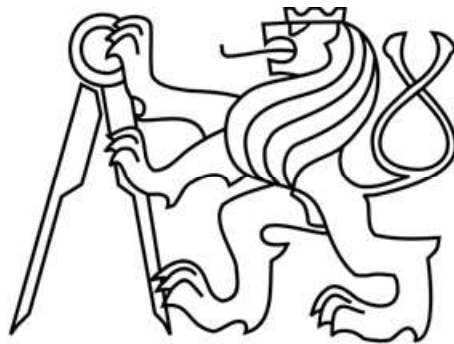


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra geotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv vstupních parametrů na numerický
model Kolektoru Hlávkův most**

Kateřina Kratochvílová

2022

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou prací vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Kateřina Kratochvílová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat panu docentovi Pruškovi za trpělivé a podnětné vedení při tvorbě této práce a dále bych chtěla poděkovat svým nejbližším za podporu.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kratochvílová Jméno: Kateřina Osobní číslo: 464517
Zadávající katedra: Katedra geotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv vstupních parametrů na numerický model Kolektoru Hlávkův most
Název diplomové práce anglicky: Influence of Input Parameters on the Numerical Model of the Hlávkův Bridge Utility Tunnel

Pokyny pro vypracování:

- rešerše geologických podmínek dané oblasti
- popis metod výpočtu (návrhu) - deterministické, stochastické
- vytvoření numerického modelu kolektoru Hlávkův most pomocí MKP
- studie vlivu vstupních parametrů využívající metodu LHS
- vyhodnocení vlivu vstupních parametrů a závěr

Seznam doporučené literatury:

- Janda, Šejnoha, Pruška Metoda konečných prvků v geomechanice - Teoretické základy a Inženýrská aplikace
- materiály firem HOCHTIEF, Ingutis
- knihovna CzTA

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Datum zadání diplomové práce: 16. 9. 2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2. 1. 2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Cílem diplomové práce bylo podrobit numerický model vybraného řezu kolektou Hlávkův most pravděpodobností analýze za použití metody latinských hyperkrychlí. V první části byla představena samotná metoda latinských hyperkrychlí, stavby kolektoru Hlávkův most a geologické podmínky v zájmovém území stavby. V další fázi bylo provedeno pravděpodobnostní zpracování vybraných veličin pro numerický model. Následně byly provedeny simulace modelu zvoleného řezu kolektoru pomocí programu GEO5 za použití zpracovaných veličin pomocí dvou materiálových modelů. Maximální vnitřní síly v ostění získané z těchto simulací byly dále použity pro posouzení navrženého primárního ostění pomocí programu Beton FIN EC. V poslední části práce byly porovnány posuny z monitorů z modelu s naměřenými hodnotami konvergenčního profilu z provádění stavby.

Klíčová slova

metoda latinských hyperkrychlí, pravděpodobnostní analýza, GEO5, metoda konečných prvků, kolektor Hlávkův most, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager

Abstract

The aim of the diploma thesis was to subject the numerical model of a selected profile of the Hlávkův Bridge Utility tunnel by probability analysis using the method of Latin hypercubes. In the first part, the method of Latin hypercubes, the construction of the Hlávkův Bridge Utility tunnel and the geological conditions in the area of interest of the construction were introduced. In the next phase, probabilistic processing of selected quantities for the numerical model was performed. Subsequently, simulations of the model of the selected collector profile were performed using the GEO5 program using the processed quantities using two material models. The maximum internal forces in the lining obtained from these simulations were further used to assess the proposed primary lining using the program Beton FIN EC. In the last part of the work, the movements from the monitors from the model were compared with the measured values of the convergence profile from the construction.

Key words

Latin hypercube method, probability analysis, GEO5, finite element method, Hlávkův Bridge Utility tunnel, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager

Obsah

Abstrakt	5
Klíčová slova	5
Abstract	6
Key words	6
Obsah	7
Použité symboly a zkratky	10
1 Metody výpočtů v geotechnice	12
1.1 Pravděpodobnostní metody	13
2 Metoda latinských hyperkrychlí	15
2.1 Náhodná proměnná	15
2.2 Výběr vzorků náhodné proměnné	16
2.2.1 LHS – random	16
2.2.2 LHS – median	17
2.2.3 LHS – mean	17
2.3 Uspořádání vzorků	18
2.4 Zavedení závislosti	18
2.5 Aplikace v geotechnické praxi	19
3 Kolektor Hlávkův most	20
3.1 Popis stavby	21
3.2 Geologické a hydrogeologické podmínky	21
3.3 Provádění a technický popis	22
3.3.1 Ražená trasa	22
3.3.2 Technické komory	23
3.3.3 Hloubená trasa	24
3.3.4 Hloubené šachty	25
3.4 Definitivní konstrukce	25
3.5 Inovativní metody použité při stavbě	26
3.5.1 Automatická bednicí forma	26
3.5.2 Kontinuální betonáž šachet	27
4 Geologické a hydrogeologické poměry	28
4.1 Inženýrskogeologický průzkum – průzkumné práce	28
4.2 Geologické poměry	29

4.2.1	Přehled geomorfologického vývoje	29
4.2.2	Místní geologické poměry	30
4.3	Hydrogeologické poměry.....	32
4.3.1	Podzemní voda v pokryvných útvarech.....	33
4.3.2	Podzemní voda v horninách skalního podkladu	33
4.3.3	Předpokládané přítoky podzemní vody do díla	33
4.4	Geotechnické zkoušky.....	34
4.4.1	Úkol a rozsah zkoušek	34
4.4.2	Použité metody	34
4.4.3	Výsledky zkoušek a jejich posouzení.....	35
4.5	Geotechnické posouzení.....	36
4.5.1	Geotechnické charakteristiky zemin a hornin	36
4.5.2	Technologické vlastnosti vytěženého materiálu.....	39
4.6	Závěrečné inženýrskogeologické zhodnocení	39
5	Výpočet parametrů pro metodu LHS.....	41
6	Model MKP.....	46
6.1	Geotechnické parametry zemin a vliv podzemní vody	46
6.2	Primární ostění kolektoru	47
6.2.1	Příhradový rám BRETEX	49
6.2.2	Svorníková výztuž kolektoru	50
6.3	Vstupní parametry modelu MKP.....	53
6.4	Fáze výpočtu.....	55
6.5	Měřené hodnoty.....	57
7	Výstupy z modelů MKP.....	58
8	Posouzení výstupů – program Beton FIN EC.....	66
8.1	Průřez z mladého betonu.....	66
8.1.1	Vstupní data	66
8.2	Průřez z vyzrálého betonu	70
8.2.1	Vstupní data	70
9	Porovnání chování modelů	74
10	Porovnání výsledků s hodnotami naměřenými během výstavby	83
10.1	Monitoring během stavby.....	83
10.2	Konvergenční měření	83

10.3 Porovnání výsledků modelování s hodnotami naměřenými během monitoringu.....	84
11 Závěr.....	86
Seznam literatury.....	87
Použitý software.....	90
Seznam obrázků.....	90
Seznam tabulek.....	92
Seznam příloh.....	93

Použité symboly a zkratky

A_k	plocha připadající na jeden svorník
C_s	zvýšení soudržnosti horniny vlivem svorníků
C_h	původní soudržnost horniny
C_{h+s}	celková soudržnost s uvažovaným vlivem svorníků
C_{min}	tloušťka minimální krycí vrstvy výztuže
$C_{min,b}$	průměr prutu výztuže, pro který je navrhována krycí vrstva
$C_{min,dur}$	krycí vrstva z hlediska třídy konstrukce a vlivu prostředí
C_{nom}	nominální hodnota betonové krycí vrstvy
ΔC_{dev}	přídavek pro návrhovou odchylku při návrhu krycí vrstvy
C_{ef}	efektivní soudržnost zeminy
D-P	Drucker-Prager
E_{cm}	modul pružnosti betonu
E_s	modul pružnosti oceli
E	modul pružnosti
E_{def}	modul přetvárnosti
E_{ur}	modul odtížení/přetížení
EX	střední hodnota
f_{ck}	válcová pevnost v tlaku
f_{ctm}	pevnost v tahu
f_{yk}	mez kluzu oceli
G	modul pružnosti ve smyku
HPV	hladina podzemní vody
k_f	koeficient filtrace
K_0	součinitel bočního tlaku v klidu
LHS	Latin Hypercube Sampling
M	ohybový moment
M_{Ed}	návrhový ohybový moment ve směru
M_{Rd}	návrhová hodnota M na mezi únosnosti průřezu
M-C	Mohr-Coulomb
MKP	Metoda konečných prvků
$\max M_{Ek}$	maximální ohybový moment
$\max N_{Ek}$	maximální normálová síla
N	normálová síla
N_{Ed}	návrhové normálové zatížení
N_{Rd}	návrhová hodnota N na mezi únosnosti průřezu
NRTM	Nová rakouská tunelovací metoda
N_u	únosnost jednoho svorníku
R_{dt}	výpočtová únosnost

t_m	tunel metr
$\text{Var}X$	rozptyl
α_{cc}	součinitel tlakové pevnosti betonu
α_t	součinitel teplotní roztažnosti
γ	objemová tíha
γ_{kc}	součinitel spolehlivosti kotvení
γ_c	součinitel spolehlivosti betonu
γ_s	součinitel spolehlivosti výztuže
γ_{cE}	dílčí součinitel modulu pružnosti betonu
γ_f	součinitel zatížení
γ_{sat}	objemová tíha zeminy saturované vodou
Φ_{ef}	efektivní úhel vnitřního tření
ν	Poissonovo číslo
ψ	úhel dilatace
\emptyset	průměr prutu výztuže
δ_c	redukční parametr soudržnosti
δ_μ	redukční parametr tření
ρ	objemová hmotnost
σ_c	pevnost v prostém tlaku
σ_0	směrodatná odchylka
Δ	rozdíl hodnot

1 Metody výpočtů v geotechnice

Během navrhování geotechnických konstrukcí se projektant musí vyrovnat s velkým množstvím rizik, jako jsou rizika výstavby podzemního díla nebo rizika správného technického řešení, ale jedním z největších je riziko geotechnických poměrů zájmového území. Mechanické parametry zeminového a horninového prostředí získané pomocí inženýrskogeologických průzkumných prací mají zpravidla značný rozptyl, což je zapříčiněno samotnou podstatou zkoumaného prostředí. Jedná se o prostředí nehomogenní, vlastnosti jednotlivých vrstev se mohou lišit na jejich povrchu a v bázi. Dále je nutné zvážit přesnost prováděných zkoušek, a to jak laboratorních, tak měření in-situ. Dále je smutnou skutečností, že samotných vstupních informací pro průzkum nemusí být dostatek pro zpřesnění parametrů, obzvláště v husté zástavbě může být podrobný inženýrskogeologický průzkum velmi náročný.

Tato nejistota mechanických vlastností zemin a hornin v zájmovém území vede k nutnému vnesení nepřesnosti do výpočtů posuzujících danou konstrukci. Pokud uvážíme míru této nejistoty, může přestat být vhodná otázka, zda daná konstrukce vyhovuje nebo nevyhovuje, což je klasická otázka deterministického přístupu. Deterministický přístup definuje podmínku spolehlivosti tak, že odpor konstrukce, tedy její únosnost, musí být větší než vnější zatížení. Pokud ale toto posouzení zatížíme příliš velkým množstvím neznámých a nejistot, pozbývá tato podmínka svého smyslu. V takovou chvíli může být mnohem vhodnější pravděpodobnostní přístup definující funkci spolehlivosti jako odpověď na otázku: s jakou pravděpodobností konstrukce vyhoví? Dochází zde tedy k mnohem přesnější optimalizaci konstrukce v závislosti na přijatelné míře rizika.

Návrh geotechnických konstrukcí se musí řídit normou Eurokódu 7 a ten primárně nabádá k použití metody dílčích koeficientů, které mají zohlednit právě nejistotu ve vstupních parametrech pro výpočet. Tento návrhový postup vychází z toho, že se při výpočtu spolehlivosti konstrukce zhorší vlastnosti dotčeného prostředí nebo zhorší účinky zatížení na danou konstrukci nebo obojí, v závislosti na návrhovém přístupu, typu konstrukce a uvážení projektanta. Jako alternativu Eurokód 7 sice nabízí možnost provést návrh založený na metodách využívajících pravděpodobnost, zároveň ale norma trvá na tom, aby byl tento návrh ověřen klasicky, tedy výpočtem metodou dílčích součinitelů spolehlivosti. [1]

Mezi největší nevýhody pravděpodobnostního přístupu k řešení geotechnických úloh patří zejména vysoká časová náročnost výpočtu daná nutným počtem simulací. Tato obtížnost je dána také tím, že v současném geotechnickém softwaru tento přístup zpravidla není zaveden a zavádí ho sám uživatel větším počtem modelů s proměnnými vlastnostmi. K dalším problematičnostem pravděpodobnostních přístupů dále patří vysoká náročnost na vstupní data modelů a někdy i na jejich množství.

1.1 Pravděpodobnostní metody

Mezi nejznámější pravděpodobnostní metody řešení spolehlivosti patří na prvním místě metoda Monte Carlo. Tato metoda je robustní, snadno použitelná a při použití počítačů se jedná o mocný a spolehlivý nástroj pro řešení pravděpodobnostních úloh. Monte Carlo je simulační metoda založená na řešení pomocí náhodných vzorků. [2] Samotný název metody vychází z původu jejího vzniku, který simuloval náhodnost pohybu v ruletě. [3]

Pomocí této metody je náhodná úloha převedena na soubor deterministických úloh, což značně zjednodušuje celé řešení. Náhodný vstup zde vytváří náhodný výstup obsahující statistické nebo pravděpodobnostní údaje o náhodné vstupní veličině. Díky své jednoduché aplikaci je tato metoda v geotechnice využívána a to hlavně pro řešení stability skalních svahů. Největší nevýhodou metody Monte Carlo je vysoký nutný počet simulací požadovaný pro přijatelně přesné výsledky, pro výpočet stability skalních svahů je to typicky v řádech $n \cdot 10^2$ až 10^3 . [2]

Druhou velmi známou metodou pro pravděpodobnostní výpočty je metoda Latin Hypercube Sampling (LHS). Metoda vychází z teorie latinských čtverců, které fungují na principu čtvercové sítě popisující pozice vzorků tak, že v každé řadě a každém sloupci se nalézá vždy jen jeden výběr. [4] Metoda latinských hyperkrychlí tuto teorii zobecňuje na latinské čtyřhrany, kde platí, že každý vzorek se nachází pouze v jedné řadě.

Mezi největší výhody výpočtů pomocí metody LHS oproti metodě Monte Carlo patří bezesporu masivní snížení potřebného počtu vzorků. Aby metoda LHS dávala průkazné výsledky, je počet potřebných simulací v řádu desítek, maximálně nižších stovek. Díky tomuto zlepšení je pro geotechnické výpočty mnohem vhodnější a snáze použitelná, protože každá simulace potřebuje vlastní výpočet modelu, například pomocí metody konečných prvků, což je značně časově náročné a snížení

nutného počtu simulací je tedy opravdu znatelné na výpočetním čase. Zároveň metoda latinských hyperkrychlí ale zachovává srovnatelnou přesnost výsledků simulací jako metoda Monte Carlo. [5]

2 Metoda latinských hyperkrychlí

Jak již bylo řečeno, metoda latinských hyperkrychlí je metoda typu Monte Carlo. Jejím největším rozdílem oproti klasické metodě Monte Carlo je řádové zmenšení nutného počtu simulací pro konvergenci ke správnému řešení. Jedná se o pravděpodobnostní startifikační metodu, jejíž výhodou je, že protože je rovnoměrně pokryt interval náhodné proměnné vzhledem k distribuční funkci, žádná její reálná hodnota není dopředu vyloučena. [5]

První použití metody latinských hyperkrychlí bylo uskutečněno pro zohlednění nejistot návrhu nukleárních elektráren ve Spojených státech amerických. První publikaci metody provedli Conover a jeho kolegové v roce 1979. Její první použití v praxi se nachází v práci Imana a Conovera z roku 1982. [6]

Postup výpočtu pomocí této metody by bylo možné rozdělit do dvou hlavních částí. V první fázi jsou zvoleny vzorky reprezentující funkce hustoty pravděpodobnosti zvolených proměnných parametrů. Ve fázi druhé se mění pořadí vybraných vzorků tak, aby se vystihla požadovaná statistická závislost mezi proměnnými. Protože se v této fázi mění pouze pořadí zvolených hodnot a nikoliv jejich velikost, funkce pravděpodobnosti se nemění. [7]

2.1 Náhodná proměnná

Jak již bylo řečeno, stanovení přesných hodnot materiálových vlastností geotechnického prostředí bývá velmi obtížné, zároveň proměnlivost těchto veličin má velký vliv na chování daného prostředí jako celku. Proto je vhodné určit některé tyto veličiny jako proměnné. Coby náhodná veličina může potom nabývat různých hodnot a je možné ji charakterizovat pomocí funkce pravděpodobnosti. Je vhodné určit pro každou veličinu interval, ze kterého může nabývat hodnot, jako spojitý. Pro výpočty jsou tyto náhodné veličiny a intervaly, na kterých jsou definovány, určeny sadou deterministických čísel, které je následně možné dosadit do sady deterministických úloh, které jako celek tvoří daný náhodnou úlohu. [5]

Mezi hlavní charakteristiky takovéto náhodné veličiny patří funkce hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ a jí příslušející kumulativní distribuční funkce $F(x)$, které mezi sebou mají vztah: [8]

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (1)$$

Dalšími charakteristikami popisujícími náhodnou veličinu jsou: [5]

- střední hodnota

$$EX = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2)$$

- rozptyl

$$VarX = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - EX)^2 \cdot f(x) dx \quad (3)$$

- směrodatná odchylka

$$\sigma_0 = \sqrt{Var X} \quad (4)$$

2.2 Výběr vzorků náhodné proměnné

Základem metody je, že je zvolen potřebný počet simulací N a pomocí něj jsou pak N násobně generovány vzorky každé zvolené proměnné veličiny. Definiční obor kumulativní distribuční funkce $F(x)$ odpovídající funkci hustoty pravděpodobnosti $f(x)$, tedy interval, v jehož mezích se má daná proměnná veličina nacházet, se dělí na N disjunktivních dílčích intervalů. Jednotlivé intervaly potom mají shodnou pravděpodobnost $1/N$. Z každého dílčího intervalu je následně zvolena jedna hodnota, která charakterizuje celý daný interval a která může být následně použita pro simulace právě jednou. Tato hodnota se získá pomocí inverzní transformace distribuční funkce. [5]

Kladem metody je, že díky postupu výběru realizací je celý rozsah zvolené náhodné proměnné pokryt rovnoměrně vzhledem k její distribuční funkci. Zároveň dochází k zachování funkce pravděpodobnosti dané proměnné a k zachování zvolené míry korelace mezi nimi. [5]

2.2.1 LHS – random

Jedním ze způsobů výběru vzorků z dílčích intervalů je generování N náhodných čísel n z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, která budou mít rovnoměrné rozdělení. Následně jsou tato čísla pomocí lineární transformace přiřazena k intervalům, kterým přísluší. Pomocí inverzní transformace distribuční funkce jsou následně určeny hodnoty veličin $x_{i,k}$ náležící náhodné proměnné X_i : [5]

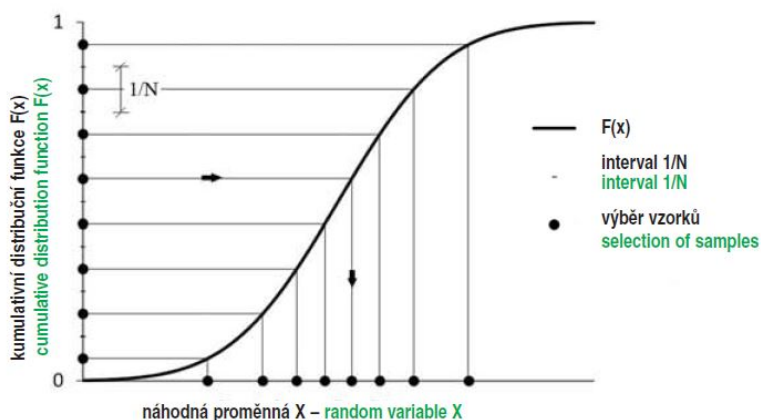
$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left(\frac{n+(k-1)}{N} \right) \quad (5)$$

k k-tá vrstva i -té proměnné
 F_i^{-1} inverzní distribuční funkce i -té proměnné

2.2.2 LHS – median

Další možností, jak získat vzorky náhodné proměnné veličiny je výběr ze středu intervalu $1/N$ na distribuční funkci. Tento postup je využit ve většině prací zabývajících se metodou LHS. [9]

$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left(\frac{k-0,5}{N} \right) \quad (6)$$



Obr. 1: Postup výběru vzorků pro metodu LHS – median [5]

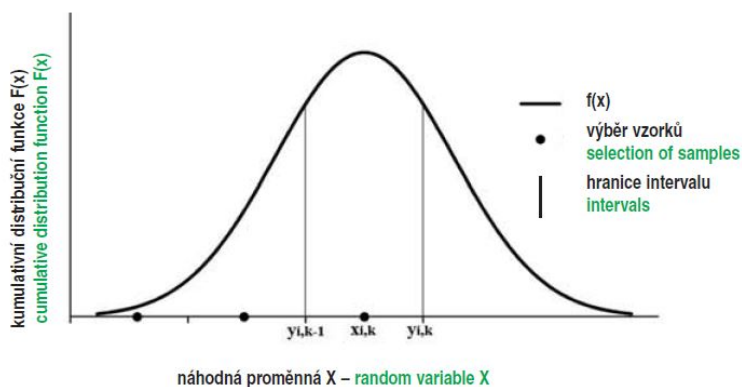
2.2.3 LHS – mean

Metoda používá jako vzorky reprezentující interval střední hodnotu daného intervalu vymezeného na funkci hustoty pravděpodobnosti vybrané proměnné. Charakterizující hodnota se potom nachází v těžišti rozdělovacích ploch. [5]

$$x_{i,k} = N \cdot \int_{y_{i,k-1}}^{y_{i,k}} x \cdot f(x) dx \quad (7)$$

Meze integrálu se určí jako: [5]

$$y_{i,k} = F_i^{-1} \left(\frac{k}{N} \right) \quad (8)$$



Obr. 2: Postup výběru vzorků pro metodu LHS – mean [5]

2.3 Uspořádání vzorků

Pro uspořádání vybraných vzorků do sad, které budou použity pro jednotlivé simulace, se zpravidla používá postup, kdy pro každou náhodnou proměnnou je zvolena náhodná permutace celých čísel od 1 až do N , které se rovná počtu simulací. [5]

Tab. 1: Permutační tabulka pro počet simulací N pro proměnné veličiny X_1 až X_i

N / X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	...	X_i
1	3	1	6	3	2	6
2	5	2	2	1	4	4
3	1	6	3	5	5	1
4	4	3	5	2	1	3
:	6	4	4	6	3	5
N	2	5	1	4	6	2

Počet řádků permutační tabulky je určen počtem navržených simulací, počet jejích sloupců je roven počtu proměnných veličin použitých pro výpočet. Každé číslo určuje hodnotu vzorku $x_{i,k}$, kde číslo i určuje neznámou X_i a číslo k k -tou vrstvou, ze které daný vzorek pochází. V dalším kroku nahradí jednotlivá čísla hodnoty vzorků jednotlivých proměnných, které charakterizují. V této chvíli lze mluvit o matici X $K \times N$, kde K charakterizuje počet proměnných veličin a N počet použitých simulací. Tato metoda pracuje s předpokladem, že jednotlivé permutace náhodných čísel 1, 2, ... N jsou na sobě nezávislé. [5]

2.4 Zavedení závislosti

Po vygenerování vzorků jejich uspořádání je třeba zohlednit statistickou korelaci mezi těmito vzorky. Ta může být nulová nebo nenulová. Při uspořádávání vzorků byl využit předpoklad, že jsou na sobě vektory matice X nezávislé, proto by měla platit i nezávislost statistických souborů představující jednotlivé simulace proměnné veličiny. Je zde určitá možnost, že při generování sloupců permutační matice vznikla nezanedbatelná závislost, což by mohlo ovlivnit výsledky výpočtů metody, proto je vhodné ověřit tuto nezávislost. Jako vhodné se zdá využití Pearsonova korelačního koeficientu nebo Spearmanova koeficientu pořadové korelace. [7]

Pokud je vhodné zavést určitou míru korelace mezi jednotlivými proměnnými veličinami, s ohledem na postup výpočtu pomocí metody LHS, doporučuje se dosáhnout této korelace pouze pomocí záměn pořadí jednotlivých vzorů, nikoliv změnami jejich hodnot. Pomocí záměn pořadí vzorků se tedy dosáhne požadované míry statistické závislosti. [10]

2.5 Aplikace v geotechnické praxi

Využití metody latinských hyperkrychlí v geotechnické praxi není v České republice bohužel zatím příliš časté. Naprostá většina aplikací této metody se soustřeďuje na akademické půdě, přeci jen, simulace jsou stále velmi časově náročné a je nutné je ověřovat klasickými výpočty.

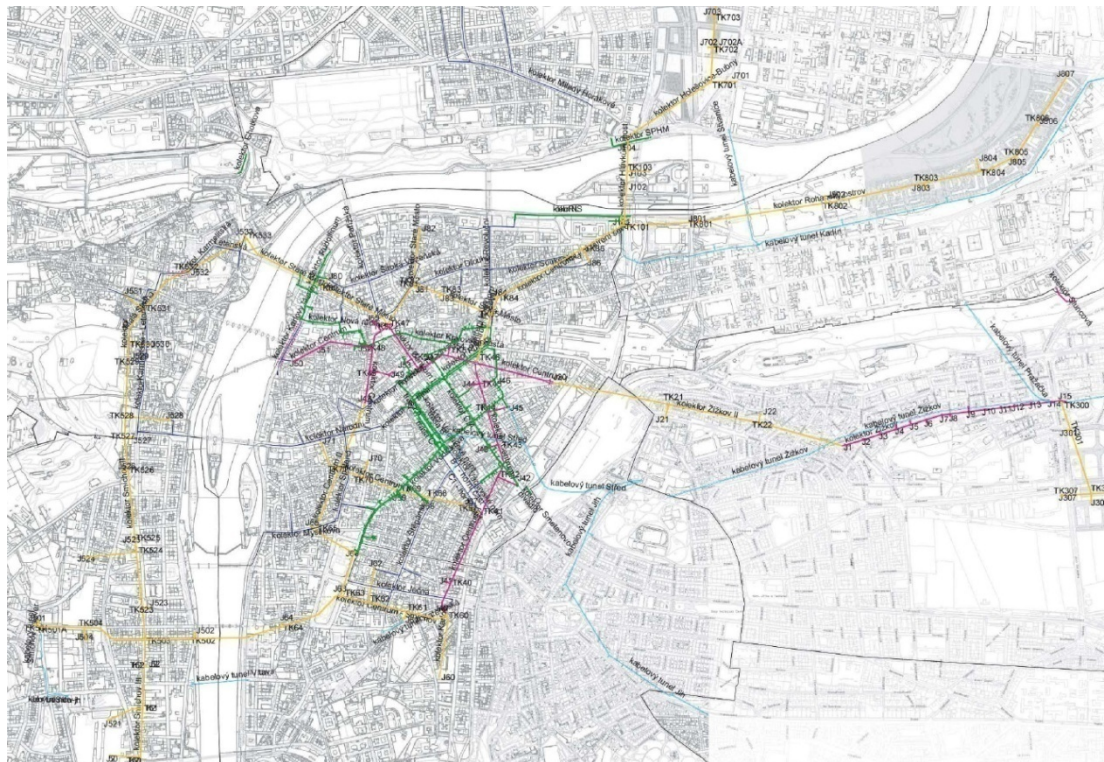
Mezi první použití této metody se u nás řadí numerické modelování deformací tunelu Mrázovka. Zde došlo poklesu masivu ve vrcholu klenby přes 190 mm a bylo nutné posoudit, zda nedojde k dalším, fatálním deformacím. Modelování pomocí metody LHS prokázalo, že deformace s pravděpodobností 95,4 % nepřekročí 213 mm. [2]

Dalším zajímavým použitím této metody byly simulace 2D modelu průzkumné štoly pro tunel Blanka. Tato štola procházela územím s velmi složitou geologií s výskytem tektonických porušení a změn horninového prostředí. Během modelování se prokázalo, že inženýrskogeologický průzkum poskytl pro návrh vcelku velmi přesné hodnoty, protože rozptyl předpokládaných deformací ze simulací byl velmi malý. Při provádění byly hodnoty naměřené na místě v podstatě shodné s deformacemi předpokládanými. [2]

Dále je možné uvést práci Hilara [11], která provádí statistickou analýzu modelů tunelu Mrázovka za použití pěti hlavních veličin ovlivňujících Mohr-Coulombův model jako proměnných. Hlavním předmětem posouzení byly deformace terénu a deformace ostění. Jako další příklad je možné uvést výpočty LHS týkající se tunelu Valík nebo modelování a zkoumání stability skalních svahů. Na Fakultě stavební ČVUT v Praze se problematikou využití metody LHS dlouhodobě zabývá doc. J. Praška. Co se týče ostatních oborů, je třeba zmínit práce doc. M. Vořechovského na ústavu stavební mechaniky Stavební fakulty VUT v Brně. [5]

3 Kolektor Hlávkův most

Kolektorová síť hlavního města Prahy má velkou tradici a poměrně dlouhou historii. Přes padesát let vznikají v Praze tato technická díla a jejich celková délka je již přes 100 km. Z tohoto pohledu patří pražská kolektorová infrastruktura mezi nejlepší na světě a její existence ulehčuje v mnoha ohledech obyvatelstvu metropole život, i když většina lidí o ní ani neví. Vedení sítí v kolektoru velmi usnadňuje veškeré činnosti, které jsou kolem těchto sítí nutné, ať už jde o kontrolu jejich stavu, výměnu současného vedení, či snad o zavedení sítí nových. Díky sdruženému vedení v kolektoru je všechny tyto činnosti možno provádět přímo v něm, bez nutnosti zásahu do terénu nad ním, což je zejména v centru obrovskou výhodou. Velkým pozitivem je též neustálý dohled nad stavem sítí zde vedených, pomocí čidel a monitorů jsou tyto sítě sledovány 7 dní v týdnu, 24 hodin denně. [12]



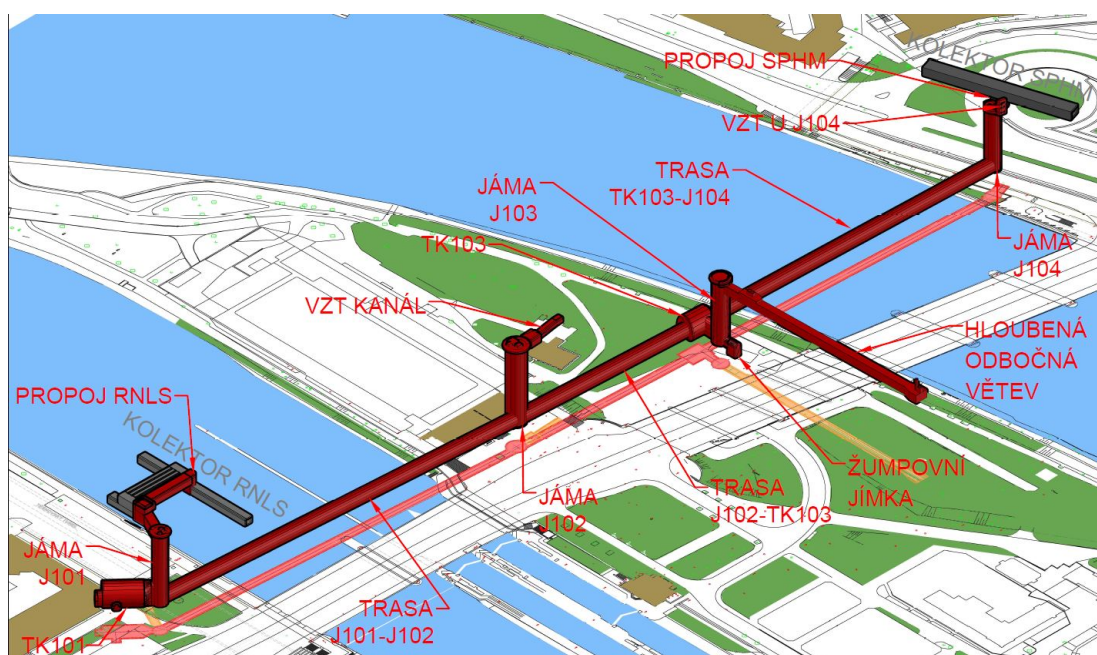
Obr. 3: Kolektorová síť v centru Prahy [12]

Návrh kolektoru Hlávkův most vznikl v návaznosti na plánovanou rekonstrukci Hlávkova mostu, která vytvořila nutnost přesunout inženýrské sítě mimo konstrukci samotného mostu. Pro možnost trvalého přesunu těchto sítí vznikl návrh nového kolektoru spojující dva stávající kolektory, kolektor RNL (Rekonstrukce nábřeží Ludvíka Svobody) a kolektor SPHM (Severní předmostí Hlávkova mostu). I přes poměrně velkou hloubku založení kolektoru byl jeho návrh po technické stránce

poměrně náročný, protože byly předpokládány velmi složité geologické podmínky, jejich značná proměnlivost a narušení přirozeného stavu lidskou činností, navíc většina ražby probíhala pod korytem řeky Vltavy. [13]

3.1 Popis stavby

Trasa hlavní části kolektoru má délku přes 430 m, začíná poblíž budovy Ministerstva zemědělství, kde navazuje na stávající kolektor RNLS, vede pod korytem Vltavy, přes ostrov Štvanice a končí na opačném břehu řeky, kde navazuje na kolektor SPHM. Tato hlavní trasa byla vedena třemi různými geologickými souvrstvími a tedy dvěma geologickými zlomy, u nichž u obou se předpokládala poloha pode dnem Vltavy a tedy velké lokální přítoky do díla. V hlavní trase leží čtyři hloubené šachty, dvě technické komory a toto vše propojují tři ražené úseky. Od hlavní kolektorové trasy na ostrově Štvanice odbočuje větev, která byla provedena jako hloubená za účelem přivedení sítí z kolektoru i na ostrov Štvanice. [13]



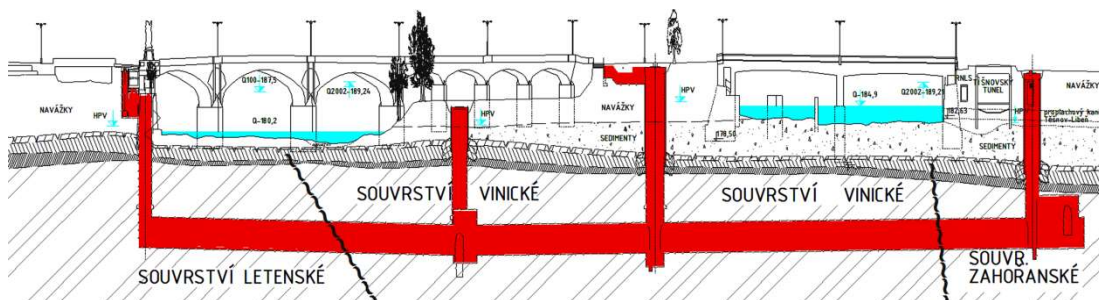
Obr. 4: 3D situace kolektoru Hlávkův most [14]

3.2 Geologické a hydrogeologické podmínky

Stavba kolektoru Hlávkův most probíhala ve velmi složitých a poměrně proměnlivých geologických podmínkách. Největší vliv na lokální poměry má erozivní a akumulární činnost řeky Vltavy a dále pak antropogenní činnost, jako terénní úpravy doprovázející stavbu nábřežní zdi nebo komunikací na obou březích i na ostrově Štvanice. [13]

Místní pokryvné útvary se skládají z fluviálních sedimentů a antropogenních navážek. Horniny skalního podkladu zde obsahují hned tři různá břidlicová souvrství, a to souvrství vinické, souvrství zahořanské a souvrství letenské. Tato souvrství se na trase nacházejí ve všech stupních zvětvování. Geologické zlomy na rozhraních souvrství znamenají pro stavbu oblast s možnými poruchami, navíc lokace obou geologických zlomů se měla nacházet pod korytem řeky Vltavy, bylo tedy možné předpokládat možnost velkých havarijních přítoků do díla. [13]

Ohledně hydrogeologických poměrů, celá trasa stavby se nalézala pod hladinou podzemní vody. V zájmovém území je možné naleznout dva vodní režimy, je zde podzemní voda v prostředí s průlinovou propustností v pokryvných sedimentech a dále pak prostředí s puklinovou propustností v horninách skalního podloží. [13]



Obr. 5: Podélný řez kolektorem Hlávkův most [14]

3.3 Provádění a technický popis

3.3.1 Ražená trasa

Z celkové délky hlavní trasy kolektoru 430,3 tm tvoří 384,3 m ražená trasa, zbytek jsou šachty a technické komory. Tato trasa začíná na holešovické straně v šachtě J104 a končí na straně těšnovské v technické komoře TK101. Profil ražené trasy má výšku 6,0 m a šířku 4,5 m, přičemž plocha profilu je 23,2 m². Mocnost skalního nadloží během ražby se pohybovala od 10,2 do 15,3 m. Pro velikost profilu bylo zvoleno jeho horizontální členění na dva dílčí výruby o výšce 3,9 a 2,1 m. Primární ostění je vyztuženo příhradovými rámy BRETEX a kari sítěmi při obou površích ostění. Samotné ostění se skládá ze stříkaného betonu C25/30. Profil je dále zajištěn pomocí svorníkové výztuže s tlakovou injektáží. Vzhledem k velmi proměnlivým podmínkám byly navrženy čtyři technologické třídy ražby, které udávaly vzdálenost výztužných ráků (0,8 až 1,2 m) a množství užívaných svorníků. Pro místa, kde byla předpokládána velká technologická náročnost (jako v místě podcházení pilíře Hlávkova mostu) byly navržena speciální opatření. [13]



Obr. 6: 3D vizualizace trasy [14]

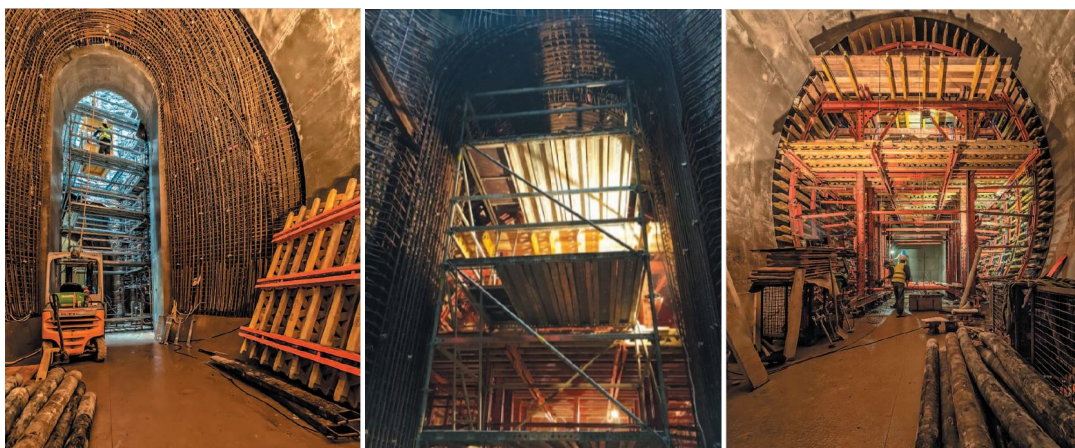


Obr. 7: Ražba pomocí razicího stroje s frézou na výložníku [15]

3.3.2 Technické komory

Technická komora TK101 představovala jednu z nejproblematičtějších částí ražby. Výška skalního nadloží zde nebyla příliš velká, pohybovala se od 4,1 do 4,7 m a navíc přímo nad komorou ve výšce 13,5 m procházely dva historické proplachovací kanály, které nesměly být ražbou ovlivněny. Zároveň má technická komora velký navržený profil, konkrétně 73,3 m². Toto vše vedlo k tomu, že ražba byla navržena pro tři různé technologické třídy, dle podmínek, počítajících ve všech případech s horizontálním i vertikálním členěním výrubu na čtyři dílčí. Pro všechny třídy byl předpokládán charakter pilotní štoly pro první dílčí výrub. [13]

Nakonec probíhala ražba v technologické třídě NRTM 4 za použití strojního rozpojování. Primární ostění bylo vyztuženo příhradovými rámy BRETEX, kari sítěmi při obou površích a radiálními svorníky typu IBO. Byl použit beton C25/30 s rychlým nárůstem pevnosti. [13]



Obr. 8 až obr. 10: Ražená technická komora TK101 – provádění primárních a definitivních konstrukcí – propoj k šachtě J101 [13]

Technická komora TK103 se nachází na ostrově Štvanice, v kontaktu s šachtou J103. Dle inženýrskogeologického průzkumu měla

ražba této komory probíhat v souvrství vinickém, reálně ale probíhala v souvrství letenském, proto byly zde využity trhačí práce, ale ražba samotná probíhala dle NRTM 4. [13]

Ražba začínala v hloubené šachtě J103, odtud byla vyražena štola po celé délce technické komory. V druhé fázi bylo zakotveno přístropí štoly a proveden druhý dílčí výrub směrem doleva. V další fázi byla dobrána kalota výrubu ve dvou dílčích fázích. Nakonec bylo dobráno dno ve dvou výškových fázích. Primární ostění bylo shodné s technickou komorou TK101, jen vzdálenost příhradových rámců se zmenšila z 1,0 m na 0,9 m. [13]

3.3.3 Hloubená trasa

Součástí projektu byla i odbočná větev, jejímž účelem bylo připojit ostrov Štvanice na inženýrské sítě vedené v kolektoru. Vzhledem k velké výšce hladiny podzemní vody na ostrově byla vedena celá větev pod její úrovní a z této skutečnosti vycházel návrh zapažení celého výkopu vodonepropustnou stěnou beraněných štětovnic. Celá jáma měla délku 100 m a většinou šířku 3,4 m, kromě koncového rozšíření. V rámci zajištění bylo použito přes 350 štětovnic a jejich průměrná délka byla 7 až 7,5 m. Většina štětovnic byla instalována klasicky pomocí autojeřábu se zavěšeným vibroberanidlem. Tento způsob ale nebyl možný pod klenbou Hlávkova mostu. Zde bylo pro malou volnou výšku použito vibroberanidlo s bočním úchopem, přičemž nejprve byl proveden kontrolní pokus, zda tato technologie neovlivní negativně konstrukci mostu. Žádné ovlivnění nebylo zjištěno. [13]



Obr. 11: Odbočná větev – provádění výkopů [13]



Obr. 12: Odbočná větev – armování definitivního ostění [13]

Při prohlubování výkopu byla stavební jáma rozepřena pomocí rozpěrných rámců. Po dokončení prohlubovacích prací byly tyto rozpěry demontovány vždy v návaznosti na provádění podkladních betonů, izolací a nakonec definitivních konstrukcí odbočné větve. Konečné světlé rozměry této větve jsou po většinu trasy 2,4 x 2,7 m. Kromě štětovnic v čele větve byly všechny ponechány v zemi jako trvalá ochrana. [13]

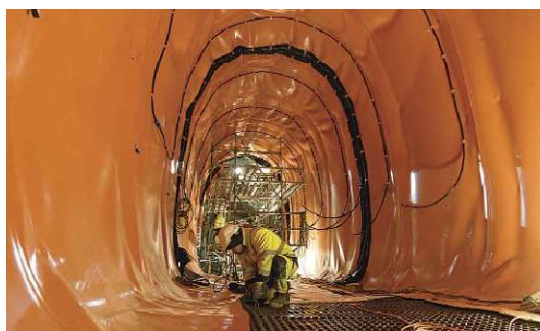
3.3.4 Hloubené šachty

Všechny šachty, mimo šachtu J104, jsou šachty kruhové o průměru od 6,1 do 8,2 m. Jejich hloubka byla od 29,4 do 37,9 m. Šachta J104 má profil elipsovitý, s délkami os 6,4 a 5,7 m a její délka je 32,2 m. Postup výstavby vždy začínal předvýkopem pro ověření existence sítí. Odtud byly vedeny vodící zídky pro piloty. Piloty byly převrtávané, přičemž primární piloty byly nevyztužené, piloty sekundární obsahovaly armokoš. U všech pilot bylo nutné splnit, aby jejich délka zasahovala alespoň 1,0 m do horizontu navětralých břidlic. [13]

Po realizaci pilot byly šachty postupně odtěžovány a současně bylo prováděno primární ostění ze stříkaného betonu C25/30. Tento beton byl vyztužen kari sítěmi a příhradovými výztužnými rámy. Následné rozrážky ze šachet bylo vždy nutné zajistit další vrstvou stříkaného betonu, kari sítěmi a svorníkovou výztuží s tlakovou injektáží. [13]

3.4 Definitivní konstrukce

Návrh definitivních konstrukcí ostění kolektorové trasy, šachet i technických komor byl od začátku dimenzován na velkou zátěž vodním sloupcem, jako mimořádná návrhová situace byly uvažovány povodně z roku 2002, které určovaly výšku vodního sloupce nad trasou přes 35 m. Proto bylo definitivní ostění navrženo z vodonepropustného monolitického betonu C30/37 pro třídy agresivity prostředí XC2 a XA2. [13]



Obr. 13: Ražená kolektorová trasa s mezilehlou izolací [16]



Obr. 14: Šachta J104 s instalovanými spárovými pásy a mezilehlou izolací [13]

Protože během ražby a provádění primárních konstrukcí byly zaznamenány na mnoha místech masivní přítoky a průsaky vody do díla, byl na konci této výstavby realizován pasport zaznamenávající veškeré průsaky a lokální masivní přítoky. Tento pasport po vyhodnocení vedl k úpravě, konkrétně k sanačním pracím, injektážím primárního ostění mikrocementem nebo chemickou injektáží, dále byla provedena organizace svodů vody do drenáže pod primárním ostěním a v místech

s velkými plošnými průsaky byly provedeny plošné izolace. Nakonec byly na trase oblasti s kompletním hydroizolačním systémem a oblasti bez hydroizolačního systému, v závislosti na lokálních podmínkách. [13]

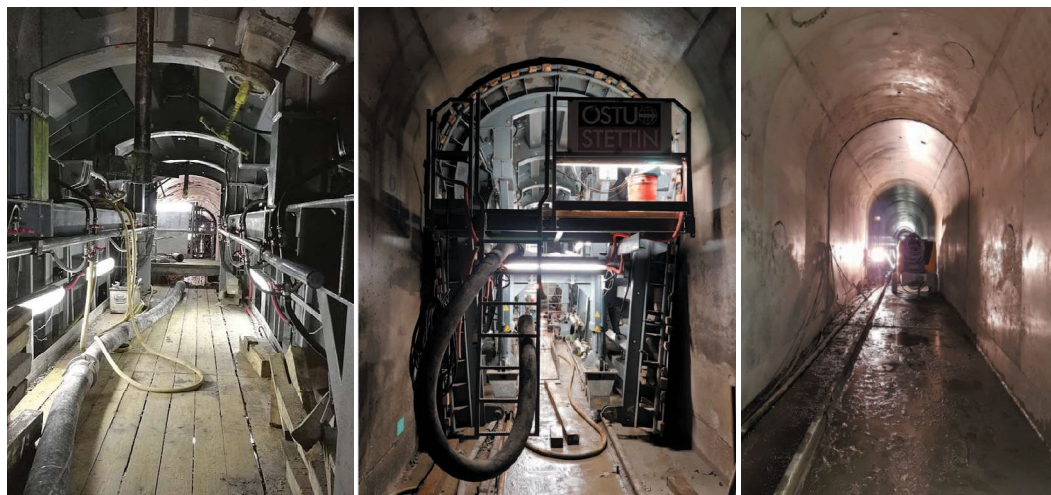
Pro případ, že by se i přes provedená opatření do stavby dostala průsaková voda, jsou zde navrženy gravitační svody pomocí žlábků v podlaze kolektoru, svádějící veškerou vodu do centrální čerpací jímky umístěné ve dně šachty J102. Odtud je voda přečerpávána pomocí ponorných kalových čerpadel do řeky Vltavy. [14]

3.5 Inovativní metody použité při stavbě

Jak již bylo řečeno, stavba kolektoru Hlávkův most probíhala ve velmi obtížných podmínkách a samotná konstrukce musí odolávat velkému namáhání, zejména vysokým vodním sloupcem. Tato skutečnost v kombinaci s požadovanou dlouhou životností inženýrských konstrukcí vyústila v používání nových technologií provádění, jako jsou hydraulická bednicí forma a kontinuální betonáž šachet. [13]

3.5.1 Automatická bednicí forma

Pro realizaci definitivního ostění kolektoru byla prvně u nás využita hydraulická bednicí forma na kolektoru. Použití této technologie bývá náročné pro malé profily, které navíc v průběhu trasy mění svoji velikost a bývají narušeny rozrážkami a útvary tryskové injektáže. Díky použití stříkaného betonu pro primární ostění trasy, bylo snazší nasazení této technologie. Dále byla zohledněna poměrně velká délka kolektoru a výhoda, že veškeré výškové a směrové změny se odehrávaly v šachtách. [16]



Obr. 15: Pohled do automatické bednicí formy [16]

Obr. 16 (uprostřed): Pohled do automatické bednicí formy [13]

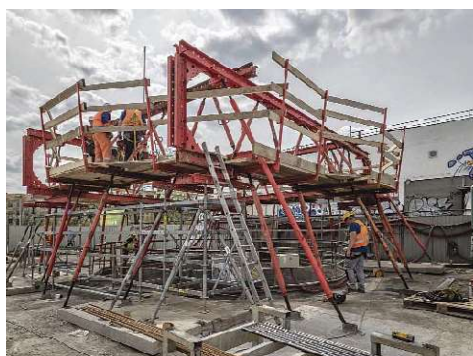
Obr. 17 (vpravo): Pohled na definitivní konstrukci po odbednění [13]

Betonáž definitivních konstrukcí probíhala pro shodně dlouhé úseky oddělené pracovními spárami tak, aby se co nejvíce urychlil postup prací. Tato betonáž začínala spodní klenbou profilu (pracovní spáry ve vzdálenosti 20 m), následně se navázalo horní klenbou, včetně svislých částí profilu (pracovní spáry po 8 m). Žádná pracovní spára nesměla být průběžná po celé výšce profilu. Dilatační spáry byly prováděny vždy u technických komor a u šachet. Pro každý úsek trasy byly typicky 8 m dlouhé úseky doplněny jedním jiné délky, aby se dodržela délka daného úseku trasy. [16]

Automatická forma byla vyrobena rakouskou firmou specializující se na výrobu forem tohoto typu. Samotná forma je z oceli, její délka je 8 m a pohybuje se pomocí elektrického vozíku. Pohyb vozíku probíhá pomocí ocelových kol s nákolkem po kolejnicích S49. Vozík má délka 9 m, kromě toho, že nese ocelovou obálku formy, tak obsahuje i hydraulické ústrojí umožňující její fungování, veškeré výztuhy, rozpěry a příslušenství, ovladače, plošinu a dva žebříky pro pohyb osob. Součástí příslušenství mimo jiné bylo dvacet šest příložných vibrátorů, šest uzavíratelných betonážních oken a tři trubky vedoucí do klenby, pomocí kterých probíhala kontrola zaplněnosti. [16]

3.5.2 Kontinuální betonáž šachet

Kontinuální betonáž šachet probíhala za využití u nás doposud nepoužité technologie hydraulicky tažené zavěšené armovací plošiny. Byly realizovány čtyři podpěrné věže na povrchu a následně mezi nimi vytvořena tuhá prostorová konstrukce. Pomocí čtyř hydraulických válců na povrchu byla konstrukce postupně spouštěna. Armování i následná betonáž byly prováděny z instalované plošiny, což je postup v ČR nestandardní, ale velmi bezpečný a vhodný. Tento typ provádění je ohledně financí nákladnější, než přístup klasický, ale má dvě velká pozitiva, a sice o 40 % větší rychlost provádění, konkrétně 5,45 m/den a zároveň celé dílo je provedeno bez pracovních spár, což značně eliminuje místa možných pozdějších závad. [13]



Obr. 18: Tuhá prostorová konstrukce [16]



Obr. 19: Pohled na definitivní konstrukci šachty [13]

4 Geologické a hydrogeologické poměry

4.1 Inženýrskogeologický průzkum – průzkumné práce

Podrobný inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum pro stavbu č. 8615 „Kolektor Hlávkův most“ byl proveden firmou PUDIS a.s. na žádost Magistrátu hlavního města Prahy.

V rámci průzkumu byly zhodnoceny archivní průzkumné práce a provedeny dva nové průzkumné vrty o délce 25,0 m a 20,5 m. Tyto vrty byly realizovány v korytě řeky Vltavy z ukotveného pontonu. Provádění těchto vrtů bylo ztíženo povodněmi v roce 2006. Průzkumné práce z pontonu byly prováděny pomocí pojízdné soupravy UGB 1VS Gaz 66 bez použití výplachu. [17]

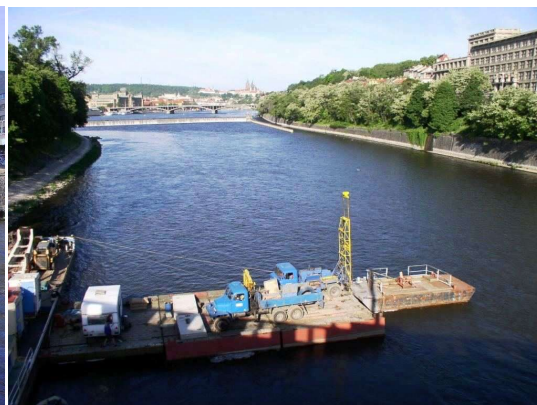
Tab. 2: Nové průzkumné vrty [17]

č. vrtu	hl. vrtu v m	hladina Vltavy - n.m. v.	ústí vrtu-dno Vltavy n m.v. – hloubka v m	zastižené horniny skalního podkladu
J 2	25,0	185,00	181,80 - 3,20	souvrvství vinické
J 5	20,5	180,38	177,88 – 2,50	souvrvství vinické - letenské

V rámci projektu byly uvažovány i další průzkumné vrty, ale vzhledem k tomu, že nebyl udělen vstup na dotčené pozemky, byly nakonec realizovány pouze tyto dva. Tyto nové vrty byly doplněny podrobným průzkumem archivních prací v dotčené oblasti. [17]



Obr. 20: Vrtná souprava – pohled ze Štvanice [17]



Obr. 21: Vrtná souprava – pohled z Hlávkova mostu [17]

Dále byl v rámci průzkumu realizován detailní průzkum reliéfu dna Vltavy pomocí geofyzikální metody využívající georadar. Taktéž byl proveden hydrogeologický průzkum k ověření vlivu realizace stavby na režim podzemních vod, případných přítoků do díla a stanovení

havarijních přítoků potřebných pro návrh čerpací stanice a žumpovních chodeb. [17]

4.2 Geologické poměry

4.2.1 Přehled geomorfologického vývoje

Z geomorfologického hlediska leží zájmové území v Pražské kotlině, předkvartérní podloží zde tvoří ordovické břidlice různého stupně porušení a toto podloží pokrývají fluviální sedimenty vltavské údolní terasy. Nejsvrchnější vrstvu tvoří antropogenní navážky. [18]

Místní morfologické poměry jsou hlavně výsledkem erozně akumulární činnosti řeky Vltavy. Údolí řeky bylo tvořeno do jeho současné podoby zejména v obdobích pleistocénu a holocénu. Říční koryto se postupně zahlubovalo do skalního podloží. Toto podloží, zvláště jeho část tvořená ordovickými horninami, vykazovalo značnou tektonickou porušenost, zvrásněnost a poměrně velkou proměnlivost pevnosti a odolnosti vůči zvětrávání danou pestrostí petrografického složení. Tato skutečnost výrazně ovlivnila vývoj a výsledný tvar koryta řeky, mnohokrát je zde možné pozorovat znaky selektivní eroze, koryto je zahloubeno v měkčích horninách, zatímco březní partie jsou tvořeny horninami mnohem odolnějšími vůči erozi. Výsledkem těchto procesů a výrazné akumulární činnosti Vltavy hromadící v zájmovém území fluviální sedimenty jsou typické terasovité stupně charakteristické pro pražskou kotlinu. [17]

Pro nejmladší vývoj území měla největší vliv činnost člověka, zejména pak stavební úpravy, výměna původních zemin a úprava toku řeky Vltavy co do směru i do průtoku. [19]



Obr.22 : Výstavba plavební komory [19]

4.2.2 Místní geologické poměry

Zpráva z podrobného inženýrskogeologického průzkumu charakterizuje místní geologické poměry jako poměrně složité a značně proměnlivé. Tato skutečnost je na jedné straně zapříčiněna velkým vlivem erozivní a akumulární činnosti řeky Vltavy a na straně druhé lidskou činností v zájmovém území. Dále zde hraje roli i lokální odolnost předkvartérního podkladu vůči erozi a denudaci. [17]

Obecně lze říci, že zde na zvětralém ordovickém skalním podloží leží fluviální sedimenty a antropogenní navážky.

Pokryvné útvary – kvartér

Navážky – tvoří nejsvrchnější vrstvu a nalézají se prakticky v celém dotčeném území, včetně dna řeky. Jejich mocnost i charakter jsou značně proměnlivé. Převládá zde štěrk špatně zrněný, hrubý (velikost 5 až 30 cm), případně s příměsí jemnozrné zeminy, dále pak písek se štěrkem. Lokálně je zde možné nalézt škváru, kameny a valouny různé velikosti, opuku, cihly a stavební suť. [17]

Fluviální sedimenty řeky Vltavy – zájmové území se nachází v oblasti nižší akumulace údolní terasy, někdy označované jako maninská terasa. Mocnost této vrstvy je též značně proměnlivá a to v závislosti na lokálním vlivu antropogenních navážek. Sedimenty v této oblasti je možné rozdělit do dvou skupin:

- hrubozrné písky (lokálně s jemnozrnou vložkou) a písky s příměsí jemnozrné zeminy – hlavně středně ulehlé valouny velikosti 3 až 5 cm, maximálně pak 15 cm
 - dle ČSN 73 1001: S2 symbol SP – písek špatně zrněný, symbol S-F – písek s příměsí jemnozrné zeminy
 - mocnost: 1,0 až 2,0 m [17]
- štěrk špatně zrněný, hrubý, někde štěrk s příměsí jemnozrné zeminy – hlavně dobře opracované valouny křemene a křemence – zrna 5 až 8 cm, maximálně 30 cm, charakter vrstvy je ulehlý
 - dle ČSN 73 1001 symbol G 2 – štěrk špatně zrněný, symbol GP a G 3 – štěrk s příměsí jemnozrné zeminy, symbol G – F – štěrk s příměsí jemnozrné zeminy
 - mocnost: 3,0 až 7,0 m [17]

Horniny skalního podloží – sv. ordovik, Beroun

V území, kde měla stavba probíhat, byly zjištěny hned tři souvrství vyskytující se ve skalním podkladu a to souvrství letenské, vinické a zahořanské.

Souvrství letenské – staničení 0,0 m až 160,0 m – souvrství bylo charakterizováno jako prachovité a písčité s písčitými závalky s vložkami křemenných pískovců a křemenců. Břidlice byly shledány jemně až hrubě slídnatými a tlustě deskovitě až lavicovitě vrstevnatými (od 6 – do 40 cm). Často se zde vyskytovaly polohy pevných jemnozrnných křemenců, deskovitě odlučných. Břidlice byla na stycích s křemenci deformována a rozdrčena na střípky s jílovitou výplní do vzdálenosti až 3 cm. [17]

Letenské jsou velmi tvrdé a houževnaté, tvoří nejpevnější horniny v trase kolektoru a jejich rozpojování bývá velmi obtížné, zejména v úzkých prostorách. Někdy bývá nutné použít pneumatické nářadí, případně trhaviny. [20]

Souvrství vinické – staničení 160,0 m až 430,0 m – černé jemně a hrubě slídnaté jílovité břidlice s určitým podílem křemenného prachu, převážně tence vrstevnaté. [17] Jedná se o břidlice poměrně měkké, snadno podléhající porušení, zvětrávání a denudaci. Jedná se o nejstlačitelnější horninu pražského skalního podkladu a její rozpojování obvykle nebývá příliš náročné. [20]

Souvrství zahořanské – staničení 430,0 m až 550,0 m – skládá se z prachovitých břidlic, hrubě slídnatých, prachovců a písčitých prachovců s proměnlivým obsahem pelokarbonátů. Vyskytují se zde také vložky vápnatých pískovců až písčitých vápenců a pelokarbonátové konkrece. Vlastnosti tohoto souvrství byly velmi proměnlivé a bylo třeba je hodnotit individuálně. [17]

Rozdělení hornin dle stupně zvětrávání

břidlice W5 – břidlice rozložená – jedná se o soudržnou zeminu, kterou by bylo možné charakterizovat jako jíl, hlínu, případně písčitou hlínu, přičemž písčitou frakci tvoří vlastně střípky původní břidlice, nebo hlíny se štěrkem, kde hrubou frakci opět tvoří původní hornina. Hlavní část této vrstvy tvoří jílové minerály, které pocházejí z původní břidlice anebo se vykrystalizovali z roztoků, které prováděly procesy zvětrávání. [18]

břidlice W4 – břidlice silně zvětralé – tato vrstva se velmi blíží mechanickými vlastnostmi nesoudržným zeminám, než horninám. Nalézají se zde velké množství střípků a úlomků původní horniny. Jejich velikost je od 0,5 cm do 5 cm. Prostor mezi jednotlivými úlomky je vyplněn jílovitými minerály vzniklými při zvětrávání. Vinou intenzivních procesů zvětrávání a chemických procesů, které ho provázejí, byly méně stabilní minerály rozloženy a ty stabilnější mají narušenou krystalovou mřížku a jsou pokryty vysráženými oxidy železa. V důsledku těchto procesů došlo ke značné degradaci mechanických vlastností horniny,

během průzkumu bylo možné jednotlivé úlomky lámat v ruce, tak nízká byla jejich pevnost. [17]

břidlice W3 – břidlice mírně zvětralé – i tato vrstva se stále blíží vlastnostmi více nesoudržným zeminám, než horninám, ale dochází zde ke zvětšení průměrné velikosti úlomků horniny, jejichž velikost je 2 až 6 cm. Vzhledem k výrazné vrstevnatosti původní horniny mají tyto úlomky převážně zploštělý tvar. Lokálně lze nalézt jílovité minerály vzniklé zvětráváním jako výplň mezi jednotlivými úlomky. I zde je výrazné zbarvení oxidy železa. S rostoucí hloubkou roste i velikost úlomků na 3 až 8 cm. [18]

břidlice W2 – břidlice navětralé – tato vrstva lze zařadit, co se mechanických vlastností týče, k poloskalním horninám. Úlomky z vyšších vrstev přechází v kusy horniny, jejichž části mají velikost od 8 do 12 cm. Ve vyšší části je možné nalézt zbarvení hydroxidem železa, ale kusy horniny samotné jsou již neporušeny na makroskopické úrovni. Stále zde ale proběhly chemické reakce, které způsobily částečné narušení krystalové struktury. [17]

břidlice W1 – břidlice zdravé – tato vrstva je tvořena zdravou horninou beze stop zvětrávání [18]



Obr. 23: Vrt J5 – hloubka 0 až 11 m [17]



Obr. 24: Vrt J5 – hloubka 8 až 20,5 m [17]

4.3 Hydrogeologické poměry

Obecně se v zájmovém území nachází dva hlavní typy prostředí, horniny skalního podkladu se chovají jako prostředí s puklinovou propustností a pokryvné útvary naopak jako prostředí s průlinovou propustností. [17]

4.3.1 Podzemní voda v pokryvných útvarech

Fluviální sedimenty se v místě chovají jako vysoce průlinově propustný kolektor, což se týká zejména místních bazálních štěrků. Zvodeň má zde volnou hladinu a místní mírný hydraulický spád je v podstatě shodný s tvarem reliéfu, který zde neobsahuje žádné zřetelnější skoky. Výška hladiny podzemní vody je velmi závislá na okolních vlivech, konkrétně na postavení jezu u ostrova Štvanice a na stavu vody v okolních propustcích a kanálech, v obdobích s nižším průtokem v řece Vltavě bude klesat i HPV, naopak v době růstu hladiny poroste i HPV. [17]

Vzhledem k velmi dobré propustnosti fluviálních sedimentů byla předpokládána poměrně velká vydatnost studen, 5 až 15 l/s. Taková vydatnost představovala problém pro snižování hladiny podzemní vody. Vydatnější čerpání podzemní vody navíc nebylo možné, protože by mohlo způsobit vyplavování jemných částic a následné deformační kolapsy okolí. [17]

Vzhledem k tomu, že místní podzemní voda nemá původ pouze v řece Vltavě, ale dochází k dotaci i z okolního prostředí, hlavně antropogenních navážek, bylo předpokládáno ovlivnění okolní agresivity. Místní podzemní voda byla tedy předpokládána jako převážně mírně agresivní na betonové konstrukce. [17]

4.3.2 Podzemní voda v horninách skalního podkladu

V horninách skalního podloží se nalézalo prostředí s průlinovou propustností, což platilo pro souvrství letenské, vinické i zahořanské. Břidlice každého z těchto souvrství jsou prakticky nepropustné, ale toto platí pouze ve stavu, kdy nejsou porušeny diskontinuitami nebo zvětráváním. V povrchových vrstvách břidlic, kde jsou horniny masivně porušeny zvětráváním, dochází vlivem husté sítě drobných trhlin k vytvoření téměř souvislé hladiny podzemní vody. Vrstvy ve větší hloubce lze považovat za prakticky nepropustné, voda se sem dostane pouze v místech poruch. [18]

4.3.3 Předpokládané přítoky podzemní vody do díla

Stanovení předpokládaných přítoků do díla vycházelo z ražby průzkumné štoly v blízkosti Troje, která probíhala pod korytem Vltavy ve velmi podobných geologických a hydrogeologických podmínkách. Z monitoringu, který probíhal během provádění štoly, bylo odvozeno, že při ražbě kolektoru Hlávkův most je možné předpokládat normální přítok

do díla $Q = 12,3$ l/s. Průměrný specifický přítok byl stanoven 0,03 l/s na metr raženého díla. [17]

Tento předpoklad neplatí v místech rozsáhlejších tektonických poruch, zde byl předpokládán lokální přítok až 20 l/s. V úsecích vedených pod korytem řeky byla navržena opatření skládající se z horizontálních kontrolních předvrtů a v případě nutnosti instalace mikropilotového deštníku a případné injektážní sanace. V případě kolapsu mohl havarijný přítok dosáhnout velikosti 50 až 80 l/s. [17]

Pro výstavbu šachet bylo doporučeno opatření skládající se ze zabezpečení stavebních jam stěnami, které by byly vetknuty do skalního podkladu. Toto opatření vycházelo z existence masivní zvodně ve fluviálních sedimentech, která měla mít značnou vydatnost. [17]

4.4 Geotechnické zkoušky

4.4.1 Úkol a rozsah zkoušek

Úkolem laboratorních zkoušek během inženýrskogeologického průzkumu bylo zjistit základní fyzikální a mechanické vlastnosti zemin a hornin zastižených v zájmovém území stavby. Mezi tyto vlastnosti patřily zejména pevnost hornin v tlaku, jejich modul přetvárnosti a přirozená vlhkost. [17]

Pro tyto účely bylo odebráno osm vzorků hornin a dva vzorky zemin. Byly provedeny dvě indexové zkoušky zemin, čtyřicet jedna indexových zkoušek vlastností hornin a patnáct určení mechanických vlastností hornin. [17]

4.4.2 Použité metody

Všechny metody použité při určování vlastností hornin a zemin během průzkumu byly v souladu s platnými technickými normami a to zejména ČSN 72 1012 (zkoušky přirozené vlhkosti, ČSN 72 1013 a 73 1014 (zkoušky určující meze tekutosti a plasticity a číslo plasticity) a OM 44 1111 (zkoušky pevnosti v prostém tlaku. Modul přetvárnosti byl zjišťován z přímkové části přetvárného diagramu deformační zatěžovací zkoušky, který již nebyl ovlivněn rychlým nárůstem deformací na začátku zkoušky (vliv pórů a dutin). Modul byl určen tak, aby jeho velikost byla co největší (odpovídá maximální hodnotě směrnice přetvárného diagramu). [17]

4.4.3 Výsledky zkoušek a jejich posouzení

4.4.3.1 Základní fyzikální vlastnosti zemin

Základní zatížení testovaných zemin:

Fluviální sedimenty údolní terasy u vzorku z vrtu J2 – hloubky 2,5 až 3,0 m jsou zatříděny jako **G2** a klasifikovány jako **GP – štěrk špatně zrněný**. [17]

Eluvium jílovité břidlice vinického souvrství u vzorku z vrtu J5 – hloubky 0,5 až 0,7 m jsou zatříděny jako **G5** a klasifikovány jako **GC – štěrk jílovitý**. [17]

4.4.3.2 Pevnost v prostém tlaku a stlačitelnost hornin

Během zkoušek hornin byla pevnost v prostém tlaku určována na válcových tělesech o průměru i výšce přibližně 60 mm. Dále na upravených úlomcích vrtného jádra byl stanoven index pevnosti při bodovém zatížení a předem stanovená korelace výsledku k pevnosti v tlaku. [17]

Vinické souvrství – břidlice jílovitá, zdravá (vrt J2 – dva vzorky sedm zkoušek pevnosti a stlačitelnosti)

objemová hmotnost	ρ	=	2616 – 2683 (\emptyset 2657)	kg . m ⁻³
pevnost v prostém tlaku	σ_c	=	27,8 – 43,3 (\emptyset 35,4)	MPa
modul přetvárnosti	E_{def}	=	5112 – 8984 (\emptyset 6907)	MPa
modulový poměr	E_{def}/σ_c	=	184 – 207 (\emptyset 194)	MPa

Zatřídění R3 – hornina střední pevnosti

Vinické souvrství – prachovce vápnité až vápence prachovité, zdravé (vrt J2 – dva vzorky a osm zkoušek pevnosti a stlačitelnosti)

objemová hmotnost	ρ	=	2632 – 2709 (\emptyset 2670)	kg . m ⁻³
pevnost v prostém tlaku	σ_c	=	38,5 – 107 (\emptyset 59,9)	MPa
modul přetvárnosti	E_{def}	=	7154 – 27316 (\emptyset 12530)	MPa
modulový poměr	E_{def}/σ_c	=	186 – 256 (\emptyset 202)	MPa

Zatřídění R3 až R2 – hornina se střední až vysokou pevností

Vinické souvrství – břidlice prachojílovitá, zdravá, slabě tektonicky porušená (vrt J5 – hloubka 8,0 až 9,0 m, pět zkoušek indexu pevnosti)

odvozená pev. v prost. tl.	σ_c	=	6,3 – 10,6 (\emptyset 8,7)	MPa
----------------------------	------------	---	-------------------------------	-----

Zatřídění R4 – hornina s nízkou pevností

Letenské souvrství – pískovec až prachovec zdravý (vrt J5 – hloubka 19,5 až 20,5 m, šest zkoušek pevnosti)

objemová hmotnost	ρ	=	2632 – 2684 (\emptyset 2658)	kg . m ⁻³
pevnost v prostém tlaku	σ_c	=	38,5 – 108 (\emptyset 71,0)	MPa

Zatřídění R2 – hornina s vysokou pevností

Letenské souvrství – břidlice písčité se závalky pískovce, zdravá (vrt J5 – hloubka 15,0 až 16,0 m, deset zkoušek indexu pevnosti)

odvozená pev. v prost. tl. $\sigma_c = 37,6 - 63,8$ (Ø 52,8) MPa

Zatřídění R3 až R2 – hornina se střední až vysokou pevností [17]

4.5 Geotechnické posouzení

4.5.1 Geotechnické charakteristiky zemin a hornin

Vlastnosti hornin a zemin získané ze zkoušek z realizovaných průzkumných vrtů byly doplněny o informace z prací archivních v zájmovém území. Z informací takto získaných byly doporučeny vlastnosti pro výpočty týkající se návrhu kolektoru (viz tab. 3 a tab. 4). Při tom bylo doporučeno, aby horninové prostředí a jemu odpovídající charakteristiky, byl brány jako kvazihomogenní prostředí, tedy že jeho vlastnosti se budou spolu s narůstající hloubkou zlepšovat. Tato závislost je dána snižováním vlivu zvětrávání a množství rozpukání spolu s rostoucí hloubkou. [17]

Tab. 3: Doporučené geotechnické charakteristiky zemin pokryvných útvarů – Kolektor Hlávkův most [17]

stratigrafické zařazení	symbol horizontu	geografická charakteristika	objemová tíha v přirozeném uložení γ [kN.m ⁻³]	součinitel filtrace k_f [m.s ⁻¹]	Přetvárné parametry			Smyk. pevnost		ČSN 73 1001		třída těžitelnosti ČSN 73 3050	vrtatelnost podle ceníku 800-2	
					modul přetvárnosti E_{def} [MPa]	modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [-]	soudržnost c_{ef} [kPa]	úhel vnitřního tření Φ_{ef} [°]	třída	výpočtová únosnost R_{dt} [kPa]			
RECENT	navážky	AN	různorodé navážky, místy s příměsí cihel, škváry a betonu	19,0-21,0	10^{-6} - 10^{-5}	4-15	10-30	0,40-0,37	5-15	28-20	Y		2-3	I - II
KVARTÉR plestiocén	fluviální sedimenty	FL	písky a písky slabě hlinité/jílovité, s valouny, středně ulehle	20,5	10^{-5} - 10^{-4}	25	50	0,34	0	34	S3, S2	300	3	I - II
		FL	hrubé štěrky s písčitou příměsí	22,0	10^{-4} - 10^{-3}	60	120	0,32	0	38	G3, G2	500	4	II - III

Tab. 4: Doporučené geotechnické charakteristiky hornin skalního podloží – Kolektor Hlávčův most [17]

stratigrafický útvar a genetický komplex		symbol stupně zvětvávání	geografická charakteristika	úroveň	součinitel filtrace k_f [m.s ⁻¹]	objemová tíha v přirozeném uložení γ [kN.m ⁻³]	Přetvárné parametry			Smyk. pevnost		pevnost v tlaku horninové hmoty σ_c [MPa]	ČSN 73 1001		třída těžitelnosti ČSN 73 3050	vrtatelnost podle ceníku 800- 2
							modul přetvárnosti E_{der} [MPa]	modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [-]	soudržnost c_{gr} [kPa]	úhel vnitřního tření Φ_{gr} [°]		třída	vypočítaná únosnost R_{gr} [kPa]		
PALEOZOIKUM ordovik, souvrství letenské LTN	břidlice prachovitá a písečná s vložkami pískovce a křemence	W5	zcela zvětralé (rozložené)	povrch	10^{-8}	20,5	8	20	0,40	25	21	<0,5	F5, R6	225	3	I - II
				báze	10^{-7}	22,0	25	50	0,37	15	24	0,5-0,3	R6, R5	300		
		W4/W3	zvětralé	povrch	10^{-7}	22,0	25	50	0,37	15	24	0,5-3,0	R6, R5	300	3 - 4	II - III
				báze	10^{-6}	24,0	100	200	0,34	25	28	3,0-10	R5, R4	450		
W2	navětralé	povrch	10^{-6}	24,0	100	200	0,34	25	28	3,0-10	R5, R4	450	4 - 5	III - IV		
		báze	10^{-7}	25,5	300	600	0,31	60	33	10-30	R4, R3	700				
W1	zdravé	povrch	10^{-7}	25,5	300	600	0,31	60	33	10-30	R4-R3	700	5 - 6	IV - V		
		5,0 m	10^{-8}	26,0	400	800	0,28	100	36	30-50	R3	900				
15,0 m			10^{-8}	26,5	500	900	0,25	150	38	>50	R3, R2	1200				
PALEOZOIKUM ordovik, souvrství vinické VNC	břidlice prachovito- jílovitá	W5	zcela zvětralé (rozložené)	povrch	10^{-9}	21,0	8	20	0,42	30	19	<0,5	F5, R6	200	3	I
				báze	10^{-8}	22,0	20	40	0,38	20	22	0,5-2,0	R6, R5	250		
		W4/W3	zvětralé	povrch	10^{-8}	22,0	20	40	0,38	20	22	0,5-2,0	R6, R5	250	3 - 4	II
				báze	10^{-7}	24,0	60	120	0,36	25	26	2,0-8,0	R5, R4	350		
W2	navětralé	povrch	10^{-7}	24,0	60	120	0,36	25	26	2,0-8,0	R5, R4	350	4 - 5	III		
		báze	10^{-7}	25,5	150	300	0,33	50	30	8,0-15	R4	500				
W1	zdravé	povrch	10^{-7}	25,5	150	300	0,33	50	30	8,0-15	R4	500	5	IV		
		5,0 m	10^{-8}	26,0	200	400	0,30	75	33	15-35	R3	600				
15,0 m			10^{-9}	26,5	350	600	0,28	100	35	35-50	R3	900				
PALEOZOIKUM ordovik, souvrství zahořanské ZHR	břidlice prachovitá s vložkami vátnitého prachovce	W5	zcela zvětralé (rozložené)	povrch	10^{-9}	21,0	8	20	0,40	30	20	<0,5	F5, R6	200	3	I
				báze	10^{-8}	22,0	20	40	0,38	20	23	0,5-2,0	R6, R5	275		
		W4/W3	zvětralé	povrch	10^{-8}	22,0	20	40	0,38	20	23	0,5-2,0	R6, R5	275	4	II
				báze	10^{-7}	24,0	75	150	0,35	25	27	2,0-8,0	R5, R4	400		
W2	navětralé	povrch	10^{-7}	24,0	75	150	0,35	25	27	2,0-8,0	R5, R4	400	4 - 5	III		
		báze	10^{-7}	25,5	200	400	0,32	50	32	8,0-20	R4, R3	600				
W1	zdravé	povrch	10^{-7}	25,5	200	400	0,32	50	32	8,0-20	R4, R3	600	5	IV		
		5,0 m	10^{-8}	26,0	300	600	0,29	80	35	20-40	R3	800				
15,0 m			10^{-9}	26,5	400	750	0,27	120	37	40-50	R3	1000				

4.5.2 Technologické vlastnosti vytěženého materiálu

Dle průzkumu bylo zjištěno, že s výjimkou štěrkopísčitých fluviálních sedimentů a případně rozsáhlejších oblastí z pevných vložek prachovců v břidlicích je materiál pro náročnější využití nevhodný. Vzhledem k tomu, že tento materiál bude mít ale masivní množství převahu, bylo doporučeno využití i pro tyto materiály, jako materiál pro terénní úpravy pod zelenými plochami s nízkou náročností pro tvarovou stabilitu, zásypy rýh pod zelenými plochami, dočasné terénní úpravy nebo protihlukové valy, pokud to není v rozporu s nutnou mírou zhutnění. [17]

4.6 Závěrečné inženýrskogeologické zhodnocení

Průzkum doporučil snížení původní nivelety kolektoru tak, aby byl možný vznik přirozené horninové klenby v celé trase kolektoru. Dále bylo doporučeno využít pro realizaci Novou rakouskou tunelovací metodu v různých technologických třídách (NRTM 3, 4, 5a a 5b). Veškeré postoupy byly uzpůsobeny ražbě pod korytem řeky Vltavy. Dále měly tyto třídy vycházet ze tříd ražnosti dle zatřídění průzkumu. [17]

Vzhledem k obtížné rozpojitelosti břidlic souvrství letenského byla předpokládána v posouzení nutnost použití trhacích prací. Vzhledem k vysokému počtu křemencových zrn a velké abrazivnosti by bylo použití strojní techniky nevhodné. Proto bylo doporučeno posouzení vlivu případných trhacích prací na přilehlé objekty. [17]

Bylo označeno za nutné provádět během realizace komplexní geotechnický monitoring v podzemí i na povrchu a to v celé zóně ovlivnění ražbou. Nutným byl shledán pasport všech dotčených objektů. Mezi další doporučená měření monitoringu patřily například měření konvergence výrubu, měření deformací povrchu v zájmovém území nebo měření pevnosti stříkaného betonu. [17]

Ohledně bezpečnosti práce během ražby pod vodním tokem byly doporučeny konzultace postupu s Českým báňským úřadem. Dále byly shledány vhodnými bezpečnostní horizontální jádrové předvrty, zejména v místech porušení masivu a v místech s přítokem do díla. S takovými předvrty byly pozitivní zkušenosti během ražby tunelu Blanka pod vodním tokem, kde zafungovaly jako vhodná drenáž, což zlepšovalo stabilitu masivu i podmínky pro práci. [17]

Ražba kolektoru Hlávkův most byla shledána náročnou stavbou ve složitých geotechnických podmínkách a tedy zařazena do třetí

geotechnické kategorie a to zejména pro existenci zvodnělých štěrků v nadloží, nutnost trhacích prací v letenských břidlicích, očekávané nutnosti sanace nadloží v místech značných poruch a pro vysoké očekávané přítoky do díla, až $20 \text{ l}\cdot\text{sec}^{-1}$, v případě propojení se zvodnělými štěrky až $80 \text{ l}\cdot\text{sec}^{-1}$. [17]

5 Výpočet parametrů pro metodu LHS

Vstupní parametry pro posouzení řezu kolektoru na staničení 220,50 m pro numerický model byly zpracovány pomocí metody latinských hyperkrychí. Pro samotnou simulaci bylo předpokládáno, že vlastnosti různých vrstev horniny jsou na sobě nezávislé a mohou se nacházet kdekoli v intervalu určeným podrobným inženýrskogeologickým průzkumem [17]. Dalším stěžejním předpokladem vstupujícím do výpočtu bylo, že všechny hodnoty, kterých může daná veličina nabývat, jsou stejně pravděpodobné. Vzhledem k informacím z průzkumu nebylo možné usuzovat na korelaci mezi jednotlivými vlastnostmi, proto bylo předpokládáno, že k ní nedochází.

Zavedené charakteristiky odpovídají definici rovnoměrného rozdělení, čemuž odpovídá distribuční funkce:

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a}; x \in \langle a; b \rangle \quad (9)$$

Graf distribuční funkce byl rozdělen na 30 intervalů tak, aby pravděpodobnost, že parametr bude ležet v daném intervalu, byla pro všechny intervaly shodná. Hodnoty charakterizující danou proměnnou pro celý interval byly vždy zvoleny jako střed daného intervalu. Následně byla vygenerována tabulka náhodných permutací čísel 1 až 30 pro všechny proměnné veličiny, která určila hodnoty těchto veličin pro jednotlivé simulace, viz tab. 6.

Jako proměnné parametry byly zvoleny parametry zemin dle geologického průzkumu, u nichž lze předpokládat největší vliv na výpočetní model Mohr-Coulomb. Těmito parametry jsou modul pružnosti E , efektivní soudržnost zeminy c_{ef} a efektivní úhel vnitřního tření Φ_{ef} . Vzhledem k hloubce založení kolektoru a geologii předpokládané v místě modelování byly jako proměnné parametry určeny parametry týkající se vinických břidlic, u nichž lze předpokládat největší vliv na chování modelu.

Tab. 5: Vstupní rozmezí proměnných parametrů

VNC	E [MPa]		c_{ef} [kPa]		Φ_{ef} [°]	
	min	max	min	max	min	max
W5	20	40	20	30	19	22
W4/W3	40	120	20	25	22	26
W2	120	300	25	50	26	30
W1	300	600	50	100	30	35

Tab. 6: Permutační tabulka

parametr simulace	W5			W4/W3			W2			W1		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	E	C _{ef}	Φ _{ef}	E	C _{ef}	Φ _{ef}	E	C _{ef}	Φ _{ef}	E	C _{ef}	Φ _{ef}
1	2	11	8	19	7	15	25	12	11	29	9	22
2	22	17	29	24	22	7	18	29	19	14	19	4
3	12	16	9	22	4	13	19	20	26	16	2	11
4	8	13	21	13	30	26	4	18	13	7	24	17
5	23	23	23	2	18	19	2	6	7	10	20	27
6	15	5	3	11	25	5	30	2	23	13	17	8
7	9	20	18	9	1	30	15	27	20	30	26	15
8	14	12	20	5	27	3	3	9	9	12	23	23
9	5	22	6	17	15	2	17	24	30	21	29	5
10	19	29	5	30	16	8	28	23	3	5	22	29
11	3	2	4	29	6	10	7	3	16	8	12	6
12	16	21	26	6	5	22	8	26	6	11	3	7
13	7	27	30	4	8	29	23	19	22	27	27	9
14	10	24	28	23	17	27	13	30	14	25	25	2
15	17	9	19	12	3	4	5	11	21	26	18	10
16	20	14	24	10	13	24	26	4	29	1	30	26
17	1	4	11	7	9	21	24	16	8	3	16	24
18	27	26	25	26	2	28	21	28	25	6	7	16
19	18	6	27	8	21	12	1	10	2	17	14	1
20	13	18	22	3	11	14	27	13	10	9	11	13
21	24	3	16	27	14	1	22	15	4	28	1	30
22	6	1	15	28	10	11	20	25	24	2	15	28
23	28	15	14	21	29	6	14	7	28	23	8	18
24	21	28	10	14	12	23	9	21	15	4	6	25
25	25	8	2	15	19	25	10	14	5	24	5	14
26	11	7	7	16	24	17	16	17	1	22	4	3
27	30	19	17	18	26	9	29	5	18	19	28	12
28	4	25	13	20	23	16	12	22	17	15	21	21
29	29	30	12	25	20	20	11	8	27	18	13	19
30	26	10	1	1	28	18	6	1	12	20	10	20

Tab. 7: Dílčí intervaly proměnných pro metodu LHS

int.	W5						W4/W3						W2						W1					
	E [MPa]		c _{ef} [kPa]		Φ _{ef} [°]		E [MPa]		c _{ef} [kPa]		Φ _{ef} [°]		E [MPa]		c _{ef} [kPa]		Φ _{ef} [°]		E [MPa]		c _{ef} [kPa]		Φ _{ef} [°]	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	20,00	20,67	20,00	20,33	19,00	19,10	40,00	42,67	20,00	20,17	22,00	22,13	120,00	126,00	25,00	25,83	26,00	26,13	300,00	310,00	50,00	51,67	30,00	30,17
2	20,67	21,33	20,33	20,67	19,10	19,20	42,67	45,33	20,17	20,33	22,13	22,27	126,00	132,00	25,83	26,67	26,13	26,27	310,00	320,00	51,67	53,33	30,17	30,33
3	21,33	22,00	20,67	21,00	19,20	19,30	45,33	48,00	20,33	20,50	22,27	22,40	132,00	138,00	26,67	27,50	26,27	26,40	320,00	330,00	53,33	55,00	30,33	30,50
4	22,00	22,67	21,00	21,33	19,30	19,40	48,00	50,67	20,50	20,67	22,40	22,53	138,00	144,00	27,50	28,33	26,40	26,53	330,00	340,00	55,00	56,67	30,50	30,67
5	22,67	23,33	21,33	21,67	19,40	19,50	50,67	53,33	20,67	20,83	22,53	22,67	144,00	150,00	28,33	29,17	26,53	26,67	340,00	350,00	56,67	58,33	30,67	30,83
6	23,33	24,00	21,67	22,00	19,50	19,60	53,33	56,00	20,83	21,00	22,67	22,80	150,00	156,00	29,17	30,00	26,67	26,80	350,00	360,00	58,33	60,00	30,83	31,00
7	24,00	24,67	22,00	22,33	19,60	19,70	56,00	58,67	21,00	21,17	22,80	22,93	156,00	162,00	30,00	30,83	26,80	26,93	360,00	370,00	60,00	61,67	31,00	31,17
8	24,67	25,33	22,33	22,67	19,70	19,80	58,67	61,33	21,17	21,33	22,93	23,07	162,00	168,00	30,83	31,67	26,93	27,07	370,00	380,00	61,67	63,33	31,17	31,33
9	25,33	26,00	22,67	23,00	19,80	19,90	61,33	64,00	21,33	21,50	23,07	23,20	168,00	174,00	31,67	32,50	27,07	27,20	380,00	390,00	63,33	65,00	31,33	31,50
10	26,00	26,67	23,00	23,33	19,90	20,00	64,00	66,67	21,50	21,67	23,20	23,33	174,00	180,00	32,50	33,33	27,20	27,33	390,00	400,00	65,00	66,67	31,50	31,67
11	26,67	27,33	23,33	23,67	20,00	20,10	66,67	69,33	21,67	21,83	23,33	23,47	180,00	186,00	33,33	34,17	27,33	27,47	400,00	410,00	66,67	68,33	31,67	31,83
12	27,33	28,00	23,67	24,00	20,10	20,20	69,33	72,00	21,83	22,00	23,47	23,60	186,00	192,00	34,17	35,00	27,47	27,60	410,00	420,00	68,33	70,00	31,83	32,00
13	28,00	28,67	24,00	24,33	20,20	20,30	72,00	74,67	22,00	22,17	23,60	23,73	192,00	198,00	35,00	35,83	27,60	27,73	420,00	430,00	70,00	71,67	32,00	32,17
14	28,67	29,33	24,33	24,67	20,30	20,40	74,67	77,33	22,17	22,33	23,73	23,87	198,00	204,00	35,83	36,67	27,73	27,87	430,00	440,00	71,67	73,33	32,17	32,33
15	29,33	30,00	24,67	25,00	20,40	20,50	77,33	80,00	22,33	22,50	23,87	24,00	204,00	210,00	36,67	37,50	27,87	28,00	440,00	450,00	73,33	75,00	32,33	32,50
16	30,00	30,67	25,00	25,33	20,50	20,60	80,00	82,67	22,50	22,67	24,00	24,13	210,00	216,00	37,50	38,33	28,00	28,13	450,00	460,00	75,00	76,67	32,50	32,67
17	30,67	31,33	25,33	25,67	20,60	20,70	82,67	85,33	22,67	22,83	24,13	24,27	216,00	222,00	38,33	39,17	28,13	28,27	460,00	470,00	76,67	78,33	32,67	32,83
18	31,33	32,00	25,67	26,00	20,70	20,80	85,33	88,00	22,83	23,00	24,27	24,40	222,00	228,00	39,17	40,00	28,27	28,40	470,00	480,00	78,33	80,00	32,83	33,00
19	32,00	32,67	26,00	26,33	20,80	20,90	88,00	90,67	23,00	23,17	24,40	24,53	228,00	234,00	40,00	40,83	28,40	28,53	480,00	490,00	80,00	81,67	33,00	33,17
20	32,67	33,33	26,33	26,67	20,90	21,00	90,67	93,33	23,17	23,33	24,53	24,67	234,00	240,00	40,83	41,67	28,53	28,67	490,00	500,00	81,67	83,33	33,17	33,33
21	33,33	34,00	26,67	27,00	21,00	21,10	93,33	96,00	23,33	23,50	24,67	24,80	240,00	246,00	41,67	42,50	28,67	28,80	500,00	510,00	83,33	85,00	33,33	33,50
22	34,00	34,67	27,00	27,33	21,10	21,20	96,00	98,67	23,50	23,67	24,80	24,93	246,00	252,00	42,50	43,33	28,80	28,93	510,00	520,00	85,00	86,67	33,50	33,67
23	34,67	35,33	27,33	27,67	21,20	21,30	98,67	101,33	23,67	23,83	24,93	25,07	252,00	258,00	43,33	44,17	28,93	29,07	520,00	530,00	86,67	88,33	33,67	33,83
24	35,33	36,00	27,67	28,00	21,30	21,40	101,33	104,00	23,83	24,00	25,07	25,20	258,00	264,00	44,17	45,00	29,07	29,20	530,00	540,00	88,33	90,00	33,83	34,00
25	36,00	36,67	28,00	28,33	21,40	21,50	104,00	106,67	24,00	24,17	25,20	25,33	264,00	270,00	45,00	45,83	29,20	29,33	540,00	550,00	90,00	91,67	34,00	34,17
26	36,67	37,33	28,33	28,67	21,50	21,60	106,67	109,33	24,17	24,33	25,33	25,47	270,00	276,00	45,83	46,67	29,33	29,47	550,00	560,00	91,67	93,33	34,17	34,33
27	37,33	38,00	28,67	29,00	21,60	21,70	109,33	112,00	24,33	24,50	25,47	25,60	276,00	282,00	46,67	47,50	29,47	29,60	560,00	570,00	93,33	95,00	34,33	34,50
28	38,00	38,67	29,00	29,33	21,70	21,80	112,00	114,67	24,50	24,67	25,60	25,73	282,00	288,00	47,50	48,33	29,60	29,73	570,00	580,00	95,00	96,67	34,50	34,67
29	38,67	39,33	29,33	29,67	21,80	21,90	114,67	117,33	24,67	24,83	25,73	25,87	288,00	294,00	48,33	49,17	29,73	29,87	580,00	590,00	96,67	98,33	34,67	34,83
30	39,33	40,00	29,67	30,00	21,90	22,00	117,33	120,00	24,83	25,00	25,87	26,00	294,00	300,00	49,17	50,00	29,87	30,00	590,00	600,00	98,33	100,00	34,83	35,00

Tab. 8: Vstupní hodnoty reprezentující jednotlivé dílčí intervaly

interval	W5			W4/W3			W2			W1		
	E [MPa]	C _{ef} [kPa]	Φ _{ef} [°]	E [MPa]	C _{ef} [kPa]	Φ _{ef} [°]	E [MPa]	C _{ef} [kPa]	Φ _{ef} [°]	E [MPa]	C _{ef} [kPa]	Φ _{ef} [°]
1	20,33	20,17	19,05	41,33	20,08	22,07	123,00	25,42	26,07	305,00	50,83	30,08
2	21,00	20,50	19,15	44,00	20,25	22,20	129,00	26,25	26,20	315,00	52,50	30,25
3	21,67	20,83	19,25	46,67	20,42	22,33	135,00	27,08	26,33	325,00	54,17	30,42
4	22,33	21,17	19,35	49,33	20,58	22,47	141,00	27,92	26,47	335,00	55,83	30,58
5	23,00	21,50	19,45	52,00	20,75	22,60	147,00	28,75	26,60	345,00	57,50	30,75
6	23,67	21,83	19,55	54,67	20,92	22,73	153,00	29,58	26,73	355,00	59,17	30,92
7	24,33	22,17	19,65	57,33	21,08	22,87	159,00	30,42	26,87	365,00	60,83	31,08
8	25,00	22,50	19,75	60,00	21,25	23,00	165,00	31,25	27,00	375,00	62,50	31,25
9	25,67	22,83	19,85	62,67	21,42	23,13	171,00	32,08	27,13	385,00	64,17	31,42
10	26,33	23,17	19,95	65,33	21,58	23,27	177,00	32,92	27,27	395,00	65,83	31,58
11	27,00	23,50	20,05	68,00	21,75	23,40	183,00	33,75	27,40	405,00	67,50	31,75
12	27,67	23,83	20,15	70,67	21,92	23,53	189,00	34,58	27,53	415,00	69,17	31,92
13	28,33	24,17	20,25	73,33	22,08	23,67	195,00	35,42	27,67	425,00	70,83	32,08
14	29,00	24,50	20,35	76,00	22,25	23,80	201,00	36,25	27,80	435,00	72,50	32,25
15	29,67	24,83	20,45	78,67	22,42	23,93	207,00	37,08	27,93	445,00	74,17	32,42
16	30,33	25,17	20,55	81,33	22,58	24,07	213,00	37,92	28,07	455,00	75,83	32,58
17	31,00	25,50	20,65	84,00	22,75	24,20	219,00	38,75	28,20	465,00	77,50	32,75
18	31,67	25,83	20,75	86,67	22,92	24,33	225,00	39,58	28,33	475,00	79,17	32,92
19	32,33	26,17	20,85	89,33	23,08	24,47	231,00	40,42	28,47	485,00	80,83	33,08
20	33,00	26,50	20,95	92,00	23,25	24,60	237,00	41,25	28,60	495,00	82,50	33,25
21	33,67	26,83	21,05	94,67	23,42	24,73	243,00	42,08	28,73	505,00	84,17	33,42
22	34,33	27,17	21,15	97,33	23,58	24,87	249,00	42,92	28,87	515,00	85,83	33,58
23	35,00	27,50	21,25	100,00	23,75	25,00	255,00	43,75	29,00	525,00	87,50	33,75
24	35,67	27,83	21,35	102,67	23,92	25,13	261,00	44,58	29,13	535,00	89,17	33,92
25	36,33	28,17	21,45	105,33	24,08	25,27	267,00	45,42	29,27	545,00	90,83	34,08
26	37,00	28,50	21,55	108,00	24,25	25,40	273,00	46,25	29,40	555,00	92,50	34,25
27	37,67	28,83	21,65	110,67	24,42	25,53	279,00	47,08	29,53	565,00	94,17	34,42
28	38,33	29,17	21,75	113,33	24,58	25,67	285,00	47,92	29,67	575,00	95,83	34,58
29	39,00	29,50	21,85	116,00	24,75	25,80	291,00	48,75	29,80	585,00	97,50	34,75
30	39,67	29,83	21,95	118,67	24,92	25,93	297,00	49,58	29,93	595,00	99,17	34,92

Tab. 9: Parametry získané metodou LHS pro jednotlivé modely MKP

interval	W5			W4/W3			W2			W1		
	E [MPa]	c ef [kPa]	Φ ef [°]	E [MPa]	c ef [kPa]	Φ ef [°]	E [MPa]	c ef [kPa]	Φ ef [°]	E [MPa]	c ef [kPa]	Φ ef [°]
1	21,00	23,50	19,75	89,33	21,08	23,93	267,00	34,58	27,40	585,00	64,17	33,58
2	34,33	25,50	21,85	102,67	23,58	22,87	225,00	48,75	28,47	435,00	80,83	30,58
3	27,67	25,17	19,85	97,33	20,58	23,67	231,00	41,25	29,40	455,00	52,50	31,75
4	25,00	24,17	21,05	73,33	24,92	25,40	141,00	39,58	27,67	365,00	89,17	32,75
5	35,00	27,50	21,25	44,00	22,92	24,47	129,00	29,58	26,87	395,00	82,50	34,42
6	29,67	21,50	19,25	68,00	24,08	22,60	297,00	26,25	29,00	425,00	77,50	31,25
7	25,67	26,50	20,75	62,67	20,08	25,93	207,00	47,08	28,60	595,00	92,50	32,42
8	29,00	23,83	20,95	52,00	24,42	22,33	135,00	32,08	27,13	415,00	87,50	33,75
9	23,00	27,17	19,55	84,00	22,42	22,20	219,00	44,58	29,93	505,00	97,50	30,75
10	32,33	29,50	19,45	118,67	22,58	23,00	285,00	43,75	26,33	345,00	85,83	34,75
11	21,67	20,50	19,35	116,00	20,92	23,27	159,00	27,08	28,07	375,00	69,17	30,92
12	30,33	26,83	21,55	54,67	20,75	24,87	165,00	46,25	26,73	405,00	54,17	31,08
13	24,33	28,83	21,95	49,33	21,25	25,80	255,00	40,42	28,87	565,00	94,17	31,42
14	26,33	27,83	21,75	100,00	22,75	25,53	195,00	49,58	27,80	545,00	90,83	30,25
15	31,00	22,83	20,85	70,67	20,42	22,47	147,00	33,75	28,73	555,00	79,17	31,58
16	33,00	24,50	21,35	65,33	22,08	25,13	273,00	27,92	29,80	305,00	99,17	34,25
17	20,33	21,17	20,05	57,33	21,42	24,73	261,00	37,92	27,00	325,00	75,83	33,92
18	37,67	28,50	21,45	108,00	20,25	25,67	243,00	47,92	29,27	355,00	60,83	32,58
19	31,67	21,83	21,65	60,00	23,42	23,53	123,00	32,92	26,20	465,00	72,50	30,08
20	28,33	25,83	21,15	46,67	21,75	23,80	279,00	35,42	27,27	385,00	67,50	32,08
21	35,67	20,83	20,55	110,67	22,25	22,07	249,00	37,08	26,47	575,00	50,83	34,92
22	23,67	20,17	20,45	113,33	21,58	23,40	237,00	45,42	29,13	315,00	74,17	34,58
23	38,33	24,83	20,35	94,67	24,75	22,73	201,00	30,42	29,67	525,00	62,50	32,92
24	33,67	29,17	19,95	76,00	21,92	25,00	171,00	42,08	27,93	335,00	59,17	34,08
25	36,33	22,50	19,15	78,67	23,08	25,27	177,00	36,25	26,60	535,00	57,50	32,25
26	27,00	22,17	19,65	81,33	23,92	24,20	213,00	38,75	26,07	515,00	55,83	30,42
27	39,67	26,17	20,65	86,67	24,25	23,13	291,00	28,75	28,33	485,00	95,83	31,92
28	22,33	28,17	20,25	92,00	23,75	24,07	189,00	42,92	28,20	445,00	84,17	33,42
29	39,00	29,83	20,15	105,33	23,25	24,60	183,00	31,25	29,53	475,00	70,83	33,08
30	37,00	23,17	19,05	41,33	24,58	24,33	153,00	25,42	27,53	495,00	65,83	33,25

6 Model MKP

Model pro simulace parametrů dle LHS 1 až 30 byl vytvořen pomocí geotechnického softwaru GEO5. Pro tyto modely byly použity vždy stejné vstupní parametry, kromě proměnných parametrů zemin získaných metodou LHS, také fáze výpočtu byly vždy shodné, aby bylo možné později srovnat výsledky z těchto modelů.

Posuzovaný řez kolektoru se nachází v kolektorové trase v blízkosti šachty J-102, konkrétně na staničení trasy 220,50 m. Řez se nachází v místě, kde bylo předpokládáno vinické břidlicové souvrství a nadloží zde dosahovalo výšky 28,9 m.

6.1 Geotechnické parametry zemin a vliv podzemní vody

Dle inženýrsko geologického průzkumu byly hodnoty pro model MKP určeny následovně: [6]

Antropogenní navážky

Objemová tíha:	γ	=	21,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,37
Modul pružnosti:	E	=	30,00 MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_o	=	0,658
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	20,00 °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	15,00 kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	22,00 kN/m ³

Fluviální sedimenty

Objemová tíha:	γ	=	20,50 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,34
Modul pružnosti:	E	=	50,00 MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_o	=	0,441
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	34,00 °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	0,00 kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	21,00 kN/m ³

Zcela zvětralé břidlice

Objemová tíha:	γ	=	21,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,40
Modul pružnosti:	E	=	LHS MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_o	=	0,667
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	LHS °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	LHS kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	21,00 kN/m ³

Zvětralé břidlice

Objemová tíha:	γ	=	24,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,37
Modul pružnosti:	E	=	LHS MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_o	=	0,587
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	LHS °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	LHS kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	24,00 kN/m ³

Navětralé břidlice

Objemová tíha:	γ	=	25,50 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,35
Modul pružnosti:	E	=	LHS MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_0	=	0,527
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	LHS °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	LHS kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	25,50 kN/m ³

Zdravé břidlice

Objemová tíha:	γ	=	26,00 kN/m ³
Poissonovo číslo:	ν	=	0,31
Modul pružnosti:	E	=	LHS MPa
Součinitel boč. tlaku v klidu:	K_0	=	0,439
Úhel vnitřního tření:	φ_{ef}	=	LHS °
Soudržnost zeminy:	c_{ef}	=	LHS kPa
Obj.tíha sat.zeminy:	γ_{sat}	=	26,00 kN/m ³

Hodnoty označené LHS byly brány jako proměnné hodnoty dle Metody latinských hyperkrychlí a byly dopočteny již dříve – viz tab. 9. Součinitel bočního tlaku v klidu pro horniny byl určen dle vzorce:

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (10)$$

a pro zeminy:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (11)$$

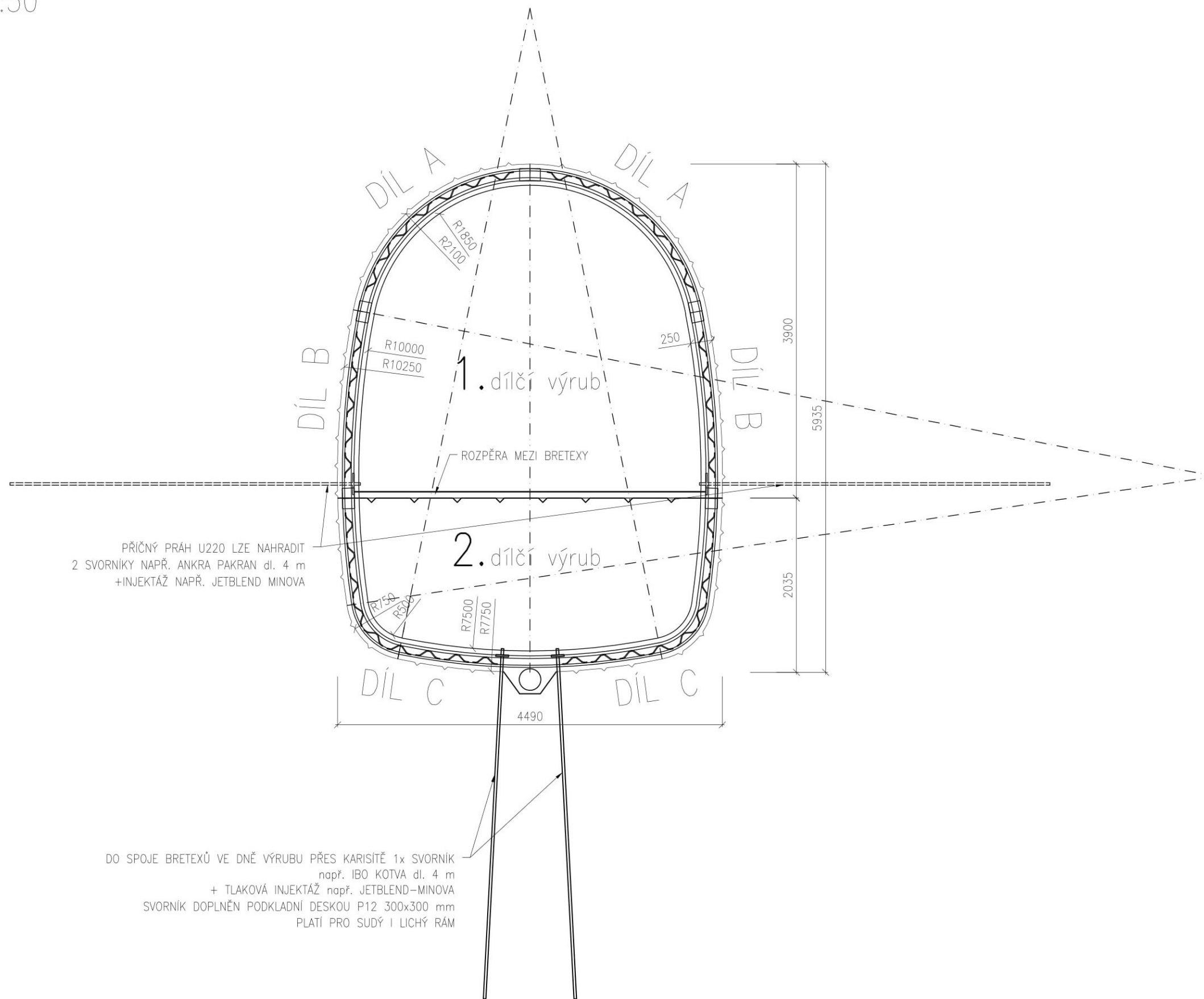
Hladina podzemní vody je vzhledem k velké blízkosti řeky Vltavy předpokládána velmi nízko pod terénem, tedy asi 24 m nad kalotou kolektoru, ale vzhledem k tomu, že primární ostění bylo navrženo jako propustné, v posouzení je hydrostatický tlak zaveden uvažováním hodnoty saturevané objemové hmotnosti.

6.2 Primární ostění kolektoru

Ražba kolektoru byla z technologického hlediska navržena do třech technologických tříd, a sice tříd NRTM 3, NRTM 4 a NRTM 5a. Třída NRTM 3 byla navržena pro letenské souvrství, kde bylo předpokládáno nejlepší prostředí pro ražbu. Třída NRTM 4 byla předpokládána v místech s obvyklými podmínkami v souvrství zahořanském a souvrství vinickém. Třída NRTM 5a byla navržena pro oblasti, kde byl předpoklad obtížných podmínek pro ražbu, zvláště pak v místech geologických zlomů a v místě, kde se ražba velmi blížila pilíři Hlávkova mostu.

Vzhledem k tomu, že posuzovaný model se nachází ve vinickém souvrství na ostrovu Štvanice mimo předpokládaný dosah geologických zlomů, byl model navržen dle třídy NRTM 4. Pro tuto technologickou třídu byla uvažována vzdálenost výztužných příhradových rámců 1,0 m.

PŘÍČNÝ ŘEZ – TYPOVÝ RÁM BRETEX
1:50



Obr. 25: Příklad příčného řezu – typový rám BRETEX

6.2.1 Příhradový rám BRETEX

Nosná výztuž výztužného rámu se skládá ze dvou profilů R25 a jednoho profilu R10. Členění rámu bylo navrženo tak, aby odpovídalo členění výrubu na dva dílčí. První úroveň výrubu má rozměry 4,49 m šířku a 3,90 m výšku výrubu. Plný profil má potom shodnou šířku 4,49 m a plnou výšku 5,935 m.

První dílčí výrub je vyztužen pomocí dvou dílů A a dvou dílů B. Ve dně výrubu byl navržen rozpěrný práh U220, který bylo možno též nahradit dvěma svorníky délky 4 m (např. ANKRA PAKRAN) doplněnými tlakovou injektáží (např. JetblendMinova).

Po dobrání plného profilu kolektoru měly být dále osazeny dva díly C spojované přesahem. Pro správnou statickou funkci rámu byly ve dně výrubu v místě spoje dílů C navrženy dvě kotvy (např. typu IBO) dl. 4,0 m s tlakovou injektáží (např. JetblendMinova).

Příhradový rám BRETEX byl dále doplněn KARI sítí 150/150-8/8 mm při obou površích ostění z oceli B500B a všechna výztuž byla zastříkána betonem C25/30 – XC2 (SB30 / typ II / obor J2) v tloušťce 250 mm.

Výztuž primárního ostění bude zohledněna v posouzení průřezu pomocí programu Beton FIN EC, v rámci modelu v programu GEO5 MKP nebyla využita.

6.2.1.1 Zohlednění stárnutí betonu v modelu MKP

V rámci modelu bylo nejprve v první fázi primární ostění modelováno z mladého betonu, tedy z betonu stáří cca 3 dny, s nízkými pevnostními parametry. [23]

V další fázi bylo uvažováno stárnutí, tedy tvrdnutí, stříkaného betonu a tedy změna jeho výpočetních parametrů.

Předpokládané vlastnosti mladého betonu

Modul pružnosti	$E_{cm} = 3\,100,00 \text{ MPa}$
Modul pružnosti ve smyku	$G = 1\,291,70 \text{ MPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha_t = 1 \cdot 10^{(-6)} \text{ 1/K}$
Měrná tíha	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 5,00 \text{ MPa}$
Pevnosti v tahu	$f_{ctm} = 0,20 \text{ MPa}$

Vlastnosti vyzrálého betonu

Modul pružnosti	$E_{cm} = 31\,000,00 \text{ MPa}$
Modul pružnosti ve smyku	$G = 12\,917,00 \text{ MPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha_t = 1 \cdot 10^{(-6)} \text{ 1/K}$

Měrná tíha	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 25,00 \text{ MPa}$
Pevnosti v tahu	$f_{ctm} = 2,60 \text{ MPa}$

6.2.2 Svorníková výztuž kolektoru

Zajištění primárního ostění svorníky bylo navrženo v závislosti na technologické třídě výrubu NRTM 4. Liché příhradové rámy BRETEX byly zajištěny pěti svorníky, sudé rámy potom šesti svorníky. Tyto svorníky měly délku 4 m (např. ANKRA PAKRAN) a vždy byly zajištěny injektážní směsí (např. Jetblend Minova).

6.2.2.1 Zavedení vlivu svorníkové výztuže do modelu MKP

Svorníková výztuž kolektoru byla do modelu zavedena jako oblast kolem kolektoru odpovídající délce a geometrii svorníků. Vliv svorníků byl uvažován jako zlepšení vlastností horniny v dané oblasti, konkrétně jako zvýšení soudržnosti dané horniny. Tato soudržnost byla uvažována dle vztahu: [26]

$$c_{h+s} = c_h + c_s \text{ [kPa]} \quad (12)$$

kde: c_{h+s} je celková soudržnost s uvažovaným vlivem svorníků
 c_h je původní soudržnost dané horniny
 c_s je zvýšení soudržnosti vlivem svorníků

Pro uvažované zvýšení je dán vztah:

$$c_s = \frac{N_u}{A_k} \cdot \frac{1 + \sin \Phi_{ef}}{2 \cdot \cos \Phi_{ef}} \cdot \frac{1}{\gamma_{kc}} \quad (13)$$

kde: N_u je únosnost jednoho svorníku [kN]
 A_k je plocha připadající na jeden svorník [m²]
 Φ_{ef} je úhel vnitřního tření dané horniny [°]
 γ_{kc} je součinitel spolehlivosti kotvení [-]

Veličiny uvažované pro výpočet pro každý model:

$$N_u = 120 \text{ kN}$$

$$A_k = 8,2 \text{ m}^2$$

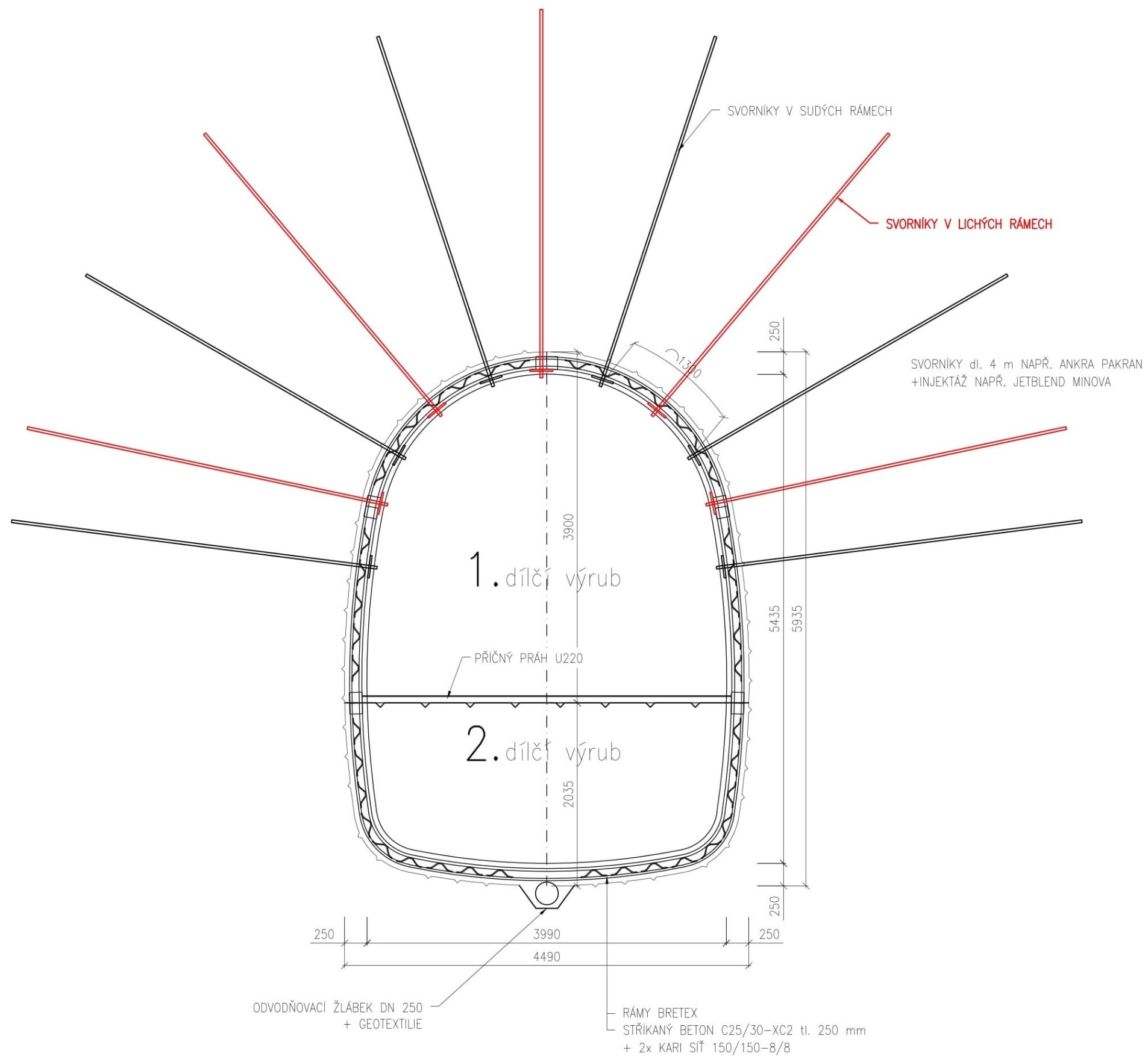
$$\gamma_{kc} = 1,2$$

Úhel vnitřního tření Φ_{ef} byl uvažován jako proměnná veličina pro každou simulaci, dle výpočtů metodou latinských hyperkrychlí, proto i hodnota uvažovaného zlepšení soudržnosti je proměnná veličina, dle tab. 10.

Tab. 10: Zlepšení soudržnosti horniny vlivem svorníkové výztuže

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_s	11,37	10,69	10,94	11,17	11,57	10,83	11,10	11,41	10,72	11,65
C_{h+s}	75,53	91,52	63,44	100,34	94,07	88,33	103,60	98,91	108,22	97,48
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C_s	10,76	10,80	10,87	10,61	10,91	11,53	11,45	11,13	10,58	11,02
C_{h+s}	79,93	64,96	105,04	101,45	90,07	110,70	87,28	71,97	83,08	78,52
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_s	11,69	11,61	11,21	11,49	11,06	10,65	10,98	11,33	11,25	11,29
C_{h+s}	62,53	85,78	73,71	70,65	68,56	66,48	106,81	95,50	82,08	77,12

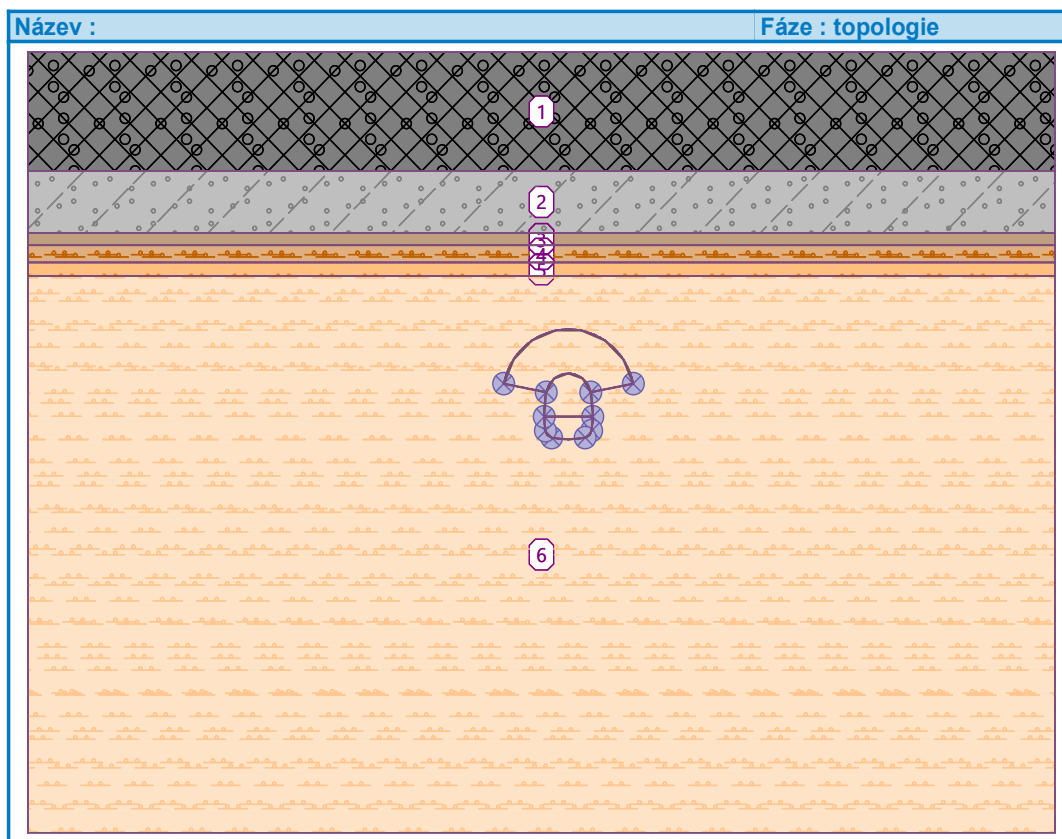
CHARAKTERISTICKÝ PŘÍČNÝ ŘEZ – PRIMÁRNÍ OSTĚNÍ
1:50



Obr. 26: Charakteristický příčný řez – primární ostění

6.3 Vstupní parametry modelu MKP

Prvním krokem tvorby numerického modelu bylo nastavení rozhraní modelu, vlastnosti jednotlivých zemin, jejich přiřazení, typy kontaktů, definované linie a nastavení generování výpočetní sítě.



Obr. 27: Model – přiřazení zemin

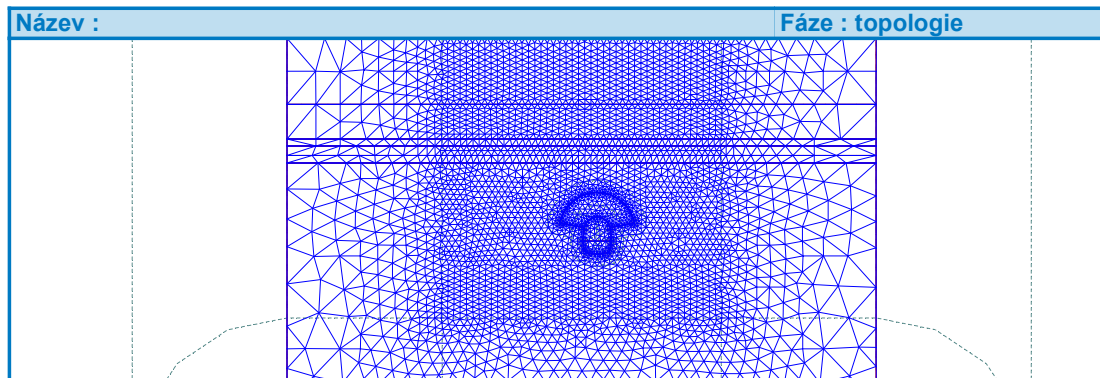
Přiřazené zeminy a mocnosti jednotlivých vrstev:

zemina	zkratka	číslo vrstvy	mocnost [m]
antropogenní navážky	AN	1	10,66
fluviální sedimenty	FL	2	5,60
zcela zvětralé břidlice (VNC)	W5	3	1,10
zvětralé břidlice (VNC)	W4/W3	4	1,55
navětralé břidlice (VNC)	W2	5	1,23
zdravé břidlice (VNC)	W1	6	-

Materiálový model pro modelování byl použit Mohr-Coulomb modifikovaný pro všechny zeminy.

Pro generování sítě pro výpočet byla nastavena délka hrany prvků 1 m. Tato délka byla upravena při krajích modelu, kde již není předpokládáno velké ovlivnění ražbou, zde do vzdálenosti 10 až 15 m byla nastavena délka prvků 5 m a naopak podél linií výrubu a podél zóny,

kde je předpokládáno zlepšení působením svorníků, byla délka prvků sítě zmenšena na 0,3 m pro větší přesnost výsledků.



Obr. 28: Výsledek generování sítě

Tuhosti kontaktních prvků na styku primárního ostění kolektoru a horniny byly definovány:

$$K_s = 20000 \text{ kN/m}^3$$

$$K_n = 50000 \text{ kN/m}^3$$

Redukční parametry pro tření a soudržnost zeminy byly definovány:

$$\delta_c = 0,80$$

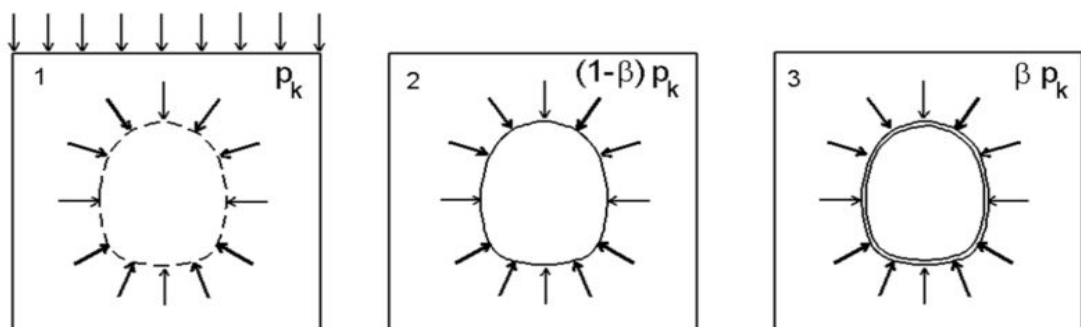
$$\delta_\mu = 0,80$$

Časový průběh ražby a její prostorový ráz byl v modelu zohledněn pomocí takzvané β metody [26], která uvažuje, že primární napjatost horniny σ_0 v místě budoucího výrubu se postupem času mění podle vztahu:

$$\sigma = (1 - \beta) \cdot \sigma_0 \quad (14)$$

působící na nevystrojený výrub, přičemž pro primární napjatost masivu σ_0 platí, že $\beta = 1,0$. Na vystrojený kolektor potom působí napětí:

$$\sigma = \beta \cdot \sigma_0 \quad (15)$$



Obr. 29: Schéma modelování změn napětí v okolí kolektoru pomocí β metody [27]

Hodnota samotného koeficientu β se odhaduje obtížně, proto v modelech MKP se toto zohledňuje pomocí postupné exkavace a procent aktivace. Procenta aktivace určují, kolik ze zatížení daného primární napjatosti masivu se vyčerpá v daném výpočetním kroku. Podrobné hodnoty jsou určeny pro jednotlivé kroky výpočtu.

6.4 Fáze výpočtu

V první fázi výpočtu byla určena primární geostatická napjatost modelu horninového masivu bez porušení ražbou.

Druhá fáze obsahuje modelování nevystrojeného výrubu prvního dílčího, přičemž je uvažována deaktivace v rámci exkavace 30 %.

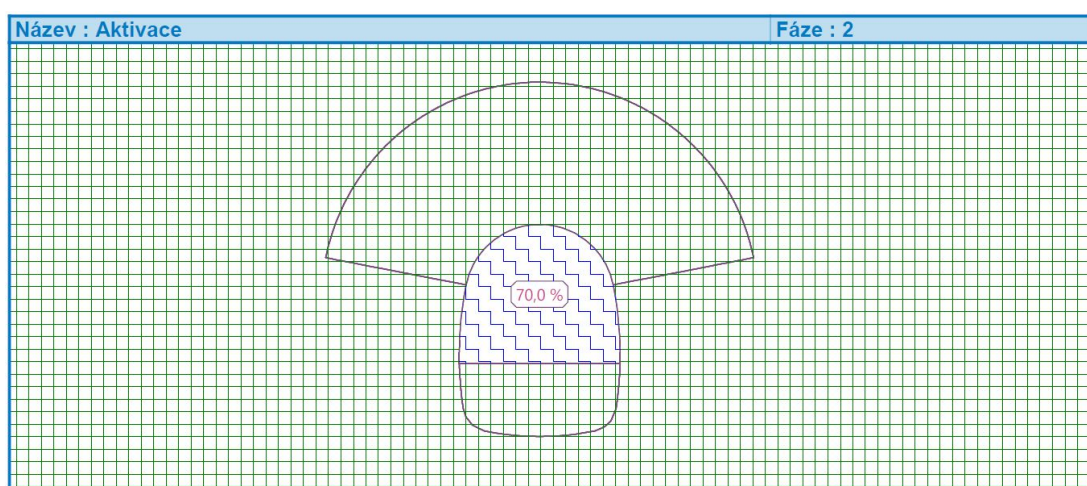
Ve třetí fázi je uvažován výrub vystrojený mladým betonem a svorníkovou výztuží, deaktivace byla uvažována dalších 30 %. Tloušťka primárního ostění je 0,25 m.

Čtvrtá fáze se skládá ze zlepšení vlastností betonu, již je uvažován vyzrálý a dochází k plnému zatížení ostění.

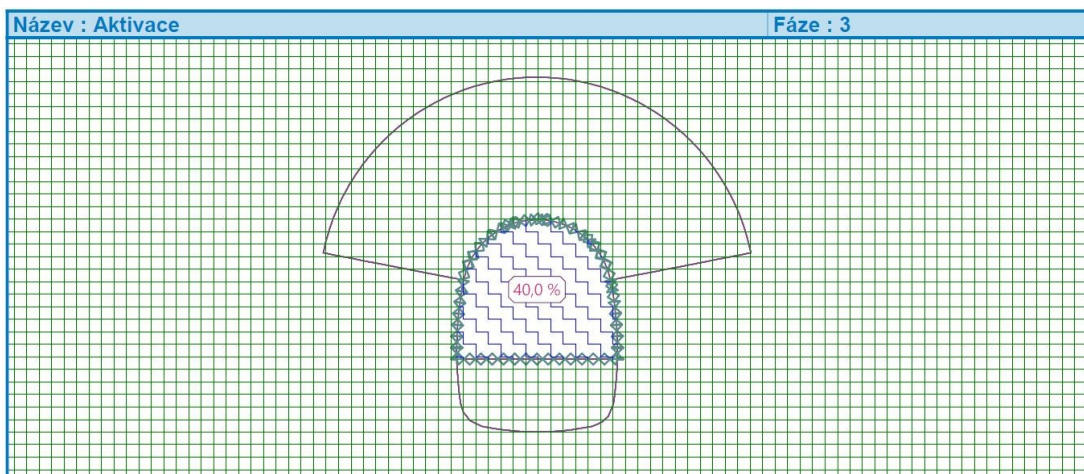
V rámci páté fáze je uvažován nevystrojený druhý dílčí výrub za deaktivace 30 %.

V šesté fázi je dno výrubu vyztuženo mladým betonem a opět dochází k deaktivaci 30 %.

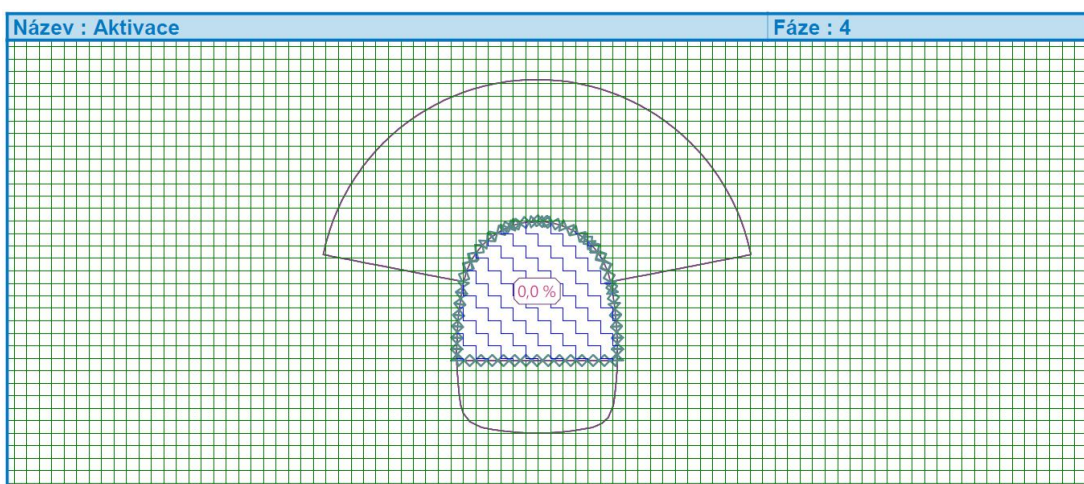
Ve fázi sedmé je celé ostění z betonu vyzrálého a působí na něj plné zatížení horninového masivu.



Obr. 30: Aktivace v druhé fázi výpočtu – Model 1



Obr. 31: Aktivace v třetí fázi výpočtu – Model 1

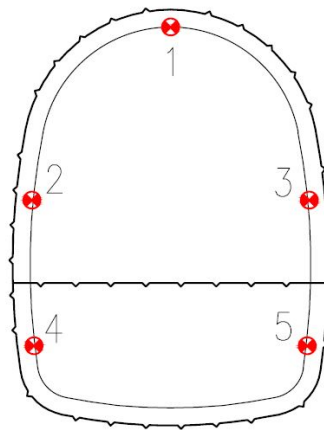


Obr. 32: Aktivace ve třetí fázi výpočtu – Model 1

6.5 Měřené hodnoty

Pro posouzení výsledků byly stěžejními hodnotami deformace primárního ostění kolektoru. Tyto hodnoty budou později porovnány s hodnotami, které byly naměřeny při skutečném provádění ražby kolektoru Hlávkův most. Pro vhodné srovnání těchto veličin byly na ostění modelu zavedeny bodové monitory odpovídající přibližně konvergenčním bodům použitých při kontrole realizace stavby. Dále budou porovnány hodnoty poklesů terénu s geodetickými měřeními na ostrově Štvanice.

SCHÉMA BODOVÝCH MONITORŮ NA OSTĚNÍ
1:100

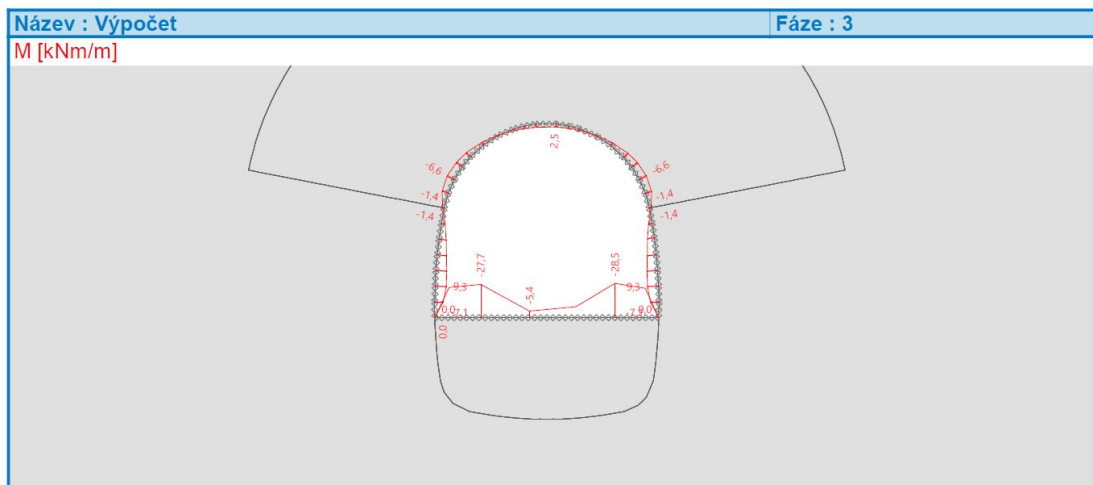


Obr. 33: Schéma bodových monitorů

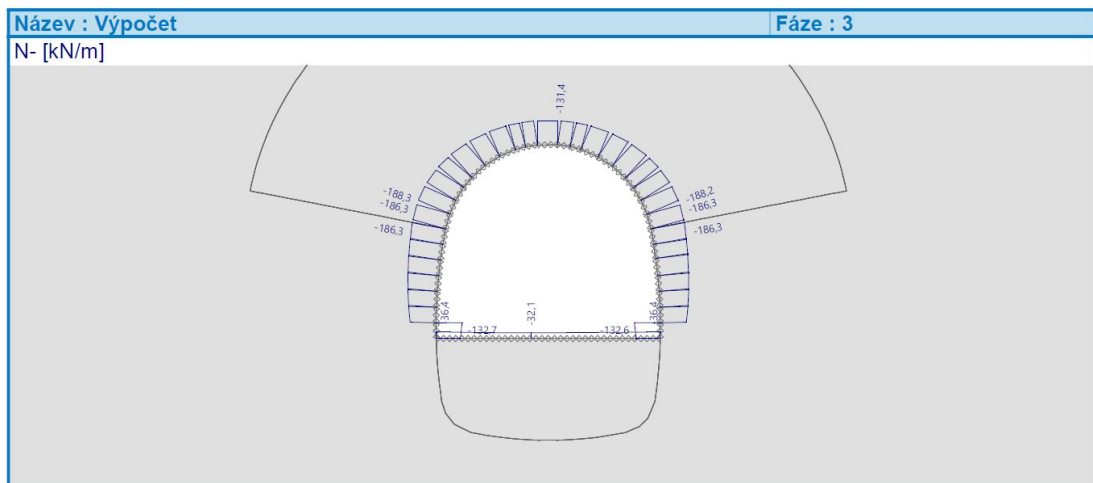
Pro posouzení navrženého ostění budou použity veličiny na nosnících, zvláště pak moment a normálová síla. Kombinace těchto zatížení budou posouzeny pomocí programu Beton FIN EC.

7 Výstupy z modelů MKP

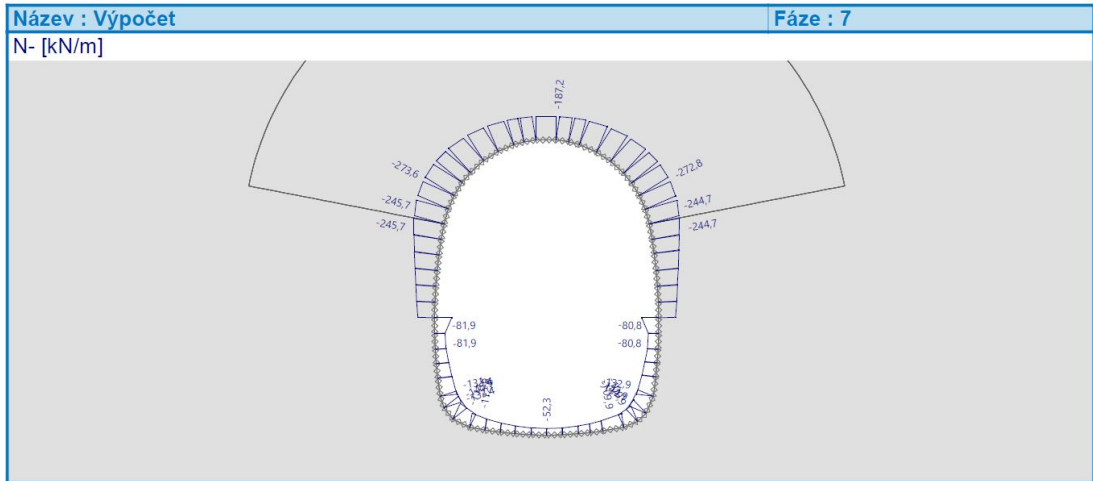
Vzhledem k velkému počtu posuzovaných modelů jsou zde uvedeny pro ilustraci podrobné výsledky pouze z modelu 1. Posuzované vnitřní a návrhové síly ze všech modelů jsou podrobně rozepsány v tab. 12 a tab. 13. Dále jsou zde v tab. 11 uvedeny posuny naměřené v jednotlivých monitorech. Grafické výstupy pro jednotlivé modely se nacházejí v přílohách 1 (vnitřní síly) a 2 (napětí a posuny).



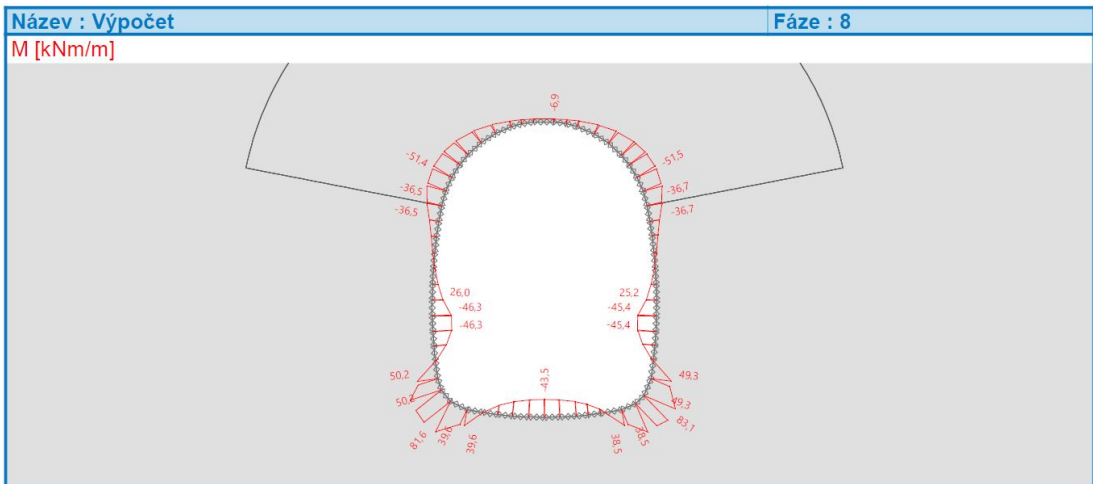
Obr. 34: Model 1 – výpočtová fáze 3 – ohybový moment



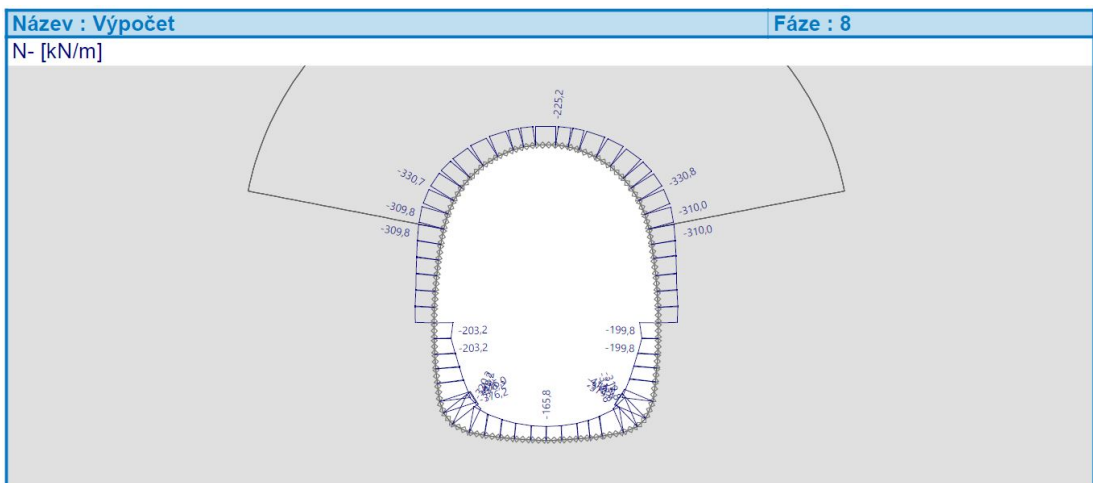
Obr. 35: Model 1 – výpočtová fáze 3 – normálová síla



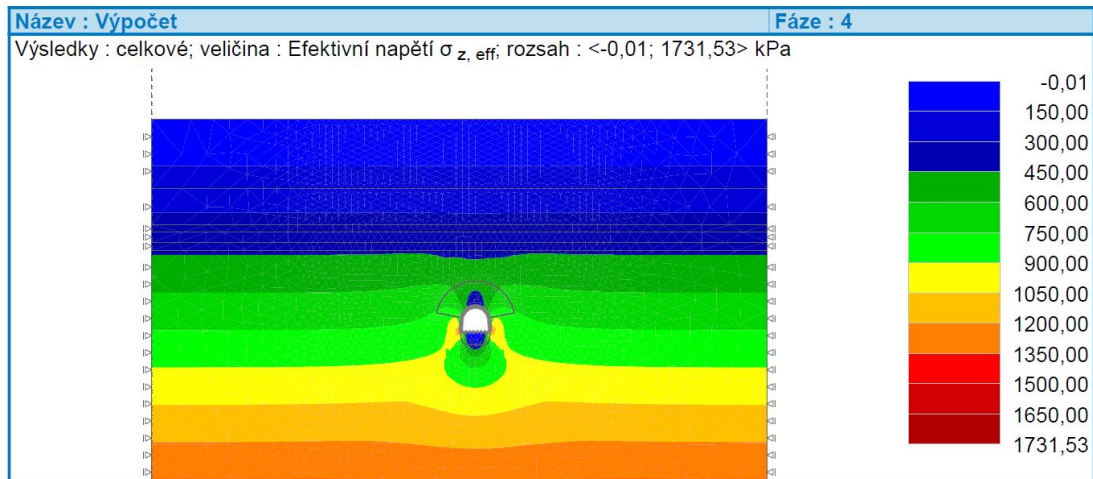
Obr. 39: Model 1 – výpočtová fáze 7 – normálová síla



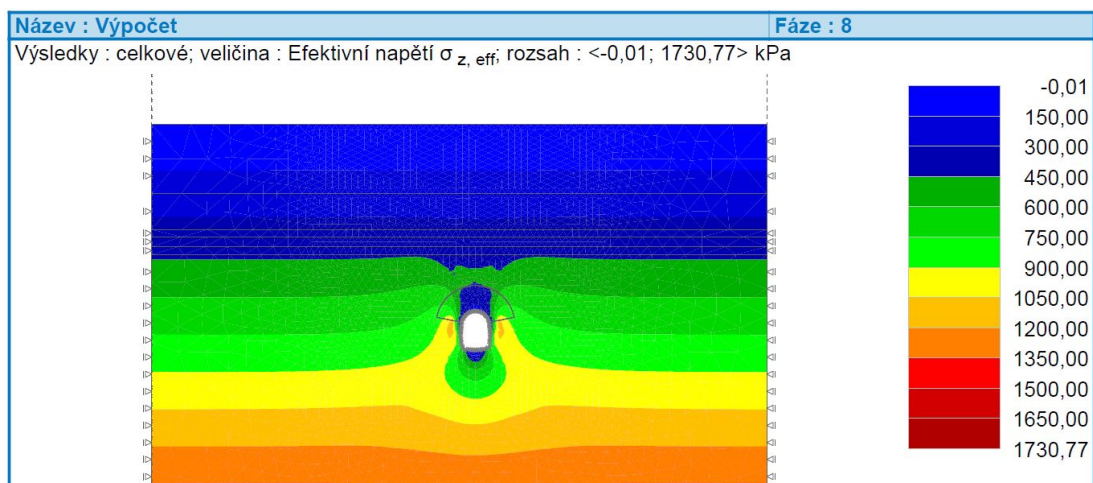
Obr. 40: Model 1 – výpočtová fáze 8 – ohybový moment



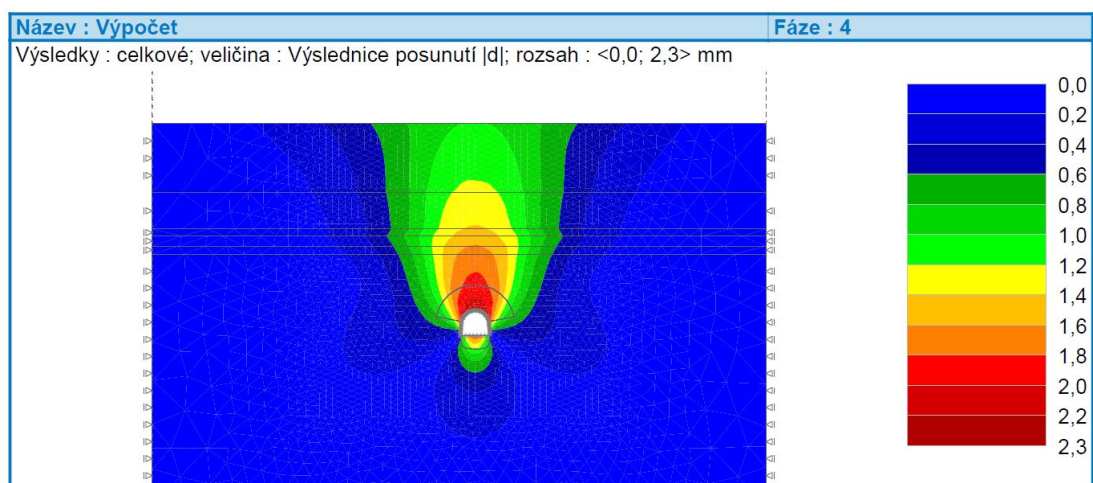
Obr. 41: Model 1 – výpočtová fáze 8 – normálová síla



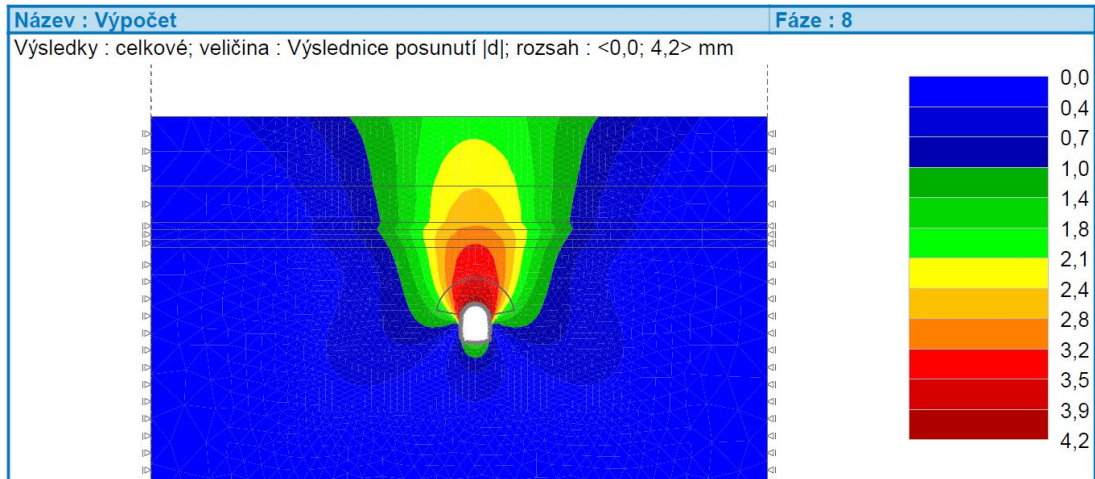
Obr. 42: Model 1 – výpočtová fáze 4 – efektivní napětí ve směru osy z



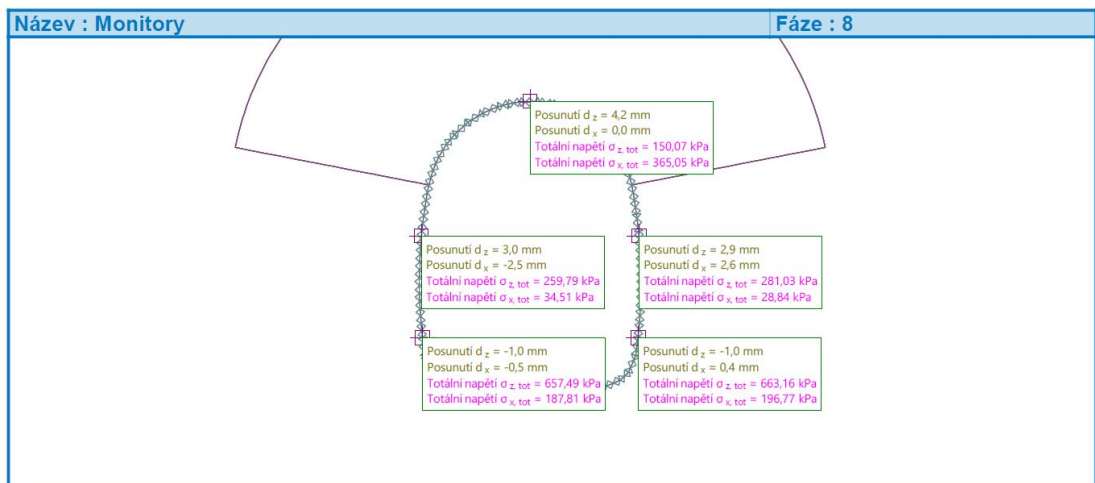
Obr. 43: Model 1 – výpočtová fáze 8 – efektivní napětí ve směru osy z



Obr. 44: Model 1 – výpočtová fáze 4 – výslednice posunutí



Obr. 45: Model 1 – výpočtová fáze 4 – výslednice posunutí



Obr. 46: Model 1 – měřená posunutí odečtená z jednotlivých monitorů

Tab. 11: Posuny měřené v monitorech 1 až 5 pro modely 1 až 30

Model	bod 1			bod 2			bod 3			bod 4			bod 5		
	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,2	0,0	4,2	3,0	-2,5	3,9	-2,9	2,6	3,9	-1,0	-0,5	1,1	-1,0	0,4	1,1
2	5,3	0,0	5,3	3,9	-3,1	5,0	3,8	3,1	4,9	-1,3	-0,6	1,4	-1,3	0,6	1,4
3	5,8	0,0	5,8	4,5	-3,9	6,0	4,3	4,0	5,9	-1,5	-0,5	1,6	-1,5	0,5	1,6
4	5,8	0,0	5,8	4,2	-3,1	5,2	4,3	3,1	5,3	-1,3	-0,7	1,5	-1,2	0,7	1,4
5	5,5	0,0	5,5	3,9	-2,8	4,8	3,9	2,8	4,8	-1,2	-0,7	1,4	-1,1	0,7	1,3
6	5,4	0,0	5,4	4,1	-3,3	5,3	4,1	3,3	5,3	-1,3	-0,6	1,4	-1,3	0,6	1,4
7	3,8	0,0	3,8	2,6	-2,0	3,3	2,6	2,0	3,3	-0,8	-0,5	0,9	-0,8	0,5	0,9
8	5,2	0,0	5,2	3,7	-2,7	4,6	3,7	2,6	4,5	-1,1	-0,7	1,3	-1,1	0,7	1,3
9	4,4	0,0	4,4	3,1	-2,4	3,9	3,1	2,4	3,9	-0,9	-0,5	1,0	-0,9	0,5	1,0
10	5,8	0,0	5,8	4,2	-3,1	5,2	4,2	3,0	5,2	-1,3	-0,8	1,5	-1,3	0,8	1,5
11	6,4	0,0	6,4	4,6	-3,9	6,0	4,7	4,0	6,2	-1,6	-0,7	1,7	-1,6	0,7	1,7
12	6,6	0,0	6,6	5,1	-4,5	6,8	5,0	4,4	6,7	-1,7	-0,6	1,8	-1,7	0,6	1,8
13	4,0	0,0	4,0	2,9	-2,2	3,6	2,8	2,1	3,5	-0,8	-0,5	0,9	-0,8	0,5	0,9
14	4,2	0,0	4,2	3,0	-2,4	3,8	3,1	2,4	3,9	-0,9	-0,5	1,0	-0,9	0,5	1,0
15	4,3	0,0	4,3	3,0	-2,5	3,9	3,1	2,5	4,0	-1,0	-0,5	1,1	-1,0	0,5	1,1
16	6,4	0,0	6,4	4,6	-3,1	5,5	4,6	3,1	5,5	-1,3	-0,9	1,6	-1,3	0,9	1,6
17	6,6	0,0	6,6	4,7	-3,6	5,9	4,8	3,6	6,0	-1,5	-0,8	1,7	-1,5	0,8	1,7
18	6,6	0,0	6,6	4,9	-4,1	6,4	4,9	4,2	6,5	-1,7	-0,7	1,8	-1,7	0,7	1,8
19	5,4	0,0	5,4	4,0	-3,4	5,2	3,9	3,4	5,2	-1,3	-0,5	1,4	-1,3	0,6	1,4
20	6,1	0,0	6,1	4,6	-3,8	6,0	4,4	3,7	5,7	-1,5	-0,7	1,7	-1,5	0,7	1,7
21	4,4	0,0	4,4	3,1	-2,9	4,2	3,1	2,8	4,2	-1,1	-0,4	1,2	-1,1	0,5	1,2
22	6,6	0,0	6,6	4,8	-3,6	6,0	4,8	3,7	6,1	-1,5	-0,9	1,7	-1,5	0,9	1,7
23	4,7	0,0	4,7	3,4	-2,9	4,5	3,3	2,9	4,4	-1,1	-0,5	1,2	-1,1	0,5	1,2
24	6,8	0,0	6,8	4,9	-4,0	6,3	5,0	4,1	6,5	-1,7	-0,8	1,9	-1,7	0,8	1,9
25	4,8	0,0	4,8	3,5	-3,2	4,7	3,5	3,1	4,7	-1,2	-0,5	1,3	-1,2	0,5	1,3
26	5,3	0,0	5,3	3,9	-3,7	5,4	3,9	3,8	5,4	-1,3	-0,4	1,4	-1,3	0,5	1,4
27	4,4	0,0	4,4	3,1	-2,3	3,9	3,1	2,3	3,9	-1,0	-0,6	1,2	-0,9	0,6	1,1
28	4,9	0,0	4,9	3,5	-2,6	4,4	3,4	2,6	4,3	-1,1	-0,6	1,3	-1,1	0,6	1,3
29	4,8	0,0	4,8	3,4	-2,9	4,5	3,5	2,8	4,5	-1,2	-0,6	1,3	-1,1	0,6	1,3
30	4,9	0,0	4,9	3,5	-3,0	4,6	3,6	3,0	4,7	-1,1	-0,5	1,2	-1,1	0,5	1,2
min.			3,8			3,3			3,3			0,9			0,9
max.			6,8			6,8			6,7			1,9			1,9
průměr			5,3			5,0			5,0			1,4			1,4

Tab. 12: Vnitřní síly z jednotlivých simulací

Model	vnitřní síly			
	mladý beton		vyzrálý beton	
	max M_{Ek} [kNm]	max N_{Ek} [kN]	max M_{Ek} [kNm]	max N_{Ek} [kN]
1	19,6	-186,3	83,1	-567,8
2	19,6	-193,0	84,2	-580,0
3	19,0	-193,2	79,3	-583,1
4	20,8	-196,4	87,7	-584,1
5	20,7	-195,0	88,0	-580,3
6	19,6	-193,4	84,6	-581,1
7	20,5	-188,1	86,7	-564,8
8	20,6	-194,0	87,9	-578,1
9	20,5	-190,4	85,3	-571,1
10	20,7	-197,1	89,1	-584,3
11	19,5	-196,3	82,8	-589,4
12	19,2	-196,1	80,1	-590,2
13	20,5	-188,8	85,5	-567,3
14	19,7	-189,3	84,7	-569,9
15	20,1	-189,2	83,3	-570,0
16	21,0	-200,0	91,0	-590,7
17	20,6	-198,8	87,5	-590,0
18	19,7	-196,9	83,0	-590,4
19	19,2	-192,7	82,5	-581,0
20	19,6	-195,5	83,8	-586,5
21	19,5	-188,4	82,1	-568,7
22	20,7	-199,2	87,7	-590,5
23	19,5	-189,9	82,4	-572,9
24	20,2	-198,1	84,4	-591,2
25	19,3	-190,1	81,5	-574,5
26	18,5	-192,0	78,3	-580,1
27	20,7	-190,9	86,2	-571,5
28	20,4	-192,5	87,0	-575,3
29	20,1	-191,4	84,8	-574,7
30	19,8	-191,0	83,7	-574,7
min.	18,5	-186,3	78,3	-564,8
max.	21,0	-200,0	91,0	-591,2
průměr	20,0	-193,1	84,6	-579,1

Pro získání návrhového zatížení konstrukce byl použit vztah:

$$F_{Ed} = F_{Ek} \cdot \gamma_F \quad (16)$$

kde platí: $\gamma_F = 1,35$. Toto návrhové zatížení bylo použito pro posouzení programem Beton FIN EC.

Tab. 13: Vnitřní návrhové síly z jednotlivých simulací

Model	návrhové síly			
	mladý beton		vyzrálý beton	
	M_{Ed} [kNm]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	N_{Ed} [kN]
1	26,5	-251,5	112,2	-766,5
2	26,5	-260,6	113,7	-783,0
3	25,7	-260,8	107,1	-787,2
4	28,1	-265,1	118,4	-788,5
5	27,9	-263,3	118,8	-783,4
6	26,5	-261,1	114,2	-784,5
7	27,7	-253,9	117,0	-762,5
8	27,8	-261,9	118,7	-780,4
9	27,7	-257,0	115,2	-771,0
10	27,9	-266,1	120,3	-788,8
11	26,3	-265,0	111,8	-795,7
12	25,9	-264,7	108,1	-796,8
13	27,7	-254,9	115,4	-765,9
14	26,6	-255,6	114,3	-769,4
15	27,1	-255,4	112,5	-769,5
16	28,4	-270,0	122,9	-797,4
17	27,8	-268,4	118,1	-796,5
18	26,6	-265,8	112,1	-797,0
19	25,9	-260,1	111,4	-784,4
20	26,5	-263,9	113,1	-791,8
21	26,3	-254,3	110,8	-767,7
22	27,9	-268,9	118,4	-797,2
23	26,3	-256,4	111,2	-773,4
24	27,3	-267,4	113,9	-798,1
25	26,1	-256,6	110,0	-775,6
26	25,0	-259,2	105,7	-783,1
27	27,9	-257,7	116,4	-771,5
28	27,5	-259,9	117,5	-776,7
29	27,1	-258,4	114,5	-775,8
30	26,7	-257,9	113,0	-775,8

8 Posouzení výstupů – program Beton FIN EC

Konstrukce byla posouzena v programu Beton FIN EC, přičemž byla posouzena ve stavu, kdy beton je stále mladý a nevyzrálý (výpočetní fáze 3 a 7) a též ve stavu betonu již vyzrálého (fáze 4, 5, 6, 7, 8). Byly nalezeny extrémní namáhání průřezu ohybem a normálovou silou a průřez byl následně posouzen na jejich návrhovou kombinaci pro modely 1 až 30. Podrobný výstup z výpočtů – viz přílohy 3 a 4.

8.1 Průřez z mladého betonu

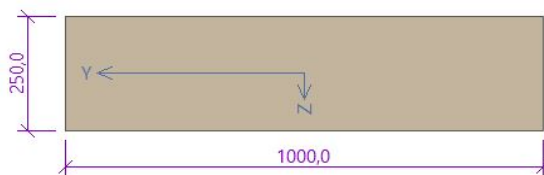
Norma: Norma EN 1992-1-1/Česko.

Únosnost betonu – základní kombinace zatížení:	$\gamma_c = 1,500$
Únosnost výztuže – základní kombinace zatížení:	$\gamma_s = 1,150$
Únosnost betonu – mimořádná kombinace zatížení:	$\gamma_c = 1,200$
Únosnost výztuže – mimořádná kombinace zatížení:	$\gamma_s = 1,000$
Modul pružnosti betonu:	$\gamma_{cE} = 1,200$
Tlaková pevnost betonu:	$\alpha_{cc} = 1,000$
Minimální stupeň vyztužení desky dle ČSN 73 1201	

8.1.1 Vstupní data

Typ prvku:	deska
Prostředí:	X0
Délka dílce:	1,00 m
šířka dílce:	0,25 m

Průřez



Obr. 47: Schéma posuzovaného průřezu

Materiály:

Beton: C 25/30 ve stáří 2 dnů

Válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 5,0 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu	$f_{ctm} = 0,2 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{cm} = 3100 \text{ MPa}$

Ocel podélná: B500B

Mez kluzu	$f_{yk} = 500,0 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 200000 \text{ MPa}$

Ocel příčná: B500B

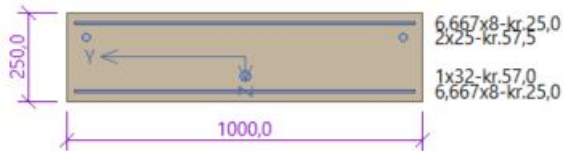
Mez kluzu

$$f_{yk} = 500,0 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

Podélná výztuž



Obr. 48: Schéma vyztužení průřezu

Minimální krytí

Třída konstrukce: S4

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10) = \max(32; 10; 10) = 32 \text{ mm}$$

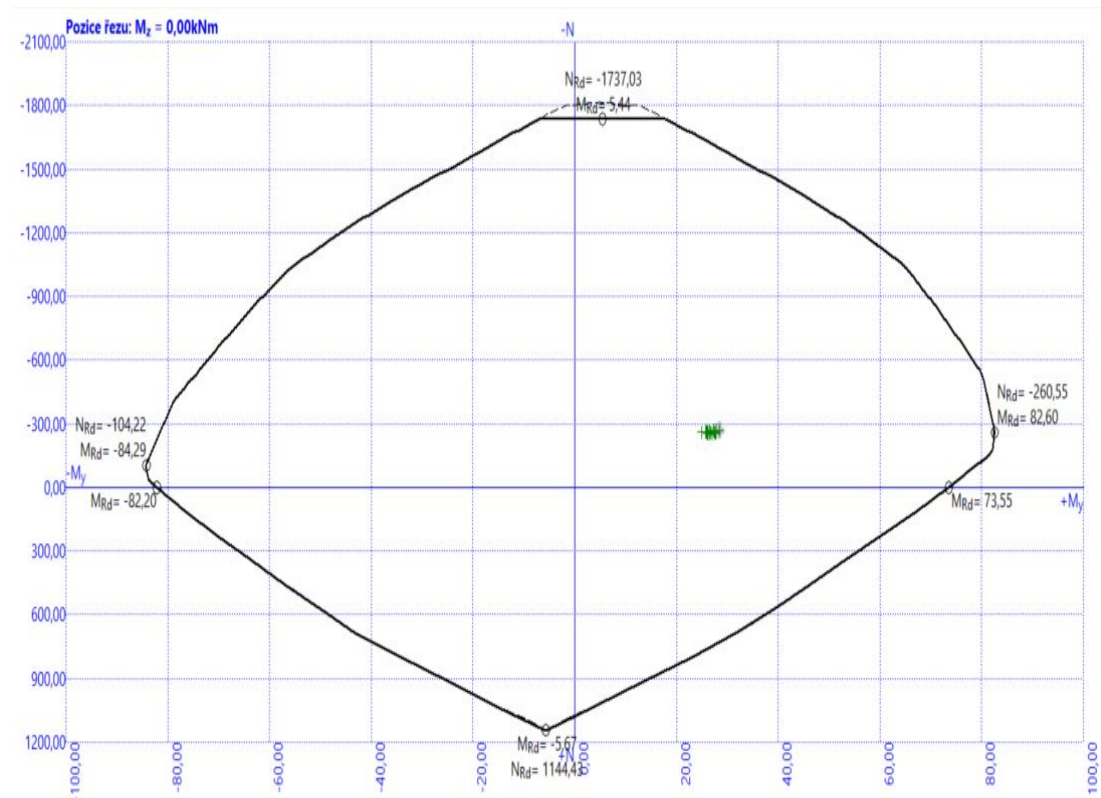
$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 32 + 10 = 42 \text{ mm}$$

Posouzení min. a max. stupně vyztužení

$$\rho_{s,t} = 0,006 \geq \rho_{s,min} = 0,0013$$

$$\rho_{s,t,CSN} = 0,00456 \geq \rho_{s,min,CSN} = 0,0018 \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

$$\rho_s = 0,00982 \leq \rho_{s,max} = 0,04 \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$



Obr. 49: Interakční diagram – průřez z mladého betonu

Tab. 14: Posouzení pro jednotlivé modely – mladý beton

Posouzení mezního stavu únosnosti

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	01	-251,50	26,50	0,00	0,00	0,00	31,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
2	02	-260,60	26,50	0,00	0,00	0,00	31,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,60	0,00	0,00	0,00		
3	03	-260,80	25,70	0,00	0,00	0,00	30,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,60	0,00	0,00	0,00		
4	04	-265,10	28,10	0,00	0,00	0,00	33,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,58	0,00	0,00	0,00		
5	05	-263,30	27,90	0,00	0,00	0,00	33,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,59	0,00	0,00	0,00		
6	06	-261,10	26,50	0,00	0,00	0,00	31,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,60	0,00	0,00	0,00		
7	07	-253,90	27,70	0,00	0,00	0,00	33,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,64	0,00	0,00	0,00		
8	08	-261,90	27,80	0,00	0,00	0,00	33,1	Vyhovuje
		-1815,83	82,59	0,00	0,00	0,00		
9	09	-257,00	27,70	0,00	0,00	0,00	33,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,62	0,00	0,00	0,00		
10	10	-266,10	27,90	0,00	0,00	0,00	33,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
11	11	-265,00	26,30	0,00	0,00	0,00	31,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,58	0,00	0,00	0,00		
12	12	-264,70	25,90	0,00	0,00	0,00	30,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,58	0,00	0,00	0,00		
13	13	-254,90	27,70	0,00	0,00	0,00	33,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
14	14	-255,60	26,60	0,00	0,00	0,00	31,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
15	15	-255,40	27,10	0,00	0,00	0,00	32,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
16	16	-270,00	28,40	0,00	0,00	0,00	33,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		
17	17	-268,40	27,80	0,00	0,00	0,00	33,1	Vyhovuje
		-1815,83	82,56	0,00	0,00	0,00		
18	18	-265,80	26,60	0,00	0,00	0,00	31,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
19	19	-260,10	25,90	0,00	0,00	0,00	30,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,60	0,00	0,00	0,00		
20	20	-263,90	26,50	0,00	0,00	0,00	31,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,58	0,00	0,00	0,00		
21	21	-254,30	26,30	0,00	0,00	0,00	31,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,64	0,00	0,00	0,00		
22	22	-268,90	27,90	0,00	0,00	0,00	33,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		
23	23	-256,40	26,30	0,00	0,00	0,00	31,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
24	24	-267,40	27,30	0,00	0,00	0,00	32,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,56	0,00	0,00	0,00		
25	25	-256,60	26,10	0,00	0,00	0,00	31,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,63	0,00	0,00	0,00		
26	26	-259,20	25,00	0,00	0,00	0,00	29,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,61	0,00	0,00	0,00		

Tab. 14 – pokračování

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
27	27	-257,70	27,90	0,00	0,00	0,00	33,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,62	0,00	0,00	0,00		
28	28	-259,90	27,50	0,00	0,00	0,00	32,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,61	0,00	0,00	0,00		
29	29	-258,40	27,10	0,00	0,00	0,00	32,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,61	0,00	0,00	0,00		
30	30	-257,90	26,70	0,00	0,00	0,00	31,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,62	0,00	0,00	0,00		

Mezní stav únosnosti VYHOVUJE - 33,8 %

Celkové posouzení - Průřez VYHOVUJE

Využití: 33,8 %

8.2 Průřez z vyztřáého betonu

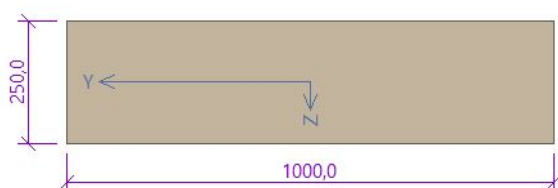
Norma: Norma EN 1992-1-1/Česko.

Únosnost betonu – základní kombinace zatížení:	$\gamma_c = 1,500$
Únosnost výztuže – základní kombinace zatížení:	$\gamma_s = 1,150$
Únosnost betonu – mimořádná kombinace zatížení:	$\gamma_c = 1,200$
Únosnost výztuže – mimořádná kombinace zatížení:	$\gamma_s = 1,000$
Modul pružnosti betonu:	$\gamma_{cE} = 1,200$
Tlaková pevnost betonu:	$\alpha_{cc} = 1,000$
Minimální stupeň vyztužení desky dle ČSN 73 1201	

8.2.1 Vstupní data

Typ prvku:	deska
Prostředí:	X0
Délka dílce:	1,00 m
šířka dílce:	0,25 m

Průřez



Obr. 50: Schéma posuzovaného průřezu

Materiály:

Beton: C 25/30 ve stáří 2 dnů

Válcová pevnost v tlaku	$f_{ck} = 5,0 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu	$f_{ctm} = 0,2 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{cm} = 3100 \text{ MPa}$

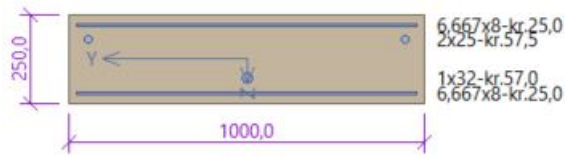
Ocel podélná: B500B

Mez kluzu	$f_{yk} = 500,0 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 200000 \text{ MPa}$

Ocel příčná: B500B

Mez kluzu	$f_{yk} = 500,0 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 200000 \text{ MPa}$

Podélná výztuž



Obr. 51: Schéma vyztužení průřezu

Minimální krytí

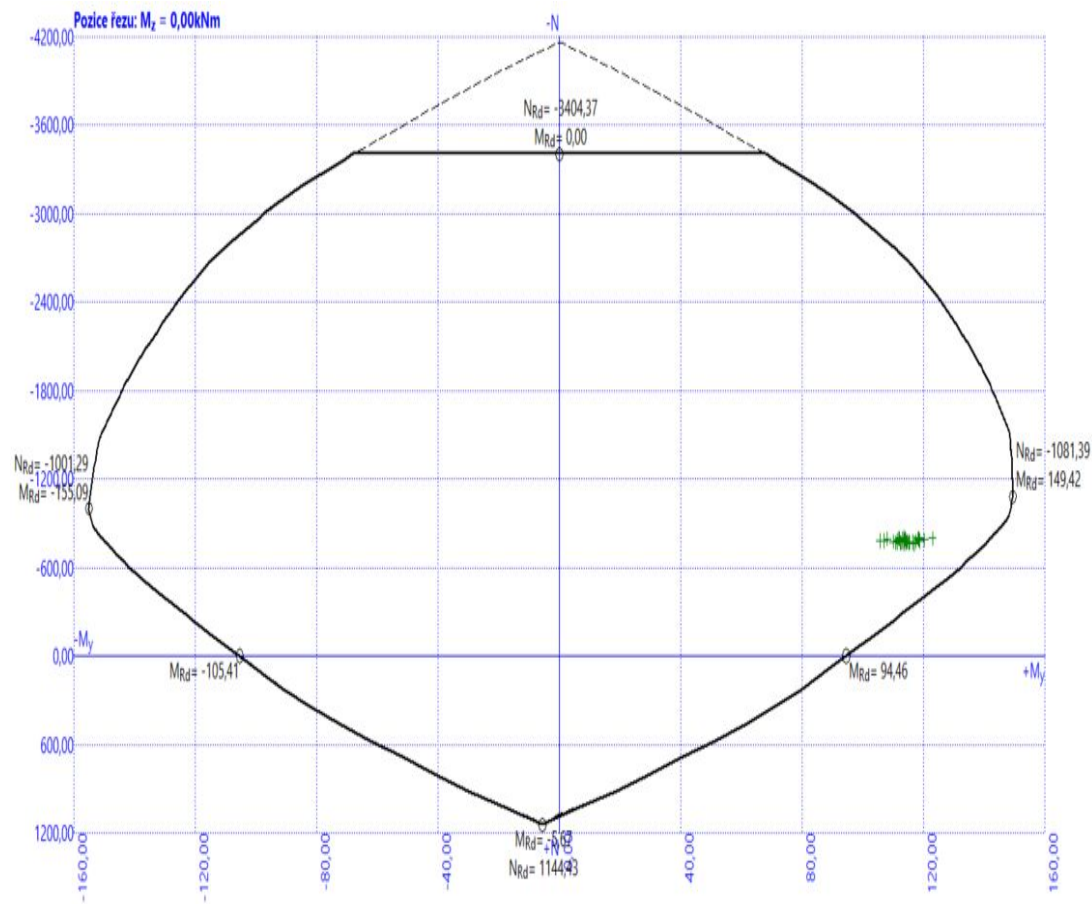
Třída konstrukce: S4

$$c_{\min} = \max(c_{\min,b}; c_{\min,dur}; 10) = \max(32; 10; 10) = 32 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom}} = c_{\min} + \Delta c_{\text{dev}} = 32 + 10 = 42 \text{ mm}$$

Posouzení min. a max. stupně vyztužení

$\rho_{s,t} = 0,006$	\geq	$\rho_{s,\min} = 0,0013$	
$\rho_{s,t,CSN} = 0,00456$	\geq	$\rho_{s,\min,CSN} = 0,0018$	\Rightarrow Vyhovuje
$\rho_s = 0,00982$	\leq	$\rho_{s,\max} = 0,04$	\Rightarrow Vyhovuje



Obr. 52: Interakční diagram – průřez z vyzrálého betonu

Tab. 15: Posouzení pro jednotlivé modely – vyzrálý beton

Posouzení mezního stavu únosnosti

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	01	-766,50	112,20	0,00	0,00	0,00	79,7	Vyhovuje
		-4166,67	140,76	0,00	0,00	0,00		
2	02	-783,00	113,70	0,00	0,00	0,00	80,4	Vyhovuje
		-4166,67	141,47	0,00	0,00	0,00		
3	03	-782,00	107,10	0,00	0,00	0,00	75,7	Vyhovuje
		-4166,67	141,42	0,00	0,00	0,00		
4	04	-788,50	118,40	0,00	0,00	0,00	83,6	Vyhovuje
		-4166,67	141,70	0,00	0,00	0,00		
5	05	-783,40	118,80	0,00	0,00	0,00	84,0	Vyhovuje
		-4166,67	141,48	0,00	0,00	0,00		
6	06	-784,50	114,20	0,00	0,00	0,00	80,7	Vyhovuje
		-4166,67	141,53	0,00	0,00	0,00		
7	07	-762,50	117,00	0,00	0,00	0,00	83,2	Vyhovuje
		-4166,67	140,60	0,00	0,00	0,00		
8	08	-780,40	118,70	0,00	0,00	0,00	84,0	Vyhovuje
		-4166,67	141,36	0,00	0,00	0,00		
9	09	-771,00	115,20	0,00	0,00	0,00	81,7	Vyhovuje
		-4166,67	140,96	0,00	0,00	0,00		
10	10	-788,80	120,30	0,00	0,00	0,00	84,9	Vyhovuje
		-4166,67	141,71	0,00	0,00	0,00		
11	11	-795,70	111,80	0,00	0,00	0,00	78,7	Vyhovuje
		-4166,67	142,01	0,00	0,00	0,00		
12	12	-796,80	108,10	0,00	0,00	0,00	76,1	Vyhovuje
		-4166,67	142,05	0,00	0,00	0,00		
13	13	-765,90	115,40	0,00	0,00	0,00	82,0	Vyhovuje
		-4166,67	140,74	0,00	0,00	0,00		
14	14	-769,40	114,30	0,00	0,00	0,00	81,1	Vyhovuje
		-4166,67	140,89	0,00	0,00	0,00		
15	15	-769,50	112,50	0,00	0,00	0,00	79,8	Vyhovuje
		-4166,67	140,89	0,00	0,00	0,00		
16	16	-797,40	122,90	0,00	0,00	0,00	86,5	Vyhovuje
		-4166,67	142,08	0,00	0,00	0,00		
17	17	-796,50	118,10	0,00	0,00	0,00	83,1	Vyhovuje
		-4166,67	142,04	0,00	0,00	0,00		
18	18	-797,00	112,10	0,00	0,00	0,00	78,9	Vyhovuje
		-4166,67	142,06	0,00	0,00	0,00		
19	19	-784,40	111,40	0,00	0,00	0,00	78,7	Vyhovuje
		-4166,67	141,53	0,00	0,00	0,00		
20	20	-791,80	113,10	0,00	0,00	0,00	79,7	Vyhovuje
		-4166,67	141,84	0,00	0,00	0,00		
21	21	-767,70	110,80	0,00	0,00	0,00	78,7	Vyhovuje
		-4166,67	140,82	0,00	0,00	0,00		
22	22	-797,20	118,40	0,00	0,00	0,00	83,3	Vyhovuje
		-4166,67	142,07	0,00	0,00	0,00		
23	23	-773,40	111,20	0,00	0,00	0,00	78,8	Vyhovuje
		-4166,67	141,06	0,00	0,00	0,00		
24	24	-798,10	113,90	0,00	0,00	0,00	80,2	Vyhovuje
		-4166,67	142,11	0,00	0,00	0,00		
25	25	-775,60	110,00	0,00	0,00	0,00	77,9	Vyhovuje
		-4166,67	141,15	0,00	0,00	0,00		
26	26	-783,10	105,70	0,00	0,00	0,00	74,7	Vyhovuje
		-4166,67	141,47	0,00	0,00	0,00		

Tab. 15 – pokračování

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
27	27	-771,50	116,40	0,00	0,00	0,00	82,6	Vyhovuje
		-4166,67	140,98	0,00	0,00	0,00		
28	28	-776,70	117,50	0,00	0,00	0,00	83,2	Vyhovuje
		-4166,67	141,20	0,00	0,00	0,00		
29	29	-775,80	114,50	0,00	0,00	0,00	81,1	Vyhovuje
		-4166,67	141,16	0,00	0,00	0,00		
30	30	-775,80	113,00	0,00	0,00	0,00	80,1	Vyhovuje
		-4166,67	141,16	0,00	0,00	0,00		

Mezní stav únosnosti VYHOVUJE - 86,5 %

Celkové posouzení - Průřez VYHOVUJE

Využití: 86,5 %

Jak je vidět dle posouzení, konstrukce vyhoví ve všech třiceti simulacích pro beton mladý i beton vyztužený.

Procenta využití navržené konstrukce se pohybují od 29,7 % do 33,8 % pro konstrukci z mladého betonu a od 74,7 % do 86,5 % pro konstrukci z betonu vyztuženého, lze tedy prohlásit, že konstrukce je navržená bezpečně pro předpokládané vstupní parametry.

9 Porovnání chování modelů

Jak již bylo dříve řečeno, výpočetní model použitý pro všechny simulace byl model Mohr-Coulomb, protože byl shledán nejvhodnějším. V rámci této kapitoly bylo provedeno kontrolní ověření vlivu zvoleného modelu tak, že výpočty všech simulačních modelů byly zopakovány se stejnými vstupními parametry, pouze byl použit výpočetní model Drucker-Prager. Vzhledem k tomu, že šlo pouze o porovnání výsledků, jsou zde vypsány pouze výsledky potřebné pro toto porovnání a pro následné ověření vyhovění navržené konstrukce.

Z výsledných maximálních vnitřních sil v konstrukci během výstavby je vidět, že model Drucker-Prager dává o něco větší normálové síly, než model Mohr-Coulomb a to jak pro mladý beton, průměrně 4,6 %, tak pro beton vyztužený, průměrně 3,0 %. Tato situace je obrácená u ohybových momentů, zde naopak vychází o něco lepší výsledky, než pro model Mohr-Coulomb, konkrétně průměrně o 4,8 % pro beton mladý a 7,2 % pro vyztužený.

Tato skutečnost se odrazila v následném posouzení průřezů pomocí programu Beton. Rozptyl využití průřezu se při posouzení pohyboval od 28,9 do 32,6 % pro průřez z mladého betonu. Pro průřez z betonu vyztuženého tento rozptyl byl od 67,8 do 79,2 %. Z toho je zjevné, že využití konstrukce vychází o něco lépe, než pro model Mohr-Coulomb, zejména pro fáze s vyztuženým betonem. Z toho lze usoudit, že zhoršení namáhání normálovými silami při změně modelu je o něco menší, než zlepšení u ohybových momentů, co se vlivu na konstrukci týče, přestože v absolutních procentech to takto nevypadá.

Ohledně posunů naměřených v jednotlivých monitorech, zde dává jednoznačně horší výsledky model Drucker-Prager, což je logické už ze zaznamenaných změn v namáhajících vnitřních silách v konstrukci.

Tab. 16: Porovnání posunů v monitorech z různých modelů

monitor	M-C	D-P	Δ	Δ
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
1	5,3	6,8	1,4	27,16
2	5,0	7,1	2,2	44,01
3	5,0	7,1	2,1	43,02
4	1,4	1,8	0,4	30,17
5	1,4	1,8	0,4	31,19

Tab. 17: Vnitřní síly z jednotlivých simulací

Model	vnitřní síly - Drucker-Prager			
	mladý beton		vyzrálý beton	
	max M_{EK}	max N_{EK}	max M_{EK}	max N_{EK}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
1	18,5	-196,0	76,6	-583,4
2	18,9	-201,6	79,6	-597,5
3	18,1	-204,9	72,4	-602,0
4	19,7	-204,0	81,2	-601,3
5	19,5	-202,1	82,0	-597,4
6	19,0	-203,3	79,6	-599,2
7	18,6	-193,4	80,9	-577,8
8	19,5	-200,7	82,0	-594,8
9	19,4	-196,9	80,7	-585,5
10	19,9	-203,6	82,2	-601,3
11	19,0	-208,2	76,1	-609,1
12	18,2	-208,8	71,9	-610,5
13	19,2	-194,7	80,2	-580,8
14	19,1	-196,5	80,0	-584,8
15	19,0	-196,9	78,8	-585,4
16	20,3	-205,8	83,9	-607,1
17	19,7	-208,0	80,5	-609,5
18	19,1	-208,9	76,7	-610,5
19	18,7	-203,2	77,6	-598,0
20	19,1	-206,6	77,7	-605,4
21	18,1	-196,9	74,7	-585,2
22	19,8	-208,3	80,8	-610,2
23	18,7	-199,0	76,3	-589,5
24	19,3	-209,8	77,2	-612,3
25	18,1	-199,8	74,6	-591,2
26	18,1	-204,1	72,8	-600,7
27	19,0	-196,9	81,4	-586,0
28	19,2	-199,4	81,0	-591,4
29	18,8	-200,1	78,5	-592,3
30	18,8	-200,0	77,0	-591,5
min.	18,1	-193,4	71,9	-577,8
max.	20,3	-209,8	83,9	-612,3
průměr	19,0	-201,9	78,5	-596,4

Tab. 18: Porovnání maximálních vnitřních sil z různých modelů – mladý beton

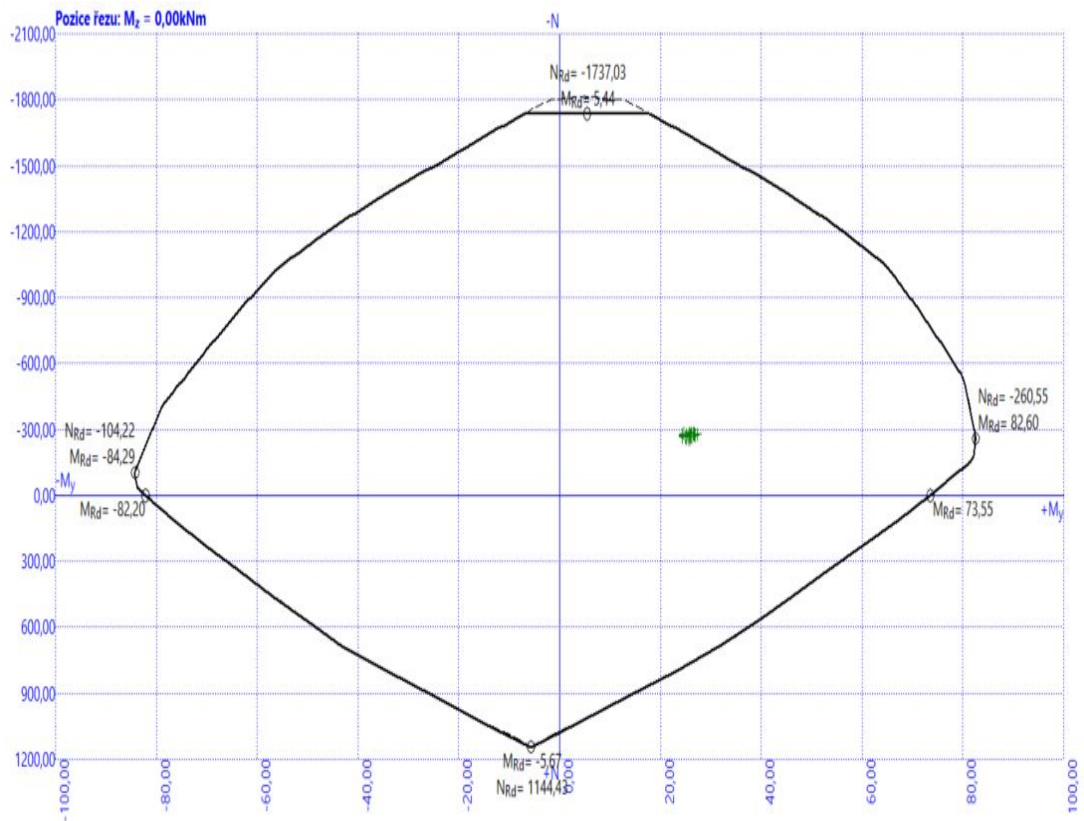
Model	vnitřní síly - mladý beton							
	M-C	D-P	Δ	Δ	M-C	D-P	Δ	Δ
	max M_{EK}	max M_{EK}			max N_{EK}	max N_{EK}		
[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[%]	
1	19,6	18,5	1,1	5,6	-186,3	-196,0	9,7	-5,2
2	19,6	18,9	0,7	3,6	-193,0	-201,6	8,6	-4,5
3	19,0	18,1	0,9	4,7	-193,2	-204,9	11,7	-6,1
4	20,8	19,7	1,1	5,3	-196,4	-204,0	7,6	-3,9
5	20,7	19,5	1,2	5,8	-195,0	-202,1	7,1	-3,6
6	19,6	19,0	0,6	3,1	-193,4	-203,3	9,9	-5,1
7	20,5	18,6	1,9	9,3	-188,1	-193,4	5,3	-2,8
8	20,6	19,5	1,1	5,3	-194,0	-200,7	6,7	-3,5
9	20,5	19,4	1,1	5,4	-190,4	-196,9	6,5	-3,4
10	20,7	19,9	0,8	3,9	-197,1	-203,6	6,5	-3,3
11	19,5	19,0	0,5	2,6	-196,3	-208,2	11,9	-6,1
12	19,2	18,2	1,0	5,2	-196,1	-208,8	12,7	-6,5
13	20,5	19,2	1,3	6,3	-188,8	-194,7	5,9	-3,1
14	19,7	19,1	0,6	3,0	-189,3	-196,5	7,2	-3,8
15	20,1	19,0	1,1	5,5	-189,2	-196,9	7,7	-4,1
16	21,0	20,3	0,7	3,3	-200,0	-205,8	5,8	-2,9
17	20,6	19,7	0,9	4,4	-198,8	-208,0	9,2	-4,6
18	19,7	19,1	0,6	3,0	-196,9	-208,9	12,0	-6,1
19	19,2	18,7	0,5	2,6	-192,7	-203,2	10,5	-5,4
20	19,6	19,1	0,5	2,6	-195,5	-206,6	11,1	-5,7
21	19,5	18,1	1,4	7,2	-188,4	-196,9	8,5	-4,5
22	20,7	19,8	0,9	4,3	-199,2	-208,3	9,1	-4,6
23	19,5	18,7	0,8	4,1	-189,9	-199,0	9,1	-4,8
24	20,2	19,3	0,9	4,5	-198,1	-209,8	11,7	-5,9
25	19,3	18,1	1,2	6,2	-190,1	-199,8	9,7	-5,1
26	18,5	18,1	0,4	2,2	-192,0	-204,1	12,1	-6,3
27	20,7	19,0	1,7	8,2	-190,9	-196,9	6,0	-3,1
28	20,4	19,2	1,2	5,9	-192,5	-199,4	6,9	-3,6
29	20,1	18,8	1,3	6,5	-191,4	-200,1	8,7	-4,5
30	19,8	18,8	1,0	5,1	-191,0	-200,0	9,0	-4,7
min.	18,5	18,1	0,4	2,2	-186,3	-193,4	5,3	-2,8
max.	21,0	20,3	1,9	9,3	-200,0	-209,8	12,7	-6,4
prům.	20,0	19,0	1,0	4,8	-193,1	-201,9	8,8	-4,6

Tab. 19: Porovnání maximálních vnitřních sil z různých modelů – vyztužený beton

Model	vnitřní síly - vyztužený beton							
	M-C	D-P	Δ	Δ	M-C	D-P	Δ	Δ
	max M_{EK}	max M_{EK}			max N_{EK}	max N_{EK}		
[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[%]	
1	83,1	76,6	6,5	7,8	-567,8	-583,4	15,6	-2,7
2	84,2	79,6	4,6	5,5	-580,0	-597,5	17,5	-3,0
3	79,3	72,4	6,9	8,7	-583,1	-602,0	18,9	-3,2
4	87,7	81,2	6,5	7,4	-584,1	-601,3	17,2	-2,9
5	88,0	82,0	6,0	6,8	-580,3	-597,4	17,1	-2,9
6	84,6	79,6	5,0	5,9	-581,1	-599,2	18,1	-3,1
7	86,7	80,9	5,8	6,7	-564,8	-577,8	13,0	-2,3
8	87,9	82,0	5,9	6,7	-578,1	-594,8	16,7	-2,9
9	85,3	80,7	4,6	5,4	-571,1	-585,5	14,4	-2,5
10	89,1	82,2	6,9	7,7	-584,3	-601,3	17,0	-2,9
11	82,8	76,1	6,7	8,1	-589,4	-609,1	19,7	-3,3
12	80,1	71,9	8,2	10,2	-590,2	-610,5	20,3	-3,4
13	85,5	80,2	5,3	6,2	-567,3	-580,8	13,5	-2,4
14	84,7	80,0	4,7	5,5	-569,9	-584,8	14,9	-2,6
15	83,3	78,8	4,5	5,4	-570,0	-585,4	15,4	-2,7
16	91,0	83,9	7,1	7,8	-590,7	-607,1	16,4	-2,8
17	87,5	80,5	7,0	8,0	-590,0	-609,5	19,5	-3,3
18	83,0	76,7	6,3	7,6	-590,4	-610,5	20,1	-3,4
19	82,5	77,6	4,9	5,9	-581,0	-598,0	17,0	-2,9
20	83,8	77,7	6,1	7,3	-586,5	-605,4	18,9	-3,2
21	82,1	74,7	7,4	9,0	-568,7	-585,2	16,5	-2,9
22	87,7	80,8	6,9	7,9	-590,5	-610,2	19,7	-3,3
23	82,4	76,3	6,1	7,4	-572,9	-589,5	16,6	-2,9
24	84,4	77,2	7,2	8,5	-591,2	-612,3	21,1	-3,6
25	81,5	74,6	6,9	8,5	-574,5	-591,2	16,7	-2,9
26	78,3	72,8	5,5	7,0	-580,1	-600,7	20,6	-3,6
27	86,2	81,4	4,8	5,6	-571,5	-586,0	14,5	-2,5
28	87,0	81,0	6,0	6,9	-575,3	-591,4	16,1	-2,8
29	84,8	78,5	6,3	7,4	-574,7	-592,3	17,6	-3,1
30	83,7	77,0	6,7	8,0	-574,7	-591,5	16,8	-2,9
min.	78,3	71,9	4,5	5,4	-564,8	-577,8	13,0	-2,3
max.	91,0	83,9	8,2	10,2	-591,2	-612,3	21,1	-3,6
prům.	84,6	78,5	6,1	7,2	-579,1	-596,4	17,2	-3,0

Tab. 20: Posuny měřené v monitorech 1 až 5 pro modely 1 až 30 – model Drucker-Prager

Model	bod 1			bod 2			bod 3			bod 4			bod 5		
	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d	d _z	d _x	d
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	5,4	0,0	5,4	3,9	-4,0	5,6	3,9	4,0	5,6	-1,1	-0,8	1,4	-1,2	0,8	1,4
2	6,6	0,0	6,6	5,0	-4,9	7,0	5,0	4,9	7,0	-1,5	-1,1	1,9	-1,5	1,0	1,8
3	8,2	0,0	8,2	6,7	-6,5	9,3	6,5	6,5	9,2	-1,9	-1,1	2,2	-1,9	1,1	2,2
4	7,0	0,0	7,0	5,3	-4,6	7,0	5,4	4,6	7,1	-1,5	-1,0	1,8	-1,6	1,0	1,9
5	6,6	0,0	6,6	5,4	-4,4	7,0	5,0	4,3	6,6	-1,4	-0,9	1,7	-1,5	0,9	1,7
6	6,8	0,0	6,8	5,3	-5,1	7,4	5,2	4,9	7,1	-1,5	-1,0	1,8	-1,5	1,1	1,9
7	4,6	0,0	4,6	3,4	-3,1	4,6	3,4	3,0	4,5	-1,0	-0,6	1,2	-1,0	0,6	1,2
8	6,3	0,0	6,3	4,7	-4,1	6,2	4,7	4,1	6,2	-1,4	-0,9	1,7	-1,4	0,9	1,7
9	5,2	0,0	5,2	4,0	-3,6	5,4	3,9	3,6	5,3	-1,1	-0,8	1,4	-1,1	0,8	1,4
10	6,9	0,0	6,9	5,3	-4,6	7,0	5,3	4,6	7,0	-1,7	-1,0	2,0	-1,7	1,0	2,0
11	8,3	0,0	8,3	6,6	-6,3	9,1	6,5	6,3	9,1	-1,9	-1,3	2,3	-1,9	1,2	2,2
12	9,4	0,0	9,4	7,7	-7,3	10,6	7,7	7,3	10,6	-2,0	-1,3	2,4	-2,1	1,2	2,4
13	4,9	0,0	4,9	3,6	-3,3	4,9	3,6	3,2	4,8	-1,0	-0,7	1,2	-1,0	0,7	1,2
14	5,2	0,0	5,2	3,9	-3,7	5,4	3,9	3,7	5,4	-1,1	-0,8	1,4	-1,1	0,8	1,4
15	5,4	0,0	5,4	4,0	-3,9	5,6	4,0	3,9	5,6	-1,1	-0,8	1,4	-1,1	0,8	1,4
16	7,5	0,0	7,5	5,8	-4,7	7,5	5,7	4,6	7,3	-1,8	-1,0	2,1	-1,8	1,1	2,1
17	8,1	0,0	8,1	6,1	-5,5	8,2	6,1	5,5	8,2	-1,8	-1,2	2,2	-1,9	1,2	2,2
18	8,5	0,0	8,5	6,8	-6,5	9,4	6,6	6,5	9,3	-2,1	-1,3	2,5	-2,1	1,3	2,5
19	7,1	0,0	7,1	5,5	-5,3	7,6	5,4	5,2	7,5	-1,5	-1,0	1,8	-1,5	1,1	1,9
20	7,9	0,0	7,9	6,1	-5,8	8,4	6,0	5,8	8,3	-1,7	-1,2	2,1	-1,8	1,2	2,2
21	5,8	0,0	5,8	4,4	-4,6	6,4	4,3	4,5	6,2	-1,3	-0,8	1,5	-1,3	0,8	1,5
22	8,1	0,0	8,1	6,3	-5,5	8,4	6,1	5,6	8,3	-1,9	-1,2	2,2	-1,9	1,2	2,2
23	6,0	0,0	6,0	4,6	-4,6	6,5	4,6	4,6	6,5	-1,4	-0,9	1,7	-1,4	0,9	1,7
24	8,8	0,0	8,8	7,0	-6,5	9,6	6,8	6,5	9,4	-2,1	-1,3	2,5	-2,1	1,3	2,5
25	6,6	0,0	6,6	5,0	-5,1	7,1	5,1	5,1	7,2	-1,4	-0,9	1,7	-1,4	0,9	1,7
26	7,8	0,0	7,8	6,4	-6,1	8,8	6,2	6,1	8,7	-1,6	-1,8	2,4	-1,6	1,0	1,9
27	5,3	0,0	5,3	4,0	-3,6	5,4	3,9	3,6	5,3	-1,2	-0,8	1,4	-1,2	0,8	1,4
28	6,0	0,0	6,0	4,4	-4,0	5,9	4,5	4,0	6,0	-1,3	-0,8	1,5	-1,3	0,8	1,5
29	6,1	0,0	6,1	4,6	-4,5	6,4	4,6	4,5	6,4	-1,4	-0,9	1,7	-1,4	0,9	1,7
30	6,3	0,0	6,3	4,8	-4,6	6,6	4,8	4,6	6,6	-1,3	-0,9	1,6	-1,4	0,9	1,7
min.			4,6			4,6			4,5			1,2			1,2
max.			9,4			10,6			10,6			2,5			2,5
průměr			6,8			7,1			7,1			1,8			1,8



Obr. 53: Interakční diagram – průřez z mladého betonu

Tab. 21: Posouzení pro jednotlivé modely – mladý beton

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	01	-264,60	25,00	0,00	0,00	0,00	29,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,58	0,00	0,00	0,00		
2	02	-272,20	25,50	0,00	0,00	0,00	30,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,54	0,00	0,00	0,00		
3	03	-276,60	24,40	0,00	0,00	0,00	28,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,50	0,00	0,00	0,00		
4	04	-275,40	26,60	0,00	0,00	0,00	31,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,51	0,00	0,00	0,00		

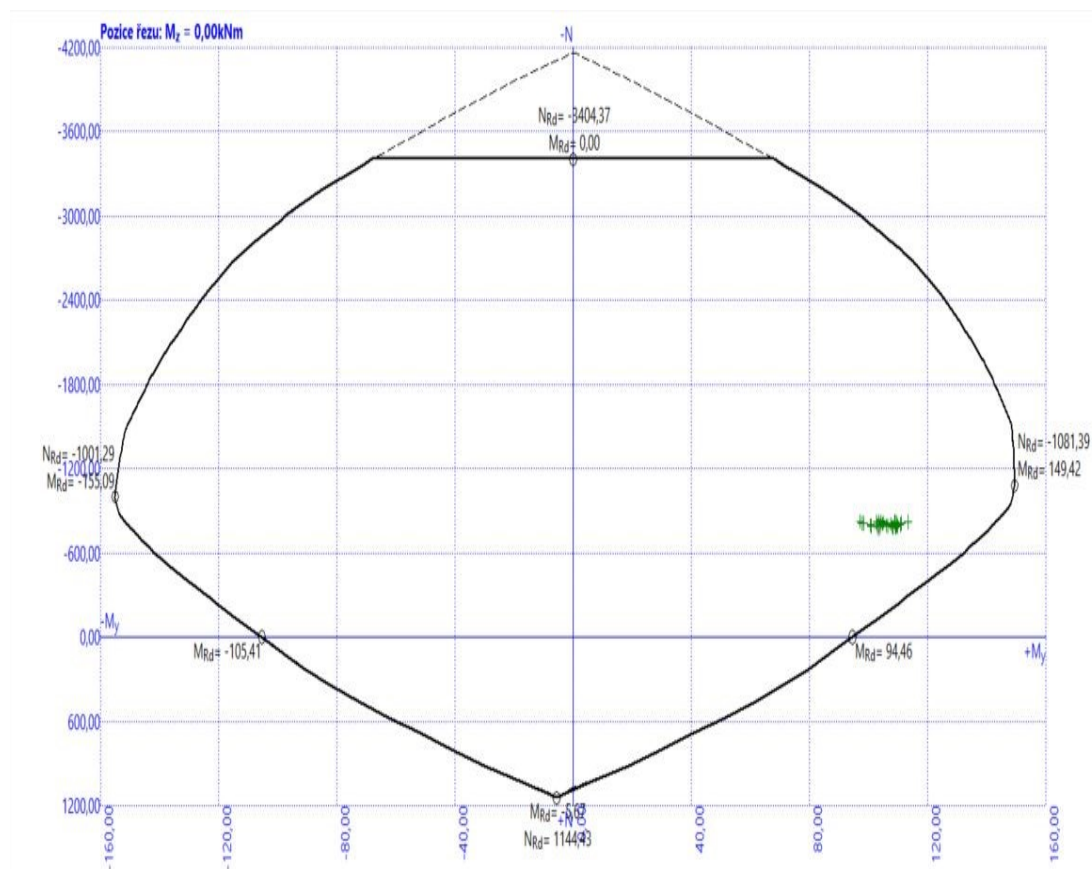
Tab. 21 – pokračování

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
5	05	-272,80	26,30	0,00	0,00	0,00	31,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,53	0,00	0,00	0,00		
6	06	-274,50	25,70	0,00	0,00	0,00	30,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,52	0,00	0,00	0,00		
7	07	-261,10	25,10	0,00	0,00	0,00	29,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,60	0,00	0,00	0,00		
8	08	-270,90	26,30	0,00	0,00	0,00	31,3	Vyhovuje
		-1815,83	82,54	0,00	0,00	0,00		
9	09	-265,80	26,20	0,00	0,00	0,00	31,1	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
10	10	-274,90	26,90	0,00	0,00	0,00	32,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,51	0,00	0,00	0,00		
11	11	-281,10	25,70	0,00	0,00	0,00	30,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,46	0,00	0,00	0,00		
12	12	-281,90	24,60	0,00	0,00	0,00	29,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,46	0,00	0,00	0,00		
13	13	-262,80	25,90	0,00	0,00	0,00	30,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,59	0,00	0,00	0,00		
14	14	-265,30	25,80	0,00	0,00	0,00	30,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
15	15	-265,80	25,70	0,00	0,00	0,00	30,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
16	16	-277,80	27,40	0,00	0,00	0,00	32,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,49	0,00	0,00	0,00		
17	17	-280,80	26,60	0,00	0,00	0,00	31,6	Vyhovuje
		-1815,83	82,46	0,00	0,00	0,00		
18	18	-282,00	25,80	0,00	0,00	0,00	30,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,45	0,00	0,00	0,00		
19	19	-274,30	25,20	0,00	0,00	0,00	29,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,52	0,00	0,00	0,00		
20	20	-278,90	25,80	0,00	0,00	0,00	30,7	Vyhovuje
		-1815,83	82,48	0,00	0,00	0,00		
21	21	-265,80	24,40	0,00	0,00	0,00	28,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
22	22	-281,20	26,70	0,00	0,00	0,00	31,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,46	0,00	0,00	0,00		
23	23	-268,70	25,20	0,00	0,00	0,00	29,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,56	0,00	0,00	0,00		
24	24	-283,20	26,10	0,00	0,00	0,00	31,0	Vyhovuje
		-1815,83	82,44	0,00	0,00	0,00		
25	25	-269,70	24,40	0,00	0,00	0,00	28,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		
26	26	-275,50	24,40	0,00	0,00	0,00	28,9	Vyhovuje
		-1815,83	82,51	0,00	0,00	0,00		
27	27	-265,80	25,70	0,00	0,00	0,00	30,5	Vyhovuje
		-1815,83	82,57	0,00	0,00	0,00		
28	28	-269,20	25,90	0,00	0,00	0,00	30,8	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		
29	29	-270,10	25,40	0,00	0,00	0,00	30,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		
30	30	-270,00	25,40	0,00	0,00	0,00	30,2	Vyhovuje
		-1815,83	82,55	0,00	0,00	0,00		

Mezní stav únosnosti VYHOVUJE - 32,6 %

Celkové posouzení - Průřez VYHOVUJE

Využití: 32,6 %



Obr. 54: Interakční diagram – průřez z vyzrálého betonu

Tab. 22: Posouzení pro jednotlivé modely – vyzrálý beton

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
1	01	-787,60	103,40	0,00	0,00	0,00	73,0	Vyhovuje
		-4166,67	141,66	0,00	0,00	0,00		
2	02	-806,60	107,50	0,00	0,00	0,00	75,5	Vyhovuje
		-4166,67	142,47	0,00	0,00	0,00		
3	03	-812,70	97,70	0,00	0,00	0,00	68,5	Vyhovuje
		-4166,67	142,73	0,00	0,00	0,00		
4	04	-811,80	109,60	0,00	0,00	0,00	76,8	Vyhovuje
		-4166,67	142,69	0,00	0,00	0,00		

Tab. 22 – pokračování

č.	Název	N_{Ed} N_{Rd} [kN]	M_{Edy} M_{Rdy} [kNm]	M_{Edz} M_{Rdz} [kNm]	V_{Edz} V_{Rdz} [kN]	V_{Edy} V_{Rdy} [kN]	Využití [%]	Posouzení
5	05	-806,50	110,70	0,00	0,00	0,00	77,7	Vyhovuje
		-4166,67	142,46	0,00	0,00	0,00		
6	06	-808,90	107,50	0,00	0,00	0,00	75,4	Vyhovuje
		-4166,67	142,57	0,00	0,00	0,00		
7	07	-780,00	109,20	0,00	0,00	0,00	77,3	Vyhovuje
		-4166,67	141,34	0,00	0,00	0,00		
8	08	-803,00	110,70	0,00	0,00	0,00	77,8	Vyhovuje
		-4166,67	142,32	0,00	0,00	0,00		
9	09	-790,40	108,90	0,00	0,00	0,00	76,8	Vyhovuje
		-4166,67	141,78	0,00	0,00	0,00		
10	10	-811,00	111,00	0,00	0,00	0,00	77,8	Vyhovuje
		-4166,67	142,66	0,00	0,00	0,00		
11	11	-822,30	102,70	0,00	0,00	0,00	71,8	Vyhovuje
		-4166,67	143,14	0,00	0,00	0,00		
12	12	-824,20	97,10	0,00	0,00	0,00	67,8	Vyhovuje
		-4166,67	143,22	0,00	0,00	0,00		
13	13	-784,10	108,30	0,00	0,00	0,00	76,5	Vyhovuje
		-4166,67	141,51	0,00	0,00	0,00		
14	14	-789,50	108,00	0,00	0,00	0,00	76,2	Vyhovuje
		-4166,67	141,74	0,00	0,00	0,00		
15	15	-790,30	106,40	0,00	0,00	0,00	75,0	Vyhovuje
		-4166,67	141,78	0,00	0,00	0,00		
16	16	-819,60	113,30	0,00	0,00	0,00	79,2	Vyhovuje
		-4166,67	143,02	0,00	0,00	0,00		
17	17	-822,80	108,70	0,00	0,00	0,00	75,9	Vyhovuje
		-4166,67	143,16	0,00	0,00	0,00		
18	18	-824,20	103,50	0,00	0,00	0,00	72,3	Vyhovuje
		-4166,67	143,22	0,00	0,00	0,00		
19	19	-807,30	104,80	0,00	0,00	0,00	73,5	Vyhovuje
		-4166,67	142,50	0,00	0,00	0,00		
20	20	-817,30	104,90	0,00	0,00	0,00	73,4	Vyhovuje
		-4166,67	142,92	0,00	0,00	0,00		
21	21	-790,00	100,80	0,00	0,00	0,00	71,1	Vyhovuje
		-4166,67	141,76	0,00	0,00	0,00		
22	22	-823,80	109,10	0,00	0,00	0,00	76,2	Vyhovuje
		-4166,67	143,20	0,00	0,00	0,00		
23	23	-795,80	103,00	0,00	0,00	0,00	72,5	Vyhovuje
		-4166,67	142,01	0,00	0,00	0,00		
24	24	-826,60	104,20	0,00	0,00	0,00	72,7	Vyhovuje
		-4166,67	143,32	0,00	0,00	0,00		
25	25	-798,10	100,70	0,00	0,00	0,00	70,9	Vyhovuje
		-4166,67	142,11	0,00	0,00	0,00		
26	26	-810,90	98,30	0,00	0,00	0,00	68,9	Vyhovuje
		-4166,67	142,65	0,00	0,00	0,00		
27	27	-791,10	109,90	0,00	0,00	0,00	77,5	Vyhovuje
		-4166,67	141,81	0,00	0,00	0,00		
28	28	-798,40	109,40	0,00	0,00	0,00	77,0	Vyhovuje
		-4166,67	142,12	0,00	0,00	0,00		
29	29	-799,60	106,00	0,00	0,00	0,00	74,6	Vyhovuje
		-4166,67	142,17	0,00	0,00	0,00		
30	30	-798,50	104,00	0,00	0,00	0,00	73,2	Vyhovuje
		-4166,67	142,12	0,00	0,00	0,00		

Mezní stav únosnosti VYHOVUJE - 79,2 %

Celkové posouzení - Průřez VYHOVUJE

Využití: 79,2 %

10 Porovnání výsledků s hodnotami naměřenými během výstavby

10.1 Monitoring během stavby

Během výstavby kolektoru Hlávkův most probíhal v dotčené oblasti rozsáhlý geotechnický monitoring, v podzemí i na povrchu. V rámci tohoto monitoringu byla prováděna měření a sledování:

- zaměřování geodetických bodů na terénu
- měření deformací objektů nadzemí zástavby
- sledování a měření poruch nadzemní zástavby
- konvergenční měření profilů
- zkoušky kvality betonu
- dynamická a akustická měření
- geotechnická sledování čelby
- geofyzikální měření
- měření napětí primárního ostění
- měření hladiny vody
- geoelektrická korozní měření
- monitoring proplachovacího kanálu

V průběhu provádění stavby byly výsledky jednotlivých měření dostupné online pro dotčené osoby, tedy pro projektanta, správce stavby, zástupce stavebníka a firmu zodpovědnou za provádění. [28]

10.2 Konvergenční měření

Konvergenční měření profilů probíhala při provádění stavby kolektoru v jednotlivých šachtách a ve štole kolektorové trasy. V kruhových šachtách J101, J102 a J103 probíhala měření pomocí tří konvergenčních bodů, v elipsově šachtě J104 pomocí čtyř bodů. Měření profilů viditelných z povrchu probíhala optickým trigonometrickým měřením, ostatní profily byly měřeny dálkoměrem. Konvergenční profily v trase a v technických komorách byly měřeny optickým trigonometrickým měřením. [28]

V rámci statického návrhu stavby byly definovány varovné a havarijní stavy pro jednotlivé části stavby. Těchto varovných stavů nebylo v trase kolektoru, v šachtách ani v technických komorách dosaženo, s výjimkou čtyř bodů, kde došlo k mechanickému posunutí měřených bodů. Na základě vyhodnocení konvergenčních měření na sledovaných konvergenčních profilech v šachtách a na sledovaných

konvergenčních profilech v kolektorové trase nebylo nutno navrhnout žádná opatření. [28]

10.3 Porovnání výsledků modelování s hodnotami naměřenými během monitoringu

V rámci simulací byl pro model MKP využit profil trasy se staničním 220,50 m, což odpovídá konvergenčnímu profilu 05.20. Pro tento profil byly definovány varovné stavy dle tab. 23.

Tab. 23: Varovné stavy pro profil 05.21 trasy [28]

	Varovný stav [mm]					
	70 %		100 %		130 %	
	xy	z	xy	z	xy	z
Bod 01	±10,5	±28,0	±15,0	±40,0	±19,5	±52,0
Body 02 až 05	±21,0	±24,5	±30,0	±35,0	±39,0	±45,5

Tyto varovné stavy byly definovány v závislosti na umístění měřeného konvergenčního bodu na profilu trasy. Pro bod 01 umístěný ve vrcholu kaloty profilu byly vyžadovány přísnější podmínky pro pohyb ve směrech x a y, ale ve směru z, kde bylo možné předpokládat největší pohyb, dle umístění, byly naopak podmínky volnější, než pro ostatní body v opěří kolektoru.

Tab. 24: Maximální celkové naměřené hodnoty [28]

	naměřená hodnota [mm]	
	xy	z
Bod 01	3,2	4,5
Body 02 až 05	4,9	6,0

V rámci modelování bylo provedeno třicet simulací za využití modelu Mohr-Coulomb a třicet simulací za využití modelu Drucker-Prager. Výsledné maximální a minimální hodnoty posunů odečtených z jednotlivých monitorů a rozdíly mezi hodnotami naměřenými během provádění se nacházejí v tab. 25 a tab. 26.

Tab. 25: Maximální a minimální hodnoty odečtené z monitorů a jejich rozdíly od hodnot naměřených v rámci monitoringu – model Mohr-Coulomb

	posun ve směru x [mm]		posun ve směru z [mm]	
	min.	max.	min.	max.
Bod 1	0,0	0,0	3,8	6,8
Body 2 až 5	0,4	4,5	0,8	5,1
	Δ posunů ve směru x [mm]		Δ posunů ve směru z [mm]	
	min.	max.	min.	max.
Bod 1	-3,2	-3,2	-0,7	2,3
Body 2 až 5	-4,5	-0,4	-5,2	-0,9

Tab. 26: Maximální a minimální hodnoty odečtené z monitorů a jejich rozdíly od hodnot naměřených v rámci monitoringu – model Drucker-Prager

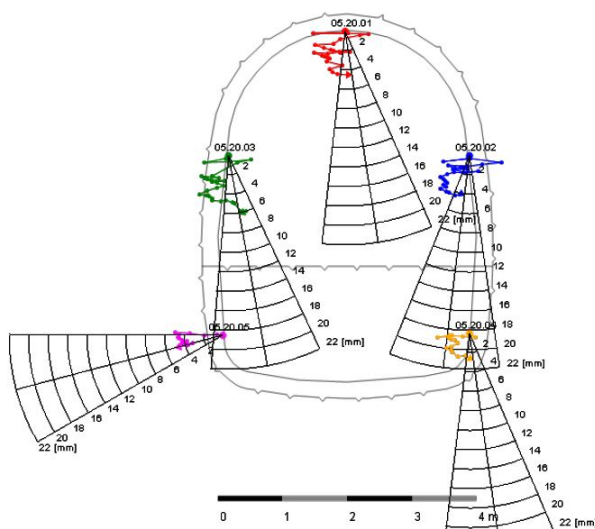
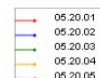
	posun ve směru x [mm]		posun ve směru z [mm]	
	min.	max.	min.	max.
Bod 1	0,0	0,0	4,6	9,4
Body 2 až 5	0,6	7,3	1,0	7,7

	Δ posunů ve směru x [mm]		Δ posunů ve směru z [mm]	
	min.	max.	min.	max.
Bod 1	-3,2	-3,2	0,1	4,9
Body 2 až 5	-4,3	2,4	-5,0	1,7

Z těchto tabulek by bylo možné předpokládat, že Drucker-Pragerův model vystihuje zastižené prostředí o trochu přesněji, protože hodnoty naměřené během monitoringu provádění stavby o něco lépe spadají do intervalu vytyčeného minimálními a maximálními posuny za použití tohoto modelu. Tento předpoklad není ale úplně průkazný, uvážíme-li, že modely MKP tohoto typu nejsou schopny vystihnout pohyb monitorů ve směru osy ražby, navíc je zde nutné uvážit možné nepřesnosti.

Zobrazení hodnot měření objektu: 05.20-TRI

Zobrazeny posuny v osách Y / Z. Pohled je ve směru ražby
 Jednotky posunu: [mm]
 Datum prvního měření: 25.10.2016
 Datum posledního měření: 29.10.2017



Obr. 55: Zobrazení hodnot měření objektu 05.20 [28]

11 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést pravděpodobnostní analýzu vybraného profilu kolektoru Hlávkův most pomocí metody latinských hylekrychlí a ověřit vhodnost jejího použití. Tato analýza byla provedena pomocí metody LHS – median za použití při proměnných veličin pro čtyři různé vrstvy skalního podloží, tedy celkem pro dvanáct proměnných pro každou simulaci. Celkem bylo provedeno třicet simulací modelu vytvořeného v programu GEO5. Tyto simulace proběhly za užití materiálového modelu Mohr-Coulomb a následně pro porovnání za užití modelu Drucker-Prager.

Následně byly použity maximální vnitřní síly z jednotlivých modelů pro posouzení navrženého primárního ostění pomocí programu Beton FIN EC. V rámci tohoto posouzení bylo prokázáno, že konstrukce bude ve všech případech rozumně využita, přibližně na 75 až 87 % pro vnitřní síly ze simulací užívajících materiálový model Mohr-Coulomb a na 68 až 80 % při užití model Drucker-Prager.

V závěrečné části práce proběhlo porovnání posunutí, které bylo odečteno z monitorů na ostění kolektoru při jednotlivých simulacích, s měřeními konvergenčního profilu během realizace stavby kolektoru Hlávkův most. V rámci tohoto porovnání byla prokázána jistá souvislost mezi naměřenými veličinami a hodnotami získanými z modelů programu GEO5. Dle měření z provádění by bylo možné uvažovat za o trochu vhodnější materiálový model Drucker-Prager pro zastižené prostředí.

Pro další rozvoj práce by bylo vhodné provést obdobnou pravděpodobnostní analýzu ve více řezech kolektoru pro prokázání vhodnosti a správnosti užití. Obecně lze ale říct, že i přes velkou časovou náročnost a chybějící rozsáhlejší implementaci do současného softwaru i legislativy, pravděpodobnostní metody mají rozhodně v geotechnice své významné místo, protože zde pracujeme se složitým a často velmi proměnlivým prostředím s velkou variabilitou vlastností.

Seznam literatury

- [1] ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí: část 1: Obecná pravidla = Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules
- [2] HILAR M., PRUŠKA J., Využití statistiky pro numerické modelování podzemních staveb, Geotechnické problémy líniových staveb, Bratislava 30. - 31. máj 2011
- [3] HRUBEŠOVÁ, Eva. Možnosti využití stochastického modelování při řešení úloh geotechnického a podzemního stavitelství. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006, 73 - 82. ISSN 1213-1962.
- [4] BOSÁK, Juraj. *Latinské štvorce*. Praha: Mladá fronta, 1976. ISBN (nev.)
- [5] SVOBODA, Tomáš, HILAR, Matouš. Pravděpodobnostní analýza metodou Latin Hypercube Sampling. *Tunel*. 2012, **21. ročník** (4/2012), 80-89.
- [6] SVOBODA, T.; HILAR, M. Pravděpodobnostní analýzy metodou Latin Hypercube Sampling. 2012.
- [7] VOŘECHOVSKÝ, M. Možnosti a vylepšení simulační metody LHS. In *4. Odborný seminář doktorského studia*. Brno: VUT v Brně, 2002. s. 1 (s.) ISBN: 80-214-2067- 7
- [8] PETRIK, Tomas, HRUBESOVA, Eva, MOHYLA, Marek. The use of stochastic simulation method Latin Hypercube Sampling in the study of the response of soil exposed to dynamic load. *14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: Section Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics.*, 971 – 978

- [9] PRUŠKA, Jan, VRBATA Jan. Application of Latin Hypercube Sampling method in tunnel analyses. *14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: Section Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics.*, 93 – 100
- [10] VOŘECHOVSKÝ, M. Nové úpravy simulační metody Latin Hypercube Sampling a možnosti využití. In *Problémy modelování*. Ostrava: VUT v Brně, 2002. s. 83 (s.)
- [11] HILAR, Matouš. *Numerická analýza tektonicky porušeného horninového masivu s primární výstrojí při aplikaci NRTM*. Praha, 2000. Doktorská disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [12] SOCHŮREK, Jan; et al. Pražský kolektorový systém. *Stavebnictví* **2019**, 19 (10), 26–32.
- [13] RÁČEK, Václav; et al. Stavba č. 8615: Kolektoru Hlávkův most, I. díl. *Stavebnictví*, **2019**, 19 (12), 52–62.
- [14] ŠVEC, Daniel; RÁČEK, Václav; et al. Stavba č. 8615: Kolektoru Hlávkův most, II. díl. *Stavebnictví* **2020**, 20 (01-02), 50–59.
- [15] DOHNÁLEK, Václav, KOZUBÍK Radek, ŠPETA Martin. Kolektor Hlávkův most – zkušenosti po zahájení ražeb. *Tunel*. 2017, **26. ročník** (4), 4 - 16.
- [16] KOZUBÍK, Radek, Václav DOHNÁLEK, Václav RÁČEK a Jaromír ZLÁMAL. *Kolektor Hlávkův most - nová řešení při projektování a výstavbě*. 2018, **27. ročník** (3), 4 – 17
- [17] CHMELÁŘ, R., J. MAŠKOVÁ a Z. LUKÁŠ. *Podrobný inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum stavba č. 8615, Kolektor Hlávkův most*. PUDIS a.s., Praha, 2006
- [18] *Rekonstrukce Hlávkova mostu přes Vltavu v Praze – podrobný inženýrsko-geologický průzkum pro DSP*, PUDIS a.s., 2015, MS ČGS-Geofond – GF P145956

- [19] *Modernizace rejd plavební komory Štvanice – Podrobný inženýrskogeologický průzkum*, Stavební geologie – IGHG, spol. s.r.o., Tachlovice, 2014, MS ČGS-Geofond – GF P143170
- [20] ZÁRUBA, Quido. *Geologický podklad a základové poměry vnitřní Prahy*. Praha: Státní geologický ústav Československé republiky, 1948. ISBN (nev.).
- [21] BARTÁK, Jiří a Jan PRUŠKA. *Podzemní stavby*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04789-7
- [22] ŠEJNOHA, Michal, Jan PRUŠKA, Tomáš JANDA a Miroslav BROUČEK. *Metoda konečných prvků v geomechanice: teoretické základy a inženýrské aplikace*. Praha: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05743-8.
- [23] HILAR, Matouš. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. ISBN 978-80-254-1262-6.
- [24] Metoda konečných prvků (MKP) – úvod: Inženýrský manuál č. 20. *Fine* [online]. Praha: Fine spol. s r.o., 2005, Aktualizace 02/2020 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/gegeotegeote-softwsof/mmk/>
- [25] Namáhání ostění kolektoru: Inženýrský manuál č. 23. *Fine* [online]. Praha: Fine spol. s r.o., 2005, Aktualizace 03/2020 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/geotechnicky-software/mkp/>
- [26] Numerické modelování tunelu metodou NRTM: Inženýrský manuál č. 26. *Fine* [online]. Praha: Fine spol. s r.o., 2005, Aktualizace 09/2020 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/gegeotegeote-softwsof/mmk/>
- [27] BRINKGREVE, R. B. J., VERMEER, P. A., *Plaxis – finite element code for soil and rock analysis – version 7. – Plaxis*. Rotterdam, Netherland, 1998
- [28] DOSTÁL, Bohuslav, *Stavba č. 8615 Kolektor Hlávkův most Geotechnický monitoring*, INSET s.r.o., Divize specializovaných prací, Praha, 2019

Použitý software

Microsoft Excel

Geotechnický software GEO5, Fine

AutoCAD, Autodesk

Beton FIN EC Software

Seznam obrázků

- Obr. 1: Postup výběru vzorků pro metodu LHS – mean [2]
- Obr. 2: Postup výběru vzorků pro metodu LHS – median [2]
- Obr. 3: Kolektorová síť v centru Prahy [12]
- Obr. 4: 3D situace kolektoru Hlávkův most [14]
- Obr. 5: Podélný řez kolektorem Hlávkův most [14]
- Obr. 6: 3D vizualizace trasy [14]
- Obr. 7: Ražba pomocí razicího stroje s frézou na výložníku [15]
- Obr. 8: Ražená technická komora TK101 – provádění primárních a definitivních konstrukcí – propoj k šachtě J101 [13]
- Obr. 9: Ražená technická komora TK101 – provádění primárních a definitivních konstrukcí – propoj k šachtě J101 [13]
- Obr. 10: Ražená technická komora TK101 – provádění primárních a definitivních konstrukcí – propoj k šachtě J101 [13]
- Obr. 11: Odbočná větev – provádění výkopů [13]
- Obr. 12: Odbočná větev – armování definitivního ostění [13]
- Obr. 13: Ražená kolektorová trasa s mezilehlou izolací [16]
- Obr. 14: Šachta J104 s instalovanými spárovými pásy a mezilehlou izolací [13]
- Obr. 15: Pohled do automatické bednicí formy [16]
- Obr. 16: Pohled do automatické bednicí formy [13]
- Obr. 17: Pohled na definitivní konstrukci po odbednění [13]
- Obr. 18: Tuhá prostorová konstrukce [16]
- Obr. 19: Pohled na definitivní konstrukci šachty [13]
- Obr. 20: Vrtná souprava – pohled ze Štvanice [16]
- Obr. 21: Vrtná souprava – pohled z Hlávkova mostu [17]
- Obr. 22: Výstavba plavební komory [19]

- Obr. 23: Vrt J5 – hloubka 0 až 11 m [17]
Obr. 24: Vrt J5 – hloubka 8 až 20,5 m [17]
Obr. 25: Příčný řez – typový rám BRETEX
Obr. 26: Charakteristický příčný řez – primární ostění
Obr. 27: Model – přiřazení zemin
Obr. 28: Výsledek generování sítě
Obr. 29: Schéma modelování změn napětí v okolí kolektoru pomocí β metody [27]
Obr. 30: Aktivace v druhé fázi výpočtu – Model 1
Obr. 31: Aktivace v třetí fázi výpočtu – Model 1
Obr. 32: Aktivace ve třetí fázi výpočtu – Model 1
Obr. 33: Schéma bodových monitorů
Obr. 34: Model 1 – výpočtová fáze 3 – ohybový moment
Obr. 35: Model 1 – výpočtová fáze 3 – normálová síla
Obr. 36: Model 1 – výpočtová fáze 4 – ohybový moment
Obr. 37: Model 1 – výpočtová fáze 4 – normálová síla
Obr. 38: Model 1 – výpočtová fáze 7 – ohybový moment
Obr. 39: Model 1 – výpočtová fáze 7 – normálová síla
Obr. 40: Model 1 – výpočtová fáze 8 – ohybový moment
Obr. 41: Model 1 – výpočtová fáze 8 – normálová síla
Obr. 42: Model 1 – výpočtová fáze 4 – svislé efektivní napětí
Obr. 43: Model 1 – výpočtová fáze 8 – svislé efektivní napětí
Obr. 44: Model 1 – výpočtová fáze 4 – výslednice posunutí
Obr. 45: Model 1 – výpočtová fáze 8 – výslednice posunutí
Obr. 46: Model 1 – měřená posunutí odečtená z jednotlivých monitorů
Obr. 47: Schéma posuzovaného průřezu
Obr. 48: Schéma vyztužení průřezu
Obr. 49: Interakční diagram – průřez z mladého betonu
Obr. 50: Schéma posuzovaného průřezu
Obr. 51: Schéma vyztužení průřezu
Obr. 52: Interakční diagram – průřez z vyzrálého betonu
Obr. 53: Interakční diagram – průřez z mladého betonu
Obr. 54: Interakční diagram – průřez z vyzrálého betonu
Obr. 55: Zobrazení hodnot měření objektu 05.20 [28]

Seznam tabulek

- Tab. 1: Permutační tabulka pro počet simulací N pro proměnné veličiny X_1 až X_i
- Tab. 2: Nové průzkumné vrty [17]
- Tab. 3: Doporučené geotechnické charakteristiky zemin pokrývných útvarů – Kolektor Hlávkův most [17]
- Tab. 4: Doporučené geotechnické charakteristiky hornin skalního podloží – Kolektor Hlávkův most [17]
- Tab. 5: Vstupní rozmezí proměnných parametrů
- Tab. 6: Permutační tabulka
- Tab. 7: Dílčí intervaly proměnných pro metodu LHS
- Tab. 8: Vstupní hodnoty reprezentující jednotlivé dílčí intervaly
- Tab. 9: Parametry získané metodou LHS pro jednotlivé modely MKP
- Tab. 10: Zlepšení soudržnosti horniny vlivem svorníkové výztuže
- Tab. 11: Posuny měřené v monitorech 1 až 5 pro modely 1 až 30
- Tab. 12: Vnitřní síly z jednotlivých simulací
- Tab. 13: Vnitřní návrhové síly z jednotlivých simulací
- Tab. 14: Posouzení pro jednotlivé modely – mladý beton
- Tab. 15: Posouzení pro jednotlivé modely – vyzrálý beton
- Tab. 16: Porovnání posunů v monitorech z různých modelů
- Tab. 17: Vnitřní síly z jednotlivých simulací
- Tab. 18: Porovnání maximálních vnitřních sil z různých modelů – mladý beton
- Tab. 19: Porovnání maximálních vnitřních sil z různých modelů – vyzrálý beton
- Tab. 20: Posuny měřené v monitorech 1 až 5 pro modely 1 až 30 – model Drucker-Prager
- Tab. 21: Posouzení pro jednotlivé modely – mladý beton
- Tab. 22: Posouzení pro jednotlivé modely – vyzrálý beton
- Tab. 23: Varovné stavy pro profil 05.21 trasy [28]
- Tab. 24: Maximální celkové naměřené hodnoty [28]
- Tab. 25: Maximální a minimální hodnoty odečtené z monitorů a jejich rozdíly od hodnot naměřených v rámci monitoringu – model Mohr-Coulomb
- Tab. 26: Maximální a minimální hodnoty odečtené z monitorů a jejich rozdíly od hodnot naměřených v rámci monitoringu – model Drucker-Prager

Seznam příloh

- Příloha 1 Vnitřní síly z modelů MKP
- Příloha 2 Napětí a posuny z modelů MKP
- Příloha 3 Podrobný výpočet – průřez z mladého betonu
- Příloha 4 Podrobný výpočet – průřez z vyzrálého betonu
- Příloha 5 Výstup z modelů MKP – Drucker-Prager
- Příloha 6 Podrobný výpočet – průřez z mladého betonu
- Příloha 7 Podrobný výpočet – průřez z vyzrálého betonu