

MOŽNOSTI VYUŽITÍ NUMERICKÉ SIMULACE PRO NÁVRH ENERGETICKÉHO TUNELU

E. Hruběšová & M. Mohyla

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava

ABSTRACT: Tento článek prezentuje numerickou analýzu segmentového ostění energetického tunelu se zaměřením na možnosti modelování přenosu tepla s využitím komerčního software MIDAS GTS NX založeného na metodě konečných prvků. Prezentovaný model předpokládá pouze vedení tepla. Přenos tepla prouděním podzemní vody není explicitně modelován, ale jeho potenciální vliv je aproximován pomocí ekvivalentní tepelné vodivosti odvozené z tepelné disperzní teorie. Vzhledem k omezením použitého softwaru nebylo možno přímo implementovat anizotropní tepelnou vodivost, proto byla v modelu uvažována zjednodušeně identická průměrná efektivní tepelná vodivost v celém modelu.

Numerický model simuluje tepelnou interakci mezi ostěním tunelu, zabudovanými trubnicemi s teplonosnou kapalinou a okolním horninovým prostředím. Tepelná odezva je vyhodnocena z hlediska rozložení teplot v ostěním tunelu, v okolním horninovém prostředí a v trubnicích, jakož i rozložení tepelného toku podél obvodu tunelu. Výsledky jsou porovnány s referenčními numerickými studiemi realizovanými na části metra v Turíně, které jsou k dispozici v literatuře a byly prezentovány kolektivem autorů pro vedením prof. Barly.

I přes zjednodušující předpoklady modelovacího přístupu dokumentuje vypočtený tepelný výkon dobrou shodu s referenčním modelem. To naznačuje, že pro předběžné studie návrhu a parametrické analýzy by model založený na vedení tepla se zavedením ekvivalentní disperzní tepelné vodivosti mohl spolehlivě odhadnout energetický potenciál energetického tunelu. Navrhovaná metodika nabízí praktickou alternativu k plně sdruženému termo-hydraulickému modelování energetických tunelů.

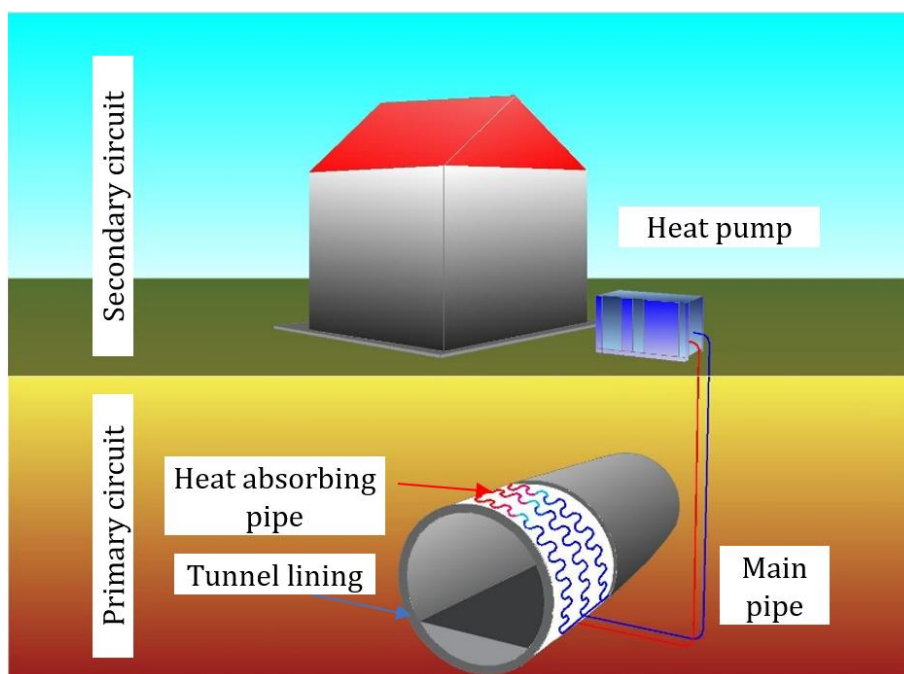
1. ÚVOD

Rostoucí poptávka po udržitelných, nízkouhlíkových energetických systémech podnítila zvýšený zájem o využívání podzemních staveb pro získávání geotermální energie či ukládání energie do obklopujícího horninového prostředí. Energetické tunely, které mají ve svém ostěním integrována potrubí s teplonosnou kapalinou pro výměnu tepla, představují způsob využití mělké geotermální energie bez nutnosti dodatečného nákladného vrtání (Obr. 1). Zejména nově budované tunely tak mohou přispět k využití obnovitelných zdrojů energie pro účely vytápění a chlazení objektů.

V praxi se obvykle používají dvě různé technologie integrace potrubí tepelného výměníku do tunelového ostění. V případě ražby tunelu s využitím konvenčních tunelovacích metod (např. Nová rakouská tunelovací metoda – NATM) se potrubí zpravidla upevňuje na netkaná geosyntetika mimo staveniště a následně se ukládá mezi primární a sekundární ostění (Adam a Markiewicz 2009). Při použití mechanizované ražby jsou segmenty tunelového ostění obsahující potrubí pro výměnu tepla prefabrikovány a na stavbě se osazují pomocí tunelovacího stroje (TBM) (Barla et al. 2016). Potrubí tepelného výměníku používané pro tyto aplikace je vyrobeno z polyethylenu a je schopno odolávat vysokým tlakům a teplotám, je odolné proti korozi a zaručuje vysokou trvanlivost. Nejčastěji používané průměry potrubí v tunelových aplikacích jsou 25 mm a 32 mm s odpovídajícími tloušťkami stěny 2.3 mm a 2.9 mm. Tyto rozměry geometrie potrubí představují kompromis mezi mechanickou trvanlivostí materiálu a přenosem tepla. Teplonosná kapalina uvnitř potrubí je obvykle propylenglykol smíchaný s vodou. Teplo se přenáší mezi kapalinou a okolním horninovým prostředím prostřednictvím betonového ostění, což umožňuje odběr nebo akumulaci tepla v závislosti na ročním období.

Navzdory svému potenciálu představují energetické tunely několik výzev pro numerické modelování. Složitá geometrie tunelového ostění, zakřivené uspořádání vestavěných potrubí a sdružené procesy mezi kapalinou, betonovým ostěním a okolním horninovým prostředím vyžadují komplexní numerický přístup a nástroje. Ačkoli se metoda konečných prvků (FEM) osvědčila při modelování energetických pilot a tepelných vrtů, její aplikace na energetické tunely je zatím relativně omezená. Fyzikální procesy probíhající v celém modelovaném systému jsou složité a zahrnují zejména mechanické, tepelné, hydraulické a chemické procesy a jejich vzájemné vlivy. Přenos tepla probíhá jak vedením (v horninovém masivu, materiálu ostění a potrubí), tak prouděním (v teponosné kapalině v potrubí, v podzemní vodě proudící v okolním prostředí a ve vzduchu proudícím uvnitř tunelu). Standardní numerické modely používané v praxi nezahrnují všechny tyto procesy a vlivy a vždy vyžadují určitou míru zjednodušení, stejně jako výběr nejpodstatnějších procesů a vlivů, které mají být v numerickém modelu zohledněny.

Cílem tohoto článku je demonstrovat použití metody konečných prvků pro simulaci tepelného chování energetického tunelu s využitím tepelného modulu komerčního softwaru MIDAS GTS NX (Korea). Důraz je v tomto článku kladen na aspekty tepelné simulace relevantní pro tepelný návrh v inženýrské praxi.



Obrázek 1: Schéma využití technologie tepelných výměníků v tunelovém ostění pro vytápění či chlazení objektů

2. KONCEPČNÍ PŘÍSTUP K TVORBĚ NUMERICKÉHO MODELU ENERGETICKÉHO TUNELU V SOFTWARE MIDAS GTS NX

Pro porovnání výsledků prezentovaného 3D numerického modelu energetického tunelu s využitím softwaru MIDAS GTS NX, byly vstupní geometrické a materiálové charakteristiky numerického modelu zvoleny tak, aby odpovídaly modelu prezentovaného prof. Barlou a kol. v práci (Barla et al. 2016), který v tomto článku považujeme za referenční model. V uvedené práci prof. Barla a jeho tým prezentovali termo-hydraulický numerický model segmentu ostění energetického tunelu metra v Turíně vytvořený v softwaru FEFLOW.

Prezentovaný 3D numerický model zahrnuje:

- vedení tepla uvnitř segmentu tunelu;
- vedení tepla v okolním horninovém prostředí;
- vedení tepla ve stěnách potrubí;
- přenos tepla prouděním uvnitř teponosné kapaliny v potrubí.

Numerický model explicitně neuvažuje proudění podzemní vody ani s ním související přenos tepla prouděním podzemní vody (advekcí). Pro zohlednění potenciálního vlivu proudění podzemní vody na přenos tepla byl použit zjednodušený přístup založený na tepelné disperzi. Na rozdíl od referenčního modelu nebyly do modelu zahrnuty vlivy ventilace uvnitř tunelu ani provozní tepelné zdroje uvnitř tunelu.

Numerický model se skládá z následujících geometrických částí:

- objemové 3D prvky reprezentující segmentové betonové ostění tunelu o tloušťce 30 cm;
- objemové 3D prvky reprezentující okolní horninové prostředí;
- jednorozměrné (1D) prvky reprezentující potrubí tepelného výměníku, která jsou v ostění uspořádána do zakřivené (serpentinové) konfigurace.

Účinek advekce byl v prezentovaném modelu zohledněn prostřednictvím zvýšené efektivní tepelné vodivosti λ_{ef} , která byla stanovena pomocí následující aproximační rovnice (Yang & Nakayama 2010; Afshari et al. 2019):

$$\lambda_{ef} = \lambda_{stagnant} + \lambda_{disp}. \quad (1)$$

kde $\lambda_{stagnant}$ odpovídá tepelné vodivosti zeminy bez vlivu proudění podzemní vody a λ_{disp} tepelné disperzní vodivosti zjednodušeně nahrazující přenos tepla prouděním podzemní vody.

Příspěvek tepelné vodivosti způsobený disperzí byl odhadnut na základě klasické teorie přenosu tepla v porézním prostředí. Složku tepelné disperzní vodivosti lze aproximovat pomocí následujícího vztahu (Yang & Nakayama 2010):

$$\lambda_{disp} = \rho_w c_w \alpha \frac{v_D}{n} = 4.18 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K} \times \alpha \frac{v_D}{n} \quad (2)$$

kde ρ_w je hustota podzemní vody (1000 kg/m³), c_w - specifická měrná tepelná kapacita vody (4180 J/(kg K)), α - disperzivita, v_D - Darcyho rychlost proudění, n - pórovitost.

Podélná tepelná disperzivita α_L je definována ve směru preferenčního proudění podzemní vody (tj. po proudu), zatímco příčná disperzivita α_T označuje tepelnou disperzitivitu kolmo ke směru proudění. Na základě tohoto přístupu lze získat různé hodnoty efektivní tepelné vodivosti $\lambda_{ef,L}$ v podélném směru (rovnoběžném se směrem proudění) a $\lambda_{ef,T}$ v příčném směru (kolmém na směr proudění).

Vzhledem k tomu, že software MIDAS GTS NX neumožňuje zohlednit tepelnou anizotropii v modelu, bylo využito harmonické zprůměrování hodnot efektivní tepelné vodivosti (za předpokladu, že dvě příčné složky tepelné vodivosti kolmé ke směru proudění podzemní vody jsou shodné):

$$\lambda_{ef,average} = \frac{3}{\frac{1}{\lambda_{ef,L}} + \frac{2}{\lambda_{ef,T}}} \quad (3)$$

Takto stanovená průměrná hodnota efektivní tepelné vodivosti $\lambda_{ef,average}$ byla uvažována v celém prezentovaném modelu. Na rozdíl od referenčního modelového přístupu použitého v (Barla et al. 2016) je tedy předložený modelový přístup čistě konduktivní a explicitně nezohledňuje preferenční směr proudění podzemní vody. Varianta s rovnoměrně zvýšenou efektivní tepelnou vodivostí v celém modelu (izotropní efektivní tepelná vodivost) odpovídá horní mezi vlivu proudění na přenos tepla, tento přístup tedy nadhodnocuje advektivní přenos tepla tím, že modelově zvyšuje vedení tepla ve všech směrech v celém modelovaném území.

3. VSTUPNÍ PARAMETRY NUMERICKÉHO MODELU

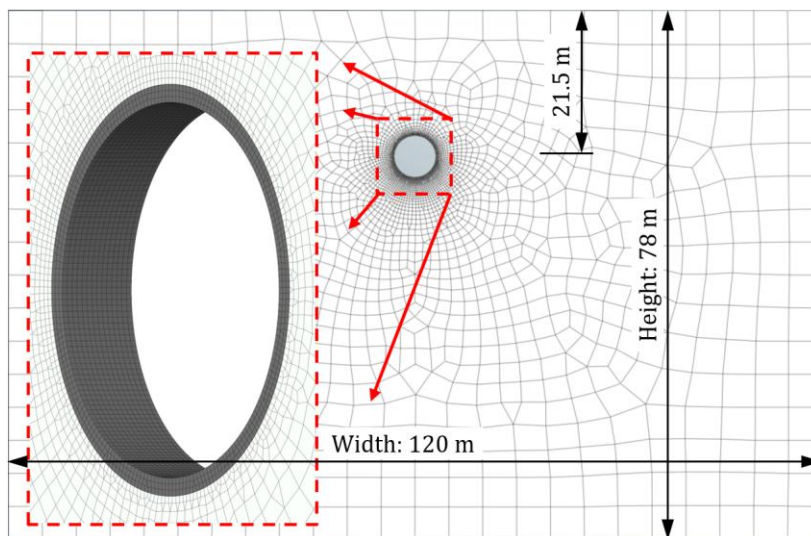
Obrázek 2 znázorňuje simulovaný tunel s kruhovým příčným průřezem vnitřního průměru 6.8 m, uložený v hloubce 21.5 m pod povrchem terénu. Šířka modelu je 120 m a výška 78 m. Segmentové betonové ostění má tloušťku 30 cm. Smyčky potrubí jsou v segmentu ostění umístěny s roztečí 30 cm, přičemž vnější průměr potrubí je 25 mm a tloušťka stěny 2.3 mm (viz Obrázek 3). Pro popis proudění média v potrubí byl použit nástroj „Pipe Cooling“, který je standardní součástí termálního modulu software MIDAS GTS NX. Vnitřní průměr potrubí je 0.0204 m, součinitel přestupu tepla 1000 W/(m²K) a měrná tepelná kapacita teplotnosné kapaliny 3.8 10³ J/(kg K). Předpokládaná Darcyho rychlost proudění podzemní vody je 1.5 m/den. Předpokládaná vstupní teplota do systému potrubního

tepelného výměníku (T_{inlet}) odpovídá hodnotám 28 °C v létě a 4 °C v zimě. Počáteční teplota horninového prostředí je uvažována 10 °C. Rychlost proudění teplotné kapaliny v potrubí je předpokládána 0.4 m/s (turbulentní režim).

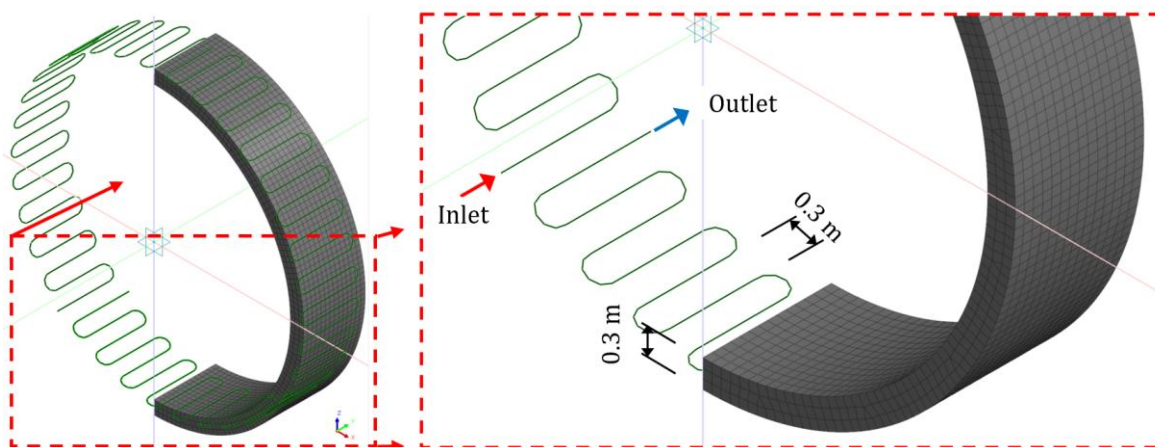
S využitím vztahů (1) a (2) jsou vyhodnoceny následující hodnoty efektivní vodivosti v obou směrech následovně:

$$\lambda_{ef.,L} = 906.97 \text{ W/(mK)} \text{ a } \lambda_{ef.,T} = 90.30 \text{ W/(mK)} \quad (4)$$

Na základě vztahu (3), má odpovídající izotropní ekvivalentní efektivní vodivost hodnotu $\lambda_{ef.,average} = 129 \text{ W/(mK)}$. Tepelné charakteristiky zeminového materiálu (Turínské zeminy) jsou uvedeny v Tabulce 1 (Barla et al. 2016).



Obrázek 2: Schéma numerického modelu



Obrázek 3: Detail soustavy trubíc v tunelovém segmentovém ostění

Tabulka 1: Tepelné charakteristiky zeminy (Turínské zeminy) (Barla et al. 2016)

Parametr	Hodnota
Pórovitost n [-]	0.25
Objemová tepelná kapacita vody $\rho_w c_w$ [MJ/m ³ /K]	4.2
Objemová tepelná kapacita zeminy $\rho_s c_s$ [MJ/m ³ /K]	2
Tepelná vodivost vody v zemině λ_w [W/m/K]	0.65
Tepelná vodivost materiálu zeminy (zeminových zrn) λ_s [W/m/K]	2.8
Podélná disperzivita a_L [m]	3.1
Příčná disperzivita a_T [m]	0.3

4. VÝSLEDKY 3D NUMERICKÉHO MODELU ENERGETICKÉHO TUNELU A JEJICH SROVNÁNÍ S VÝSLEDKY REFERENČNÍ STUDIE

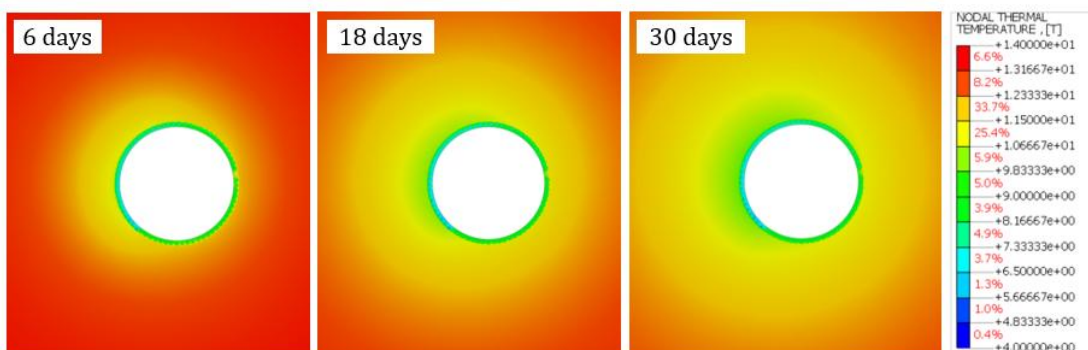
Výsledky 3D numerického modelu vytvořeného pomocí softwaru MIDAS GTS NX jsou následující:

- časový průběh rozložení teplot v tunelovém ostění, okolním horninovém prostředí a potrubí;
- vývoj tepelného toku v tunelovém ostění a okolním horninovém prostředí.

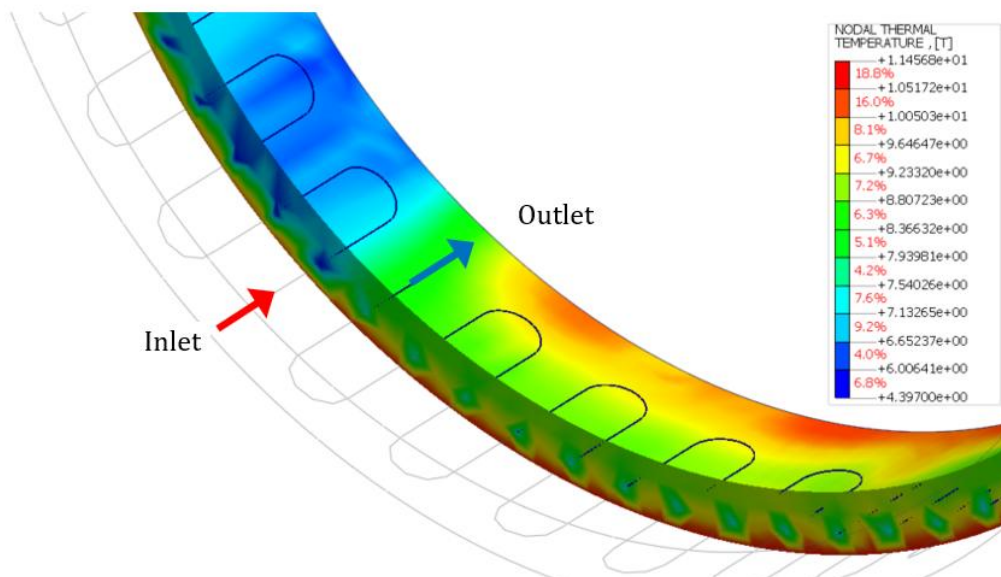
Získané výsledky teplot a tepelných toků jsou následně porovnány s výsledky referenčního numerického modelu vytvořeného v softwaru FEFLOW a prezentovaného v práci (Barla et al. 2016).

Srovnávací grafy zobrazující výsledky tepelného 3D numerického modelu vytvořeného v softwaru MIDAS GTS NX, ve kterém je vliv proudění podzemní vody aproximován pomocí disperzní tepelné vodivosti, společně s výsledky referenčního sdruženého termo-hydraulického 3D numerického modelu vytvořeného v softwaru FEFLOW, jsou uvedeny na obrázcích 4 až 6.

a) Temperature redistribution in mass



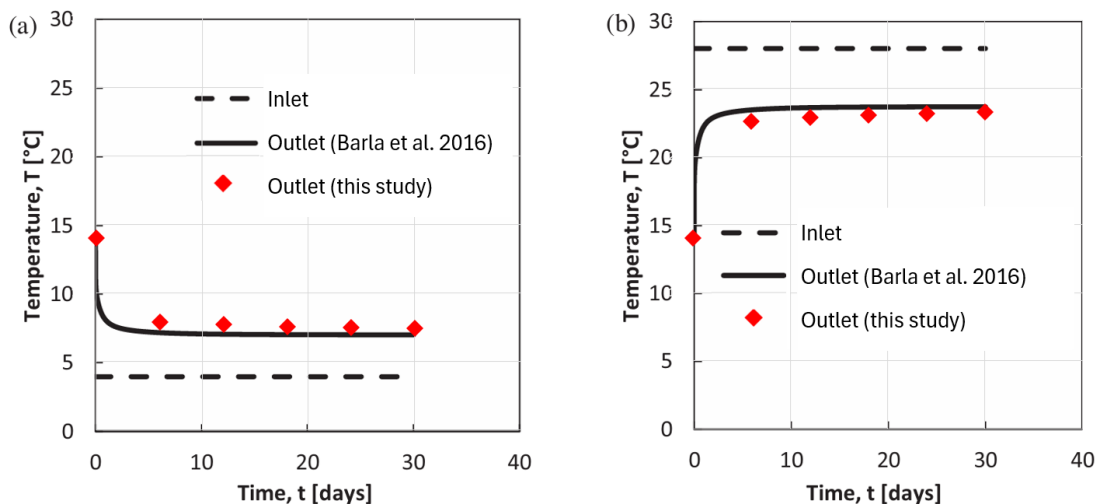
b) Temperature redistribution in lining



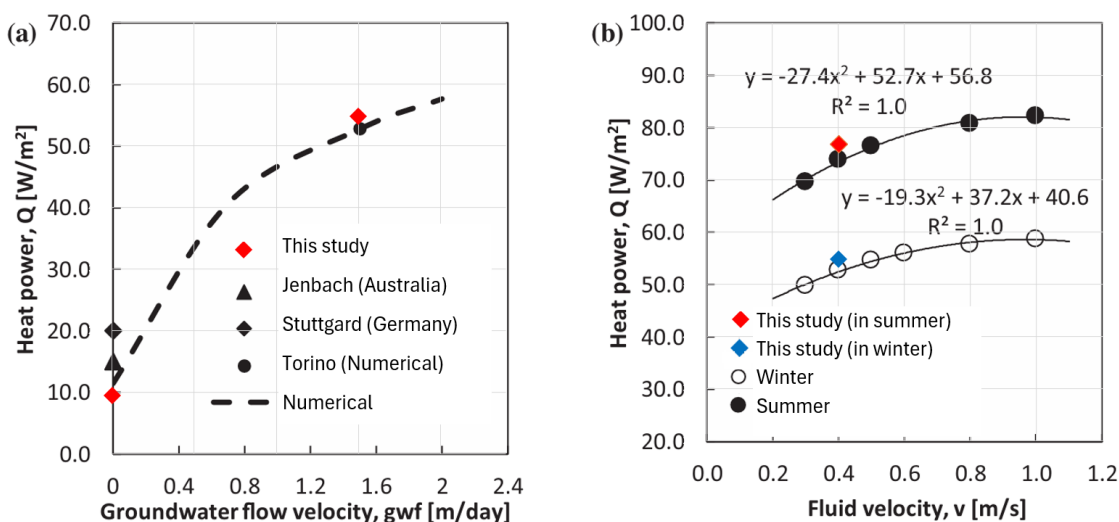
Obrázek 4: Rozložení teplot a) v horninovém prostředí a b) v segmentovém tunelové ostění (zimní podmínky)

Tepelný tok podél tunelu není rovnoměrný. V zimním období jsou v blízkosti vstupního bodu do trubicového systému pozorovány nižší hodnoty teplot v důsledku menšího teplotního rozdílu mezi cirkulující kapalinou a okolním horninovým prostředím. Směrem k výstupnímu bodu se tepelný tok postupně zvyšuje. V letním období je situace opačná.

I přes určitá uvedená modelová zjednodušení výsledky prezentovaného modelu dokumentují možnosti kvantifikace celkové tepelné odezvy numerického modelu s využitím zjednodušeného konduktivního modelu. Výsledky simulace rozložení teplot a tepelného toku získané pomocí zde prezentovaného zjednodušeného modelu vytvořeného v softwaru MIDAS GTS NX vykazují velmi dobrou shodu s výsledky referenčního modelu.



Obrázek 5: Předepsaná teplota na vstupu do potrubního systému a vypočtená hodnota na výstupu z potrubního systému a) v zimě a b) v létě (upraveno dle Barla et al. 2016)



Obrázek 6: Vliv a) rychlosti proudění podzemní vody v zimě a, b) rychlosti proudění teplotnosného media v trubici na tepelný výkon (upraveno dle Barla et al. 2016)

Bez uvažování vlivu tepelné konvekce podzemní vody vykazuje zjednodušený konduktivní 3D numerický model, v souladu s referenčním modelem, hodnotu tepelného výkonu 10 W/m^2 , zatímco při uvažování rychlosti proudění podzemní vody 1.5 m/den dosahuje hodnota tepelného výkonu 55 W/m^2 (obr. 6(a)).

Hodnota tepelného výkonu při rychlosti proudění teplotnosné kapaliny v potrubí 0.4 m/s rovněž dosahuje stejných hodnot jako v referenční studii, a to jak v letních, tak v zimních podmínkách (obr. 6(b)).

5. ZÁVĚR

Tento článek se zabývá hodnocením tepelné účinnosti ostění energetického tunelu prostřednictvím numerického modelu vytvořeného v softwaru MIDAS GTS NX. Model byl zaměřen na tepelné chování tunelového ostění, okolního horninového prostředí a trubíc. Zvláštní pozornost byla věnována vlivu proudění podzemní vody v rámci omezení konduktivně orientovaného modelu založeného na metodě konečných prvků.

Proudění podzemní vody nebylo modelováno explicitně. Jeho potenciální vliv na přenos tepla byl pouze aproximován zavedením efektivní tepelné vodivosti odvozené z teorie tepelné disperze. Vzhledem k omezením softwaru nebylo možné přímo implementovat anizotropní tepelnou vodivost, a

proto byla do celého modelového prostoru rovnoměrně přiřazena jediná, zprůměrovaná izotropní efektivní hodnota tepelné vodivosti. Tento přístup nereprodukuje preferenční směr proudění podzemní vody, který je explicitně uvažován v pokročilých referenčních termo-hydraulických modelech, ale pouze kvantifikace tohoto advekčního vlivu.

Navzdory těmto zjednodušením vykazují numerické výsledky dobrou shodu s referenčním modelovým přístupem prezentovaným Barlou et al., a to z hlediska celkové tepelné odezvy i celkové výměny tepla mezi tunelovým ostěním a horninovým prostředím. To naznačuje, že při hodnocení integrální tepelné účinnosti ostění energetických tunelů může zjednodušený konduktivní model s izotropní ekvivalentní tepelnou vodivostí zohledňující tepelnou disperzivitou poskytovat spolehlivé a konzistentní výsledky.

Zvolená metodika představuje praktickou a výpočetně efektivní alternativu pro předběžné návrhové studie a parametrické analýzy energetických tunelů, kde je hlavním zájmem celkový tepelný výkon, nikoliv detailní vliv proudění podzemní vody. Pro komplexní analýzu a návrh energetického tunelu z hlediska primárního statického i energetického posouzení je však nutné implementovat kombinovaný termo-mechanický model.

LITERATURA

Adam, D. and Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique*, 59(3), 229–236.

Afshari, A., Shahraeeni, E., & McCartney, J. S. (2019). Evaluation of groundwater flow effects on the thermal performance of energy geostructures. *Geothermics*, 80, 121–134.

Barla, M., Di Donna, A., & Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, 61, 104–113.

Yang, K., & Nakayama, A. (2010). A synthesis of tortuosity and dispersion in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(15–16), 3222–3230.

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Česká republika

eva.hrubesova@vsb.cz

Ing. Marek Mohyla, Ph.D.

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Česká republika

marek.mohyla@vsb.cz