

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství



Disertační práce

Problematika primárního ocelobetonového ostění podzemních děl

Contribution to Design of Primary Tunnel Lining from Steel-Shotcrete Structure

Předkládá: Ing. Marek Mohyla
Školitel: doc. Ing. Vojtasík Karel, CSc.
Studijní obor: Geotechnika
Místo, datum: Ostrava, září 2016

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3950-9

Abstrakt

Práce představuje alternativní postup, který dovoluje při návrhu primárního ostění realizovaného pomocí numerického modelování zohlednit jeho specifické vlastnosti. Primární ostění, tak, jak je konstrukčně chápáno dle základních principů Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) se vyznačuje časově závislou pracovní-deformační charakteristikou, která je daná jeho konstrukcí. Hlavním konstrukčním prvkem je stříkaný beton, který již krátce po aplikaci zajišťuje statické spolupůsobení s obklopujícím masivem, které se během ražby díla vyvíjí do doby dosažení rovnovážného napěťo-deformačního stavu systému „hornina – ostění“. Během této doby se zmíněné statické spolupůsobení mění v závislosti na tuhnutí stříkaného betonu, reologických vlastnostech masivu a dalších okolnostech.

Způsob vyztužení primárního ostění je specifický rozložením ocelové výztuže v ploše průřezu. Kromě výztužných sítí, které jsou v průřezu ostění rozloženy rovnoměrně, se používají také výztužné obloukové nosníky. Tyto nosníky jsou osazovány s osovou vzdáleností většinou totožnou s délkou zabírky, následkem čehož dojde k nerovnoměrnému vyztužení průřezu. Takovouto konstrukci pak není možné, v případě nutnosti zohlednění výztužných ocelových oblouků, posoudit jako konstrukci železobetonovou běžným postupem dle EC2. Situace je alternativně řešena užitím principů využívaných při návrhu spřažených ocelobetonových konstrukcí, nebo jinými alternativními postupy.

Postup představený v práci dovoluje zohlednění výše zmíněných specifík primárního ostění uživatelsky přívětivou alternativou. V rámci řešení je využíván software *Homogenizace*, který vznikl na půdě Fakulty stavební, Katedry geotechniky a podzemního stavitelství. Tento software dovoluje zohlednění heterogenní struktury ostění formou jeho nahrazení průřezem homogenním. Do numerických modelů tak vstupují parametry primárního ostění homogenního, ve kterém je zohledněna přítomnost ocelové výztuže a časově závislých vlastností stříkaného betonu.

Klíčová slova

Tunelové stavby, primární ostění, stříkaný beton, homogenizace průřezu, numerické modelování.

Abstract

The paper presents an alternative procedure that allows the specific characteristics of primary lining implemented using numerical modelling to be taken into account during its design. Primary lining, as it is structurally construed in accordance with the fundamental principles of the New Austrian Tunneling Method (NATM), is characterized by a time-dependent deformation property, which is determined by its design. The main design element is shotcrete, which, shortly after its application, provides structural interaction with the surrounding rock mass, which develops during the excavation until reaching the equilibrium stress-strain state of “rock mass – tunnel lining”. During this time, the structural interaction varies depending on the hardening of shotcrete, the rheological properties of rock mass, and other circumstances.

The method to reinforce the primary lining is specific due to the distribution of steel reinforcement over the cross-sectional area. In addition to reinforcement meshes, which are evenly distributed in the cross-section of the lining, use is also made of reinforcing arched beams. These beams are fitted with an axial distance which is generally identical to the length of the burden, which consequently leads to uneven reinforcement of the cross-section. If it is necessary to take account of the reinforcing steel arches, such a structure then cannot be assessed as a reinforced concrete structure under the common Eurocode 2 procedure. As an alternative solution, use is made of the principles applied in the design of composite steel and concrete structures, or other alternative procedures.

The procedure introduced in the paper provides a user-friendly alternative to take account of the above specific properties of primary lining. The solution uses the software Homogenization, developed by the Faculty of Civil Engineering, Department of Geotechnics and Underground Engineering. This software allows taking account of the heterogeneous structure of the lining by its replacement with a homogenous cross section. As a result, the parameters of homogeneous primary lining, which takes account of the presence of steel reinforcements and the time-dependent property of shotcrete, are included in numerical models.

Keywords

Tunnel construction, tunnel lining, shotcrete, homogenization of cross-section, numerical modelling.

Poděkování

Autor děkuje vedoucímu disertační práce panu doc. Ing. Karlu Vojtasíkovi, CSc., vedoucí Katedry geotechniky a podzemního stavitelství paní doc. RNDr. Evě Hrubéšové, Ph.D. a ostatním členům katedry.

Dále patří poděkování za finanční podporu projektům studentské grantové soutěže (SP/201022, SP2011/37, SP2013/140, SP2014/164), kterou poskytlo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy.

Největší díky za ochotu a shovívavost však patří rodině autora: rodičům, dcerám Nikolce, Elišce a jejich mamince, manželce Lucii.

Obsah

1 Úvod	8
2 Stručný přehled současného stavu	10
3 Cíle disertační práce	12
4 Teorie spolupracujících prstenců	13
5 Software Homogenizace	17
6 Aplikace softwaru Homogenizace v prostorovém modelu tunelového ostění se zohledněním technologie ražby	25
7 Závěr	34
Literatura	35
Seznam vybraných publikací doktoranda k tématu disertační práce	38

1 Úvod

Značná část soudobých podzemních liniových staveb v ČR je realizována na základě principů, které částečně nebo zcela vychází z Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Tato metoda patří mezi konvenční metody, tzn. metody, které nevyužívají plnoprofilové razicí stroje (TBM) nebo štíty, ale realizace staveb probíhá pomocí cyklicky se opakujících úkonů, typicky: vyrazení dílčího úseku, odtěžení rubaniny, vyztužení a další práce [1, 2]. Vyztužování podzemního díla dle NRTM je realizováno pomocí dvouplášťového ostění skládajícího se z:

- primárního ostění (dočasného),
- a sekundárního ostění (definitivního).

Účelem primárního ostění je dočasné zajištění výrubu a vytvoření vhodných podmínek v horninovém masivu pro správnou funkci sekundárního ostění. Primární ostění umožňuje částečné uvolnění původního napětí masivu v podobě radiálních přetvoření, vede k vyššímu využití smykové pevnosti masivu a zajišťuje dosažení minimálního zatížení ostění sekundárního. Primární ostění tímto způsobem napomáhá k dokonalejšímu využití stabilního potenciálu horninového masivu, ve kterém dojde, následkem správné aplikace primárního ostění, k vytvoření samonosného prstence. Je důležité, aby pracovní charakteristika primárního ostění vhodně reagovala na reologické procesy probíhající v horninovém masivu a umožnila průběh určitých deformací, ale současně zabránila vývoji kritických deformací, při kterých dochází k sekundárnímu porušování a nakypřování horninového masivu. Popisovaná interakce mezi ostěním a horninovým masivem je ovlivnitelná především prostřednictvím následujících faktorů:

- časovou prodlevou mezi provedením dílčího výrubu a zabudováním ostění tzv. časovým faktorem,
- tuhosti ostění a jejím vývoji v čase, která je závislá na časově závislých parametrech stříkaného betonu (SB).

Hlavními konstrukčními prvky primárního ostění jsou SB, ocelové oblouky (příhradové, valcované a jiné) a výtuzňné síť. Takto vytvořená konstrukce je chápána jako ocelobetonová konstrukce lišící se svou skladbou a charakterem zatížení od klasických železobetonových konstrukcí. Významný rozdíl spočívá v podstatě zatížení, které je deformační a časově závislé následkem tuhnutí stříkaného betonu v čase a dalších reologických procesech horninového masivu. Klasická ŽB konstrukce je

vystavena zatížení až po vyzrání betonu, naopak primární ostění v podzemním stavitelství při využití zásad NRTM je vystaveno zatížení ihned po aplikaci SB.

Nedílnou součástí výstavby většiny geotechnických staveb zejména staveb tunelových je inženýrsko-geologický průzkum a monitoring. Význam inženýrsko-geologického průzkum spočívá ve zjištění vlastností horninového masivu jakožto “stavebního materiálu” tunelových staveb. Monitoring pak slouží ke kontrole předpokladů projektu a rozhoduje o změně třídy vystrojení primárního ostění před další výstavbou v případě nežádoucího chování již realizované části ostění. Využitím tohoto principu se NRTM řadí také mezi metody observační. Tento způsob realizace ostění zohledňuje konkrétní chování horninového prostředí a dovoluje tak využít jeho maximum únosnosti v kooperaci s primárním ostěním, které se tak stává svým charakterem nejpodstatnější součástí výstavby podzemního díla realizovaného dle principů NRTM.

V reálné situaci se při výstavbě primárního ostění uplatní řada faktorů, které mají významný vliv na průběh interakce mezi ostěním a horninovým masivem a probíhajícím vývoji napětí v primárním ostění. Hlavní faktory vstupující do součinnosti primárního ostění a horninového masivu jsou:

- technologie výstavby díla (členění čelby, velikost výrubu, délka dílčích zabírek, rychlost postupu, apod.);
- geologické podmínky v masivu, pevnostní, přetvárné a reologické parametry prostředí;
- přetváření horninového masivu v závislosti na vytvoření výrubu, které je nejčastěji zobrazováno formou Fenner-Pacherových křivek [1, 2];
- specifické deformační zatížení konstrukce ostění, které je dané interakcí mezi horninovým prostředím a primárním ostěním;
- heterogenní struktura ostění – beton, ocelové prvky a jejich prostorové uspořádání v průřezu ostění;
- proměnné deformační parametry betonu v čase, nelineární pracovní-deformační charakteristika výztuže;
- redistribuce napětí v prvcích ostění v čase, která je závislá na probíhajícím tuhnutí betonu a proměnném deformačním zatížení od horninového masivu.

Ve statických výpočtech realizovaných pomocí numerických modelů je obecně velice obtížné, často nemožné podrobně zachytit všechny výše uvedené faktory, protože některé nelze dostatečně exaktně popsat. Řadu faktorů je při návrhu nutné zjednodušit, nahradit analyticko-empirickými vztahy, nebo je zcela opomenout ve prospěch zjednodušení numerického modelu. Zjednodušení modelu by se ovšem nemělo týkat podstaty chování předlohy. Jednou z příčin uvedeného zjednodušení je nedostatečné poznání mechanismů vzniku některých uvedených faktorů a jejich komplikovaná nebo nemožná implementace do numerického modelu. Častým prvkem využívaným při tvorbě numerických modelů je inverzní analýza, pomocí které mohou být částečně eliminovány vlivy neznámých faktorů. Numerický model i s obsáhlým zjednodušením tak může poskytnout dostatečně kvalitativní výsledky za předpokladu, že jsou použita zjednodušení při vyhodnocování výsledků vzata v potaz.

2 Stručný přehled současného stavu

Primární ostění používané při vyztužování podzemních děl, tak jak jej známe v dnešní době, se z funkčního hlediska od doby položení základů NRTM nezměnilo, např. [1, 3, 4, 5]. První stavba silničního tunelu Massenbergr v rakouském Štýrsku realizována touto metodou byla dokončena v roce 1963 [6]. Nejvýznamnější a největší stavbou realizovanou touto metodou v České republice je tunelový komplex Blanka (TKB), jenž byl vystavěn v letech 2007-2015 [7].

Primární ostění podzemních staveb se posuzuje dle mezních stavů pro časový úsek od jeho realizace do vybudování sekundárního (definitivního) ostění. Poté se již z jeho únosností běžně nepočítá [1, 4, 5]. Uvažování primárního ostění jakožto trvalé nosné konstrukce spolupůsobící s ostěním sekundárním je v současné době ve fázi výzkumu [8]. Norma EC7 [9], která popisuje metodiku návrhu geotechnických staveb obecně, řeší tunelové stavby jen okrajově. Zmíněnou normou jsou definovány návrhové přístupy, dle kterých lze zohlednit ve statickém výpočtu míru nejistot vstupujících parametrů, jenž jsou geotechnickým konstrukcím vlastní.

Primární ostění je navrhováno pomocí numerického modelování, realizovaného v softwarech, které užívají nejčastěji metodu konečných prvků (MKP) [10]. Ve větší míře se uplatňují 2D analýzy, které ovšem problematiku výstavby tunelových staveb značně aproximují [11, 12, 13]. Zejména vliv prostorového

přeskupování napětí, vznikající v masivu během ražby, nedokáže 2D analýza dostatečně exaktně zachytit. Tento jev je možné do 2D výpočtu zakomponovat pomocí metod, které ovšem daný problém popisují jen částečně. Nejčastěji užívanou metodou je β -metoda, která dovoluje v rovinném modelu zohlednit proběhlé radiální deformace výrubu, vznikající před vlastní realizaci primárního ostění [14,15]. Do modelu je tak zanesena podstatná změna napěťo-deformačního stavu masivu a částečně je tak zohledněna prostorová dispozice stavby. 3D analýzy jsou běžně využívány v případech prostorově složitějších částí tunelových staveb, jako jsou např. rozplety a křížení. Oproti 2D analýzám poskytují reálnější informaci o chování masivu během ražby. Cenou je ovšem delší příprava 3D modelu a vyšší náročnost na komplexnost vstupních parametrů včetně detailního zachycení postupu ražby. Často obecně diskutovaným problémem numerických modelů je volba konstitutivních vztahů, které popisují chování užitých materiálů [16, 17, 18]. Jejich volba je závislá především na dostupnosti vstupních parametrů. V České republice převládá užití Mohr – Coulombova konstitutivního vztahu, který je nenáročný z hlediska laboratorního vybavení nutného pro zjištění vstupních parametrů, jeho použití ovšem skýtá jistá omezení. Pro reálnější vystižení chování numerického modelu je zapotřebí volit konstitutivní vztahy pokročilé [14], které poskytují reálnější výsledky, zejména deformaci včetně vývoje poklesové kotliny.

Výsledkem modelů je stanovení: napěťo-deformačního stavu masivu, vlivu výstavby tunelu na rozvoj poklesové kotliny na povrchu, jejíž predikce je podstatná především v zastavěných oblastech, a vnitřních sil v primárním ostění. Průřez ostění je pak posouzen srovnáním vnitřních sil s jeho únosností, která je zobrazena pomocí interakčního diagramu dle EC2 [19]. Výztužné oblouky nejsou ve výpočtech běžně uvažovány z důvodu nesplnění požadavků kladené na železobetonové (ŽB) konstrukce, při posudku se tak uvažují jen výztužné ocelové sítě [5]. Vzhledem k interakci primárního ostění a horninového prostředí, která je ovlivněna technologií ražby, členěním průřezu, časovým postupem ražby, způsobem vyztužování a v neposlední řadě také vlastní konstrukcí primárního ostění, by měly být ocelové výztužné oblouky ve statickém výpočtu běžně uvažovány. Kromě specifického vyztužování ocelovými oblouky se primární ostění vyznačuje také časově závislými vlastnostmi [20, 21, 22]. Již krátce po nástřiku stříkaného betonu začíná ostění staticky spolupůsobit s horninovým masivem. Během doby od aplikace SB do vytvrdnutí betonu se tedy

mění přetvárné i pevnostní parametry, které ovlivňují již zmíněnou interakci. Tuhost primárního ostění je tak závislá nejen na své struktuře tzn. použitých konstrukčních komponent, ale i na čase neboli fázi výstavby, ve kterém je ostění uvažováno v rámci dílčího statického výpočtu [12, 13, 14, 15, 16]. Kromě základních nástrojů určených k popisu heterogenní struktury ostění, jako je např. homogenizace průřezu na základě váženého průměru nebo výpočet dle ocelobetonu, existuje také řada alternativních metod [12, 16, 21, 22, 23]. Ty ve své podstatě aproximují heterogenní strukturu ostění a nahrazují ji parametry homogenního materiálu. Časově závislé parametry betonu jsou pak do statického výpočtu zanesené v rámci homogenizace průřezu.

Při zpracování práce je využit software *Homogenizace* [24, 25, 26], který dovolí ve statickém výpočtu zohlednit heterogenní strukturu primárního ostění a časově závislé parametry SB. Uvedený software je založený na analytické teorii spolupracujících kruhových prstenců, kterou formuloval prof. Bulytchev [27]. Uvedená problematika je na Katedře geotechniky VŠB - TU Ostrava rozvíjena od roku 1999 [28, 29, 30]. Autor této práce byl přizván do řešitelského kolektivu začátkem svého doktorského studia v roce 2009 a během studia vznikla ve spolupráci s kolektivem řada odborných článků, které uvedenou problematiku dále rozvíjí a rozšiřují, např. [31, 32].

3 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je vytvoření v praxi použitelného alternativního postupu, na jehož základě bude možné vytvořit simulaci výstavby liniového podzemního díla prostřednictvím numerického prostorového modelu (MKP) s využitím analytické metody spolupracujících prstenců [27, 28] a následně dané primární ostění posoudit. Při tvorbě modelu budou zohledněny faktory, které mají významný vliv na průběh interakce mezi ostěním a horninovým masivem a probíhajícím vývoji napětí v primárním ostění:

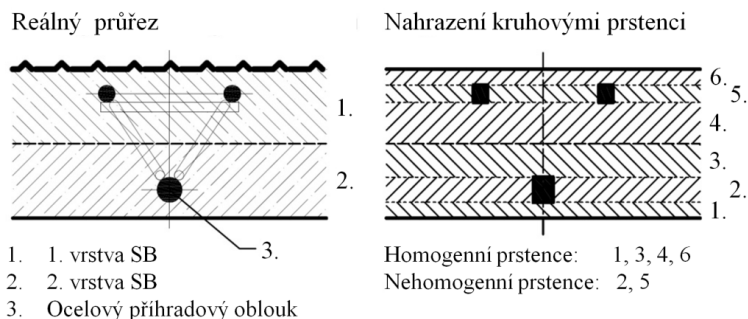
- technologie výstavby díla (velikost výrubu, délka zabírky a “rychlost postupu”);
- geologické podmínky v masivu, pevnostní a přetvárné;
- specifické zatížení konstrukce ostění, které je dané interakcí mezi horninovým prostředím a primárním ostěním;

Předložená práce rozšiřuje možnosti přístupu numerického modelování primárního ostění alternativním zohledněním následujících faktorů:

- heterogenní struktura ostění – beton, ocelové prvky a jejich prostorové uspořádání v průřezu ostění;
- časově závislé parametry stříkaného betonu.

4 Teorie spolupracujících prstenců

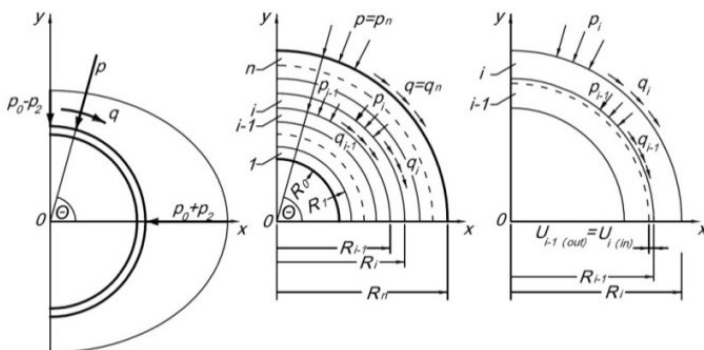
Problematika práce je řešena alternativním postupem s využitím softwaru *Homogenizace* [24], který využívá teorii spolupracujících kruhových prstenců, podrobně představenou v [28, 29]. Teorie vychází z analytického modelu pro výpočet napěťo-deformačního stavu ve vícevrstevném kruhovém prstenci, který byl formulován prof. Bulytchevem [27].



Obr. 4.1 Nahrazení heterogenní struktury primárního ostění kruhovými prstenci

Metoda předpokládá nahrazení heterogenní struktury primárního ostění soustavou centrických kruhových prstenců dvou typů dle materiálové homogenity (obr. 4.1). Jeden typ prstence je homogenní nahrazující stříkaný beton a druhý je heterogenní zohledňující ocelové výztužné prvky ve vrstvě stříkaného betonu.

Algoritmus vychází z předpokladu, že se vnější zatížení prstence (normálové i smykové) přenáší jednotlivými vrstvami pomocí tzv. přenosových koeficientů (K_{ij}), které obecně plynou z podmínky spojitosti deformací na jednotlivých kontaktech vrstev výztuže. Tyto přenosové koeficienty jsou funkcemi tloušťky vrstev a přetvárných charakteristik materiálů vrstev (Poissonovo číslo, modul pružnosti).



Obr. 4.2 Nahrazení heterogenní struktury primárního ostění kruhovými prstenci

Metoda vychází z následujícího tvaru vnějšího zatížení (obr. 4.2):

$$p_k = p_0(k) + p_2(k) \cos 2\theta \quad (4.1)$$

$$q_k = q_2(k) \sin 2\theta$$

$$p_0(k) = \left(\prod_{i=k+1}^n K_{0(i)} \right) p_0 \quad (4.2)$$

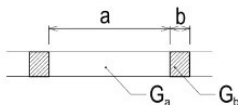
$$\begin{pmatrix} p_2(k) \\ q_2(k) \end{pmatrix} = \left[\prod_{i=k+1}^n \begin{pmatrix} K_{pp}(i) & K_{pq}(i) \\ K_{qp}(i) & K_{qq}(i) \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} p_2 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

kde: $K_{0(i)}$, $K_{pp(i)}$, $K_{pq(i)}$, $K_{qp(i)}$, $K_{qq(i)}$, $i=1, \dots, n$ jsou přenosové koeficienty přes i -tou vrstvu výztuže (přenosové koeficienty přes první (vnitřní) vrstvu jsou rovny nule). Takto vyjádřeným hodnotám radiálních napětí na jednotlivých kontaktech vrstev pak odpovídají tangenciální napětí a posuny na kontaktech vrstev.

Uvedená výpočetní metodika je základem pro stanovení kvazihomogenního modulu pružnosti nehomogenního ostění. Nehomogenní ostění s vnitřními vložkami z odlišného materiálu (např. ocelové vložky) lze totiž rozdělit na jednotlivé dílčí vrstvy, z nichž některé jsou vrstvy homogenní (obr. 4.1), některé jsou nehomogenní s pravidelně se střídajícími dílčími tuhostně odlišnými oblastmi (výplň, vložka). Jeden z hlavních požadavků v tomto kroku je střídání homogenních a nehomogenních vrstev, nesmí tedy bezprostředně po sobě následovat dvě nehomogenní vrstvy (tyto vrstvy lze proložit homogenní vrstvou o minimální tloušťce). Celé toto ostění tak může být považováno za speciální případ vícevrstvého ostění a pro stanovení napěťo-deformačního stavu lze tedy vycházet z již zmíněného algoritmu pro řešení vícevrstevých prstenců.

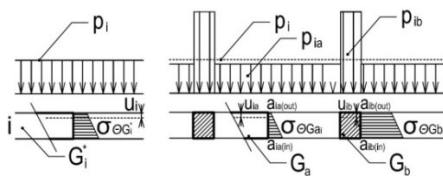
Výpočetní postup pro stanovení kvazihomogenního modulu pružnosti nehomogenního ostění lze rozdělit do dvou dílčích kroků:

- Stanovení dílčích kvazihomogenních modulů pružnosti v dílčích nehomogenních vrstvách, v tomto kroku je zahrnuta do jednotlivých prstenců výztuž a dochází k homogenizaci dílčích nehomogenních prstenců.
- Stanovení celkového kvazihomogenního modulu pružnosti pro celý prstavec ostění. Algoritmus lze popsat následovně – v 1. kroku jsou dva vnitřní prstence homogenizovány (vytvoření jednoho homogenního prstence), v 2. kroku je k předešlému homogenizovanému prstenci přidán další a opět probíhá homogenizace. Postup se opakuje, dokud nedojde k homogenizaci celého průřezu ostění.



Obr. 4.3 Popis heterogenního prstence

Tvar pro vyjádření dílčího kvazihomogenního modulu pružnosti dílčí nehomogenní vrstvy plyne ze základního předpokladu, že radiální posunutí na kontaktních plochách jednotlivých vrstev je identické jak v případě kontaktu s vložkou, tak v případě kontaktu s výplní. Napětí na jednotlivých kontaktech však, na rozdíl od posunů, vykazují nespojitý průběh (obr. 4.4), v tužších prvcích systému (např. ocelové vložky) s určitým modulem pružnosti G_a se napětí koncentrují, v poddajnějších částech (výplň), charakterizovaných modulem pružnosti o velikosti G_b , jsou napětí nižší (Poissonova čísla považujeme v obou materiálech za identická). Průměrná radiálně symetrická složka normálového napětí p_i^* v této nehomogenní vrstvě i odpovídá stanovovanému dílčímu kvazihomogennímu smykovému modulu pružnosti G^* , napětí p_a odpovídající vložkám a napětí p_b ve výplni.



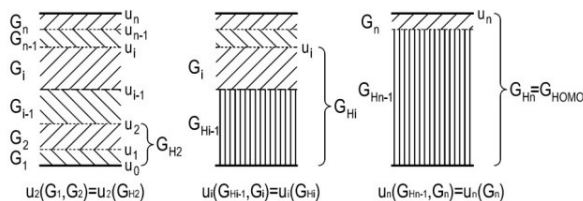
Obr. 4.4 Přerozdělovací koeficienty tangenciálního napětí

Vztah pro určení dílčího kvazihomogenního smykového modulu pružnosti G^* v dílčí nehomogenní vrstvě, který je váženým průměrem obou modulů G_a a G_b s vahami odpovídajícími příčným rozměrům a , b tuhostně odlišných oblastí je následující (Poissonovo číslo je v obou materiálech uvažováno totožné):

$$G^* = \frac{G_a \cdot a + G_b \cdot b}{a + b} \quad (4.4)$$

Stanovení celkového kvazihomogenního modulu pružnosti pro celý prstenec ostění je realizováno dle následujícího postupu:

- homogenizujeme první dvě vnitřní vrstvy výztužného prstence s využitím podmínky, že radiální složka posunů na vnějším obrysu v pořadí druhé vrstvy musí být identická jak v případě, že uvažujeme dvouvrstvý systém s rozdílným modulem pružnosti v každé vrstvě, tak v případě, že uvažujeme jednu vrstvu (její tloušťka je součtem tlouštěk obou dílčích vrstev) s kvazihomogenním modulem pružnosti G^{*c} .
- po provedení homogenizace prvních dvou vnitřních vrstev výztuže zavedeme tuto homogenizovanou vrstvu s tloušťkou rovnou součtu tlouštěk obou dílčích vrstev do uvažovaného vícevrstvého systému a proces homogenizace opakujeme dle postupu popsaného výše (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Postup homogenizace soustavy prstenců

Na základě stanoveného modulu pružnosti G^{*c} homogenizovaného prstence lze pak určit tangenciální napětí na vnitřním obrysu R_0 a vnějším obrysu R_n homogenizovaného prstence. S využitím předpokladu lineárního průběhu napětí po výšce celého homogenizovaného prstence lze pak stanovit tangenciální napětí σ_q^h v homogenizovaném prstenci na úrovni jednotlivých vrstev v původním (nehomogenizovaném) výztužném prstenci. Podíl tangenciálních napětí σ_q

odpovídajících jednotlivým vrstvám v nehomogenním výztužném prstenci a výše uvedených tangenciálních napětí σ_q^h v homogenizovaném prstenci udává nezávisle na vnějším zatížení p_0 tzv. koeficienty přerozdělení tangenciálních napětí pro jednotlivé vrstvy nehomogenního výztužného systému.

Uvedená metoda užívá jako vstupní přetvárný parametr modul pružnosti ve smyku G [MPa], který popisuje závislost mezi smykovým napětím τ a jím způsobeným zkosením γ . Pro izotropní látky lze modul pružnosti ve smyku, na základě znalosti Youngova modulu pružnosti E a Poissonova čísla ν , určit dle vztahu:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4.5)$$

5 Software Homogenizace

Kapitola si klade za cíl seznámit čtenáře se základním uživatelským ovládáním a způsobem užití výsledků softwaru *Homogenizace* [24] a jejich implementace do numerických modelů.

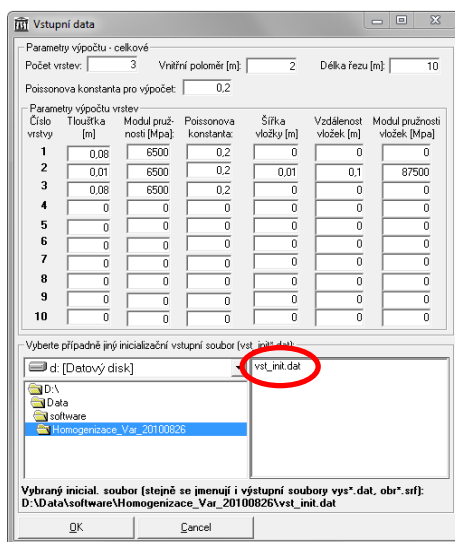
Po spuštění souboru „*Homo2009_26_8_2010.exe*“ verze programu z roku 2010 se spustí úvodní uvítací obrazovka, která dovoluje pokračovat do následujícího menu, nebo ukončit program. Po stisknutí tlačítka „*Pokračovat*>>“ se uživatel ocitne již v hlavním dialogovém okně programu viz. obr. 5.1.

V tomto okně se objeví matice pro zadání vstupních parametrů „*Parametry výpočtu vrstev*“ včetně parametrů uvedených v záhlaví dialogového okna „*Parametry výpočtu – celkové*“. „*Počet vrstev*:“ určuje počet uvažovaných vrstev homogenizovaného průřezu viz. obr. 5.1 (počet řádků v matici). „*Vnitřní poloměr [m]*:“ a „*Délka řezu [m]*:“ představují další proměnné uvažované během výpočtu. „*Poissonova konstanta*:“ představuje Poissonovo číslo ν [-], která je uvažována pro homogenizovaný průřez.

Jednotlivé sloupce matice pak postupně představují geometrické a přetvárné parametry jednotlivých vrstev ve stejném pořadí:

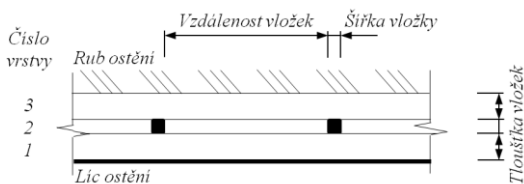
- „*Tloušťka [m]*“ představuje tloušťku jednotlivých vrstev vzorového homogenizovaného průřezu,

- „Modul pružnosti [MPa]:“ v rámci homogenizace je tato hodnota reprezentována smykovým modulem pružnosti G [MPa], který se stanoví na základě rovnice 4.5.
- „Poissonova konstanta:“ i zde se Poissonovou konstantou myslí Poissonovo číslo ν [-],
- „Šířka vložky [m]:“ popisuje šířku vložky v homogenizovaném průřezu, pomocí které je popsána výztuž,
- „Vzdálenost vložek [m]:“ popisuje světlou vzdálenost mezi vložkami resp. výztuží v homogenizovaném průřezu,
- „Modul pružnosti vložek [MPa]:“ i zde je v rámci homogenizace tato hodnota reprezentována smykovým modulem pružnosti výztuže G [MPa], který se stanoví na základě rovnice.

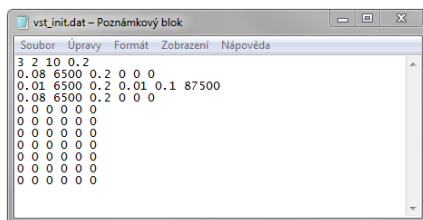


Obr. 5.1 Ukázka uživatelského prostředí softwaru Homogenizace

Vstupní data po zadání do dialogového okna jsou také uložena v textovém inicializačním souboru, defaultně „vst_init.dat“, který se nachází v kořenovém adresáři programu obr. 5.3. Parametry je možno dialogově upravit a uložit pod novým názvem. Ze zvoleného adresáře lze vybrat libovolný vstupní soubor.

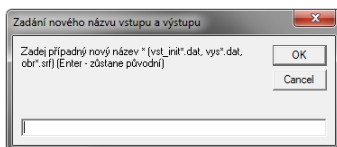


Obr. 5.2 Schéma vzorového homogenizovaného průřezu



Obr. 5.3 Ukázka obsahu inicializačního souboru vst_init.dat

Po dokončení vložení vstupních parametrů a stisknutí tlačítka „OK“ je uživatel vyzván k zadání nového názvu souboru (obr. 5.4). Např. při zadání názvu: „dp_model_11“, se nový inicializační soubor pojmenuje na: „vst_initdp_model_11.dat“.



Obr. 5.4 Dialogové okno pro zadání nového názvu souboru se vstupními daty a výsledky

Po dokončení operace zadávání vstupních dat lze nalézt výsledky v adresáři „vys.dat“ (obr. 5.5). Kromě mezivýsledků lze v textovém adresáři nalézt i přerozdělovací koeficienty $a1 - a2$ (zvýrazněno červeným rámečkem), které slouží k přepočtu napětí v homogenizovaném průřezu na napětí v jednotlivých komponentech ostění (stříkaný beton, ocel). Obdobně jako u inicializačního souboru se původní soubor s výsledky „vys.dat“ přejmenuje na „vysdp_model_11.dat“. Číselné hodnoty v sekci „Homogenizace“ souboru s výsledky představují moduly pružností postupně

homogenizovaného průřezu (viz. Princip teorie prstenců) včetně hodnoty finální $E_{homog} = 6932\text{MPa}$.

```

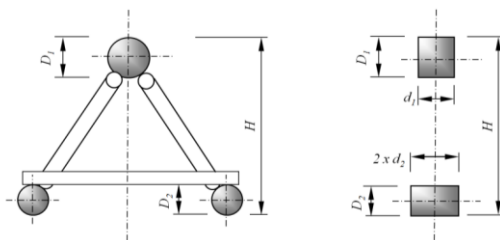
vys.dat - Poznámkový blok
-----
Soubor  Úpravy  Formát  Zobrazení  Nápověda
G_prep
1 6500
2 13863.6363636364
US 3 6500
G_Homog  R_Homog
1 6500 2.08
2 13863.6363636364 2.09
US 3 6500 2.17
KO_vrstvy
1
2 0.79713850309
3 0.589019303140296
PO
1 0.469868856214369
2 0.589019303140296
1
Tangenciální napětí: vnitřní - vnější
1 12.4561312470946 - 11.9862623908803
2 159.889709979029 11.9862623908803 - 159.128760438631 11.9312918533016
3 11.9462200275691 - 11.932293307094
Tangenciální napětí pro homogenizovaný profil
1 13.2850895753985 - 12.8145013401044
2 12.8145013401044 - 12.7556778106926
3 12.7556778106926 - 12.2850895753985
Koeficienty a1 - a2
1 0.93760235310427 - 0.935367055865682
2 12.4772479034074 0.935367055865686 - 12.4751316864745 0.935371058314126
3 0.936541374348212 - 0.93896257409545
Homogenizace
1 7295.54203658962
2 6931.89394993301
    
```

Obr. 5.5 Ukázka obsahu souboru s výsledky vys.dat

Pro popsání geometrie příhradové výztuže v průřezu primárního ostění před vlastní homogenizací je nutno postupovat dle následujících kroků:

- Průměry prutů D_1 , D_2 a výška H jsou výchozími parametry při náhradě průřezu dle obr. 5.6.
- V rámci softwaru *Homogenizace* je nutné průřezy prutů nahradit ekvivalentními obdélníkovými plochami o rozměrech D_i a d_i . Kde D_i je výška obdélníku v průřezu ostění reprezentující tloušťku nehomogenního prstence, ta musí být rovna průměru prutu.
- Šířku obdélníku v podélném směru s ostěním d_i (reprezentující šířku vložek v nehomogenním prstenci), je nutné zredukovat tak, aby se výsledná plocha rovnala ploše průřezu prutu. Tento úkon lze charakterizovat rovnicí 5.1.
- Prut s průměrem $D2$ se vyskytuje 2x, proto je nutné šířku obdélníku vynásobit 2.

$$d_i = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4 \cdot D_i} = \frac{\pi \cdot D_i}{4} \quad (5.1)$$



Obr. 5.6 Nahrazení reálného průřezu příhradové výztuže průřezem náhradním

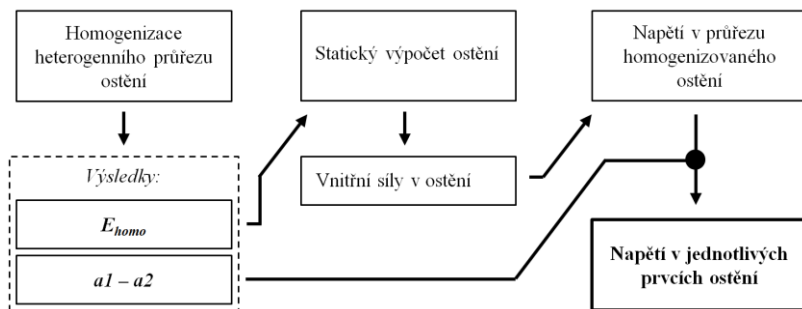
Výztužné síť je také nutné nahradit ekvivalentními plochami, kde je výška totožná s průměrem prutu a šířka je redukována. Na základě požadavku střídání homogenních a nehomogenních vrstev v průřezu ostění nelze výztužnou síť umístit při homogenizaci bezprostředně za nebo před prstenec reprezentující prut příhradové výztuže. Výslednou plochu lze přičíst k jednotlivým prutům - vložkám příhradové výztuže a navýšit tak šířku ekvivalentní obdélníkové plochy d_1 , nebo lépe příhradovou výztuž zahrnout v rámci homogenizace v samostatné nehomogenní vrstvě. Ta musí být od nehomogenní vrstvy popisující prut příhradové výztuže oddělena vrstvou homogenní o tloušťce rovné průměru prutu výztužné sítě, která reprezentuje vrstvu neboli prstenec s podélnými pruty výztužné sítě. Podélné pruty výztužné sítě nemají na přetvárné vlastnosti primárního ostění v příčném směru vliv, navíc software *Homogenizace* jejich zohlednění nedovoluje, proto nejsou při homogenizaci průřezu ostění uvažovány. Způsob nahrazení válcovaných profilů výztužných oblouků je dán jejich geometrií. Pásnice se nahradí vložkami o stejných rozměrech, stojinu je nutno zanedbat, nebo vložit mezi stojinu a pásnici homogenní prstenec.

V rámci této práce jsou veškeré vstupní parametry a výsledky homogenizace prezentovány v podobě tabulky 5.1. Průřez ostění je dle teorie spolupracujících prstenců členěn na prstence o mocnostech respektujících geometrii jednotlivých komponent průřezu. Výztuž je v průřezu reprezentována pomocí vložek zahrnutých do vrstev nehomogenních. Líc a rub každého prstence je popsán vzdáleností od líce ostění jako celku h_y [m]. Lícem ostění je myšlen pohledový povrch, rubem pak povrch odvrácený. Každému z prstenců lze přiřadit vlastní smykový modul pružnosti G_{bet} [MPa]. Výsledkem procesu homogenizace je smykový modul pružnosti homogenizovaného průřezu G_{homo} [MPa] a skupina přerozdělovacích koeficientů:

- $a1$ [-] přerozdělovací koeficient tangenciálních napětí pro vnitřní (rub) vlákna prstence,
- $a2$ [-] přerozdělovací koeficient tangenciálních napětí pro vnější (líc) vlákna prstence.

Ukázka prezentace výsledků homogenizace – popis řešeného stavu									
prstenec	mocnost [m]	vločky		strana prstence	h_y [m]	G_{bet} [MPa]	G_{homo} [MPa]	$a1 - a2$ [-]	
		šířka [m]	vzdál. [m]					Beton	Ocel
1	0,0800	-	-	líc	0,0000			0,9376	-
				rub	0,0800			0,9354	-
2	0,0010	0,01	0,1	líc	0,0800	6500	6930	0,9354	12,4772
				rub	0,0810			0,9354	12,4751
3	0,0800	-	-	líc	0,0810			0,9365	-
				rub	0,1610			0,9390	-

Tab. 5.1 Ukázka prezentace výsledků homogenizace



Obr. 5.7 Postupové schéma stanovení napětí v ostění alternativním způsobem

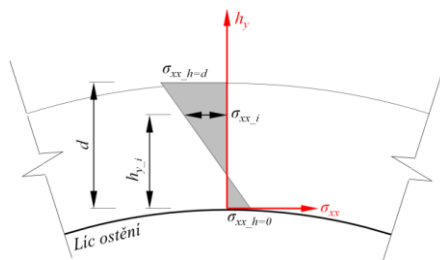
Získané výsledky homogenizovaného průřezu G_{homo} (E_{homo}) jsou dále použity v numerickém výpočtu. Výsledkem numerického výpočtu je mimo jiné velikost zatížení homogenizovaného ostění vnitřními silami a v závislosti na použitém prvku také i stav napětí v průřezu, typicky tangenciální napětí na líci a rubu ostění. Tangenciální napětí homogenizovaného průřezu lze pak pomocí přerozdělovacích koeficientů přepočítat na napětí v jednotlivých prvcích ostění, typicky ocelová výztuž a stříkaný beton. Celkový postup dokumentuje obrázek 5.7.

V případě lineárního výpočtu lze pro stanovení napětí po celé výšce průřezu užít vztah, který je založený na lineární interpolaci (obrázek 5.8):

$$\sigma_{xx_i} = \left(\sigma_{xx_h=b} + \frac{\sigma_{xx_h=0} - \sigma_{xx_h=b}}{d} \right) \cdot h_{y_i} \quad (5.2)$$

kde:

- σ_{xx_i} normálové napětí v obecném bodě průřezu,
- $\sigma_{xx_h=b}$ normálové napětí na rubu ostění,
- $\sigma_{xx_h=0}$ normálové napětí na lici ostění,
- d tloušťka ostění,
- h_{y_i} vzdálenost obecného bodu průřezu od lince ostění.



Obr. 5.8 Princip stanovení napětí v průřezu ostění

Na základě rovnice 5.2 je možné stanovit velikosti napětí v zájmových oblastech homogenizovaného průřezu, typicky v místech vložek respektive v místech styku jednotlivých prstenců. Pro nelineární výpočet je nutno tyto hodnoty odečíst přímo z numerického modelu. Pro lineární výpočet lze ukázkově zvolit demonstrativní hodnoty napětí na rubu $\sigma_{xx_h=b} = -6\text{MPa}$ a lici $\sigma_{xx_h=0} = 2\text{MPa}$, pak se dle rovnice 5.2 určí velikost napětí v místech vložek respektive styku jednotlivých prstenců (tab. 5.2) a na základě rovnic 5.3 se stanoví napětí v jednotlivých prvcích výztuže, tzn. oceli a betonu.

$$\begin{aligned} \sigma_{c_lic_i} &= a1_{(beton)} \cdot \sigma_{xx_i} \\ \sigma_{c_rub_i} &= a2_{(beton)} \cdot \sigma_{xx_i} \\ \sigma_{s_lic_i} &= a1_{(ocel)} \cdot \sigma_{xx_i} \\ \sigma_{s_rub_i} &= a1_{(ocel)} \cdot \sigma_{xx_i} \end{aligned} \quad (5.3)$$

kde:

- $\sigma_{c_lic_i}$ napětí v betonu na lici i-tého prstence,

$\sigma_{c_rub_i}$ napětí v betonu na rubu i-tého prstence,

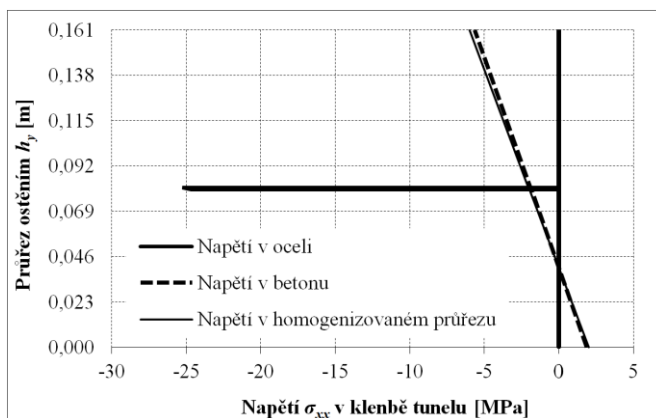
$\sigma_{s_lic_i}$ napětí v oceli na lici i-tého prstence,

$\sigma_{s_rub_i}$ napětí v oceli na rubu i-tého prstence.

Kompletní proces výpočtu tangenciálního napětí v jednotlivých prvcích ostění, jmenovitě oceli a betonu dokumentuje následující tabulka, která je v práci užitá totožně.

Přepočet napětí v prvcích primárního ostění pomocí přerozdělovacích koeficientů $a1 - a2$							
prstenec	mocnost [m]	h_y [m]	a1 - a2 [-]		Napětí v homogenizovaném průřezu [MPa]	Napětí v prvcích [MPa]	
			Beton	Ocel		Beton	Ocel
1	0,0800	0,0000	0,9376	-	2,000	1,875	-
		0,0800	0,9354	-	-1,975	-1,848	-
2	0,0010	0,0800	0,9354	12,4772	-1,975	-1,848	-24,644
		0,0810	0,9354	12,4751	-2,025	-1,894	-25,260
3	0,0800	0,0810	0,9365	-	-2,025	-1,896	-
		0,1610	0,9390	-	-6,000	-5,634	-

Tab. 5.2 Ukázkový výpočet napětí v jednotlivých prvcích ostění



Obr. 5.9 Ukázkový průběh napětí v prvcích ostění modelového příkladu

Obrázek 5.9 dokumentuje výsledky tangenciálních napětí jednotlivých prvků ostění v grafické podobě. Kromě výsledků numerického modelu v podobě vnitřních sil působících na ostění tak projektant dostává k dispozici i informaci o velikosti napětí v jednotlivých prvcích výztuže.

6 Aplikace softwaru Homogenizace v prostorovém modelu tunelového ostění se zohledněním technologie ražby

Kapitola představuje praktickou aplikaci softwaru *Homogenizace* při numerickém modelování a následném posouzení primárního ostění. Ostění je posouzeno v totožném příčném řezu v rámci výpočetních fází: 1, 5 a 10 dnů jeho stáří, respektive s postupem ražby/čelby 1, 5 a 10m od řešeného příčného řezu, při uvažovaném postupu ražby 1m/den. Včetně posouzení je také provedena analýza vývoje napětí ve vybraných řezech napříč výpočetními fázemi. V prezentované analýze jsou zohledněny základní významné postuláty NRTM, zejména:

- heterogenní struktura ostění respektive přítomnost výztužných oblouků v průřezu ostění,
- časová závislost přetvárných parametrů ostění následkem tuhnutí SB,

Jak již bylo podrobněji řečeno v kapitole 2, zatížení primárního ostění je závislé na mnoha proměnných, včetně jeho vlastní tuhosti, a pro dosažení relevantních výsledků numerických modelů je potřebné zohlednění podstaty chování modelované předlohy. Zde uvedený postup je možno integrovat s běžně používanými schémata statického posouzení, bez vlivu na jeho vypovídací hodnotu.

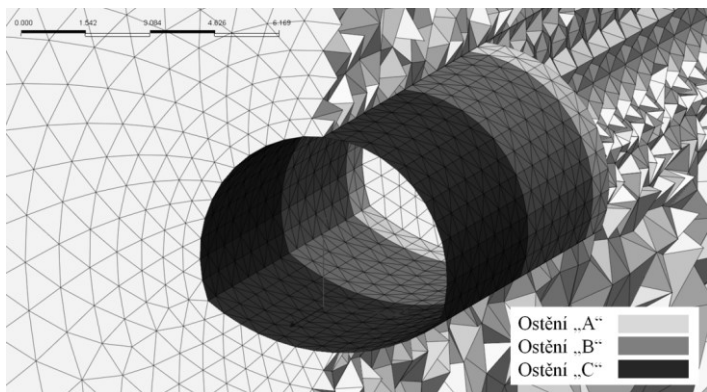
Konstrukční etapou ostění v rámci této podkapitoly se rozumí etapa, ve které jsou uvažovány konstantní přetvárné parametry primárního ostění. Výpočetní fázi se rozumí krok, simulující postup realizace díla o jeden krok / zabírku = 1m. Jedna konstrukční etapa ostění se tedy může uplatnit pro několik výpočetních fází.

V rámci této kapitoly byly řešeny následující varianty skladby konečných prvků primárního ostění:

- I. Primární ostění bylo modelováno pomocí skořepiny, tzv. „shell“ prvku. Ocelové oblouky byly do výpočtu zahrnuty v rámci

- homogenizace heterogenní struktury ostění. Ocelové sítě uvažovány nebyly. Řešení odpovídá modelové variantě „2.2“.
- II. Primární ostění bylo modelováno pomocí skořepiny. Ocelové oblouky včetně výztužných sítí byly do výpočtu zahrnuty v rámci homogenizace heterogenní struktury ostění. Řešení odpovídá modelové variantě „2.2“.
- III. Primární ostění bylo modelováno pomocí skořepiny. Výztužné sítě byly do výpočtu zahrnuty v rámci homogenizace heterogenní struktury ostění. Ocelové oblouky byly modelovány „beam“ prvkem. Řešení odpovídá modelové variantě „2.1“.
- IV. Primární ostění bylo modelováno pomocí skořepiny. Výztužné sítě byly do výpočtu zahrnuty v rámci homogenizace heterogenní struktury ostění. Ocelové oblouky nebyly ve výpočtu uvažovány. Řešení odpovídá modelové variantě „2.2“.

Referenční prostorový model o celkových rozměrech 60x60m s šířkou 30m a počtu elementů 118809 (21226 uzlů) byl vytvořen v softwaru Midas NX. Tunel s příčným průřezem složeným z kruhových oblouků je situován ve středu modelu, tj. vrchol klenby je v hloubce cca 25,8m. Deformační zatížení je dané přetvárnými a pevnostními parametry horninového prostředí, které bylo charakterizováno Mohr – Coulombovým konstitutivním modelem: $\gamma = 21\text{kN/m}^3$, $E = 100\text{MPa}$, $\nu = 0,3$, $\varphi = 28^\circ$, $c = 30\text{ kPa}$, $\psi = 0^\circ$.



Obr. 6.1 3D model ostění

Tunel je vyztužen primárním ostěním o tloušťce $d = 0,2\text{m}$. V rámci analýzy byly v ostění uvažovány příhradové nosníky ASTA 70 ($D_1 = 32\text{mm}$; $D_2 = 22\text{mm}$; $H = 124\text{mm}$) s osovou vzdáleností 1m a vyztužná síť $6 \times 100\text{mm}$ u líce i rubu s krytím 30mm . Komponenty primárního ostění byly voleny s následujícími popisnými a přetvárnými parametry:

- ocel: ($\gamma = 78,5\text{kN/m}^3$, $E = 210\text{ GPa}$, $\nu = 0,2$),
- stříkaný beton (SB 25 / typ II / obor J2): $\gamma = 25\text{kN/m}^3$, $E = f(t)$ [MPa], $\nu = 0,2$,
- konstitutivní model: lineárně pružný.

Okrajové podmínky byly typicky voleny jako tzv. „tuhá vana“, tzn.: po obvodu modelu byly omezeny horizontální posuny kolmé k příslušným rovinám, dno modelu mělo omezené vertikální a horizontální posuny v obou směrech.

V numerickém modelu je zachycena cyklická realizace primárního ostění. Jako referenční „pseudo-čas“ byl zvolen 1 den, kdy byl uvažován postup ražby 1m/den , tzn. jednotlivé nárůsty tuhostí primárního ostění uvažovaných konstrukčních etap respektovaly výše zmíněný předpoklad. Zvolenému časovému dělení byly přizpůsobeny všechny konstrukční etapy ostění, zejména vývoj časově závislých parametrů stříkaného betonu. Dle zásad NRTM je primární ostění realizováno krátce po vyražení dílčí zabírky. V rámci definovaného měřítka vývoje časově závislých parametrů ostění – 1den resp. měřítko postupu 1m/den , nebylo možné v rámci numerického modelu zachytit vliv časového faktoru.

Celkem bylo realizováno 20 fází výpočtu, během kterých došlo k postupu čelby do vzdálenosti 20m od okraje numerického modelu. Sledovaný řez ostění se nachází ve vzdálenosti 10m od okraje modelu. V rámci posouzení ostění a sledování vývoje napětí ve vybraném řezu ostění se tedy do výsledků promítla ražba 10m .

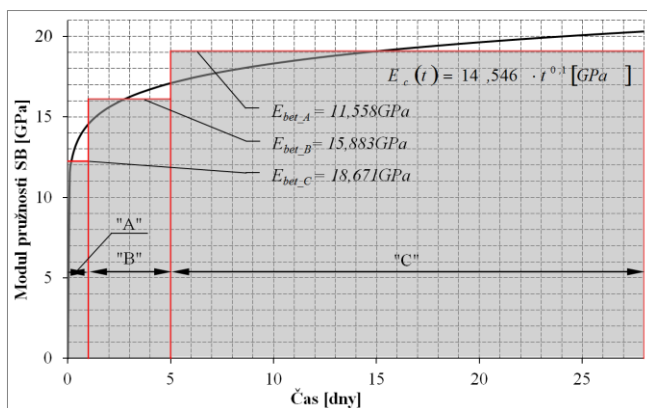
Před stanovením přetvárných parametrů primárního ostění pro uvažované výpočetní fáze byla realizována analýza vývoje modulu pružnosti stříkaného betonu na základě laboratorního rozboru dle FAST. Časová osa vývoje byla rozdělena na tři dílčí intervaly A, B a C kterým byla přiřazena reprezentativní průměrná hodnota modulu pružnosti stříkaného betonu dané etapy tuhnutí (viz. obr 6.2). Reprezentativní hodnota stříkaného betonu $E_{bet_A,B,C}$ příslušící konstrukční etapě A, B, C byla stanovena pomocí

aritmetického průměru diskrétních hodnot E s dělením časové osy po 0,1dne v rámci daného časového intervalu příslušné etapy dle vztahu:

$$E_{bet_etap.} = \frac{T \cdot \sum E_{bet_t}}{\Delta t} \quad (6.1)$$

kde:

$E_{bet_etap.}$ průměrný modul pružnosti SB uvažované etapy [GPa],
 E_{bet_t} modul pružnosti SB [GPa] v čase t odpovídající Δt a T ,
 Δt délka trvání uvažovaného intervalu [den],
 T jemnost dělení časové osy [den].



Obr. 6.2 Přetvárné parametry ostění v uvažovaných konstrukčních fázích

Při aplikaci výše uvedeného vztahu lze ukázkově stanovit modul pružnosti konstrukční etapy A následovně:

$$E_{bet_A} = \frac{0,1 \cdot \sum (0 + 11,554 + 12,384 + 12,896 + \dots + 14,546)}{1} = \frac{0,1 \cdot 115,58}{1} = 11,558 \text{ GPa}$$

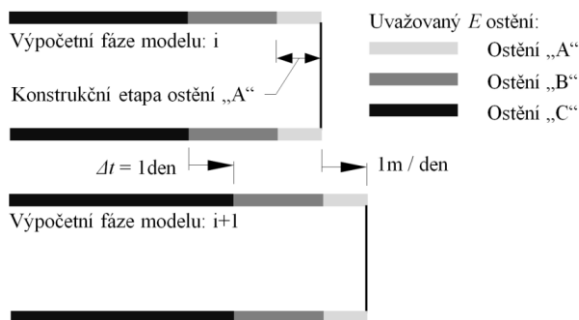
Pro detailnější zachycení vývoje modulu pružnosti SB je možné v rámci numerického modelu použít větší počtu konstrukčních etap, ovšem za cenu členitějšího numerického modelu s nutností použití většího počtu výpočetních fází. Metodika stanovení modulu pružnosti samotného stříkaného betonu je graficky znázorněna na obrázku 6.2.

etapa	stáří [dny]	varianta	Stříkaný beton		Homogenizovaný průřez	
			E [MPa]	G [MPa]	G_{homo} [MPa]	E_{homo} [MPa]
A	0 - 1	I.	11558	4816	5457	13097
		II.			5753	13807
		III. a IV.			5054	12130
B	1 - 5	I.	15883	6618	7245	17388
		II.			7512	18029
		III. a IV.			6851	16442
C	5 - 28	I.	18671	7780	8398	20155
		II.			8661	20786
		III. a IV.			8010	19224

Tab. 6.1 Přetvárné parametry ostění v uvažovaných konstrukčních fázích

Tabulka 6.1 shrnuje moduly pružnosti stříkaného betonu a výsledné moduly homogenizovaného průřezu uvažovaných výpočetních etap. Následně byla heterogenní struktura ostění pomocí softwaru (kap. 5) homogenizována.

Obrázek 6.3 popisuje konstrukční fázování numerického modelu. Z obrázku je patrné uvažování postupného zvyšování modulu pružnosti ostění, které je dané tuhnutím SB.



Obr. 6.3 Schéma znázorňující fázování numerického modelu

Výsledkem numerického modelu je vývoj napěťo-deformačního stavu masivu i primárního ostění a vývoj vnitřních sil v ostění. Dle EC2 je ostění posouzeno pomocí

interakčního diagramu ve kterém jsou zohledněny pouze výztužné sítě. Z výsledků řešených variant I. až IV. je patrné, že vazba mezi uvažovanou tuhostí respektive uvažovanými ocelovými prvky v ostění a jejím zatížení masivem je přímo úměrná. Zmíněná informace nepřímo potvrzuje základní tezi NRTM, která v jednoduchosti říká, že ostění by mělo být poddajné, aby byly umožněny radiální deformace masivu, následkem čehož dojde k nižšímu zatížení primárního ostění. Dále lze usoudit, že numerický model, který neuvažuje všechny ocelové výztužné prvky, počítá ve své podstatě s ostěním, které je proti reálné situaci poddajnější a ve výsledku méně zatížené (za cenu větších deformací). Rozdíly ve výsledném zatížení modelovaného ostění variant I. až IV. vnitřními silami ovšem v modelové úloze nedosahují dramatických rozdílů, majících významný vliv na vlastní posudek. Rozdíl nabývá do 2% v případě normálových sil. Rozdíly ohybových momentů jsou markantnější, ovšem je-li vzat v potaz vliv velikosti momentu na výstřednost výsledného zatížení, tak jsou rozdíly řádově do 10%.

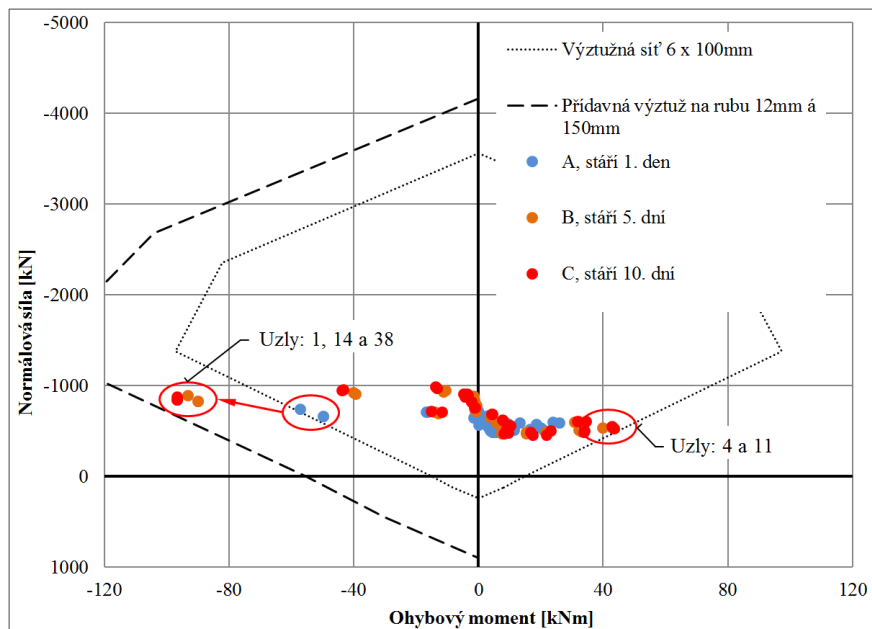
Varianta II., zohledňující příhradové oblouky i výztužné sítě v rámci homogenizace průřezu, podává totožné výsledky, jako varianta III., ve které byly výztužné oblouky modelovány pomocí „beam“ prvků a v rámci homogenizace průřezu byly zohledněny pouze výztužné sítě. Na základě uvedené informace lze říci, že uvedený postup dovolující zjednodušení numerického modelu homogenizací ostění podává dostatečně spolehlivé výsledky pro praktické užití. Případné rozpory mezi výsledky modelu a monitoringem jsou způsobeny zejména individuálním přístupem k numerickému modelování (volba konstitutivního vztahu apod.) a často také chybami zatížený monitoring.

Při dalším vyhodnocení je pozornost soustředěna pouze na modelovou variantu II., která v rámci homogenizace průřezu uvažovala příhradové oblouky a výztužné sítě. Obrázek 6.4 demonstruje posouzení primárního ostění ve vybraných časových etapách výstavby:

- A, stáří vybraného úseku 1 den,
- B, konkrétně stáří vybraného úseku 5 dní, vzdálenost čelby 5 m,
- C, konkrétně stáří vybraného úseku 10 dní, vzdálenost čelby 10 m,

Obrázek 6.4 prezentuje interakční diagram sestavený pro řešené ostění se zanedbáním výztužných oblouků. Výztužný oblouk se tak uplatnil pouze v numerickém

modelu respektive tuhosti primárního ostění. Z výsledků je patrné, že únosnost ostění v uzlech 1, 14 a 38 (přechod boků a protiklenby) byla vyčerpána (tečkovaný interakční diagram). Tyto uzly se nacházejí v místech spojení protiklenby a boků ostění. V tomto místě je nutno uvažovanou výztuž rozšířit o pruty průměru 12mm s osovou vzdáleností 150mm, čemuž odpovídá čárkovaný interakční diagram. Jistým rizikem jsou také uzly 4 a 11 a jím blízké, které se nacházejí v klenbě díla. Zatížení je v těchto uzlech téměř na hranici únosnosti ostění. Uvedené koncentrace napětí jsou způsobeny příčným tvarem ostění respektive přechodem jeho boků do protiklenby. Vzniklé koncentrace by bylo možné řešit vhodnějším příčným tvarem ostění, např. zaoblením v místech přechodu.



Obr. 6.4 Interakční diagram se zakreslenými vnitřními silami (varianta II.)

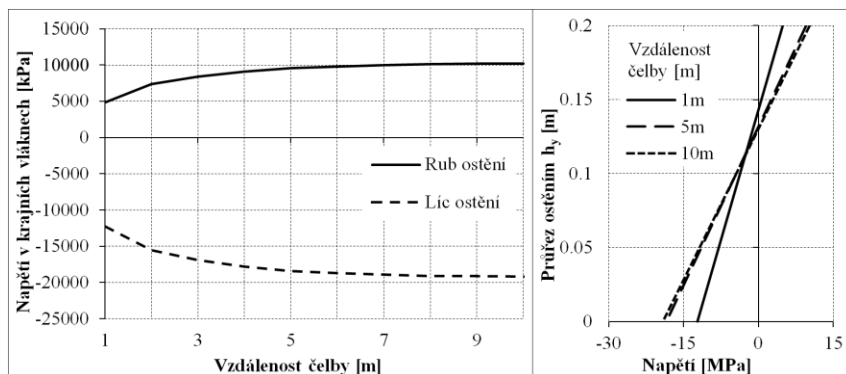
Z hlediska posouzení primárního ostění dle EC7, EC2 je tento text kompletní. Přesto, že posouzení nebylo realizováno pro všechny fáze zrání SB v ostění (zejména do 28dní), je podán tento návod vyčerpávajícím způsobem. Další kroky kopírují kroky předešlé v závislosti na počtu uvažovaných konstrukčních fází ostění (zrání SB), dále

na technologii ražby (členění čelby, délka zabírek apod.) a míře zjednodušení numerického modelu.

Vzdálenost čelby [m]:	1	5	10
Rub ostění	4860	9540	10200
Líc ostění	-12200	-18400	-19200

Tab. 6.2 Vývoj tangenciálních napětí v krajních vláknech ostění v závislosti na vzdálenosti čelby

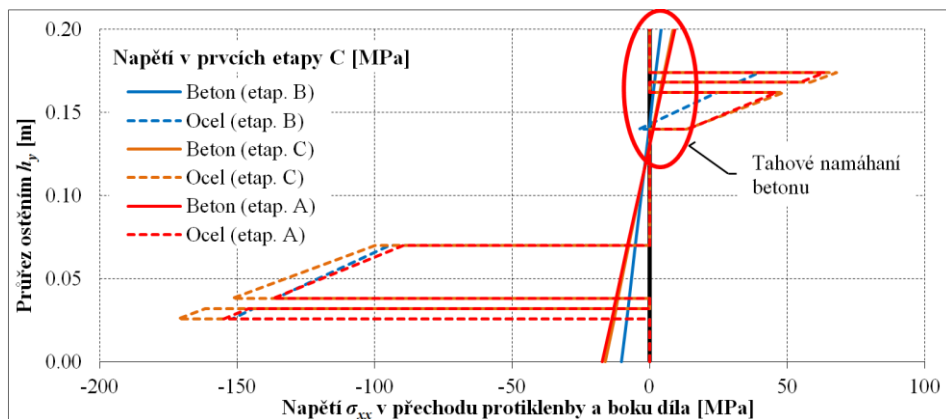
Další část textu se soustředí na detailní analýzu vývoje napjatostního stavu ve vybraném řezu s kritickými hodnotami napětí, dle obr. 6.4 jsou to uzly: 1=38, 14. Zájmový řez se nachází ve vzdálenosti 10m od kraje numerického modelu mezi postupem ražby desátého a jedenáctého metru. Tabulka 6.2 shrnuje výsledky tangenciálního napětí ve vybraném řezu ostění během ražby, které byly získány: Results – Shell Element Stresses – S-XX TOP (odpovídá rubu ostění) a S-XX BOT (odpovídá líci ostění). Obrázek 6.5 prezentuje vývoj napětí grafickou podobou. Levá část obrázku prezentuje vývoj napětí v krajních vláknech ostění v závislosti na vzdálenost čelby od analyzovaného řezu, levá část obrázku potom vykreslené napětí po průřezu ostění ve vybraných etapách výstavby.



Obr. 6.5 Vývoj tangenciálních napětí v krajních vláknech ostění v závislosti na vzdálenosti čelby

Analýze napjatostního stavu jednotlivých prvků ostění – oceli a betonu byly podrobeny, stejně jako v případě posudku, etapy A, B, C se vzdáleností čelby od řešeného řezu 1m, 5m a 10m. Příloha A prezentuje včetně přetvárných parametrů homogenizovaného průřezu také skupinu přerozdělovacích koeficientů, pomocí kterých byl určen stav napětí v jednotlivých prvcích ostění (pravá část obr. 6.5).

Výpočtem dle teorie spolupracujících prstenců, na rozdíl od teorie železobetonu, nejsou ošetřena tahová napětí v průřezu, která jsou způsobena velkou výstředností zatížení. Zatím co u teorie železobetonu je část průřezu namáhaná tahem vyloučena z činnosti, u teorie spolupracujících prstenců tomu tak není. Tato vlastnost teorie je daná podmínkami jejího odvození [27, 28]. Při interpretaci výsledků je možné připustit variantu vzniku tahových trhlin v betonu a redistribuci napětí do ocelových prvků, které v tomto případě mají velkou rezervu únosnosti. Uvedený závěr je dle zásad NRTM, kde primární ostění tvoří sice podstatnou, ale dočasnou konstrukci, přípustný.



Obr. 6.6 Napětí v jednotlivých prvcích ostění, oceli a betonu, po přepočtu na základě přerozdělovacích koeficientů softwaru Homogenizace

Tato kapitola si kladla za cíl představit praktické použití softwaru *Homogenizace* (teorie spolupracujících prstenců) při řešení prostorového numerického modelu ražby tunelu s účelem posouzení primárního ostění. Řešení dovolilo zohlednit časově závislé parametry primárního ostění dané tuhnutím stříkaného betonu a zejména

přítomnost ocelových výztužných oblouků, které by jinak bylo nutné zcela zanedbat nebo modelovat pomocí samostatných prvků za cenu náročnějšího numerického modelu. Při tvorbě modelu tak byla zohledněna „skutečná“ tuhost samotného ostění a jeho interakce s masivem. Posouzení je pak realizováno klasicky dle EC2 sestavením interakčního diagramu a jeho srovnáním se zatížením průřezu. V rámci sestavení interakčního diagramu nebyly zohledněny výztužné oblouky z důvodu nesplnění podmínek kladených na železobetonové konstrukce.

7 Závěr

Úvodní kapitoly práce shrnuly obecné poznatky a současný stav týkající se problematiky vyztužování tunelových staveb ražených dle NRTM a definovaly podstatu a význam primárního ostění. Včetně základního popisu primárního ostění a jeho jednotlivých komponent byl podrobněji rozebrán vývoj časově závislých parametrů komponenty, z hlediska NRTM nejvýznamnější - stříkaného betonu. Práce také obsahuje základní přehled normativních postupů, alternativních metod a možností přístupů k tvorbě numerických modelů, pomocí kterých je ostění navrhováno a posuzováno.

Práce rozšířila výše zmíněné obecně užívané poznatky o alternativní postup, který dovoluje při tvorbě numerických modelů zohlednit podstatné vlastnosti primárního ostění:

- heterogenní strukturu ostění – beton, ocelové prvky a jejich prostorové uspořádání v průřezu ostění;
- časově závislé parametry stříkaného betonu.

Tyto vlastnosti byly v rámci realizace numerických modelů zohledněny pomocí softwaru *Homogenizace*, který nahrazuje heterogenní strukturu primárního ostění strukturou homogenní. Řadou realizovaných studií byly ověřeny vlastnosti použitého softwaru, včetně způsobu jeho praktického užití.

Kapitola 6 představila praktickou aplikaci softwaru *Homogenizace* při numerickém modelování a následném posouzení primárního ostění. V rámci tvorby modelu byl zohledněn postup ražby, přítomnost ocelových oblouků a časově závislé parametry stříkaného betonu. Ostění bylo modelováno ve 4 variantách, které potvrzují

vhodnost použití softwaru *Homogenizace*. Primární ostění bylo závěrem posouzeno dle EC2 a průřez s extrémní zátěží byl podroben analýze napětí.

Práce neobsahuje studii, která by komparovala výsledky modelů s výsledky monitoringu skutečné stavby z důvodu komplexnosti dané problematiky. Během řešení tohoto úkolu by bylo nutné brát v úvahu mnoho proměnných, jejichž řešení je předmětem dalšího výzkumu autora.

Literatura

- [1] KLEPSATEL, F., KUSÝ, P., MAŘÍK, L. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN 80-88905-43-5.
- [2] KLEPSATEL, F., MAŘÍK, L., FRANKOVSKÝ M. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga group, 2005. ISBN 80-8076-021-7.
- [3] ALDORF J., BRADÁČ J., CHROMEČKA M., STEHLÍK E. *Podzemní stavby a zakládání staveb - vybrané kapitoly*. Skriptum VŠB-TU Ostrava, 1993. ISBN 978-80-707-816-30.
- [4] BARTÁK J., PRUŠKA J. *Podzemní stavitelství*. Skriptum ČVUT, 2011. ISBN 978-80-0104-789-7.
- [5] ALDORF J., HASÍK O., HORÁK V. a kol. *Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR*. ITA/AITES, 2006. Dostupné na: <http://www.ita-aites.cz/cz/>
- [6] BARTÁK, J. *Vývoj podzemního stavitelství v České republice. Silnice a železnice* [online]. 2010-07-04 [cit. 2014-08-20]. Dostupné zde: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vyvoj-podzemniho-stavitelstvi-v-ceske-republice/>. ISSN 1803-8441.
- [7] DOLÍNEK, P., *Dopravní tunely v Praze*. Proc. 13th Int. Conf. Underground Construction Prague 2016, Prague: Czech Tunnelling Association ITA-AITES. 20 stran. ISBN 978-80-906452-0-2.
- [8] PRUŠKA., J. a kol. *Spřažené primární a sekundární ostění*. Výzkumná aktivita v rámci projektu CESTI. Dostupné zde: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2015/2015_WP4_TL4_4_1.pdf
- [9] ČSN EN 1997-1 (731000) Eurokód 7: *Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla*. ICS 91.010.30; 93.020, Praha: ÚNMZ, září 2006.
- [10] HILAR, M. a kol. *Sířikaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES. 2008. 66s. ISBN 978-80-254-1262-6.

- [11] KRCH, V., RIEGER, R. Městský okruh, úsek Myslbekova – Prašný most (Mypra) Metodika návrhu primárního a sekundárního ostění, *Tunel*, 2007, roč. 16, č. 3, s. 40-44, ISSN: 1211-0728.
- [12] SVOBODA, T. *Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu*. Doktorská dizertační práce. Praha: přírodovědecká fakulta UK, 2010.
- [13] KARAKUS, M. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, str. 47–56, 2007.
- [14] SVOBODA, T., MAŠÍN, D. Convergence-confinement method for simulating NATM tunnels evaluated by comparison with full 3D simulations. In *Proc. International Conference Underground Constructions Prague 2010 - Transport and City Tunnels*, Prague, Czech Rep. 795-801, 2010.
- [15] MÖLLER, S. C., VERMEER, P. A. On design analyses of NATM tunnels. In Y. Erdem and T. Solak, editors, *Tunnelling and Underground Space Technology - Proceedings of the ITA- AITES 2005 World Tunnel Congress and 31st ITA General Assembly*, Istanbul, Turkey, pages 233–238, 2005.
- [16] MAŠÍN, D. 3D modelling of a NATM tunnel in high K_0 clay using two different constitutive models. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, No.9: 1326–1335, 2009. ISSN 1090-0241.
- [17] ROTT, J., MAŠÍN, D. Využití konvergenčních měření ve zpětném výpočtu součinitele bočního tlaku v klidu v brněnském jílu. In *Proc. 41st Conf. Zakládání Stavěb*, Brno 2013. ISBN 978-80-87920-00-8.
- [18] ROTT, J., MAŠÍN, D. Užití zpětně stanoveného součinitele bočního tlaku v klidu K_0 brněnského jílu v numerické simulaci postupu ražby tunelu Dobrovského. In *Proc. 42st Conf. Zakládání Stavěb*, Brno 2014. ISBN 978-80-87920-01-5.
- [19] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ICS 91.010.30; 91.080.40, Praha: ÚNMZ, červenec 2011.
- [20] ORESTE, P. P. A procedure for determining the reaction curve of shotcrete lining considering transient conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2003, 36 (3), 209-236. DOI: 10.1007/s00603-002-0043-z.
- [21] PÖTTLER, R. Time-dependent rock-shotcrete interaction. A numerical shotcut. *Computers and Geotechnics*, Volume 9, Issue 3, 1990, Pages 149-169. doi:10.1016/0266-352X(90)90011-J.
- [22] ZAPLETAL, A. Statický model spřaženého ocelobetonového ostění. *Tunel*, 2007, roč. 16, č. 4, s. 68-71, ISSN: 1211-0728.

- [23] ROTT, J. Homogenizace a modifikace složeného ocelobetonového ostění s časovým nárůstem modulu pružnosti stříkaného betonu. *Tunel*, 2014, roč. 23, č. 3, s. 53-60, ISSN: 1211-0728.
- [24] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J., STANĚK, F. Výpočetní software: *Homogenizace*. 2011. ev.č.:011/14-11-2011_SW. Dostupné na: <http://www.fast.vsb.cz/224/cs/okruhy/software/>
- [25] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. *Determination of development of elastic modulus value for primary steel concrete reinforcement according to cooperative-ring-exchange theory*. Proc. 11th Int. Conf. Underground Construction Prague 2010, Prague: Czech Tunnelling Association ITA-AITES, 802-804. ISBN 978-80-254-7054-1.
- [26] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Určení přetvárných vlastností a stavu napětí v průřezu ocelobetonového ostění. *Tunel*, 2010, roč. 19, č. 4, s. 68-74, ISSN: 1211-0728.
- [27] BULYTCHEV, N. C. *Mechanika podzemních sooruzenij*. (1982) Moskva: NEDRA, 270
- [28] HRUBEŠOVÁ, E. *Příspěvek k problematice inverzní analýzy v geotechnice*. Disertační práce. Ostrava: VŠB-TUO, FAST, 1999. Školitel práce: prof. Ing. Aldorf Josef, DrSc.
- [29] ALDORF, J., HRUBEŠOVÁ, E., VOJTASÍK, K., ĎURIŠ, L. Alternativní výpočet tuhosti betonového ostění vyztuženého válcovanými prvky. *Informace Českého svazu stavebních inženýrů, ročník XV*. (2009), č. 1, 27-31. ISSN 1213-4112.
- [30] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., ĎURIŠ, L. Porovnání stavu napjatosti v průřezu tunelové ocelobetonové výztuže stanovené dle teorie spolupracujících prstenců a teorie železobetonu. *Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada stavební*. 2009, ročník IX, článek č.10.
- [31] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Určení přetvárných vlastností a stavu napětí v průřezu ocelobetonového ostění. *Tunel*, 2010, roč. 19, č. 4, s. 68-74, ISSN: 1211-0728.
- [32] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., ĎURIŠ, L. Assessment of stress state in a heterogeneous cross-section from steel and shotcrete at primary tunnel lining. *SGEM 2014, 14th GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings Volume II*. 17-26. June, 2014, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., str. 125-129. ISBN: 978-619-7105-08-7.

Seznam vybraných publikací doktoranda k tématu disertační práce

MOHYLA, M. Stanovení průběhu napjatosti v průřezu primárního ocelobetonového ostění podzemních děl. In *ÚGN - Ph.D. workshop 2010 : proceedings*. Ostrava: Institute of Geonics AS CR, Ph.D. Workshop 2010 Proceedings [CD-ROM], počet str.: 4, ISBN: 978-80-86407-96-8.

MOHYLA, M. Stanovení přetvárných parametrů primárního ostění podzemních děl. *Juniorstav 2010: 12. odborná konference doktorského studia : sborník anotací: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 24.2.2010*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2010, s. 225-225, ISBN 978-80-214-4042-5.

VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Určení přetvárných vlastností a stavu napětí v průřezu ocelobetonového ostění. *Tunel*, 2010, roč. 19, č. 4, s. 68-74, ISSN: 1211-0728.

VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Determination of development of elastic modulus value for primary steel concrete reinforcement according to cooperative-ring-exchange theory. *Transport and City Tunnels - Underground construction Prague 2010*. Prague: Czech Tunelling Association ITA/AITES, 2010, s. 802-804, ISBN 978-80-254-7054-1.

VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J., STANĚK, F. Výpočetní software: *HOMO. 2011. ev.č.:011/14-11-2011_SW*. Dostupné na: <http://www.fast.vsb.cz/224/cs/okruhy/software/>

MOHYLA, M., VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E. Modelování primárního ostění podzemních děl. *ÚGN - Ph.D. workshop 2012: proceedings: Ostrava, December 5, 2012*. Ostrava: Institute of Geonics AS CR, 2012, s. 34-37, ISBN: 978-80-86407-31-9.

ŽURIŠ, L., ALDORF, J., MOHYLA, M. Modelování chování tuhého prvku v primárním ostění. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební*, 2012, roč. 12, č. 2, s. 87-92. ISSN: 1213-1962.

ALDORF, J., ŽURIŠ, L., MOHYLA, M. Vliv tuhých liniových prvků v primárním ostění tunelu. *Geotechnika 2012: konštrukcie, technológie a riziká: 13. ročník medzinárodnej konferencie: zborník: Slovenská republika, Vysoké Tatry, Horný Smokovec, hotel Bellevue, 26.-28.09.2012*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 138-143. ISBN: 978-80-248-2785-8.

MOHYLA, M. Application of the homo software at design of a primary tunnel lining. *Aktualne badania i analizy z inżynierii lądowej: prace naukowe doktorantów*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013, s. 117-124. ISBN: 978-83-7880-058-3.

VOJTASÍK, K., MOHYLA, M., HRUBEŠOVÁ, E., ĎURIŠ, L. Optimalizace deformačních parametrů primárních tunelových ostění. *Podzemní stavby Praha 2013: 12. mezinárodní konference*,: 22.-24. dubna 2013, Praha, Česká republika. Praha: Česká tunelářská asociace, 2013, s. 1-4. ISBN: 978-80-260-3868-9.

MOHYLA, M. Determination of stress-state in cross-section of a primary tunnel lining. *Wiedza i eksperymenty w budownictwie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014, s. 121-127. ISBN: 978-83-7880-191-7.

VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., ĎURIŠ, L. Assessment of stress state in a heterogeneous cross-section from steel and shotcrete at primary tunnel lining. *SGEM 2014, 14th GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Minig, Conference Proceedings Volume II*. 17-26. June, 2014, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., str. 125-129. ISBN: 978-619-7105-08-7. *)

VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., ĎURIŠ, L., Design and Evaluation of a Subterranean Work Lining from Layers of Shotcrete and Steel Arch. *6th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction 2014*, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 24.-27.6.2014, str. 79, příspěvek na DVD nosiči, ISBN: 978-80-248-3147-3. *)

VOJTASÍK, K., MOHYLA, M., HRUBEŠOVÁ, E., Stress-strain state assesment in oval tunnel. In: *15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015*. Volume II. Issue I. 17-26. June, 2014, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., Pages 753-757. ISSN: 1314-2704. *)

MOHYLA, M., VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., ZDVOŘÁK, J. 3D numerical analysis of primary tunnel lining. In: *15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015*. Volume II. Issue I. 17-26. June, 2014, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., Pages 3-8. ISSN: 1314-2704. *)

*) scopus.com

Autor: Marek Mohyla
Katedra, Instituce: Katedra geotechniky a podzemního stavitelství (224)
Název publikace: Problematika primárního ocelobetonového ostění podzemních děl
Počet stran: 40
Místo, rok vydání: Ostrava, 2016
Název nakladatele: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Tisk: Fakulta stavební, VŠB – TU Ostrava
Náklad: 26ks
ISBN: 978-80-248-3950-9