba, preto je použiteľný model rovinatej deformácie. Na základe prieskumu, kde boli zistené lamíny a preplástky piesku lokálne staticky zvodnelé, bola do modelu zavedená hladina podzemnej vody v hĺbke 8,4 m.

V modeli sú uvažované dva druhy zemín. Na povrchu sa nachádzajú sprašovité hliny s mocnosťou 4,3 m. Pod touto kvartérou vrstvou sa nachádzajú neogénne íly, ktoré tvoria podložie až po spodný okraj modelu. PKS, stropná rozpera a dno konštrukcie sú modelované pomocou prvku „doska“. Vzájomné spolupôsobenie medzi zeminou a konštrukciou je definované kontaktným prvkom, rozhrania slúžiacemu k určeniu redukovaného trenia. Spojité zaťaženie v modeli nie je uvažované keďže sa v blízkosti konštrukcie nenachádza nič, čo by konštrukciu

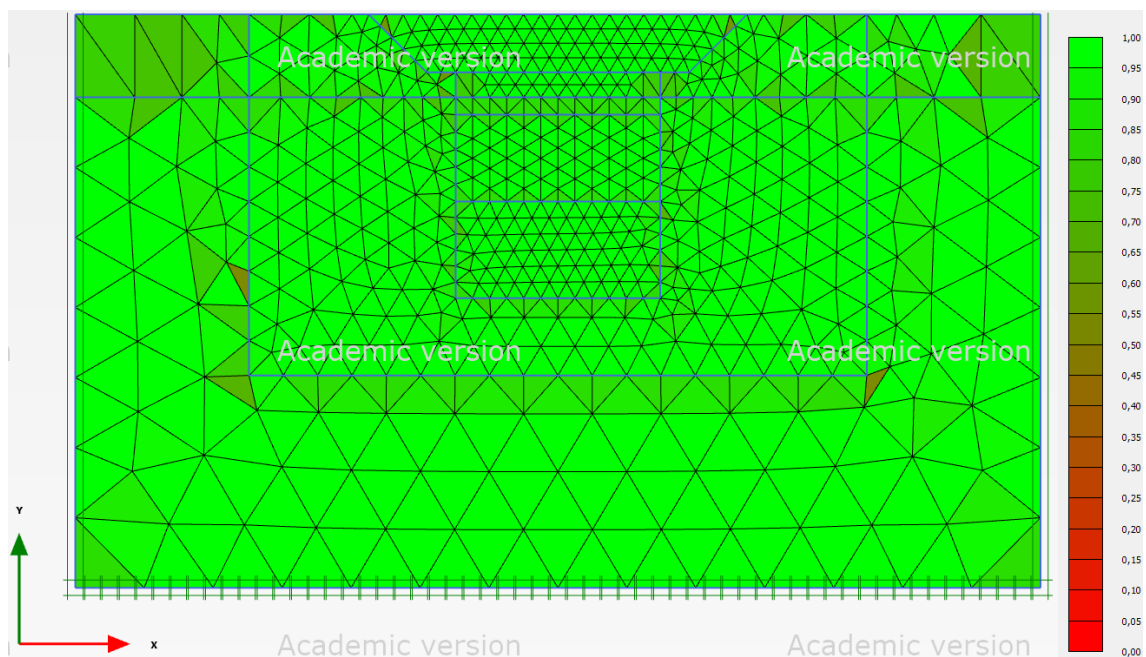
zaťažovalo. Pri uvažovaní spojitého zaťaženia 2 kN/m boli zmeny posunov a vnútorných síl do 2 %. Popis geometrie je zobrazený na Obr. 24.

Jednotlivé fázy a aktivácia (deaktivácia) prvkov konštrukcie sú určené v kapitole **8.2 Výpočtové fázy**.



Obr. 24 Schéma tunela v matematickom modeli

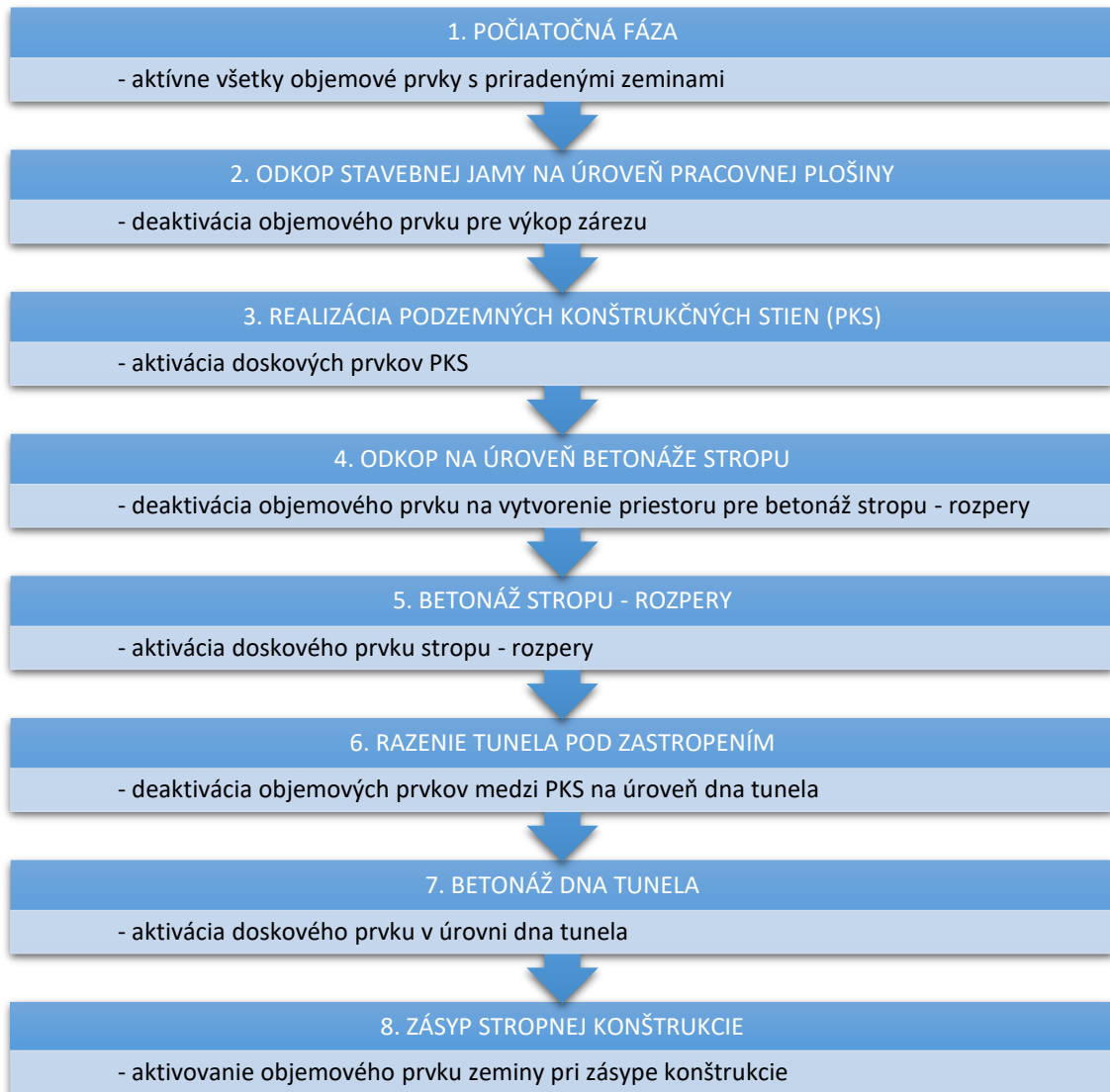
Rozdelenie modelovanej oblasti a kvalita vygenerovanej siete konečných prvkov je zobrazená na Obr. 25. Faktor hrubosti siete bol generovaný hodnotou 1,0, v blízkosti konštrukcie tunela zjemnený na 0,5 a v okolí konštrukčných prvkov 0,25.



Obr. 25 Vygenerovaná sieť konečných prvkov v programe PLAXIS 2D

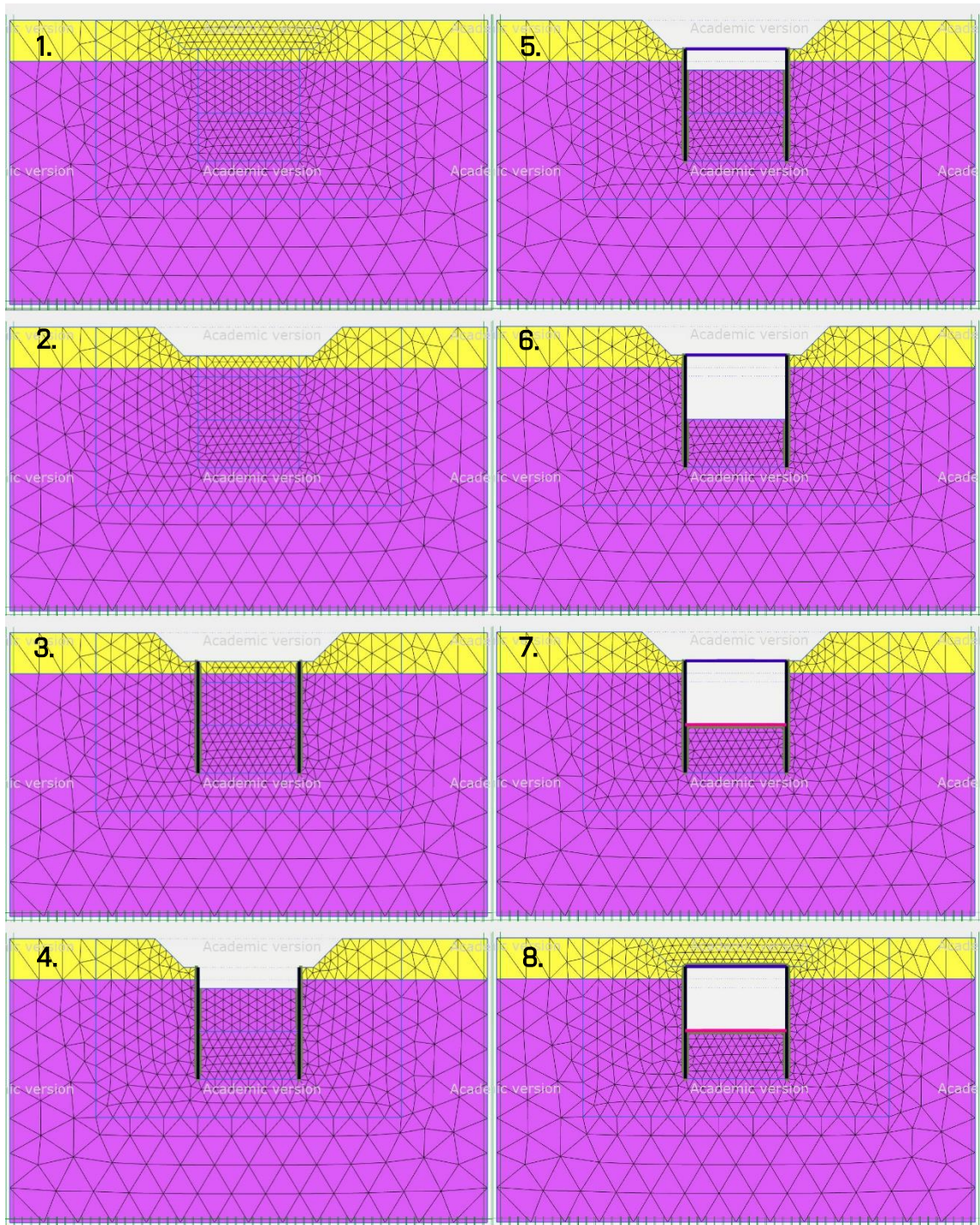
8.2 Výpočtové fázy

Výpočet konečných prvkov je rozdelený do ôsmych po sebe idúcich fáz. Každá fáza má presne definované aktívne (neaktívne) objemové a konštrukčné prvky v modeli. Fázy boli definované na základe pracovného postupu pri výstavbe technológiou TOP – DOWN.



Konsolidácia zeminu medzi jednotlivými fázami bola určená nasledovne [31]:

- Fáza 3. – 4., 59 dní
- Fáza 4. – 5., 158 dní
- Fáza 5. – 6., 20 dní
- Fáza 6. – 7., 36 dní



Obr. 26 Schéma modelovaných fáz výstavby 1. – 8.

8.3 Hodnoty vstupných parametrov

Vstupné parametre boli určené na základe prevedenej CPT skúšky (SP30) z geotechnického prieskumu [8]. Z nameraných hodnôt boli podľa vyššie uvedených korelačných vzťahov v kapitole 7. odvodené parametre tuhosti zeminy. Ostatné vstupné hodnoty boli určené podľa vyhodnotenia jadrových vrstiev z prieskumu alebo odborným odhadom.

Tabuľka 9.3- 1 Hodnoty vstupných parametrov modelovaných zemín

Parameter	Skratka	Druh zeminy		Jednotky
		SPRAŠ	ÍL	
Materiálový model	-	HS model	HSs	-
Objemová hmotnosť	γ_{unset}	19,8	17,3	kN/m ³
Objemová hmotnosť pod HPV	γ_{sat}	-	20,9	kN/m ³
Sečnicový referenčný modul	E_{50}^{ref}	12,9	15,67*	kN/m ²
Dotyčnicový referenčný modul z edometrickej skúšky	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	12,9	15,67*	kN/m ²
Odťažovací a opäť priťažovací modul pružnosti	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	38,7	47,0*	kN/m ²
Exponent závislosti deformačných charakteristík na napätí	m	0,5	1,0*	-
Poissonovo číslo pre odťaženie a opätovne priťaženie	ν'_{ur}	0,2	0,2	-
Súdržnosť	c'_{ref}	17	15	kN/m ²
Uhol vnútorného trenia	φ'	24	25	°
Uhol dilatancie	ψ	4	0	°
Parameter prietoku v smere „x“	k_x	-	$1 \cdot 10^{-3}$	m/deň
Parameter prietoku v smere „y“	k_y	-	$1 \cdot 10^{-3}$	m/deň
Síla rozhrania	R_{inter}	0,9	0,9	-
Stanovenie zemného tlaku	-	Automaticky	Ručne	-
Súčiniteľ zemného tlaku	K_0	0,5933	0,8	-
	OCR	1,0	1,0	-
	POP	0,0	1000	kN/m ²
* odvodené hodnoty z CPT skúšky, ostatné hodnoty boli stanovené odborným odhadom po konzultáciách alebo hodnotami z IG prieskumu				

Tabuľka 9.3- 2 Hodnoty vstupných parametrov modelovaných prvkov konštrukcie

Parameter	Skratka	Prvok konštrukcie			Jednotky
		PKS ■	Strop ■	Dno ■	
Materiálový model	-	Elastický	Elastický	Elastický	-
Osová tuhosť	EA₁	19,8 · 10 ⁶ 26,4 · 10 ^{6*} 33,0 · 10 ^{6**}	26,4 · 10 ⁶	13,2 · 10 ⁶	kN/m
Tuhosť v smere mimo roviny	EA₂	19,8 · 10 ⁶ 26,4 · 10 ^{6*} 33,0 · 10 ^{6**}	26,4 · 10 ⁶	13,2 · 10 ⁶	kN/m
Ohybová tuhosť	EI	0,594 · 10 ⁶ 1,41 · 10 ^{6*} 2,75 · 10 ^{6**}	1,41 · 10 ⁶	176,0 · 10 ³	kN/m ² /m
Hrúbka	d	0,6 0,8* 1,0**	0,8	0,4	m
Poissonovo číslo	v	0,15	0,15	0,15	-
Hmotnosť materiálu dosky	w	4,62 6,16* 7,70**	6,16	3,08	kN/m/m
* hodnoty pre hrúbky PKS 800 mm, ** hodnoty pre hrúbky PKS 1000 mm, zvyšné hodnoty pre hrúbky PKS 600 mm					

9 Príprava a postup výpočtu

Samotnému výpočtu predchádzala úprava vstupov zo statickej penetračnej skúšky (CPT) [8], ktorá bola vykonaná počas podrobného geotechnického prieskumu. Výsledky vyššie spomínanej skúšky boli pomocou jednotlivých korelačných vzorcov, ktoré sú uvedené v **kapitole 7**, prepočítané na vstupné hodnoty do matematického modelu pre objemové prvky zeminy vid' **Prílohy P7.1, P7.2 a P7.3**.

Vstupné parametre boli priradené ako objemovým prvkom zemín tak aj konštrukčným prvkom tunela. Pri výpočte je uvažovaná hĺbka založenia PKS 11,7 m od pracovnej plošiny. Výpočet bol realizovaný pri troch rôznych hrúbkach PKS – 600 mm, 800 mm a 1000 mm. Pre tieto parametre PKS sa predložená práca sústredí na dimenzovanie vybraného konštrukčného prvku, porovnávanie zvislých a horizontálnych posunov, porovnanie s realizovaným inklinometrickým meraním IN – SITU, a vyčíslenie a porovnanie jednotkovej ceny za m².

9.1 Dimenzovanie vybraného konštrukčného prvku

Za vybraný konštrukčný prvok bola zvolená podzemná stena. Poloha rezu je zobrazená v **prílohe P7.1**. Rez sa nachádza v približnom staničení – km 0,422 000. Charakteristické hodnoty vnútorných síl boli získané z matematického modelu konštrukcie. Boli vytvorené tri modely pre rôzne hrúbky PKS. Prepočet charakteristických hodnôt na návrhové je uvedený v rovnici 9.1 a rovnici 9.2:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_K \quad (9.1)$$

kde N_{Ed} je návrhová hodnota normálovej sily, γ_G je súčiniteľ stálego zaťaženia a N_K je charakteristická hodnota normálovej sily.

$$M_D = \gamma_G \cdot M_K \quad (9.2)$$

kde M_D je návrhová hodnota momentu, γ_G je súčiniteľ stálego zaťaženia $\gamma_G = 1,35$ a M_K je charakteristická hodnota momentu.

Z návrhových hodnôt vnútorných síl v priereze sú zostavené štyri kombinácie pre následne posúdenie interakčným diagramom:

- K1 – Maximálny moment (M_{max}) a tomu odpovedajúca normálová sila (N_{odp})
- K2 – Maximálna normálová sila (N_{max}) a tomu odpovedajúci moment (M_{odp})
- K3 – Minimálny moment (M_{min}) a tomu odpovedajúca normálová sila (N_{odp})
- K4 – Minimálna normálová sila (N_{min}) a tomu odpovedajúci moment (M_{odp})

Vymenované kombinácie sú zobrazené v interakčných diagramoch pre jednotlivé hrúbky. Tento postup je opakovaný pre tri hrúbky PKS – 600 mm, 800 mm a 1000 mm vid'. **Kapitola 10.1, 10.2 a 10.3.**

9.2 Posuny vybraného konštrukčného prvku

Z vytvorených matematických modelov sú v tejto časti práce zobrazené horizontálne a vertikálne posuny podzemnej konštrukčnej steny v závislosti na hrúbke. Jednotlivé krivky odpovedajú hrúbkam PKS 600 mm, 800 mm a 1000 mm, posuny sú zobrazené v závislosti na hĺbke vid'. **Kapitola 10.4.**

9.3 Porovnanie matematického modelu so skúškami in – situ

V tejto časti sa bakalárska práca zaoberá porovnaním správania sa konštrukcie v matematickom modeli a v skutočnosti. Pre porovnanie sú použité výsledky vytvoreného modelu pre hrúbku PKS 600 mm s výsledkami inklinometrického merania v smere kolmom na konštrukciu tunela pre takú istú hrúbku. Porovnanie horizontálnych posunov bolo uskutočnené iba v čase, kedy bol tunel razený vid'. **Kapitola 10.5.**

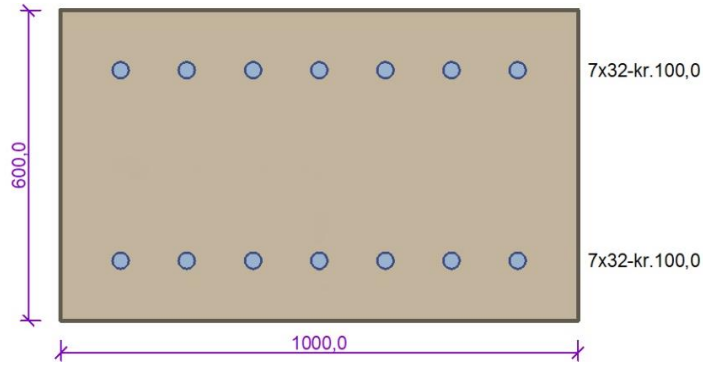
9.4 Zjednodušené parametrické porovnanie cien PKS

Posledná časť bakalárskej práce parametricky porovnávaná cenu jednotlivých hrúbok podzemných konštrukčných stien. Zaoberá sa iba porovnaním teoretických množstiev materiálu s jednotkovou cenou na m^2 PKS v položkách ocelová výstuž a betón vid'. **Kapitola 10.6.** Výpočet neobsahuje výrobnú réžiu, ktorá sa zvyšuje pri zväčšovaní hrúbky PKS.

10 Výsledky výpočtu a parametrické porovnanie

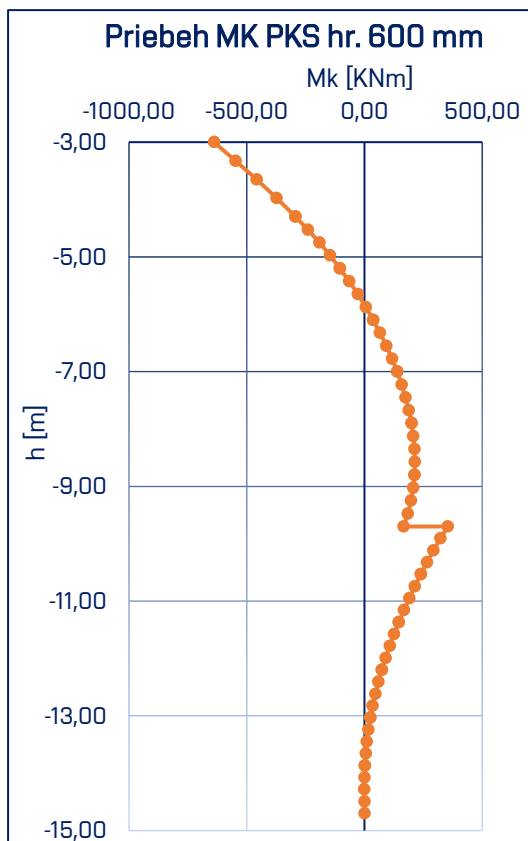
10.1 Výpočet I. dimenzovanie PKS hr. 600 mm

V prvej časti bol matematický model vytvorený pre dimenzovanie prierezu podzemnej steny hrúbky 600 mm vid' Obr. 27.

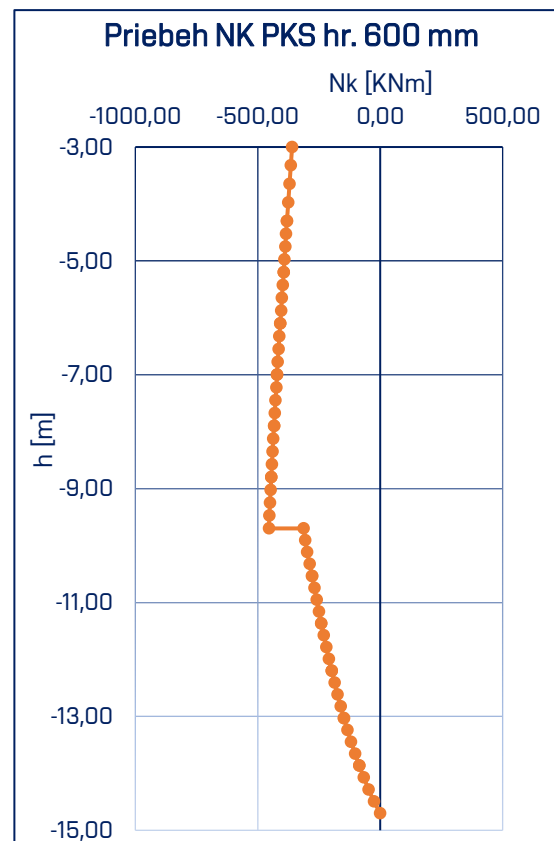


Obr. 27 Schéma prierezu 600x1000

Vykreslený priebeh charakteristických hodnôt v PKS hr. 600 mm vid' Graf 1 a Graf 2.



Graf 1 Priebeh M_k v PKS o hr. 600 mm



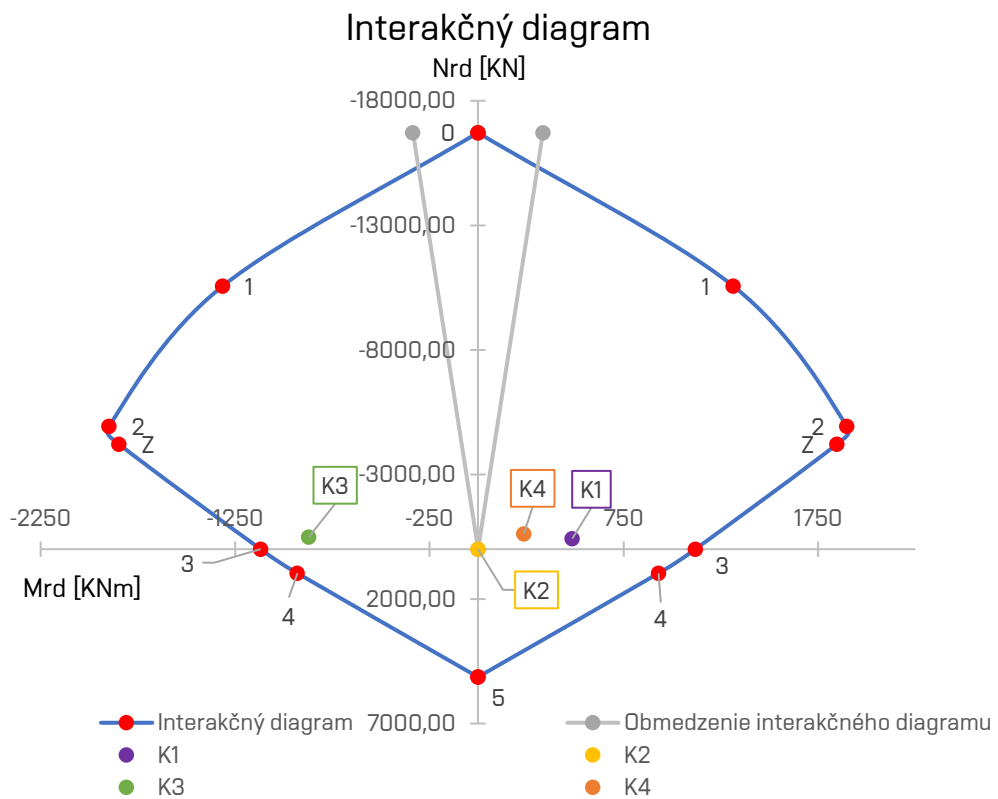
Graf 2 Priebeh N_k v PKS hr. 600 mm

Návrhové a prepočítané charakteristické hodnoty kombinácií použité pre Interakčný diagram vid'. Tabuľka 11.1- 1.

Tabuľka 11.1- 1 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 600 mm

	K1	K2	K3	K4
M_K	354,06	0,00	-638,70	166,97
N_K	-313,32	-0,47	-359,89	-454,47
M_D	477,99	0,00	-862,24	225,41
N_{Ed}	-422,99	-0,64	-485,85	-613,54

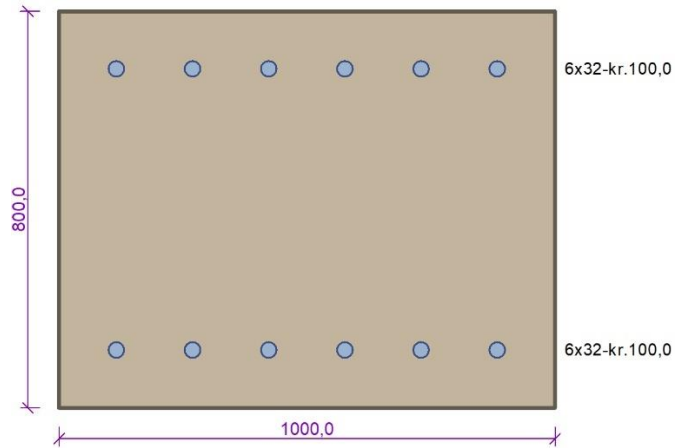
Pre dimenzovanie bol použitý betón pevnosti C30/37 a betonárska oceľ B500B – 14 kusov (ks) v dvoch radoch s priemerom (\varnothing) 32 mm. Posudok je vyhovujúci a podrobný výpočet je zobrazený v prílohe P10.1.



Graf 3 Interakčný diagram PKS hr. 600 mm

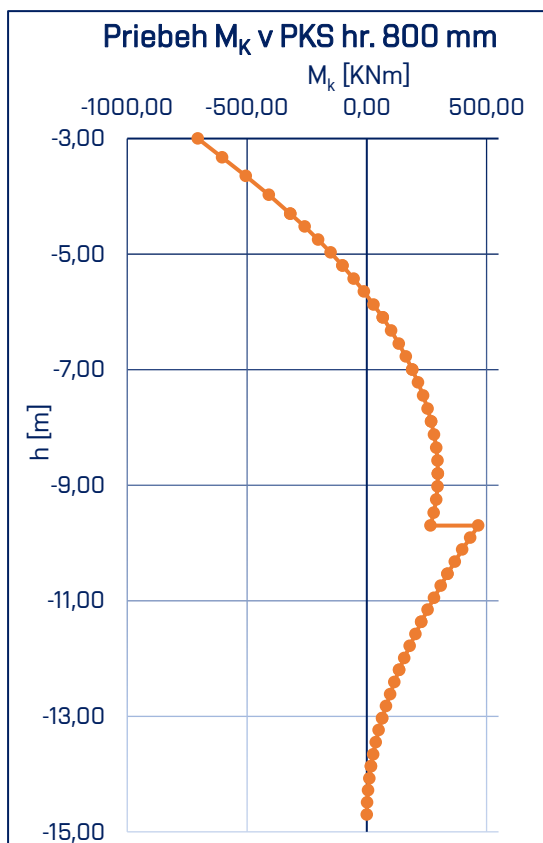
10.2 Výpočet II. dimenzovanie PKS hr. 800 mm

V druhej časti bol matematický model vytvorený pre dimenzovanie prierezu podzemnej steny hrúbky 800 mm vid'. Obr. 28.

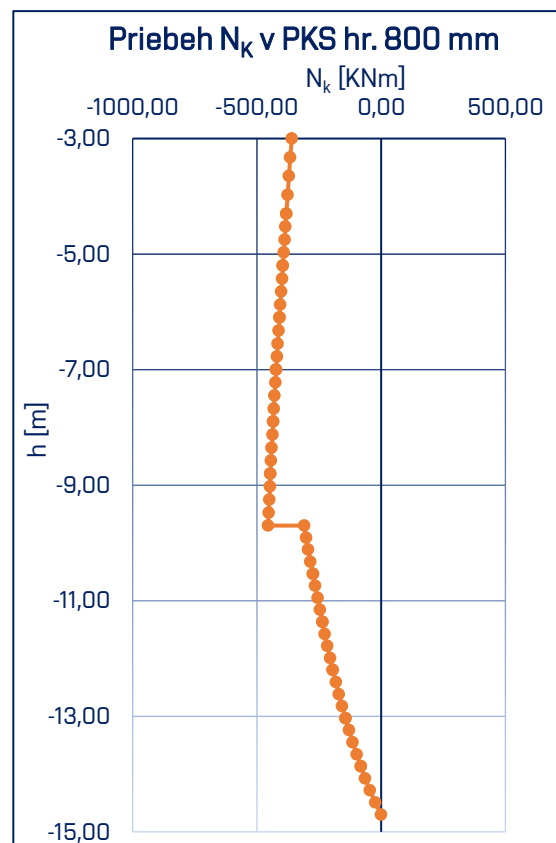


Obr. 28 Schéma prierezu 800x1000

Vykreslený priebeh charakteristických hodnôt v PKS hr. 800 mm vid'. Graf 4 a Graf 5.



Graf 4 Priebeh M_k v PKS o hr. 800 mm



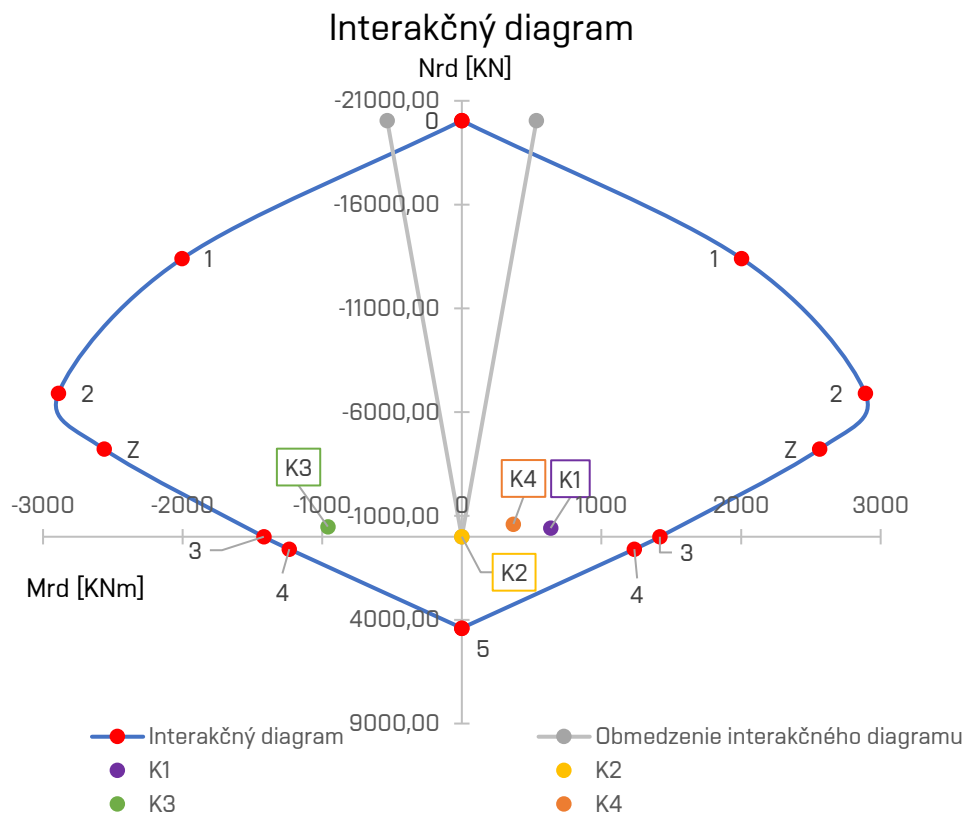
Graf 5 Priebeh N_k v PKS hr. 800 mm

Návrhové a prepočítané charakteristické hodnoty kombinácií použité pre Interakčný diagram vid'. Tabuľka 11.1- 2.

Tabuľka 11.1- 2 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 800 mm

	K1	K2	K3	K4
M_K	465,76	0,00	-705,15	266,04
N_K	-309,25	-0,47	-360,02	-454,47
M_D	628,77	0,00	-951,96	359,15
N_{Ed}	-417,48	-0,64	-486,02	-613,54

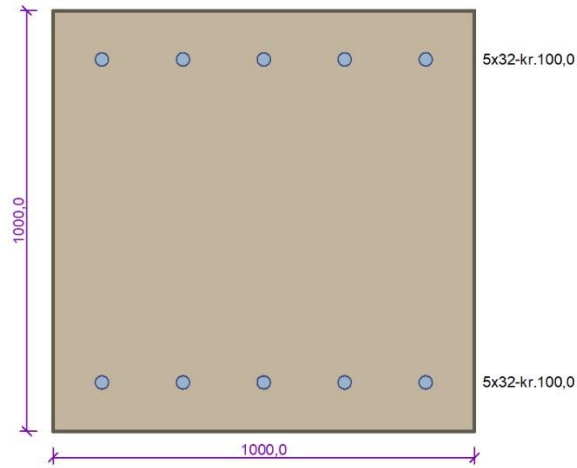
Pre dimenzovanie bol použitý betón pevnosti C30/37 a betonárska oceľ B500B – 12 ks v dvoch radoch s $\varnothing = 32$ mm. Posudok je vyhovujúci a podrobný výpočet je zobrazený v prílohe P10.2.



Graf 6 Interakčný diagram PKS hr. 800 mm

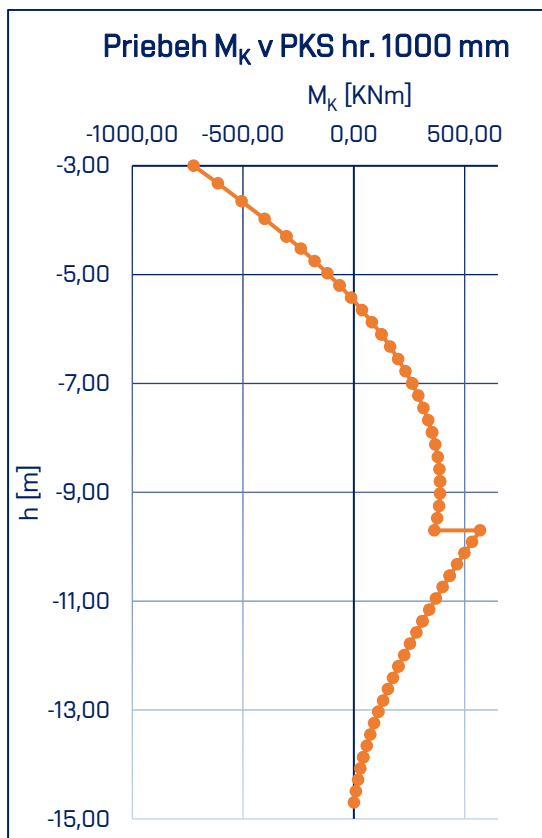
10.3 Výpočet III. dimenzovanie PKS hr. 1000 mm

V tretej časti bol matematický model vytvorený pre dimenzovanie prierezu podzemnej steny hrúbky 1000 mm vid'. Obr. 29.

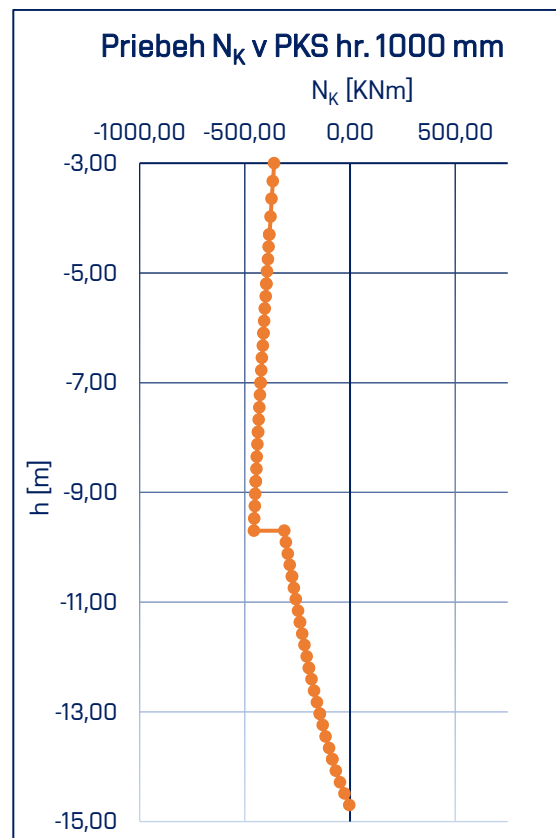


Obr. 29 Schéma prierezu 1000x1000

Vykreslený priebeh charakteristických hodnôt v PKS hr. 1000 mm vid'. Graf 7 a Graf 8.



Graf 7 Priebeh MK v PKS o hr. 1000 mm



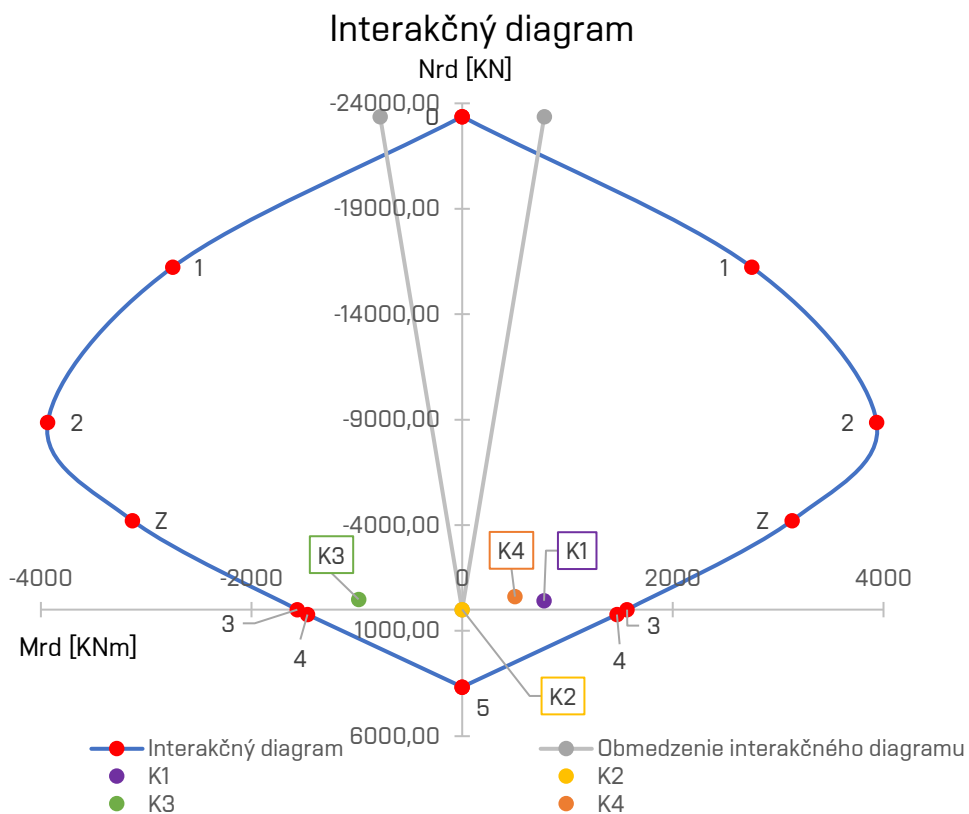
Graf 8 Priebeh NK v PKS hr. 1000 mm

Návrhové a prepočítané charakteristické hodnoty kombinácií použité pre Interakčný diagram vid'. Tabuľka 11.1- 3

Tabuľka 11.1- 3 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 1000 mm

	K1	K2	K3	K4
M_K	570,33	0,00	-722,67	363,50
N_K	-311,01	-2,68	-360,08	-456,47
M_D	769,94	0,00	-975,61	490,73
N_{Ed}	-419,87	-3,62	-486,11	-616,24

Pre dimenzovanie bol použitý betón pevnosti C30/37 a betonárska oceľ B500B – 10 ks v dvoch radoch s $\varnothing = 32$ mm. Posudok je vyhovujúci a podrobný výpočet je zobrazený v prílohe P10.3.

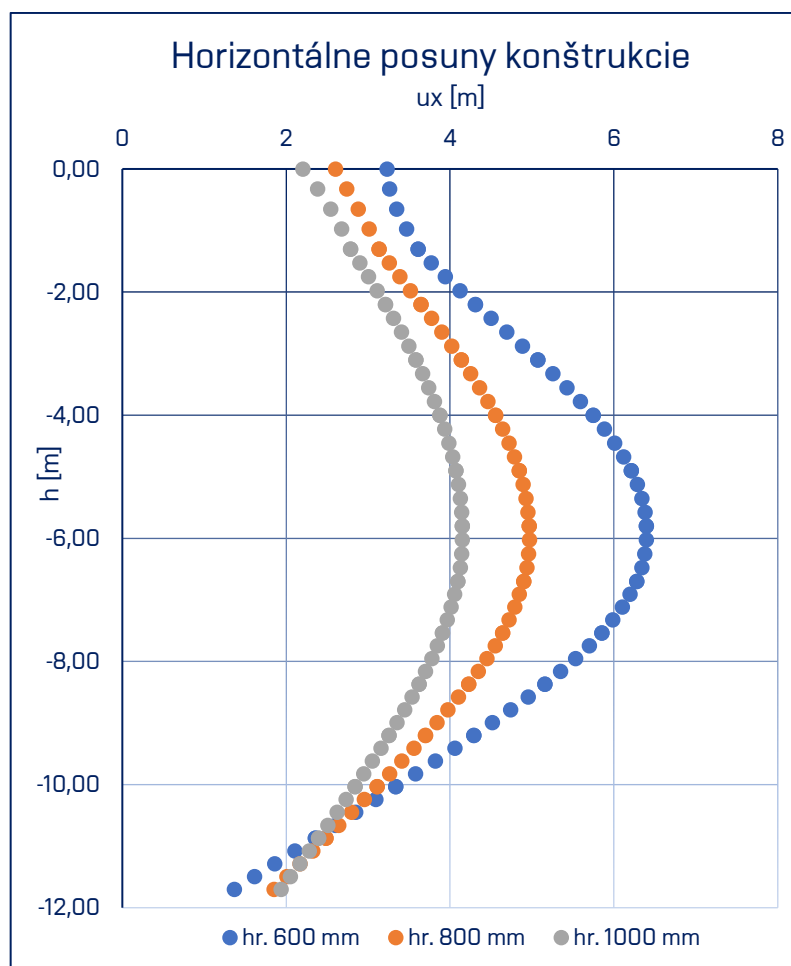


Graf 9 Interakčný diagram PKS hr. 1000 mm

10.4 Parametrické porovnanie horizontálnych a vertikálnych posunov

Pri horizontálnych posunoch je na osi y zobrazená hĺbka založenia PKS kde za počiatok je uvažovaná pracovná plošina 3 m pod úrovňou pôvodného terénu. Os x zobrazuje posuny konštrukcie vo vodorovnom smere. Zobrazené posuny sa vzťahujú na fázu výstavby – 7. „Zásyp stropnej konštrukcie“. To preto, že v tejto fáze boli definované najväčšie posuny po razení tunela a následnom priťažení konštrukcie vid'. Graf 10:

- PKS hrúbky 600 mm mala najväčší horizontálny posun 6,40 mm v hĺbke -5,8 m.
- PKS hrúbky 800 mm mala najväčší horizontálny posun 4,97 mm v hĺbke -6 m.
- PKS hrúbky 1000 mm mala najväčší horizontálny posun 4,15 mm v hĺbke -6 m.

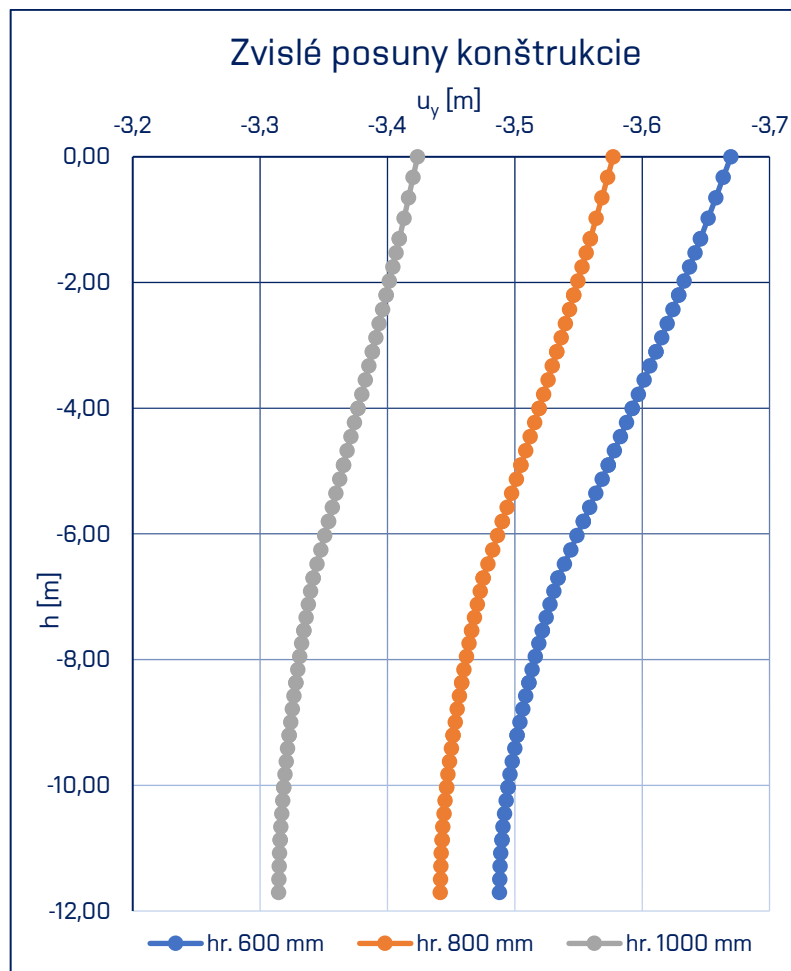


Graf 10 Porovnanie horizontálnych posunov PKS hr. 600 mm, 800 mm a 1000 mm

Pri vertikálnych posunoch je na osi y taktiež zobrazená hĺbka založenia PKS kde za počiatok je uvažovaná pracovná plošina 3 m pod úrovňou pôvodného terénu.

Os x zobrazuje posuny konštrukcie vo vertikálnom smere. Zobrazené posuny sa vzťahujú na fázu výstavby – 7. „Zásyp stropnej konštrukcie“ ako bolo uvedené aj pri horizontálnych posunoch. Opäť je možné vidieť krivky podobného trendu, ktoré zobrazujú najväčšie posuny v hlave a postupne klesajú k päte PKS vid'. Graf 11:

- PKS hrúbky 600 mm mala najväčší vertikálny posun -3,67 mm v hlave.
- PKS hrúbky 800 mm mala najväčší vertikálny posun -3,58 mm v hlave.
- PKS hrúbky 1000 mm mala najväčší vertikálny posun -3,42 mm v hlave.



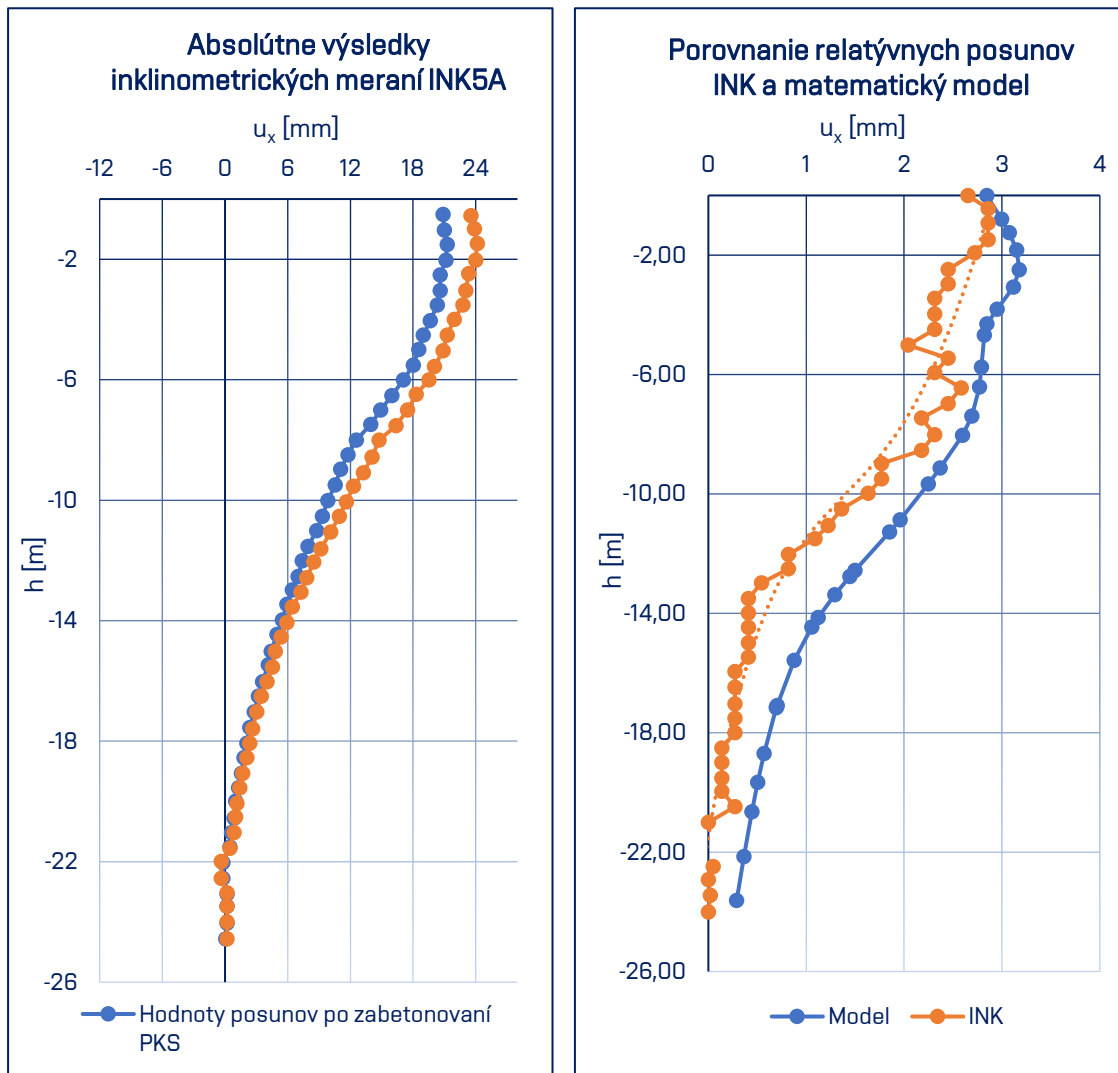
Graf 11 Porovnanie vertikálnych posunov PKS hr. 600 mm, 800 mm a 1000 mm

10.5 Kontrola modelu skúškami IN – SITU

Porovnanie vytvoreného modelu s reálnym správaním sa konštrukcie bolo realizované s inklinometrom – INK5A. Inklinometrický vrt je umiestnený na hornej hrane zárezu. V rovnakom mieste bol vytvorený rez v modeli, z ktorého boli odčítané dáta posunov spôsobené razením tunela.

V prvom kroku boli zobrazené absolútne hodnoty posunov po realizácii podzemných stien a razení tunela, ktoré dosahovali najväčší posun kumulovanej deformácie vid'. Graf 12.

Tieto merania boli od seba odčítané, aby boli získane relatívne hodnoty posunov a následne možné porovnanie s matematickým modelom vid'. Graf 13.



Graf 12 Výsledky inklinometrických meraní po realizácii PKS a razení tunela

Graf 13 Porovnanie relatívnych posunov v modeli a inklinometrickým meraním

Pri výslednom porovnaní je vidieť blízku zhodu inklinometrického merania a modelu MKP. Tým pádom je možné skonštatovať, že sa podarilo vytvoriť funkčný matematický model, ktorého vstupné parametre sú odvodené zo statickej penetračnej skúšky (CPT) a doplnené odbornými odhadmi po konzultáciách.

10.6 Zjednodušené parametrické porovnanie cien PKS

V tejto kapitole sú vyčíslené jednotlivé objemy a ceny betónu spolu s jednotkovými cenami ocele za kilogram (kg) výstuže pre PKS steny o vyššie spomínaných hrúbkach 600 mm, 800 mm a 1000 mm. Ceny sa vzťahujú na jednotku hrúbky PKS, bežný meter a meter [Kč/m²]. Podrobné rozpísanie postupu porovnania cien je uvedené nižšie vid'. Tabuľka 11.5- 1.

Pri výpočte PKS hr. 600 mm bola do úvahy braná hlavná nosná výstuž 14Ø32 mm, obvodový strmeň s rozstupom (s), s = 200 mm, 5Ø10 a dvojstrižné strmene s = 200 mm, 5Ø10. Súčet ceny betónu a ocele je najnižší – 6710,5 Kč/m².

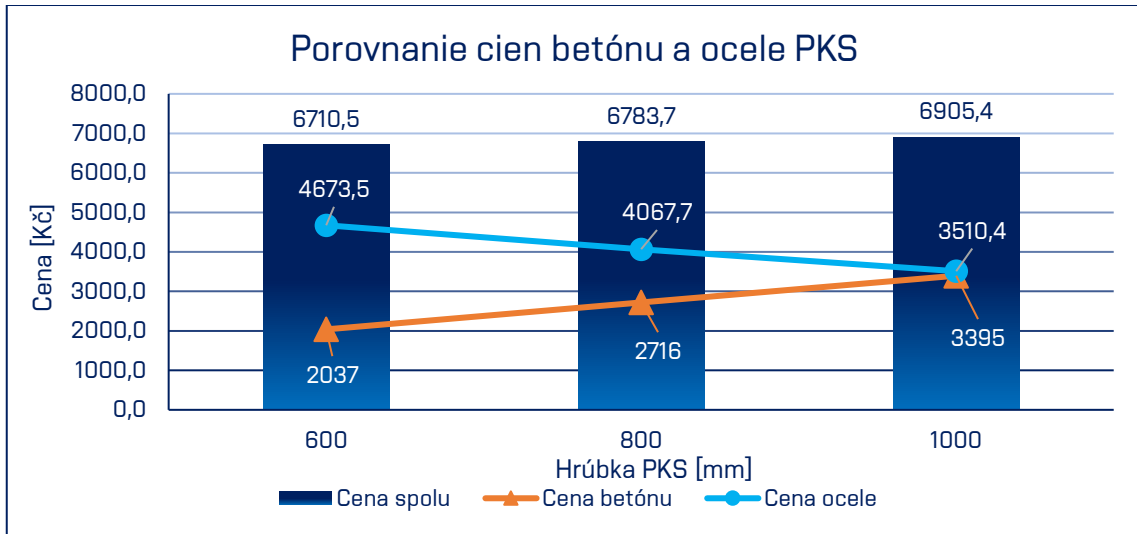
PKS hr. 800 mm, do úvahy bola braná hlavná nosná výstuž 12Ø32 mm, obvodový strmeň s = 250 mm, 4Ø8 a dvojstrižné strmene s = 250 mm, 4Ø8. Súčet ceny betónu a ocele je – 6783,7 Kč/m².

PKS hr. 1000 mm bola do úvahy braná hlavná nosná výstuž 10Ø32 mm, obvodový strmeň s = 250 mm, 4Ø8 a dvojstrižné strmene s = 250 mm, 4Ø8. Súčet ceny betónu a ocele je – 6905,4 Kč/m².

Tabuľka 11.5- 1 Výpočet ceny materiálu pre jednotlivé hrúbky PKS

Materiál			Hrúbka PKS [mm]		
			600	800	1000
Betón ***	Jednotková cena	[Kč/m ³]	3 395		
	Množstvo	[m ³]	0,6	0,8	1,0
	Jednotková cena *	[Kč/m ²]	2037	2716	3395
Oceľ - hlavná nosná výstuž	Ø betonárskej výstuže	[mm]	14xØ32	12xØ32	10xØ32
	Celková hmotnosť bet. výstuže	[kg/m ²]	88,34	75,72	63,1
	Jednotková cena **	[Kč/kg]	48,7		
	Jednotková cena	[Kč/m ²]	4302,2	3687,6	3073,0
Oceľ - strmene	Ø strmeňov	[mm]	5xØ10	4xØ8	4xØ8
	vzdialenosť strmeňov	[mm]	200	250	250
	Celková hmotnosť strmeňov	[kg/m ²]	7,9	8,09	9,31
	Jednotková cena **	[Kč/kg]	47,0		
	Jednotková cena	[Kč/m ²]	371,3	380,1	437,5
	Cena ocele	[Kč/m ²]	4673,5	4067,7	3510,4
	Cena spolu, betón + oceľ	[Kč/m ²]	6710,5	6783,7	6905,4
poznámka: * - cena betónu ku 1.1.2022 [32], ** - cena ocele ku 15.5.2022 [33], *** - C 30/37– 90D X0, XC1-4, XD1-2, XF1, XA1-2 svc PERMACRETE, m.p.30mm					

Po vyčíslení množstva ocele a objemu betónu pre jednotlivé hrúbky PKS bolo možné zostaviť porovnanie v závislosti celkovej ceny na hrúbke PKS Graf 14. Toto porovnanie zobrazuje celkovú cenu PKS a cenu jednotlivých položiek.



*Graf 14 Porovnanie cien betónu a ocele pre jednotlivé hrúbky podzemných konštrukčných stien.
Poznámka: dtto ako Tabuľka 11.5- 1*

11 Záver

V bakalárskej práci sú predstavené použiteľné technológie výstavby tunela pre električky s nízkym nadložíím vid'. **Kapitola 6**, z ktorých bola vybraná metóda TOP – DOWN. Pre zvolenú metódu bol vytvorený matematický model MKP, do ktorého boli podľa korelačných vzťahov určené hodnoty vlastnosti neogénnych ílov vid'. **Kapitola 7**. Pre výpočet sú použité pokročilé materiálové modely HS a HSs.

PKS bola nadimenzovaná pre tri hrúbky podľa kombinácií z vnútorných síl od stáleho zaťaženia konštrukcie a okolitého zaťaženia od zeminy.

Na podzemnej konštrukčnej stene o hrúbke 600 mm, 800 mm a 1000 mm sú realizované parametrické porovnaní. Porovnanie posunov spôsobených razením vid'. **Kapitola 10.4**. Porovnanie modelu o hrúbke 600 mm s inklinometrickým meraním po vybetónovaní PKS, ktorá ukazuje podobné správanie sa konštrukcie a tým je overená funkčnosť matematického modelu vid'. **Kapitola 10.5**.

Záverečná časť práce obsahuje parametrické porovnanie teoretických cien materiálu, kde sú zobrazené celkové a jednotlivé ceny materiálu podľa hrúbky PKS vid'. **Kapitola 10.6**.

12 Zoznam použitej literatúry

- [1] SŮRA, Jan. *Obrazem: stavba tramvajové trati do brněnského kampusu je v polovině - Zdopravy.cz* [online]. 2021 [vid. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/obrazem-stavba-tramvajove-trati-do-brnenskeho-kampusu-je-v-polovine-78921/>
- [2] POLÁK, Marek, Marek PAZDÍREK a Ondrej HORT. Geotechnický monitoring na stavbe tramvajového tunelu v Brně. *Tunel: Časopis českého tunelářského komitétu a slovenskej tunelárskej asociace ITA-AITES*. [online]. 2021, č.3, str. 22-23. ISSN 1211-0728. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2021/tunel_3-21-def.pdf
- [3] *Situácia tramvajového tunela Osová – Kampus MU* [online]. Dostupné z: <https://www.metroprojekt.cz/public/files/gallery/101/situace-stavby-osova.png>
- [4] MARTINEC, Jan. *Prodloužení TT z Osové ke Kampusu MU v Bohunicích - 1. etapa, Podélny rez tunely, Stupeň dokumentace - DUR, Číslo přílohy 003*. 2016
- [5] *Geomorfologická mapa* [online]. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>
- [6] *Mapa vrtnej preskúmanosti* [online]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/
- [7] HANŽL, P., Z. KREJČÍ, J. VÍT, J. OTAVA, Z. NOVÁK a Z. STRÁNIK. *Geologická mapa Brna a okolí*. Praha: Český geologický úřad, 1999. ISBN 80-7075-351-X.
- [8] HANÁK, Jaroslav, Lucie Rachel SANŽA, Pavel ŘEZNÍČEK, Adam ZAPLETAL a Adéla GAZDOVÁ. *Podrobný geotechnický průzkum - Prodloužení TT z Osové do Kampusu MU v Brně Bohunicích*. 2018.
- [9] ČSN 28 0318. *Průjezdne průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových dráhach*. 2015.
- [10] ITA-AITES, Asociace. *UŽIVATELSKÁ PRÍRUČKA PRO KONVENČNÍ TUNELOVÁNÍ*: [online]. 2019. ISBN 978-80-906452-40. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/edice_CTuK/prirucka-konvencni-tunelovani-191120.pdf

- [11] THOMAS, Alun. *Sprayed Concrete Lined Tunnels* [online]. 2009. ISBN 9780429186776. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781482265682>
- [12] PRUŠKA, Jan (FSv ČVUT v Praze) a Matouš HILAR (D2 CONSULT PRAGUE S.R.O.). POUŽITÍ STRÍKANÉHO BETONU PRO DEFINITIVNÍ OSTĚNÍ TUNELŮ [online]. 2011. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/Seminare/2011_03_TO/Pruska_Hilar-Pouziti_SB_pro_def_osteni.pdf
- [13] *Tunel Moutier (CH)- Jadrová metóda* [online]. Dostupné z: https://www.marti-tunnel.ch/PublishingImages/_03_Referenzen/Tunnel de Moutier_4.jpg?RenditionID=5
- [14] ITA-AITES, Asociace. *UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA PRO MECHANIZOVANÉ TUNELOVANIE*. 2014. ISBN 978-80-260-5957-8.
- [15] HORÁK, Vladislav. *Přednáška BF006 PODZEMNÍ STAVBY- Štítování*
- [16] MOURATIDIS, Anastasios. The “Cut-and-Cover” and “Coverand- Cut” Techniques in Highway Engineering. *Ejge* [online]. 2008. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.533.8498&rep=rep1&type=pdf>
- [17] HORÁK, Vladislav. *Přednáška BF006 PODZEMNÍ STAVBY- Mělké tunely*
- [18] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Jiří BUREŠ, Vladislav HORÁK a Alexej VITULA. *Geodézie v podzemních prostorách* [online]. B.m., nedatováno. b.n. Dostupné z: <https://adoc.pub/geodezie-v-podzemnich-prostorach.html>
- [19] RAČANSKÝ, Václav. *Přednáška zakládání staveb - stavební jámy*. 2018
- [20] BARTÁK, Jiří. STAVEBNÍ JÁMY [online]. nedatováno, 1–18. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/10/stavebni-jamy-1.pdf>
- [21] KLEPSATEL, František, Libor MAŘÍK a Miloslav FRANKOVSKÝ. *Městské podzemní stavby*. 2005. ISBN 978-80-8076-021-2.
- [22] PETKO, Anton a Vít PASTRŇÁK. Technológia, postup a špecifiká razenia tunela Považský Chlmec. *Tunel* [online]. 2015, 88–92. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2015/150902_tunel.pdf
- [23] KLEPSATEL, František a Jaroslav RACLAVSKÝ. *Bezvýkopová výstavba a*

- obnova podzemních vedení*. Bratislava: JAGA GROUP, s. r. o., 2007. ISBN 978-80-8076-053-3.
- [24] *Přednáška BF006 PODZEMNÍ STAVBY- Mikrotunelovanie*
- [25] BLOODWORTH, Alan Graham. THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF TUNNELLING EFFECTS ON STRUCTURES TO DEVELOP DESIGN METHODS [online]. 2002, (June), 140–141. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/255683038_THREE-DIMENSIONAL_ANALYSIS_OF_TUNNELLING_EFFECTS_ON_STRUCTURES_TO_DEVELOP_DESIGN_METHODS
- [26] BRINKGREVE, Ronald B.J., S KUMARSWAMY, W M SWOLFS, F FONSECA, N Ragi MONOJ, L ZAMPICH a N ZALAMEA. Plaxis connect edition - Material Models Manual [online]. 2021, str. 67-95. Dostupné z: https://communities.bentley.com/cfs-file/__key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCEV22.01_2D00_3_2D00_Material_2D00_Models.pdf
- [27] KULHAWY, F.H. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. nedatováno.
- [28] TITI ET AL. Evaluation of Bearing Capacity of Piles From Cone. 1999, (November), 14.
- [29] MAYNE, P. W. *CPT indexing of in-situ OCR in clays*. 1986.
- [30] DUNCAN, J.M. Buchignani, A. L.; *An Engineering Manual for Settlement Studies*. 1976.
- [31] HORT, Ondřej. *VÝSLEDKY INKLINOMETRICKÝCH MĚŘENÍ - osobné konzultácie - GEOtest Brno a.s.* 2022
- [32] BETONY CENÍK PRO ROK 2022 - TBG METROSTAV [online]. 2022, 1–12. Dostupné z: <https://www.tbg-metrostav.cz/wp-content/uploads/cenik-2022-tbg-mts.pdf>
- [33] *Cenník Feroná, a.s.* [online]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/vyhledavani/392>

13 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Situácia tunela pre električky na trati Osová – Kampus MU [3]	11
Obr. 2 Pozdĺžny profil predĺženia trate električky [4]	12
Obr. 3 Geomorfologická mapa [5].....	13
Obr. 4 Mapa vrtnej preskúmanosti [6].....	14
Obr. 5 Výrez z geologickej mapy Brno-Bohunice [7].....	14
Obr. 6 Legenda geologickej mapy Brno – Bohunice [7]	14
Obr. 7 Prejazdny prierez dvojkoľajnej trate pre električky [9]	18
Obr. 8 Schéma použiteľných metód pre výstavbu tunela	19
Obr. 9 Rez tunela budovaného SCL metódou v mäkkých zeminách [7].....	20
Obr. 10 1. Razenie kaloty 2. Razenie lavice 3. Zaistenie výrubu prvou vrstvou 4. Razenie protiklenby 5. Zaistenie protiklenby prvou vrstvou 6. Aplikácia nosnej a dokončujúcej vrstvy [12]	21
Obr. 11 Kernbauweise – postup vyrazenia a rozoprenia záberu: (Ia, Ib) – razenie a inštalácia vodorovnej rozpery, (Ic, Id) – dokončenie oporných tunelov, (Ie) – dokončenie kaloty, skompletizovanie vodorovnej rozpery, (If) – dobratie jadra	22
Obr. 12 Tunel Moutier (CH)- Jadrová metóda	23
Obr. 13 Schéma zeminového štítu: 1 – raziaca hlava, 2 – tlakotesná prepážka, 3 – šnekový dopravník, 4 – štítové lisy, 5 – prístupová tlaková komora, 6 – kruhový erektor, 7 – plášť štítu, 8 – ostenie, 9 – prefabrikované dielce ostenia, 10 – dopravník [13]	24
Obr. 14 Uloženie prefabrikovaného/ monolitického alebo kombinovaného tunela do svahovanej stavebnej jamy [15]	25
Obr. 15 Uloženie prefabrikovaného/ monolitického alebo kombinovaného tunela do svahovanej stavebnej jamy [16]	25
Obr. 16 Rozdelenie pilótových stien podľa osových vzdialeností [18]	25
Obr. 17 Schéma postupu Milánskej metódy (TOP – DOWN) [10]	26
Obr. 18 Postup výstavby razeného tunela metódou želva [10]	27
Obr. 19 Ukážka separačnej vrstvy a montáž výstuže, vyrazenie opery pod želvou a prestriekanie jej podpôr primárnym ostením, tunel Považský Chlmec D3 [21]	28
Obr. 20 Podchod pre chodcov a cyklistov, Bratislava – pretláčanie pravouhlého železobetónového monobloku tunelovej rúry z úrovne terénu bez pracovnej šachty [23]	29
Obr. 21 Raziaci stroj – Perforex 3715 S [10]	31
Obr. 22 Hyperbolický pracovný diagram s Mohr – Coulombovou podmienkou porušenia [25]	35
Obr. 23 Závislosť Eus/su na OCR (8,25) a PI (41%) [29]	37
Obr. 24 Schéma tunela v matematickom modeli	39
Obr. 25 Vygenerovaná sieť konečných prvkov v programe PLAXIS 2D	39
Obr. 26 Schéma modelovaných fáz výstavby 1. – 8.	41
Obr. 27 Schéma prierezu 600x1000	46
Obr. 28 Schéma prierezu 800x1000	48
Obr. 29 Schéma prierezu 1000x1000	50

14 Zoznam tabuliek

Tabuľka 4.4- 1 Prehľad geotechnických typov [8]	15
Tabuľka 4.4- 2 Geotechnické charakteristiky spraší, sprašovitých a ílovitých hĺn Gtypu 2a [8]	16
Tabuľka 4.4- 3 Geotechnické char. neogénnych ílov prachovitých, slabo piesčitých Gtypu 3a [8]	17
Tabuľka 9.3- 1 Hodnoty vstupných parametrov modelovaných zemín	42
Tabuľka 9.3- 2 Hodnoty vstupných parametrov modelovaných prvkov konštrukcie	43
Tabuľka 11.1- 1 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 600 mm	47
Tabuľka 11.1- 2 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 800 mm	49
Tabuľka 11.1- 3 Charakteristické a návrhové hodnoty vnútorných síl pre PKS hr. 1000 mm	51
Tabuľka 11.5- 1 Výpočet ceny materiálu pre jednotlivé hrúbky PKS	55

15 Zoznam grafov

Graf 1 Priebeh M_K v PKS o hr. 600 mm	46
Graf 2 Priebeh N_K v PKS hr. 600 mm.....	46
Graf 3 Interakčný diagram PKS hr. 600 mm.....	47
Graf 4 Priebeh M_K v PKS o hr. 800 mm	48
Graf 5 Priebeh N_K v PKS hr. 800 mm.....	48
Graf 6 Interakčný diagram PKS hr. 800 mm.....	49
Graf 7 Priebeh M_K v PKS o hr. 1000 mm.....	50
Graf 8 Priebeh N_K v PKS hr. 1000 mm.....	50
Graf 9 Interakčný diagram PKS hr. 1000 mm.....	51
Graf 10 Porovnanie horizontálnych posunov PKS hr. 600 mm. 800 mm a 1000 mm.	52
Graf 11 Porovnanie vertikálnych posunov PKS hr. 600 mm. 800 mm a 1000 mm.....	53
Graf 12 Výsledky inklinometrických meraní po realizácii PKS a razení tunela	54
Graf 13 Porovnanie relatívnych posunov v modeli a inklinometrickým meraním	54
Graf 14 Porovnanie cien betónu a ocele pre jednotlivé hrúbky podzemných konštrukčných stien. Poznámka: dtto ako Tabuľka 11.5- 1.....	56

16 Skratky a symboly

TT	Trať pre električky
C&C	CUT & COVER
U.K.	Veľkej Británie
PKS	Podzemné konštrukčné steny
IG REZ	Inžiniersko – geologický rez
HS model	Hardening soil model
HSs model	Hardening soil model with small – strain stiffness
φ'	Efektívny uhol vnútorného trenia
c'	Efektívna súdržnosť
ψ	Uhol dilatancie
E_{50}^{ref}	Sečnicový referenčný modul z triaxiálnej skúšky
E_{OED}^{ref}	Dotýčnicový referenčný modul z edometrickej skúšky
E_{ur}^{ref}	Odťažovací a opäť priťažovací referenčný modul pružnosti
ν_{ur}	Poissonovo číslo pre odťaženie a opätovne priťaženie
m	Exponent riadiaci závislosť deformačných charakteristík na napätí
$p_{ref} = \sigma_3^{ref}$	Referenčné napätie 100 kPa
k_0^{NC}	Súčiniteľ zemného tlaku pre normálnu konsolidáciu
OCR	Stupeň prekonsolidácie
POP	Rozdiel maximálneho napätia pôsobiaceho v minulosti a aktuálneho napätia
G_0^{ref}	Počiatočný šmykový modul alebo šmykový modul pri veľmi malých pretvoreniach
$\gamma_{0,7}$	Pomerné šmykové pretvorenie, pri ktorom klesne G_0 na 70% pôvodnej hodnoty
q_c	Odpor na hrote CPT skúšky
s_u	Neodvodnená šmyková pevnosť
CPT	Statická penetračná skúška
N_k	Nosný faktor kužeľa
$\sigma_{v0} = \sigma'_{or}$	Totálne geostatické napätie
σ_p	Maximálne prekonsolidačné napätie

E_u	Neodvodnený modul pružnosti
$E_{u,ur}$	Neodvodnený odľahčujúci a opäť priťažovací referenčný modul pružnosti
E'_{ur}	Efektívny odľahčujúci a opäť priťažovací referenčný modul pružnosti
ν'_{ur}	Poissonovo číslo po odľahčení a opätovnom priťažení
N_{Ed}	Návrhová hodnota normálovej sily
γ_G	Súčiniteľ stáleho zaťaženia
N_K	Charakteristická hodnota normálovej sily
M_D	Návrhová hodnota momentu
M_K	Charakteristická hodnota momentu
k_s	Kusov
\varnothing	Priemer
hr.	Hrúbka
INK	Inklinometrické meranie
vs.	Verzus

17 Prílohy

17.1 Zoznam priložených príloh

Príloha P7.1 – Výpočet neodvodnenej šmykovej pevnosti.....	67
Príloha P7.2 – Stanovenie maximálneho prekonsolidačného napätia v minulosti	68
Príloha P7.3 – Stanovenie efektívneho modulu tuhosti pri odľahčení a opätovnom príťažení.....	69
Príloha P7.4 – Stanovenie vlastností parametrov zemín do modelu MKP	70
Príloha P10.1 – Interakčný diagram PKS hr. 600 mm	71
Príloha P10.2 – Interakčný diagram PKS hr. 800 mm	77
Príloha P10.3 – Interakčný diagram PKS hr. 1000 mm	83

17.2 Zoznam samostatných príloh

Príloha P4.1 – SITUÁCIA SKÚŠOK, IG VRTOV A REZOV	
Príloha P4.2 – IG REZ č.1	
Príloha P4.3 – IG REZ č.2	
Príloha P4.4 – IG REZ č.3	
Príloha P5.1 – KONŠTRUKCIA TUNELA, PREJAZDNÝ PRIEREZ	
Príloha P5.2 – ZOBRAZENIE KONŠTRUKCIE VO VYBRANOM REZE	

Príloha P7.1 – Výpočet neodvodnenej šmykovej pevnosti

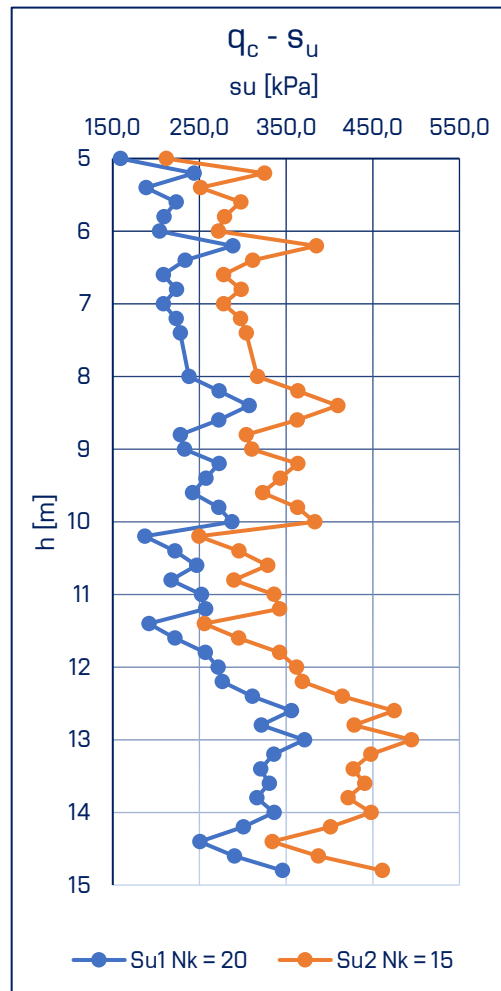
1) $q_c - s_u$

Nk ₁ =	15	
Nk ₂ =	20	
γ=	20,9	kN/m ³

h [m]	q _c [MPa]	q _c [kPa]	σ _{no} [kPa]	Nk ₁	Nk ₂
				s _{u1} [kPa]	s _{u2} [kPa]
5	3,28	3280	104,5	158,8	211,7
5,2	4,98	4980	108,7	243,6	324,8
5,4	3,88	3880	112,9	188,4	251,1
5,6	4,58	4580	117,0	223,1	297,5
5,8	4,3	4300	121,2	208,9	278,6
6	4,2	4200	125,4	203,7	271,6
6,2	5,9	5900	129,6	288,5	384,7
6,4	4,8	4800	133,8	233,3	311,1
6,6	4,3	4300	137,9	208,1	277,5
6,8	4,61	4610	142,1	223,4	297,9
7	4,31	4310	146,3	208,2	277,6
7,2	4,61	4610	150,5	223,0	297,3
7,4	4,71	4710	154,7	227,8	303,7
7,6	7,31	7310	158,8	357,6	476,7
7,8	8,72	8720	163,0	427,8	570,5
8	4,92	4920	167,2	237,6	316,9
8,2	5,62	5620	171,4	272,4	363,2
8,4	6,32	6320	175,6	307,2	409,6
8,6	5,62	5620	179,7	272,0	362,7
8,8	4,74	4740	183,9	227,8	303,7
9	4,84	4840	188,1	232,6	310,1
9,2	5,64	5640	192,3	272,4	363,2
9,4	5,34	5340	196,5	257,2	342,9
9,6	5,04	5040	200,6	242,0	322,6
9,8	5,65	5650	204,8	272,3	363,0
10	5,95	5950	209,0	287,1	382,7
10,2	3,95	3950	213,2	186,8	249,1
10,4	4,65	4650	217,4	221,6	295,5
10,6	5,15	5150	221,5	246,4	328,6
10,8	4,57	4570	225,7	217,2	289,6
11	5,27	5270	229,9	252,0	336,0
11,2	5,37	5370	234,1	256,8	342,4
11,4	4,07	4070	238,3	191,6	255,4
11,6	4,67	4670	242,4	221,4	295,2
11,8	5,38	5380	246,6	256,7	342,2
12	5,68	5680	250,8	271,5	361,9
12,2	5,78	5780	255,0	276,3	368,3
12,4	6,48	6480	259,2	311,0	414,7
12,6	7,38	7380	263,3	355,8	474,4
12,8	6,69	6690	267,5	321,1	428,2
13	7,69	7690	271,7	370,9	494,6
13,2	6,99	6990	275,9	335,7	447,6
13,4	6,69	6690	280,1	320,5	427,3
13,6	6,89	6890	284,2	330,3	440,4
13,8	6,61	6610	288,4	316,1	421,4
14	7,01	7010	292,6	335,9	447,8
14,2	6,31	6310	296,8	300,7	400,9
14,4	5,31	5310	301,0	250,5	333,9
14,6	6,11	6110	305,1	290,2	387,0
14,8	7,22	7220	309,3	345,5	460,7

$$q_c = N_k \cdot s_u + \sigma_{v0}$$

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k}$$



Príloha P7.2 – Stanovenie maximálneho prekonsolidačného napätia v minulosti

2) $q_c - \sigma_p$

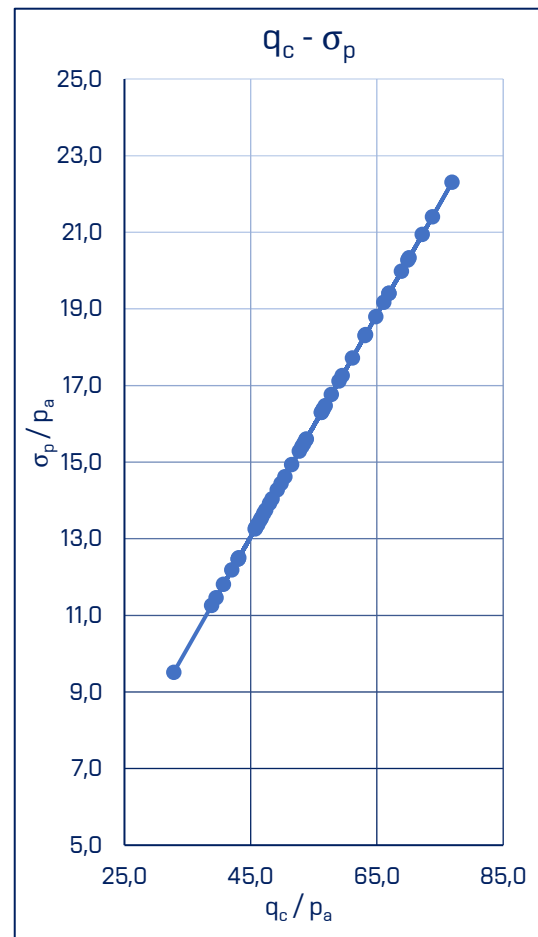
$p_a =$	100	kPa
---------	-----	-----

q_c [kPa]	σ_p [kPa]	σ_{no} [kPa]	OCR	POP	q_c/p_a	σ_p/p_a
3280,0	951,2	104,5	9,1	846,7	32,8	9,5
4980,0	1444,2	108,7	13,3	1335,5	49,8	14,4
3880,0	1125,2	112,9	10,0	1012,3	38,8	11,3
4580,0	1328,2	117,0	11,3	1211,2	45,8	13,3
4300,0	1247,0	121,2	10,3	1125,8	43,0	12,5
4200,0	1218,0	125,4	9,7	1092,6	42,0	12,2
5900,0	1711,0	129,6	13,2	1581,4	59,0	17,1
4800,0	1392,0	133,8	10,4	1258,2	48,0	13,9
4300,0	1247,0	137,9	9,0	1109,1	43,0	12,5
4610,0	1336,9	142,1	9,4	1194,8	46,1	13,4
4310,0	1249,9	146,3	8,5	1103,6	43,1	12,5
4610,0	1336,9	150,5	8,9	1186,4	46,1	13,4
4710,0	1365,9	154,7	8,8	1211,2	47,1	13,7
7310,0	2119,9	158,8	13,3	1961,1	73,1	21,2
8720,0	2528,8	163,0	15,5	2365,8	87,2	25,3
4920,0	1426,8	167,2	8,5	1259,6	49,2	14,3
5620,0	1629,8	171,4	9,5	1458,4	56,2	16,3
6320,0	1832,8	175,6	10,4	1657,2	63,2	18,3
5620,0	1629,8	179,7	9,1	1450,1	56,2	16,3
4740,0	1374,6	183,9	7,5	1190,7	47,4	13,7
4840,0	1403,6	188,1	7,5	1215,5	48,4	14,0
5640,0	1635,6	192,3	8,5	1443,3	56,4	16,4
5340,0	1548,6	196,5	7,9	1352,1	53,4	15,5
5040,0	1461,6	200,6	7,3	1261,0	50,4	14,6
5650,0	1638,5	204,8	8,0	1433,7	56,5	16,4
5950,0	1725,5	209,0	8,3	1516,5	59,5	17,3
3950,0	1145,5	213,2	5,4	932,3	39,5	11,5
4650,0	1348,5	217,4	6,2	1131,1	46,5	13,5
5150,0	1493,5	221,5	6,7	1272,0	51,5	14,9
4570,0	1325,3	225,7	5,9	1099,6	45,7	13,3
5270,0	1528,3	229,9	6,6	1298,4	52,7	15,3
5370,0	1557,3	234,1	6,7	1323,2	53,7	15,6
4070,0	1180,3	238,3	5,0	942,0	40,7	11,8
4670,0	1354,3	242,4	5,6	1111,9	46,7	13,5
5380,0	1560,2	246,6	6,3	1313,6	53,8	15,6
5680,0	1647,2	250,8	6,6	1396,4	56,8	16,5
5780,0	1676,2	255,0	6,6	1421,2	57,8	16,8
6480,0	1879,2	259,2	7,3	1620,0	64,8	18,8
7380,0	2140,2	263,3	8,1	1876,9	73,8	21,4
6690,0	1940,1	267,5	7,3	1672,6	66,9	19,4
7690,0	2230,1	271,7	8,2	1958,4	76,9	22,3
6990,0	2027,1	275,9	7,3	1751,2	69,9	20,3
6690,0	1940,1	280,1	6,9	1660,0	66,9	19,4
6890,0	1998,1	284,2	7,0	1713,9	68,9	20,0
6610,0	1916,9	288,4	6,6	1628,5	66,1	19,2
7010,0	2032,9	292,6	6,9	1740,3	70,1	20,3
6310,0	1829,9	296,8	6,2	1533,1	63,1	18,3
5310,0	1539,9	301,0	5,1	1238,9	53,1	15,4
6110,0	1771,9	305,1	5,8	1466,8	61,1	17,7
7220,0	2093,8	309,3	6,8	1784,5	72,2	20,9
ϕ	8,2	1329,4				

$$\sigma_p = 0,29 \cdot q_c$$

$$POP = \sigma_p - \sigma'_{or}$$

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{or}}$$



Príloha P7.3 – Stanovenie efektívneho modulu tuhosti pri odľahčení a opätovnom prifažení

3) $\sigma_c - E_{ur}$

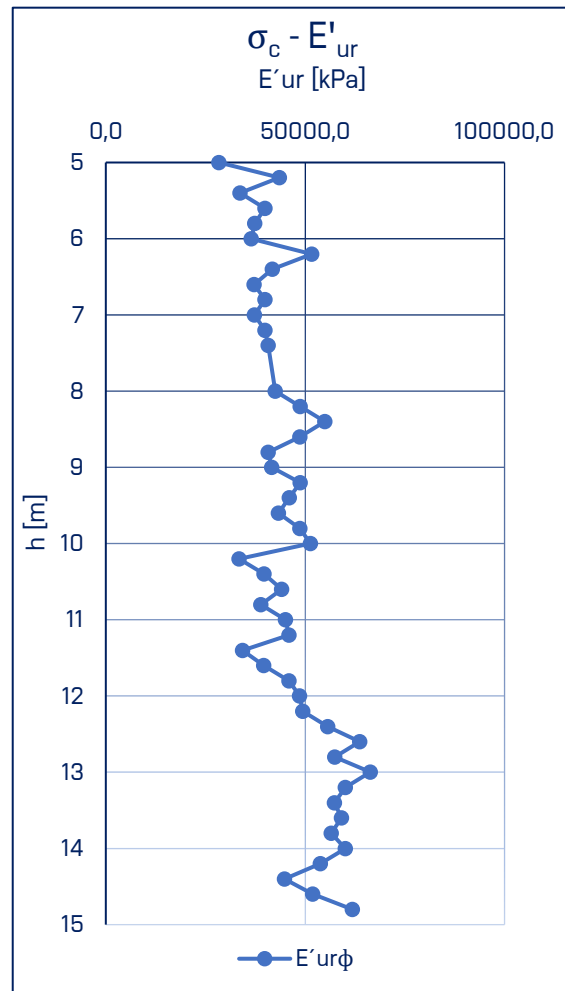
OCR = 8,2 =>

E_{us}/s_u	200
ν'	0,15

$$\frac{E_{uur}}{E'_{ur}} = \frac{3}{2 \cdot (1 + \nu'_{ur})}$$

$$\frac{E_{uur}}{E'_{ur}} = 1,3$$

E_{u1} [kPa]	E_{u2} [kPa]	E'_{ur1} [kPa]	E'_{ur2} [kPa]	$E'_{ur\phi}$ [kPa]
31755,0	42340,0	24345,5	32460,7	28403,1
48713,2	64950,9	37346,8	49795,7	43571,3
37671,4	50228,5	28881,4	38508,5	33695,0
44629,6	59506,1	34216,0	45621,4	39918,7
41787,8	55717,1	32037,3	42716,4	37376,9
40746,0	54328,0	31238,6	41651,5	36445,0
57704,2	76938,9	44239,9	58986,5	51613,2
46662,4	62216,5	35774,5	47699,3	41736,9
41620,6	55494,1	31909,1	42545,5	37227,3
44678,8	59571,7	34253,7	45671,7	39962,7
41637,0	55516,0	31921,7	42562,3	37242,0
44595,2	59460,3	34189,7	45586,2	39887,9
45553,4	60737,9	34924,3	46565,7	40745,0
71511,6	95348,8	54825,6	73100,7	63963,2
85569,8	114093,1	65603,5	87471,4	76537,4
47528,0	63370,7	36438,1	48584,2	42511,2
54486,2	72648,3	41772,8	55697,0	48734,9
61444,4	81925,9	47107,4	62809,8	54958,6
54402,6	72536,8	41708,7	55611,5	48660,1
45560,8	60747,7	34929,9	46573,3	40751,6
46519,0	62025,3	35664,6	47552,8	41608,7
54477,2	72636,3	41765,9	55687,8	48726,8
51435,4	68580,5	39433,8	52578,4	46006,1
48393,6	64524,8	37101,8	49469,0	43285,4
54451,8	72602,4	41746,4	55661,8	48704,1
57410,0	76546,7	44014,3	58685,8	51350,1
37368,2	49824,3	28649,0	38198,6	33423,8
44326,4	59101,9	33983,6	45311,4	39647,5
49284,6	65712,8	37784,9	50379,8	44082,3
43442,8	57923,7	33306,1	44408,2	38857,2
50401,0	67201,3	38640,8	51521,0	45080,9
51359,2	68478,9	39375,4	52500,5	45938,0
38317,4	51089,9	29376,7	39168,9	34272,8
44275,6	59034,1	33944,6	45259,5	39602,1
51333,8	68445,1	39355,9	52474,6	45915,2
54292,0	72389,3	41623,9	55498,5	48561,2
55250,2	73666,9	42358,5	56478,0	49418,2
62208,4	82944,5	47693,1	63590,8	55642,0
71166,6	94888,8	54561,1	72748,1	63654,6
64224,8	85633,1	49239,0	65652,0	57445,5
74183,0	98910,7	56873,6	75831,5	66352,6
67141,2	89521,6	51474,9	68633,2	60054,1
64099,4	85465,9	49142,9	65523,8	57333,4
66057,6	88076,8	50644,2	67525,5	59084,9
63215,8	84287,7	48465,4	64620,6	56543,0
67174,0	89565,3	51500,1	68666,8	60083,4
60132,2	80176,3	46101,4	61468,5	53784,9
50090,4	66787,2	38402,6	51203,5	44803,1
58048,6	77398,1	44503,9	59338,6	51921,2
69106,8	92142,4	52981,9	70642,5	61812,2



Príloha P7.4 – Stanovenie vlastnosti parametrov zemín do modelu MKP

	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	φ [°]	φ [rad]	c' [kPa]
íl	17,3	20,9	25	0,43633	8
voda	10	-	-	-	-
$k_0^{NC} =$	0,5774				
$m =$	1,0				

$$E_{ur,ref} \quad 47000 \text{ kPa} = \underline{47,00} \text{ MPa} \quad E_{50}^{ref} \quad E_{oed}^{ref} = 15,67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{3,ref} \quad 100 \text{ kPa}$$

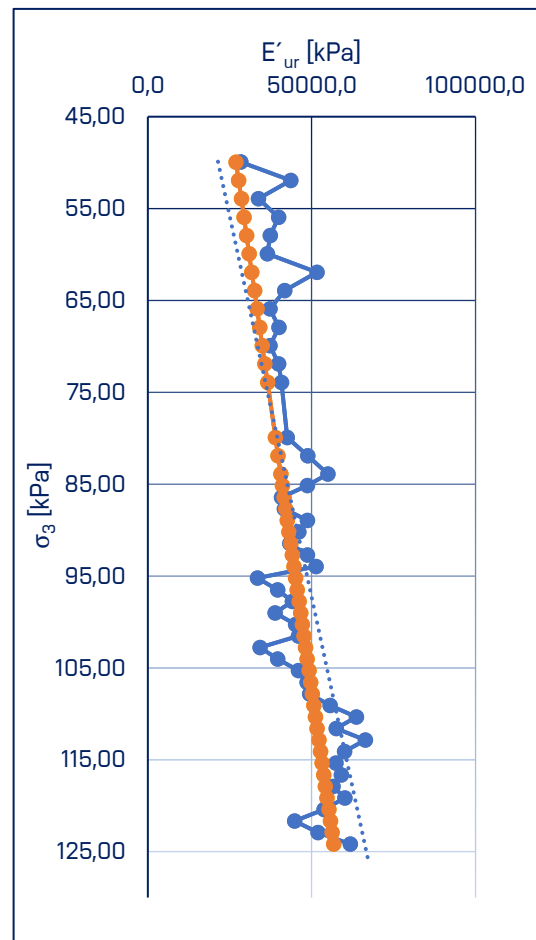
- ÍL 3a
- ÍL 3a pod HPV

h [m]	σ_{or} [kPa]	u [kPa]	σ_{or}' [kPa]	σ_3' [kPa]	E_{ur} [kPa]
5,00	86,50	0,00	86,50	49,94	26918,63
5,20	89,96	0,00	89,96	51,94	27720,07
5,40	93,42	0,00	93,42	53,94	28521,51
5,60	96,88	0,00	96,88	55,94	29322,95
5,80	100,34	0,00	100,34	57,93	30124,40
6,00	103,80	0,00	103,80	59,93	30925,84
6,20	107,26	0,00	107,26	61,93	31727,28
6,40	110,72	0,00	110,72	63,93	32528,72
6,60	114,18	0,00	114,18	65,93	33330,16
6,80	117,64	0,00	117,64	67,92	34131,61
7,00	121,10	0,00	121,10	69,92	34933,05
7,20	124,56	0,00	124,56	71,92	35734,49
7,40	128,02	0,00	128,02	73,92	36535,93
8,00	138,40	0,00	138,40	79,91	38940,26
8,20	141,86	0,00	141,86	81,91	39741,70
8,40	145,32	0,00	145,32	83,91	40543,15
8,60	149,50	2,00	147,50	85,16	41048,10
8,80	153,68	4,00	149,68	86,42	41553,06
9,00	157,86	6,00	151,86	87,68	42058,01
9,20	162,04	8,00	154,04	88,94	42562,97
9,40	166,22	10,00	156,22	90,20	43067,92
9,60	170,40	12,00	158,40	91,46	43572,88
9,80	174,58	14,00	160,58	92,72	44077,83
10,00	178,76	16,00	162,76	93,97	44582,79
10,20	182,94	18,00	164,94	95,23	45087,74
10,40	187,12	20,00	167,12	96,49	45592,69
10,60	191,30	22,00	169,30	97,75	46097,65
10,80	195,48	24,00	171,48	99,01	46602,60
11,00	199,66	26,00	173,66	100,27	47107,56
11,20	203,84	28,00	175,84	101,53	47612,51
11,40	208,02	30,00	178,02	102,79	48117,47
11,60	212,20	32,00	180,20	104,04	48622,42
11,80	216,38	34,00	182,38	105,30	49127,38
12,00	220,56	36,00	184,56	106,56	49632,33
12,20	224,74	38,00	186,74	107,82	50137,29
12,40	228,92	40,00	188,92	109,08	50642,24
12,60	233,10	42,00	191,10	110,34	51147,20
12,80	237,28	44,00	193,28	111,60	51652,15
13,00	241,46	46,00	195,46	112,86	52157,11
13,20	245,64	48,00	197,64	114,11	52662,06
13,40	249,82	50,00	199,82	115,37	53167,02
13,60	254,00	52,00	202,00	116,63	53671,97
13,80	258,18	54,00	204,18	117,89	54176,93
14,00	262,36	56,00	206,36	119,15	54681,88
14,20	266,54	58,00	208,54	120,41	55186,84
14,40	270,72	60,00	210,72	121,67	55691,79
14,60	274,90	62,00	212,90	122,92	56196,75
14,80	279,08	64,00	215,08	124,18	56701,70

$$k_0^{NC} = 1 - \sin \varphi'$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_{3,ref}} \right)^m$$

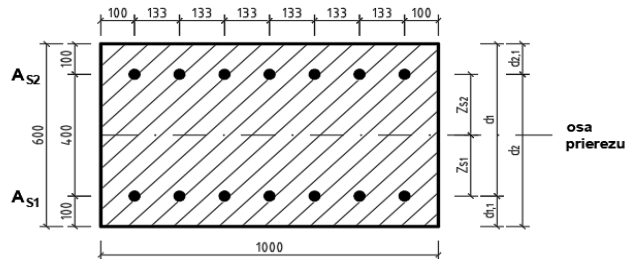
$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} = 3E_{oed}^{ref}$$



Príloha P10.1 – Interakčný diagram PKS hr. 600 mm

Materiálové charakteristiky

	Betón	C30/37	
f_{ck}	30	MPa	
f_{cd}	$=\alpha^*(f_{ck}/\gamma_c)=$	20,00	MPa
α	1		
γ_c	1,5		
ϵ_{cu3}	3,5	‰	
ϵ_{c2}	2,0	‰	
	Oceľ	B500B	
f_{yk}	500	MPa	
f_{yd}	$=f_{yk}/\gamma_s=$	434,78	MPa
γ_s	1,15		
E_s	200	GPa	
ϵ_{yd}	$=f_{yd}/E_s=$	2,17	‰



Geometria

h	0,6	m	
b	1,0	m	
A_{s1}	5,901E-03	m ²	7 Ø 32
A_{s2}	5,901E-03	m ²	7 Ø 32

Strmene

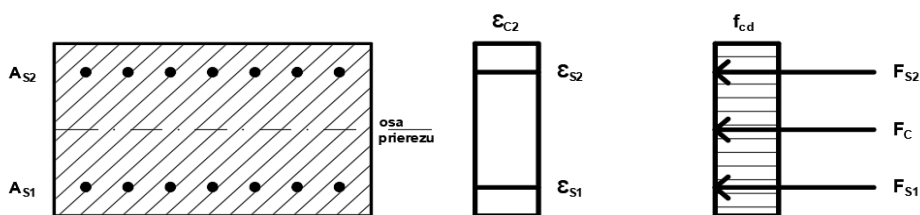
	obvodové strmene	Ø10 mm á 200 mm
	2 dvojstrižné strmene	Ø10 mm á 200 mm
d_1	0,50	m
$d_{1,1}$	0,10	m
d_2	0,50	m
$d_{2,1}$	0,10	m

z_{s1}	$=(h/2)-d_{1,1}=$	0,20	m	Celková plocha výstuže: 11802 mm ²
z_{s2}	$=(h/2)-d_{2,1}=$	0,20	m	$\rho_s = 0,019 \geq \rho_{s,min} 0,0020 \Rightarrow$ Vyhovuje
				$\rho_s = 0,019 \leq \rho_{s,max} 0,0400 \Rightarrow$ Vyhovuje
				Minimálna plocha vodorovnej výstuže: $A_{sh,min} = 2815 \text{ mm}^2$

1. Bod 0

Rovnomerné rozloženie pretvorenia v tlačennom betóne po celej výške prierezu (ϵ_{c3})

pomerné pretvorenie je $\epsilon_{s1} = \epsilon_{s2} = \epsilon_{c3} = 2,0 \text{ ‰}$

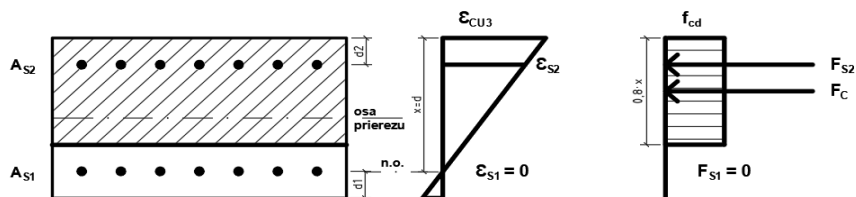


σ_{s1}	$=E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
σ_{s2}	$=E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
F_{s1}	$=A_{s1} * \sigma_{s1} =$	5,90E-03 *	4,00E+05 =	2360,40 kN
F_{s2}	$=A_{s2} * \sigma_{s2} =$	5,90E-03 *	4,00E+05 =	2360,40 kN
F_c	$=A_c * f_{cd} =$	0,6 * 1,00 *	2,00E+04 =	12000,00 kN
z_c	=	0		
N_{Rd0}	$=-F_c - F_{s1} - F_{s2} =$			-16720,80 kN
M_{Rd0}	$=F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} =$			0 kNm

2. Bod 1

Neutrálna os prechádza ťažiskom výstuže A_{s1}

$x=d= 0,50$ m



$$\varepsilon_{s1} = 0 \Rightarrow \sigma_{s1} = 0 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x * (x - d_{2,1}) = 2,80 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,90E-03 * 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,50 * 2,00E+04 = 8000,00 \text{ kN}$$

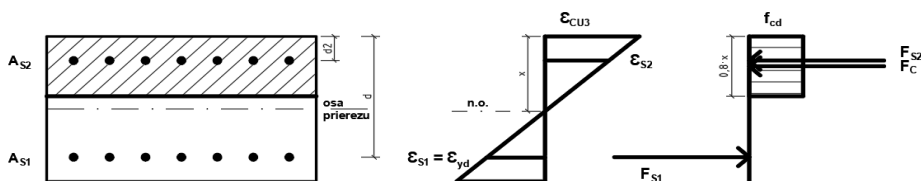
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,10 \text{ m}$$

$$N_{Rd1} = -F_c - F_{s1} - F_{s2} = -10565,65 \text{ kN}$$

$$M_{Rd1} = F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 1313,13 \text{ kNm}$$

3. Bod 2

Vrstva výstuže je využitá na medzu f_{yd} , rozhranie medzi tlakovým a ťahovým porušením



$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s1} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal1} \quad \text{určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal1}}{\varepsilon_{cu3}} = \frac{d - x_{bal1}}{\varepsilon_{s1}}$$

$$x_{bal1} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{s1}} * d = 0,308 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x_{bal1} * (x_{bal1} - d_{2,1}) = 2,37 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,308 * 2,00E+04 = 4934,87 \text{ kN}$$

$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal1})/2 = 0,177 \text{ m}$$

$$N_{Rd2} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -4934,87 \text{ kN}$$

$$M_{Rd2} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 1897,8981 \text{ kNm}$$

4. Bod z

V tlačenej výstuži betónu je dosiahnute medzné pomerné pretvorenie ϵ_{cu3} a v tlačenej výstuži je dosiahnutá medza klzu:

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s2} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal2} \quad \text{a určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal2}}{m} = \frac{x_{bal2} - d_{2,1}}{\epsilon_{s2}}$$

$$x_{bal2} = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} - \epsilon_{s2}} * d_{2,1} = 0,264 \text{ m}$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu3} / x_{bal2} * (x_{bal2} - d_{1,1}) = 2,17 \text{ ‰} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,264 * 2,00E+04 = 4222,95 \text{ kN}$$

$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal2})/2 = 0,194 \text{ m}$$

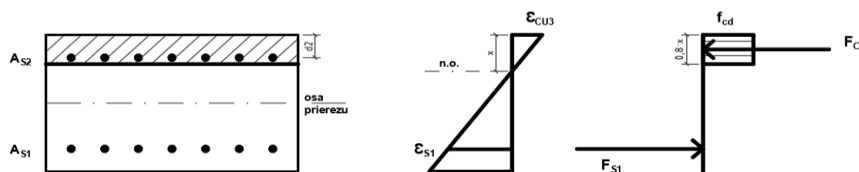
$$N_{Rd2} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -4222,95 \text{ kN}$$

$$M_{Rd2} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 1847,31 \text{ kNm}$$

5. Bod 3

V priereze je rovnováha normálových síl, porušenie prostým ohybom polohu neutrálnej osi x určíme z podmienky

$$N_{Rd3} = 0 \text{ kN}$$



Tlačenu výstuž zanedbáme

$$h_1 = 0,50 \text{ m} \quad h_2 = 0,10 \text{ m}$$

Predpoklad P1: ťahaná výstuž A_{s1} je plne využitá:

$$\epsilon_{s1} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c$$

Podmienka rovnováhy síl v priereze

$$N_{Rd3} - F_c + F_{s1} = 0 \Rightarrow x = 0,160 \text{ m}$$

Overenie predpokladu P1:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu3} / x * (h_1 - x) = 7,41 \text{ ‰} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa} \quad (\text{Predpoklad P1 platí})$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,90E-03 * 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,1604 * 2,00E+04 = 2565,65 \text{ kN}$$

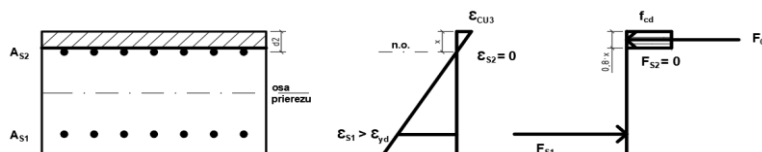
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,23586 \text{ m}$$

$$N_{Rd3} = -F_c + F_{s1} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{Rd3} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} = 1118,262 \text{ kNm}$$

6. Bod 4

Nulové pretvorenie v „tlačenej“ výstuži, pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuže A_{s2}



$$x = 0,10 \text{ m}$$

$$\epsilon_{s1} \Rightarrow \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s2} \approx 0,00 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 5,90E-03 \cdot 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 5,90E-03 \cdot 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_c = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \sigma_c = 1,00 \cdot 0,8 \cdot 0,10 \cdot 2,00E+04 = 1600,00 \text{ kN}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{(\lambda \cdot x)}{2} = 0,260 \text{ m}$$

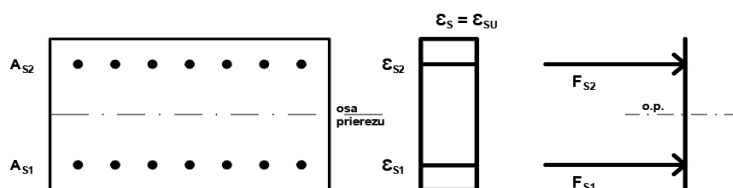
$$N_{Rd4} = -F_c + F_{s1} + F_{s2} = 965,65 \text{ kN}$$

$$M_{Rd4} = F_c \cdot z_c + F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 929,13 \text{ kNm}$$

7. Bod 5

Pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuží A_{s1} a A_{s2}

Celý prierez je namáhaný ťahom



$$\epsilon_{s1} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s2} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 5,90E-03 \cdot 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

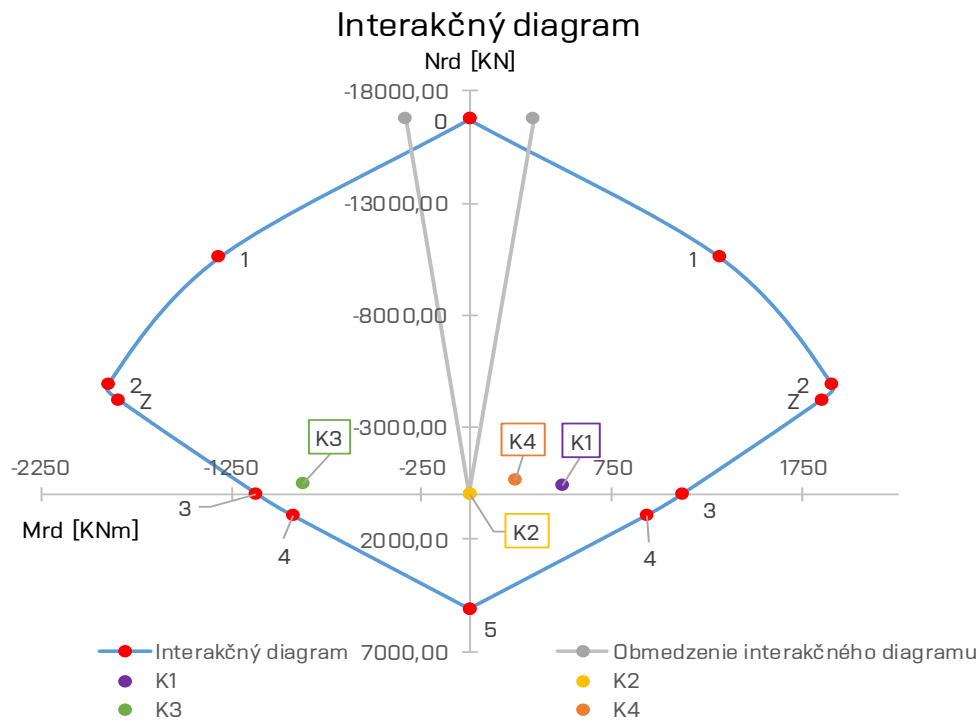
$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 5,90E-03 \cdot 4,35E+05 = 2565,65 \text{ kN}$$

$$N_{Rd5} = F_{s1} + F_{s2} = 5131,30 \text{ kN}$$

$$M_{Rd5} = F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 0 \text{ kNm}$$

Rekapitulácia výsledných hodnôt

Bod	N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]
0	-16720,80	0
1	-10565,65	1313,13
2	-4934,87	1897,898103
Z	-4222,95	1847,31
3	0,00	1118,262
4	965,65	929,13
5	5131,30	0



Výpočet dimenzačných účinkov Moment prvého rádu

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed}$$

$$e_i = l_0 / 400 = 0,01675 \text{ m}$$

$$l_0 = l \cdot \beta = 6,7 \text{ m}$$

$$\beta = 1$$

$$l = 6,7 \text{ m}$$

Pozn.

Tlaková normálová
sila je uvažovaná
kladne.

1. Kombinácia $M_{\max} N_{0dp}$

$$N_{Ed} = 422,99 \text{ kN}$$

$$M_d = 477,99 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 485,075 \text{ kNm}$$

2. Kombinácia $N_{\max} M_{0dp}$

$$N_{Ed} = 0,64 \text{ kN}$$

$$M_d = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 0,01072 \text{ kNm}$$

3. Kombinácia M_{\min} N_{odp}

$$N_{Ed} = 485,85 \text{ kN}$$

$$M_d = -862,24 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i * N_{Ed} = -870,38 \text{ kNm}$$

4. Kombinácia N_{\min} M_{odp}

$$N_{Ed} = 613,54 \text{ kN}$$

$$M_d = 225,41 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i * N_{Ed} = 235,687 \text{ kNm}$$

Moment druhého rádu

Kritérium štíhlosti

1. Kombinácia

$$n = N_{Ed} / (Ac * f_{cd}) = 0,04$$

$$\lambda = l_0 / i = 39$$

$$i = \sqrt{I/A} = 0,173 \text{ m}$$

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 = 1,80E-02 \text{ m}^4$$

$$A = b * h = 0,60 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 25 \text{ pro } n \geq 0,41$$

$$= (20 * A * B * C) / \sqrt{n} \text{ pro } n < 0,41$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 95$$

$$A = 1 / (1 + 0,2 * \varphi_{ef}) = 1$$

$$\varphi_{ef} = 0$$

$$B = \sqrt{1 + 2 * \omega} = 1,4$$

$$\omega = (As * f_{yd}) / (Ac * f_{cd}) = 4,28E-01$$

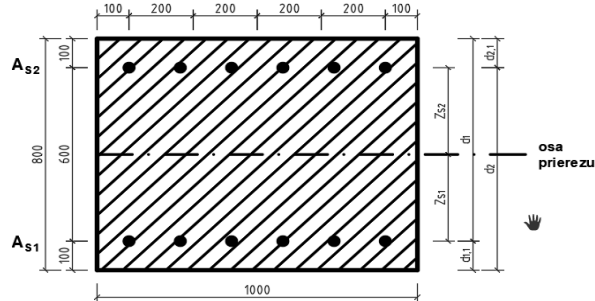
$$C = 0,7$$

$\lambda_{\text{lim}} > \lambda \Rightarrow$ **Moment druhého rádu sa dá zanedbať**

Príloha P10.2 – Interakčný diagram PKS hr. 800 mm

Materiálové charakteristiky

Betón C30/37	
f_{ck}	30 MPa
$f_{cd} = \alpha * (f_{ck} / \gamma_c) =$	20,00 MPa
α	1
γ_c	1,5
ϵ_{cu3}	3,5 ‰
ϵ_{c2}	2,0 ‰
Oceľ B500B	
f_{yk}	500 MPa
$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s =$	434,78 MPa
γ_s	1,15
E_s	200 GPa
$\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s =$	2,17 ‰



Geometria

h	0,8 m
b	1,0 m
A_{s1}	5,058E-03 m ² 6 Ø 32
A_{s2}	5,058E-03 m ² 6 Ø 32

Strmene

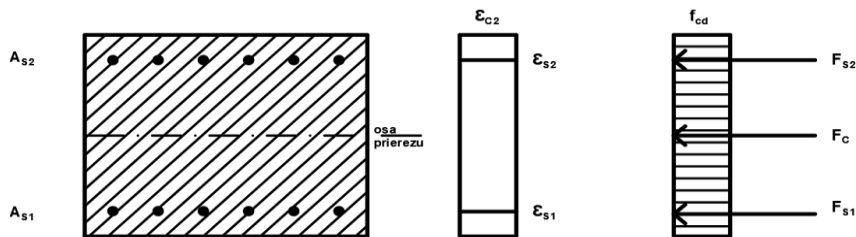
obvodové strmene Ø8 mm á 250 mm	
2 dvojstrižné strmene Ø8 mm á 250 mm	
d_1	0,70 m
$d_{1,1}$	0,10 m
d_2	0,70 m
$d_{2,1}$	0,10 m

$z_{s1} = (h/2) - d_{1,1} =$	0,30 m	Celková plocha výstuže: 10116 mm ²
$z_{s2} = (h/2) - d_{2,1} =$	0,30 m	$\rho_s = 0,012 \geq \rho_{s,min} 0,0020 \Rightarrow$ Vyhovuje
		$\rho_s = 0,012 \leq \rho_{s,max} 0,0400 \Rightarrow$ Vyhovuje
		Minimálna plocha vodorovnej výstuže: $A_{sh,min} = 2413 \text{ mm}^2$

1. Bod 0

Rovnomerné rozloženie pretvorenia v tlačnom betóne po celej výške prierezu (ϵ_{c3})

pomerne pretvorenie je $\epsilon_{s1} = \epsilon_{s2} = \epsilon_{c3} = 2,0 \text{ ‰}$

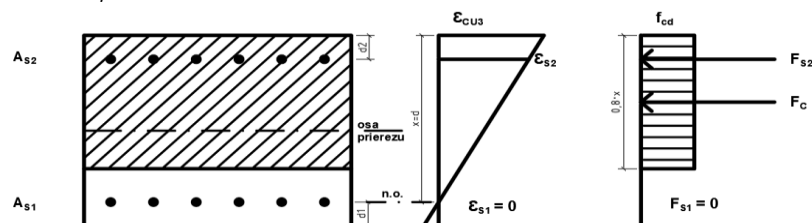


$\sigma_{s1} = E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
$\sigma_{s2} = E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} =$	5,06E-03 *	4,00E+05 =	2023,20 kN
$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} =$	5,06E-03 *	4,00E+05 =	2023,20 kN
$F_c = A_c * f_{cd} =$	0,8 * 1,00 *	2,00E+04 =	16000,00 kN
$z_c =$	0		
$N_{Rd0} = -F_c - F_{s1} - F_{s2} =$			-20046,40 kN
$M_{Rd0} = F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} =$			0 kNm

2. Bod 1

Neutrálna os prechádza ťažiskom výstuže A_{s1}

$$x=d= 0,70 \text{ m}$$



$$\varepsilon_{s1} = 0 \Rightarrow \sigma_{s1} = 0 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x * (x - d_{2,1}) = 3,00 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,06E-03 * 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,70 * 2,00E+04 = 11200,00 \text{ kN}$$

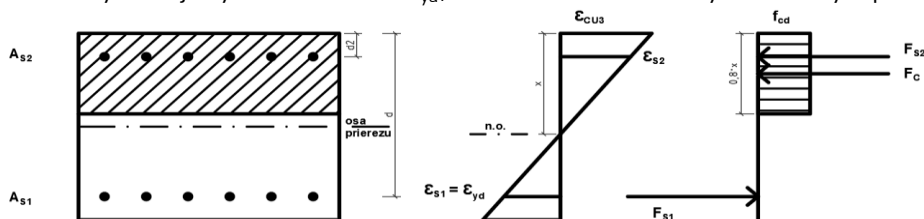
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,12 \text{ m}$$

$$N_{Rd1} = -F_c - F_{s1} - F_{s2} = -13399,13 \text{ kN}$$

$$M_{Rd1} = F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 2003,74 \text{ kNm}$$

3. Bod 2

Vrstva výstuže je využitá na medzu f_{yd} , rozhranie medzi tlakovým a ťahovým porušením



$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s1} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal1} \quad \text{určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal1}}{\varepsilon_{cu3}} = \frac{d - x_{bal1}}{\varepsilon_{s1}}$$

$$x_{bal1} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{s1}} * d = 0,432 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x_{bal1} * (x_{bal1} - d_{2,1}) = 2,69 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,432 * 2,00E+04 = 6908,81 \text{ kN}$$

$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal1})/2 = 0,227 \text{ m}$$

$$N_{Rd2} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -6908,81 \text{ kN}$$

$$M_{Rd2} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 2889,711 \text{ kNm}$$

4. Bod z

V tlačenej výstuži betónu je dosiahnuté medzné pomerné pretvorenie ε_{cu3} a v tlačenej výstuži je dosiahnutá medza klzu:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s2} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal2} \quad \text{a určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal2}}{\varepsilon_{cu3}} = \frac{x_{bal2} - d_{2,1}}{\varepsilon_{s2}}$$

$$x_{bal2} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{s2}} * d_{2,1} = 0,264 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu3} / x_{bal2} * (x_{bal2} - d_{1,1}) = 2,17 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,264 * 2,00E+04 = 4222,95 \text{ kN}$$

$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal2})/2 = 0,294 \text{ m}$$

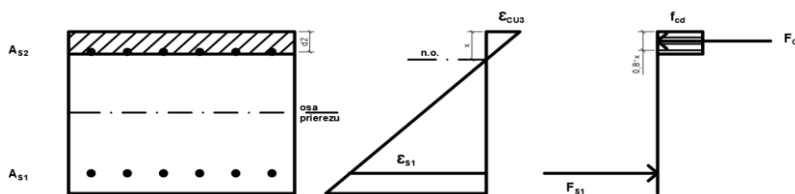
$$N_{Rd,z} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -4222,95 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,z} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 2562,83 \text{ kNm}$$

5. Bod 3

V priereze je rovnováha normálových síl, porušenie prostým ohybom polohu neutrálnej osi x určíme z podmienky

$$N_{Rd3} = 0 \text{ kN}$$



Tlačenu výstuž zanedbáme

$$h_1 = 0,70 \text{ m} \quad h_2 = 0,10 \text{ m}$$

Predpoklad P1: ťahaná výstuž A_{s1} je plne využitá:

$$\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c$$

Podmienka rovnováhy síl v priereze

$$N_{Rd3} = -F_c + F_{s1} = 0 \Rightarrow x = 0,137 \text{ m}$$

Overenie predpokladu P1:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu3} / x * (h_1 - x) = 14,33 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa} \quad (\text{Predpoklad P1 platí})$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 5,06E-03 * 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,137 * 2,00E+04 = 2199,13 \text{ kN}$$

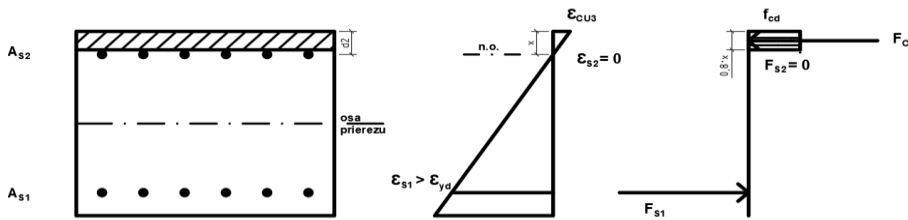
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,34502 \text{ m}$$

$$N_{Rd3} = -F_c + F_{s1} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{Rd3} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} = 1418,487 \text{ kNm}$$

6. Bod 4

Nulové pretvorenie v „tlačenej“ výstuži, pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuže A_{s2}



$$x = 0,10 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s1} \Rightarrow \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} \approx 0,00 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 5,06E-03 \cdot 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 5,06E-03 \cdot 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_c = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \sigma_c = 1,00 \cdot 0,8 \cdot 0,10 \cdot 2,00E+04 = 1600,00 \text{ kN}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{(\lambda \cdot x)}{2} = 0,360 \text{ m}$$

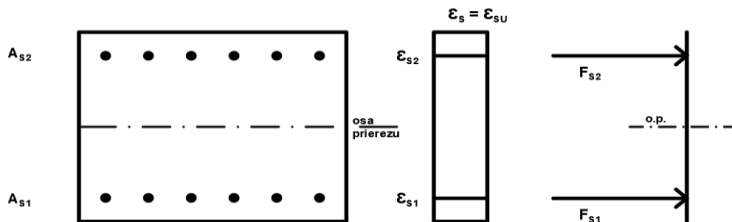
$$N_{Rd4} = -F_c + F_{s1} + F_{s2} = 599,13 \text{ kN}$$

$$M_{Rd4} = -F_c \cdot z_c + F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 1235,74 \text{ kNm}$$

7. Bod 5

Pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuží A_{s1} a A_{s2}

Celý prierez je namáhaný ťahom



$$\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 5,06E-03 \cdot 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

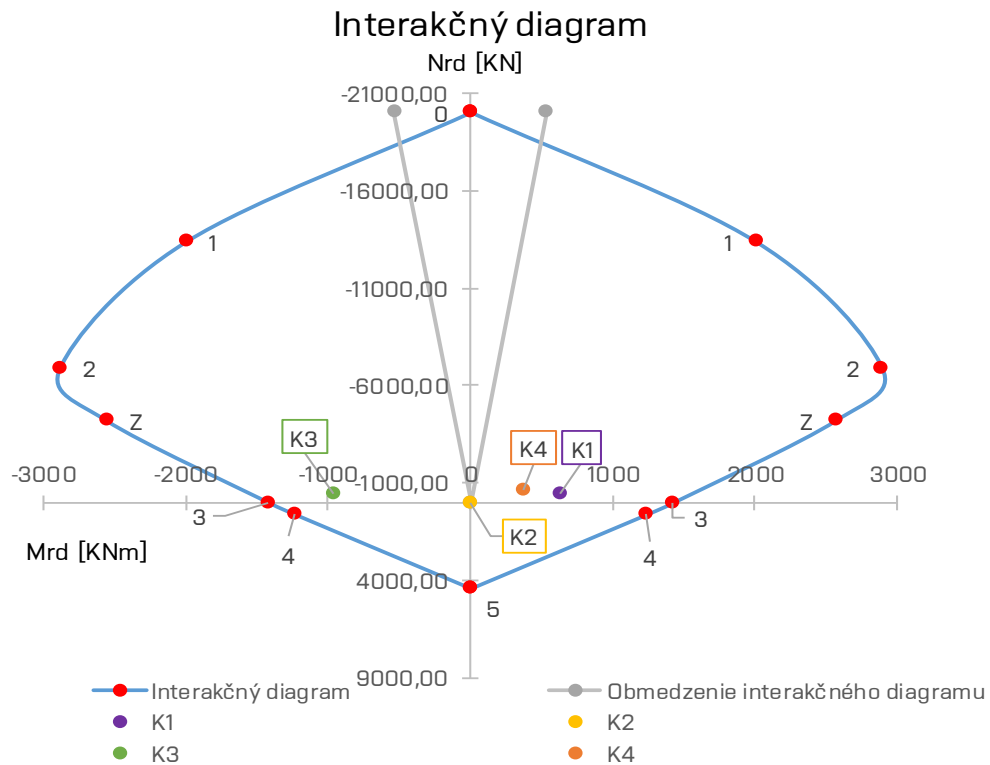
$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 5,06E-03 \cdot 4,35E+05 = 2199,13 \text{ kN}$$

$$N_{Rd5} = F_{s1} + F_{s2} = 4398,26 \text{ kN}$$

$$M_{Rd5} = F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 0 \text{ kNm}$$

Rekapitulácia výsledných hodnôt

Bod	N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]
0	-20046,40	0
1	-13399,13	2003,74
2	-6908,81	2889,710994
Z	-4222,95	2562,83
3	0,00	1418,487
4	599,13	1235,74
5	4398,26	0



Výpočet dimenzačných účinkov

Moment prvého rádu

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed}$$

$$e_i = l_0 / 400 = 0,01675 \text{ m}$$

$$l_0 = l \cdot \beta = 6,7 \text{ m}$$

$$\beta = 1$$

$$l = 6,7 \text{ m}$$

Pozn.

Tlaková normálová
sila je uvažovaná
kladne.

1. Kombinácia $M_{\max} N_{0dp}$

$$N_{Ed} = 417,48 \text{ kN}$$

$$M_d = 628,77 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 635,763 \text{ kNm}$$

2. Kombinácia $N_{\max} M_{0dp}$

$$N_{Ed} = 0,64 \text{ kN}$$

$$M_d = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 0,01072 \text{ kNm}$$

3. Kombinácia M_{\min} N_{odp}

$$N_{Ed} = 486,02 \text{ kN}$$

$$M_d = -951,96 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{odEd}} = M_d + e_i * N_{Ed} = -960,1 \text{ kNm}$$

4. Kombinácia N_{\min} M_{odp}

$$N_{Ed} = 613,54 \text{ kN}$$

$$M_d = 359,15 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{odEd}} = M_d + e_i * N_{Ed} = 369,427 \text{ kNm}$$

Moment druhého rádu

Kritérium štíhlosti

1. Kombinácia

$$n = N_{Ed} / (Ac * fcd) = 0,03$$

$$\lambda = l_0 / i = 29$$

$$i = \sqrt{I / A} = 0,231 \text{ m}$$

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 = 4,27E-02 \text{ m}^4$$

$$A = b * h = 0,80 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 25 \text{ pro } n \geq 0,41$$
$$= (20 * A * B * C) / \sqrt{n} \text{ pro } n < 0,41$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 100$$

$$A = 1 / (1 + 0,2 * \varphi_{ef}) = 1$$

$$\varphi_{ef} = 0$$

$$B = \sqrt{1 + 2 * \omega} = 1,2$$

$$\omega = (As * fy_d) / (Ac * fcd) = 2,75E-01$$

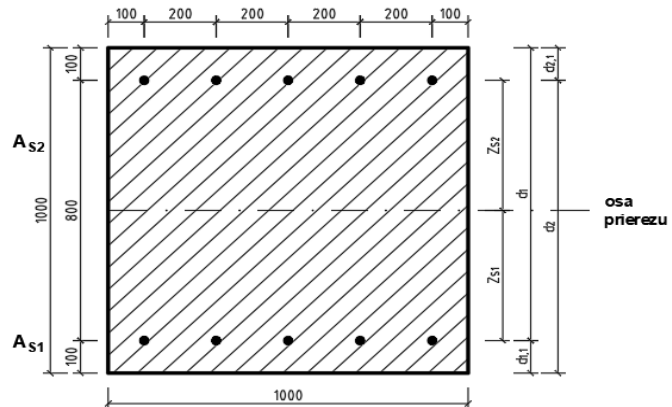
$$C = 0,7$$

$$\lambda_{\text{lim}} > \lambda \Rightarrow \text{Moment druhého rádu sa dá zanedbať}$$

Príloha P10.3 – Interakčný diagram PKS hr. 1000 mm

Materiálové charakteristiky

	Betón	C30/37	
f_{ck}	30	MPa	
$f_{cd} = \alpha * (f_{ck} / \gamma_c) =$	20,00	MPa	
α	1		
γ_c	1,5		
ϵ_{cu3}	3,5	‰	
ϵ_{c2}	2,0	‰	
	Oceľ	B500B	
f_{yk}	500	MPa	
$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s =$	434,78	MPa	
γ_s	1,15		
E_s	200	GPa	
$\epsilon_{yd} = f_{yd} / E_s =$	2,17	‰	



Geometria

h	1,0	m	
b	1,0	m	
A_{s1}	4,215E-03	m ²	5 Ø 32
A_{s2}	4,215E-03	m ²	5 Ø 32

Strmene

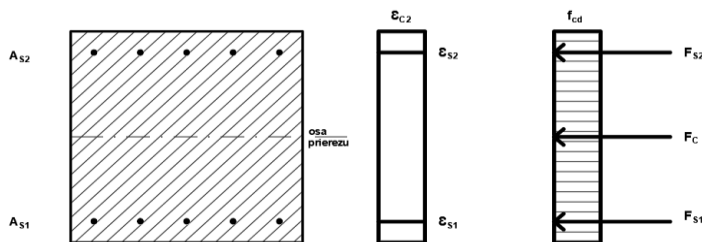
obvodové strmene Ø8 mm á 250 mm	
2 dvojstrižné strmene Ø8 mm á 250 mm	
d_1	0,90 m
$d_{1,1}$	0,10 m
d_2	0,90 m
$d_{2,1}$	0,10 m

$z_{s1} = (h/2) - d_{1,1} =$	0,40 m	Celková plocha výstuže: 8430 mm ²
$z_{s2} = (h/2) - d_{2,1} =$	0,40 m	$\rho_s = 0,01 \geq \rho_{s,min} 0,0020 \Rightarrow$ Vyhovuje
		$\rho_s = 0,01 \leq \rho_{s,max} 0,0400 \Rightarrow$ Vyhovuje
		Minimálna plocha vodorovnej výstuže: $A_{sh,min} = 2011$ mm ²

1. Bod 0

Rovnomerné rozloženie pretvorenia v tlačennom betóne po celej výške prierezu (ϵ_{c3})

pomerné pretvorenie je $\epsilon_{s1} = \epsilon_{s2} = \epsilon_{c3} = 2,0$ ‰

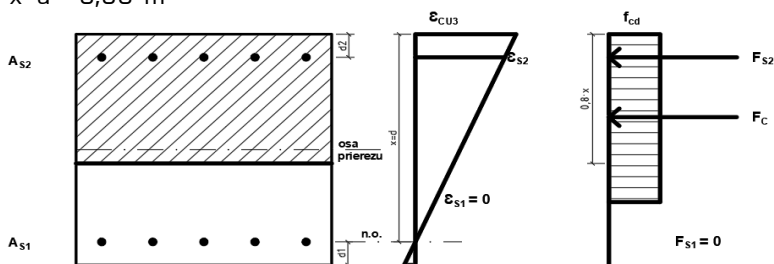


$\sigma_{s1} = E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
$\sigma_{s2} = E_s * \epsilon_s =$	2,00E+05 *	2,00E-03 =	400 MPa
$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} =$	4,22E-03 *	4,00E+05 =	1686,00 kN
$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} =$	4,22E-03 *	4,00E+05 =	1686,00 kN
$F_c = A_c * f_{cd} =$	1 * 1,00 *	2,00E+04 =	20000,00 kN
$z_c =$	0		
$N_{Rd0} = -F_c - F_{s1} - F_{s2} =$			-23372,00 kN
$M_{Rd0} = F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} =$			0 kNm

2. Bod 1

Neutrálna os prechádza ťažiskom výstuže A_{s1}

$x=d= 0,90$ m



$$\varepsilon_{s1} = 0 \Rightarrow \sigma_{s1} = 0 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x * (x - d_{2,1}) = 3,11 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 4,22E-03 * 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,90 * 2,00E+04 = 14400,00 \text{ kN}$$

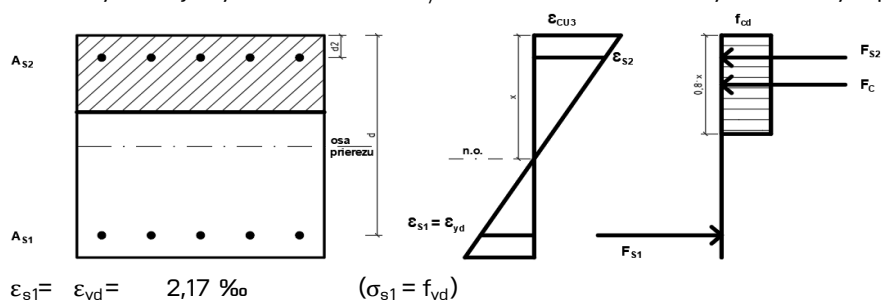
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,14 \text{ m}$$

$$N_{Rd1} = -F_c - F_{s1} - F_{s2} = -16232,61 \text{ kN}$$

$$M_{Rd1} = F_c * z_c - F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 2749,04 \text{ kNm}$$

3. Bod 2

Vrstva výstuže je využitá na medzu f_{yd} , rozhranie medzi tlakovým a ťahovým porušením



$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s1} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal1} \text{ určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal1}}{\varepsilon_{cu3}} = \frac{d - x_{bal1}}{\varepsilon_{s1}}$$

$$x_{bal1} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{s1}} * d = 0,555 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu3}/x_{bal1} * (x_{bal1} - d_{2,1}) = 2,87 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,555 * 2,00E+04 = 8882,76 \text{ kN}$$

$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal1})/2 = 0,278 \text{ m}$$

$$N_{Rd2} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -8882,76 \text{ kN}$$

$$M_{Rd2} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 3934,881 \text{ kNm}$$

4. Bod z

V tlačenej výstuži betónu je dosiahnuté medzné pomerné pretvorenie ϵ_{cu3} a v tlačenej výstuži je dosiahnutá medza klzu:

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \quad (\sigma_{s2} = f_{yd})$$

$$x = x_{bal2} \quad \text{a určíme ho z podmienky} \quad \frac{x_{bal2}}{\epsilon_{cu3}} = \frac{x_{bal2} - d_{2,1}}{\epsilon_{s2}}$$

$$x_{bal2} = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} - \epsilon_{s2}} * d_{2,1} = 0,264 \text{ m}$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu3} / x_{bal2} * (x_{bal2} - d_{1,1}) = 2,17 \text{ ‰} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} * \sigma_{s2} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,264 * 2,00E+04 = 4222,95 \text{ kN}$$

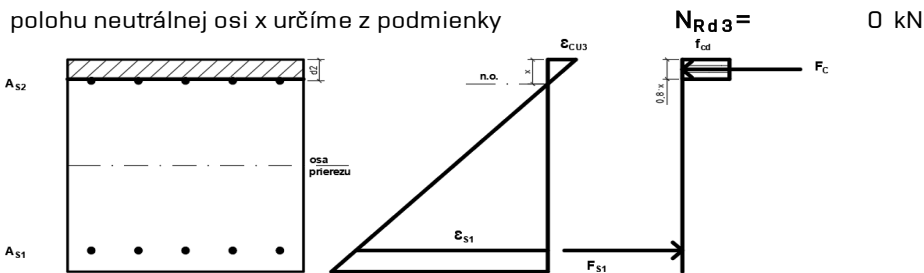
$$z_c = h/2 - (\lambda * x_{bal2})/2 = 0,394 \text{ m}$$

$$N_{RdZ} = -F_c + F_{s1} - F_{s2} = -4222,95 \text{ kN}$$

$$M_{RdZ} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} + F_{s2} * z_{s2} = 3131,73 \text{ kNm}$$

5. Bod 3

V priereze je rovnováha normálových síl, porušenie prostým ohybom polohu neutrálnej osi x určíme z podmienky



Tlačenu výstuž zanedbáme

$$h_1 = 0,90 \text{ m} \quad h_2 = 0,10 \text{ m}$$

Predpoklad P1: ťahaná výstuž A_{s1} je plne využitá:

$$\epsilon_{s1} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd}$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c$$

Podmienka rovnováhy síl v priereze

$$N_{Rd3} - F_c + F_{s1} = 0 \Rightarrow -b * \lambda * x * \sigma_c + F_{s1} = 0 \Rightarrow x = 0,115 \text{ m}$$

Overenie predpokladu P1:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu3} / x * (h_1 - x) = 24,00 \text{ ‰} > \epsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa} \quad (\text{Predpoklad P1 platí})$$

$$F_{s1} = A_{s1} * \sigma_{s1} = 4,22E-03 * 4,35E+05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_c = b * \lambda * x * \sigma_c = 1,00 * 0,8 * 0,115 * 2,00E+04 = 1832,61 \text{ kN}$$

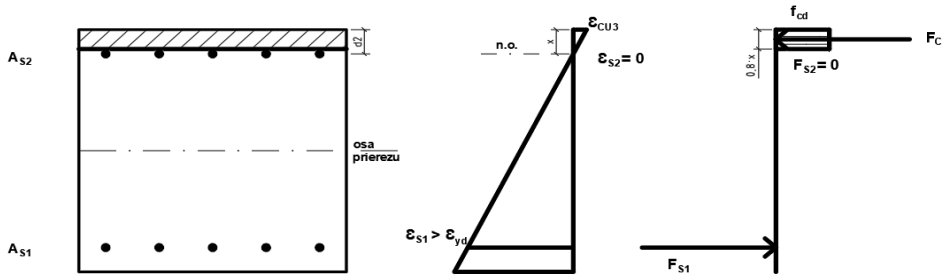
$$z_c = h/2 - (\lambda * x)/2 = 0,45418 \text{ m}$$

$$N_{Rd3} = -F_c + F_{s1} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{Rd3} = F_c * z_c + F_{s1} * z_{s1} = 1565,388 \text{ kNm}$$

6. Bod 4

Nulové pretvorenie v „tlačenej“ výstuži, pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuže A_{s2}



$$x = 0,10 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{s1} \Rightarrow \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} \approx 0,00 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 4,22 \text{E-}03 \cdot 4,35 \text{E+}05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 4,22 \text{E-}03 \cdot 0 = 0,00 \text{ kN}$$

$$F_c = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \sigma_c = 1,00 \cdot 0,8 \cdot 0,10 \cdot 2,00 \text{E+}04 = 1600,00 \text{ kN}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{(\lambda \cdot x)}{2} = 0,460 \text{ m}$$

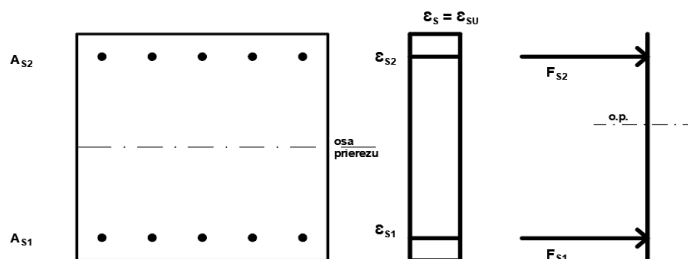
$$N_{Rd4} = -F_c + F_{s1} + F_{s2} = 232,61 \text{ kN}$$

$$M_{Rd4} = F_c \cdot z_c + F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 1469,04 \text{ kNm}$$

7. Bod 5

Pôsobisko ťahovej sily leží v ťažisku výstuží A_{s1} a A_{s2}

Celý prierez je namáhaný ťahom



$$\varepsilon_{s1} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s1} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s2} > \varepsilon_{yd} = 2,17 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} = 4,22 \text{E-}03 \cdot 4,35 \text{E+}05 = 1832,61 \text{ kN}$$

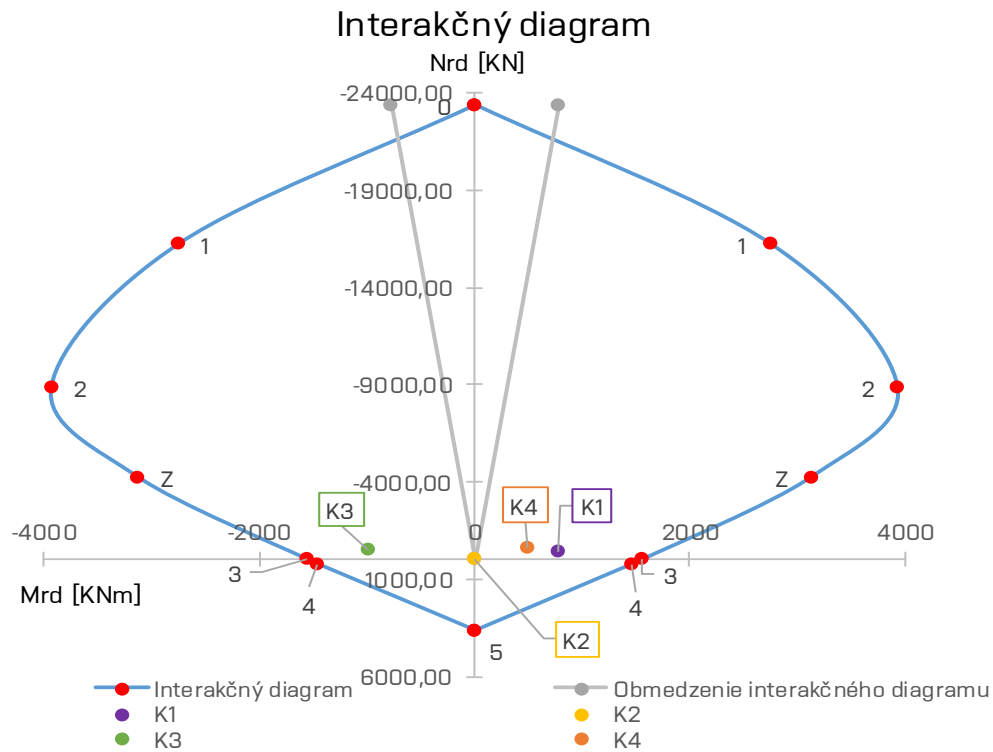
$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = 4,22 \text{E-}03 \cdot 4,35 \text{E+}05 = 1832,61 \text{ kN}$$

$$N_{Rd5} = F_{s1} + F_{s2} = 3665,22 \text{ kN}$$

$$M_{Rd5} = F_{s1} \cdot z_{s1} - F_{s2} \cdot z_{s2} = 0 \text{ kNm}$$

Rekapitulácia výsledných hodnôt

Bod	N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]
0	-23372,00	0
1	-16232,61	2749,04
2	-8882,76	3934,881249
Z	-4222,95	3131,73
3	0,00	1565,388
4	232,61	1469,04
5	3665,22	0



Výpočet dimenzačných účinkov

Moment prvého rádu

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed}$$

$$e_i = l_0 / 400 = 0,01675 \text{ m}$$

$$l_0 = l \cdot \beta = 6,7 \text{ m}$$

$$\beta = 1$$

$$l = 6,7 \text{ m}$$

Pozn.

Tlaková normálová sila je uvažovaná kladne.

1. Kombinácia $M_{max} N_{0dp}$

$$N_{Ed} = 419,87 \text{ kN}$$

$$M_d = 769,94 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 776,973 \text{ kNm}$$

2. Kombinácia $N_{max} M_{0dp}$

$$N_{Ed} = 3,62 \text{ kN}$$

$$M_d = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{0Ed} = M_d + e_i \cdot N_{Ed} = 0,06064 \text{ kNm}$$

3. Kombinácia $M_{\min} N_{\text{odp}}$

$$N_{Ed} = 486,11 \text{ kN}$$

$$M_d = -975,61 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{odEd}} = M_d + e_i * N_{Ed} = -983,75 \text{ kNm}$$

4. Kombinácia $N_{\min} M_{\text{odp}}$

$$N_{Ed} = 616,24 \text{ kN}$$

$$M_d = 490,73 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{odEd}} = M_d + e_i * N_{Ed} = 501,052 \text{ kNm}$$

Moment druhého rádu

Kritérium štíhlosti

1. Kombinácia

$$n = N_{Ed} / (Ac * fcd) = 0,02$$

$$\lambda = l_0 / i = 23$$

$$i = \sqrt{I / A} = 0,289 \text{ m}$$

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 = 8,33E-02 \text{ m}^4$$

$$A = b * h = 1,00 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 25 \text{ pro } n \geq 0,41$$

$$= (20 * A * B * C) / \sqrt{n} \text{ pro } n < 0,41$$

$$\lambda_{\text{lim}} = 105$$

$$A = 1 / (1 + 0,2 * \varphi_{ef}) = 1$$

$$\varphi_{ef} = 0$$

$$B = \sqrt{1 + 2 * \omega} = 1,2$$

$$\omega = (As * fy_d) / (Ac * fcd) = 1,83E-01$$

$$C = 0,7$$

$$\lambda_{\text{lim}} > \lambda \Rightarrow \text{Moment druhého rádu sa dá zanedbať}$$