Návrh a vyhodnocení aplikace tepelně vodivého geopolymeru ve vysokoteplotním úložišti energie za pomoci numerického modelování

Disertační práce

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

školitel: Doc. Ing. Václav Kuráž, CSc.

doktorand: Ing. Matěj Černý

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně na základě vlastního výzkumu a že jsem uvedl všechny prameny, ze kterých jsem čerpal.

Ing. Matěj Černý
Praha, srpen 2015

Poděkování

Děkuji Doc. Ing. Václavu Kurážovi, CSc. za vedení práce, Doc. Ing. Michalovi Kurážovi, PhD. a Ing. Janu Uhlíkovi, PhD. za pravidelné konzultace, Prof. Ing. Pavlovi Pechovi, CSc. a ostatním členům katedry KVHEM za studijní zázemí a podporu, Ing. Radimovi Hladkému a Ing. Jaroslavovi Noskovi, PhD. za spolupráci při experimentech a RNDr. Martinovi Milickému za technické a výpočetní zázemí pro zpracování této práce. V neposlední řadě děkuji rodičům, své ženě Anně a svým blízkým za dlouhodobou podporu a trpělivost.

Tato práce vznikla díky výzkumnému projektu „Reversibilní Skladování Energie“ podporovaného Technologickou agenturou České republiky v rámci projektu ALFA (ev. č. TA01020348).

Obsah

1. ÚVOD 1

2. REŠERŠE 2

2.1 SKLADOVÁNÍ ENERGIE 2
2.2 TEPLO A JEHO ŠÍŘENÍ 3
2.2.1 Terminologie a definice 3
2.2.2 Mechanismy přenosu tepla 6
2.3 UKLÁDÁNÍ ENERGIE VE FORMĚ TEPLA 10
2.3.1 Ukládání tepla s využitím zjevného tepla 10
2.3.2 Ukládání tepla s využitím latentního tepla 11
2.3.3 Ukládání tepla s využitím termochemické reakce 12
2.4 PRINCIPY A UŽITÍ TEPELNÝCH ÚLOŽIŠŤ 13
2.4.1 Tepelné úložiště využívající vodu 14
2.4.2 Vrtné tepelné úložiště 15
2.4.3 Úložiště v podzemních základech staveb 15
2.4.4 Ukládání tepla pomocí roztavených solí 15
2.4.5 Vysokoteplotní tepelné úložiště 16
2.5 VÝBĚR HORNINOVÉHO MATERIÁLU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 17
2.5.1 Kritéria výběru horninového materiálu 19
2.5.2 Geomechanické a petrofyzikální parametry vybraných hornin 20
2.5.3 Měření tepelných parametrů hornin 22
2.5.4 Měření tepelných parametrů hornin za vysokých teplot 23
2.5.5 Volba horniny pro tepelné úložiště 25
2.6 TEPELNĚ VODIVÝ GEOPOLYMER 25
2.7 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ 28

3. CÍLE PRÁCE 31

4. METODIKA MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ TEPELNÉHO TRANSPORTU 33

4.1 ROVNICE TRANSPORTU TEPLA 33
4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY TRANSPORTU TEPLA 34
4.2.1 Speciální případy konvekce 34
4.2.2 Speciální případy radiace 37
4.3 ROVNICE PROUDĚNÍ TEKUTINY 37
4.3.1 Okrajové podmínky proudění tekutiny 38
4.4 PÁROVÁNÍ ŘÍDÍCÍCH ROVNIC 38
4.4.1 Multifyzikální okrajová podmínka otevřené hranice 39
4.5 TVORBA MODELOVÉ GEOMETRIE 39
4.6 PEÁCE S MATERIÁLY 39
4.7 SÍŤOVÁNÍ GEOMETRIE 40

5. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY A MODELOVÁ ANALÝZA 41

5.1 SIMULACE ZAHŘÍVÁNÍ VYBRANÝCH VZORKŮ MATERIÁLŮ ZA ÚČELEM ANALÝZY MĚŘENÝCH DAT 41
5.2 SIMULACE VLIVU VÝPLNĚ UMĚLÉ DUTINY TEPELNĚ VODIVOU HMOTOU 48
5.3 ANALÝZA VLIVU TVG V UMĚLÉ SPÁŘE GRANITOVÉHO BLOKU 52
5.3.1 Analýza experimentálních dat 56
5.3.2 Vyhodnocení experimentu numerickým modelem 59
5.4 PREDIKČNÍ SIMULACE PRO ÚČELY NÁVRHU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 61
5.4.1 Testování vlivu tepelně vodivého geopolymeru v jednoduché topologii 61
5.4.2 Analýza průměru odběrných trubic a způsobu simulace odběru 67
5.5 LABORATORNÍ MODEL TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 71
5.5.1 Experimentální provoz laboratorního prototypu 74
5.5.2 Experimentální data 74
5.5.3 Modelová geometrie tepelného úložiště 80
5.5.4 Materiálové charakteristiky 81

5.5.5 Výpočetní sít *81*
5.5.6 Okrajové a počáteční podmínky *82*
5.5.7 Simulace termodynamického zatěžování prototypu tepelného úložiště *82*
5.6 MODELOVÉ POROVNÁNÍ ALTERNATIVNÍCH MATERIÁLŮ ÚLOŽIŠTĚ 89
5.6.1 Jednorázové nabití *90*
5.6.2 Cyklický režim 12/12 h *91*
5.6.3 Cyklický režim 24/24 h *93*
5.6.4 Shrnutí variantních výsledků *94*
5.7 MOŽNOSTI NAVÝŠENÍ TEPLOTY VYSTUPUJÍ TEKUTINY 94
6. DISKUZE **97**
7. ZÁVĚR **99**
8. LITERATURA **100**
SEZNAM OBRÁZKŮ **106**
SEZNAM TABULEK **109**

1. Úvod

Trvalé zajištění energetické soběstačnosti pro potřeby obyvatel a průmyslu je stěžejní úkol, který řeší všechny vyspělé státy. S pozvolným úbytkem fosilních paliv a trvalým růstem energetické poptávky, se naplnění této vize stává stále naléhavější.

Řešení problematiky zajištění dostupnosti energie spočívá v diverzifikaci zdrojů i dodavatelů. Současná východiska pro dlouhodobé udržení energetické soběstačnosti jsou rozpoznána především:

- v úsporách energií,
- v rozvoji obnovitelných a alternativních zdrojů (vodních, větrných, fotovoltaických, geotermálních, z biomasy),
- v trvalém rozvoji jaderné energetiky,
- ve výzkumu jaderné fůze,
- v možnostech skladování energie.

Vzhledem k výrazně nerovnoměrné spotřebě energie a vzhledem k bezpečnostně-technologickým potřebám relativně rovnoměrné produkce energie z jádra je pro účely efektivního fungování energetické soustavy potřeba řešit možnosti skladování energie. Potřeba skladování energie vzniká i ve vztahu k časové proměnlivosti některých obnovitelných zdrojů, zejména sluneční a větrné energie. Možnost energii využít při nárazové produkci energie z těchto zdrojů, může zamezit přetížení nebo případný kolaps distribuční sítě elektrické energie.

Práce analyzuje možnosti skladování energie ve formě tepla v horninovém masivu s využitím látky zlepšující tepelnou vodivost. Látky horninového masivu jsou zkoumány z důvodu jejich schopnosti uložit velké množství tepla na jednotku objemu, vysoké tepelné odolnosti, jejich široké dostupnosti a relativně nízké ceně.

Skladování energie ve formě tepla umožňuje využití zdrojů odpadního tepla z průmyslu bez další nutné přeměny. Odpadní teplo může být následně využito k předehřívání vstupujících látek do procesu výroby a dochází tak k zefektivnění procesu a úspoře energie.

Nezbytným podpůrným nástrojem pro návrh technologických zařízení určených pro ukládání a zpětný odběr tepla do horninového masivu jsou matematické výpočty šíření tepla. Bilanci a šíření tepla v hmotném prostředí popisují parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Pro jejich řešení je potřeba využít matematické modely umožňující popsat komplexní úlohu šíření tepla v tepelném úložišti.

Cílem práce bylo navrhnout, popsat a analyzovat chod vysokoteplotního tepelného úložiště sestávajícího se primárně z materiálu horninového masivu a tepelně vodivého geopolymeru. Tepelně vodivý geopolymer slouží k distribuci tepla v úložišti a umožňuje vyšší dynamiku nabíjení a odběru tepla. Maximální pracovní teploty úložiště se pohybují mezi 380 – 400 °C.

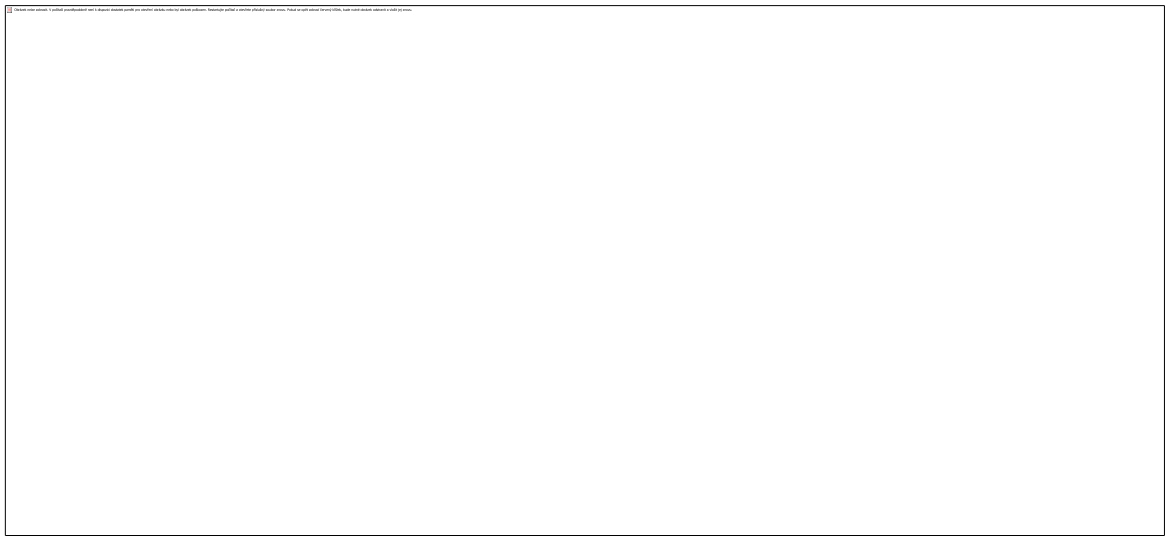
Návrh a analýza úložiště byla založena na vyhodnocení sekundárních experimentů a matematických modelů. Jako podklad pro sestavení a kalibraci finálního modelu byla použita experimentální data fyzického prototypu výše popsaného tepelného úložiště.

2. Rešerše

2.1 Skladování energie

Úložiště energie je úložiště libovolného druhu energie, která může být později čerpána a užitečně využita pro pozdější účel. Úložiště mají potenciál zvýšení efektivního využití produkované energie, nejčastěji jsou využívána k vyrovnání nerovnováhy mezi nabídkou a poptávkou po energii (Gil et al., 2010). Důležitost úložišť vyplývá z potřeby oddělení produkce energie od zdroje a její distribuce a pro vyvážení kolísavé povahy produkce energie z alternativních zdrojů (Chen et al., 2009). Veškeré procesy skladování energie jsou založeny na třech základních krocích: ukládání (nabíjení), skladování a vybíjení (Gil et al., 2010). Využití úložišť energie usnadňuje energetický management, pomáhá přemostění nabídky a poptávky, čímž zvyšuje stabilitu celého energetického systému (Chen et al., 2009). Nejčastěji se jedná o mechanickou, chemickou, elektrickou nebo teplenou formu energie. Všechny jmenované formy mohou být uloženy při použití vhodné metody, sytému a technologie (Fernandes et al., 2012).

Každý systém nebo technologie úložiště energie byl vyvinut jako řešení specifických požadavků (Chen et al., 2009). Bývají klasifikovány podle typu energie, která je skladována, jak je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Přehled možností ukládání energie. Převzato z Marval (2013).

Mechanické systémy úložišť pracují s potenciální i kinetickou povahou energie. Pro ukládání kinetické energie jsou obvykle používány setrvačníky s nízkými nebo vysokými otáčkami (Chen et al., 2009). K ukládání potenciální energie jsou nejčastěji užívány vodní přečerpávací nádrže, nebo systémy pracující se stlačeným vzduchem (Fernandes et al., 2012). Úložiště elektrické energie je jediná technologie, která je nabíjena, ukládá a zpětně odevzdává přímo elektrickou energii. Využívá standardní elektrostatické kondenzátory, elektrochemické kondenzátory (superkondenzátory) a supravodivé magnetické úložiště (Fernandes et al., 2012). Chemické energetické úložiště slučuje tři hlavní typy baterií – konvenční, s roztaveným solným elektrolytem a redukčně oxidační průtokové baterie (Chen et al., 2009). V tepelných úložištích je během nabíjení teplo dopraveno do akumulačního media a později je opět odebráno při jeho potřebě. Systémy tepelných úložišť zahrnují široké spektrum teplot a využití. Odebrané teplo může být využito při ohřevu budov, v průmyslu pro předehřívání vstupujících surovin nebo při ohřevu vysokotlaké páry pro elektrický turbínový generátor (Ataer 2006).

Možnosti nakumulovat teplo do kamenů a horninového masivu využívali lidé již před mnoha tisíci lety.

2.2 Teplo a jeho šíření

Jak uvádí Kaviani (2011), šíření energie ve formě tepla je způsobeno teplotní nerovnováhou uvnitř látky nebo mezi dvěma sousedními tělesy. Fyzika tepla zahrnuje termodynamiku (vztah mezi energií a prací), transport tepla, mechanizmy a vlastnosti přeměny tepla. Mezi mechanizmy transportu tepla patří přenos částicemi tekutiny, vibracemi v krystalové mřížce (nazývaný transport fonony), volnými elektrony (a ionty) a emisí a absorpcí fotonů. Fyzika tepelné přeměny pokrývá širokou škálu fenoménů. Při elektromagnetické tepelné přeměně (např. mikrovlnný ohřev) molekuly pohlcují elektromagnetické vlnění a tím zvyšují svojí vnitřní energii. Uložené teplo je ve formě molekulárního pohybu, vibrací a rotací, a ve změně vnitromolekulárních vazebných sil. Oblast chemie zabývající se teplem popisuje změny chemických a fyzických vazeb způsobených nebo ovlivňujících změnu teploty. Biologie se zabývá řízením teploty a chováním biologických systémů (rostlin, živočichů, nebo jejich orgánů) a jejich podsystémy (např. buňky). V širokém záběru, téměř všechny obory zabývající se teplem se potýkají s analýzou transportu tepla. S fyzikou tepla se také setkáváme v mechanice při působení sil, při napětí, nebo vzniku vztlakových sil v kapalinách.

2.2.1 Terminologie a definice

Vědní disciplína zabývající se tepelnými jevy se nazývá termodynamika. Podle Kuneše (1989) se termodynamika zabývá teplem, jeho účinky a vzájemným vztahem mezi teplem a různými druhy energie. Obecná, jinak rovnovážná termodynamika zkoumá zákonitosti šíření tepla v rovnovážných systémech a při přechodu systémů na rovnovážné. Termodynamika dále popisuje vztah mezi energií a prací.

Termodynamika se vyvinula při zkoumání tepelných procesů, avšak při svém dalším rozvoji šla mnohem dále a lze říci, že se stala obecnou vědou o energii, která zkoumá živou i neživou část přírody. Termodynamika poukazuje na různé formy energie, zabývá se podle svého 1. zákona vzájemným vztahem rovnováhy mezi nimi a objasňuje podmínky a meze pro vzájemnou přeměnu energie v různých procesech podle svého 2. zákona.

Termodynamickým systémem se rozumí prostorově vymezená hmotná část, jejíž stav se mění vlivem přenosu tepla nebo přeměnou i jiných druhů energie.

2.2.1.1 Základní vztahy termodynamiky

Axiomy klasické termodynamiky jsou přírodní zákony, které vyplývají z našich pozorování a experimentů. Existují nezávisle na nás a nelze je odvodit. Nazýváme je termodynamické věty. Nultá věta termodynamická postuluje existenci teploty T jako termodynamické veličiny, říká, že jsou-li dvě a více těles v termodynamické rovnováze s dalším tělesem, jsou všechna tato tělesa v rovnováze (Cibulka et al., 2006; Pavelek, 2012).

První věta termodynamická vychází (1) ze zákona zachování energie. Celková energie v izolované soustavě je neměnná, nemůže samovolně vznikat ani zanikat, může se pouze měnit na jiný druh energie. Definuje stavovou veličinu vnitrní energie *U* termodynamické soustavy. Změna vnitřní energie je rovna výměně tepla s okolím a vykonáním nebo dodáním práce *W*. Práce může být ve formě mechanické nebo chemické energie. Matematicky zapsáno:

$$\Delta U = Q + \mathrm{W} \qquad (1)$$

ΔU … změna vnitřní energie [J]

Q … teplo [J]

W … práce [J]

Druhá věta termodynamická se zabývá problematikou přeměny mezi jednotlivými formami energie (zejména přeměnou tepla na práci. Říká, že teplo nemůže při styku dvou těles různých teplot samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na teplejší. Definuje entropii systému a omezení směru samovolných reakcí – podmínku růstu entropie izolovaného systému. Nelze sestrojit periodicky pracující tepelný stroj (perpetuum mobile druhého druhu), který by trvale konal práci pouze tím, že by ochlazoval jedno těleso a k žádné další změně v okolí by nedocházelo.

Třetí termodynamická věta říká, že při teplotě absolutní nululy je entropie čisté látky rovna nule. Čistou pevnou látku nelze konečným počtem kroků ochladit na teplotu absolutní nuly.

2.2.1.2 Teplo

Teplo je definováno jako část vnitřní energie systému, kterou tento sytém přijme nebo odevzdá při interakci s jiným systémem (Kuneš, 1989). Podle dřívější terminologie byl místo pojmu „teplo“ používán pojem „tepelná energie“. Teplo je v látce uloženo ve formě vibrací samotných atomů, molekul, jejich pohybu a rotaci. Uložené teplo je skryto ve změně elektrických nebo vnitromolekularních vazebních sil (Kaviani, 2011).

Názorně lze definici tepla ozřejmit na principu fungování kalorimetru. Pokud do tepelně izolované nádoby s kapalinou o teplotě T_1 vložíme pevný objekt s teplotou T_2, dojde po nastolení tepelné rovnováhy k vyrovnání teplot v kapalině a v pevném objektu. Mezi kapalinou a pevným objektem proběhl proces tepelné výměny (předání množství tepla ΔQ). Výsledná teplota sloučeného systému kapaliny a pevného objektu musí ležet mezi počáteční teplotou samostatných systémů. Rovněž pro sloučený systém musí platit, že teplo ΔQ z kapaliny dodané/přijaté je rovno teplu, které pevný objekt přijme/odevzdá.

Teplo má shodné jednotky s energií a popisuje změnu (nikoliv stav) sytému. Základní jednotkou je 1 Joule [J]. Joule je definován jako práce, kterou síla 1 Newton vykoná podél dráhy 1 m. Jeden Joule také odpovídá jedné Wattsekundě [Ws].

Tepelná výměna není vždy nutně spojena se změnou teploty systému. Fázové přeměny (tuhnutí, tání, výpar, kondenzace, sublimace) probíhají při uvolňování nebo spotřebě tepla. Teplo spotřebované/přijaté při fázové přeměně se nazývá latentní teplo (Rohsenow et al., 1998).

2.2.1.3 Teplota

Pojem teplota je běžně používaný. Jednoduše poznáme, co je teplé a co studené. Teplota je základní fyzikální veličina soustavy SI. Teplota nemůže být definována na mikroskopické úrovni, protože jde o vnímání průměrné kinetické energie molekul. (Bergman et al., 2011). Lze jí definovat jako intenzivní stavovou veličinu, která je ve všech podsystémech stejná. Tento způsob definice teploty však nedává dostatečný obraz o vlastnostech teploty a ani nedává návod, jak teplotu měřit. (Cibulka et al., 2006)

Velikost změny teploty lze odvodit např. ze stavové rovnice ideálního plynu (2), která popisuje vztah tlaku, objemu a teploty. Tohoto vztahu se využívá pro měření teploty pomocí tzv. plynového teploměru. Měřeni teploty je převedeno a měření tlaku ideálního plynu při konstantním objemu.

$$pV = N\boldsymbol{R}T \qquad (2)$$

p … tlak ideálního plynu [Pa]

V … objem [m^3]

n … látkové množství [mol]

R … konstanta ideálního plynu **R** = 8.314 4598(48) $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$

T … teplota [K]

Další souvislost mezi tepelnými veličinami lze odvodit z I. věty termodynamické (1). Pokud systém nekoná práci (*dW = 0),* pak platí:

$$dU = dQ \tag{3}$$

Přírůstek tepla v systému vyvolá úměrný přírůstek teploty (4).

$$dU = c \cdot dT \tag{4}$$

c … tepelná kapacita [J·K^{-1}]

Kelvin [K] je jednotkou teploty zavedený v mezinárodním sytému SI. Je definován jako 1/273.16 termodynamické teploty trojného bodu vody. V praxi je užívanější jednotkou stupeň Celsia [°C]. Tato jednotka je historicky starší a její velikost 1 °C byla základem pro velikost 1 K. Dnes je jednotkou odvozenou a je definována vztahem (5).

$$\mathrm{t} = T - 273.15 \tag{5}$$

t … teplota ve stupních Celsia [°C]

T … teplota v Kelvinech [K]

2.2.1.4 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita jakékoli látky odpovídá množství tepla potřebného k zvýšení teploty látky o jeden teplotní stupeň (Kaviani, 2011). Jak teplota vzrůstá, teplo je ukládáno do molekul látky ve formě translační, rotační a vibrační energie. Měrná (nebo specifická) tepelná kapacita látky odpovídá tepelné kapacitě jedné hmotnostní jednotky. V SI jednotkách má pak měrná tepelná kapacita rozměr [J·kg^{-1}K^{-1}].

$$\mathrm{c_p} = \frac{\Delta \mathrm{Q}}{\mathrm{m} \cdot \Delta \mathrm{T}} \tag{6}$$

c_p … měrná tepelná kapacita [J·kg^{-1}K^{-1}]

ΔT … rozdíl teploty ohřívané/ochlazované látky na počátku a na konci děje [K]

m … hmotnost ohřívané/ochlazované látky [kg]

ΔQ … dodané/odebrané teplo mezi začátkem a koncem děje [J]

V jiných případech je udávána také objemová tepelná kapacita nebo molární tepelná kapacita. U objemové tepelné kapacity c_v [J·m^{-3}K^{-1}] je změna energie vztažena na jednotku objemu, hodnotu lze získat vynásobením specifické tepelné kapacity objemovou hmotností dané látky [kg·m^{-3}]. Podobně je vztaženo potřebné teplo k ohřátí jednoho molu látky o jeden stupeň Kelvina u molární tepelné kapacity [J·mol^{-1}K^{-1}].

Měrná tepelná kapacita mnohých látek je funkcí stavových veličin (především teploty nebo tlaku) – se změnou stavových veličin se hodnota měrné tepelné kapacity těchto látek mění. Ukázka změny naměřené tepelné kapacity konkrétních hornin je na Obr. 3

2.2.1.5 Tepelný tok

Tepelný tok Φ vyjadřuje množství přeneseného tepla za jednotku času.

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{7}$$

Φ … tepelný tok [J·s^{-1} = W]

ΔQ … dodané/odebrané teplo mezi začátkem a koncem děje [J]

Δt … časový interval mezi začátkem a koncem měření [s]

Tepelný tok Φ má shodnou jednotku s výkonem [$J \cdot s^{-1}$ = W] (Blahož et Kadlec, 1996).

2.2.1.6 Hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku q_T podle Blahože et Kadlec (1996) vyjadřuje množství transportovaného tepla přes jednotkovou plochu za jednotku času, respektive se jedná o tepelný tok připadající na jednotkovou plochu.

$$q_T = \frac{\Delta Q}{S \Delta t} = \frac{\Phi}{S} \tag{8}$$

q_T … hustota tepelného toku [$J \cdot s^{-1} m^{-2}$ = $W \cdot m^{-2}$]

ΔQ … dodané/odebrané teplo mezi začátkem a koncem měření [J]

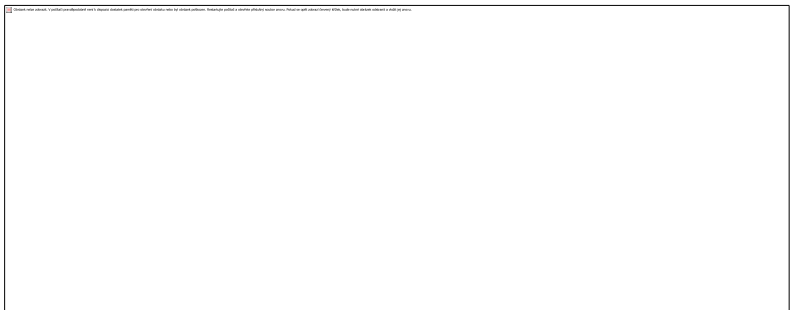
Δt … časový interval mezi začátkem a koncem měření [s]

S … plocha, přes kterou je tepelný tok realizován [m^2]

2.2.2 Mechanismy přenosu tepla

Přenos tepla nastává při existenci tepelné nerovnováhy, při rozdílných teplotách uvnitř látky tělesa nebo mezi dvěma tělesy rozdílných látek.

Transport tepla je obvykle dělen do tří základních kategorií. Jejich procesy jsou schematicky znázorněny na Obr. 2. Pokud se teplotní rozdíl vyskytne uvnitř nepohybující se látky, což může být pevná látka i tekutina, dochází k procesu zvanému jako kondukce. V protikladu termín konvekce odkazuje na transport tepla mezi povrchem a okolní pohybující se tekutiny při jejich rozdílných teplotách (Bergman et al., 2011). Kaviani (2011) popisuje konvekci jako unášení tepla uvnitř tekutiny díky jejímu pohybu, daného vektorem rychlosti proudění tekutiny. Třetí proces transportu tepla je nazýván tepelná radiace. Všechny povrchy při konečné teplotě vyzařují energii ve formě elektromagnetických vln. Z tohoto důvodu dochází k toku tepla mezi dvěma oddělenými povrchy s rozdílnými teplotami bez účasti třetího media (Bergman et al. 2011).



Obr. 2 Vlevo je znázorněna kondukce, kdy teplo prochází pevnou látkou. Uprostřed je konvekce, kdy kapalina odnáší teplo vyzářené deskou. Vpravo je znázorněna radiace z povrchů, červené šipky znázorňují směr šíření tepla (Bergman et al., 2011).

2.2.2.1 Kondukce

Koncept kondukce popisuje vedení tepla čistě na atomární a molekulární úrovni. Kondukce představuje šíření tepla v tělesech předáváním energie srážkami kmitajících částic látky nebo vlněním v krystalové mřížce. Díky difuzi energie náhodným molekulárním pohybem teplo

samovolně proudí z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s nižší teplotou, čímž se teploty během času mění a blíží se k bodu tepelné rovnováhy.

Tento jev popisuje Fourierův zákon (Bergman et al., 2011).

$$q_T = -\lambda \nabla T \qquad (9)$$

q_T … hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

λ … součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]

∇T … teplotní gradient [$K \cdot m^{-1}$]

Tok tepla probíhá proti směru nejvyššího gradientu teploty, z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Parametr λ je součinitel tepelné vodivosti. Je to charakteristická vlastnost daného materiálu udávající schopnost vést teplo.

V pevných elektricky nevodivých tělesech dochází k toku tepla čistě ve formě šíření vibrací v atomové, molekulární nebo krystalické mřížce. V elektricky vodivých látkách dochází k šíření tepla také translačním pohybem volných elektronů (Bergman et al., 2011).

2.2.2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti

Schopnost dané látky vést teplo je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti, který se nazývá měrná tepelná vodivost (tepelná konduktivita). Hodnota měrné teplené vodivosti představuje výkon (teplo za jednotku času), který projde jednotkovou plochou desky tlusté jednotkovou délku při jednotkovém gradientu teploty. V SI jednotkách má rozměr [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]. Pro převrácenou hodnotu měrné tepelné kapacity je užíván termín měrný tepelný odpor. Rovnice vyjadřující vztah součinitele tepelné vodivosti a hustotou tepelného toku publikuje např. Noranzyk (2009).

$$\Delta Q = \lambda \frac{S \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{d} \qquad (10)$$

$$\lambda = \frac{\Delta Q \cdot d}{S \cdot \Delta T \cdot \Delta t} = \frac{q_T \cdot d}{\Delta T} \qquad (11)$$

λ … součinitel tepelné vodivosti [$J \cdot m^1 s^{-1} m^{-2} K^{-1} = W \cdot m^{-1}K^{-1}$]

ΔQ … změna tepla [J]

d … tloušťka konstrukce, respektive dráha přestupu tepla [m]

q_T … hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

S … plocha [m^2]

ΔT … teplota [K]

Δt … časový interval měření [s]

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti při teplotě 25°C se pro různé látky obvykle pohybují v rozmezí 0.0146 (oxid uhličitý v plynné formě) až 401 (měď v pevném skupenství) $W \cdot m^{-1}K^{-1}$.

V české literatuře je zvykem součinitel tepelné vodivosti značit pomocí λ, v anglosaské literatuře bývá označován *k.*

2.2.2.1.2 Tepelná difuzivita

Tepelná difuzivita vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné konduktivity a součinu její objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity při stálém tlaku.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \qquad (12)$$

α … tepelná difuzivita [$m^2 s^{-1}$]

λ … součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]

ρ … objemová hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$]

c_p … měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1}K^{-1}$]

2.2.2.2 Konvekce

Šíření tepla prouděním neboli konvekcí, se uplatňuje pouze u tekutin (kapalin a plynů) a plazmatu. Je realizováno dvěma mechanizmy přenosu tepla. Náhodným molekulárním pohybem (difuze) a makroskopickým pohybem kapaliny (advekce), při kterém je teplo přemisťováno díky vlastnímu pohybu tekutiny. Proudění v tekutinách je popisováno Navier - Stokesovou rovnicí. Advekce bývá rozdělována na volnou (přirozenou) a nucenou. Pohyb tekutiny při volné advekci je způsoben vztlakovou silou, která vzniká díky rozdílné hustotě kapaliny v závislosti na teplotě. Nucená advekce bývá způsobena vnějšími silami, např. pohybem pevného tělesa v kapalině nebo čerpáním.

Termíny konvekce, respektive konvektivní ochlazování či ohřívání, jsou také používány k popisu disipace tepla z pevného povrchu do okolní tekutiny, typicky popsané součinitelem přestupu tepla. Tento jev kvantifikuje Newtonův zákon ochlazování. (Bergman et al., 2011).

$$q = h(T_s - T_\infty) \qquad (13)$$

q … hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

h … součinitel přestupu tepla - závisí na pohybu kapaliny, geometrii a termodynamických a fyzikálních vlastnostech. [$W \cdot m^{-2}K^{-1}$]

T_s … teplota povrchu [K]

T_∞ … teplota okolní kapaliny [K]

Přenos tepla může být realizován nejen výměnou zjevného tepla, jak bylo popsáno výše, ale také výměnou latentního tepla. Výměna latentního tepla je spojována s fázovou přeměnou tekutin, nejčastěji při varu a kondenzaci.

2.2.2.2.1 Součinitel konvekce

Součinitel konvekce (také součinitel přestupu tepla) *h* není termodynamická vlastnost. Je to zjednodušená korelace vlastností tekutiny a podmínek proudění, a proto se často nazývá vlastnost proudění. Hodnota součinitele konvekce je závislá na rychlosti a směru proudění (typu konvekce), na vlastnostech kapaliny (viskozita, tepelná vodivost a kapacita, hustota) a na vlastnostech a tvaru povrchu.

Součinitel konvekce pro danou situaci lze zjistit měřením přestupu tepla a rozdílu teplot nebo změřením teplotního gradientu u povrchu a rozdílu teplot. Měření teplotního gradientu v hraniční vrstvě vyžaduje vysokou přesnost a obvykle se provádí ve výzkumné laboratoři. Mnoho příruček obsahuje tabulky součinitelů konvekce převodu tepla pro různé konfigurace nebo empirické rovnice sloužící k stanovení hodnoty. Orientační rozsahy hodnot součinitele konvekce jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Typické hodnoty součinitele konvekce (Bergman et al., 2011)

Proces	h [$W \cdot m^{-2}K^{-1}$]
volná konvekce	
plyny	2 – 25
kapaliny	50 – 1000
nucená konvekce	
plyny	25 – 250

kapaliny	100 – 20 000
konvekce se změnou skupenství	2500 – 100 000

2.2.2.3 Radiace

Tepelná radiace, resp. záření či sálání, je energie vyzařována hmotou při nenulové absolutní teplotě. Nejčastěji je radiace uvažována u tuhých těles, ačkoli k záření dochází i z kapalin a plynů. Bez ohledu na skupenství, vyzáření energie je doprovázeno změnou v elektronové konfiguraci atomů a molekul látky. Vyzářená energie je transportována ve formě elektromagnetických vln, případně fotony. Zatímco pro výskyt konvekce a kondukce je nutné hmotné prostředí, přenos zářením probíhá nejefektivněji ve vakuu.

Maximální míru vyzářené energie tělesem vyjadřuje Stefan-Boltzmannův zákon, který platí pro ideální zářič neboli absolutně černé těleso. Bergman et al. (2011) jej uvádějí takto:

$$E_b = \sigma T_s^4 \qquad (14)$$

E_b … intenzita záření absolutně černého tělesa [W·m^{-2}]

T_s … absolutní teplota povrchu [K]

σ … Stefan-Boltzmannova konstanta [σ = 5,67 ×10^{-8} W·m^{-2}K^{-4}]

2.2.2.3.1 Koeficient emisivity

Intenzita záření reálného tělesa je silně závislá na povrchovém materiálu a jeho úpravě. Při stejné povrchové teplotě je intenzita záření reálného tělesa vždy nižší než záření absolutně černého tělesa. Rovnice popisující záření reálného tělesa je následující:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \qquad (15)$$

ε … koeficient emisivity (-), $\varepsilon = \frac{E}{E_b}$

σ … Stefan-Boltzmannova konstanta [σ = 5,67 ×10^{-8} W·m^{-2}K^{-4}]

T_s … absolutní teplota povrchu [K]

Koeficient emisivity vyjadřuje poměr mezi daným a absolutně černým tělesem. Hodnota je v mezích 0 ≤ ε ≤ 1.

Pokud je těleso vystaveno záření z jiného zdroje, povrchem pohlcuje toto záření a přeměňuje na teplo. Množství pohlceného záření udává koeficient absorpce (pohltivosti), zbylé záření je odraženo zpět do prostoru. Pro tzv. šedá tělesa platí, že koef. emisivity a koef. absorpce jsou si rovny.

Tab. 2 Tabulkové hodnoty koeficientu emisivity (zdroj: http://www.engineeringtoolbox.com).

materiál	koeficient emisivity ε (-)	materiál	koeficient emisivity ε (-)
asfalt	0.93	mosaz, leštěná	0.03
beton	0.85	mosaz, plátová	0.22
cihla, hrubá červená	0.93	písek	0.76
cihla, šamot	0.75	pískovec	0.9 - 0.93
granit	0.45	železo, leštěné	0.14 - 0.38
hliník, silně oxidovaný	0.2 - 0.31	železo, rezavé	0.61
hliníková folie	0.04	železo, tmavě šedivý povrch	0.31

2.3 Ukládání energie ve formě tepla

Existují tři základní principy způsobu ukládání tepla. První typ používá zjevné teplo. Uložená energie je úměrná rozdílu teplot a tepelné kapacitě dané látky. Pokud je k akumulaci využívána změna skupenství, energie je ukládána ve formě latentního tepla, což je druhý princip. Třetí tzv. termochemické skladování využívá endotermické a exotermické reverzibilní chemické reakce (Fernanders et al., 2012). První dva typy jsou častější, třetí je stále vyvíjen (Abedin et Rosen, 2012; Dunn et al., 2012)

2.3.1 Ukládání tepla s využitím zjevného tepla

Při využití zjevného tepla k ukládání energie dochází k ohřevu akumulačního media, aniž by došlo k přeměně jeho skupenství. Množství uložené energie je úměrné teplotní změně materiálu úložiště, tepelné kapacitě a jeho objemu (Ataer, 2006). Skladování energie pomocí zjevného tepla je poměrně populární, díky nízkým nákladům na výrobu, nicméně hustota této energie je nižší než u jiných technologií tepelného skladování (Evans et al., 2012). Teplo bývá ukládáno v látce v pevném nebo kapalném skupenství（Tian et Zhao, 2013).

Látky v pevném skupenství bývají využity spíše ve vysokoteplotních úložištích. Nejčastěji se jedná o nerosty, beton, ohnivzdorné cihly a materiály ze slitin železa (Gil et al., 2010; Tian et Zhao, 2013). Pracovní teplota těchto materiálů se pohybuje od 200 °C do 1200 °C, mají dobrou tepelnou vodivost v rozmezí 1-7 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ pro horniny a až 37-40 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ pro slitiny železa. Hodnoty parametrů vybraných používaných materiálů viz Tab. 3.

Daschner et al. (2013) popisuje testování tepelného úložiště se sypkým materiálem promývaným proudícím vzduchem. Jako náplň testovali kuličky oxidu hliníku, křemenný štěrk, vulkanitovou a basaltovou drť. Využití přírodního kameniva je popisováno i v dalších aplikacích se sypaným materiálem promývaným vzduchem (Daschner et al., 2013; Zanganeh et al., 2012). Allen et al. (2014) se věnuje využití kameniva v solárních tepelných elektrárnách. Tyto úložiště pracují s teplotami 500-600 °C. Práce obsahuje rešerši popsaných tepelných vlastností hornin, hodnot jejich parametrů a jejich dostupnost v jižní Africe. Další experimenty s 6mm hliníkovými částicemi a jejich výpočetní vyhodnocení popisuje Anderson (2014). Alkilani et al. (2011) shrnuje využití vzduchu pro transport tepla v širokém spektru nízko- i vysokoteplotních úložišť.

V literatuře je dále uvedeno testování lité keramiky nebo specificky navrženého betonu ve španělské solární elektrárně Plataforma Solar de Almería. (Tamme et al., 2003, 2004). Jako dalšií kandidát byla studována recyklovaná průmyslová keramika vyrobená vitrifikací odpadů obsahujících asbest (Py 2009, 2011). Většina těchto materiálů jsou relativně levná (Tian et Zhao, 2013). Nevýhodou těchto úložišť je nižší tepelná kapacita a nutnost vytvořit tepelný výměník pro jejich plnění a prázdnění.

Tab. 3 Hodnoty tepelných parametrů pro běžné materiály používané při ukládání zjevného tepla. Převzato z Tian et Zhao (2013).

Storage materials	Working temperature (°C)	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/(m K))	Specific heat (kJ/(kg °C))	Specific heat (kW h_t/(m^3 °C))	Cost per kg (US$/kg)	Cost per kW h_t (US$/kW h_t)
Sand-rock minerals	200–300	1700	1.0	1.30	0.61	0.15	4.2
Reinforced concrete	200–400	2200	1.5	0.85	0.52	0.05	1.0
Cast iron	200–400	7200	37.0	0.56	1.12	1.00	32.0
NaCl	200–500	2160	7.0	0.85	0.51	0.15	1.5
Cast steel	200–700	7800	40.0	0.60	1.30	5.00	60.0
Silica fire bricks	200–700	1820	1.5	1.00	0.51	1.00	7.0
Magnesia fire bricks	200–1200	3000	5.0	1.15	0.96	2.00	6.0

Výhodou úložišť využívajících kapalinu jako akumulační medium je možnost využít kapalinu nejen k akumulaci, ale zároveň i k transportu tepla od zdroje tepla do úložiště a dále na místo jeho užití (Hermann, 2004; Xu et al., 2013). Běžně využívanou kapalnou látkou pro ukládání tepla je voda. Hlavní výhodou vody je její vysoká tepelná kapacita, zdravotní nezávadnost a široká dostupnost. Nevýhodou je možnost ukládání tepla jen do teploty bodu varu vody. Tato

úložiště jsou nejčastěji využita v nízkoenergetických budovách (Gaine et Duffy, 2010; Evans et al., 2012; Pinel et al., 2011). Ve vysokoteplotních úložištích jsou používány minerální i syntetické oleje, dusičné soli a anorganické tekuté soli (Tian et Zhao, 2013). Hodnoty vybraných látek jsou uvedeny v Tab. 4. Hlavní nevýhodou olejů je jejich těkavost, což vede ke zvýšení nákladů při výstavbě vzduchotěsných systémů (Zhao et Wu, 2011). Tavené soli jsou považovány jako ideální materiály pro použití v slunečných tepelných elektrárnách (Gil et al., 2010; Zhao et Wu, 2011) pro jejich tepelnou stabilitu, nízký tlak par, nízkou viskozitu, vysokou tepelnou kapacitu, nehořlavost a zdravotní nezávadnost. Zhao et Wu (2011) popisují směsi tavených solí, jejichž bod tuhnutí je pod 100 °C, což zjednodušuje jejich praktické nasazení.

Tab. 4 Hodnoty tepelných parametrů pro běžné tekutiny používané při ukládání zjevného tepla při vysokých teplotách. Převzato z Tian et Zhao (2013).

Storage materials	Working Temperature (°C)	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/(m K))	Specific heat (kJ/(kg °C))	Specific heat (kW h$_t$/(m^3 °C))	Costs per kg (US$/kg)	Costs per kW h$_t$ (US$/kW h$_t$)
Hitec® solar salt	220–600	1899	n.a.	1.5	0.79	0.93	10.7
HitecXL® solar salt	120–500	1992	0.52	1.4	0.77	1.19	13.1
Mineral oil	200–300	770	0.12	2.6	0.56	0.30	4.2
Synthetic oil	250–350	900	0.11	2.3	0.58	3.00	43.0
Silicone oil	300–400	900	0.10	2.1	0.53	5.00	80.0
Nitrite salts	250–450	1825	0.57	1.5	0.76	1.00	12.0
Liquid sodium	270–530	850	71.0	1.3	0.31	2.00	21.0
Nitrate salts	265–565	1870	0.52	1.6	0.83	0.50	3.7
Carbonate salts	450–850	2100	2.0	1.8	1.05	2.40	11.0

Jedním ze speciálních případů bývají sezónní úložiště ve zvodni (Paksoy et al., 2004; Pinel et al., 2011; Xu et al., 2013). V takovém systému voda slouží nejen jako teplonosná kapalina, ale zároveň jako akumulační medium. Druhou složkou akumulačního média tvoří horninový masív zvodně. Numerickým vyhodnocením takového systému se zabýval např. Clauser (2003), Vanhoudt et al. (2011) nebo Wiberg (1983).

2.3.2 Ukládání tepla s využitím latentního tepla

Jedná se o mechanismus, při kterém materiál podstupuje změnu skupenství, obvykle tání, a tím pohltí žádané teplo. Tato změna skupenství je velice efektivní ve srovnání se zbývajícími fázovými přechody, a proto se využívá nejčastěji. Množství ukládané latentní energie se označuje E_l [J] a Ataer (2006) ho popisuje následujícím vztahem:

$$E_l = mL_t \tag{16}$$

m … hmotnost [kg]

L_t … skupenské teplo fázového přechodu materiálu [J·kg^{-1}]

Ukládání většiny energie probíhá při izotermickém ději při teplotě změny skupenství materiálu. Děj často probíhá komplikovaněji nebo s nižší efektivitou i za účasti tepla zjevného. Interval teplot <T1, T2> *[K]* pak musí obsahovat teplotu fázového přechodu materiálu. Vztah pro výpočet množství energie se změní následovně, jak uvádí Ataer (2006):

$$E = m\left[\left\{\int_{T_1}^{T^*} c_{ps}\,\mathrm{d}T\right\} + L_t + \left\{\int_{T^*}^{T_2} c_{pl}\,\mathrm{d}T\right\}\right] \tag{17}$$

m … hmotnost [kg]

T^* … teplota změny skupenství materiálu [K]

T_1 … horní teplotní úroveň [K]

T_2 … dolní teplotní úroveň [K]

L_t … skupenské teplo změny skupenství materiálu [J·kg^{-1}]

c_{ps} … měrná tepelná kapacita pevné fáze [J·kg^{-1}K^{-1}]

c_{pl} … měrná tepelná kapacita kapalné fáze [J·kg^{-1}K^{-1}]

V současné době se tento mechanismus pro ukládání tepla jeví jako nejperspektivnější. Z anglického originálu Phase Change Materials se zažila zkratka PCM pro materiály, které se využívají k ukládání tepla při fázové změně.

PCM mají schopnost uložit a uvolnit velké množství tepla při vzniku fázových molekulárních struktur během tání a tuhnutí nebo výparu a zkapalnění. Jelikož entalpie změny fáze PCM je obvykle velmi vyšší (100 – 200 krát) oproti latentnímu teplu, úložiště s PCM mají obvykle vyšší tepelnou hustotu. V Tab. 5 jsou uvedeny parametry několika komerčně dostupných látek, zahrnující anorganické soli a eutektické směsi. Tyto látky mají pracovní teploty v rozmezí od 100 °C do 897 °C, jejich latentní teplo je od 12 do 560 $kJ \cdot kg^{-1}$. Oproti úložištím latentního tepla pracujících v širokém teplotním rozsahu, latentní tepelná úložiště mohou pracovat téměř izotermicky, což je vhodné pro procesy vyžadující úzkou pracovní teplotu (Dutil et al., 2011; Nkwetta et Haghighat, 2013; Tian et Zhao, 2013).

Většina PCM mají nízkou tepelnou vodivost, což má za následek pomalé vybíjení a nabíjení energie (Evans et al., 2012). Tian et Zhao (2013) uvádí tepelnou vodivost běžně dostupných PCM v rozmezí 0.2 až 0.7 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$. Proto Zhao et al. (2010) doporučuje techniku zlepšování tepelné vodivosti a popisují užití měděné pěny ve voskovém úložišti. Vkládání uhlíkových vláken do PCM za účelem zvýšení tepelné vodivosti je experimentálně a numericky analyzován v práci Fukai et al. (2003). Práce Hamada et al. (2003) zkoumá využití tepelně vodivých trubic.

Tab. 5 Tabulka tepelných parametrů popsaných PCM, „n.a“ značí nedostupnost údaje. Převzato z Tian et Zhao (2013).

Storage materials	Phase change temperature (°C)	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/m K)	Specific heat (kJ/kg K)	Latent heat (kJ/kg)	Latent heat (MJ/m^3)
RT100 (paraffin)	100	880	0.20	n.a.	124	n.a.
RT110 (paraffin)	112	n.a.	n.a.	n.a.	213	n.a.
E117 (inorganic)	117	1450	0.70	2.61	169	245
A164 (organic)	164	1500	n.a.	n.a.	306	459
$NaNO_3$	307	2260	0.5	n.a	172	389
KNO_3	333	2110	0.5	n.a	226	477
KOH	380	2044	0.5	n.a	149.7	306
$AlSi_{12}$	576	2700	1.6	1.04	560	1512
$MgCl_2$	714	2140	n.a.	n.a.	452	967
NaCl	800	2160	5	n.a	492	1063
LiF	850	n.a	n.a	n.a	n.a	1800
Na_2CO_3	854	2533	2	n.a	275.7	698
K_2CO_3	897	2290	2	n.a	235.8	540
$48\%CaCO_3$–$45\%KNO_3$–$7\%\ NaNO_3$	130	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
KNO_3–$NaNO_2$–$NaNO_3$	141	n.a	n.a	n.a	275	n.a
$LiNO_3$–$NaNO_3$	195	n.a	n.a	n.a	252	n.a
$MgCl_2$–KCl–NaCl	380	2044	0.5	n.a	149.7	306

Další informace o dostupných PCM a výzkumných prací s latentním teplem jsou dostupné v rozsáhlých pracích Tyagi et Buddhi (2007), Sharma et al. (2009), a Cabeza et al. (2005). Užití PCM při ukládání tepla ze solárních kolektorů sumarizuje Chidambarama et al. (2011). Rešerše matematického modelování a simulací různých typů PCM úložišť popisuje Dutil et al. (2011). Způsob modelování PCM při aplikaci chlazení budov popisuje Amori (2008). Numerické vyhodnocení úložiště s PCM využívající tenký plátový tepelný výměník je obsahem práce Ye et al. (2011). Hamada et al. (2003) popisuje matematické modelování zlepšení tepelné vodivosti PCM uhlíkovými vlákny, kartáčky či tepelně vodivými trubicemi.

2.3.3 Ukládání tepla s využitím termochemické reakce

Určité chemikálie pohltí velké množství energie při tvorbě nebo rozdělení chemických vazeb během endotermické reakce. Pokud je reakce vratná, je možné během opačné (exotermické) reakce teplo opět získat. Na tomto principu je založeno skladování tepla s využitím termochemické reakce. Vhodné materiály mohou být organické i anorganické, pokud jejich vratná chemická reakce pojme a uvolní velké množství tepla. Hlavní tři kritéria při návrhu termochemického úložiště jsou: vynikající vratnost reakce, velká změna entalpie a jednoduché reakční podmínky (Tian et Zhao, 2013). Tabulka Tab. 6 ukazuje vybrané materiály, jejich základní parametry a využívanou chemickou reakci.

Tab. 6 Tabulka materiálů užívaných při termochemické reakci. Převzato z Tian et Zhao (2013).

Materials	Temperature range (°C)	Enthalpy change during chemical reaction	Chemical reaction
Iron carbonate	180	2.6 GJ/m^3	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$
Methanolation demethanolation	200–250	n.a.	$CH_3OH \leftrightarrow CO + 2H_2$
Metal hydrides	200–300	4 GJ/m^3	$(Metal\ xH_2) \leftrightarrow metal\ yH_2 + (x-y)H_2$
Ammonia	400–500	67 kJ/mol	$NH_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2N_2 + 3/2H_2$
Hydroxides, e.g.	500	3 GJ/m^3	$Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$
Methane/water	500–1000	n.a.	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$
Calcium carbonate	800–900	4.4 GJ/m^3	$CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2$
Metal oxides (Zn and Fe)	2000–2500	n.a.	2-step water splitting using Fe_3O_4/FeO re-dox system
Aluminium ore alumina	2100–2300	n.a.	n.a.

Nejvyužívanějším ze známých a dostupných principů pro termochemické skladování energie je využití sorpce (Benoit et al. 2014). Jeho výhodou je vysoká hustota ukládané energie (přibližně 100 až 500 kWh·m^{-3}) a malé ztráty tepla během fáze skladování, protože energie je uložena jako chemický potenciál a zjevné teplo je nízké. Proces ukládání využívá vratnou rekci mezi pevnou fází a plynem. Jedná se o hydratační/dehydratační reakci mezi solí a vodou. Hydratační reakce pevné fáze je exotermická (vybíjení), zatímco její rozklad (dehydratace) vyžaduje dodání tepla (ukládání). Tato rekce může probíhat za různých podmínek. Sůl může reagovat s vodní párou při nízkém tlaku, nebo s vlhkým vzduchem při atmosférickém tlaku. Většina popisovaných systémů v literatuře pracuje s čistou párou (De Boer et al., 2004; Iammak et al., 2004; Jaehning et al., 2008; Mauran et al., 2008; Stitou et al., 2012).

Jednou z nevýhod systému pro skladování tepla, který využívá vratné termochemické reakce, jsou vysoké pořizovací náklady. Naopak hlavní výhodou je potenciálně vyšší hustota energie než u ostatních metod skladování. Fernandes et al. (2012) řadí mezi nejčastěji používané látky oxidy cínu, cín (SnO_x/Sn) a amoniak (NH_3). Při exotermní reakci se nad kapalným Sn vznáší SnO_2 (pevná látka) a ta je redukována metanem CH_4 (plyn) při teplotě 980 K. V případě využití amoniakového systému, dochází k exotermické reakci jeho syntézou z volného vodíku (H) a dusíku (N), tato reakce je pak vhodná pro výrobu elektrické energie za užití konvenčních Rankinových cyklů.

Několik studií se zabývá využitím termochemické reakce pro sezónní ukládání tepla v obytných domech (Pinel et al., 2011; N'Tsoukpoe et al., 2009). Benoit et al. (2014) popisuje několik prototypů malého měřítka, největší systém SOLUX (Mauran et al., 2008) ukládající 60 kWh. Dosud nebyl dokončen jediný projekt velkého měřítka (Xu et al., 2013).

2.4 Principy a užití tepelných úložišť

Při návrhu tepelného úložiště je důležitým parametrem rozmezí teplot v jakém bude využíváno. Proto se často tepelná úložiště dělí na nízko- a vysokoteplotní. Nízkoteplotní tepelná úložiště jsou ty, co pracují pod 120 °C (Gil et al., 2010), resp. 200 °C (Fernandes, 2012). Jejich použití lze nejčastěji nalézt při výtápění a klimatizaci budov (Cabeza et al., 2007; Novo et al., 2010). Obvykle jsou budována s využitím horninového prostředí, někdy zvodněného, jakožto velkoobjemového zásobníku (Lee, 2010; Vanhoudt et al., 2011; Socaciu, 2011). Úložiště mohou sloužit k vyrovnání krátkodobých rozdílů teplot v intervalu den-noc, nebo dlouhodobě k vyrovnání ročních výkyvů (Paksoy et al., 2004; Pinel et al., 2011; Xu et al., 2013). Posledním trendem v ukládání tepla je instalace tepelných výměníků přímo do základů nově zakládaných staveb (Bouazza et Adam, 2012; Brandl, 2013; Mimouni et al., 2014). Využití liniových staveb jako jsou tunely nebo kanalizace popisují Adam et Markiewicz (2009), Frodl et al. (2010) nebo Unterberger et al. (2004).

Vysokoteplotní tepelná úložiště pracují s teplotami 200 až 1200 °C. Jejich nasazení je časté v solárních tepelných elektrárnách, ve kterých je sluneční energie za pomoci vysokoteplotní páry a turbín transformována na elektrickou energii (Gil et al., 2010; Tian et Zhao, 2013). Konkrétní případy nasazení jsou shrnuty v práci Medrano et al. (2010). Díky tepelnému úložišti je umožněna produkce v tomto typu solárních elektráren i například v noci. Druhým nasazením vysokoteplotních úložišť je v průmyslových procesech při využití odpadního tepla.

(Gude, 2014; Walmsley et. al., 2014). Více o vysokoteplotních úložištích je pojednáno v poslední části této kapitoly.

2.4.1 Tepelné úložiště využívající vodu

Systémů využívajících vodu je velké množství. Jedná se různé kombinace použití vody jako nosného i akumulačního media, jsou budovány nádrže, nebo otevřené systémy často v kombinaci s horninovým masivem nebo druhotným akumulačním mediem jako je písek nebo štěrk. Výhodou vody je její vysoká tepelná kapacita 4180 $J \cdot kg^{-1}K^{-1}$.

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) - tepelné úložiště ve zvodni využívá k uchování tepla zvodněné horninové prostředí. Tím se řadí mezi otevřené systémy ukládající teplo. Vzhledem k přímému využití podzemních vod, které jsou zde nosným médiem tepla s relativně vysokou tepelnou kapacitou, mají systémy ATES vyšší výkon než ostatní systémy využívající geotermální energii. Podzemní voda má stálou teplotu, která obvykle koresponduje s průměrnou roční teplotou vzduchu v daném místě. Typická pro ATES je soustava dvou (v některých případech i více) vrtů s hydraulickým propojením (Andersson, 2007). Pro získání maximálního výkonu je jeden vrt užíván pro teplou vodu a druhý pro studenou. V zimě je čerpána voda z teplého vrtu a pomocí tepelných čerpadel je teplo využito k vytápění budovy. Ochlazená voda je odváděna do studeného vrtu. V létě, kdy je potřeba budovy klimatizovat, proces funguje opačně. Studená voda je čerpána ze studeného vrtu, prochází klimatizačním systémem, ochlazuje vzduch v budovách (konvekční klimatizace), a tím se ohřívá. Ohřátá je pak odváděna do teplého vrtu, kde je teplo ukládáno na zimní období (Lee, 2010;).

Systémy ATES se využívají pro projekty v rozmezí tepelného výkonu od 50 do 15000 kW, dají se dle velikosti a kapacity výkonu rozdělit do 3 kategorií. První kategorií jsou malé rodinné systémy ATES, které disponují průtokem vody vrtem v rozmezí od 1 – 8 m^3h^{-1} s odpovídajícím výkonem do 50 kW. Tyto malé systémy nejsou vždy ekonomicky výhodné vzhledem k počátečním nákladům na technické vybavení. Druhou kategorií jsou střední instalace ATES systému, které mají průtok vody v rozmezí 8 až 25 m^3h^{-1} a tepelný výkon mezi 50 až 150 kW. Bývají instalovány v kancelářských objektech, u průmyslových staveb, u malých a středních podniků nebo v bytových domech (Paksoy et al., 2004). Velké instalace ATES systémů mají průtoky až 100 m^3h^{-1} s výkonem od 150 do 15000 kW (Gaine et Duffy, 2010; Xu et al., 2013). Takové instalace se pak provádějí pro velké objekty, jako jsou nemocnice (Vanhoudt et al., 2011) nebo letiště (Wigstrand, 2003). Patyn et Lookman (2012) popisují možnost spojení sanačních prací při čištění podzemních vod se systémem ATES.

Ukládání tepla v zatopených dolech a jeskyních – Cavern Thermal Energy Storage (CTES) – je možné uplatnit pouze tam, kde se tyto objekty vyskytují. Tato skutečnost omezuje možnost rozsáhlého využití. Jednou ze zemí, kde je CTES ve vyšší míře využívána je Kanada. Průběh ukládání funguje podobně jako u HWTES. Ohřátá voda je v létě čerpána do masivních úložišť v podobě dolů nebo jeskyní a v zimě je využívána zpětně pro vytápění. V prvních letech využívání těchto úložišť dochází ke ztrátám okolo 10 %, než se okolní půdní masiv ohřeje podle vháněné kapaliny (Michel 2009; Novo et al. 2010). Na území ČR byla zpracována pouze práce o potencionálním využití důlního díla k získávání tepla (Uhlík et Baier, 2012), nicméně při menší úpravě by mohl systém sloužit i k akumulaci tepla.

Při způsobu ukládání tepla v mělké jámě se pro uložení používá kombinace vody a štěrku nebo vody a písku – gravel-water thermal energy storage (GWTES). Ke skladování tepla je užita kuželovitá jáma s přirozeným sklonem stěn, které jsou společně s horní stěnou tepelně izolovány a potaženy vodotěsnou plastovou folií. Teplo se do úložiště přivádí a zpětně odebírá přímou výměnou vody nebo nepřímo prostřednictvím plastových trubic uložených v různých vrstvách jámy. Nevýhodou tohoto systému je snížená tepelná kapacita oproti samotné vodě, výhodou je snadnější udržení teplotní stratifikace, která přispívá k vyšší efektivnosti systému (Lavinia, 2011; Schmidt et al., 2003). První takto koncipovaný projekt o objemu 1000 m^3 byl s uspokojivými výsledky proveden na Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Stuttgartské univerzity v roce 1984. (Mangold et Schmidt, 2002)

Úložiště tepla ve vodním tanku – Hot Water Thermal Energy Storage (HWTES) – má nejširší možnosti využití. Může být vybudováno téměř kdekoliv, nezávisle na geologických podmínkách. Sezonní HWTES bývají budovány z předpjatého betonu s dodatečnou tepelnou izolací. Tepelné ztráty se snižují také částečným nebo úplným umístěním tanku pod zem. Nejvýhodnější skladovací médium pro HWTES je voda, díky své dostupnosti a vysoké tepelné kapacitě (Lavinia, 2011). V současné době se tepelné úložiště v podobě tanku nejčastěji využívá v Evropě v kombinaci se solárními kolektory u rodinných domů. (Novo et al., 2009).

2.4.2 Vrtné tepelné úložiště

Podzemní vrtná tepelná úložiště – Borehole Thermal Energy Storage (BTES) využívají suché horninové prostředí. Pro ukládání tepla pomocí systémů BTES se využívá systém desítek až tisíců vrtů do hloubky v rozmezí 30 – 200 m pod povrch země. Na rozdíl od systému ATES je zde žádoucí, aby se okolí vrtů teplotně ovlivňovalo a vznikaly tak rozsáhlá tepelná pole (Čížek 2005).

Systém BTES může využívat dva základní principy, uzavřený a otevřený. Více využívaný a bezpečnější je systém uzavřený, kdy se k přenosu tepla do horniny využívají trubicové tepelné výměníky. Výměníky obsahují teplonosné médium ve formě kapaliny - vody nebo nemrznoucí směsi. Porovnáním jednotlivých systémů se zabývá práce Breger et al. (1996). Dalším zlepšením tepelného kontaktu vrtu s okolím a tím lepší možností akumulace se zabývá Delaleux et al. (2012). BTES nemá výrazné vertikální rozmístění tepla, ale ukládá teplo horizontálně, od středu k okraji, proto je důležité, aby výměníky měly přímý styk s horninou, protože je zde využíván výhradně konduktivní přenos tepla (Fujimitsu et al., 2010; Socaciu, 2011).

Otevřený princip BTES má trubici přivádějící teplonosnou kapalinu umístěnou v blízkosti spodní části vrtu. Trubice odvádějící kapalinu je situována v horní části vrtu. Otevřený systém se často potýká s problémy možné kontaminace podzemních vod, a proto se od něj upouští. Pod krycí vrstvou, nad úložištěm, se umisťuje tepelně izolační vrstva snižující tepelné ztráty. Účinnost BTES systémů závisí na několika faktorech, jako je teplota půdy, provozní teplota úložiště, proudění podzemní vody v okolí a tepelné vlastnosti půdy (Kim et al., 2010). Ovlivnění teplotního pole pod povrchem při dotaci a čerpání tepla popisuje Fujimitsu et al. (2010).

2.4.3 Úložiště v podzemních základech staveb

Zemní stavby s tepelným výměníkem se v posledních letech staly populární ve Švýcarsku a Rakousku. Mimouni et al. (2014) popisuje využití specifických šroubů a kotev v základech staveb jako tepelných výměníků. Bouazza et Adam (2012) shrnují užití pilot a dalších druhů základů při jímání a ukládání tepla. Frodl et al. (2010) popisuje užití tunelového ostění s předinstalovaným tepelným výměníkem v Jenbachu, Rakousku. Užití pilotů s tepelným výměníkem shledává Brandl (2013) jako velmi populární. Od roku 2005 bylo v Austrálii nainstalováno vice jak 7000 takových pilot každý rok. Další využití tunelového ostění jako zdroje tepla a chlazení popisuje Unterberger et al. (2004). Výhoda tunelové stavby je velká plocha kontaktu s horninovým prostředím (Unterberger et al., 2004). V Evropském klima bývají 10 metrů pod povrchem stabilní teploty v rozmezí 10 až 15 °C (Adam et Markiewicz, 2009). V dlouhých dopravních tunelech může být teplo získáváno z odpadního tepla pocházejícího z provozu, během léta je regenerováno z proudícího vzduchu, nebo je dodáváno ze zdrojů při chlazení budov (Brandl, 2013).

2.4.4 Ukládání tepla pomocí roztavených solí

Jednou z nejnovějších technologií pro ukládání tepla je jeho akumulace v roztavených solích. Pro ukládání se využívají tzv. solární soli, nejčastěji se jedná o dusičné soli ($NaNO_3$, KNO_3, $Ca(NO_3)_2$). Dříve se pro tyto účely používaly syntetické oleje (např. Therminol VP-1), které však

neumožnily dosáhnout takových teplot. Vysoká skladovací teplota až 500 °C snižuje objem zásobníku pro danou tepelnou kapacitu. Další praktickou výhodou je jejich velmi nízký tlak par, jsou levnější a šetrnější k životnímu prostředí než zmiňované oleje. Nízký tlak par roztavených solí umožňuje vertikální postavení skladovacích nádrží se samonosným zastřešením, které jsou podobné nádržím na skladování ropy. Jsou vyrobeny z uhlíkové oceli a stěny jsou izolovány minerální vatou (Herrman et al., 2004; Zhao et Wu, 2011).

K roztavení solí se využívá tzv. solární věž. Na vrcholu věže je zásobník odolávající vysokým teplotám. V okolí věže jsou umístěna parabolická zrcadla s možností natáčení dle polohy slunce. Zrcadla soustřeďují světelné paprsky na zásobník soli a tím je produkováno teplo potřebné k roztavení soli. Po roztavení je sůl přemístěna do druhotných zásobníků, kde je uložena pro pozdější využití. Uložené teplo je použito k ohřevu vody na přehřátou páru k pohonu turbín k výrobě elektrického proudu. Nevýhodou těchto systémů jsou vysoké nároky na technologii, pořizovací a provozní náklady. Je nutné zajistit, aby roztavená sůl v systému nezatuhla (Gil et al., 2010; Zhao et Wu, 2011). V této oblasti problematiky panuje rychlý vývoj, Zhao et Wu (2011) ohlašují směsi tavených solí, jejichž teplota bodu tání je pod 100 °C, což zjednodušuje jejich praktické nasazení a dále snižuje náklady na provoz takového systému.

2.4.5 Vysokoteplotní tepelné úložiště

Vysokoteplotní úložiště – High Temperature Thermal Energy Storage (HTTES) mohou nalézt uplatnění při redistribuci tepla z obtížně regulovatelných zdrojů, nejčastěji při jímání sluneční energie ve formě tepla. Využití tepla spalin z průmyslu nebo odpadního tepla v jiné formě si vyžaduje nasazení technologií odolávající teplotám v řádu stovek stupňů Celsia. Tyto předpoklady splňují úložiště zjevného tepla bez přítomnosti vody a úložiště pracující s latentním teplem (Gil et al., 2010; Medrano et al., 2010). Mezi vysokoteplotní úložiště patří i dříve uvedené systémy pracující s roztavenými solemi.

Velká pozornost je věnována vývoji nových PCM z důvodu jejich velké energetické hustoty. Základní požadavky na PCM, které podléhají fázové změně z pevné látky na kapalnou jsou: vysoké množství latentního tepla na jednotku, dobrá tepelná vodivost pro pevnou i kapalnou fázi a malý rozdíl hustoty při změně skupenství. Je žádoucí, aby nedocházelo k přechlazení během tuhnutí látky a zamrzání výměníku uvnitř úložiště (Adinberg, 2010). K základním požadavkům na chemické vlastnosti patří chemická stabilita, potlačení chemického rozkladu, kompatibilita s materiály používanými při výstavbě systému (výměníky, potrubí). Dále nesmějí být toxické, hořlavé ani výbušné. Aby PCM byly zajímavé pro využití ve velké míře, musejí podléhat také základním ekonomickým faktorům, tedy být levné a dostupné ve velkém množství (Fernandes et al., 2012).

Z důvodu nízké tepelné vodivosti dostupných PCM byly testovány způsoby zlepšení distribuce tepla, například vkládáním uhlíkových vláken a štětečků přímo do PCM (Hamada 2003). Vkládání tepelných trubek a další způsoby užití PCM přehledně popsal Farid et al., (2004). Využití PCM pro domovní klimatizaci popisuje Al-Abibi (2012). Hlavním problémem se jeví solidifikace pevné fáze na tepelných výměnících úložiště a nízká tepelná vodivost materiálů (Adinberg, 2010). Hodnoty skupenského tepla a teploty tání vybraných PCM jsou uvedeny v Tab. 5.

Alternativou k PCM jsou úložiště využívající zjevného tepla pevné fáze, která nepodléhá fázové přeměně v teplotním rozsahu procesu skladování (Singh et al., 2009). Schopnost ukládat zjevné teplo pro daný materiál je dána tepelnou kapacitou na jednotku objemu. Aby byl materiál vhodný pro tepelné úložiště, musí být levný a musí mít dobrou tepelnou vodivost (Fernandez et al., 2010).

V úvahu připadají pevné materiály jako horniny a kovy, které mohou být použity při skladování tepla při nízkých i vysokých teplotách (Hasnain, 1998). Při užití pevných materiálů musí být zajištěn transport tepla z a do úložiště. K tomuto účelu se používají teplonosné kapaliny. Přenos tepla z nebo do transportní teplonosné tekutiny zajišťuje tepelný výměník. V případě

nižší tepelné vodivosti materiálu úložiště rostou vstupní náklady na komplikovanější tepelný výměník. Problém může nastávat při rozdílné tepelné roztažnosti materiálů úložiště, tepelného výměníku a potrubí. Oddělení tepelného výměníku a materiálu tepelného úložiště vede ke snížení tepelné výměny s teplonosnou kapalinou (Kousksou et al. 2014). Vybrané pevné materiály používané ve vysokoteplotních tepelných úložištích jsou již popsány v kapitole 2.3.1 o ukládání zjevného tepla. Další vyčerpávající shrnutí a porovnání použitelných materiálů v HTTES aplikacích podává Khare et al. (2013). Shledává několik výhod pevného TES oproti využití tekutin, ve smyslu jednoduchosti designu, stavby a provozu, tudíž i nižších nákladů. Vyhovujícími materiály shledává korundovou a magneziovou keramiku, korundové betony, karbid křemíku, grafit a železité materiály. Metodologii výběru a charakterizaci recyklovaných materiálů pro HTTES se zabývá Navarro et al. (2012). Kritérii výběru jsou energetická hustota, tepelná vodivost a cena. Jako vhodné jsou vybrány vedlejší produkci při výrobě ocele, různé oxidy kovů, halitové minerály a beton.

Mimo tepelné solární elektrárny jsou HTTES využívány v kogeneračních elektrárnách při společné výrobě elekřiny a tepla. Daschner et al. (2013) popisuje využití štěrkového akumulátoru ve spalovně biomasy a následovné využití odpadního tepla. Testován byl kuličkový oxid hlinitý a štěrky z křemene, vulkanitu a basaltu. Průměr zrna se pohyboval v rozmezí 3 až 12 mm. Testovací úložiště bylo válecového tvaru s průměrem 650 mm a výškou 900 mm. Při spalování procházely kouřové plyny dosahující teplot 800 až 1200 °C matricí sypaného materiálu úložiště. Uložené teplo může být použito k předehřívání vstupujícího vzduchu a tím ke zvýšení účinosti, nebo k redistribuci produkované elektřiny v čase. Kapacita tohoto úložiště byla až 80 kWh. Dalším popsaným prototypem HTTES využívajícím vzduchu jako teplonosné tekutiny byla kónická nádrž s výškou 4 m a průměrem klesajícím od 2 m na vrcholu, k 1.25 m u dna (Zanganeh et al. 2012). Projektované teploty se pohybovaly mezi 20 a 650 °C, celková kapacita úložiště 6.5 MWh. Další výpočetní zhodnocení a optimalizace prototypu je popsána v Zanganeh et al. (2015).

Optimalizací designu 10MJ betonového HTTES se zabývá Prasad et Muthukumar (2013). Podstatou optimalizace jsou rozměry úložiště, rozměry registru trubic tepelného výměníku a počet lamel na trubicích, které zvyšují přenos tepla z a do teplonosné kapaliny. K optimalizaci byl vybrán numerický model COMSOL Multiphysics využívající metody konečných prvků. Rešerší numerického modelování a matematického popisu HTTES s porézním mediem se zabývá Andreozzi et al. (2012). Vlastní zhodnocení materiálů se týká sypaného štěrkového úložiště a keramických pěn.

2.5 Výběr horninového materiálu tepelného úložiště

Problematiku skladování tepla v látkách horninového prostředí zásadním způsobem ovlivňují parametry definující rychlost šíření tepla a kapacitu pro jeho skladování. Vlastnosti látek z hlediska šíření a ukládání tepla (tepelné charakteristiky) určuje součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita. Parametr charakterizující množství energie uložené v jednotkovém množství látky je měrná tepelná kapacita c_p ($J \cdot kg^{-1}K^{-1}$). Čím vyšší je tento koeficient, tím více tepla je daný materiál schopen pojmout.

Zvolený materiál tepelného úložiště by měl mít schopnost odolávat tepelnému namáhání. Především by cyklické nabíjení a prázdnění tepelného úložiště nemělo vést k degradaci jeho tepelných charakteristik (součinitele tepelné vodivosti nebo tepelné kapacity). Při tepelném namáhání by nemělo docházet k rozpukání v důsledku objemových změn (a následným přerušením vodivých cest) nebo přeměně struktury a chemismu materiálu (Gil et al., 2010). Přírodní horninové materiály jsou tvořeny pevnou fází (tzv. matricí) a póry vyplněnými vzduchem, nebo vodou (Allen et al., 2014). Obecné požadavky na materiál vysokoteplotního tepelného úložiště byly popsány v kapitolách 2.3.1 a 2.4.5.

V literatuře mnoho pozornosti horninovým materiálům jakožto materiálům pro tepelné úložiště není věnováno (Allen et al. 2014). Hlavní pozornost je věnována PCM nebo umělým materiálům z druhotných surovin. Výjimky tvoří úložiště tvořené sypaným materiálem (Barton,

2013; Heller et Gauché, 2013; Daschner et al., 2013; Zanganeh et al., 2014). Rešerší vlastností hornin se zabývá Allen et al. (2014), Gil et al. (2010) a Tian et Zhao (2013). V pevné fázi horninového prostředí na území ČR bývají dominantně zastoupeny následující minerály: křemen, živce, slídy, amfiboly, pyroxeny, olivín a jílové minerály. Koncept kombinace užití horninového materiálu a tepelného výměníku nebyl v dostupné literatuře nalezen. Idea využití tepelně vodivé hmoty ke zvýšení vodivosti, resp. tepelné difuzivity celého úložiště, se jeví jako novátorská.

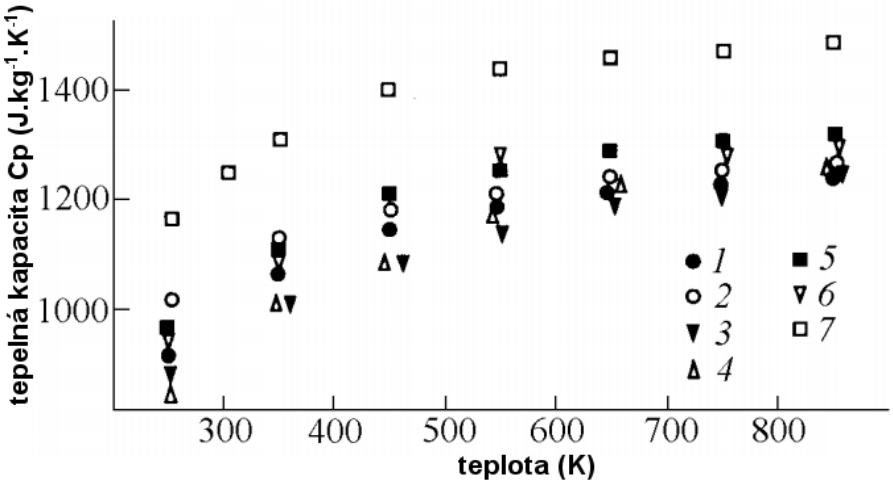
Běžně zastoupenou kapalnou fází v horninovém prostředí je voda. Za normálního tlaku by ale v rámci předpokládaného pracovního rozpětí tepelného úložiště (do 400 °C) docházelo ke skupenské přeměně vody v páru. Nekontrolovaná přeměna vody v páru může vést k porušení pevné fáze materiálu tepelného úložiště. Neřízenému proudění vody nebo páry úložištěm je nutno bránit.

Izolace systému a konstrukce umělého tepelného úložiště (s umělým, nebo přírodním kamenivem), se kvůli omezení ztrát jeví jako nutnost. Za předpokladu provedení izolace (tepelné a tlakové) je třeba hledat materiály a kapaliny s pokud možno maximální měrnou tepelnou kapacitou a součinitelem tepelné vodivosti (přitom požadavek vysoké hodnoty součinitele tepelné vodivosti je v porovnání s požadavkem na vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity prioritní). Takový postup zajišťuje menší objem úložiště a větší hustotu skladovaného tepla a efektivnější možnosti zpětného odběru tepla.

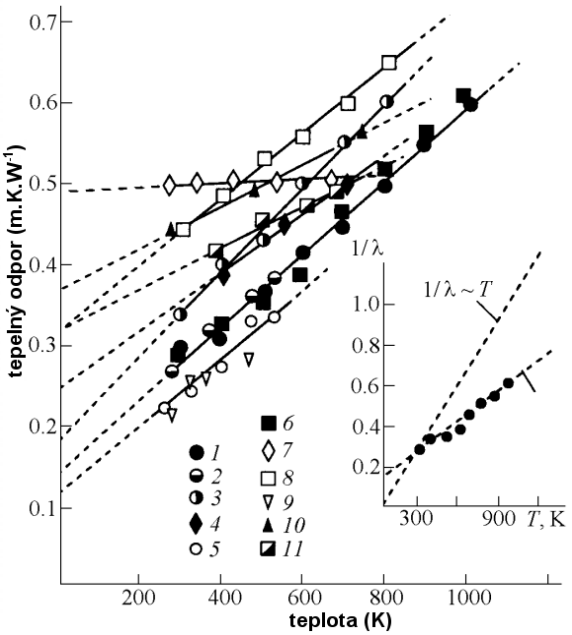
Závislost tepelných vlastností na samotné teplotě je demonstrována na několika grafech. Závislost tepelné kapacity vybraných hornin je vyobrazena na Obr. 3. V teplotním rozmezí 0 až 400 °C mění uvedené minerály svoji měrnou tepelnou kapacitu více jak o deset procent. Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě je obvykle popisována pomocí polynomických funkcí.

Vztah teploty a měrného tepelného odporu minerálů a hornin je v grafu na Obr. 4. Měrný tepelný odpor je definován jako převrácená hodnota součinitele tepelné vodivosti [$W^{-1}K \cdot m$]. Přepočet mezi kelvinovou a celsiovou stupnicí udává vztah (5), 0 °C odpovídá teplotě 273.16 K a 400 °C odpovídá teplotě 673.16 K.

Z obrázku Obr. 4 je patrná výrazná závislost měrného tepelného odporu (a součinitele tepelné vodivosti) na teplotě. V projektovaném pracovním rozpětí tepelného úložiště (0 °C – 400 °C) se hodnota měrného tepelného odporu mění o desítky procent. S nárůstem teploty součinitel tepelné vodivosti klesá.



Obr. 3 Hodnoty měřené tepelné kapacity hornin v závislosti na teplotě: 1: granit, 2: diorit, 3: diabas, 4: gabro, 5: dunit, 6: harzburgit, 7: serpentinit . Převzato z Petrunin et Popov (1995).



Obr. 4 Závislost měrného tepelného odporu hornin na teplotě: 1: granit, 2: granit, 3: diorit, 4: diabas, 5: dunit, 6: dunit, 7: gabro, 8: serpentinit, 9: hyperstenit, 10: eklogit, 11: slída. Převzato z Petruin et Popov (1995)

2.5.1 Kritéria výběru horninového materiálu

Při výběru vhodného horninového materiálu Česká geologická služba vytipovala (Franěk et al., 2012) lokality různých hornin podle předem daných kritérií, asistovala při odběrech vzorků a prováděla petrologické a analytické práce s těmito vzorky. Při prvotním odebírání většího množství hornin měly vzorky splňovat alespoň některé z následujících kritérií.

- dostupnost dostatečného objemu čerstvého horninového materiálu (ideálně činný lom);
- co nejnižší počet hlavních horninotvorných minerálů (ideálně třísložkové horniny, jejichž minerály jsou v teplotním rozmezí 0 až 400 °C stabilní);
- vysoký stupeň homogenity horniny;
- vysoká pórová nebo puklinová porozita (pro vyplnění tepelně vodivou hmotou);
- preferenční obsah křemene, případně grafitu nebo magnetitu (jakožto dobrých a chemicky stabilních vodičů tepla);
- drobnozrnná až středně zrnná struktura hornin bez vyrostlic;
- vysoký stupeň tepelné vodivosti;
- postižení kontaktní nebo nízkoteplotní metamorfózou.

Vybrané vzorky hornin pak měly splňovat zejména tyto 2 základní požadavky – vysokou porozitu a zároveň stabilní minerální asociaci. Taková ideální hornina však neexistuje, proto byl výběr hornin a jejich konkrétních lokalit orientován dvěma směry:

- horniny s co nejvyšší porozitou (u nich se počítá s horší stabilitou minerální asociace při ohřevu na plánovaných 380°C nebo při interakci s hydrotermálními roztoky);
- horniny s co nejstabilnější minerální asociací (zejména krystalinické horniny; přestože mají obecně nízkou porozitu, byl výběr zaměřen na lokality se vzorky relativně nejporéznějšími).

Důraz na poréznost byl kladen z důvodu původní idei tepelně vodivou hmotu injektovat přímo do horninové matrice. Vytipováno bylo celkem 35 lokalit, kde bylo odebráno 42 vzorků různých hornin (viz Tab. 7), které se co nejvíce blížily výše uvedeným kritériím. Všech 42 vzorků bylo zkoumáno a popsáno z makroskopického petrologického hlediska a byly pořízeny skeny těchto vzorků.

Tab. 7 Přehled vzorkovaných lokalit, převzato z Franěk et al. (2012)

Lokalita	Typ horniny	X JTSK	Y JTSK
Barchovice	Ortorula	-705597	-1064302
Bechyně	Ortorula	-751951	-1130079
Bernartice	Serpentinit	-698936	-1094118
Bílkovice u Vlašimi	Rula	-716949	-1083349
Borovany	Diatomit	-744816	-1174298
Bradlo u Jihlavy	Pararula	-664859	-1130898
Černá studnice	Tanvaldský granit	-677852	-981687
Česká Kamenice	Českokamenický pískovec	-730966	-964330
Děčín	Děčínské pískovce	-748567	-964772
Frýdštejn	Melafyr	-682372	-987429
Hodkovice nad Mohelkou	Ignimbrit	-686781	-984724
Hrubšice	Serpentinit	-623477	-1169286
Husinec	Migmatit, migmatická pararula	-787805	-1152919
Kamenné doly	Migmatit a syenit	-771185	-1125350
Kladruby Stříbra	Rohovec	-852288	-1070123
Královec	Ignimbrit	-623556	-993062
Krásno	Fylit, albitický granit	-858698	-1022664
Kyje u Jičína	Melafyr	-670048	-1006964
Libodřice	Amfibolit	-697391	-1058946
Lipová u Šluknova	Granit a dolerit	-734252	-941048
Malé Žernoseky	Ryolit	-762006	-989343
Markovice	Amfibolit	-671653	-1073884
Mšené-Lázně	Mšenské pískovce	-759300	-1011044
Panské Dubenky	Granit	-694406	-1147609
Pavlice	Ortorula	-652934	-1179813
Pecerady	Gabro	-732064	-1072845
Plešovice	Felzický granulit	-767131	-1176395
Rabštejn bad Střelou	Grafitický fylit	-823556	-1036453
Radčice	Fylit	-673769	-986973
Skalice u České Lípy	Skalický pískovec	-725511	-972163
Slapy u Tábora	Syenit	-736234	-1118120
Tatobity	Ignimbrit	-674554	-998744
Tis u Blatna	Granit	-818831	-1032400
Třebnuška	Ryolit	-795102	-1057940
Vítkov u Sokolova	Granit	-864015	-1017078

2.5.2 Geomechanické a petrofyzikální parametry vybraných hornin

V laboratoři geomechaniky Aracadis CZ (Najser et al., 2012) probíhaly laboratorní zkoušky geomechanických a petrofyzikálních parametrů horninových vzorků různě postižených tepelným namáháním. Předmětem těchto zkoušek bylo charakterizovat různé horninové typy a poskytnout tak podklady pro vyhledání vhodných typů hornin. Po předběžném hodnocení bylo vybráno 10 hornin pro podrobnější charakteristiku a následně 4 lokality pro testování kompozitních vzorků vyplněných geopolymerem.

Provedené zkoušky zahrnovaly stanovení pórovitosti, hydraulické vodivosti, pevnosti a tuhosti v prostém tlaku, pevnosti v příčném tahu a ultrazvukové prozařování P a S vlnami. Zkoušky byly rozděleny do čtyř sad, v rámci kterých proběhla specifická sekvence zkoušek vždy na několika vzorcích z každé lokality. Po každém zúžení byly na horninách vybraných k dalším analýzám provedeny podrobnější geomechanické a petrofyzikální zkoušky s cílem získat komplexnější představu o jejich chování. Výsledky prezentovaných zkoušek byly pouze jedním z několika kritérií uvažovaných při výběru vhodných hornin. (Lachman et al., 2014)

Na základě souhrnu výsledků všech provedených zkoušek a posouzení dalších relevantních faktorů bylo do užšího okruhu vhodných hornin vybráno 10 lokalit. Bílkovice - pararula, Česká Kamenice - pískovec, Černá Studnice - granit, Bezděčín u Frýdštejna - melafyr, Hrubšice - serpentinit, Královec - ignimbrit, Malé Žernoseky - ryolit, Mšené-lázně – pískovec a Slapy u Tábora, Panské Dubenky - granit).

U každé lokality se posuzovala pórovitost (n), hydraulická vodivost (K), rychlost šíření ultrazvukových P (v_P) a S (v_S) vln, pružnostní (E) a deformační (E_{def}) modul, pevnost v prostém tlaku (σ_{UC}) a pevnost v příčném tahu (σ_{TS}). Tyto zkoušky probíhaly na každé lokalitě v rámci dvou zkušebních sad. Současně byl posuzován vliv cyklického tepelného namáhání (8 cyklů zahřívání na 380 °C) na studované parametry. Tab. 8 uvádí výsledky všech zkoušek. Studované parametry byly měřeny vždy na jednom vzorku s výjimkou pórovitosti, která byla měřena vždy na pěti vzorcích a v tabulce je uvedená průměrná hodnota.

Tab. 8 Výsledky geomechanických zkoušek na prvotním souboru vzorků. Pórovitost (n), hydraulická vodivost (K), rychlost šíření ultrazvukových P (v_P) a S (v_S) vln, pružnostní (E) a deformační (E_{def}) modul, pevnost v prostém tlaku (σ_{UC}) a pevnost v příčném tahu (σ_{TS}). Převzato z Lachman et al. (2014)

	sada	Bílkovice	Česká Kamenice	Černá Studnice	Bezděčín u Frýdštejna	Hrubšice	Královec	Malé Žernoseky	Mšené-lázně	Slapy u Tábora	Panské Dubenky
PŘED TEPELNÝM NAMÁHÁNÍM											
n (%)	B	1,96	28,43	0,89	10,85	1,64	11,11	13,00	30,44	0,24	0,82
K (m/s)	B	2,9E-12	2,6E-05	4,1E-11	1,8E-12	1,9E-10	5,7E-10	1,4E-09	5,3E-06	2,5E-12	2,3E-11
$V_{p\text{-}dry}$ (km/s)	B	4,550	2,392	4,276	3,750	5,274	4,256	4,160	2,426	5,713	4,895
$V_{s\text{-}dry}$ (km/s)	B	2,814	1,484	2,742	2,321	2,746	2,584	2,349	1,513	3,327	2,988
E (GPa)	A	46,79	8,92	43,16	17,97	38,05	29,96	29,14	7,66	73,81	52,07
E_{def} (GPa)	A	39,94	7,38	41,37	14,04	33,18	24,6	23,28	6,62	68,01	47,86
σ_{UC} (MPa)	A	72,15	12,18	127,97	42,08	57,47	104,06	63,84	21,79	113,83	191,03
σ_{TS} (MPa)	A	8,6	0,67	8,8	7,19	4,56	4,62	4,4	1,29	6,6	9,3
PO TEPELNÉM NAMÁHÁNÍ (8 CYKLŮ ZAHŘÁTÍ NA 380°C)											
n (%)	B	2,53	28,02	1,37	16,72	2,62	11,55	13,01	30,44	0,80	0,97
K (m/s)	B	7,2E-11	2,8E-05	4,9E-11	4,5E-11	1,0E-09	3,9E-10	1,8E-09	3,3E-05	5,8E-12	1,8E-10
$V_{p\text{-}dry}$ (km/s)	B	3,826	1,848	2,951	3,802	4,473	3,893	3,933	1,693	4,463	3,169
$V_{s\text{-}dry}$ (km/s)	B	2,483	0,979	1,969	2,424	2,523	2,433	2,678	1,001	2,764	2,072
E (GPa)	B	53,4	10,21	33,92	28,94	23,82	29,12	27,64	7,97	55,55	41,39
E_{def} (GPa)	B	37,28	8,42	30,1	25,26	22,81	21,75	22,29	7,08	47,79	37,14
σ_{UC} (MPa)	B	45,8	15,39	123,06	144,57	55,84	120,61	80,2	21,24	145,99	160,11
σ_{TS} (MPa)	B	10,03	0,55	6,49	9,11	5,48	9,38	5,24	0,95	8,78	4,73

Jako zásadní charakteristika studovaných hornin se ukázala pórovitost, na které do určité míry závisí i další měřené parametry (rychlost ultrazvukových vln, pevnosti nebo hydraulická vodivost) Výsledky hydraulické vodivosti obecně negativně korelují s naměřenou pórovitostí. U

jednotlivých hornin jsou přesto patrné podstatné rozdíly. Například u granitů (Černá Studnice, Panské Dubenky) byla při pórovitosti 0,8-0,9% zaznamenána o řád vyšší hydraulická vodivost než u lokality Frýdštejn s pórovitostí 10,9%. Tento výsledek naznačuje výrazně odlišný charakter pórů ve studovaných horninách. U melafyru z lokality Frýdštejn tak i přes značný objem pórů vede jejich pravděpodobně špatné propojení k nízké hydraulické vodivosti. (Lachman et al., 2014; Najser et al., 2012)

Nejvyšší rychlosti ultrazvukových P vln byly zaznamenány u syenitu ze Slap u Tábora (5,7 $km \cdot s^{-1}$) a serpentinitu z Hrubšic (5,3 $km \cdot s^{-1}$). Nejnižších hodnot dosahují vysoce porézní pískovce z České Kamenice a lázní Mšené (2,4 $km \cdot s^{-1}$). Mezi horniny z nejvyšší pevností a tuhostí patří granity (Panské Dubenky, Černá Studnice) a syenit ze Slap u Tábora, nejnižší pevnost byla naměřena u obou testovaných pískovců. (Najser et al., 2012)

Na vzorcích z vybraných lokalit bylo provedeno opakované měření parametrů před a po cyklickém tepelném zatěžování. Souhrnné zhodnocení všech výsledků (nejen geomechanických) získaných na 10 vybraných lokalitách vedlo v další fázi k výběru čtyř hornin z lokalit Panské Dubenky, Černá Studnice, Malé Žernoseky a Bílkovice. Tyto lokality byly předmětem dalšího testování kompozitních vzorků vyplněných geopolymerem.

2.5.3 Měření tepelných parametrů hornin

Měření tepelných vlastností hornin ze zájmových lokalit popisuje Hladký (2012). Hlavní pozornost byla věnována stanovení tepelné vodivosti a kapacity hornin. Bylo zjišťováno jejich chování a změny po tepelném namáhání nebo vlivem vlhkosti. Pro zjištění tepelných parametrů byl použit přístroj ISOMET 2104 slovenské firmy Applied Precision. ISOMET 2104 je přenosný měřící přístroj určený k přímému měření součinitele tepelné vodivosti a měrné objemové tepelné kapacity. ISOMET je řízený mikroprocesorem, který umožňuje optimalizaci podmínek měřícího procesu. Měření je založené na analýze časové závislosti teplotní odezvy zkoušeného materiálu na impulsy tepelného toku. Tepelný tok je vyvolán elektrickým vyhříváním odporového ohřívače v sondě, která je v přímém kontaktu s testovaným vzorkem. Používaná dynamická metoda je daleko rychlejší oproti metodám využívajícím ustáleného tepelného toku (Applied Precision, 1999).

Pro změření tepelných konstant byly připraveny vzorky zkoumaných hornin tvaru krychle s hranou délky 8 cm. Velikost vzorků byla stanovena po konzultaci s výrobcem měřicího přístroje, kdy je potřeba pro příložnou sondu minimální šířka zkoušeného materiálu 7 cm a tloušťka 4 cm (Hladký, 2012). Tepelné konstanty byly měřeny na 11 zájmových materiálech (10 hornin a 1 beton).

Z minimálně 54 měření pro každou horninu byl vypočten aritmetický průměr součinitele tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity c_v (viz Tab. 9). Pro zhodnocení rozptylu souboru naměřených dat pak slouží směrodatná odchylka δ. Dále je vypočtena přesnost měření tepelných konstant σ a nahodilá složka přesnosti měření Δ dle údajů výrobce měřicího zařízení (Applied Precision, 1999).

Tab. 9 Výsledné hodnoty měřené tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity c_v

Název lokality horniny	λ	δ	σ	Δ	c_v	δ	σ	Δ
	[W·m^{-1}K^{-1}]				[MJ·m^{-3}K^{-1}]			
Česká Kamenice	**1.72**	0.05	0.17	0.05	**1.56**	0.01	0.23	0.05
Mšené Lázně	**1.75**	0.10	0.17	0.05	**1.60**	0.07	0.24	0.05
Královec	**1.80**	0.05	0.18	0.06	**1.88**	0.07	0.28	0.06
Malé Žernoseky	**2.55**	0.10	0.25	0.08	**1.71**	0.11	0.26	0.05
Frýdštejn	**1.20**	0.09	0.12	0.04	**1.71**	0.08	0.26	0.05
Černá Studnice	**2.76**	0.14	0.28	0.08	**1.89**	0.13	0.28	0.06
Slapy u Tábora	**2.14**	0.06	0.21	0.07	**1.86**	0.09	0.28	0.06
Bílkovice	**2.43**	0.13	0.24	0.07	**1.87**	0.14	0.28	0.06
Hrubšice	**2.19**	0.22	0.22	0.07	**1.87**	0.20	0.28	0.06
Panské Dubenky	**2.88**	0.06	0.29	0.09	**2.14**	0.05	0.32	0.07
Beton	**1.75**	0.19	0.18	0.05	**1.72**	0.10	0.26	0.05

2.5.4 Měření tepelných parametrů hornin za vysokých teplot

Podle Vosteen et Schellschmidt (2003) nebo Petruin et Popov (1995) dochází vlivem zvýšení teploty ke změnám v absolutních hodnotách tepelných parametrů. Tepelná vodivost vlivem rostoucí teploty u hornin obvykle klesá a tepelná kapacita naopak roste. Při měření hodnot tepelných parametrů až do teploty 400 °C byla tato tvrzení potvrzena (Hladký, 2012). Měření byla provedena pouze pro 4 horniny z neužšího výběru (Panské Dubenky, Černá Studnice, Malé Žernoseky a Bílkovice). Jednalo se o vzorky, které byly nejprve podrobeny cyklickému tepelnému ohřevu, aby při měření za vysokých teplot nedocházelo ke zkreslení naměřených hodnot tepelných parametrů vlivem degradace. Dále byly vzorky upraveny rozříznutím na dvě stejné kruhové poloviny, aby mohly být změřeny na přístroji HotDisk (Hot Disk, 2014).

Pro zjištění tepelných parametrů za vysokých teplot byl použit přístroj HotDisk Thermal Constants Analyser firmy HotDisk AB ze Švédska, který vlastní Západočeská univerzita v Plzni. HotDisk umožňuje zjišťovat tepelnou vodivost, kapacitu a difuzivitu pevných a sypkých materiálů v závislosti na teplotě. Teplotní rozsah měření se pohybuje v rozmezí od pokojových teplot až do teploty 600 °C. Využívá se metody plošného pulzního ohřevu. Jedná se o kontaktní metodu, která vychází z předpokladu rovinného zdroje tepla umístěného v nekonečně velkém vzorku. Předpoklad rovinného zdroje je zajištěn minimální tloušťkou senzoru, umístěním senzoru mezi dva dostatečně velké vzorky vyrobené ze stejného materiálu (pro pevné látky) a vhodnou volbou doby trvání tepelného pulzu. Senzorem, který pracuje zároveň jako zdroj, prochází po předem zvolenou dobu elektrický proud. Následkem toho vzniká Jouleovo teplo. Takto vytvořený tepelný pulz ohřívá senzor a proniká do vzorku. Poměr mezi teplem využitým k ohřevu senzoru a množstvím generovaného tepla dává informaci o tepelně fyzikálních vlastnostech zkoumaného materiálu. (Hot Disk, 2014).

Cílem měření bylo stanovit tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu v závislosti na teplotě a to od pokojové teploty do 400 °C. Bylo zvoleno 5 teplotních hodnot, při kterých byla měření prováděna: 20, 100, 200, 300 a 400°C. Při měření pro teploty vyšší než pokojové, jsou nad a pod vzorkem umístěny termočlánky pro kontrolu teplotní stability vzorku, měření je realizováno pouze při změně teploty do 0,2°C/min.

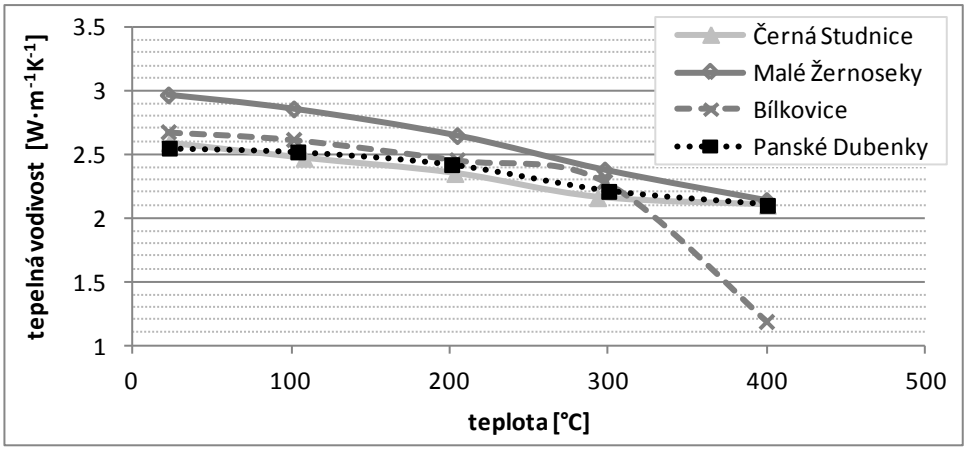
Z minimálně 11 měření pro každou horninu byl vypočten aritmetický průměr součinitele tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity c_v. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Stanovené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity c_v pro teploty v rozmezí 20 – 400 °C. Převzato z Hladký (2013)

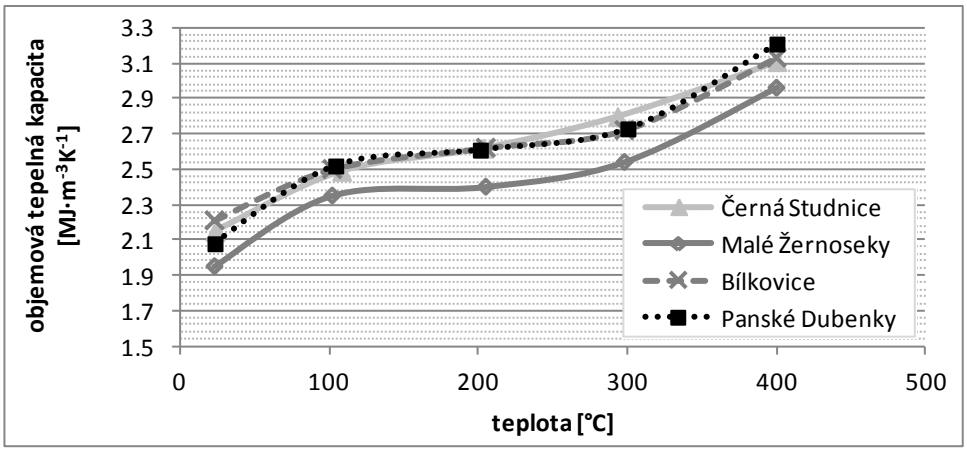
Černá Studnice					
teplota měření [°C]	23	108	203	293	400
λ [W·m^{-1}K^{-1}]	2.59	2.47	2.35	2.16	2.1
c_v [MJ·m^{-3}K^{-1}]	2.15	2.49	2.62	2.8	3.11
Malé Žernoseky					
teplota měření [°C]	23	102	205	298	400
λ [W·m^{-1}K^{-1}]	2.96	2.85	2.64	2.37	2.13
c_v [MJ·m^{-3}K^{-1}]	1.95	2.35	2.4	2.54	2.96
Bílkovice					
teplota měření [°C]	23	102	205	298	400
λ [W·m^{-1}K^{-1}]	2.67	2.61	2.45	2.28	1.18
c_v [MJ·m^{-3}K^{-1}]	2.21	2.5	2.62	2.72	3.13
Panské Dubenky					
teplota měření [°C]	23	104	201	300	400
λ [W·m^{-1}K^{-1}]	2.55	2.52	2.42	2.21	2.1
c_v [MJ·m^{-3}K^{-1}]	2.08	2.52	2.61	2.73	3.21

Naměřené výsledky závislosti měrné tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě odpovídají poznatkům dříve zmíněným poznatkům uváděným v literatuře. Změřené hodnoty byly vyneseny do následujících grafů (Obr. 5 a Obr. 6) pro lepší přehlednost a porovnání.

U horniny lokality Malé Žernoseky je zajímavý výraznější pokles měrné tepelné vodivosti při vysokých teplotách. Naopak u horniny lokality Panské Dubenky je příznivý výrazně menší pokles tepelné vodivosti s rostoucí teplotou. U stejné horniny je dobře patrný mírně větší nárůst tepelné kapacity s rostoucí teplotou, což je rovněž příznivé pro potencionální materiál uložiště tepelné energie. Zjištěné hodnoty měrné tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity při vysokých teplotách jsou důležitými vstuponími parametry pro matematické modelování založené na fyzikálních vstazích.



Obr. 5 Měřená závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě vybraných hornin



Obr. 6 Měřené závislost hodnot objemové tepelné kapacity na teplotě vybraných hornin

2.5.5 Volba horniny pro tepelné úložiště

Po celkovém zhodnocení všech posuzovaných charakteristik byla jako hornina s nejpříznivějšími vlastnostmi pro vysokoteplotní uložiště zvolena žula z lokality Panské Dubenky. Při výběru byl hlavní důraz kladen na příznivé termofyzikální vlastnosti, ale také na další petrologické, mechanickofyzikální, geologické nebo ekonomické aspekty. Následuje souhrn zjištěných parametrů pro zvolenou horninu (Lachman et al., 2014).

Hornina: granit
Lokalita: Panské Dubenky
Hustota ρ = 2620 kg·m^{-3}
Tepelná vodivost λ = 2,88 W·m^{-1}K^{-1}
Měrná tepelná objemová kapacita c_v = 2,14 MJ·m^{-3}K^{-1}
Měrná tepelná vodivost kapilárně nasycené horniny λ = 3,29 W·m^{-1}K^{-1}
Tepelná objemová kapacita kapilárně nasycené horniny c_v = 2.22 MJ·m^{-3}K^{-1}
Tepelná vodivost po cyklickém ohřevu λ = 2.48 W·m^{-1}K^{-1}
Degradace tepelné vodivosti vlivem cyklického ohřevu = 16.1 %
Tepelná vodivost při 400°C λ = 2.10 W·m^{-1}K^{-1}
Měrná tepelná objemová kapacita při 400 °C c_v = 3.21 MJ·m^{-3}K^{-1}
Faktor anizotropie tepelné vodivosti a_f = 1.04
Teplotní dilatace (prodloužení) při 380°C = 0.42 %
Počet ohřevných cyklů potřebných pro ustálení degradace tepelné vodivosti P_{min} = 4.

2.6 Tepelně vodivý geopolymer

Hlavním úkolem tepelně vodivé hmoty mělo být zlepšení tepelných charakteristik horninového materiálu (zvýšení tepelné vodivosti) za účelem zlepšení distribuce tepla do horninového prostředí. Dílčím cílem byl výzkum možné elektrické vodivosti materiálu, což by mohlo být velmi efektivně využito pro odporové zahřívání hmoty a následný přenos tepla do horniny. Posledním žádaným specifickým parametrem materiálu, byla jeho dobrá aplikovatelnost a to jak do makro/mikro trhlin tak i do pórového prostoru horniny. To vše spojeno s vysokou mechanickou i chemickou stabilitou materiálu v intervalu teplot 0 až 400 °C. Tato mez je daná teplotou, při které dochází k nevratným strukturálním změnám hornin vedoucí k jejich degradaci. (Lanchman et al., 2014).

V počátku byl vývoj materiálu řešen ve dvou paralelních větvích, které byly zaměřeny podle typu prostředí, do kterého byla hmota určena. První typ počítal s aplikací do prostředí makropuklin a volných dutin, druhá varianta byla zaměřena na injektáž energetické hmoty do mikropuklin a do pórového prostoru hornin. (Nosek et al., 2012)

Pórový prostor hornin je tvořen póry s maximální velikostí podle typu horniny. Od velikosti 1 mm pro pískovce, po granity s velikostí pórů v řádech mikrometrů. Při hledání vhodné hmoty, která by byla aplikovatelná přímo do pórového prostoru horninové matrice byla pozornost zaměřena na materiály různých typů kovových nanočástic v suspenzi. Pro testy byly použity nanočástice stříbra, železa a magnetitu, tedy materiály s řádově vyšší tepelnou vodivostí (λ nad 10 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$) než u horninového prostředí. Hlavní problém byla nutnost použití velmi koncentrovaných suspenzí, které však měly značnou viskozitu a horší migrační schopnosti, to souvisí i s metodou impregnace hornin. (Nosek et al., 2012)

Z provedených testů se ukazuje, že myšlenka impregnace hornin za účelem zvýšení jejich tepelné vodivosti je s ohledem na dostupné materiály velmi obtížně realizovatelná. S použitím nanočástic stříbra a magnetitu, které byly povrchově upraveny organickým stabilizátorem za účelem posílení jejich stability, bylo možné vybrané horniny tímto materiálem prosytit, avšak pozitivní efekt tohoto sycení byl na mezi stanovitelnosti dané měřící metodou (Nosek et al. 2012). Nejlepší výsledky byly dosažené pro vzorky pískovce impregnovaného nanostříbrem, avšak ani tento výsledek není s ohledem na rozdíl mezi upraveným a kontrolním vzorkem průkazný a lepší výsledky upravených vzorků mohou jít na vrub přirozeným heterogenitám vzorků. Hlavní omezení této metody spočívá v malém množství materiálu, které je možno vpravit do horninové matrice, a který zde zůstane i po vysušení a vyplní tak volný pórový prostor. Hmotnostní přírůstky po impregnaci dosahovaly, v případě dobře propustných pískovců, maximálně jednoho gramu, což je s ohledem na celkovou hmotnost vzorku (cca 110 g) a jeho porositu velmi málo. U velmi málo propustných horninových vzorků (amfibolit), byl tento poměr ještě výrazně horší – cca 200 g hmotnosti vzorku oproti 17 mg impregnovaného stříbra. Dokud tedy nebude dostupný vhodný materiál s požadovanými vlastnostmi: možnost vysoké koncentrace (v řádu desítek g/l), při zachování dostatečné viskozity a stability velikostní distribuce částic, se střední velikostí částic do 100 nm a bude ekonomicky přijatelný, nemá tato metoda zvýšení tepelné vodivosti hornin uplatnění. Na základě těchto výsledků se další směr výzkumu soustředil již pouze na tepelně vodivou hmotu pro prostředí makropuklin. (Lanchman et al., 2014).

V rámci vývoje tepelně vodivé hmoty bylo testováno několik různých typu základních matric, které musely splňovat několik základních požadavků. Dostatečnou tepelnou odolnost se stálými mechanickými vlastnostmi i při cyklickém tepelném zatěžování do teplot 400 °C; schopnost zapracování co nejvyššího množství tepelně vodivé příměsi (žádná z testovaných matric neměla již v základním stavu požadovanou vysokou tepelnou vodivost) a ekonomickou přijatelnost, aby mohl být v budoucnu materiál využíván také v širším měřítku (Lanchman et al., 2014). V rámci tohoto zadání pak byla soustředěna pozornost hlavně na různé typy geopolymerních matric a to hlavně z portfolia českých výrobců: Vodní Sklo a.s. a ČLUZ a.s., které se nakonec ukázaly být jako nejlepší. Dále pak byly studovány možnosti využití geopolymerní a organicko-minerální pryskyřice, žádný z těchto materiálů však nedosáhl kvalit geopolymerní matrice. (Nosek et al., 2013)

Aby výsledný materiál tepelně vodivé hmoty dosáhl požadované vysoké tepelné vodivosti, bylo nutné do základních matric, které tuto podmínku nesplňovaly, zakomponovat tepelně vodivé příměsi. Zjednodušeně lze říci, že výsledná tepelná vodivost je dána hmotnostním poměrem základních složek a jejich tepelných vodivostí. Čím větší množství tepelně vodivé příměsi se tak podaří do výsledného materiálu zakomponovat, tím lepších výsledných hodnot lze dosáhnout. Při vývoji byly testovány v zásadě dva typy materiálů: různé formy grafitu, které se i s ohledem na cenu jevily již od začátku jako potenciálně nejvýhodnější a práškové kovy, včetně oxidů a některých nano-forem. Z vodivých příměsí byl testován grafit: hrubozrnný (malá, velká vločka), střednězrnný, jemnozrnný, nebo práškové kovy: železo (včetně nano-forem), oxidy železa (magnetit), hliník, měď, bronz. (Nosek et al., 2013)

Z širokého spektra testovaných materiálů byl zvolen geopolymer s příměsí grafitu. Složení a vlastnosti tepelně vodivého geopolymeru (dále jen TVG) je právně chráněno formou užitného vzoru (číslo CZ 25908), přičemž patent je dále v řízení (patentová přihláška PV 2013-137). Jako suroviny pro výrobu TVG jsou použity průmyslově vyráběné materiály. Velkou výhodou je

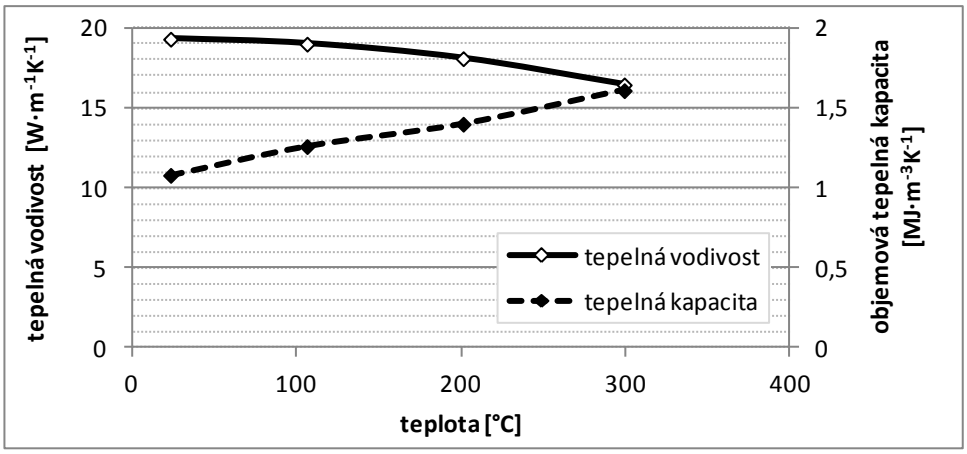
tak velmi příznivá cena výsledného produktu, která umožňuje i jeho širší průmyslové využití. Základem TVG jsou materiály ve složení 7 – 15 $\%_{hmot.}$ Mefisto K05 a 35 až 85 $\%_{hmot.}$ Baucis H110. Tento materiál je vyráběn kontrolovaným tepelným zpracováním kaolínů a lupků, kdy se přidáním vody a alkalicky rozpustných křemičitanů tvoří hlinito-křemičitý řetězec. Do této základní hmoty je aplikován přídavek tepelně vodivostní složky, kde jako nejvhodnější se jevilo 10 – 50 $\%_{hmot.}$ grafitu SV (vločkový grafit). Konkrétní množství této přísady je závislé na požadované hustotě a cílové tepelné vodivosti. (Nosek et al., 2013)

Měření termofyzikálních parametrů bylo realizováno na pracovišti Západočeské Univerzity – Výzkumného centra nových technologií, na měřícím zařízení HotDisk Constant Thermal Analyser (Hot Disk 2014). Měření probíhalo na dvou vzorcích TVG ve tvaru válce s podstavou o průměru 39 mm a výškou 7 mm. Jedna strana podstavy každého vzorku, která byla použita pro vlastní měření tepelné vodivosti, byla sbroušena na diamantové brusce, aby byl zajištěn co nejlepší styk materiálů při měření se senzorem (Lanchman et al., 2014).

Prezentované výsledky v Tab. 11 jsou vztaženy k TVG obsahujícímu 45 % tepelně vodivé příměsi grafitu SV. Z výsledků je zřejmé, že tepelná vodivost výsledného materiálu dosahuje při pokojové teplotě 19.3 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$, přičemž s rostoucí teplotou klesá až na hodnotu 16.5 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ při 300 °C. Pro názornost jsou teplotní závislosti parametrů vyneseny v grafu na Obr. 7. U popsaného TVG byly dále stanoveny následující parametry - objemová hmotnost 1150 $kg \cdot m^{-3}$, pórovitost 40 %, pevnost v tlaku 4 MPa a nasycená hydraulická vodivost $7 \cdot 10^{-9}$ $m \cdot s^{-1}$.

Tab. 11 Měřené hodnoty tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity cv tepelně vodivého geopolymeru (TVG)

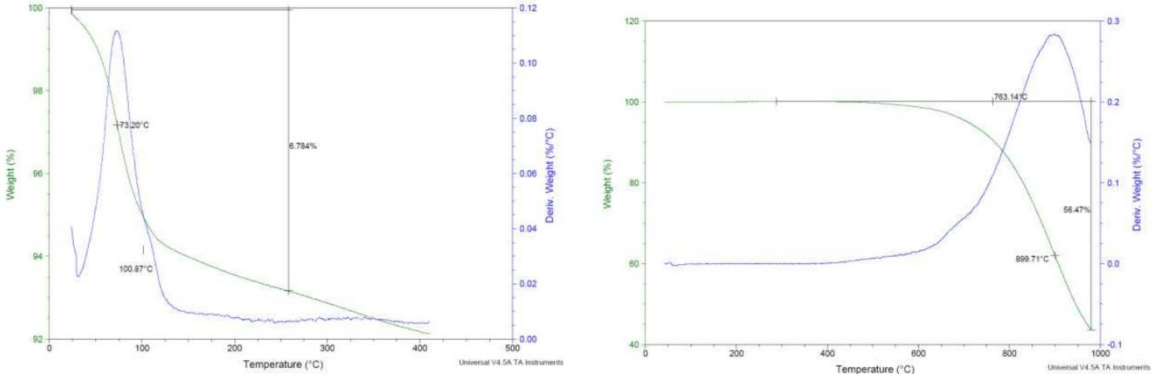
Tepelně vodivý geopolymer				
teplota měření [°C]	23	106	201	299
λ [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]	19.32	19.01	18.1	16.46
c_v [$MJ \cdot m^{-3}K^{-1}$]	1.08	1.26	1.4	1.61



Obr. 7 Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity TVG na teplotě

Za účelem sledování mechanické a chemické stability TVG při cyklickém ohřívání na vysoké teploty byly provedeny tři typy testů: i) termogravimetrické testy zaměřené na degradaci TVG sledováním úbytku hmotnosti. Termogravimetrické analýzy sledují úbytek hmotnosti vzorku při jeho řízném zahřívání. Na Technické univerzitě v Liberci je za tímto účelem k dispozici přístroj TGA Q500, který umožňuje měřit vzorky s maximální hmotností 1 g v teplotním rozsahu 20–1000 °C v řízené atmosféře. Jako atmosféru lze volit buď inertní plyn (N_2), nebo vzduch (80 % N_2 + 20 % O_2). Pro měření byl připraven vzorek TVG, který po namíchání nebyl žádným způsobem tepelně stabilizován, pouze byl ponechán na vzduchu po dobu 3 měsíců. Po této době byl vzorek termogravimetricky analyzován v atmosféře syntetického vzduchu (80 % N_2 + 20 % O_2). Samotná termogravimetrická analýza proběhla v 5 cyklech. Během prvních čtyř cyklů byl vzorek zatěžován na 400 °C. Hmotnost vzorku před testováním byla 15.824 mg, po

1. cyklu poklesla na 14.564 mg, po 2. na 14.561 mg, po 3. na 14.562 mg a po 4. na 14.563 mg. Poslední pátý cyklus kdy již nebyly na vzorku patrné žádné změny, byl za účelem zjištění maximální tepelné odolnosti zatěžován až do teplot 1000 °C (Lachman et al., 2014). Výsledky v podobě grafů závislosti hmotnosti na teplotě jsou vyneseny na Obr. 8.



Obr. 8 Grafy z výstupů termogravimetrie. Vlevo 1. cyklus zahřátí TVG na 400 °C, vpravo 4. cyklus zahřátí TVG na 1000 °C

Z výsledků termogravimetrických testů je zřejmé, že při prvním zahřívacím cyklu dochází k finální stabilizaci TVG, kdy z materiálu odchází poslední chemicky vázaná voda, popř. se vypékají nečistoty s nízkou teplotní odolností, které jsou obsaženy v tepelně vodivé příměsi vločkového grafitu. To se projevuje poklesem hmotnosti při prvním zahřívacím cyklu o 8 %. V následujících vyhřívacích cyklech již zůstává hmotnost konstantní. Poslední vyhřívací cyklus sloužil k otestování maximální možné teplotní odolnosti TVG v atmosféře syntetického vzduchu a proběhl až do 1000 °C. Z výsledků vynesených v grafu na Obr. 8 je zřejmé, že maximální bezpečnou teplotou, do které nedochází ke strukturálním změnám, je 420 °C, po té již dochází k pomalé degradace (oxidaci uhlíku vzdušným kyslíkem), která se od cca 650 °C dále urychluje. Přičemž celkový úbytek hmotnosti dosahuje 57 % na počátku pátého vyhřívacího cyklu, což odpovídá poklesu 48 % oproti počátečnímu stavu na začátku vyhřívání. To velmi dobře koreluje s celkovým množstvím tepelně vodivého grafitu v TVG, které při přípravě dosahuje 45 $\%_{hmot}$.

2.7 Matematické modelování

Matematický popis jednotlivých simulovaných fyzikálních dějů vyskytujících se při analýze chodu tepelného úložiště je popsán v kapitole 2.2. Cílem práce je simulovat fyzikální experimenty při vývoji tepelného úložiště. Předpokládané rozměry experimentů jsou v řádu centimetrů až metrů. Modely budou kalibrovány na základě experimentálních dat pozorovaných teplot.

V literatuře je zaznamenáno velké množství přístupů k modelování tepelných úložišť. Jedná se různé úrovně zjednodušení daného problému na základě simulované geometrie a principu úložiště. Vybrané numerické metody pro analýzu chování nízkoteplotních úložišť popisuje Guo et Znag (2008). Často se jedná o specifické programové kódy řešící jen jeden konkrétní problém, který se jeví klíčový. Díky nárůstu výpočetních výkonů v posledních letech dokumentuji úspěšný pokus vyhodnocení PCM úložiště s užitím komerčně dostupného programu Fluent verze 6.2. Jeho dvourozměrný transientní model vyhodnocoval průběh vybíjení - množství získaného tepla, rozložení teplot v úložišti, aktuální skupenství PCM a tepelné toky pláštěm v podobě ztrát tepla do okolí.

Foudhil et al. (2012) popisuje numerickou analýzu tepelných vlastností akumulačního media v úložišti s vertikálními kanály vyplněnými porézní matricí se vzduchem jako teplonosnou tekutinou. Zkoumány byly skleněné kapky a zapouzdřený PCM. Model je formulován rovnicí zachování energie a Darchy-Brinkmanovým zákonem popisujícím proudění v porézním mediu. Numerické řešení bylo provedeno v programu COMSOL. Využití COMSOL Multiphysics nejen

jako numerického řešiče je dokumentováno v práci Rálek et Hokr (2012). Z programu byly využity matematické formulace transportu tepla a výpočtu pole napětí a deformací. Model popisuje periodický zahřívací experiment horninového masivu a vliv zahřívání na jeho deformace. Výsledky byly validovány experimentálním měřením v podzemní laboratoři ČVUT dolu Josef. Program COMSOL Multiphycs byl dále využit k vyhodnocení níkzopotencionálního geotermálního systému (Saeid et al., 2013). Zvodeň s vtláčecím a čerpaným vrtem byla reprezentována ve 2D, ale samotné vrty a jejich vystrojení bylo simulováno liniovými elementy a jednorozměrným přestupem tepla z teplonosné kapaliny do okolního prostředí. Tento přístup umožňuje snížení počtu konečných elementů a tím výpočetní náročnosti úlohy. V modelu byla uvažována i teplotní závislost hustoty a viskozity vody. Vyhodnocením zlepšení přestupu tepla přidáním lamel na trubice tepelného výměníku a celkovou optimalizací rozměrů tepelného úložiště se zabýval Prasad et Muthukumar (2013). K simulaci byl také použit COMSOL Multiphysics. V modelu byly spárovány simulace proudění teplonosné kapaliny uvnitř trubic výměníku pomocí Navier-Stokesových rovnic a celkový transport tepla v úložišti. Cílem simulací byla analýza pole teplot při různé geometrické konfiguraci úložiště.

V práci Nam et Ooka (2010) byl pro řešení experimentálního jímání tepla z podzemních vod použit program FEFOW. Jednalo se o experiment s jedním jímacím a jedním vtláčecím vrtem. Model umožnil trojrozměrnou simulaci hydrogeologických poměrů na lokalitě se spárovaným transportem tepla v podzemní vodě. Další vyhodnocení geotermálních zdrojů za pomocí programu FEFLOW jsou popsány v Diersch (2005) a Trefry et Muffels (2007).

Modelováním válcových zásobníků se sypaným materiálem se zabývají Anderson et al. (2014), Barton (2013), Beasleyt et Clark (1984) Cascetta et al. (2014). Všechny jmenované práce využívají svůj vlastní matematický popis a jeho řešení. K urychlení výpočtu je použita osová symetrie a zjednodušení úlohy do dvou rozměrů. Podstatou vyhodnocení je rozložení pole teplot v úložišti a dynamika plnění a prázdnění zásob. Heller et Gauché (2013) sestavili vlastní model v prostředí MATLAB. Stabilizací teploty vystupujícího vzduchu ze sypaného úložiště s kamenivem přidáním zapouzdřeného PCM se zabýval Zanganeh et al. (2014). I on používá vlastní matematickou formulaci jednorozměrného modelu transportu tepla uvažujícího fázový přechod PCM.

Pro zhodnocení požadavků na software budou shrnuty předpokládané vlastnosti plánovaného tepelného úložiště. Teplo bude do prototypu úložiště dodáváno vysokoteplotním zdrojem. Přenos tepla z vysokoteplotního zdroje bude zajištěn pomocí tepelně vodivé hmoty, která bude spojitě vyplňovat prostor mezi horninovým materiálem. Zahřívání úložiště je navrženo na teplotu 380 – 400 °C. Zpětný odběr uloženého tepla je předpokládán do média proudícího tepelným výměníkem umístěným v úložišti.

Simulace výše uvedených procesů klade požadavky na vlastnosti simulačního softwaru, kdy obecně (bez definitivní koncepce technologického provedení úložiště) bude nutné zvládnout matematický popis:

- konduktivní tok tepla v tuhé matrici
- kolísání teploty v rozmezí 1 až 450 °C,
- proudění kapaliny tepelným výměníkem při zvýšených tlacích (pouze pro simulace zpětného odběru tepla),
- možnost simulace nelineární závislosti parametrů na teplotě.

Nejsou uvažovány teploty úložiště pod bodem mrazu, proto byla stanovena spodní hranice rozsahu simulovaných teplot na 1 °C. Horní mez (450 °C) poněkud přesahuje navrženou provozní teplotu vysokoteplotního zdroje. Pro úspěšné provedení modelových simulací je nezbytné, aby simulační software výše uvedené teplotní rozpětí pokrýval.

Uložení energie v podobě tepla je pouze prvním krokem před jejím dalším využitím. Ideálním stavem je zpětná přeměna tepla na elektrickou energii. V rámci předpokládaného technologického řešení bude tento proces řešen zpětným odvodem tepla horninového bloku do proudící tekutiny v tepelném výměníku. Odebírané teplo může být dále využito pro pohon

elektrického generátoru nebo dalším účelům. Schůdná technologická varianta při použití vody v tepelném výměníku pro zpětný odběr tepla by spočívala v jejím natlakování a ohřevu nad 100 °C. Při zpětné úpravě tlaku na normální atmosférický by byla vyvíjena pára pro pohon turbogenerátoru.

V ideálním případě by modelové řešení mělo umožnit simulovat proudění kapaliny uvnitř tepelného výměníku a přestup tepla mezi kapalinou, tepelným výměníkem a pevnou složkou úložiště. Numerické řešení turbulentního proudění spárovaného s transportem tepla kapalinou je velmi výpočetně náročné, proto bude pravděpodobně nutno přistoupit k aproximaci výpočtu přestupu tepla z úložiště bez nutnosti simulace proudící kapaliny. Pro energetickou bilanci a věrohodnou simulaci dění uvnitř pevné části úložiště bude takováto aproximace dostatečná.

V návaznosti na technické řešení úložiště bude veškerý transport tepla v termálním úložišti (až k tepelnému výměníku) probíhat výhradně pomocí procesu kondukce.

Modelový popis tepelného úložiště s kamenivem a prostory vyplněnými tepelně vodivou hmotou je vhodné realizovat na úrovni makroskopického měřítka. Míra diskretizace (rozdělení na výpočetní bloky) by měla umožnit simulaci rozložení:

- spojitých cest tepelně vodivé hmoty,
- vlastního horninového materiálu,
- míst ohřevu,
- míst s tepelným výměníkem.

Cílem modelování je simulace pozorovaných jevů a měření při fyzických experimentech. V počátcích prací byl testován software Processing SHEMAT (Clauser, 2003) a FEHM (Zyvolosky et al., 2006). Ani jeden ze softwarů nebyl shledán vhodným pro simulaci dějů probíhajících v tepelném úložišti a pro analýzu komplexní geometrie prototypu úložiště. Ke zpracování všech následujících prací byl použit software COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2012a) rozšířený o Heat Transfer Module (COMSOL, 2012b).

3. Cíle práce

Hlavním cílem práce je vyhodnocení vlivu přidání tepelně vodivé hmoty v designu vysokoteplotního tepelného úložiště z horninového materiálu. Tepelné úložiště obsahuje nový prvek tepelně vodivého geopolymeru. Jeho funkcí je zlepšení distribuce tepla v hlavním akumulačním horninovém materiálu úložiště. Dílčí cíle jsou shrnuty do následujících bodů:

1. Ověření stanovených parametrů kandidátních hornin na hlavní akumulační medium.
2. Navrhnutí testovací úlohy ověření funkce tepelně vodivé hmoty.
3. Vyhodnocení měření testovací úlohy.
4. Numerické vyhodnocení testovací úlohy.
5. Navrhnutí prototypu tepelného úložiště.
6. Navrhnutí instrumentace monitoringu prototypu tepelného úložiště.
7. Vyhodnocení monitoringu teplot prototypu tepelného úložiště.
8. Sestavení modelu prototypu tepelného úložiště.
9. Kalibrace modelu prototypu tepelného úložiště.
10. Vyhodnocení modelu prototypu tepelného úložiště.
11. Zhodnocení a extrapolace výsledků.

Ad 1) Stanovení tepelných parametrů probíhalo na standardizovaných zařízeních. Měřené hodnoty jsou konfrontovány s dostupnou literaturou. Měřené hodnoty tepelné vodivosti a kapacity budou ověřeny na numericky ověřených experimentech se vzorky v rozměru jednotek centimetrů.

Ad 2) Byl navržen experiment v měřítku desítek centimetrů. Pro experiment byl použit kandidátní vzorek horniny v kompozitu s tepelně vodivou hmotou. Experiment byl navržen tak, aby bylo možné vyhodnotit vliv aplikované tepelně vodivé hmoty.

Ad 3) Z měřených dat při experimentu budou stanoveny benefity tepelně vodivé hmoty, zvýšená možnost distribuce tepla v horninovém materiálu.

Ad 4) Experiment bude simulován softwarovými prostředky v co největším detailu. Cílem modelové simulace je zachytit šíření tepla a distribuci teplot v plném objemu experimentu.

Ad 5) Při návrhu prototypu tepelného úložiště bude kladen důraz na možnosti co nejpřesnější modelové reprezentace. Jako vstupní informace pro model je důležitá jednoznačnost modelové geometrie. Z tohoto důvodu se jeví jako nevhodné uspořádání použití sypaného materiálu s litou tepelně vodivou hmotou.

Ad 6) Při experimentu s cílem plnohodnotného vyhodnocení modelovými nástroji jsou důležité informace o rozložení teplot při zahřívání a uchováni tepla v tepelném úložišti. Proto je důležité rozmístění pozorovacích teploměrů při experimentu. Limitované množství pozorovacích bodů klade důraz na vhodné umístění těchto čidel.

Ad 7) Ze získaných dat teplot a dodané energie při experimentu je možné sestavit prvotní energetickou bilanci. Druhým krokem je příprava dat pro kalibraci modelu a minimalizaci odchylek modelových teplot od měřených hodnot teploty.

Ad 8) Reprezentace reálné geometrie úložiště si vyžaduje jisté zjednodušení. Volba úrovně zjednodušení je důležitá pro věrohodnost následujících výsledků. Tvorba modelu prototypu tepelného úložiště je podstatnou částí při reprezentaci pozorovaných dějů a důvěryhodnosti vyplývajících závěrů. Stanovení vhodných okrajových podmínek je také součástí.

Ad 9) Numerický model má reprezentovat průběh experimentu. Kalibrace modelu spočívá v nastavení parametrů uvažovaných v modelu a zajištění shody měření a modelových výsledků. Na základě dostupných znalostí bude pro vybrané materiály simulována funkční

závislost hodnoty tepelné vodivosti a kapacity na teplotě. Kalibrace modelu bude na úrovni měřených teplot a dodaného a odevzdaného tepla do úložiště.

Ad 10) Z modelu tepelného úložiště budou odečteny tepelné toky na jednotlivých stranách účastnících se procesů. Numerická simulace umožňuje kvantifikovat jevy i mimo možností měření běžných veličin. Takovou veličinou jsou například ztráty tepla do okolí. V běžném přístupu by bylo možné kvantifikovat ztráty jen sumárně za dobu jednoho cyklu úplného nabití a úplného vybití, nikoli průběžně, jak umožňuje numerické modelování.

Ad 11) Z numerické simulace je možné vyhodnotit celkový přínos tepelně vodivé hmoty. Simulace tepelného úložiště bude porovnána s modelem bez tepelně vodivé hmoty na identické geometrii. Dále budou srovnány výsledky s dalšími alternativními materiály z rešerše. Tyto závěry je pak možné extrapolovat do dalších časových nebo prostorových rozměrů.

4. Metodika matematického modelování tepelného transportu

Postup při aplikaci matematického modelování pro hodnocení tepelného transportu lze shrnout do několika základních bodů:

1) definice, popis zkoumaného problému, vymezení cílů - v tomto případě se jedná o řešení úloh souvisejícími s přenosem tepla v horninových vzorcích a v umělém prostředí tepelného úložiště,
2) volba konceptuálního přístupu a vhodného modelovacího nástroje,
3) analýza a syntéza vstupních modelových dat včetně materiálových charakteristik, analýza a syntéza kalibračních údajů a dat pro porovnání měřených a modelových výstupů,
4) sestavení modelové simulace - definování geometrie, okrajových podmínek, zadání transportních parametrů v podobě funkčních vztahů materiálových charakteristik v závislosti na teplotě,
5) numerický výpočet, kalibrace modelových parametrů včetně materiálových charakteristik pro získání ověřeného funkčního modelu,
6) zpracování a vizualizace výsledků, porovnání a zhodnocení rozdílů mezi měřenými a modelovými daty, diskuze získaných výsledků.

Obvyklým cílem modelování transportu tepla je získání informace o rozložení teplot a toků v modelové doméně na základě definovaných okrajových podmínek. Takové numerické modely jsou založeny na matematickém zápisu fyzikálních vztahů.

4.1 Rovnice transportu tepla

Základním předpisem pro veškerý teplený transport v programu COMSOL Multiphysics je první termodynamický zákon, obvykle popisován jako princip zachování energie. Jelikož vnitřní energie je nevhodná veličina ke kvantifikaci, měření a simulaci, bývá zákon přepsán ve smyslu teplot. Pro tekutinu je výsledná rovnice tepla následující (COMSOL, 2012b):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = \boldsymbol{Q} \qquad (18)$$

ρ … měrná hmotnost [kg·m^{-3}]

c_p … měrná tepelná kapacita [J·kg^{-1}.K^{-1}]

T … absolutní teplota [K]

$\boldsymbol{u}$ … rychlostní vektor proudění kapaliny [m·s^{-1}]

$\boldsymbol{q}$ … konduktivní tepelný tok [W·m^{-2}]

Q … zdroj tepla (jiného než z tření uvnitř kapaliny) [W·m^{-3}]

t … čas [s]

Kombinací rovnice (18) s Furierovovým zákonem (9) získáme předpis pro transport tepla v kapalině:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q \qquad (19)$$

pokud je rychlost **u** nulová, rovnice (19) popisuje čistě konduktivní transport tepla. Rovnici lze pak rozepsat do obecného diferenciálního tvaru (20) difuzní rovnice vedení tepla v kartezském systému souřadnic (Bergman et al., 2011). Je uvažováno homogenní medium bez účasti konvekce.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (20)$$

T … teplota [K]

$\dot{q}$ … propadový člen: tepelný tok na jednotkový objem [W·m^{-3}]

λ … součinitel tepelné vodivosti [W·m^{-1}K^{-1}]

ρ … hustota látky [kg·m^{-3}]

c_p … měrná tepelná kapacita [J·kg^{-1}·K^{-1}]

t … čas [s]

Řídící rovnice (20) je využita ve všech dále uvedených modelech pro simulaci šíření tepla v horninových vzorcích a v konglomerátu tepelně vodivého geopolymeru s horninovým materiálem. Pro předpověď teploty výstupní tekutiny v kapitole 5.7 je použita rovnice (19). Výpočet vektorového pole rychlostí ***u*** proudící kapaliny je popsán dále.

4.2 Okrajové podmínky transportu tepla

Okrajové podmínky při řešení diferenciálních rovnic popisují interakce mezi modelovanou oblastí a jejím okolím. Okrajové podmínky mají dopad na tepelnou bilanci a rozložení teplotního pole v modelové doméně.

- Okrajová podmínka 1. typu (Dirichletova) – specifikována je teplota:
  $\mathrm{T}(\mathrm{x_i}, \mathrm{t}) = \mathrm{T^R}(\mathrm{T})$ *(21)*
- Okrajová podmínka 2. typu (Neumannova) – specifikována je hodnota tepelného toku kolmo přes hranici:
  $\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x_i}} = \mathrm{q_T}(\mathrm{x_i}, \mathrm{t}) = \mathrm{f}(\mathrm{x_i}, \mathrm{t})$ *(22)*
  kde $f(x_i,t)$ je známá funkce nebo konstantní hodnota.

Okrajová podmínka prvního typu fixuje v místě zadání hodnotu řešení, zde konstantní teplotu T^R (bez ohledu na blízkou dotaci/odběr tepla). Tato okrajová podmínka může v modelu působit jako neomezený zdroj/propad tepla.

Okrajová podmínka druhého typu reprezentuje hranici s předepsaným tokem. Speciálním případem této okrajové podmínky je izolovaná hranice. V případě izolované hranice je složka toku kolmá k hranici rovna nule $f(x_i,t) = 0$.

V samotném programu COMSOL jsou tyto základní okrajové podmínky zahrnuty přímo nebo jak je naznačeno formou funkčního vztahu. Tepelný tok na okraji modelové domény je stanoven na základě aproximace simulovaných jevů.

4.2.1 Speciální případy konvekce

Jedním z nejběžněji simulovaných dějů je tzv. konvektivní ochlazování či zahřívání, tj. proces kdy je pevný povrch ochlazován okolní pohybující se tekutinou, např. vzduchem (viz kapitola 2.2.2.2). V principu je možné tento jev modelovat dvěma způsoby:

- rozšířením modelu o popis pohybující se tekutiny a přenosu tepla v ní;
- použitím součinitele konvekce k simulaci ochlazování na povrchu.

První způsob je správný, pokud potřebujeme přesné informace rozložení teplot tekutiny nebo její zpětnou interakci s povrchem. Výsledné numerické řešení je mnohem náročnější na výpočetní i paměťovou kapacitu. Druhý způsob je jednoduchý, méně přesný, ale efektivní. Konvektivní ochlazování je modelováno specifikací tepelného toku na stěně sousedící s tekutinou jako proporcionální teplotnímu rozdílu na fiktivní okrajové vrstvě tekutiny. Matematicky je tok popsán následovně

$$-\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q} = h(T_{ext} - T_s) \qquad (23)$$

n … normálový vektor k hranici domény [-]

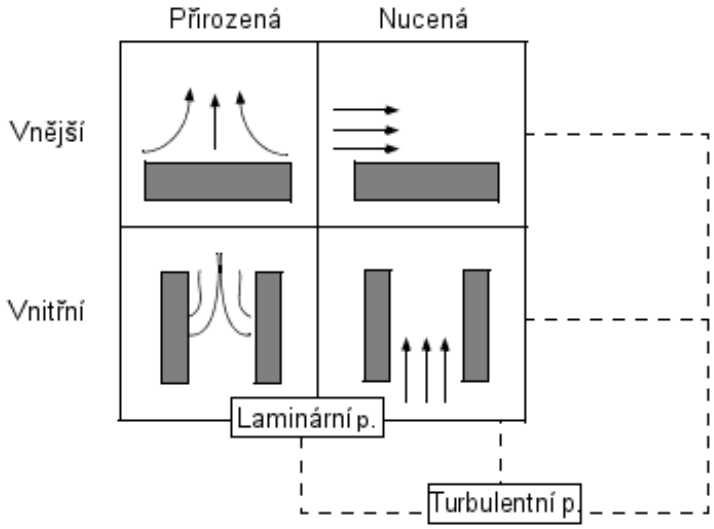
q ... tepelný tok na hranici [W·m^{-2}]

h … součinitel konvekce [W·m^{-2}K^{-1}], viz kapitola 2.2.2.1

T_{ext} … teplota okolní tekutiny vzdálené od hranice [K]

T_s … teplota povrchu [K]

Konvektivní ochlazování je děleno do čtyř hlavních kategorií, závisejících na podmínkách konvekce - přirozená nebo nucená; a na typu geometrie - interní nebo externí proudění. Tyto kombinace mohou nastat při laminárním nebo turbulentním proudění, což vede na osm typů konvektivního ochlazování, jak je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 9 Možné případy konvektivního ochlazování (COMSOL, 2012b)

Při nucené konvekci je proudění způsobeno vnější silou, např. ventilátorem, kompresorem nebo větrem, na rozdíl od přirozené konvekce, kterou způsobují vztlakové síly vznikající při rozdílných hustotách tekutiny v důsledku rozdílných teplot.

K určení hodnoty součinitele konvekce je užíváno velké množství empirických či teoretických korelací (Bergman et al., 2011). Uváděné rozpětí typických hodnot součinitele konvekce pro jednotlivé případy konvekce jsou uvedeny Tab. 12. V Heat Transfer Module se vychází z následujících bezrozměrných veličin používaných k popisům vlastnosti kapaliny, proudění a konvekce.

Nusseltovo číslo je poměr mezi konvektivním a induktivním přenosem tepla ve směru kolmém na hranici.

$$Nu_L(Re, Pr, Ra) = hL/\lambda \qquad (24)$$

Reynoldsovo číslo udává poměr setrvačných a třecích sil uvnitř kapaliny.

$$Re_L = \rho UL/\mu \quad (25)$$

Prandtlovo číslo je závislé pouze na vlastnostech tekutiny, je poměrem mezi mechanickou a tepelnou difuzí.

$$Pr = \mu c_p/\lambda \quad (26)$$

Rayleighovo číslo je spojováno s tokem způsobeným vztlakovými silami (pokud hodnota překročí kritickou mez, přenos tepla je primárně konvektivní).

$$Ra = GrPr = \rho^2 g\beta c_p \Delta T L^3/(\mu\lambda) \quad (27)$$

Při přirozené konvekci je dále používáno Grashofovo číslo, které udává poměr mezi vztlakovými a třecími silami.

kde

h … součinitel konvekce [W·m^{-2}K^{-1}]

L … charakteristická délka [m]

ΔT … rozdíl teplot mezi povrchem a tekutinou [K]

g … gravitační zrychlení [m·s^{-2}]

λ … součinitel tepelné vodivosti tekutiny [W·m^{-1}K^{-1}]

ρ … měrná hmotnost tekutiny [kg.m^{-3}]

U … průměrná rychlost proudění [m·s^{-1}]

μ … dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

c_p … měrná tepelná kapacita tekutiny [J·kg^{-1}K^{-1}]

β … tepelná roztažnost [K^{-1}]

V modelu lze zadat přímo hodnotu součinitele konvekce nebo použít jednu z nabízených aproximací. V modelu tepelného úložiště byly použity rovnice (28) pro aproximaci přestupu tepla uvnitř horizontální trubice a (29) na stanovení Rayleighova čísla Ra_D pro proudění uvnitř trubice o průměru *D*. Pro přesné informace o způsobu kvantifikace součinitele konvekce pro ostaní typy lze nahlédnout do Heat Transfer Module User's Guide, strana 68 a dále (COMSOL, 2012b).

$$h = \frac{\lambda}{H}\frac{1}{128}Ra_D \quad (28)$$

h … součinitel konvekce [W·m^{-2}K^{-1}]

λ … součinitel tepelné vodivosti tekutiny [W·m^{-1}K^{-1}]

H ... délka trubice [m]

$$\mathrm{Ra_D} = \frac{g\alpha_p\rho^2 c_p|T-T_{ext}|D^3}{\lambda\mu} \quad (29)$$

Tab. 12 Typické hodnoty součinitele konvekce (Bergman et al., 2011)

Proces	***h*** **[W·m^{-2}K^{-1}]**
volná konvekce	
plyny	2 – 25
kapaliny	50 – 1000
nucená konvekce	
plyny	25 – 250
kapaliny	100 – 20 000
konvekce se změnou skupenství	2500 – 100 000

4.2.2 Speciální případy radiace

Další specifickou okrajovou podmínkou v modelu COMSOL je okrajová podmínka vyzařování aproximující radiaci z plochy do okolí a absorpci příchozí radiace z okolí. Funkce *Surface-to-Ambient Radiation* je realizována následující rovnicí:

$$q = \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T_s^4) \qquad (30)$$

q … intenzita záření okrajové plochy [W·m^{-2}]

ε … koeficient emisivity [-] $0 \leq \varepsilon \leq 1$

σ … Stefan-Boltzmannova konstanta [$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W·m^{-2}K^{-4}]

T_{amb} … absolutní teplota okolí [K]

T_s … absolutní teplota povrchu [K]

Pokud je těleso uzavřeno v jiném tělese, za T_{amb} lze uvažovat teplotu tohoto tělesa. Koeficient emisivity lze exaktně zadat či použít hodnotu z databáze materiálů.

4.3 Rovnice proudění tekutiny

Fyzikální modul Heat Transfer Module obsahuje řídící rovnice a okrajové podmínky pro modelování volně se pohybující tekutiny. K výpočtu rychlostního a tlakového pole je použita Navier-Stokesova rovnice (31) a rovnice kontinuity (32). Uvedené rovnice platí pro stacionární simulaci. Pro řešení Navier-Stokesovi rovnice je použit model *k-ε low Re* (COMSOL, 2012b). Může být uvažována stlačitelnost tekutiny, ale maximální rychlost proudění je omezena na 0.3 Machova čísla.

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u} = \nabla\cdot\left[-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla\boldsymbol{u} + (\nabla\boldsymbol{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\boldsymbol{I}\right] + F \qquad (31)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u}) = 0 \qquad (32)$$

ρ … měrná hmotnost tekutiny [kg·m^{-3}]

$\boldsymbol{u}$ … rychlostní vektor [m·s^{-1}]

p … tlak [Pa]

$\boldsymbol{I}$ … jednotková matice 3×3;

μ … dynamická viskozita tekutiny [Pa·s]

F … vnější síly [N]

Speciální případ laminárního proudění je tzv. Stokesovo proudění, při kterém jsou zanedbány setrvačné síly.

4.3.1 Okrajové podmínky proudění tekutiny

Okrajová podmínka Wall v základu reprezentuje nepropustnou hranici pro pohybující se tekutinu, ale program COMSOL disponuje více variantami této hranice (COMSOL, 2012b).

- *No Slip* je základní varianta okrajové podmínky představující nepohyblivou pevnou stěnu. Podmínka předepisuje nulovou rychlost proudění na hranici, $\mathbf{u} = 0$ m·s^{-1}.
- *Slip* předpokládá zanedbání efektu působení viskozity, což vede k absenci mezní vrstvy proudění na této hranici.
- *Sliding Wall* je vhodná k simulaci stěny, jejíž chování odpovídá dopravnímu pásu – povrch se pohybuje v tečném směru zadanou rychlostí [m·s^{-1}]. V modelu se stěna nemusí fyzicky pohybovat.
- *Moving Wall* reprezentuje pohybující se stěnu zadanou rychlostí [m·s^{-1}] ve směru kolmém k povrchu. Tato varianta okrajové podmínky nezpůsobí fyzický pohyb hranice, ale rychlost tekutiny odpovídá rychlosti pohybu stěny. Pokud je zapotřebí simulovat reálně pohybující se stěnu, je nutné přidat rozšíření Moving Mesh.
- *Leaking Wall* představuje perforovanou stěnu kterou do nebo z modelu prosakuje tekutina zadanou rychlostí [m·s^{-1}].

V modelu zahrnujícím simulaci proudění teplonosné tekutiny je použita okrajová podmínka „*No Slip boundary*“.

Okrajová podmínka Inlet a Outlet zabezpečuje vstup, resp. výstup tekutiny do a z modelu. Z matematického hlediska se jedná o totožné podmínky jen s opačným znaménkem, tudíž není způsob jak zabránit výstupu tekutiny z modelové domény skrze okrajovou podmínku vstupu, pokud nastane adekvátní situace. Tyto okrajové podmínky jsou zadány jedním, ze čtyř způsobů.

- *Velocity* – rychlost toku [m·s^{-1}] je zadána kolmo ke hranici nebo jako vektor.
- *Pressure, No Viscous Stress* – Na hranici nejsou simulovány viskózní síly a zároveň je zde aplikována Dirichletova tlaková okrajová podmínka zadaného tlaku [Pa].
  V závislosti na tlakových poměrech v modelu může touto stěnou kapalina vstupovat i vystupovat nezávisle, zda jde o funkci Inlet nebo Oulet.
- *Normal Stress* - Normálové napětí je analogická veličina tlaku, je definována jako síla působící kolmo na hranici [N·m^{-2}].
- *Laminar Inflow* – Laminární přítok může být nadefinován třemi způsoby
  - průměrnou rychlostí [m.s^{-1}] a délkou fiktivního kanálu, na kterém je nasimulován laminární profil rychlostí,
  - průtokem [m^{3}s^{-1}], délkou a průměrem vstupního kanálu [m],
  - okrajovým tlakem [Pa] a délkou fiktivního kanálu.

4.4 Párování řídících rovnic

Hlavní výhodou COMSOL Multiphysics je možnost definovat tzv. multifyzikální úlohy ve kterých je spárováno dvě a více fyzikálních rozhraní. *Non-Isothermal Flow* reprezentuje párování transportu tepla prouděním kapaliny do jedné simulace, ve které jsou všechny proměnné obou modelů (tlak, rychlostní pole proudění a teplota) počítány současně. Tento systém je vhodný v případech, kdy je modelováno pomalé proudění a důležitou roli hraje i přenos energie. Propojení modelů zde hraje důležitou roli a umožňuje simulovat přirozenou konvekci, spárováním teploty tekutiny s její hustotou. V takovémto modelu jsou závislé proměnné tlak, teplota a rychlostní pole. (COMSOL, 2012b)

V této práci je použito jen jednosměrné spárování, kdy je samostatně vypočteno pole rychlostí kapaliny a to je vstupující proměnou pro transport tepla.

4.4.1 Multifyzikální okrajová podmínka otevřené hranice

Okrajová podmínka *Open Boundary* popisuje hranici reprezentující propojení s velkým, resp. neomezeným objemem tekutiny. Na této hranici je tekutině umožněno vstupovat i opouštět výpočetní doménu modelu v závislosti na tlakových podmínkách. Vlastností okrajové podmínky je normálové napětí [$N \cdot m^{-2}$] na hranici a teplota [K] tekutiny.

4.5 Tvorba modelové geometrie

COMSOL Multiphysics poskytuje mnoho možností jak vytvářet modelové geometrie v jedno-, dvou- i třírozměrném prostoru. K reprezentaci reálné geometrie je možno použít tzv. modelování těles a modelování hranic (COMSOL, 2012a).

Pro vkládání geometrie používá COMSOL způsob nazvaný „geometry sequence“. Při modelování těles (solid modeling) je geometrie tvořena za pomoci boolovských operací, sjednocení, průniku nebo rozdílu prostorových těles. Výsledkem operací je tzv. „*composite solid object*“. Druhou možností definice těles je pomocí jejich stěn, mnoho základních geometrických tvarů je již definováno. Oba způsoby je možné kombinovat. V trojrozměrných modelech je také možno použít pracovní rovinu, ze které následně vytažením či rotací vznikají složitější trojrozměrná tělesa.

Při reprezentaci reálné geometrie je vhodné se vyhnout malým detailům, mezerám, dírám a singularitám, které při analýze metodou konečných prvků mohou vést na velký počet elementů nebo dokonce znemožní tvorbu konečné výpočetní sítě.

Pokud je možno, je vhodné k minimalizaci rozsahu geometrie využít funkci symetrie, kterou COMSOL nabízí. Například rotačně symetrickou úlohu často stačí reprezentovat dvourozměrným osově symetrickým modelem, při osových souměrnostech stačí modelovat polovinu či čtvrtinu reálné úlohy. Některé méně významné části úlohy lze nahradit vhodnou okrajovou podmínkou. Všechna výše uvedená doporučení snižují náročnost na výpočetní a paměťovou kapacitu.

Další možností vkládání geometrie do modelů je import z nejběžnějších CAD formátů, například VRML, DXF, nebo STL. V rozšíření o CAD Import Module je možné živé propojení s programy SolidWorks, CATIA, Pro/Engineer nebo Invertor.

Veškeré dále popisované modely byly vytvořeny pomocí boolovských operací ze základních trojrozměrných geometrických těles a dvourozměrných ploch.

4.6 Peáce s materiály

Program COMSOL Multiphysics pracuje s databází materiálů, pro které se definují materiálově-fyzikální vlastnosti potřebné pro danou fyzikální úlohu. Poté je materiál přiřazen k požadované geometrické entitě.

Vlastnosti látek nemusí být zadány konstantní hodnotou, ale mohou být závislé na jiné proměnné. Tak může být např. definována závislost hodnoty tepelné vodivosti na teplotě materiálu. Závislost může být vyjádřena ve formě předepsané funkce nebo tabulky, jejíž hodnoty mohou být interpolovány i extrapolovány. Hodnoty termofyzkálních vlastností hlavních simulovaných materiálů (granit a TVG) byly zadány tabulkově s interpolací kubickou funkcí.

Program obsahuje databázi základních materiálů a jejich fyzikálních vlastností. V dále popsaných pracech byly použity materiálové vlastnosti z databíze COMSOL pro ocel a vzduch.

4.7 Síťování geometrie

Při numerickém řešení diferenciálních problémů je třeba řešenou úlohu rozdělit na výpočetní uzly, pro které jsou sestaveny řešené rovnice. V COMSOL Multiphysics je používána metoda konečných prvků (COMSOL, 2012a).

Při metodě konečných prvků je výpočetní doména rozdělena nepravidelnou sítí. Nepravidelná síť umožňuje lépe reprezentovat složitější tvary při obdobných výpočetních nárocích. Plochy bývají rozloženy na trojúhelníky nebo čtyřúhelníky, v objemech se používají čtyřstěny, šestistěny, hranoly nebo pyramidy.

Kvalitu sítě v programu COMSOL Multiphysics je možné kontrolovat na několika úrovních. Program umožňuje automaticky nastavit parametry sítě na základě použitých fyzikálních balíčků, ručně nastavit kvalitu sítě od hrubé po extrémně jemnou nebo je možno nadefinovat přímo maximální a minimální velikosti elementů, faktor růstu sousedních elementů a kvalitu reprezentovaných křivek. Kvalitu sítě lze definovat zvlášť pro různé části geometrie, tak je možno síť zahustit např. v oblasti proudění tekutiny a naopak v okrajových částech, kde jsou změny minimální, použít síť méně hustou. Při nedostatečně husté síti může klesat přesnost řešení simulací.

5. Experimentální výsledky a modelová analýza

Metodika prací je přizpůsobena dosažení závěrečného cíle - zpracování simulací laboratorního modelu tepelného úložiště. Postup prací odpovídá principům „od jednoduchého ke komplexnímu“ ve vztahu ke složitosti vyhřívaných soustav a „od malého k rozměrnému“ ve vztahu k velikosti simulovaných soustav.

Uplatnění uvedených principů je patrné i v následujícím přehledu prací spjatých s vytyčeným cílem:

- modelová analýza termodynamických dějů v horninových vzorcích s rozměry do 10 cm, potenciálních materiálů tepelného úložiště; ověření naměřených tepelných charakteristik a jejich interpretace pro projektovaný rozsah teplot 10 - 400°C;
- modelové vyhodnocení zlepšení přenosu tepla v horninovém vzorku s umělé dutiny pro geometrii válečku s rozměry 50×100 mm; modelové vyhodnocení změn přenosu tepla ve válečku s umělou dutinou po aplikaci tepelně vodivé hmoty,
- modelové vyhodnocení vlivu výplně umělé spáry na termodynamické chování vzorku granitového bloku s rozměry (d×š×v) 800×400×300 mm
- modelová předpověď termodynamického chování prototypu umělého úložiště objemu 0.5 m^3; výběr geometrie, podpora instrumentace experimentu;
- modelové vyhodnocení měřených dat pro zkonstruovaný prototyp tepelného úložiště; modelové posouzení účinnosti technologie;
- modelová predikce chování úložiště „průmyslových rozměrů“.

Jednotlivé okruhy prací jsou zdokumentovány v následujících kapitolách.

5.1 Simulace zahřívání vybraných vzorků materiálů za účelem analýzy měřených dat

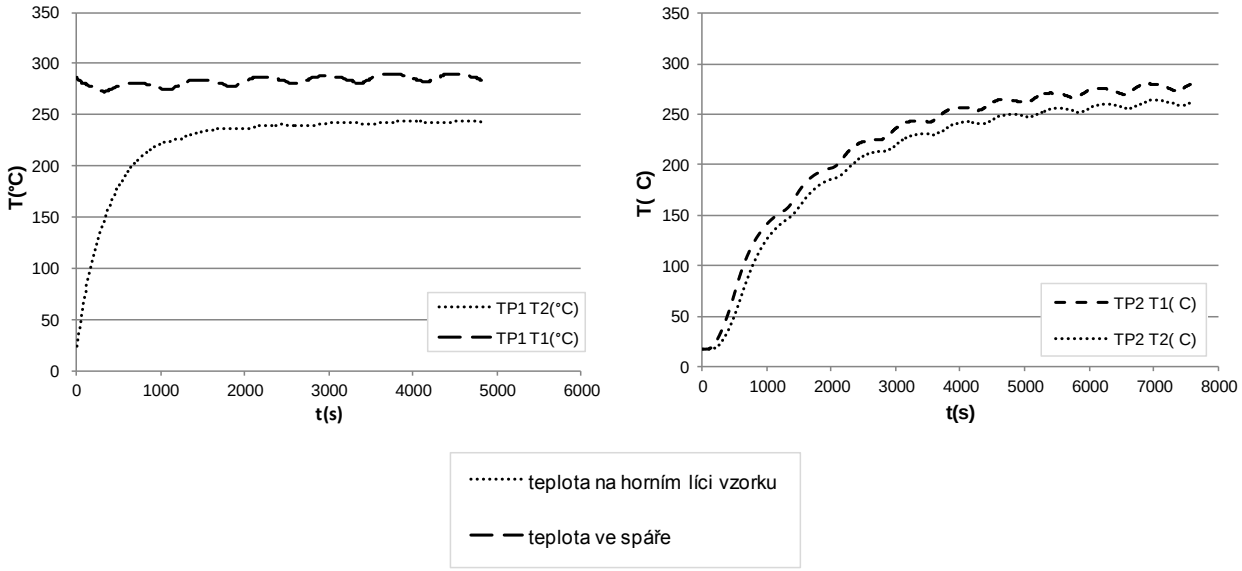
Modelové práce počaly analýzou měřených dat pořízených na experimentální soustavě pro zahřívání kandidátních vzorků tepelně vodivé hmoty. Cílem prací bylo sestavit aparaturu a metodiku na identifikaci tepelné vodivosti. Na pracovišti TUL bylo prohřívání vzorků používáno k rozpoznání „dobré“ nebo „špatné“ tepelné vodivosti. Modelové vyhodnocení zaznamenaných experimentů mělo upřesnit rozmezí hodnot tepelné vodivosti a kapacity. Pro srovnání průběhů ohřívání vzorků byl v laboratoři používán hliníkový vzorek

Původní experimentální soustava pro vyhřívání vzorků (viz Obr. 10a) sestávala z odporového vařiče, hliníkového hranolu (s funkcí vyrovnání kolísání teploty plotýnky odporového vařiče), spáry mezi hliníkovým hranolem a vzorkem (případně její výplní), vzorkem a tepelné izolace. Analyzován byl průběh teplot při rozdílných počátečních teplotách hliníkového hranolu. Pro kalibraci modelu byl použit vzorek hliníku o známých termofyzikálních parametrech. Zdroj tepla v podobě odporového vařiče byl posléze nahrazen ohřevem indukčním (Obr. 10b), který nevykazoval takové výkyvy teplot při ohřevu vzorků.

Obr. 10 Experimentální soustava – vlevo a) odporová plotýnka; vpravo b) indukční vařič

Analýza vlivu předehřátí hliníkového hranolu byla provedena na starší aparatuře v sestavě vyobrazené na Obr. 10a, za použití měděné pasty ve spáře a okolní izolace z materiálu Silca 250KM. Při experimentu byl hliníkový vzorek umístěn na hliníkovém hranolu o rozměrech (š×h×v) 40×40×130 mm, vyhřívaný vzorek měl rozměry 20×23×40 mm. Izolace vzorku byla zajišťována navrstvenými deskami o celkových rozměrech 80×80×80 mm (na Obr. 10a je vyfotografována pouze izolace hranolu).

Získaná data jsou vynesena v grafech na Obr. 11. V první variantě (TP1) byl hliníkový hranol předehřán na maximální dosažitelnou teplotu a až poté byl přidán vyhřívaný vzorek. Ve druhé variantě (TP2) byl hranol zahříván souběžně se vzorkem. Při zahřívání byla teplota monitorována dvěma čidly. První čidlo bylo umístěno ve spáře mezi hranolem a vzorkem (*T1*) a druhé na horním líci vzorku (*T2*). Kolísavý charakter průběhu teploty *T1* je způsoben odporovou plotýnkou, u které je cyklickým spínáním regulována její teplota.

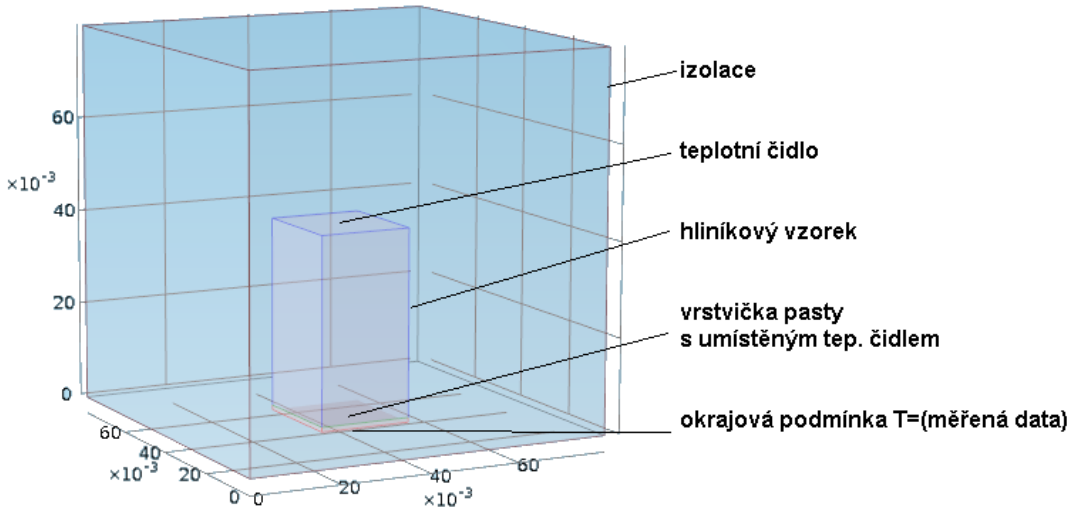


Obr. 11 Naměřená data teploty; a) vlevo experiment s předehřátím (TP1), b) vpravo bez předehřátí (TP2), data pořízena odporovým vařičem.

Již z vynesených dat je patrné rozdílné chování soustavy při obou experimentech. Při stejné geometrii a identickém vzorku byly dosaženy rozdílné ustálené teploty na svrchním líci vzorku.

Po dosažení ustáleného stavu by měl být rozdíl teploty mezi horním a spodním čidlem stejný u obou experimentů. Rozdíl teplot na hliníkovém vzorku při experimentu TP1 s předehřátím byl 43 °C, ve variantě TP2 bez předehřátí 18 °C. I z tohoto důvodu byla experimentální soustava shledána jako nevyhovující a bylo navrženo její zjednodušení.

Z dostupných dat nebylo možné určit množství dodané energie ani přesnou teplotu vařiče, proto bylo zvoleno modelově reprezentovat pouze část vyhřívané soustavy (viz Obr. 12). V simulaci byly zahrnuty pouze: vzorek, měděná pasta ve spáře a okolní izolace. Na spodní straně vrstvy měděné pasty byla definována okrajová podmínka prvního typu (21) s průběhem teploty odpovídajícím naměřeným datům (*T1*). Na povrchu izolace byla zadána okrajová podmínka radiace, teplota laboratoře byla stanovena na 20 °C. Vzhledem ke znalosti tepelných vlastností použitých materiálů (viz Tab. 13) a rozměrů vzorku i izolace zůstaly dvě neznámé hodnoty. Subjektem kalibrace modelu se stala mocnost vrstvy měděné pasty (resp. celkového odporu na přestupu mezi vzorkem a plotnou) a parametr emisivity povrchu tepelné izolace. Optimalizačním kriteriem byla shoda měřené teploty na horním líci vzorku (*T2*) s modelovou teplotou ve stejném bodě. Výsledný model s rozměry 80×80×80 mm byl reprezentován 131172 objemovými elementy.

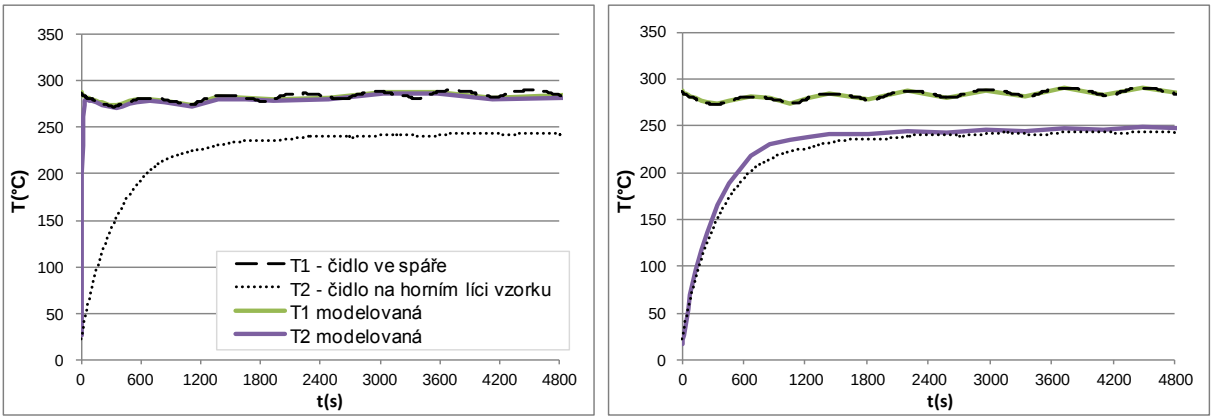


Obr. 12 Geometrie modelu analýzy rozdílných okrajových podmínek

Tab. 13 Vlastnosti simulovaných materiálů (odhadnuto)*

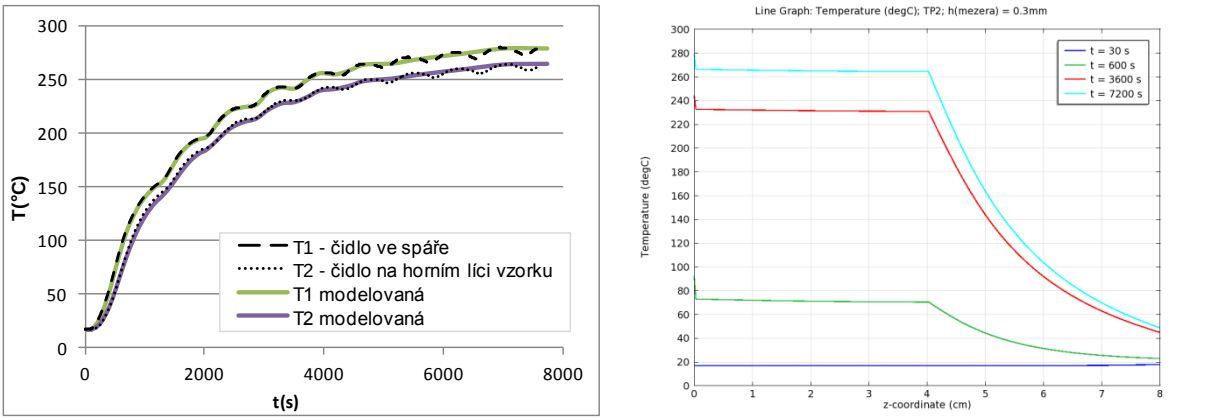
materiál	součinitel tepelné vodivosti	specifická tepelná kapacita	hustota
	λ [W·m^{-1}K^{-1}]	c_p [J·kg^{-1}K^{-1}]	ρ [kg·m^{-3}]
hliník	160	900	2700
izolace	0.1	200*	250
měděná pasta	0.3	500*	1200*

V úvodních simulacích byl vliv spáry mezi vzorkem a hranolem zanedbán. Důsledkem byl nesoulad průběhu měřené a modelové teploty na horním líci vzorku (Obr. 13a). Vysoký součinitel tepelné vodivosti hliníku (při neexistenci odporu na styčné spáře) způsobil téměř okamžité vyrovnání teploty v celém objemu vzorku. Zvolený typ okrajové podmínky fungoval jako neomezený zdroj tepla. Náběh teploty na horním líci vzorku je extrémně rychlý a dosažená teplota odpovídá teplotě ve spáře. Na Obr. 13b je zobrazen výsledek nakalibrovaného modelu. Lze konstatovat, že hodnota emisivity izolace definuje maximální dosaženou teplotu a výška spáry řídí sklon náběhu teploty. Výsledná emisivita byla odladěna hodnotou ε = 0.9 a výška spáry h = 1 mm. Spáru lze také popsat jako rovinný prvek s odporem $R = h/\lambda$, který je definován jako podíl výšky spáry h a její vodivosti λ. V tomto případě je hodnota odporu R = 0.0033 K·m^{2}W^{-1}.



Obr. 13 Výsledek simulace TP1 (s předehřátím hranolu): a) bez zahrnutí vlivu spáry, b) se spárou h = 1 mm.

Při stejné geometrii a hodnotách modelových parametrů byla vypočtena i druhá simulace odpovídající poměrům bez předehřátí. Na Obr. 14a jsou porovnány měřené i modelové průběhy teplot v čase, jejich shoda je dostatečná. Do modelu byla zadána již kalibrovaná hodnota koeficientu emisivity ε = 0.9. Výsledná výška spáry pro tuto simulaci byla stanovena kalibrací na h = 0.3 mm (R = 001 K·m^{2}W^{-1}). Na Obr. 14b je vynesen průběh modelové teploty podél osy vzorku pro časy t = 30, 600, 3600 a 7200 sekund. Na grafu jsou patrny dva zlomové body, na pozici z = 0.3 cm se vyskytuje přechod mezi měděnou pastou a hliníkovým vzorkem a na z = 4 cm je přechod mezi vzorkem a okolní izolací.



Obr. 14 Výsledek simulace TP2; bez počátečního předehřátí hranolu. Modelové teploty a) v porovnání s měřenými daty, b) v řezu podél svislé osy.

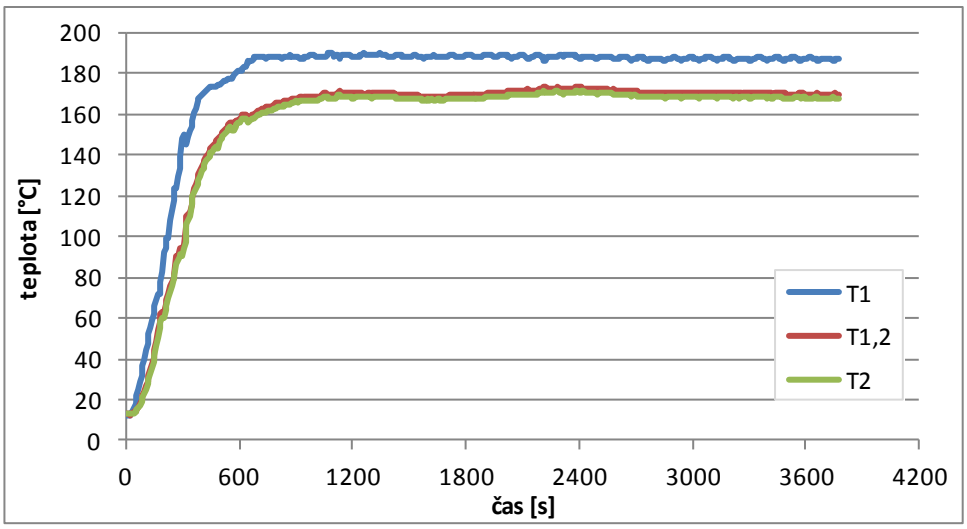
Příčiny rozdílů v trendu měřených teplot (Obr. 11) jsou vysvětlovány dvěma možnými faktory:

- teploty měřené čidly neodpovídají skutečné bodové teplotě vzorku, ale jsou jakýmsi průměrem teploty styčných ploch; uplatňuje se nahodilá chyba měření v závislosti detailu umístění čidla,
- velký význam má mocnost a způsob vyplnění spáry mezi vzorkem a hranolem; při užití výplně spáry s nižší vodivostí než má vzorek je tato výplň limitující pro tepelný tok v celé soustavě.

Design nové aparatury s indukčním vařičem (viz Obr. 10b) byl opětovně testován na hliníkovém vzorku. Celá aparatura se v této konfiguraci skládala pouze z indukčního vařiče a ocelového bloku, na který byl umístěn vzorek. Využitím indukce byla eliminována jedna styčná spára mezi plotnou a hranolem.

Ocelový blok měl tvar komolého kužele s dolní podstavou o průměru 80 mm a horní podstavou 63 mm. U obou podstav je šikmá strana kužele zarovnána na válcovou plochu o výšce 3 mm, celý blok je vysoký 60 mm. Povrch bloku byl opracován do hladka.

Za účelem stanovení vlivu styčné spáry bylo přidáno jedno teplotní čidlo, které bylo umístěno do vyvrtaného otvoru pod horní podstavou ohřívaného ocelového bloku. Toto čidlo je dále v textu označováno jako *T1*. Čidlo označené *T1,2* bylo umístěno do hliníkového vzorku cca 1 mm nad spodní podstavu, čidlo *T2* je opět na horním líci vzorku.



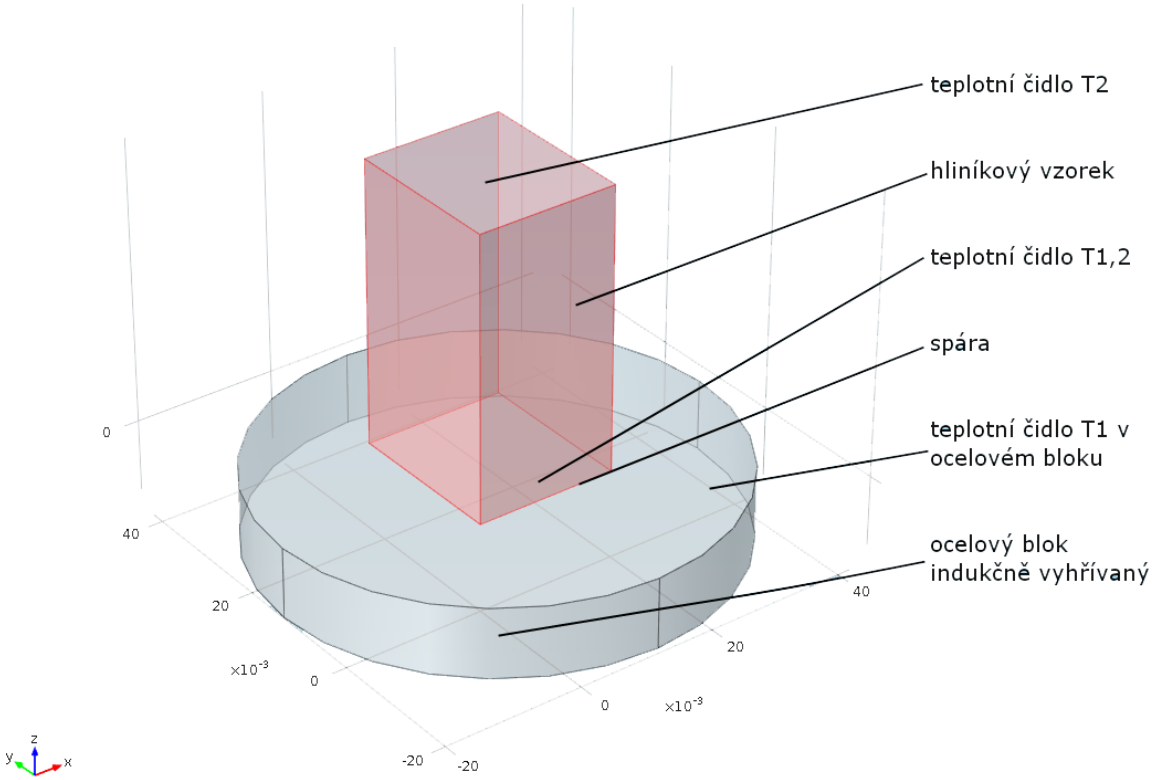
Obr. 15 Měřená data (Nosek et al., 2012) v soustavě s indukčním ohřevem

Na Obr. 15 jsou vynesené teploty zaznamenané při ohřevu hliníkového vzorku s indukčním ohřevem. Po 10 až 20 minutách dojde k ustálení teplot a jejich rozdílů na jednotlivých čidlech. Rozdíl teplot mezi čidlem *T1* umístěným v ocelovém bloku a čidlem nad spárou vychází v průměru na 17 °C, rozdíl teplot mezi spárou a svrchním lícem hliníkového hranolu je v průměru pouze 1.9 °C. Toto měření potvrzuje předpoklad, že skoková změna teploty byla způsobena tepelným odporem ve spáře.

Modelovaná geometrie vyhřívané soustavy je vyobrazena na Obr. 16. Na spodní straně ocelového bloku byla simulována měřená teplota T1, na povrchu hliníkového vzorku byl simulován přestup tepla formou radiace do okolí o teplotě 20 °C. Parametr emisivity byl opět předmětem kalibrace, jeho počáteční hodnota byla stanovena na 0.3. Použití materiálů o známých vlastnostech (viz Tab. 14) opět umožnilo v modelu nakalibrovat neznámé parametry emisivity a tepelnou vodivost spáry, která v tomto experimentu nebyla ošetřena. Při kalibraci bylo z počátku uvažováno rozevření h = 0.1 mm s tepelnou vodivostí odpovídající vzduchu λ = 0.025 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$., což odpovídá odporu R = 0.004 $K \cdot m^2W^{-1}$.

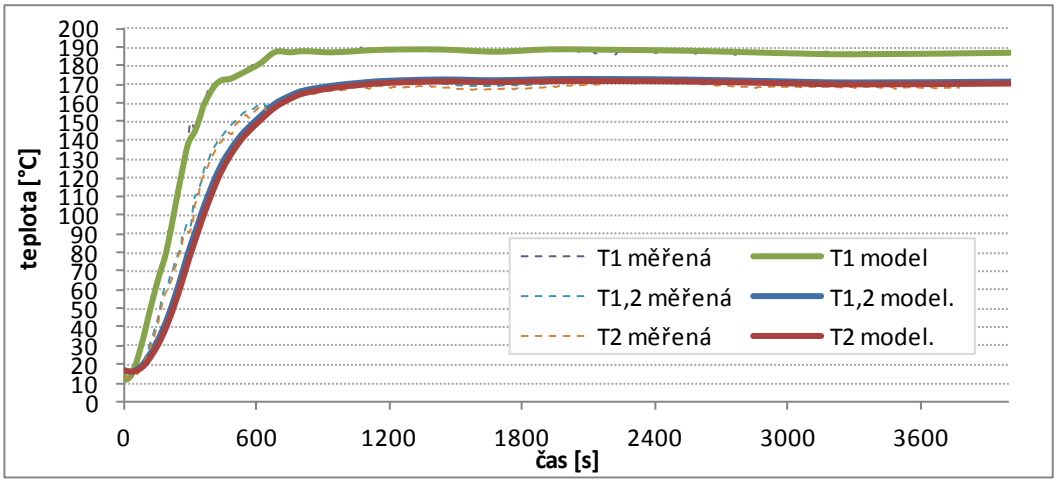
Tab. 14 Tabulka tepelných konstant užitých v modelu (odhadnuto)*

materiál	součinitel tepelné vodivosti	specifická tepelná kapacita	hustota
	λ [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]	c_p [$J \cdot kg^{-1}K^{-1}$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]
hliník	160	900	2700
ocel	76.2	440	2870
měděná pasta	0.3	500*	1200*



Obr. 16 Modelová reprezentace úvodních měření hliníkového hranolu s indukčním ohřevem

Kalibrace byla provedena manuálně na podkladě znalosti odpovědi modelu na změnu vstupních parametrů. Cílem kalibrace bylo dosáhnout co nejlepší shodu průběhu měřených a modelových teplot. Zjednodušeně platí, že hodnota tepelné vodivosti ve spáře ovlivňuje sklon narůstající teploty v místě umístění čidel *T1,2* a *T2* a hodnota emisivity řídí maximální dosaženou teplotu na čidle *T2.* Tato závislost není přímá, ale změna jednoho parametru ovlivňuje celý systém.

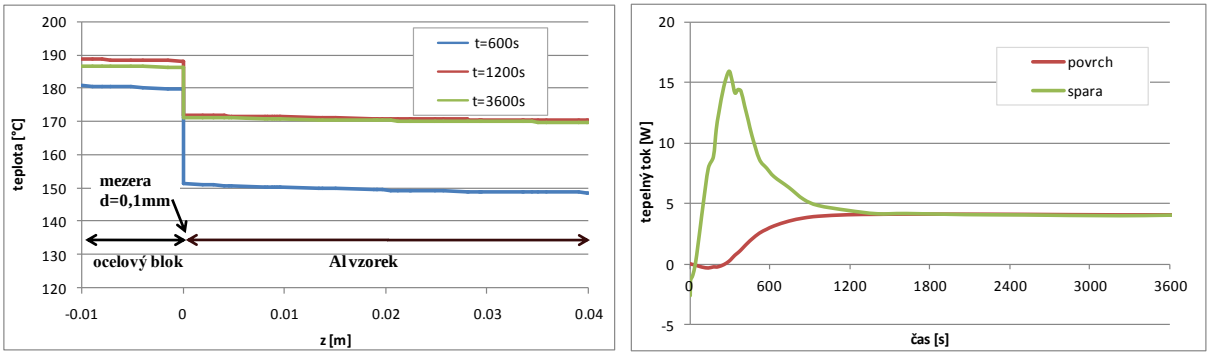


Obr. 17 Porovnání měřených a simulovaných teplot při ohřevu vzorku

Porovnání modelových a měřených teplot je vyneseno na Obr. 17. Výsledná hodnota parametru emisivity hliníkového hranolu byla určena na ε = 0.7, součinitel tepelné vodivosti spáry byl stanoven λ = 0.07 $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ (R = 0.00142 $K \cdot m^2W^{-1}$) Parametr emisivity v tomto případě nelze chápat v jeho fyzikální podstatě, ale spíše jako obecný koeficient regulující

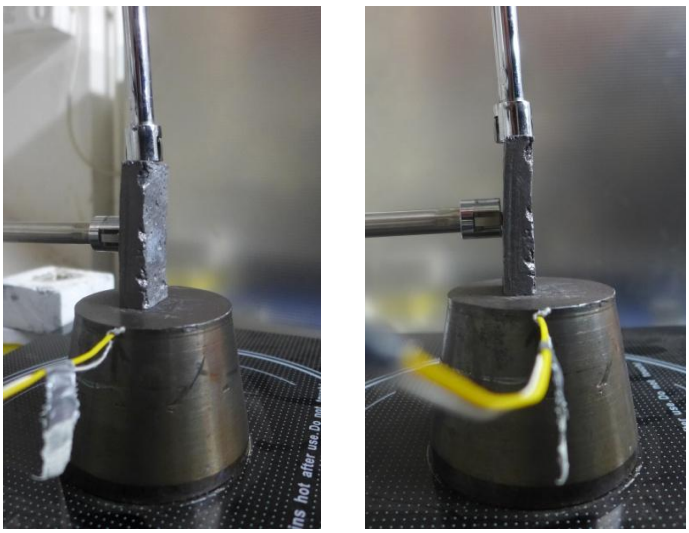
rychlost odběru tepla okolím. Stejně tak součinitel tepelné vodivosti spáry reprezentuje nejen proces kondukce ve spáře, ale i přenos energie vyzařováním.

V grafu na Obr. 18a je vynesen průběh teploty podél svislé osy vzorku. Po ustálení modelových teplot (viz Obr. 18 „t = 1200 s“) je patrný měřený i modelový skokový pokles 17 °C na spáře a dvoustupňový rozdíl teplot mezi podstavami hliníkového vzorku. Na Obr. 18b je kvantifikován tok tepla v ploše spáry a na povrchu hliníkového vzorku během měření. Je patrné, že při ustálení dojde k vyrovnání vstupujícího a vystupujícího tepla do vzorku. Maximální dosažený výkon vařiče potřebný k udržení simulovaných teplot je 15.94 W. Pokles tepelného toku na povrchu vzorku do záporných hodnot je způsoben zadáním jeho počáteční teploty nižší než okolí, hodnoty jsou v řádu desetin wattu. Hodnota ustáleného toku je 4.09 W.



Obr. 18 a) Průběh teplot podél řezu hliníkovým vzorkem b) tepelný tok v čase.

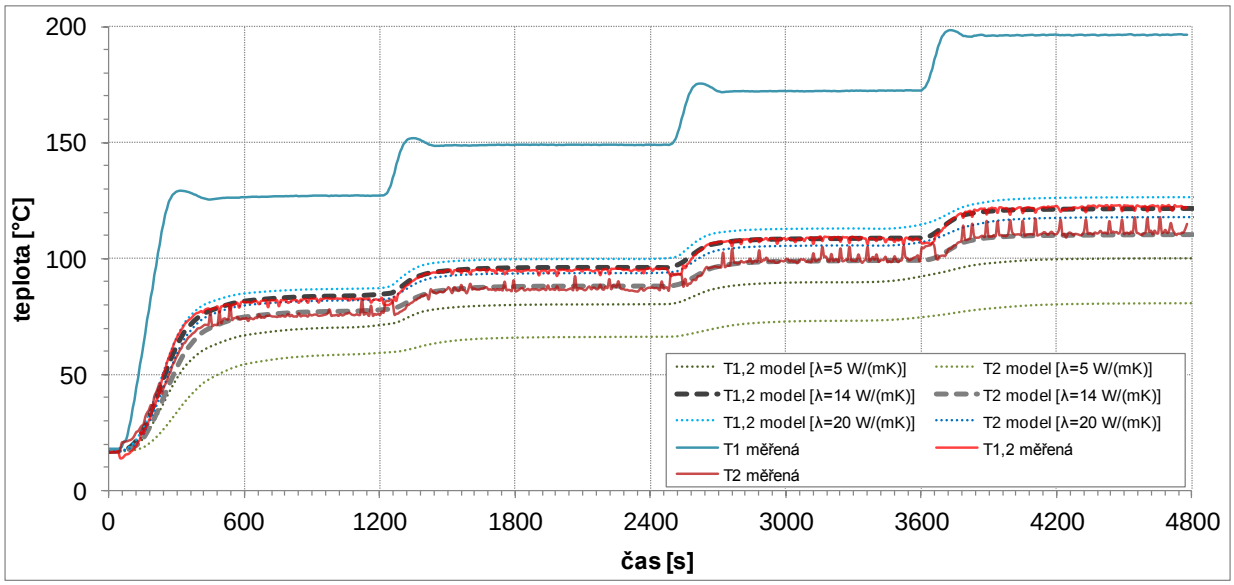
Pomocí modelových simulací, po úpravě experimentální soustavy a po doplnění teplotního čidla byl potvrzen předpoklad skokové změny teploty na spáře. Použití hliníku o známých tepelných konstantách umožnilo v kombinaci s informací povrchové teploty kvantifikovat tepelný tok procházející soustavou. Nicméně při experimentech se vzorky bez známých parametrů se jevily možnosti kalibrace parametrů v příliš širokém spektru řešení. Proto byla navržena vícestupňová zahřívací zkouška, která umožňuje lépe separovat vlivy spáry, neznámé emisivity, tepelné vodivosti a kapacity vzorku. Vícestupňová zkouška probíhá za stejných podmínek jako výše zmíněné experimenty, jen je rozdílný průběh zahřívání. Regulované zahřívání bylo umožněnou zpětnou vazbou mezi měřenou teplotou *T1* a příkonem indukčního ohřevu. Při vícestupňové zkoušce je teplota udržována po stanovenou dobu (nejlépe tak, aby došlo k ustálení teploty *T2*) a pak skokově zvýšena. Tento průběh je několikrát opakován, přičemž je sledována dynamika vývoje teplot na čidlech *T1,2* a *T2*. Průběh takové zkoušky je na fotografii na Obr. 19, průběh zaznamenaných teplot je v grafu na Obr. 20. Křivka „*T1 měřená*“ odpovídá průběhu teploty ocelového bloku.



Obr. 19 Detaily experimentální soustavy: při měření vzorku tepelně vodivé hmoty

Ustálený rozdíl teplot čidel *T1* a *T1,2* identifikuje tepelný odpor spáry. Ustálený rozdíl teplot čidel *T1,2* a *T2* (Obr. 20) identifikuje pokles teploty v měřeném vzorku a nepřímo jeho součinitel tepelné vodivosti vzhledem ke ztrátě tepla do okolního prostředí vlivem konvektivního ochlazování a radiace.

Rychlost vzestupu teplot na čidlech *T1,2* a *T2* charakterizuje zahřívaný vzorek z hlediska tepelné kapacity. Nepřímo jsou identifikovány velikost přestupu tepla do vyhřívaného vzorku a ztráta tepla z povrchu do okolí. V případě známé měrné tepelné kapacity vzorku lze nejlépe z vícestupňového testu zahřívání identifikovat součinitel tepelné vodivosti vzorku λ.



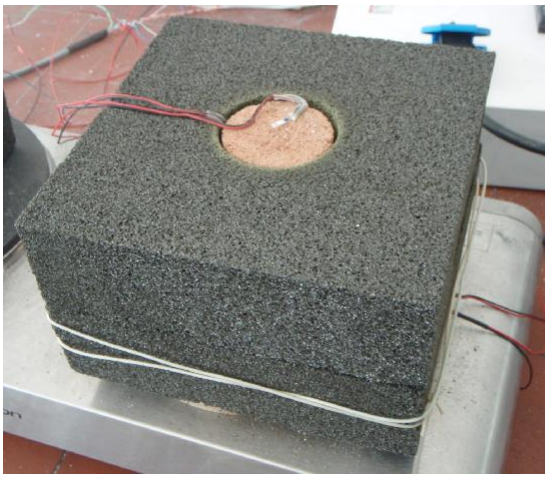
Obr. 20 Průběh teplot při zahřívání vzorku TVG při analýze tepelné vodivosti a výsledky tří modelů. V grafu jsou vyneseny průběhy simulovaných teplot pro TVG se zadanou tepelnou vodivostí λ = 5 W·m^{-1}K^{-1}, λ = 14 W·m^{-1}K^{-1} a λ TVG = 20 W·m^{-1}K^{-1}.

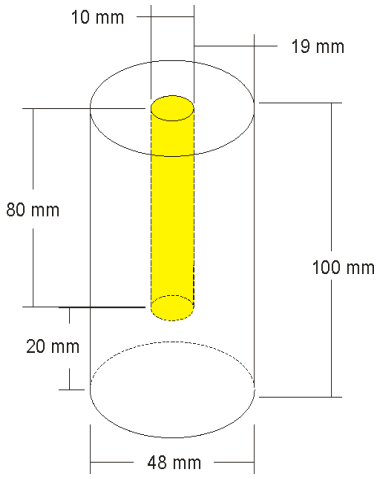
Při vyhodnocení koeficientu tepelné vodivosti jednoho z kandidátních vzorků TVG byl odladěn odpor spáry mezi vzorkem a ocelovým blokem na hodnotu R = 0.02 K·m^{2}W^{-1} a vodivost TVG na λ = 14 W·m^{-1}K^{-1}.

V Obr. 20 jsou vyznačeny varianty se stejnými vstupními hodnotami, ale odlišnou hodnotou tepelné vodivosti TVG (λ = 5 W·m^{-1}K^{-1} a λ = 20 W·m^{-1}K^{-1}). Zvyšování hodnoty tepelného odporu spáry, resp. snižování vodivosti vzorku, vede ke zvýšení rozdílů mezi jednotlivými teploměry a zároveň ke zpomalení reakce na dynamické změny teploty bloku.

5.2 Simulace vlivu výplně umělé dutiny tepelně vodivou hmotou

Pro analýzu trvalých změn tepelných parametrů hornin v důsledku tepelného zatěžování byly připraveny válcové vzorky. V druhé části experimentu byl do vzorků aplikován tepelně vodivý geopolymer (TVG) a byl zjišťován reálný efektu navýšení tepelné vodivosti. Experiment zahřívání horninových vzorků byl realizován v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR (Hladký, 2012).





Obr. 21 Experimenty prohřívání válečků a) vlevo ilustrační fotografie prohřívaného vzorku (pískovec) b) rozměry válcového horninového vzorku s mini-vrtem (žlutě). (Hladký, 2012)

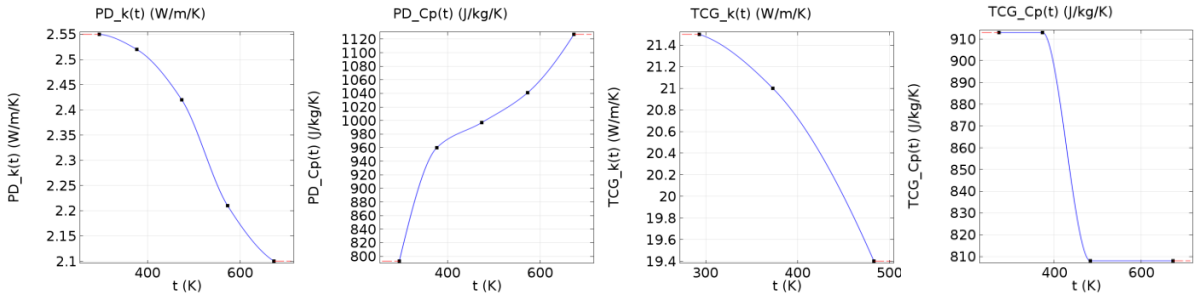
Tepelné zatěžování probíhalo na jednoduché aparatuře. Válcový vzorek s podstavou o průměru 48 mm a výškou 100 mm byl umístěn na topné plotně. Kolem vzorku byla usazena tepelná izolace z materiálu Foamglas. Izolaci válcového vzorku tvořily tři 50 mm tlusté čtvercové desky s podstavou 180 mm. Na Obr. 21a jsou vyfotografovány pouze dvě vrstvy izolace, při experimentu ohřevu byl vzorek zakryt třetí deskou. Na topné plotně byla udržována teplota nad 350 °C po dobu minimálně 10 hodin. Na obou podstavách vzorku byla kontinuálně měřena a digitálně zaznamenávána teplota. Po tepelném zatěžování a provedení všech geomechanických zkoušek byl do vzorku odvrtán mini-vrt, který byl vyplněny TVG. Rozměry vzorku, mini-vrtu a jeho umístění jsou na Obr. 21b. Po aplikaci TVG bylo tepelné zatěžování vzorku opakováno. Pro zvolenou horninu tepelného úložiště (granit Panských Dubenek) bylo provedeno ověření možnosti modelové předpovědi chování konglomerátu horniny a TVG.

Experiment vycházel ze zkušeností nabytých při analýze prohřívání kandidátních vzorků tepelně vodivé hmoty. Přidáním tepelné izolace s definovanými parametry byl minimalizován vliv sekundárního transportu tepla - konvektivním unášením tepla proudícím vzduchem. Průběh naměřených teplot pro neodvrtaný vzorek je vynesen v levém grafu na Obr. 24. Měřené bodové teploty vzorku byly využity ke kalibraci a kontrole výsledů modelu.

Fyzikální materiálové parametry potřebné pro simulaci transportu tepla jsou uvedeny v Tab. 15. Tepelné charakteristiky (vodivost a kapacita) granitu z Panských Dubenek a TVG s vyšším zastoupením grafitových vloček byly proměřeny v rozmezí teplot 20 – 400 °C. Měřené hodnoty v závislosti na teplotě jsou v grafech na Obr. 22 vyznačeny černými body, modře je vynesen funkční vztah zadaný v modelu.

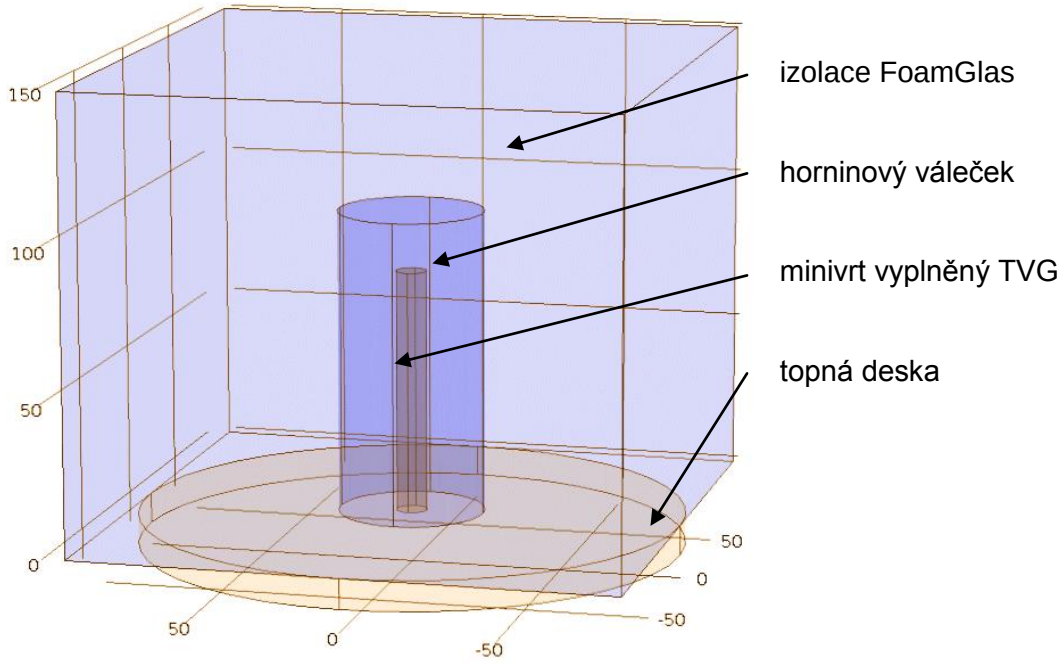
Tab. 15 Fyzikální parametry simulovaných materiálů.

	součinitel tepelné vodivosti **λ [W·m^{-1}K^{-1}]**	**měrná tepelná kapacita** **Cp [J·kg^{-1}K^{-1}]**	**hustota** **ρ [kg·m^{-3}]**
granit PD	viz Obr. 24– *PD_k(t)*	viz Obr. 24 – *PD_Cp(t)*	2620
tepelně vodivý geopolymer	viz Obr. 24 – *TCG_k(t)*	viz Obr. 24 – *TCG_Cp(t)*	1150
izolace FoamGlas	0.044	800	115



Obr. 22 Průběh funkcí tepelné vodivosti (λ – PD_k a TVG_k) a kapacity (PD_Cp a TVG_Cp) v závislosti na teplotě pro granit Panské Dubenky (PD) a tepelně vodivého geopolymeru (TVG).

Geometrie modelu kopíruje skutečnost s drobnými zjednodušeními. Tepelná izolace vzorku je zadána jako jeden geometrický blok. Plotna vařiče je v modelu reprezentován válcem o průměru r = 90 mm s výškou h = 10 mm. Na jeho spodní straně je simulována okrajová podmínka s definovanou teplotou odpovídající měřeným hodnotám na spodním čidle. Rozměry ostatních prvků odpovídají výše popsaným hodnotám. Stejně jako v předchozích modelech je mezi plotnou, vzorkem a izolací simulován tepelný odpor styčné spáry. Geometrie modelu je vyobrazena na Obr. 23. Při simulaci zkoušek bez mini-vrtu byly v daném prostoru zadány parametry horniny. Geometrie modelu byla reprezentována 46483 objemovými a 5148 plošnými elementy. Ukázka sítě je na Obr. 25



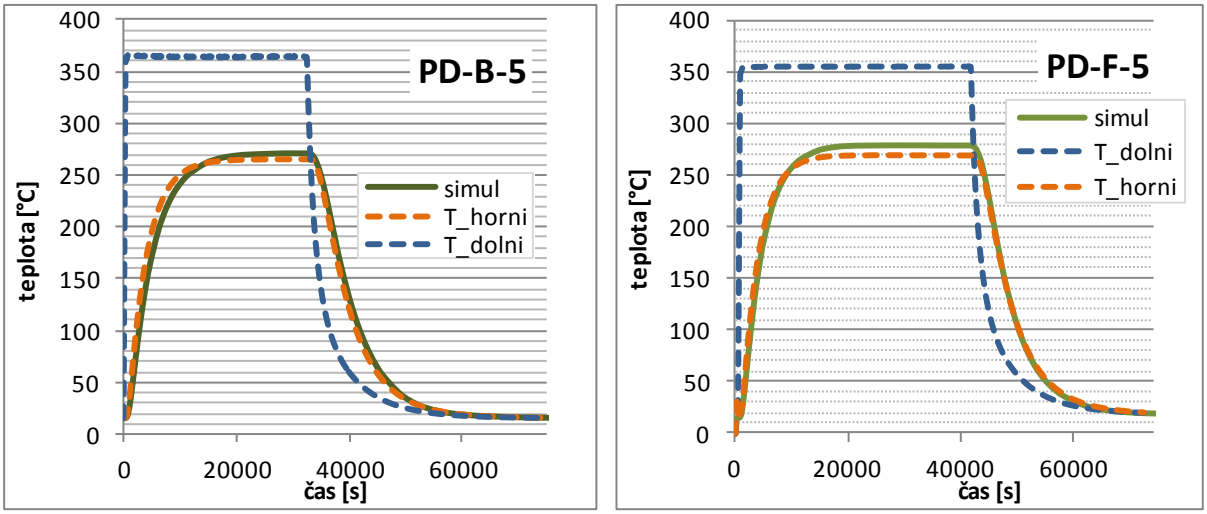
Obr. 23 Modelová geometrie prohřívání horninových válečků s vyplněným mini-vrtem.

V prvním kroku simulací byl sestaven model reprezentující experiment bez odvrtaného mini-vrtu. Na základě znalosti materiálových parametrů a teplot na obou podstavách vzorku byl model kalibrován. Před provedením druhého kola zatěžování byly sestaveny predikční simulace vlivu mini-vrtu vyplněného TVG na vývoj teplot při experimentu. Mezitím byly v laboratoři odvrtány mini-vrty a provedena aplikace TVG. Získaná data při druhém kole zatěžování byla porovnána s predikovaným průběhem.

Předmětem kalibrace byl odpor styčné spáry, který byl stanoven na hodnotu R = 0.004 $m^2K \cdot W^{-1}$. Na povrchu izolace je simulován odvod tepla ze soustavy pomocí okrajových podmínek reprezentujících sálání šedého tělesa a konvektivní ochlazování (viz rovnice (23) a (30) v

kapitolách 4.2.1 a 4.2.2). Koeficient emisivity byl stanoven ε = 0.8. Okrajová podmínka volného konvektivního ochlazování byla zadána s rozměrovým parametrem 0.15 m.

Na Obr. 24 je dokumentován průběh obou experimentů zahřívání granitových válečků z lokality Panské Dubenky. Vlevo je graf zahřívání hmoty granitu bez centrálního otvoru (vzorek označený PD-B-5). Vpravo je graf teplot s výplní mini-vrtu TVG (vzorek PD-F-5). Měřená data jsou vynesena čárkovaně. Topná deska byla vyhřívána na cca 380 °C po dobu 11 hodin. Teplota zaznamenaná na plotně je v grafech označena *T_dolni*, měřená teplota na horní podstavě vzorku je označena *T_horni*.

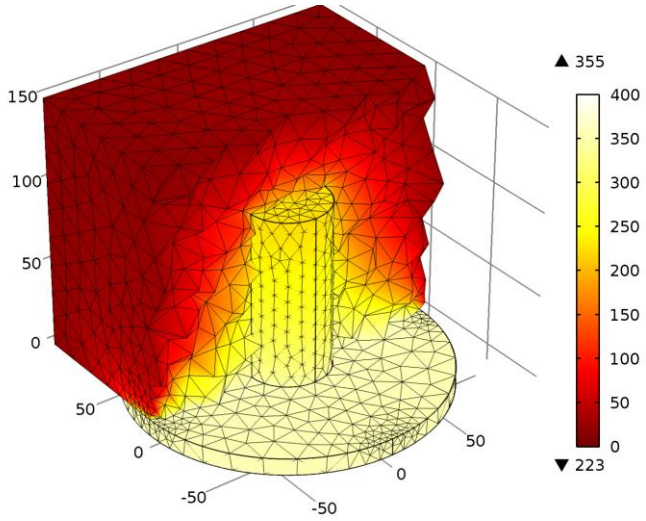


Obr. 24 Průběhy teplot při zahřívání válcového vzorku, vlevo bez mini-vrtu, vpravo s výplní TVG.

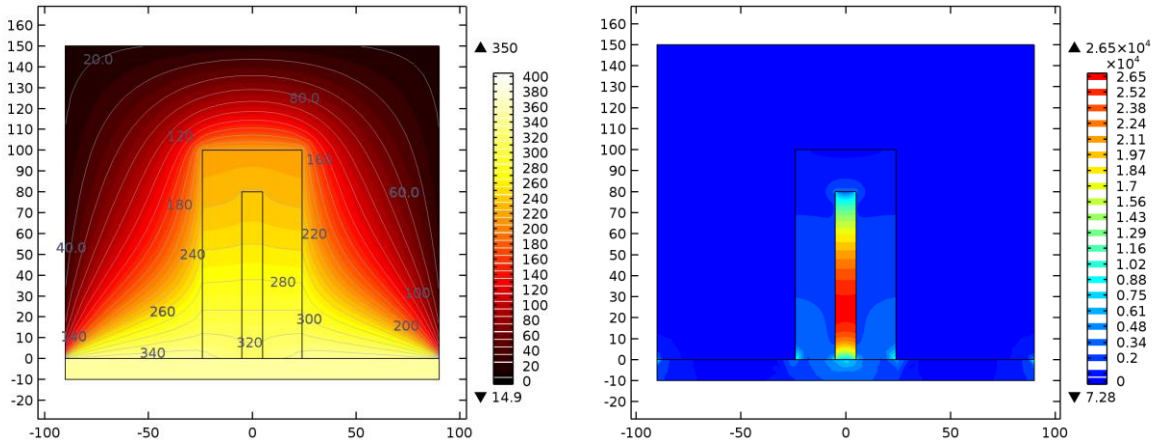
Po dosažení ustálené teploty vzorku dochází k přísunu tepla z topné plotny a odvodu tepla z povrchu izolace. Nasimulovaná velikost přestupu tepla z topné desky je určena tepelným odporem modelové soustavy. Limitujícím faktorem pro velikost tepelného toku vyhřívanou soustavou jsou obecně prvky s nejnižším součinitelem tepelné vodivosti. Za minimální hodnotu tepelné vodivosti spáry mezi plotnou a vzorkem je uvažována hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu λ = 0.025 $W \cdot m^{-1} K^{-1}$. Určení celkového tepelného odporu spáry R ovlivňuje její rozevření h.

Při prohřívání vzorku PD-B-5 byla za ustáleného stavu dosažena teplota 365 °C na styku s topnou deskou a 264 °C na horním líci vzorku. Rozdíl měřených teplot je 101 °C. Při prohřívání vzorku PD-F-5 vyplněného geopolymerem bylo ustálené teplotní maximum na styku s topnou deskou 355 °C, této hodnotě odpovídá teplota 270 °C na horním teplotním čidle. Rozdíl teploty na vzorku s centrální výplní TVG je 85 °C. Zmenšení rozdílu teplot horninového vzorku o 16 °C způsobuje přítomnost TVG.

Výsledky modelových simulací jsou na Obr. 24 označeny jako „*simul*“. Model byl nakalibrován na datech zaznamenaných při experimentu prohřívání neodvrtaného válečku. Obě modelové simulace mírně nadhodnocují dosaženou teplotu na horním líci válečku. Při simulaci vzorku PD-B-5 byla dosažená teplota nadhodnocena o 7 °C (měřeno 264 °C, simulace 271 °C). V identickém modelu s daty z prohřívání PD-F-5 byla teplota nadhodnocena o 8 °C (měřeno 270 °C, simulace 278 °C). Relativní nárůst teploty při experimentu s TVG byl předpovězen s odchylkou 1 °C. Celkově nižší měřené teploty lze přisoudit pravděpodobně nekompaktnosti použité izolace složené z několika desek, oproti jednolitému bloku zadanému v modelu. Obr. 26 dokumentuje vliv aplikace TVG do mini-vrtu na řezu modelem experimentu v čase t = 7200 s. Na rozložení teplot (Obr. 26a) je patrný rychlejší postup teplot mini-vrtem. Až pětinásobný nárůst tepelného toku v TVG je dokumentován na Obr. 26b.



Obr. 25 Ukázka modelové sítě konečných prvků a výsledné pole teplot v čase t = 7200 s.

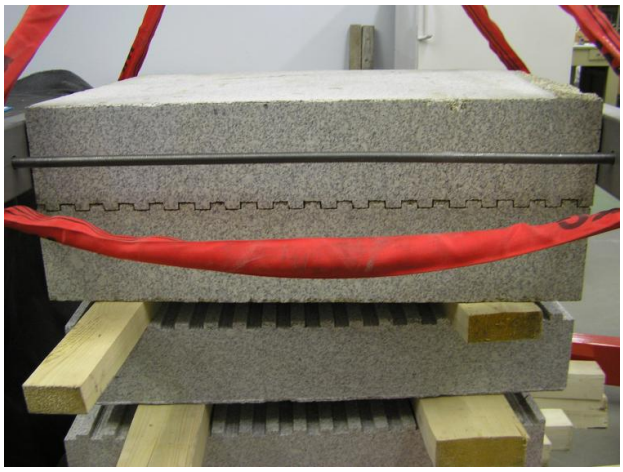


Obr. 26 Modelové rozložení a) vlevo teplot; b) vpravo toku tepla; v řezu modelu experimentu s TVG v čase t = 7200 s.

5.3 Analýza vlivu TVG v umělé spáře granitového bloku

Na experimenty zahřívání vzorků s mini-vrtem navázal experiment s několikanásobně větším granitovým blokem. Realizace testu byla předstupněm pro experimentální a modelové zpracování tepelného úložiště laboratorních rozměrů. Jeho podoba byla stanovena na základě předchozích fyzických testů a modelových predikcí. Náplní testu bylo porovnání šíření tepla horninovou matricí a umělou spárou a kvantifikace vlivu TVG na rozvod tepla. Při následném modelování experimentu byly ověřeny numerické postupy modelování a schopnost modelu komplexně popsat tepelné procesy v souladu s pozorováním. Získané znalosti byly využity pro simulace prototypu tepelného úložiště.

Pro experiment byl použít geometricky opracovaný granitový blok se zazubenou spárou (Obr. 27). Blok byl vyroben z vybrané horniny pro tepelné úložiště pocházející z lokality Panských Dubenek. Blok byl 800 mm dlouhý, 600 mm široký a 300 mm vysoký. V polovině jeho výšky byla zhotovena zazubená spára. Šířka zubů se pohybuje v rozmezí 20 až 27 mm, jejich výška je 9 až 11 mm.



Obr. 27 Fotografie granitového bloku se zazubenou spárou (ÚSMH)

Cílem experimentálních výzkumných prací s granitovým blokem bylo naměřit a modelově vyhodnotit vliv přítomnosti TVG v umělé puklině. Současně technické práce spjaté s konstrukcí vzorku, jeho instrumentací a sběrem dat sloužily k ověření použitých technologií pro návrh experimentu testovacího provozu prototypu tepelného úložiště.

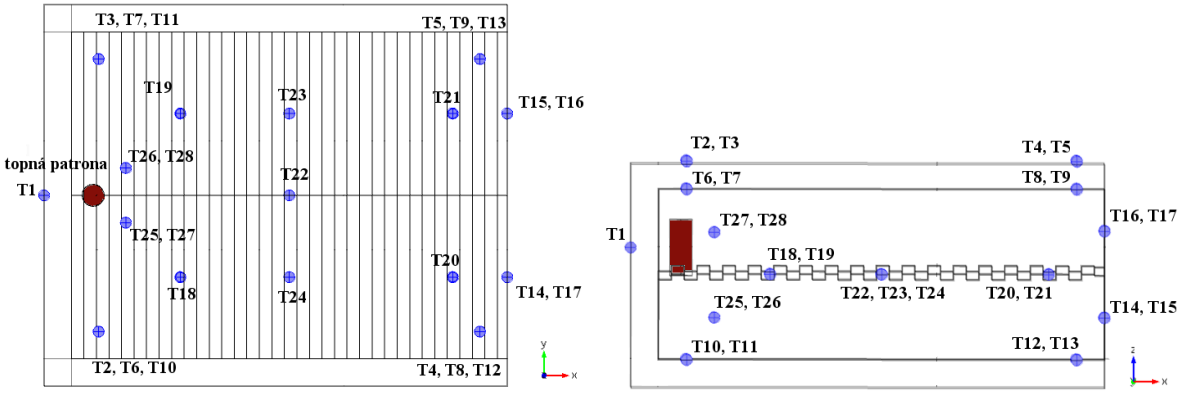
Z nemožnosti úpravy instrumentace bloku během experimentů byl navržen symetrický design pokusu. Jedna polovina bloku představovala horninu s neošetřenou spárou a druhá polovina spáry byla vyplněna TVG. Neošetřená část spáry byla vyplněna dusanou balotinou. Balotina jsou křemičité skleněné mikro-kuličky se známými vlastnostmi. Vzdálenost povrchů granitu ve spáře, resp. mocnost geopolymeru a balotiny byla stanovena na 15 mm. Před aplikací TVG byly do spáry rozmístěny monitorovací teploměry. Příprava teploměrů a aplikace TVG jsou dokumentovány na Obr. 28. Zdroj tepla byl umístěn na rozhraní těchto dvou prostředí.

Obr. 28 Příprava experimentu s granitovým blokem. Vlevo příprava monitorovacích teploměrů; vpravo nanesení TVG do zazubené spáry. (ÚSMH)

Zahřívání granitového bloku bylo realizováno topnou patronou délky 130 mm, umístěnou u kratší stěny bloku v místě styku balotiny a geopolymeru. Topná patrona byla umístěna pouze v horní polovině bloku ve vyvrtaném otvoru s průměrem 30 mm. Volný prostor mezi granitem a topnou patronou byl vyplněn TVG. Poblíž topidla byl umístěn teploměr pro zpětnou vazbu do řídící jednotky topné patrony. Maximální cílená teplota topné patrony při experimentech byla stanovena na 400 °C.

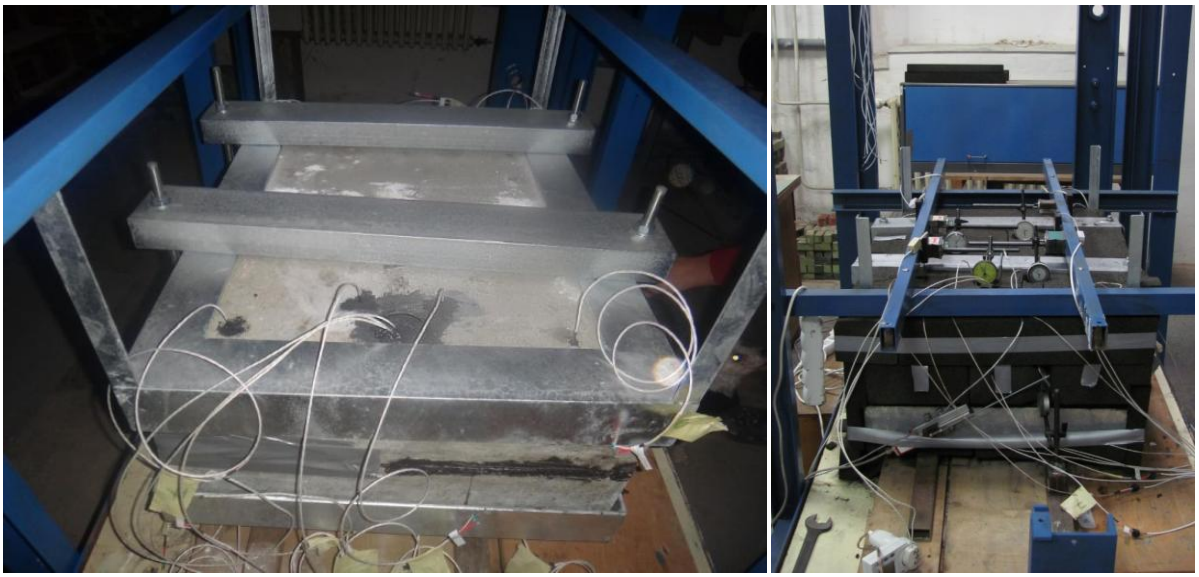
V obou deskách granitu a umělé spáře byly pro účely měření a vyhodnocení experimentu nainstalovány teploměry. Dva teploměry byly umístěny v podélné ose, 26 teploměrů bylo

umístěno symetricky do obou polovin. Rozmístění teploměrů je znázorněno na Obr. 29. Na povrchu izolace bylo umístěno 5 čidel, na povrchu hřebene 8 ks, na nejvzdálenější stěně od zdroje tepla 4 ks, přímo ve spáře 7 ks a v okolí topné kapsle 4 ks. Schematické znázornění umístění teploměrů je na Obr. 29. Detailní popis je v Příloze 1.1. Pro účely měření byly použity odporové teploměry PT100 s digitálním záznamem dat. Během experimentu byl také zaznamenáván příkon topné patrony.



Obr. 29 Schematické umístění teplotních čidel - půdorys a bokorys.

Sestavený blok osazený teploměry byl umístěn do fixačního ocelového rámu (viz Obr. 30). Následně byl blok osazen analogovými dilatoměry a digitálními tenzometry pro sledování působících sil při tepelném zatěžování. Téměř celý blok včetně ocelového rámu byl zakryt 50mm deskami tepelné izolace Foamglas. Nejvzdálenější stěna od topidla byla ponechána bez izolace z důvodu usměrnění tepelného toku ve směru umělé spáry.

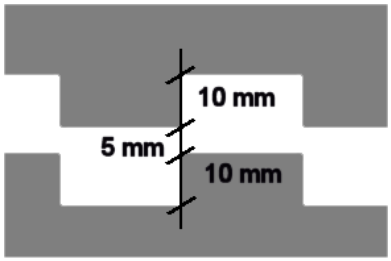


Obr. 30 Fotografie z přípravy testu tepelně vodivého geopolymeru na granitovém bloku. Vlevo granitový blok v ocelovém rámu s přívody k topidlu a teploměrům; vpravo již osazený blok izolací a měřící aparaturou (foto ÚSMH)

Při modelovém hodnocení experimentu byly ověřeny aplikované postupy a schopnost modelu komplexně popsat vzniklé termodynamické procesy. Získané znalosti byly následně využity i pro simulace provozu prototypu tepelného úložiště. Na základě výsledků predikčních modelových simulací byl stanoven příkon topné patrony a rozmístění teplotních čidel.

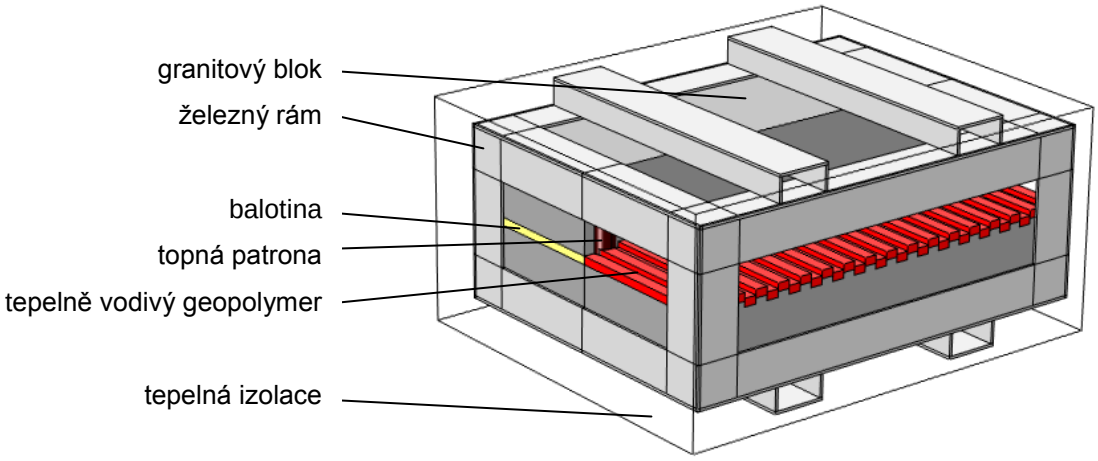
V modelové geometrii je blok simulován kvádrem s podstavou 800 × 600 mm a výškou 305 mm (300 mm granitového bloku a 5 mm spojité spáry, viz níže). Nepravidelné zazubení spáry je aproximováno na pravidelné – na skutečném zazubení se šířka zubů pohybuje mezi 20 a 27 mm a jejich výška je 9 až 11 mm. V modelové geometrii jsou zuby široké 23 mm a

mají hloubku 10 mm. Osa spáry prochází polovinou výšky vzorku. Vyplnění zubů vodivou pastou a granitovou drtí je uvažováno v celé výšce zubů (10 mm) s přesahem 5 mm. Výsledkem je spojitá spára vysoká 15 mm, ale pouze 5 mm v místech přechodu zubů (Obr. 31).



Obr. 31 Reprezentace zubů umělé spáry v modelové geometrii - granit: šedivě, výplň spáry: bíle. Šířka zubu je 23 mm.

Cílem numerických simulací experimentů prohřívání granitového bloku bylo potvrdit a zlepšit schopnost modelově reprezentovat transport tepla v komplikované geometrii, analyzovat naměřené anomálie teplot při experimentu a kvantifikovat tepelné toky uvnitř spáry a v masivu granitového bloku. Modelová geometrie je vykreslena na Obr. 32. V modelu byly zadány dvě granitové desky se zazubením, zazubená spára z poloviny vyplněná TVG a z poloviny balotinou, zpevňující ocelový rám a 50 mm tlusté desky izolace Foamglas. Povrch příčných vzpěr zůstal a byl simulován nezakrytý.
Na povrchu izolace i nezakrytých částech ocelového rámu byla zadána okrajová podmínka radiace (30) a konvektivního ochlazování (27) s koef. přestupu h = 4 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$. Zdroj tepla v modelu je zadán v místě topné patrony hodnotou energetického toku, který byl zaznamenán při probíhajícím experimentu.



Obr. 32 Schéma modelové geometrie experimentu s granitovým blokem.

Parametry simulovaných materiálů jsou totožné s uvedenými v minulé kapitole. Pro granit Panských Dubenek a TVG byla při simulaci uvažována funkční závislost hodnot teplené vodivosti a tepelné kapacity na teplotě (viz Obr. 22). Parametry balotiny byly změřeny přístrojem ISOMET 2104. Parametry ocelového rámu byly převzaty z databáze tepelných charakteristik materiálů (COMSOL, 2012a). Hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 16. Výpočetní síť byla složena z 944300 objemových elementů a 158746 plošných elementů.

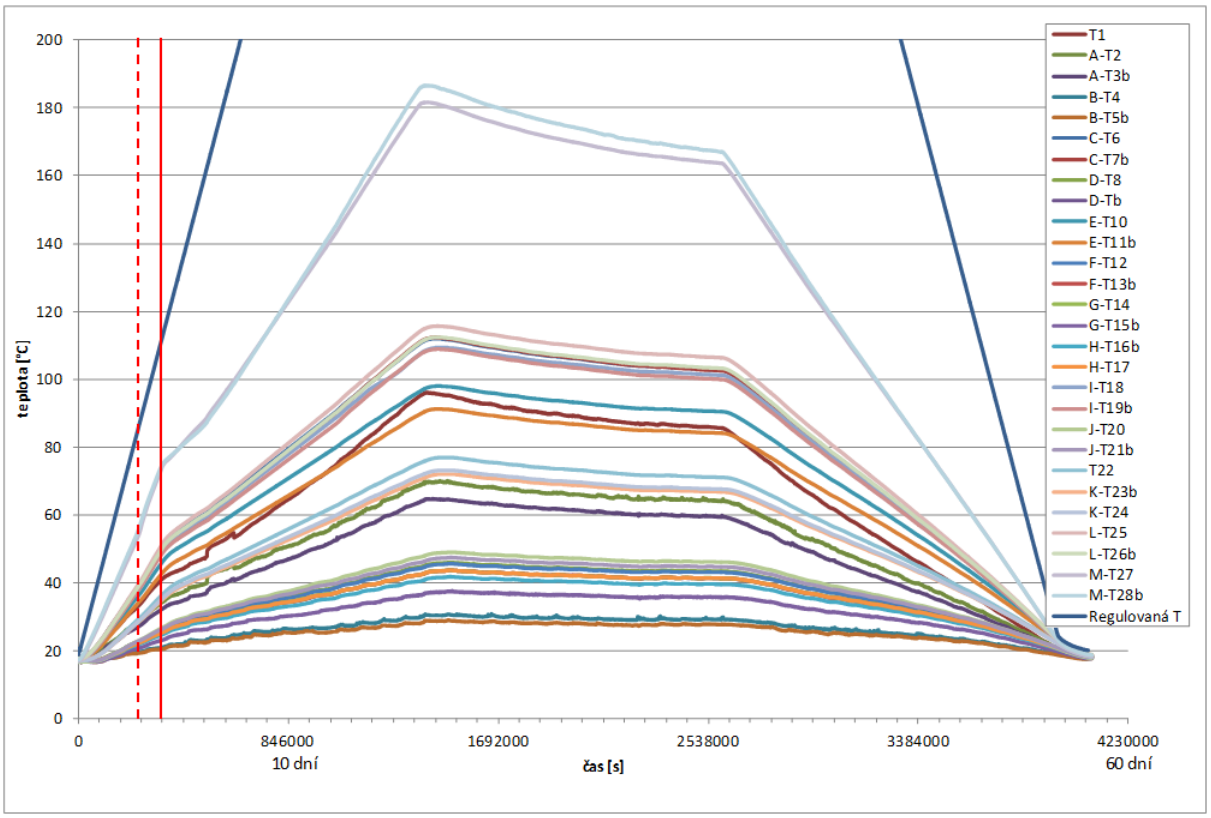
Tab. 16 Tabulka materiálových parametrů zadaných v modelu granitového bloku.

	součinitel tepelné vodivosti	měrná tepelná kapacita	objemová tepelná	hustota
	λ [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]	c_p [$J \cdot kg^{-1}K^{-1}$]	c_v [$MJ \cdot m^{-3}K^{-1}$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]
dusaná balotina	0.18	550	0.11	200
ocelový rám	76.2	440	3.4628	7870

5.3.1 Analýza experimentálních dat

Veškerá data během experimentu byla zaznamenávána každých 30 sekund. Pro účely analýzy pořízených dat teplotních záznamů byl upraven krok časových řad z 30 na 300 sekund. I po zředění se jedná o 13617 řádků s hodnotami času a dat z 28 teploměrů a 6 tenzometrů. Celý experiment trval přes 1134 hodin (47.27 dne).

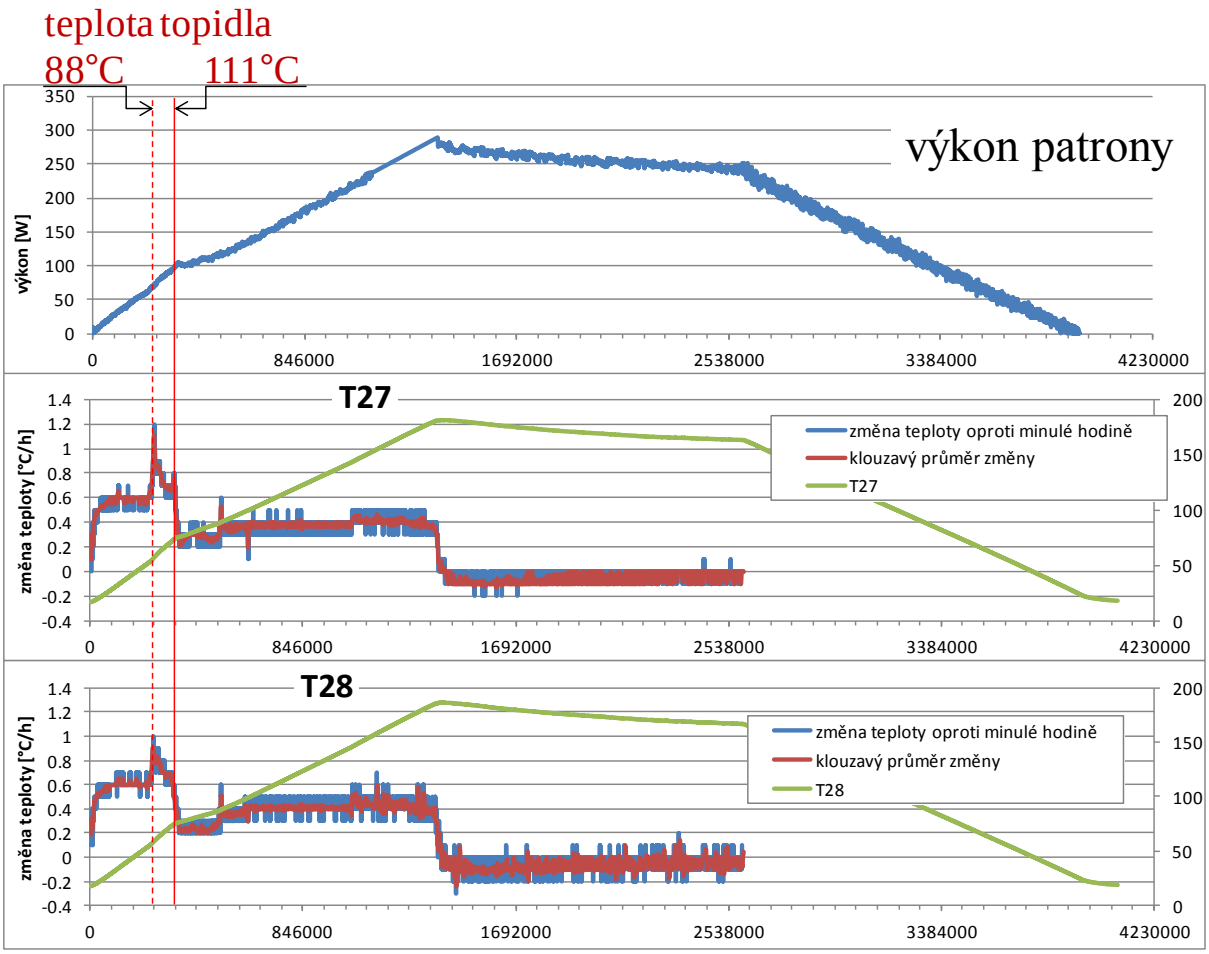
V první fázi prohřívání hřebene byla patrona zahřívána z teploty laboratoře 17 °C na 400 °C s konstantním nárůstem teploty o 1 °C za 1 hodinu. Experiment započal 10.4.2013 v 9:06. Teplota 400 °C byla na patroně dosažena necelých 16 dní od započetí experimentu. Průběh teplot je vynesen v grafu na Obr. 33 nebo v Příloze 1.2. Písmeny jsou označeny párové teploměry (symetricky umístěné podle osy přechodu obou materiálů výplně spáry), teploměry umístěné v balotině mají za číselným označením písmeno *b*.



Obr. 33 Graf teplot zaznamenaných na čidlech během prohřívání granitového bloku. Písmeny označeny párové teploměry (symetricky umístěné).

V ranních hodinách 14.4.2013 (cca v 5:50 - 94 hodin od začátku experimentu) nastává v průběhu všech teplot i sledovaného příkonu topné patrony nepředvídaný zlom, na Obr. 33 a Obr. 34 vyznačeno plnou červenou čarou. Před i po tomto zlomu je pozorován lineární nárůst teplot až po dosažení teploty 400 °C na topné patroně. Nárůst teploty patrony byl po celou periodu postupného zahřívání konstantní - zlom v grafu nárůstu teploty nenastal (v grafu Obr. 33 označena *Regulovaná T*). V čase zlomu vývoje teplot na ostatních čidlech osazených v hřebeni, byla na topné patroně dosažena teplota 111 °C.

Pro účely analýzy zlomu teplot byla provedena numerická derivace průběhu teploty dle času v hodinovém kroku. Průběh derivace ze dvou patroně nejbližších čidel (T27 a T28) je vynesen v grafech na Obr. 34. Nejvyšší nárůst teploty na čidle T28 (1 °C za 1 h) byl zaznamenán v době 69.74 hodiny od počátku experimentu (13.4. 7:51), během následujícího dne nárůst teploty poklesl až na 0.2 °C za 1 h (14.4 v 11:11). Teploty na patroně v těchto dobách byly 88.6 °C (13.4. 7:51) a 116.8 °C (14.4 v 11:11). Na čidle T27 (v TVG) proběhl podobný pokles gradientu teploty z 1.2 °C/h na 0.2 °C/h, zpožděný oproti T28 o 3300 sekund.



Obr. 34 Na horním grafu je vynesen výkon topné patrony, dva spodní grafy znázorňují průběh teploty na čidlech T27 a T28 (osa vpravo) a její derivaci v čase (levá osa).

Vzhledem k faktu, že k udržení stejného trendu teploty na topné patroně bylo zapotřebí menšího množství energie (viz Obr. 34 *výkon patrony*), lze vyvozovat, že v oblasti patrony došlo ke snížení přestupu tepla do jejího okolí. To mohlo být způsobeno zvýšením tepelného odporu např. ztrátou kontaktu patrony a granitového bloku vlivem rozdílné roztažnosti patrony, TVG a granitového bloku. Po přihlédnutí k rozsahu teplot (88 – 116 °C) při kterém ke změně došlo, lze uvažovat i o odpaření zbytkové vody z TVG.

Vyhodnocení přínosu TVG u experimentů granitového bloku vychází z porovnání teplot párových čidel. Ty byly symetricky umístěny v granitovém bloku v polovině se spárou vyplněnou TVG a v druhé polovině balotinou. Jednotlivé páry jsou označeny velkým písmenem. Rozdíly hodnot teploty těchto párů jsou vyneseny na grafu v Příloze 1.3. Kladná hodnota značí, že teplota v polovině s TVG byla vyšší.

Z hlediska vzdálenosti od patrony měla být měřena nejvyšší teplota na čidlech T27, T28. Tento předpoklad byl splněn. Nejvyšší dosažená teplota byla 187.7 °C (T27) a 186.6 °C (T28). Průběh rozdílů teploty má rozkolísaný charakter (pár M). Rozdíly teplot -5 °C (strana s balotinou je teplejší) až 1.6 °C (strana s TVG teplejší).

Z hlediska vzdálenosti od topné patrony měla být druhá nejvyšší teplota měřena na čidlech T25, T26. Tento předpoklad byl splněn. Čidla jsou umístěna ve spodní polovině bloku. Současně byla splněna podmínka, že čidlo situované pod spárou s TVG (T25) má vyšší teplotu oproti párovému čidlu T26. Maximální měřený rozdíl (pár L) byl 3.3 °C. Rozdíl teplot má předpokládaný průběh. Dosažené teploty jsou 115.7 °C, resp. 112.4 °C.

Další nejbližší párové teploměry T6 a T7 jsou umístěny na povrchu horní desky hřebenu. Dosažené maximální teploty jsou 111.8 °C a 112.5 °C. Maximální měřený rozdíl teplot byl 1.3 °C. Vyšších teplot je dosaženo na čidle T7 nacházejícím se nad spárou vyplněnou balotinou. Tento jev je způsoben menším přestupem tepla spárou, která plní v porovnání s částí spáry s TVG funkci izolantu.

Párová čidla T18 a T19 jsou umístěna přímo ve spáře cca 17 cm od topné patrony. Maximální dosažené teploty jsou 109.2 °C a 108.9 °C. Maximální dosažený rozdíl (pár I) 1.9 °C byl pozorován 11.77 dní od započetí experimentu, tedy v čase, kdy na patroně byla teplota 301.3 °C. V době maximálních teplot byl rozdíl 0.3 °C. Téměř po celou dobu experimentu byla vyšší teplota v polovině spáry vyplněné balotinou.

Nejvyšší dosažené rozdíly (pár E) - až 6.7 °C - byly pozorovány mezi teploměry T10 a T11. Tyto dvě čidla byla umístěna na spodní podstavě bloku v blízkosti patrony. Maximální dosažené teploty jsou 98 °C, resp. 91.3 °C. Byl splněn předpoklad vyšší teploty v polovině s TVG.

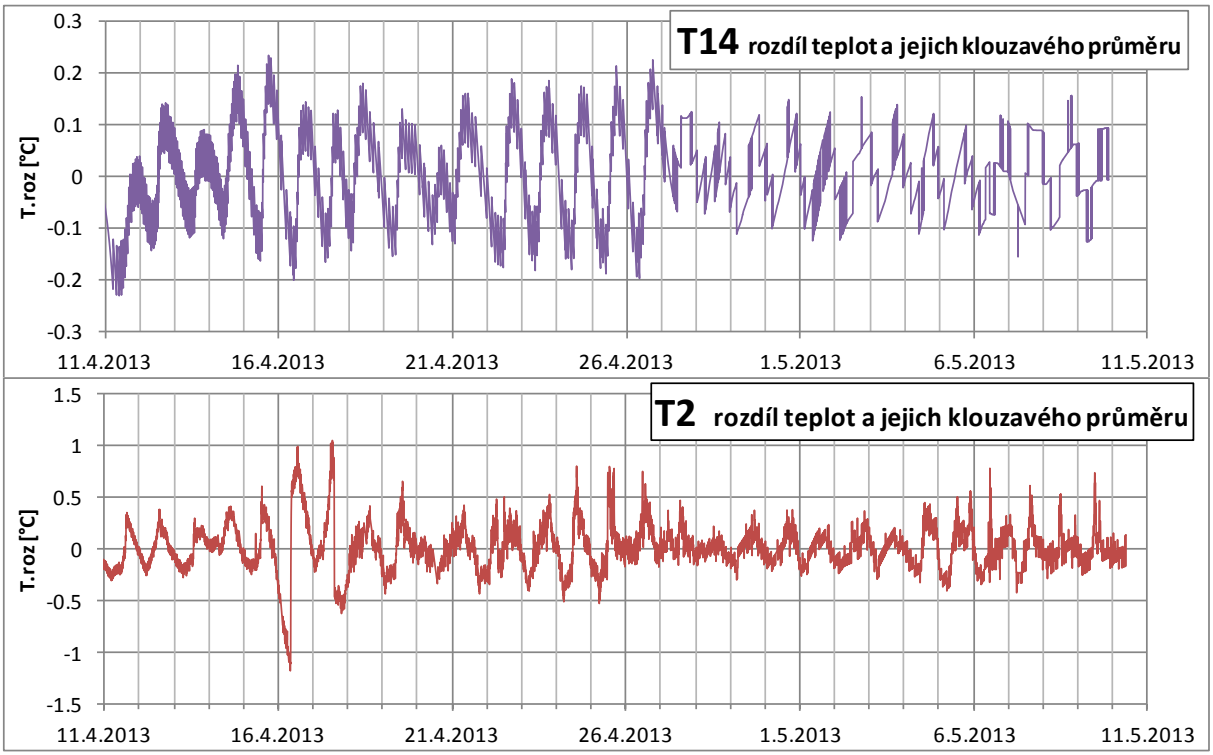
Obdobný teplotní průběh byl sledován na čidle T1 s maximální teplotou 96.1 °C. Toto čidlo bylo umístěno v ose na stěně bloku za topnou patronou.

Teploměry T22, T23 a T24 jsou umístěny přímo ve spáře a polovině délky hřebene. T22 je umístěn v ose, tedy na přechodu mezi balotinou a TVG. T23 a T24 jsou párové. Teploty naměřené na čidlech T23 a T24 dosáhly svého maxima při teplotách 71.9 °C, resp. 73.3 °C. s maximálním rozdílem teploty 1.5 °C (pár K). Vyšší teplota je v místě s TVG. Rozdíl teplot vykazuje očekávaný průběh, bez zvláštních výkyvů. Teploměr T22 vykazuje v průměru o 2.5 °C (v maximu 3.6 °C) vyšší teplotu oproti teploměru T24 (v TVG). Nižší teplota na T23 i T24 je pravděpodobně dána jejich umístěním blíže stěnám hřebene, které jsou ochlazovány přestupem tepla do atmosféry laboratoře.

Párové teploměry T2 a T3 (pár A) jsou umístěné z vnější strany izolace nad teploměry T6 a T7 (T2 a T6 jsou nad TVG, T3 a T7 nad balotinou). Dosažená maxima jsou 70.1 °C, resp. 64.7 °C, nejvyšší sledovaný rozdíl byl 5.9 °C. Vyšší teploty jsou pozorovány nad částí s TVG. Po odečtení dlouhodobého klouzavého průměru od časové řady byl i identifikován denní cyklus výkyvů (viz Obr. 35). Průměrná absolutní odchylka je 0.16 °C, výkyvy jsou nejčastěji v rozmezí ± 0.5 °C.

Další pár čidel určený k analýze je tvořen teploměry T20 a T21 (pár J). Tyto teploměry jsou umístěny přímo ve spáře. Maximální dosažené teploty jsou 49.2 °C v TVG (T20) a 47.7 °C v balotině (T21), s maximálním rozdílem 1.6 °C. Průběh teplot ani rozdílů nevykazují anomálie.

Na zadní odkryté, neizolované stěně byly umístěny čtyři teploměry. Na horní desce, ve které je umístěno topidlo, jsou teploměry T16 (balotina) a T17 (TVG) – pár označený H. Na spodní desce je pár G, který tvoří teploměry T14 (TVG) a T15 (balotina). Maximální zaznamená teplota na teploměru T14 byla 43.8 °C a T15 37.9 °C. Maximální rozdíl mezi touto dvojicí (G) umístěné na spodní desce je 6.3 °C. Maximální teplota na T16 byla 42.0 °C a na T17 46.3 °C. Nejvyšší zaznamenaný rozdíl dvojice H na horní desce je 1.7 °C. Při porovnání rozdílů mezi horní a spodní deskou je patrný vliv TVG, kdy byla zlepšena vodivost spáry a zlepšila přestup tepla z horní desky do spodní. Na teploměrech umístěných mimo izolaci je patrné ovlivnění atmosférou laboratoře. Při odečtení klouzavého průměru od časové řady teplot T14 vyplynul rozkyv v denním cyklu ± 0.2 °C (viz Obr. 35).



Obr. 35 Pozorované teplotní výkyvy na některých čidlech.

Podobné závěry lze vyvozovat z porovnání hodnot teploměrů umístěných nad sebou. Teploměry umístěné v polovině s TVG (T14 a T17) dosahují bližších teplot (43.3 °C a 46.3 °C), oproti teploměrům umístěných na polovině s balotinou (T15 - 37.9 °C a T16 - 42 °C)

Pár teploměru (označený F) byl umístěný mezi spodní podstavou hřebene a izolací. Teploměr T12 pod spárou s TVG naměřil maximální teplotu 45.8 °C, teploměr T13 (balotina) zaznamenal maximum při 43.8 °C. Maximální zaznamenaný rozdíl teplot v tomtéž okamžiku je 6.7 °C. Tento, relativně, velký rozdíl dokazuje pozitivní vliv TVG oproti vyplnění balotinou.

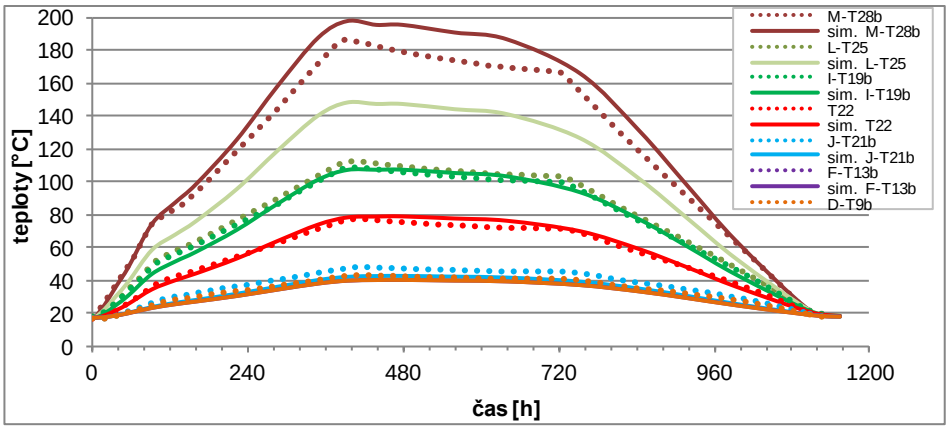
Celkově nejnižší teploty byly logicky zaznamenány nejdál od topné patrony z vnější strany izolace. Na této dvojici, označené B, byl zaznamenán maximální rozdíl teplot 2.5 °C. Předpoklad vyšší teploty nad spárou s TVG byl splněn teplotou 31.0 °C na teploměru T4, oproti teploměru T5 na němž byla zaznamenána nejvyšší teplota 29 °C. Na této dvojici je také patrné ovlivnění teplot vývojem teploty vzduchu laboratoře.

Všechny tři dvojice čidel s nepředvídaným průběhem (C, I, M – viz Příloha 1.3) jsou v blízkosti topidla a zároveň ve styku s horní deskou hřebene. Dvojice C je na povrchu, dvojice I je ve spáře a pár M je nejblíže patrony přímo v bloku.

5.3.2 Vyhodnocení experimentu numerickým modelem

Anomálie vývoje teplot hřebene po 94. hodině experimentu byla v modelu zavedena přidáním tepelného odporu na přechodu mezi patronou a hřebenem. Hodnota odporu byla nakalibrována na $R = 0.0025\ \mathrm{K{\cdot}m^{-2}K^{-1}}$. Výsledný průběh modelový teplot a porovnání se zaznamenanými teplotami je na Obr. 36.

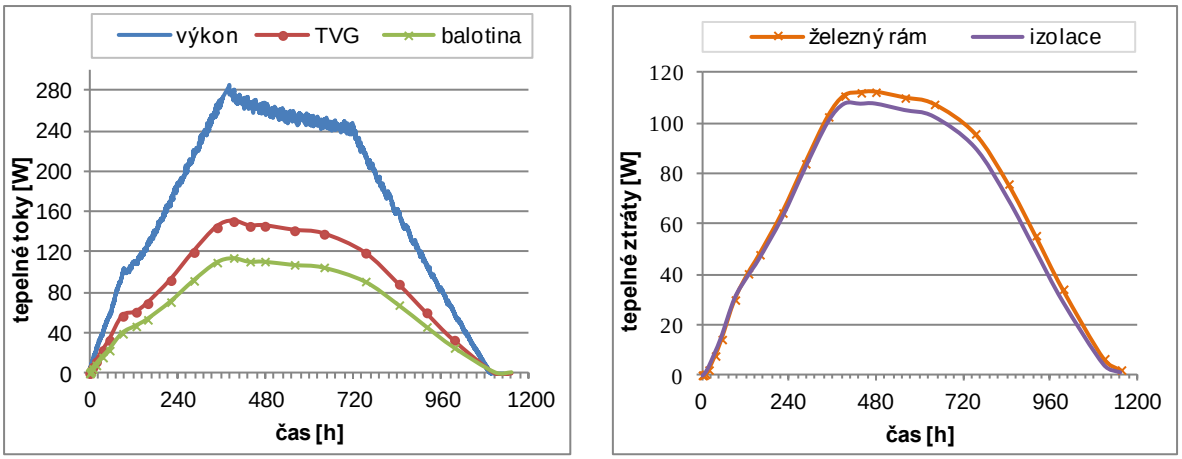
V rámci kalibrace na absolutní teploty i na rozdíly teplot v párových čidlech byl funkční hodnoty tepelné vodivosti TVG sníženy o 30 %. Bez této úpravy by rozdíly modelových teplot párových teploměrů dosahovaly až 12 °C (naměřeno bylo maximálně 6.5 °C – viz Příloha 1.3).



Obr. 36 Měřené (tečkovaná čára) a simulované (plná čára) průběhy teplot na vybraných teploměrech.

Přínos TVG byl vyhodnocen na základě porovnání kolmého tepelného toku z topné patrony do poloviny granitového bloku s balotinou a do poloviny s TVG. Simulované tepelné toky jsou vyneseny v grafu na Obr. 37a. Při maximu byl tepelný tok do poloviny s TVG o 38 % vyšší, v průměru o 24 %, oproti toku do poloviny s balotinou.

Na Obr. 37b jsou vyhodnoceny tepelné ztráty pláštěm izolace a ocelového rámu. Ačkoli je odhalená plocha rámu 4x menší než plocha izolace, tepelné ztráty rámem byly podle výsledků simulací vyšší než ztráty celou plochou izolace. Zjištěná informace byla využita pro design tepelného úložiště v tom smyslu, že nebyly připuštěny tepelné mosty mezi atmosférou laboratoře a jádrem úložiště.



Obr. 37 Vlevo a) průběh měřeného příkonu topné patrony a modelových toků do poloviny hřebene s TVG a balotinou; vpravo b) modelové tepelné ztráty povrchem izolace (2.013 m2) a ocelového hámu (0.5198 m2).

Vyšší teploty párových teploměrů na straně bloku s TVG a modelové vyhodnocení toků potvrzují přínos geopolymeru na rozvod tepla. V příslušné polovině TVG tvořil 5 % celkového objemu. Výskyt zlomu v průběhu teplot a následný měřený mírný pokles teplot v úložišti po zafixování teploty topné patrony nasvědčuje degradaci kontaktu patrony přes TVG s granitovým okolím. Tento předpoklad byl potvrzen při rozebrání granitového bloku. Z neznámého důvodu došlo k degradaci TVG přímo na styku s topnou patronou (viz Obr. 28).

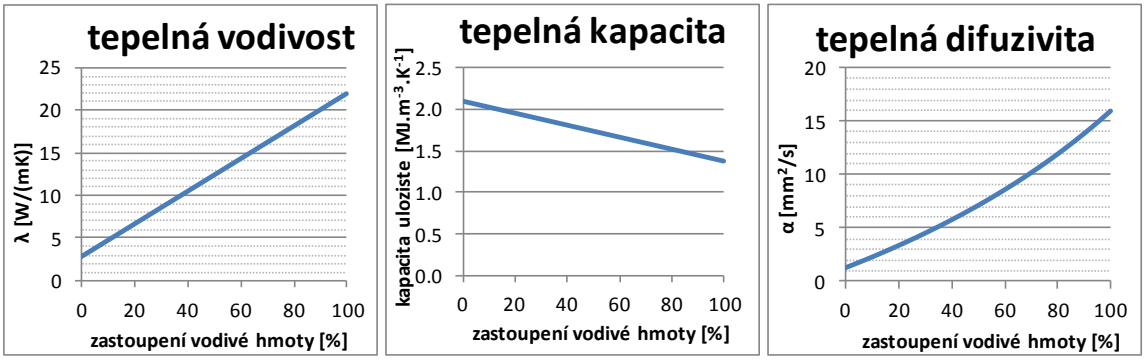
Obr. 38 Fotografie topné patrony a okolního TVG pořízená při rozebírání granitového bloku (ÚSMH).

5.4 Predikční simulace pro účely návrhu tepelného úložiště

5.4.1 Testování vlivu tepelně vodivého geopolymeru v jednoduché topologii

Cílem modelových experimentů bylo popsat změny tepelných toků a množství uloženého tepla v jednotkovém objemu konglomerátu horniny a TVG. Specielně bylo cílem zanalyzovat tyto změny i pro případy puklinových systémů blízkých přírodním puklinovým systémům (malý objem puklin v poměru k objemu horninového masivu).

Pro účely analýzy tepelných vlastností úložiště byly sestaveny tři grafy (Obr. 39) popisující hodnotu tepelné vodivosti, tepelné objemové kapacity a tepelné difuzivity v závislosti na poměru zastoupení vodivého geopolymeru a horniny (granitu). Hodnoty jsou vypočítány jako vážený průměr charakteristiky s váhou objemového zastoupení. Jde o jisté zjednodušení, tento přístup by exaktně charakterizoval pouze homogenní konglomerát.



Obr. 39 Vliv zastoupení tepelně vodivého geopolymeru na vybrané charakteristiky.

Pro porovnání jsou v tabulce (Tab. 17) uvedeny charakteristiky lité keramiky a vysokoteplotního betonu vyvinutého pro účely ukládání tepla v solárních elektrárnách využívajících teplo usměrněné z parabolických zrcadel (Laing et al. 2006). Oba uvedené materiály (keramika, vysokoteplotní beton) převyšují konglomerát i samotný granit v hodnotách objemové tepelné kapacity. Tato určitá nevýhoda konglomerátu je dostatečně vyvážena vyšší tepelnou vodivostí. Již při 20% zastoupení TVG má konglomerát 7x vyšší průměrnou tepelnou vodivost než vysokoteplotní beton, při relativně nevýznamném snížení celkové tepelné kapacity. Vyšší tepelná vodivost má přínos pro dynamiku úložiště, umožňuje rychlejší nabíjení a vybíjení, resp. pro zachování identické dynamiky úložiště postačuje méně

rozsáhlý tepelný výměník. Tento fakt může mít pozitivní ekonomický přínos při konstrukci tepelných úložišť.

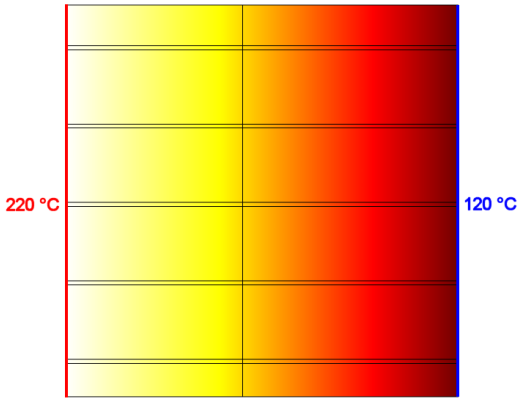
Tab. 17 Tepelné charakteristiky vysokoteplotního betonu a lité keramiky (Laing et al. 2006).

materiál	součinitel tepelné vodivosti	měrná tepelná kapacita při 350 °C	objemová tepelná kapacita	hustota
	λ [W·m^{-1}K^{-1}]	c_p [J·kg^{-1}K^{-1}]	c_v [MJ·m^{-3}K^{-1}]	ρ [kg·m^{-3}]
lité keramika	1.35	866	3.031	3500
vysokoteplotní beton	1	916	2.519	2750

Všechny dále popsané simulace jsou realizovány v 2D řezu. Zobrazovaná oblast reprezentuje plochu 1 × 1 metr, výsledné hodnoty jsou vztaženy na jeden metr hloubky. V modelech jsou simulovány dva materiály - granit a TVG s parametry zdokumentovanými v kapitole 5.2 na Obr. 22.

5.4.1.1 Analýza energetických toků při konstantním gradientu

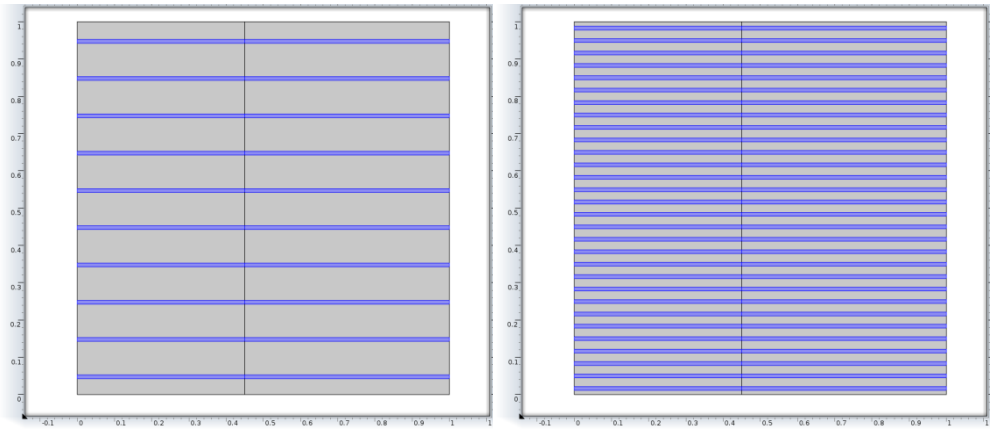
Byla sestavena sada modelů lišících se vnitřní topologií. V modelech byl simulován rozdílný počet různě širokých spár vyplněných TVG. V první sadě simulací byla zafixována šířka spár a byl testován efekt změny jejich počtu při rovnoměrném rozmístění. V druhé sadě simulací byl naopak ustálen počet spár a byl porovnáván vliv změny jejich rozevření.



Obr. 40 Okrajové podmínky modelů

V modelech byl nejprve vyhodnocován horizontální tepelný tok za ustáleného stavu při rozdílu teplot 100 °C dokumentovaném v Obr. 40. Následně byla analyzována dynamika plnění stejného uspořádání geometrie.

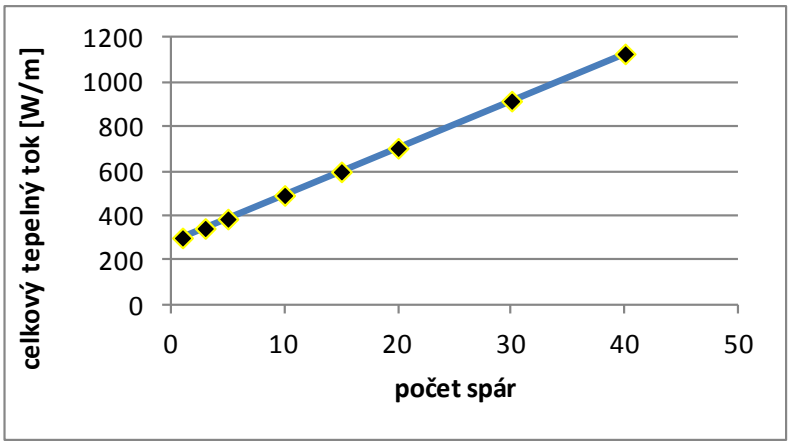
Rozevření spár vyplněných TVG bylo zafixováno na 1 cm. Příklady topologie dvou variant modelu jsou znázorněny na Obr. 41. Počty spár v simulovaných variantách jsou uvedeny na Obr. 42.



Obr. 41 Ukázka různého počtu jednocentimetrových spár, vlevo 10, vpravo 30.

Na Obr. 42 jsou výsledky simulací. V grafu je vynesena závislost počtu spár a vypočítané hodnoty tepelného toku. V tabulce jsou uvedeny exaktní hodnoty. Výsledky simulací vykazují lineární závislost mezi počtem simulovaných spár a tepelným tokem mezi protilehlými stěnami.

počet spár	tepelný tok [W/m]
1	301.2
3	343.6
5	386
10	492
15	598
20	704
30	916
40	1128



Obr. 42 Tabulka ustálených toků a jejich vynesení v grafu.

Ve druhé sadě simulací byly zadány tři rovnoměrně rozmístěné spáry a testován byl vliv jejich rozevření. Šířka rozevření byla volena od 0.1 do 200 mm. Opět byla ověřena lineární závislost mezi výškou spár a celkovým tepelným tokem.

Při kombinaci výsledků obou sad simulací (spáry situovány rovnoběžně se směrem tepelného toku) bylo potvrzeno, že za ustálených podmínek, je celkový tok závislý na celkovém průřezu TVG a nikoli na rozmístění či mocnosti spár. Kvůli obvykle minimálnímu objemu puklinových systémů v přírodních horninových masivech se jeví možnost zušlechtění jejich tepelných vlastností jako neperspektivní. Modelové výpočty také zcela pomíjí potíže s aplikací TVG do puklinového systému a předpokládají spojité vodivé cesty napříč granitem. Východiskem jsou umělé konglomeráty horninovému masivu a TVG.

5.4.1.2 Plnění a prázdnění bloku

Pro analýzu vlivu TVG při její aplikaci v tepelném úložišti byla vytvořena neustálená simulace plnění a prázdnění zvoleného objemu 1 m^3 konglomerátu. Při uplatnění časové závislosti se projeví rozdílná topologie (v závislosti na poměru masivu a TVG) rozdíly v rozložení teplot a rovněž rozdíly v naakumulovaném a odebraném množství tepla.

V realizované sadě simulací byly zadány tři časové periody, každá trvající 100 hodin. Počáteční teplota celé soustavy byla 20 °C. V první periodě byla na levé stěně zadána podmínka konstantní teploty 220°C (docházelo k akumulaci tepla). Ve druhé periodě byl zdroj tepla vypnut a docházelo pouze k přerozdělení tepla v celém objemu (bez ztrát do prostoru). Ve třetí periodě byl simulován odběr tepla okrajovou podmínkou konstantní teploty 120 °C.

Topologie domény byla obdobná, jako u výše uvedených stacionárních modelů vedení tepla. V prostoru 1×1 m byly rovnoměrně rozmístěny pukliny s daným rozevřením. Jednotlivé varianty A až T se liší v počtu a rozevření puklin. Varianta D je řešena jako kompaktní blok horniny bez puklin, varianta H obsahuje 96 % TVG. Přehled modelových parametrů pro jednotlivé varianty je v Tab. 18.

Tab. 18 Tabulka proměnných jednotlivých variant.

varianta	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
rozevření puklin [m]	0.1	0.01	0.01	0	0.05	0.025	0.01	0.08	0.025	0.02
počet puklin	3	3	5	0	6	12	12	12	10	10
zastoupení tepelně vodivé hmoty v průřezu [%]	30	3	5	0	30	30	12	96	25	20
varianta	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
rozevření puklin [m]	0.013	0.01	0.04	0.1	0.05	0.01	0.015	0.01	0.019	0.021
počet puklin	15	20	5	2	2	10	10	25	10	10
zastoupení tepelně vodivé hmoty v průřezu [%]	19.95	20	20	20	10	10	15	25	19	21

V modelu byla sledována dynamika plnění a prázdnění konglomerátu granitu a TVG. Vyšší dosažená celková energie soustavy (viz Příloha 2.1) nemusí odpovídat vyššímu uloženému množství - pro varianty s větším podílem horninového masivu má soustava se stejnou počáteční teplotou vyšší počáteční energii.

V grafu přílohy 2.1 je vynesen průběh celkové energie vybraných simulací (varianty A až H) v modelové doméně na jeden metr hloubky ($J \cdot m^{-1}$). Nejrychlejší plnění a prázdnění ze zobrazených variant vychází u variant A, E a F, které mají totožný poměr TVG a horninového masivu (30 % TVG). Tyto tři varianty (vzhledem ke shodnému poměru objemu masivu a TVG) také umožňují uložení stejného množství energie. Zvyšování objemu TVG vede kvůli její menší hustotě (resp. objemové tepelné kapacitě) ke snižování maximální tepelné kapacity úložiště (viz Obr. 39).

Tvar křivek celkové energie v periodě nabíjení (prvních 100 hodin) vypovídá o tom, že u variant A, E, F a H došlo téměř k úplnému nabití úložiště odpovídajícímu vstupní teplotě 220 °C (cca 87 - 89 % teoretické maximální kapacity). Naopak v ostatních simulovaných variantách k úplnému nabití úložiště nedošlo (76 až 67 %). Vyšší dosažené množství celkové energie (např. varianta G) je dáno větší hustotou systému danou menší hustotou TVG v menším zastoupení, a větším počátečním množstvím. Výsledek tak ukazuje na určité snižování celkového uložitelného množství tepla do úložiště při nárůstu objemu TVG (menší tepelná objemová kapacita ve srovnání s výplňovým kamenivem). Tato nevýhoda je bohatě vyvážena zvýšenou dynamikou plnění i zpětného odběru tepla.

Pro nalezení výhodného uspořádání bylo nutno simulovat další varianty I až T. V grafu v Příloze 2.2 jsou vyneseny vybrané varianty s rozdílným množstvím TVG. Vynesené hodnoty v grafu jsou již snížené o počáteční energii bloku. Z analýzy vyplývá dominantní vliv zastoupení TVG nad počtem spár na možnost úložiště akumulovat dodávané teplo. Již při počtu dvou rovnoměrně rozmístěných spár (v jednom metru simulovaného bloku) docházíme k obdobným výsledkům jako s vyšším počtem spár. V uvažovaném geometrickém rozložení bylo dosaženo uložení nejvíce tepla při počtu spár rovno deseti a zastoupení TVG 20 % z celkového objemu. Tento „optimální“ poměr a rozložení jsou platné pouze pro modelovanou geometrii, dobu plnění 100 hodin a ostatní použité okrajové podmínky. Při jiné geometrii a době plnění mohou optimální parametry nabývat poněkud rozdílných hodnot. V Tab. 19 jsou stanovené hodnoty uloženého tepla (rozdíl stavu vnitřní energie po plnění a počátečního stavu) seřazené od nejvyšší k nejnižší.

Tab. 19 Přehled uložené energie v modelové doméně pro jednotlivé varianty, seřazeno dle naakumulované energie.

varianta	rozevření puklin [m]	počet puklin	zastoupení TVG v průřezu [%]	uloženáé teplo [kWh]
J	0.02	10	20	103.488
S	0.019	10	19	103.486
K	0.0133	15	19.95	103.479
M	0.04	5	20	103.460
T	0.021	10	21	103.414
N	0.1	2	20	103.002
I	0.025	10	25	102.963
L	0.01	20	20	102.963
Q	0.015	10	15	102.934
R	0.01	25	25	102.839
G	0.01	12	12	101.828
F	0.025	12	30	101.701
E	0.05	6	30	101.689
A	0.1	3	30	101.629
P	0.01	10	10	100.654
O	0.05	2	10	100.209
C	0.01	5	5	95.635
B	0.01	3	3	92.515
D	0	0	0	86.483
H	0.08	12	96	75.400

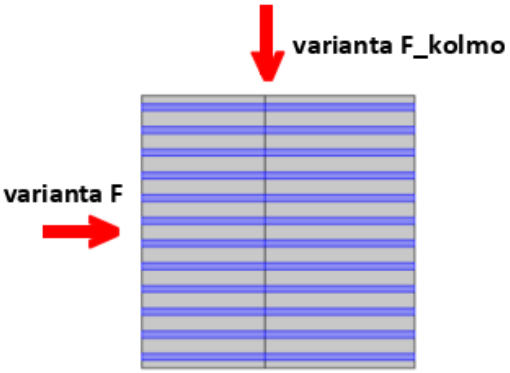
K nejvyšší akumulaci tepla po periodě nabíjení (prvních 100 h) došlo ve variantách J, S a K s rozdílem 10 Wh. Rozdíl v průběhu akumulačních křivek je téměř neznatelný. Zastoupení TVG je 20 % (resp. 19 a 19.95 % pro varianty S a K), varianty J a S simulují 10 spár, varianta K 15. Varianty I a F mají větší počáteční sklon křivky akumulované energie, což znamená rychlejší nabíjení za časovou jednotku. V kratší periodě nabíjení by dosáhly vyššího množství uloženého tepla. Největší sklon křivek plnění a prázdnění energie má varianta H simulující 96% zastoupení TVG v modelovém bloku. Výhoda možnosti rychlého plnění platí pouze po dobu nabíjení cca 25 hodin, kdy úložiště dosáhne svého maxima, odpovídajícímu vstupní teplotě 220 °C. Nejnižší sklon má křivka plnění odpovídající simulaci samotného granitového bloku bez přidání TVG (varianta D). Ačkoliv jeho teoretická tepelná kapacita je ze všech variant nejvyšší, za 100 hodin nabíjení nedosáhne svého maximálního potenciálu.

Tvar křivek prázdnění úložiště lze hodnotit analogicky ke křivkám plnění. Míra jejich strmosti při poklesu udává schopnost úložiště odevzdávat akumulované teplo.

5.4.1.3 Vliv orientace spár s tepelně vodivým geopolymerem

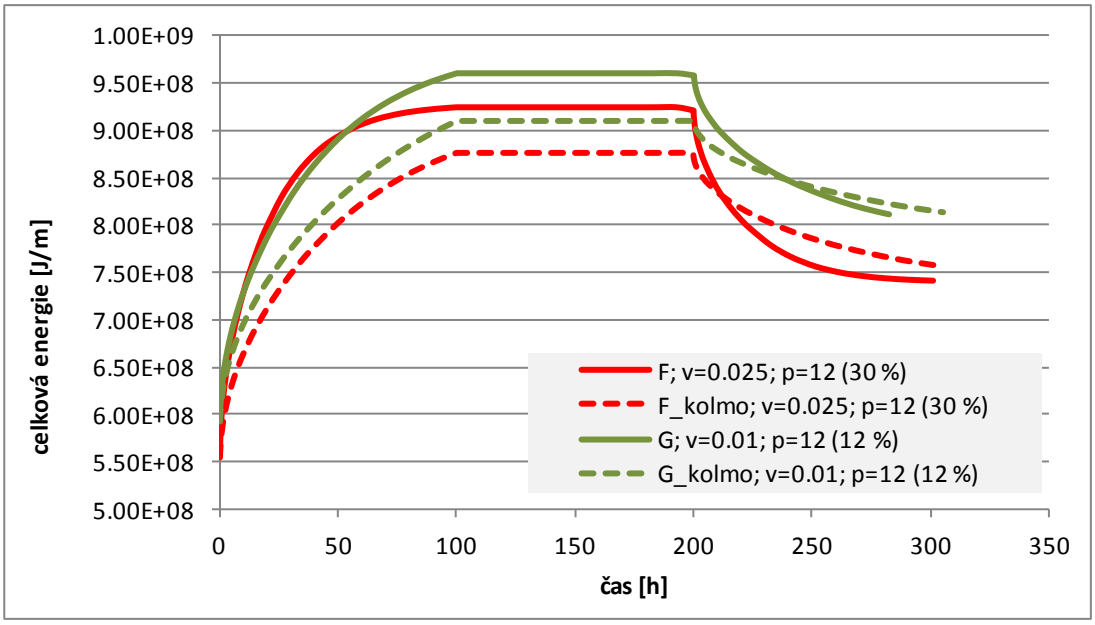
Vliv orientace puklin s TVG ve vztahu k tepelnému toku (a rychlosti nabíjení) konglomerátu TVG a granitu je zdokumentován pomocí simulací variant F a G. Směr teplotního gradientu a orientace puklin ovlivňuje velikost tepelného toku a množství uloženého tepla za daný čas.

Tento jev byl kvantifikován na identické geometrii předchozích simulací, jen byla změněna poloha okrajových podmínek (viz Obr. 43).



Obr. 43 Rozdílný směr dominantního tepelného toku ve variantách F a F_kolmo (resp. G a G_kolmo).

Průběhy celkové energie na Obr. 44 dokládají skutečnost, že záleží na směrech uložení spár s TVG a na směru šíření tepla. K optimálnímu šíření tepla dochází v případě, ve kterém jsou spáry s TVG orientovány rovnoběžně se směrem šíření tepla. Případ, ve kterém je směr šíření kolmý na plochy jednotlivých spár, je naopak z hlediska dynamiky tepelných změn systému nejhorší.



Obr. 44 Porovnání průběhu uložené energie v úložišti při rozdílném směru tepelného toku.

V Tab. 20 jsou hodnoty uloženého tepla po 100 hodinách nabíjení modelové domény. Při 30% zastoupení TVG byl při zdroji tepla kolmém na spáry pokles uloženého tepla o 12 %, při 12% zastoupení TVG byl pokles maxima uloženého tepla o 13 %.

Tab. 20 Tabulka parametrů a výsledků modelů 2D geometrie.

Varianta	**F**	**F_kolmo**	**G**	**G_kolmo**
rozevření puklin [m]	0.025	0.025	0.01	0.01
Počet	12	12	12	12
uložená energie [kWh]	101.70	89.359	101.83	87.844

K optimálnímu šíření tepla dochází za podmínek, kdy jsou pukliny orientovány rovnoběžně se směrem proudění tepla (gradientem). Varianta, ve které je směr šíření kolmý na plochy jednotlivých spár, je naopak z hlediska dynamiky tepelných změn systému nejhorší.

5.4.1.4 Shrnutí analýzy jednoduché geometrie spár s TVG v granitovém bloku

Přítomnost vyvinutého TVG v přírodním puklinovém systému s rozevřením puklin nejčastěji v desetinách a setinách mm tepelné charakteristiky masivu téměř nepozmění. Přínos vyvinutého geopolymeru spočívá především v možnosti budování umělých úložišť s řízeným poměrem geopolymeru a výplňového kameniva.

Optimalizace jednoho z parametrů úložiště lze provést jen při „zafixování“ ostatních, ale je platné pouze pro danou geometrii a okrajové podmínky (včetně časově proměnných). Při rozdílné době plnění bude optimální jiný poměr vodivé a akumulační složky úložiště.

Veškeré uvedené hodnoty byly simulovány v dvourozměrném uspořádání a vztaženy na jeden metr hloubky. Při rozdílném prostorovém uspořádání lze výsledky extrapolovat do třetí prostorové dimenze pouze orientačně.

5.4.2 Analýza průměru odběrných trubic a způsobu simulace odběru

Pro odběr tepla z úložiště byl finálně zvolen princip transportu teplonosnou tekutinou – v tomto případě vzduchem. Tato metoda v závislosti na předpokládaných teplotách umožňuje vyvíjení páry a zpětnou výrobu elektrické energie. Zároveň realizace takového způsobu odběru je jedna z nejméně komplikovaných. Z hlediska designu prototypu úložiště bylo předmětem výpočtů počet a průměr trubic výměníku. Déle jsou popsány práce zabývající se vlivem průměru sběrných trubic na rychlost a teplotní parametry odběru tepla z úložiště. Porovnány jsou způsoby simulace odběru tepla proudícím vzduchem.

V úvodní části jsou porovnávány výpočty tří navrhovaných průměrů trubic, ve kterých proudí vzduch odčerpávající uložené teplo. V druhé části kapitoly vycházející z identických simulací je srovnán aproximativní výpočet odběru tepla Newtonovým zákonem ochlazování s numericky náročnějším řešením, ve kterém je nejprve vypočteno turbulentní proudění vzduchu uvnitř trubic, které je v druhém kroku spárováno s transportem tepla.

5.4.2.1 Geometrie modelu tepelného úložiště

Navrhovaná geometrie jádra tepelného úložiště měla tvar krychle o straně 800 mm. Ta je sestavena z řezaných granitových kostek s hranou 90 mm. Spára mezi kostkami široká 10 mm je vyplněna TVG. Tepelně akumulační jádro je zaizolováno. Spodní část je izolována podlahovou izolací Foamglas (z důvodu zvýšeného nároku na pevnost) a na zbytku stěn byla navržena izolace RockWool.

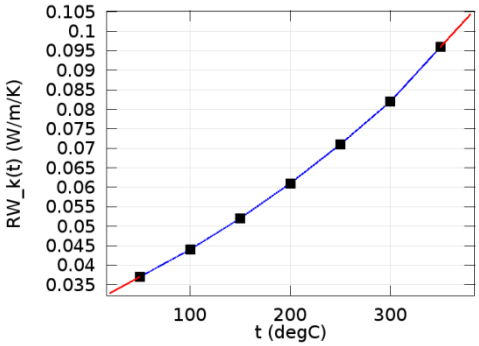
V modelu je akumulační jádro vyhříváno čtyřmi 60cm topnými tyčemi umístěnými na diagonálách vnitřního jádra. Zpětný odběr tepla je realizován tepelným výměníkem s nuceným prouděním vzduchu. Na vstupu výměníku do úložiště je objekt rovnoměrně rozdělující přívod vzduchu do čtyř trubic, které procházejí přímo akumulačním jádrem a jsou s ním spojeny TVG. Pro účely simulace je z důvodů vysokých výpočetních nároků rozdělovací objekt vzduchotechniky zanedbán a čtyři chladící trubice jsou v zadání modelu vyústěny až na povrch izolace.

Pro účely návrhu prototypu úložiště byl simulován průměr sběrných trubic 1.5, 2.0 a 3.0 palce. Odběr tepla byl simulován Newtonovým zákonem ochlazování (27). Velikost odběru tepla byla porovnávána při simulované rychlosti proudění vzduchu 10 $m \cdot s^{-1}$. Pro variantu s 2“ trubicemi byl vypočten i model s rychlostí proudění 3 $m \cdot s^{-1}$. Jeho řešení bylo porovnáváno s modelem, ve kterém bylo numericky řešeno turbulentní proudění vzduchu uvnitř trubic a následně řešen transport tepla tímto proudícím vzduchem (viz kapitola 4.3).

5.4.2.2 Materiálové charakteristiky

Použité výpočtové parametry pro granit a TVG již byly uvedeny na Obr. 22. Parametry ostatních materiálů jsou v tabulce na Obr. 45, pro izolaci RockWool je výrobcem udávána i závislost tepelné vodivosti na teplotě (viz graf na Obr. 45). Izolace RockWool vykazuje v předpokládaném rozsahu teplot zvýšení koeficientu tepelné vodivosti na více než dvojnásobek, proto byla tato závislost na teplotě zanesena i do matematického modelu.

	tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1}K^{-1}$]	tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1}K^{-1}$]	hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
Foamglas	0.044	800	115
RockWool	0.037	840	15
Vzduch	0.025	1.005	1.205



Obr. 45 Vlevo tabulka materiálových vlastností; vpravo závislost tepelné vodivosti na teplotě izolace RockWool HD Wired Mat.

Parametry proudícího vzduchu jsou převzaty z databáze tepelných vlastností materiálů COMSOL. Je uvažována závislost tepelné vodivosti, kapacity i hustoty na teplotě a tlaku.

5.4.2.3 Varianty řešení

Simulace byla realizována dvěma přístupy. První výpočetně méně náročný přístup obsahuje zjednodušené řešení odběru tepla z úložiště skrze stěny trubic. Na stěnách trubic je simulováno ochlazování Newtonovým zákonem (27) s parametry představujícími proudění ve sběrných trubicích, ze kterých je stanoven koeficient přestupu tepla.

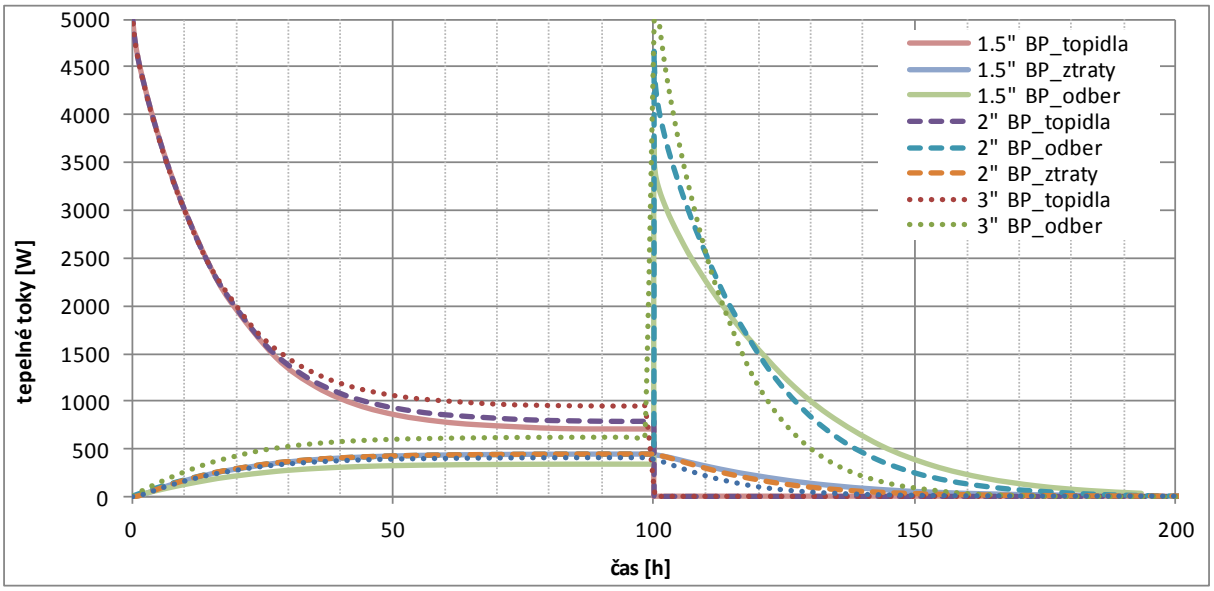
Při druhém přístupu je simulace rozdělena do dvou kroků. V prvním kroku je simulováno samotné turbulentní proudění vzduchu za pomocí Navier-Stokesovy rovnice (31). V druhém kroku je proudění spárováno se simulací transportu tepla (18) v celé modelové doméně a je tak simulován nejen přenos kondukcí, ale také konvekcí proudícího vzduchu.

Omezení prvního přístupu spočívá v neznalosti nárůstu teploty vzduchu uvnitř sběrného potrubí a proto je uvažována konstantní teplota po jeho celé délce, což vede k vyhodnocení vyššího přestupu tepla z úložiště do teplonosné tekutiny oproti předpokládané skutečnosti. Druhé omezení spočívá v tom, že i při nulové rychlosti proudící tekutiny, je vzhledem ke způsobu výpočtové aproximace, simulován odběr tepla. Nevýhodou druhého přístupu založeném na nezjednodušeném způsobu simulace je jeho výpočetní náročnost.

Ohřev úložiště je simulován tak, že v prvních okamžicích dodávané teplo nepřesáhne 5 kW příkonu a zároveň na topných tyčích není překročena cílená teplota úložiště 400 °C.

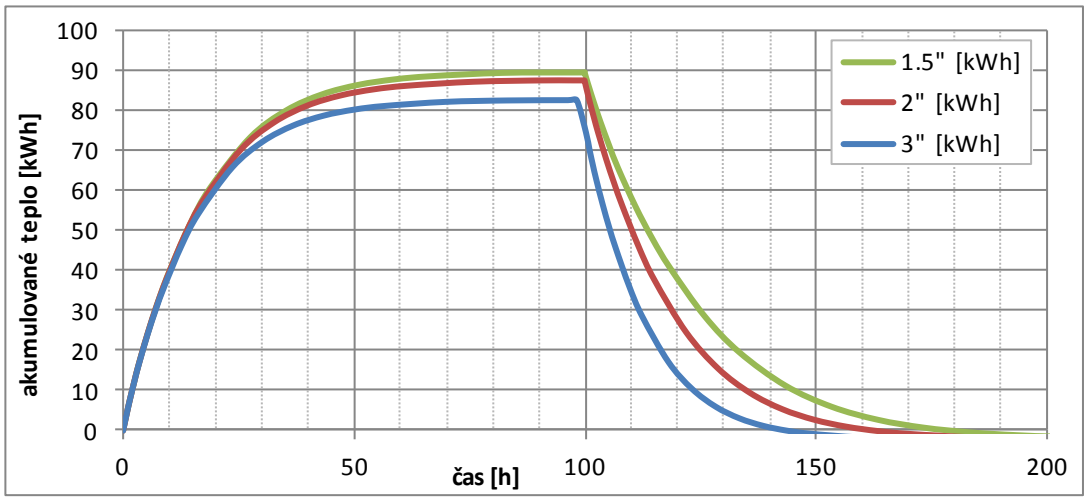
Ve všech variantách simulací byl prvních 100 hodin simulován ohřev, druhých 100 hodin byl realizován odběr tepla.

Průběh energetických toků simulací založených na odběru tepla při využití Newtonova zákona ochlazování (první - výpočetně méně náročný přístup) je znázorněn na Obr. 46. Ztráty tepla pláštěm úložiště jsou ve všech třech variantách téměř totožné. S rostoucím průměrem trubic se zvyšuje počáteční odběr tepla z akumulačního jádra, zároveň rychleji klesá intenzita odběru z důvodu rychlejšího vyčerpání zásob tepla. K podkročení odběru 1 kW dochází u 1.5“ varianty po 30 hodinách, ve variantě 3“ trubic o 10 hodin dříve.



Obr. 46 Průběh energetických toků v modelech.

Na Obr. 47 je vynesen průběh zásob tepla při plnění a odběru tepla z akumulačního jádra tepelného úložiště. Trend menšího nabití úložiště s větším průměrem trubic výměníku je nutné přisoudit větším simulovaným ztrátám během nabíjení. Tento jev je patrný i na rozložení teplot v řezech modelem, které jsou vyobrazeny v Příloze 3.1



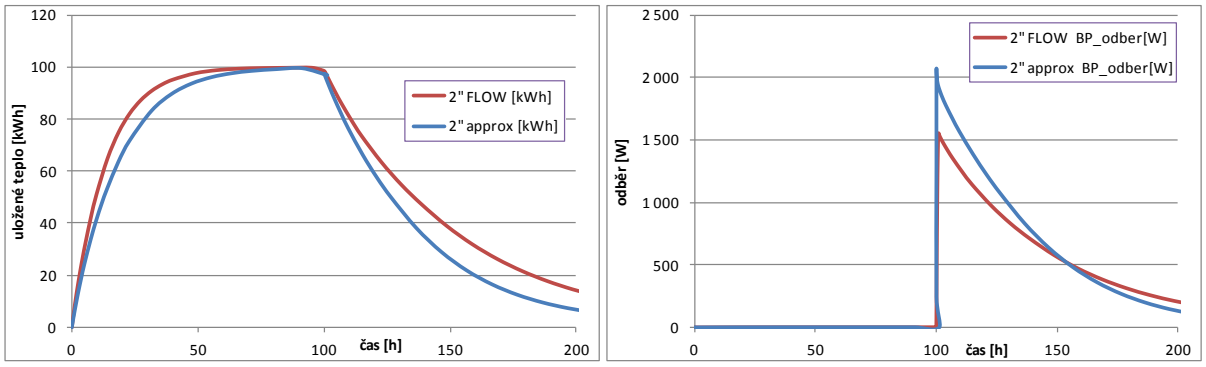
Obr. 47 Plnění a prázdnění akumulačního jádra pro tři různé geometrie.

5.4.2.4 Porovnání způsobů výpočtu odběru tepla v tepelném výměníku

Varianta s 2“ chladícími trubicemi byla vybrána jako vhodná pro budoucí realizaci a proto pro ni byly prováděny další porovnání. Bylo provedeno srovnání způsobů výpočtu odběru tepla a také byl stanoven průběh teploty vycházejícího vzduchu při rychlostech 3 a 10 $m \cdot s^{-1}$.

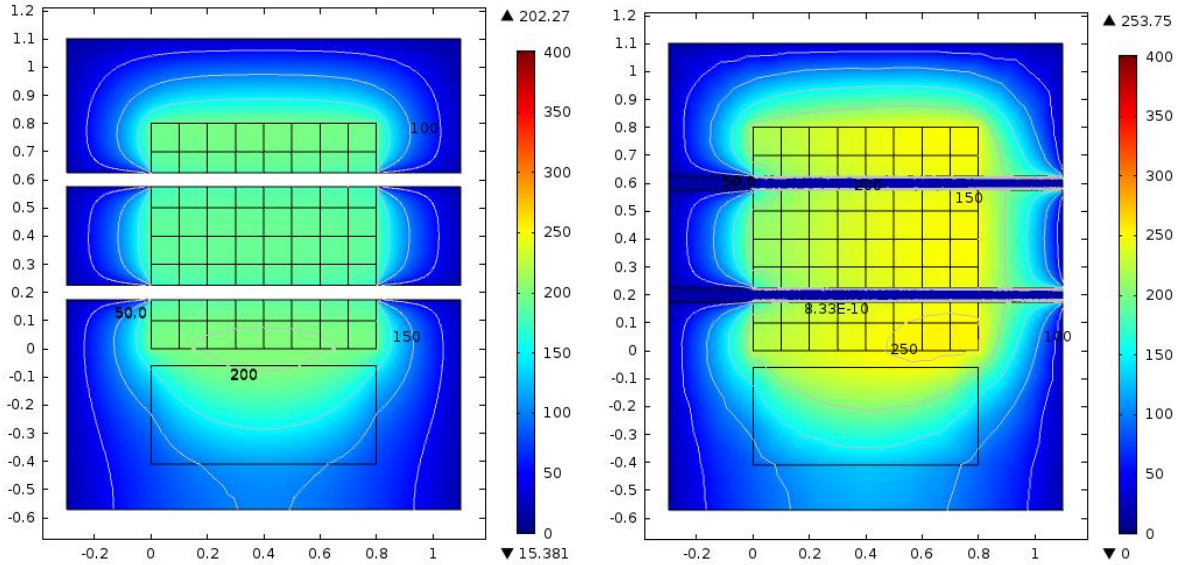
Na Obr. 48 jsou výsledky dvou simulací s cílem dokumentovat rozdíly výsledků při odlišném způsobu simulace odběru tepla. Je porovnávána aproximace Newtonovým zákonem ochlazování s přesnějším, ale náročnějším, výpočtem transportu tepla turbulentním prouděním uvnitř trubic výměníku. Varianta s turbulentním prouděním je v grafech označena *2“ FLOW* a varianta s aproximací ochlazování *2“ approx*. Na levém grafu je znázorněno celkové množství akumulovaného tepla, vpravo pak množství vypočteného odebíraného tepla. Pomalejší nabíjení varianty s aproximaci je dán malým odběrem na stěnách trubic i ve fázi ohřívání.

Z grafu tepelných toků (viz pravý graf na Obr. 48) je patrné, že model používající Newtonovu aproximaci, odběr tepla z úložiště nadhodnocuje. To je pravděpodobně dáno zanedbáním nárůstu teploty vzduchu uvnitř trubic ve směru jeho proudění a tím i klesajícím přestupem tepla do trubic tepelného výměníku. Důsledek je dobře patrný na Obr. 49.



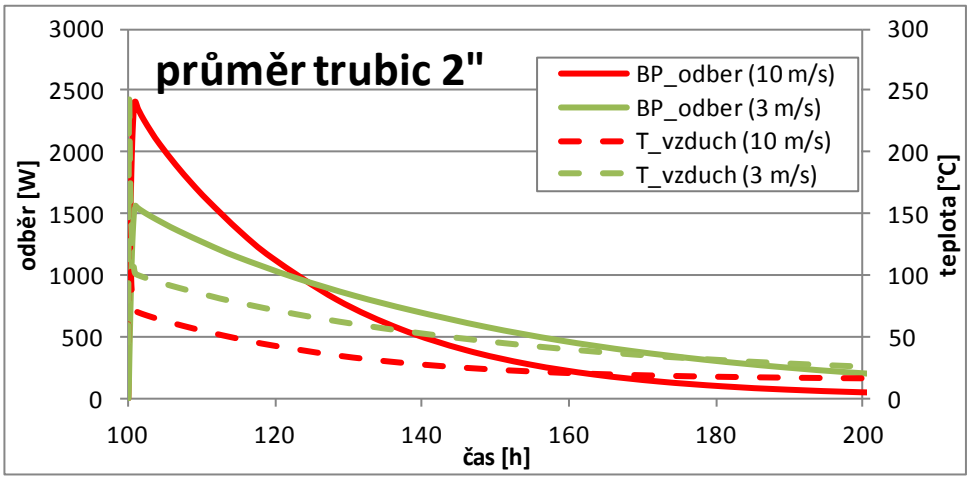
Obr. 48 Porovnání způsobů výpočtu, vlevo průběh uloženého tepla v jádru úložiště; vpravo průběh hodnot odběru tepla.

Na Obr. 49 jsou vyneseny řezy modelem úložiště po 20 hodinách odběru tepla proudícím vzduchem. Vlevo je vidět symetrický tvar izolínií teploty, na obrázku vpravo se projevuje směr proudění vzduchu zleva doprava. V tomto směru je patrný i nárůst teploty, který je způsoben nižším odběrem tepla z úložiště již ohřátým vzduchem. Pro srovnání lze uvést maximální zobrazené teploty v řezech. Ve variantě s aproximací je to 202.27 °C, zatímco ve variantě s prouděním je maximální simulovaná teplota 253.75 °C.



Obr. 49 Rozložení teplot v ose úložiště po 20 h ochlazování. Vlevo řešení aproximací, vpravo s turbulentním prouděním.

Z modelu s turbulentním prouděním vycházejí i simulace teploty vystupujícího vzduchu při dvou různých rychlostech proudění. Na Obr. 50 je porovnán model s 2“ trubicemi výměníku při rychlostech proudění 3 a 10 $m \cdot s^{-1}$. Na pravé svislé ose je uveden odběr tepla (plné linie, označené jako *BP_odber*) a na levé svislé ose je teplota vystupujícího vzduchu (čárkované linie, označené jako *T_vzduch*). Po 25 hodinách (od začátku prázdnění) se průběhy hodnot odebíraného tepla protínají přibližně na hodnotě 1000 W. Vyšší rychlost proudění vzduchu vede k vyššímu počátečnímu odběru tepla, ale nižší teplotě vycházejícího vzduchu. Zásoby tepla poblíž chladících trubic se při rychlejším proudění rychleji vyčerpají a po 25 hodinách hodnota odběru podkročí hodnoty odběru tepla při simulované nižší rychlosti proudění vzduchu.



Obr. 50 Porovnání výsledků simulace

Při návrhu prototypu úložiště byl kladen značný zřetel na maximální znalost a jednoznačné definování jeho vnitřní geometrie a možnosti věrně toto úložiště modelovat v co největším detailu.

5.5 Laboratorní model tepelného úložiště

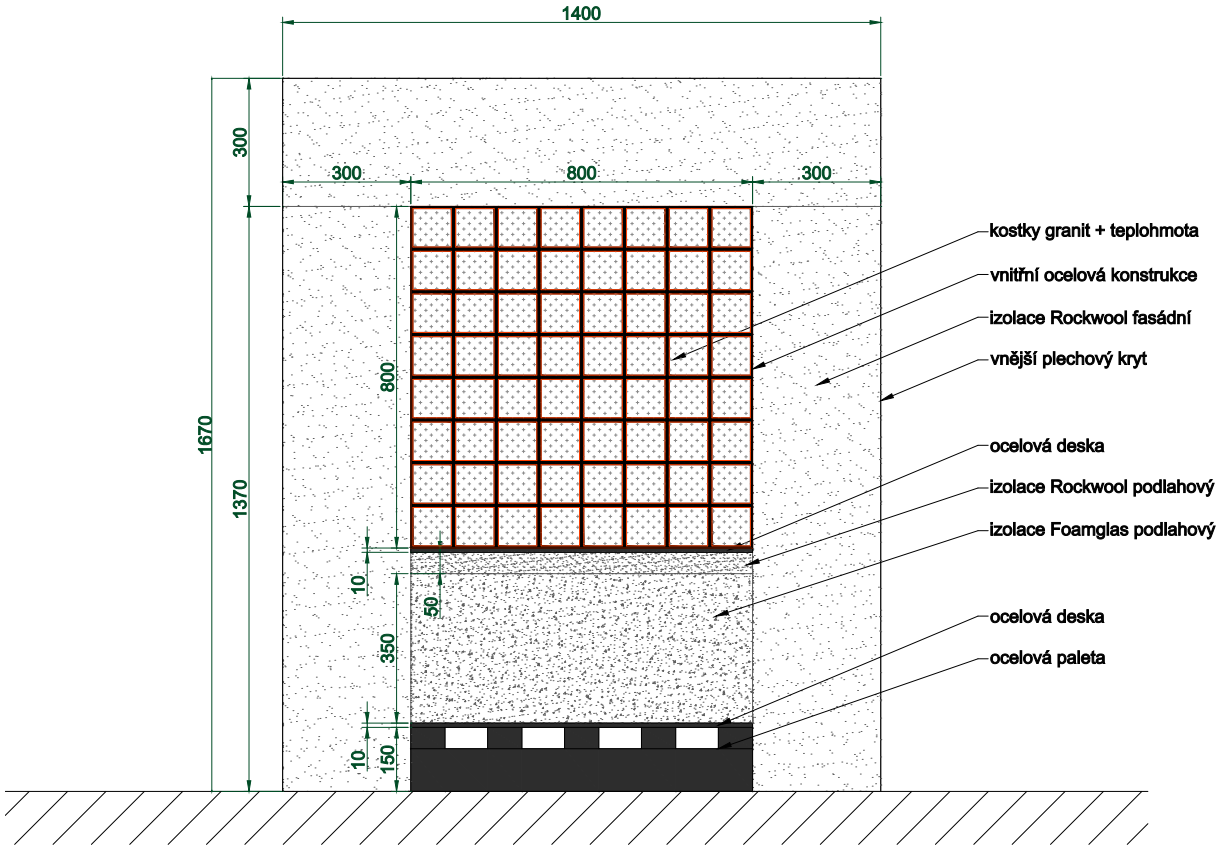
Prototyp vysokoteplotního tepelného úložiště energie vychází z výsledků laboratorních zkoušek materiálů a matematických simulací termodynamického zatěžování modelových variant. Bylo navrženo zařízení, které může jímat elektrickou energii v podobě tepla, za co nejmenších ztrát je tuto energii schopno uchovávat a nakonec ji odevzdávat. Jako materiálem, který je schopen tepelnou energii uchovávat je použita hornina, která byla vyhodnocena s nejvhodnějšími tepelnými vlastnostmi. Touto horninou je granit z lokality Panské Dubenky. Podstatné je, že vybraná hornina má co nejvyšší tepelnou vodivost a nejvyšší tepelnou kapacitu, nízkou míru degradace svých mechanických vlastností tepelným zatěžováním. Její další fyzikální parametry jsou v přijatelných mezích (teplotní dilatace, pevnost v tlaku apod.).

Při společných jednáních s jednotlivými subjekty projektu bylo dohodnuto, že laboratorní model úložiště bude složen z kostek z vybrané horniny a mezerní prostor bude vyplněn TVG. K nabíjení úložiště bude docházet pomocí elektrických topných těles a jeho vybíjení bude realizováno vzdušným tepelným výměníkem. Koncepce úložiště byla navržena co nejjednodušeji s ohledem na možnosti výroby i matematického modelování.

Obr. 51 Fotografie ze stavby akumulačního jádra. Konglomerát granitových kostek a TVG. (Lachman et al., 2014)

Jádro úložiště bylo navrženo kubické s objemem akumulační části cca 0.5 m^3. Dálka strany krychle je 800 mm. Jádro je tvořeno granitovými kostkami o hraně 90 mm a spárami s rozevřením 10 mm vyplněnými TVG (viz Obr. 51). Pro laboratorní experiment byly použity kostky řezané s přesností 2 mm. Přesná geometrie řezaných kostek byla zvolena z důvodu co možná nejpřesnější reprezentace matematickým modelem. Při praktickém využití navrhovaného úložiště by mohly být použity kostky štípané, drcené kamenivo či hrubý štěrk míchaný s TVG.

Jádro je uloženo v ocelové konstrukci z L-profilů umístěných na hranách jádra a pozinkovaným plechem překrývající stěny. Vespod jádra je ocelová roznášecí deska. Důležitou součástí úložiště je tepelná izolace. Ve spodní části úložiště je umístěna dostatečně únosná a zároveň tepelně odolná izolace Foamglas, určená pro zatěžované podlahy. Ta je v horní části navíc opatřena vrstvou vermikulitu, který snižoval teplotní zatížení Foamglasu. Spodní část tepelné izolace byla spolu s jádrem úložiště položena na dostatečně únosné a tepelně odolné ocelové paletě, která zároveň umožnila mobilitu laboratorního modelu. Na bocích a na horní straně bylo úložiště osazeno 300 mm silnou vrstvou tepelně izolačního materiálu RockWool (bez impregnační pryskyřice). Z vnějšku bylo těleso úložiště oplechováno. Celkové rozměry a uspořádání úložiště je patrné z Obr. 52 a Přílohy 4.1.



Obr. 52 Rozměry laboratorního prototypu tepelného úložiště bez vyobrazeného vzdušného výměníku.

Nabíjení úložiště bylo realizováno 5 elektrickými ohřevnými tyčemi délky 400 mm a průměrem 12 mm. Každá tyč má maximální příkon 500 W. Úložiště bylo opatřeno 17 teplotními čidly pro monitoring teploty a 5 teplotními čidly pro termoregulaci topných tyčí. Jejich rozmístění je dokumentované v Příloze 4.1.

S ohledem na jednoduchost realizace bylo pro vybíjení zásobníku navrženo vzduchové vyfukování. Jádro zásobníku je opatřeno 4 tenkostěnnými ocelovými trubicemi o průměru 60 mm, které jsou vyústěny na bocích do plechových sběrnic, ze kterých jsou vyvedeny vně plechové roury o průměru 120 mm. Pohyb vzduchu je zajištěn pomocí ventilátoru s regulovatelnými otáčkami. Ventilační potrubí je opatřeno měřičem průtoku a teploty vzduchu.

Ve směru proudění za tepelným jádrem je umístěn slučovací prvek (totožný s rozdělovacím prvkem), který ústí do jedné 120 mm široké výstupní trubice. Na fotografii vlevo na Obr. 53 je zobrazeno jádro bez instalovaného rozdělovacího prvku vzdušného výměníku, vpravo na témže obrázku je již rozdělovací prvek instalován. Průběh teplot a měření průtoku vzduchu bylo registrováno do digitálního záznamového zařízení. Spotřeba elektrická energie potřebná pro nabití úložiště byla měřena elektromeřem. Celkový pohled na konečnou podobu laboratorního prototypu vysokoteplotního tepelného úložiště energie je na Obr. 54.

Obr. 53 Fotografie z průběhu výstavby prototypu tepelného úložiště. Vlevo jádro úložiště bez rozdělovacího prvku vzdušného výměníku, vpravo již probíhá zaizolování akumulačního jádra i spolu s prvky výměníku.

Obr. 54 Fotografie konečné podoby prototypu tepelného úložiště s TVG.

5.5.1 Experimentální provoz laboratorního prototypu

Cílem realizovaného experimentu bylo ověřit funkčnost prototypu a poskytnout data pro vyhodnocení přínosu TVG na termodynamické chování systému. Před spuštěním experimentu bylo úložiště prohříváno na teplotu 80 °C s cílem stabilizovat TVG. Průběh experimentu byl rozdělen do pěti fází (Tab. 21).

V první fázi experimentálního provozu byl prototyp úložiště řízeně zahříván s přírůstkem teploty na topných tyčích 5 °C za hodinu. Po uplynutí 78 hodin byla dosažena cílová teplota topných tyčí 400 °C.

Druhá fáze experimentu probíhala mezi 78. – 167. hodinou od zahájení experimentu. Ustálené vyhřívání při zafixovaných teplotách topných tyčí trvalo 89 hodin.

Ve třetí fázi po dobu 120 hodin (5 dní) probíhal odběr tepla vzdušným výměníkem.

V rámci čtvrté fáze byl spuštěn 48 hodinový cyklický provoz ukládání a odběru tepla. Jeden cyklus se sestával z 24 hodin ohřevu a 24 hodin odběru tepla. Jednotlivé cykly na sebe plynule navazovaly.

V páté fázi byly provedeny dva 96 hodinové cykly s dobou ohřevu 48 hodin. Druhý cyklus byl ukončen až po úplném vychladnutí.

Celková délka experimentu byla 1152 hodin, resp. 48 dní.

Tab. 21 Experiment provozu úložiště - vymezení fází provozu.

fáze provozu	popis provozu úložiště	hodiny
1	počáteční řízené nabití	0-78
2	udržování konstantní teploty	78-167
3	počáteční „úplný“ odběr	167-297
4	cyklický režim (24 hod / 24 hod)	297-720
5	cyklický režim (48 hod / 48 hod)	720-912 (resp. 1152)

5.5.2 Experimentální data

Během experimentu byla zaznamenávána data o jeho průběhu. Po celou dobu byla měřena teplota v místech monitorovacích teploměrů. V době ohřevu byla zaznamenávána teplota i všech pěti regulačních teploměrů topidel. Při zahřívání byl sledován celkový příkon topidel. Během odběru tepla byla zaznamenávána teplota a rychlost proudění vzduchu na vstupu i výstupu z úložiště.

5.5.2.1 Teplota

Za účelem získání dat byl prototyp úložiště osazen teplotními čidly a celý průběh experimentu dynamického tepelného zatěžování byl zaznamenán. Nejvíce teploměrů bylo instalováno uvnitř tepelného jádra.

Teploty byly zaznamenány celkem 25 teplotními čidly. 3 čidla byla situována pro měření povrchové teploty úložiště, 2 čidla byla umístěna na povrchu tepelného jádra, 11 čidel bylo situováno ve spárách mezi granitovými kostkami uvnitř tepelného jádra, 1 teploměr byl zavrtán ve středu krajní kostky. Během ohřevu byla zaznamenávána data z 5 regulačních čidel v topných tyčích, během odběru byla sledována teplota na vstupu a výstupu tepelného výměníku.

Rozmístění teplotních čidel dokumentuje Příloha 4.1. Následuje zdůvodnění umístění jednotlivých čidel.

T1, T2, T3 – určení gradientu v úložišti vlivem vyfoukání (rohová oblast),

T5 – čidlo situováno uvnitř granitové kostky (zbylá čidla v TVG),

T6 – určení gradientu v úložišti vlivem vyfoukání (centrální oblast),

T11 – ověření míry symetrie rozložení teplot při bázi a povrchu úložiště,

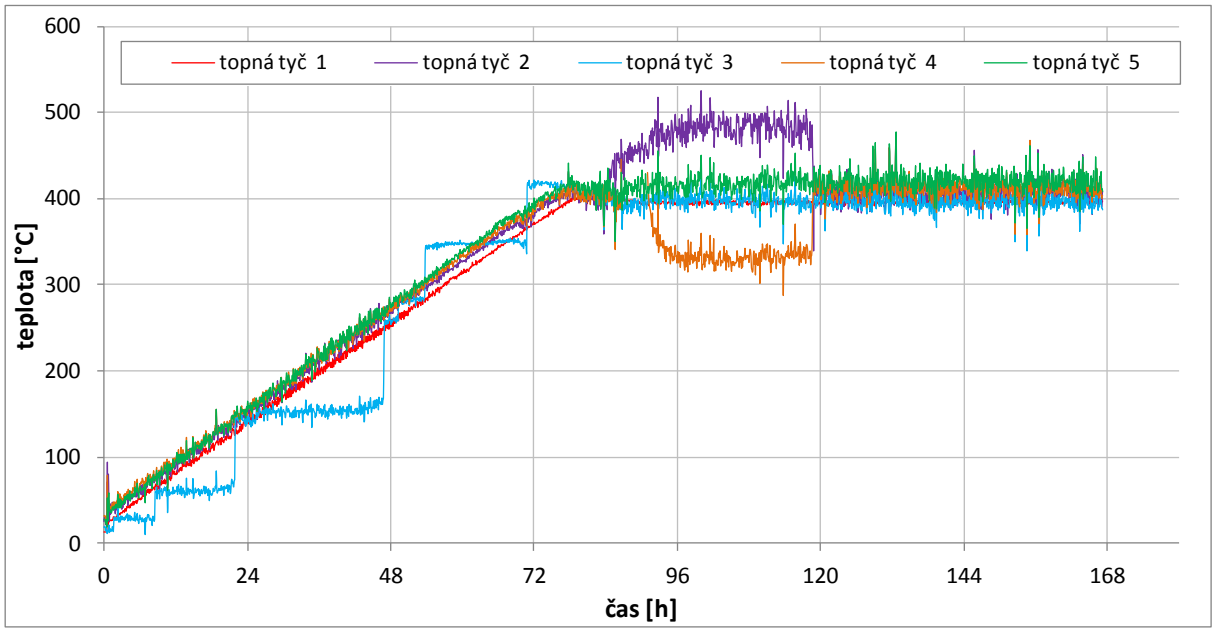
T9 – teplota na styku s trubicí tepelného výměníku,

T2,T5,T7,T8,T9,T10 – detailní zjišťování teplot v centrálním příčném řezu úložištěm (uvedená čidla jsou situována v TVG),

T14, T15 – porovnání teplot v místě styku tepelného jádra a izolace,

T16, T17, T18 – teplota povrchu úložiště (16, 17 v ose centrálního řezu úložištěm; 18 roh izolace).

Časové řady naměřených teplot na topných tyčích za celé období experimentu jsou vyneseny v grafu Přílohy 4.2. Průběh teplot je mírně rozkolísaný. Tento fakt je dán způsobem regulace příkonu - zadaná teplota topných tyčí byla udržována „iterativně“, vypínáním a zapínáním na nominální výkon. Vyhlazené teploty z první fáze jsou zobrazeny v Příloze 4.3, zaznamenané na Obr. 55.



Obr. 55 Zaznamenaný průběh teplot topných tyčí - fáze 1 a 2.

Ustálené teploty na topných tyčích (120 - 168 hod po zahájení experimentu) se pohybují v intervalu 30 °C okolo teploty 400 °C (viz Obr. 55). V době vypnutého vyhřívání nebylo možné teploty topných tyčí zaznamenávat. Teplotu topné tyče 3 (v centrální oblasti akumulačního jádra) bylo v první fázi řízeného ohřívání nutné nastavovat manuálně z důvodu výpadku funkce samoregulace.

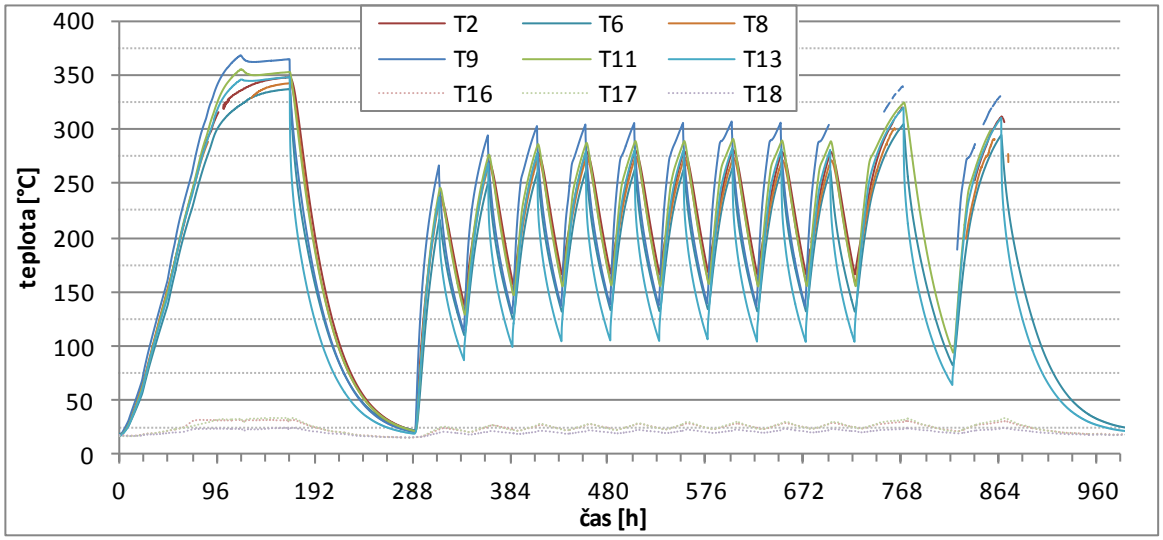
Z důvodu ztráty funkčnosti nejsou záznamy teploty ze všech instalovaných čidel kompletní. Dostupná data z teploměrů instalovaných v úložišti (T1-18) jsou vynesena v Příloze 4.4. Průběhy časových vybraných řad teplot pokrývajících trvání celého experimentu jsou v grafu na Obr. 56.

Pro naměřená data lze konstatovat:

- Nejnižší teploty byly v souladu s předpoklady naměřeny na povrchu tepelného úložiště (teploměry 16, 17, 18). V první fázi (nabité úložiště) se teploty pohybovaly v rozmezí 23 - 34 °C. V období cyklického zatěžování (fáze 4) byly naměřeny povrchové teploty úložiště v rozmezí 19 - 29 °C. Teplota čidla na horním povrchu (T16) a teplota na boční stěně (T17) byla téměř totožná - konvektivní ochlazování horní plochy a boční

stěny je přibližně shodné. Nejnižší teploty byly trvale měřeny na čidle T18 (situováno na rohu pláště tepelného úložiště).

- Nejvyšší teploty se v úložišti vyskytovaly v místech zdrojů tepla (topné tyče). Po ustálení (fáze 2) i v době cyklického zatěžování (fáze 4) byla teplota topných tyčí cca 400 °C.
- Nejvyšší teplota v prostoru úložiště (mimo topné tyče) byla měřena na čidle T10. (situováno na myšlené spojnici topných tyčí 1 a 3 - viz Příloha 1.1). Anomálie v regulaci topné tyče 3 se na průběhu teploty čidla T10 projevují zrychlením nárůstu teploty v návaznosti na jednotlivá ruční přenastavení teploty topné tyče.
- V souladu s předpoklady byla druhá nejvyšší měřená teplota v prostoru úložiště dosahována na čidle T9 (konec druhé fáze - cca 365 °C).
- V době ustálení (konec fáze 2) by teploty na čidlech T12 a T13 měly být přibližně totožné. Měřený rozdíl je cca 10°C. Obdobně by shodnou teplotu měly zaznamenávat čidla T1 a T3. V naměřených úsecích řízeného ohřevu (v období ustálení teplot v úložišti se vyskytla porucha) se teplota také mírně liší - cca do 10°C. Popsané rozdíly teplot lze zřejmě přičíst vzniklým nehomogenitám při výstavbě tepelného úložiště, nehomogenitám vzniklým v důsledku nevratné změny při tepelném namáhání, případně částečné degradaci TVG v nejbližším okolí topných tyčí.
- Anomálie dosažených teplot na topné tyči 2 (mezi 96 - 120 hod; průměrná teplota cca 480 °C) se zřetelně projevuje na zaznamenaných teplotách čidel T9, T5 a T11 tím, že před nastolením ustáleného stavu (konec druhé fáze) v nich teplota mírně klesala.
- Obdobně dlouhá anomálie dosažených teplot na topné tyči 4 (mezi 96 - 120 hod; průměrná teplota cca 330 °C) se projevuje na zaznamenaných teplotách čidel T6 a zejména T8. Před nastolením ustáleného stavu v nich teplota výrazněji rostla.
- Přibližně po třetím cyklu došlo k ustálení dosahovaných maximálních a minimálních teplot úložiště při plnění a prázdnění (fáze 4).
- Maximální měřené teploty úložiště na konci cyklů nabíjení jsou průměrně cca 80 °C pod hodnotami teplot zaznamenaných při plném nabití (konec druhé fáze).

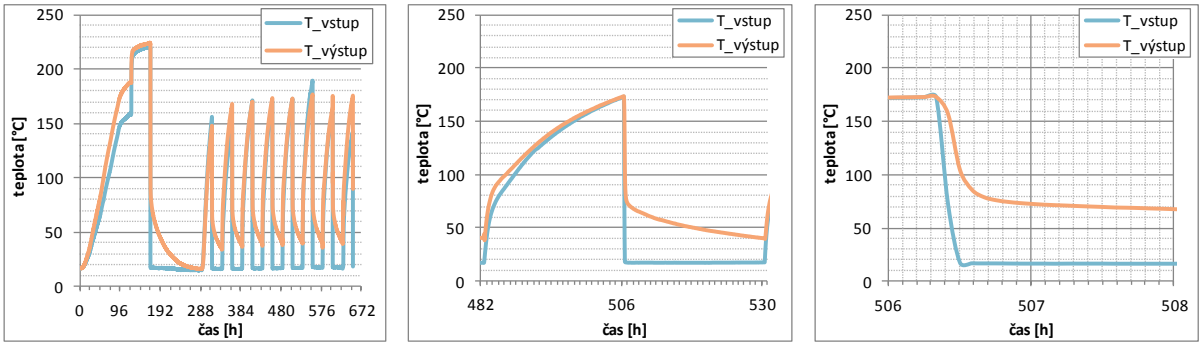


Obr. 56 Časový průběh teplot při testu tepelného úložiště z vybraných teploměrů.

5.5.2.2 Proudění vzduchu

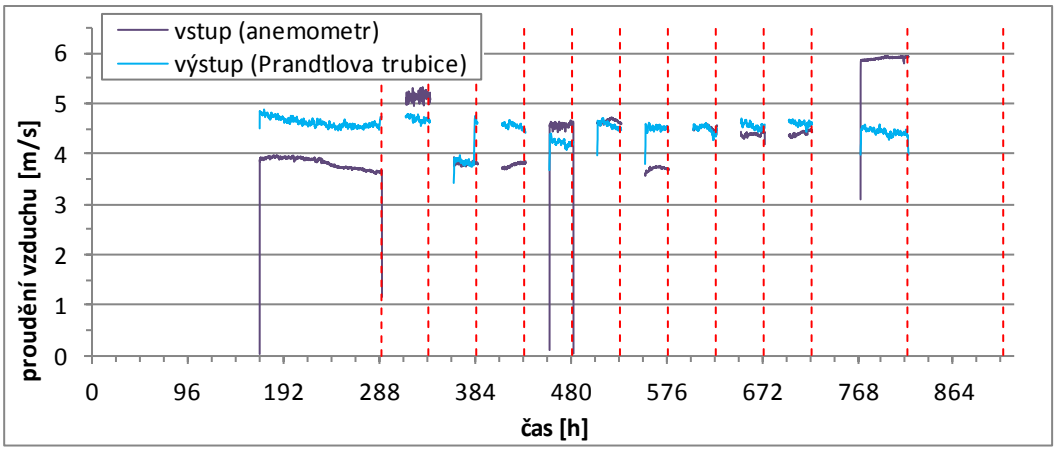
K odběru tepla z úložiště docházelo proudícím vzduchem v tepelném výměníku procházejícím akumulačním jádrem. Cirkulace vzduchu byla zajištěna ventilátorem umístěným na vstupní straně výměníku (bez možnosti regulace). Na vstupu i výstupu z výměníku byla monitorována teplota a rychlost proudění vzduchu.

V Příloze 4.5 a na Obr. 57 jsou vyneseny průběhy teplot zaznamenané v přívodní a výstupní trubici tepelného výměníku. Při cyklickém ohřevu byla vstupní i výstupní trubice zatěsněna tepelnou izolací, proto teploty částečně kopírují trend vnitřních teplot. Na Obr. 57 uprostřed je detail pátého cyklu 48 hodinového poloprovozu - mezi 482. až 506. hodinou probíhá nabíjení úložiště a teploty vzrůstají z 20 °C na vstupu (resp. 40 °C na výstupu) na totožnou teplotu 170 °C. Po aktivaci ventilátoru v tepelném výměníku dochází k rychlému poklesu teplot. Na Obr. 57 vpravo je dvouhodinový výřez zahrnující spuštění ventilace. Během cca hodiny teplota vystupujícího vzduchu z úložiště klesla ze 170 °C na 80 °C. Poté dochází téměř k lineárnímu poklesu po celou dobu odběru ke konečné teplotě 40 °C. Teplota vstupujícího vzduchu po aktivaci ventilace klesá dle očekávání na teplotu okolí během prvních 10 minut. Teploty zaznamenané během celého experimentu jsou vyneseny v příloze 4.4



Obr. 57 Záznam teplot ve vstupní a výstupní trubici vzdušného výměníku, zleva doprava: celý experiment; jeden cyklus; detail spuštění odběru.

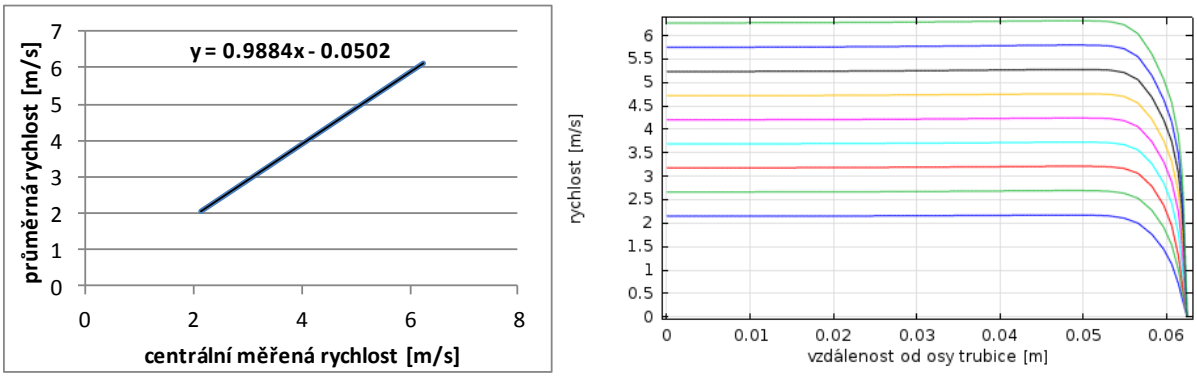
Pro účely stanovení energetické bilance byla monitorována rychlost proudění vstupního a výstupního vzduchu do tepelného výměníku. Proudění vzduchu zajišťoval ventilátor umístěný před vstupem do výměníku. Na vstupu byla rychlost zaznamenávána zchlazovacím anemometrem. Z důvodů zvýšené teploty byla na výstupu pro měření rychlosti vzduchu použita Prandtlova trubice. Zaznamenané hodnoty z obou měřících zařízení jsou vyneseny v grafu na Obr. 58. Hodnoty získané anemometrem vykazují vyšší rozptyl, ačkoli rychlost proudění by měla být ustálená. Hodnoty se pohybují mezi 3.8 až 5 $m \cdot s^{-1}$ (resp. 6 $m \cdot s^{-1}$ v předposledním cyklu). Rychlosti proudění vzduchu měřené Prandtlovou trubicí mají méně rozkolísaný charakter. Získané hodnoty se pohybují nad rychlostí 4.5 $m \cdot s^{-1}$. Při detailním pohledu se ve vývoji rychlostí na výstupu projevuje mírně klesající trend. Ten lze vysvětlit klesající teplotou vystupujícího vzduchu, resp. menší změnou objemu při zahřátí konstantního množství vstupujícího vzduchu. V době ukončení prvotního odběru (288. hodina; fáze 3) by se rychlosti proudění vzduchu na vstupu a výstupu měly rovnat. Měření je patrně zatíženo chybami.



Obr. 58 Zaznamenaný průběh rychlostí proudění na vstupu a výstupu tepelného výměníku.

Pro výpočet objemu proudícího vzduchu ve výstupním potrubí tepelného výměníku byla pomocí simulací stanovena závislost měřené bodové rychlosti v_m a průměrné střední rychlosti v_p v celém profilu. Výsledná funkční závislost (33) a profily rychlostí jsou vyneseny na Obr. 59. Při užití tohoto vztahu vychází průměrná rychlost přibližně o 3 % nižší než je rychlost měřená.

$$v_p = 0.9884 \cdot v_m - 0.0502 \qquad (33)$$

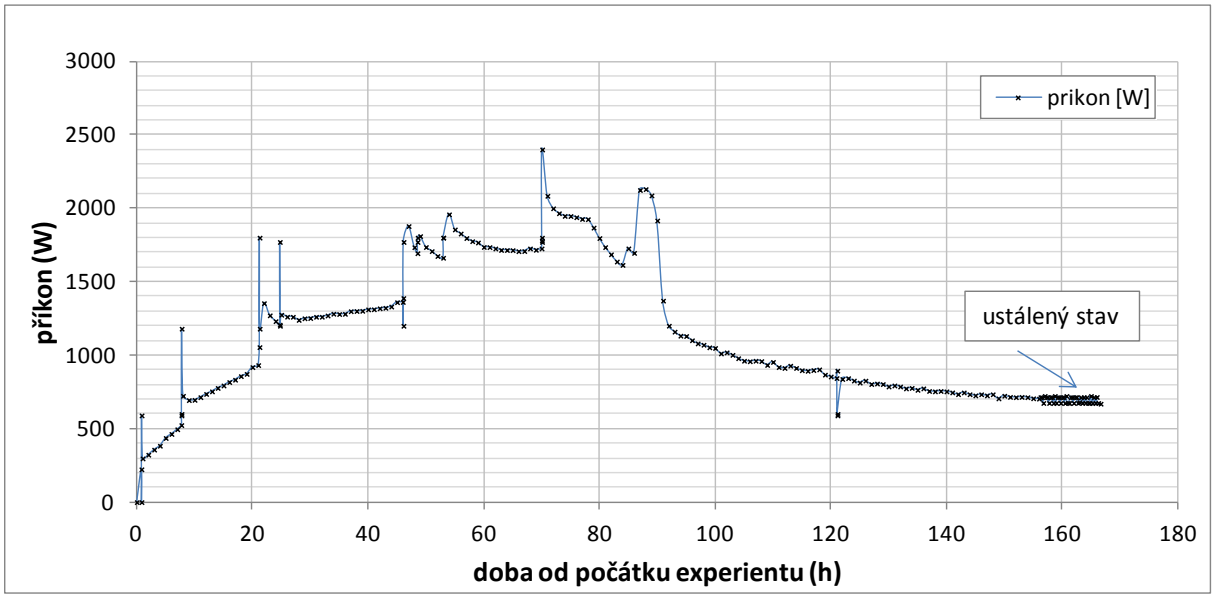


Obr. 59 Stanovení závislosti průměrné a bodové rychlosti (vlevo); profil rychlostí turbulentního proudění v trubici r = 0.062 m (vpravo).

5.5.2.3 Příkon

Příkon jednotlivých topných tyčí nebyl přímo zaznamenáván. Topné tyče byly napojeny přes digitální elektroměr zobrazující kumulativní příkon dohromady. Digitální elektroměr byl snímán kamerou. Záznam byl zpracován manuálně, hodnoty z elektroměru byly zpracovány v počátku a konci jednotlivých cyklů a v mezidobí v hodinovém kroku. Derivací získaných hodnot dle času byl stanoven průměrný příkon do topných tyčí v dané periodě. Graf průběhu příkonu po celé období experimentu obsahuje Příloha 4.6.

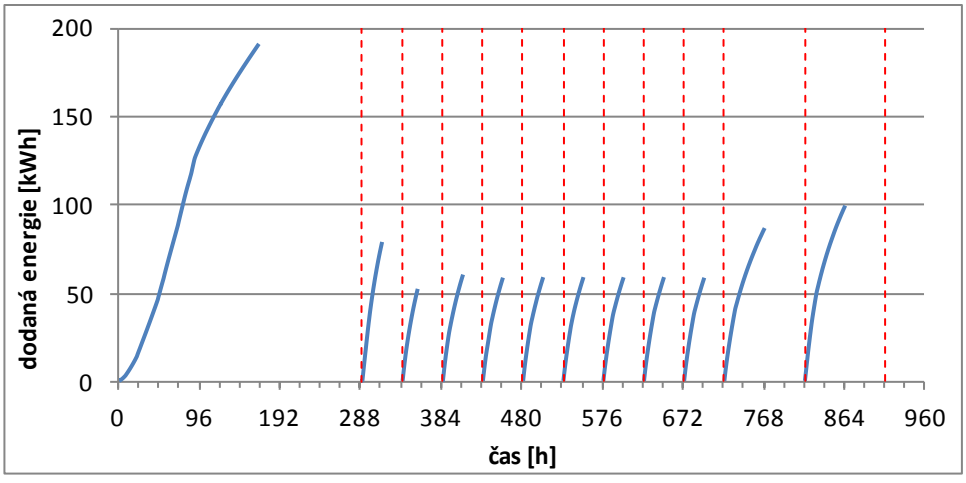
Příkon topných tyčí ve fázi řízeného ohřívání (0 - 80 hod; Obr. 60) postupně rostl. Skokové nárůsty hodnot příkonu se kryjí s obdobími manuálního přenastavení teplot na topné tyči č. 3. Ke konci období (150 - 168 hod) dochází k ustálení příkonu a teplotní změny v úložišti jsou již minimální. Při ustálení teplot odpovídá příkon tepla tepelným ztrátám. Tepelná ztráta úložiště při plném nabití byla stanovena cca 690 W.



Obr. 60 Příkon topných tyčí v období první a druhé fáze experimentu (řízené nabíjení, ustálený stav)

Zdigitalizované hodnoty příkonu jsou vyneseny v grafu Přílohy 4.6. Ve 4. i 5. fázi experimentu (cyklické zahřívání) příkon na počátku každého cyklu vystoupal na hodnotu cca 4400 W. Během prvního cyklu 4. fáze příkon klesal téměř lineárně k hodnotě 2000 W. Od třetího cyklu byl pokles konstantně na 1500 W: Během 48 hodinového ohřevu (5. fáze) příkon klesal k hodnotě 1000 W. Vyšší hodnoty příkonu během prvních dvou cyklů 4. fáze jsou způsobeny úplným vychladnutím jádra při třetí fázi experimentu. V průběhu dalších cyklů není jádro během 24 hodin odběru zpětně vychlazeno na teplotu před začátkem cyklu, a proto v následujícím ohřevném cyklu je zapotřebí méně energie na dosažení stejných teplot.

Na Obr. 61 je vynesen kumulativní vývoj dodané energie do topných tyčí pro jednotlivé cykly. Při prvním prohřátí (fáze 1 a 2) bylo spotřebováno 190 kWh elektrické energie. V prvním 24 hodinovém cyklu bylo dodáno 78.5 kWh. V následujících čtyřiadvacetihodinových cyklech bylo do úložiště obvykle dodáno 58-60 kWh. Ve dvou osmačtyřicetihodinových cyklech bylo spotřebováno 86.4 a 99 kWh.

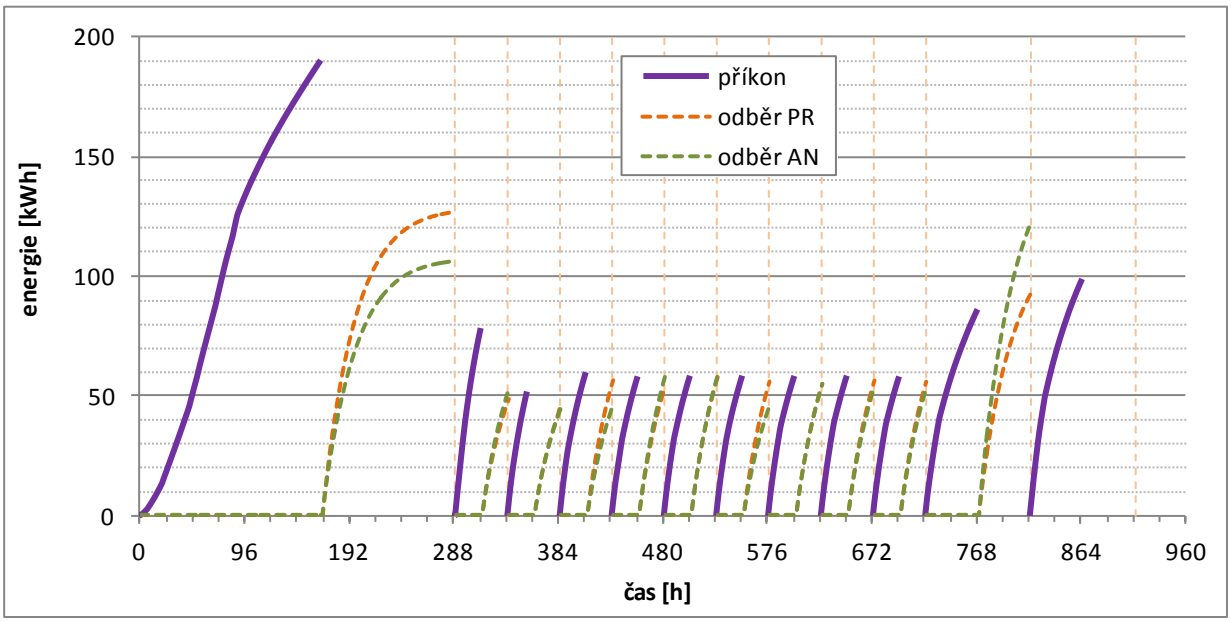


Obr. 61 Kumulativní příkon pro jednotlivé cykly ohřevu.

5.5.2.4 Energetická bilance z měřených dat

V rámci procesu zpracování měřených dat byla sestavena orientační tepelná bilance prototypu tepelného úložiště. Bez modelových výpočtů nelze stanovit průběžné ztráty tepla pláštěm do

okolí úložiště. Ustálená ztráta tepla při plném nabití byla naměřena 690 W (viz předchozí kapitola). Ze součinu rozdílů teplot vstupního a výstupního vzduchu, rychlosti proudění, plochy průřezu výměníku, hustoty a tepelné kapacity vzduchu lze stanovit orientační množství odebraného tepla. Na Obr. 62 je fialově vynesena dodaná energie do úložiště zaznamenaná elektroměrem při ohřevu úložiště. Z důvodu nesouladu měřených dat rychlosti proudění na vstupu a výstupu tepelného výměníku, bylo odebrané teplo stanoveno z obou měřených údajů. Oranžově je vynesen kumulativní průběh odebraného tepla stanoveného z měřených hodnot Prandtlovou trubicí, zeleně je identický výpočet pro data z anemometru. Mimo poslední cyklus, výpočty pro Prandtlovu trubici nadhodnocují oproti výpočtům s daty anemometru.



Obr. 62 Orientační bilance experimentu tepelného úložiště. Odebrané teplo bylo vypočteno na základě rychlostí proudění měřených Prandtlovou trubicí – „odběr PR“, nebo anemometrem - „odběr AN“.

Rozdíl mezi dodanou a odebranou energií reprezentuje ztráty systému do prostoru laboratoře přes vnější plášť. Podle orientačních výpočtů bilance není v průběhu cyklického nabíjení a vybíjení tato ztráta zásadní. Úložiště je dobře izolováno, v testovaných režimech (24 hod a 48 hod cyklus) je v úložišti prostor pro příjem další energie - ztráta tepla přes plášť v době cyklického provozu úložiště nedosahuje hodnotu maximální (690 kW).

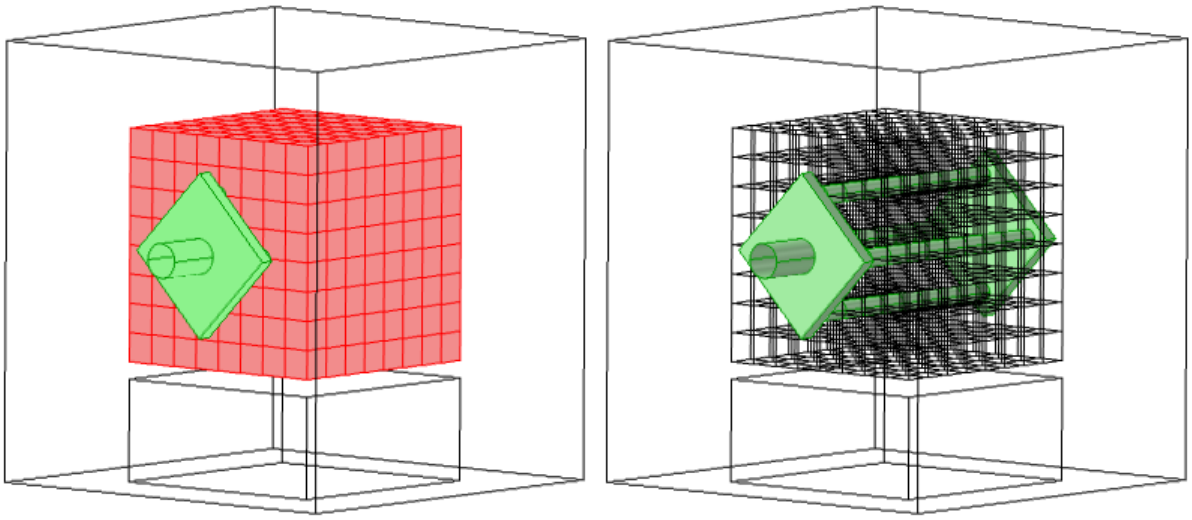
5.5.3 Modelová geometrie tepelného úložiště

V modelové geometrii bylo zadáno jádro tepelného úložiště tvaru krychle se stranou 800 mm, na Obr. 63 červeně. To je sestaveno z 512 krychlí s hranou 90 mm. Spáry mezi kostkami jsou vytvořené jako doplněk jádra ke kostkám. V prostoru jádra jsou spáry široké 10 mm, na okrajích ve styku s pláštěm jsou 5 mm. Plášť tepelného úložiště byl tvořen jen 2D plochami. Rozsah tepelné izolace odpovídá skutečným rozměrům. Tepelně akumulační jádro bylo izolováno 300 mm termoizolace, ve spodní části je zadána kvádrová geometrie izolace Foamglas.

V modelu je zadáno pět 400 mm dlouhých válcových objektů s průměrem 12 mm reprezentující topné tyče umístěné na jeho diagonálách a v centrální části. Uložení topných tyčí je rovnoběžné s trubicemi tepelného výměníku.

Pro odběr tepla je použit vzdušný výměník. Na vstupu výměníku před tepelným jádrem úložiště je umístěn objekt rovnoměrně rozdělující přivedený vzduch do 4 trubic tepelného výměníku. Jeho rozměry jsou 400×400×5 mm. Průměr přívodní trubice (před rozdělovacím objektem) je 120 mm, průměr 4 trubic tepelného výměníku procházejících jádrem úložiště je

60 mm. Ve směru proudění za tepelným jádrem je umístěn slučovací prvek (totožný s rozdělovacím prvkem), který ústí do jedné 120mm široké výstupní trubice.



Obr. 63 Geometrie tepelného úložiště. Jádro červeně, soustava vzdušného tepelného výměníku zeleně.

5.5.4 Materiálové charakteristiky

Pro simulaci a vyhodnocení experimentu s prototypem tepelného úložiště byly použity materiálové charakteristiky ověřené i v předchozích etapách projektu. Parametry granitu z Panských Dubenek i TVG jsou známy v rozsahu teplot 20 až 400 °C. Parametry tepelných charakteristik izolace jsou převzaty od výrobce. Simulována je závislost tepelných charakteristik na teplotě. Vstupní parametry modelu pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce Tab. 22.

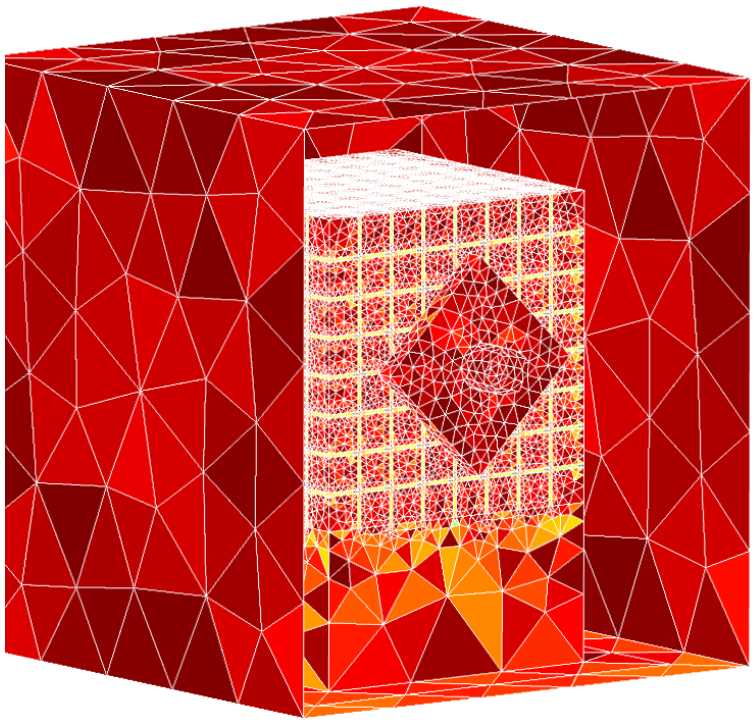
Tab. 22 Materiálové charakteristiky, hodnoty jsou uvedeny pro teplotu 20 °C.

	součinitel tepelné vodivosti λ **[W·m^{-1}K^{-1}]**	**měrná tepelná kapacita** **Cp [J·kg^{-1}K^{-1}]**	**hustota** ρ **[kg·m^{-3}]**
granit PD	viz Obr. 22 – *PD_k(t)*	viz Obr. 22 – *PD_Cp(t)*	2620
tepelně vodivý geopolymer	viz Obr. 22 – *TCG_k(t)*	viz Obr. 22 – *TCG_Cp(t)*	1150
izolace Foamglas	0.044	800	115
izolace RockWool	viz Obr. 45 – *RW_k(t)*	840	15
Vzduch	0.025	1.005	1.205

5.5.5 Výpočetní síť

Pro řešení soustavy diferenciálních rovnic metodou konečných prvků je využívána automaticky generovaná nepravidelná výpočetní síť. Prostor modelového řešení (tepelné úložiště od jádra po obvodový plášť) je rozdělen na konečný počet nepravidelných, proměnlivě velkých, elementů. Plochy jsou rozděleny na trojúhelníky a objemy na čtyřstěny (tetraedry). Velikost elementů je stanovena na základě požadavků reprezentace detailů geometrie užitých prvků a materiálů úložiště a simulovaných fyzikálních dějů. V místech s očekávanými velkými gradienty teploty je síť rovněž zahuštěna. Na Obr. 64 je vykreslena výpočetní síť pro povrchy

jednotlivých domén úložiště. Výpočetní síť sestává ze 704696 čtyřstěnných elementů a 187774 trojúhelníkových elementů.



Obr. 64 Nepravidelná výpočetní síť konečných elementů - reprezentace tepelného úložiště.

5.5.6 Okrajové a počáteční podmínky

Okrajové podmínky v daném případě popisují interakce s okolním prostředím v rovinách povrchu tepelného úložiště a na povrchu trubního systému tepelného výměníku.

Ohřev tepelného úložiště prostřednictvím topných tyčí je simulován pomocí okrajové podmínky prvního typu - modelová teplota topných tyčí odpovídá naměřenému vývoji teplot v průběhu experimentu.

Na plášti úložiště je zadána okrajová podmínka radiace do okolí a okrajová podmínka konvektivního ochlazování. Hodnota součinitele konvekce se pohybuje v rozmezí 1.4 až 3.7 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ v závislosti s polohou na plášti.

Na povrchu trubního systému tepelného výměníku je simulována okrajová podmínka konvektivního ochlazování proudícím vzduchem s rychlostí 4.5 $m \cdot s^{-1}$.

Jediná stanovená počáteční podmínka je teplota domény úložiště před počátkem experimentu.

5.5.7 Simulace termodynamického zatěžování prototypu tepelného úložiště

Počáteční řízené nabití úložiště (fáze 1) v kombinaci s fází udržování konstantní teploty (2) adresuje tepelnou kapacitu a kvalitu izolace ve smyslu tepelného odporu. V rámci kalibrace je kontrolována shoda:

- úniku tepla z úložiště v době ustálení teplot na topných tyčích (fáze 2),
- množství dodaného tepla pro pozorovaný nárůst teplot.

Dynamické prázdnění a plnění (fáze 3, 4 a 5) adresuje především součinitel tepelné vodivosti jádra tepelného úložiště. Cílem modelových simulací je dosáhnout shodu amplitudy a celkového průběhu vývoje teplot úložiště v období dynamického zatěžování.

Zkalibrovaný model tepelného úložiště byl docílen odladěním simulací:

- prvotního nabití a ustálení teplot (fáze 1 a 2),
- úplného vyprázdnění (fáze 3),
- cyklického režimu plnění a prázdnění (fáze 4) v režimu 24 hod / 24 hod a plnění a prázdnění v režimu 48/48 hod (fáze 5).

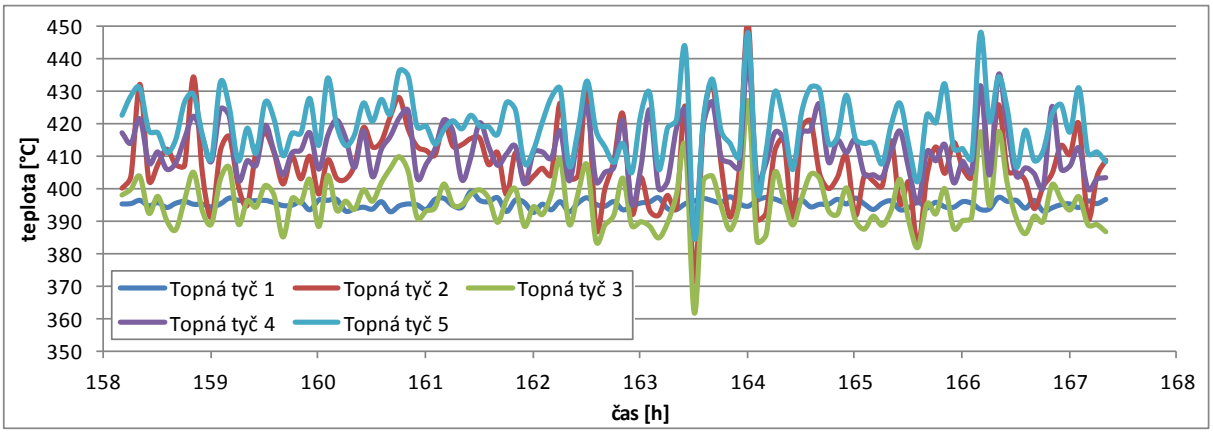
V prvním bloku byly provedeny simulace, které opakují provedený experiment. Tyto simulace slouží pro zpětné vyhodnocení experimentu - zejména stanovení prostorového rozložení teplot, tepelných toků, především stanovení ztrát do okolí.

5.5.7.1 Řízený ohřev, stav při plném nabití

Cílem simulace je zpracovat režim tepelného úložiště ve fázi 1 (řízené nabíjení) a následný přechod na ustálený stav (fáze 2). Kalibrace modelu spočívá v docílení shody:

- průběhu měřených a modelových teplot,
- měřeného a modelového úniku tepla v období ustálení teplotního pole (závěr simulace),
- modelového a zaznamenaného příkonu využitého pro ohřev úložiště.

Prvotní kalibrace proběhla na stacionárním modelu za podmínek ustálení druhé fáze experimentu. Okrajové podmínky teplot topných tyčí byly odvozeny z měření v desetihodinovém intervalu před započetím odběru tepla z úložiště (Obr. 65). Stanovené hodnoty teplot pro jednotlivé topné tyče jsou uvedeny v Tab. 23.



Obr. 65 Zaznamenaná teplota topných tyčí (konec fáze 2) před zahájením řízeného odběru tepla.

Tab. 23 Stanovené teploty topných tyčí pro stacionární model.

	Topná tyč 1	Topná tyč 2	Topná tyč 3	Topná tyč 4	Topná tyč 5
ustálená teplota [°C]	395.3	407.8	395.7	411.9	419.4

Kalibračním kriteriem modelu byla shoda měřených a simulovaných teplot na jednotlivých teplotních čidlech a shoda množství dodaného tepla při ustálené fázi 2.

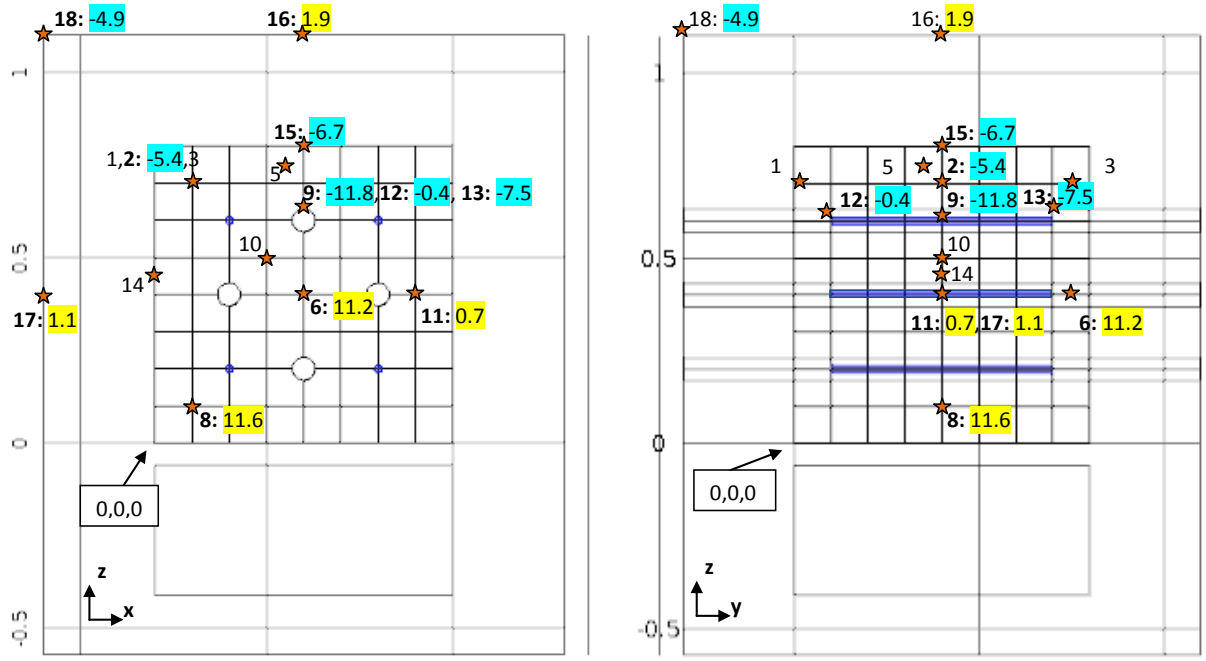
Obdobně jako v předchozích simulacích na hřebeni bylo v okolí topných tyčí nutné zavést dodatečný tepelný odpor ($R = 0.003\ K{\cdot}m^2W^{-1}$) reprezentující přestup tepla na materiálovém rozhraní topných tyčí a TVG.

Ustálený příkon v modelu vychází 678 W (měřený příkon 690 W). Porovnání měřených a modelový teplot je provedeno v Tab. 24, rozložení rozdílů modelových a měřených teplot je vykresleno na Obr. 66. Kladná hodnota rozdílu (na obrázku žlutě) značí modelové

nadhodnocení teploty, modře jsou vyznačena místa, kde je modelová teplota ve srovnání s měřením nižší. Maximální zaznamenaná odchylka měření a modelu je -11.8 °C (čidlo T9), což odpovídá chybě cca 3 % simulovaného rozpětí hodnot.

Tab. 24 Tabulka ustálených měřených a modelových teplot teplotních čidel.

čidlo	T1	T2	T3	T5	T6	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
modelová T	326.02	342.47	325.95	345.62	347.07	353.82	352.22	359.55	353.66	340.50	340.74	347.21	343.97	34.47	34.69	20.13
měřená T		347.92			335.86	342.25	364.01		352.96	340.86	348.24		350.63	32.47	33.54	25.09
rozdíl teplot		-5.45			11.21	11.58	-11.79		0.69	-0.36	-7.50		-6.66	1.99	1.15	-4.96



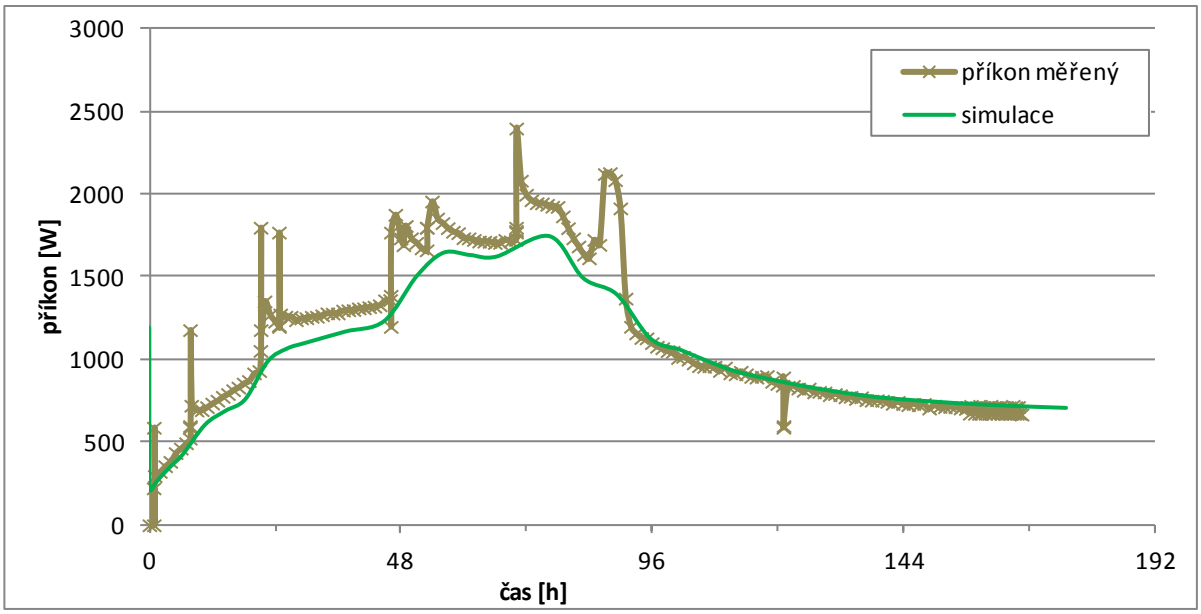
Obr. 66 Rozdíl modelových a měřených teplot na jednotlivých teplotních čidlech při ustáleném stavu.

V příloze 4.7 je vykresleno rozložení modelových teplot v osových řezech úložištěm při plném nabití. V akumulačním jádru jsou nasimulovány teploty v rozmezí 320 až 410 °C.

Pro nestacionární simulaci řízeného ohřevu byl využit nakalibrovaný stacionární model plného nabití úložiště. Hodnoty teplot okrajových podmínek pro jednotlivé topnné tyče byly zadány dle zaznamenaného měření při experimentu. Kalibrace nestacionárního modelu je posuzována na základě shody měřeného a modelového příkonu a měřených a modelových teplot na jednotlivých teplotních čidlech.

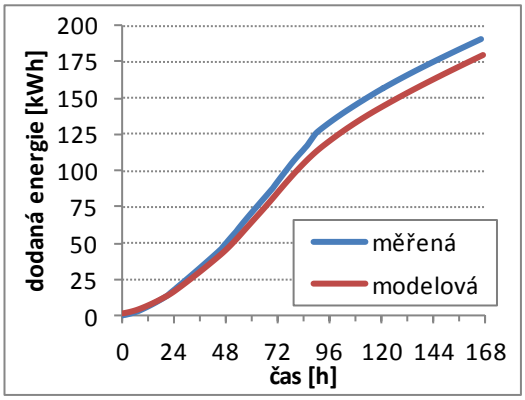
Na Obr. 67 jsou vyneseny průběhy měřeného a simulovaného příkonu topných tyčí. Jednotlivé překmity v měřeném příkonu cca o 500 W byly způsobeny skokovou změnou požadované teploty na topné tyči č. 3. Model tyto kminy nedokáže věrně rekonstruovat. Simulovaný průběh příkonu má hladší průběh, ale ve svém trendu kopíruje měřené hodnoty. V době ohřevu model příkon do úložiště podhodnocuje. K největšímu podhodnocení dochází při změně teploty tyče č. 3 z 60 na 140 °C před započetím 24. hodiny experimentu. V době ustálení (fáze 2) je shoda téměř absolutní.

Zlepšení shody modelu a měření (zejména pro první fázi řízeného ohřevu) by teoreticky bylo možné dosáhnout úpravou hodnot součinitele měrné tepelné kapacity a jeho funkční závislosti na teplotě. Hodnoty zadávané v simulaci byly ponechány v rozsahu měřených dat pro jednotlivé materiály. V průběhu řízeného ohřevu pravděpodobně ještě docházelo i k realizaci nevratné změny tepelných charakteristik.



Obr. 67 Graf průběhu měřeného a simulovaného příkonu do úložiště během 1 a 2. fáze experimentu.

Graf s porovnáním měřeného a simulovaného tepla dodaného do úložiště je na Obr. 68. Výsledná naměřená hodnota příkonu úložiště je 190 kWh, nasimulováno bylo o 11 kWh méně - jedná se tak o relativně malou a přípustnou chybu (5.8 %).



Obr. 68 Porovnání měřené a simulované dodané celkové energie.

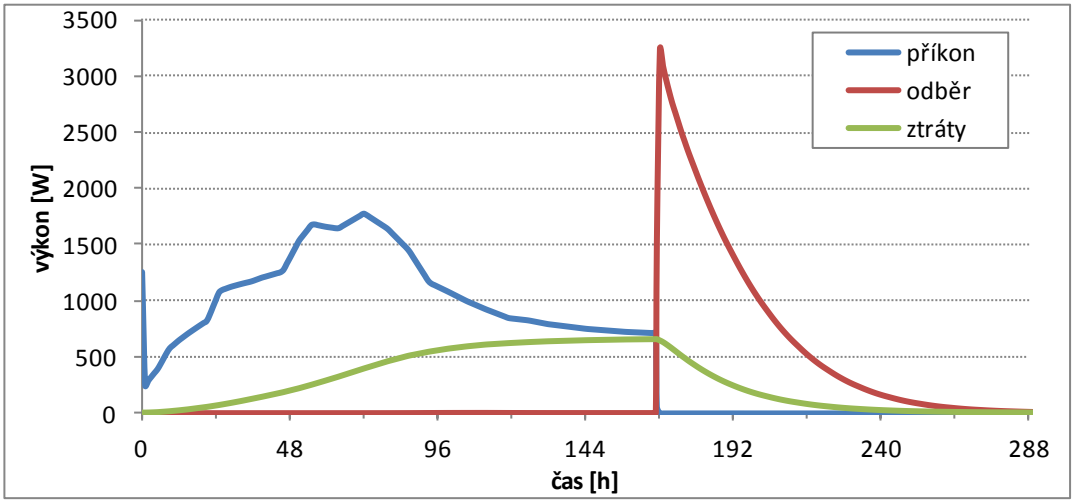
5.5.7.2 Úplný odběr tepla proudícím vzduchem

Cílem simulace je zpracovat režim tepelného úložiště ve fázi 3 (úplné vybití). Validace modelu spočívá v docílení shody poklesu měřených a modelových teplot.

Model odběru tepla navazuje na výsledky modelu ohřevu. V trubicích výměníku je zadána okrajová podmínka konvektivního přestupu (23) reprezentující vnitřní nucenou konvekci s rychlostí proudění 4.5 $m \cdot s^{-1}$. Jak bylo prokázáno v minulé etapě prací, užitá aproximace konvektivního odběru tepla v trubicích výměníku mírně podhodnocuje počáteční fázi odběru a následně poněkud nadhodnocuje fázi konečnou ve smyslu množství odebrané energie. Tento jev (viz Příloha. 4.8) je patrný i na průběhu simulovaných teplot fáze 3. Na konci fáze 3 jsou dosahované poklesy teplot s měřením ve velmi dobré shodě.

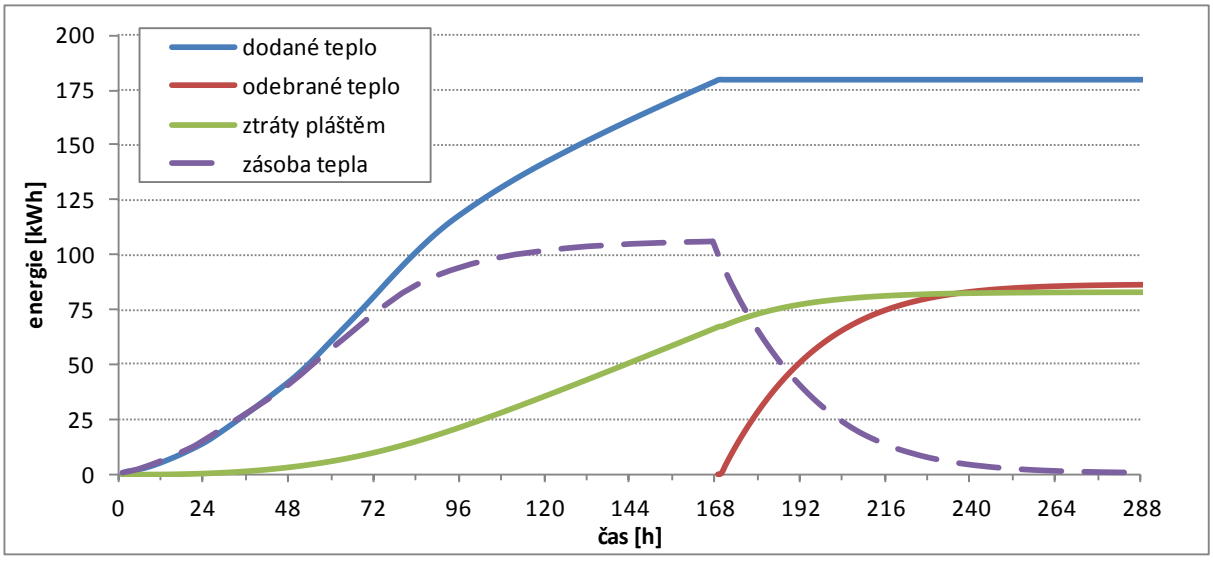
Na Obr. 68 je v grafu vynesen průběh výkon topných tyčí, tepelné ztráty pláštěm a odběr tepla proudícím vzduchem tak, jak byly vyhodnoceny modelem. Jedná se o modelové zhodnocení efektivity testovaného systému.

Před ukončením dodávky tepla (konec fáze 2, 168. hodina) je patrné vyrovnání příkonu a ztrát, poté následuje odběr tepla. V maximu (počátek fáze 3) je simulován odběr tepla z úložiště proudícím vzduchem 3244 W. Během následujících 24 hodin odebíraný tepelný výkon poklesne na hodnotu 1500 W, po dalších 24 h na 500 W a během třetího dne odběr tepla klesá k nule (úložiště je vyprázdněno).



Obr. 69 Modelová bilance toků tepla během 1., 2. a 3. fáze experimentu.

Bilance tepelných toků a zásob tepla tak, jak byly vyhodnoceny modelem, jsou znázorněny na Obr. 70. Na grafu jsou kumulativně vyneseny dodané a odebrané teplo, ztráty pláštěm a zásoba tepla v úložišti. V průběhu fáze 3 bylo vyfoukáno 86.3 kWh, ztráty za celé období fází 1 až 3 byly vyhodnoceny na hodnotu 82.7 kWh.



Obr. 70 Modelová bilance zásob tepla experimentu tepelného úložiště.

Z Obr. 70 je rovněž patrné, že nárůst tepelných ztrát pláštěm má značné zpoždění za počátkem nabíjení (cca 36 hod). Efektivitu úložiště z hlediska poměru tepelných ztrát pláštěm a zpětně odebraného množství tepla je potřeba zhodnotit pro režim cyklického nabíjení a odběru tepla.

5.5.7.3 Cyklický ohřev a prázdnění

Cílem simulace je modelově zpracovat cyklické zatěžování úložiště v časové rozmezí 288 - 1152 hodin experimentálního provozu. V daném období proběhlo 11 cyklů nabití a

vyprázdnění. Validace modelu spočívá v porovnání shody modelové a měřené doby ustálení pracovních cyklů úložiště ve shodném teplotním rozmezí.

Simulace cyklického provozu byla rozdělena do jednotlivých výpočetních celků, reprezentujících ohřev či odběr (každý odběr, nebo ohřev reprezentuje samostatnou výpočetní periodu). Po ukončení simulace ohřevu je výsledné teplotní pole zadáno do simulace odběru jako počáteční podmínka rozložení teplot v modelové doméně.

Porovnání průběhů simulovaných (červeně) a měřených (modře) teplot na jednotlivých čidlech je v Příloze 4.8. V části grafů porovnání průběhů teplot není provedeno z důvodu občasného výpadku záznamu teplot. Dosahovaná shoda modelu a měření je kvalitní - v simulaci se zdařilo pro celý prostor úložiště přiměřeně postihnout:

- amplitudu kolísání teplot,
- trendy vývoje teplot v jednotlivých cyklech plnění a prázdnění úložiště,
- dobu ustálení mezí kolísání teplot po zahájení cyklického poloprovozu úložiště.

Na čidle T2 modelové teploty poněkud více zaklesají - v minimech až o 30 °C. V maximech je shoda měření a modelu lepší. Čidlo T2 je umístěno v tepelném jádru 10 cm od povrchu. Všechny modelované hodnoty jsou v porovnání s měřením mírně nižší.

Model v místě čidla T5, které je situováno v granitové kostce poblíž povrchu jádra úložiště, teplotu poněkud podhodnocuje, v maximech o 20 °C, v minimech do 40 °C. Při experimentu zřejmě ochranné kovové pouzdro teploměru působí jako tepelný most.

Dobrou shodu mezi modelem a měřenými daty vykazuje čidlo T6. Čidlo T6 je umístěno 6 cm pod povrchem tepelného jádra.

Model v místě čidla T8 vykazuje poněkud vyšší rozkyv teplot. V maximech nadhodnocuje o cca 5 °C, v minimech model měřenou teplotu podhodnocuje o cca 20 °C. Čidlo je situováno v tepelném jádru 10 cm od povrchu a je párovým k čidlu T2.

Čidlo T9 je umístěno v centrální části jádra u horní trubice vzdušného výměníku. Model teplotu podhodnocuje o cca 25 °C, amplituda kolísání je shodná s měřením.

V pozici čidla T11 (umístěno mezi výměníkem a hranou tepelného jádra) dochází v minimech k podhodnocení měřené teploty o 30 °C, v maximech o 20 °C.

Optimální shoda měření a simulace je docílena v místě čidla T12 (s výpadky v měření). V pozdějších cyklech model měřenou teplotu mírně podhodnocuje.

V místě čidla T13 umístěného poblíž vzdušného výměníku, model v maximech dosahovanou teplotu mírně podhodnocuje o 20 - 30 °C. Samotný tepelný výměník zřejmě působí jako tepelný most do středu tepelného jádra.

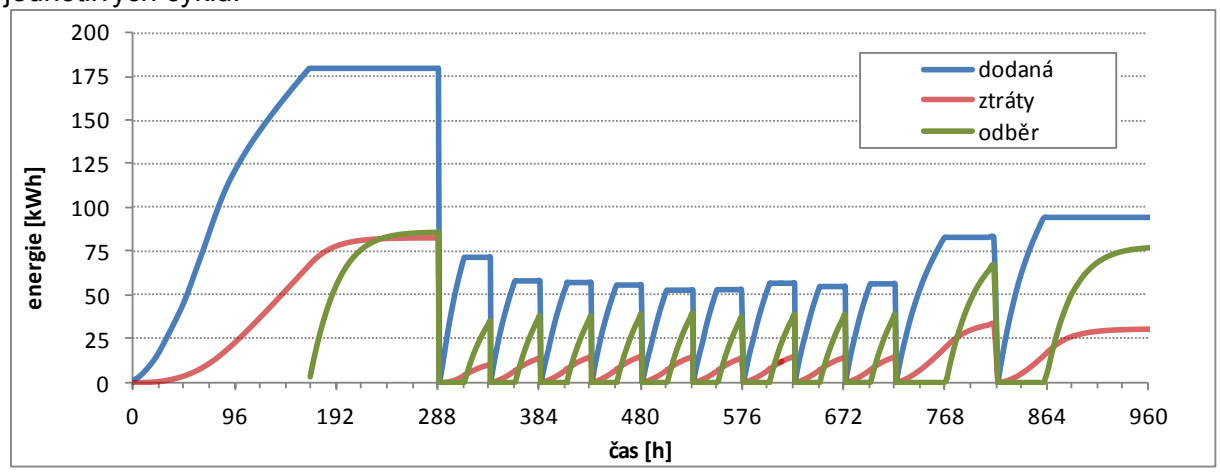
Čidla T16 až T18, situovaná na opláštění úložiště, vykazují nejmenší absolutní chyby. Měřená data jsou nasimulována s chybou jednotek stupňů.

Pro čidlo T18, umístěno na rohu pláště úložiště, byl simulován rozkmit teploty 2 °C, měřen byl rozkmit 5 °C, minimální hodnoty se shodují. Větší rozkmit měřených teplot může být způsoben vyšší vodivostí konstrukce opláštění nebo lokálně zvýšenou vodivostí tepelné izolace.

Rozdíly mezi měřením a simulací jsou pravděpodobně způsobeny především idealizovanou modelovou geometrií úložiště (v modelu mají všechny granitové kostky identický rozměr a tepelné vlastnosti, což je v rozporu s heterogenitou přírodních materiálů a vzniklými nepřesnostmi při opracování; v modelu je také zadáno identické rozevření tepelně vodivých spár a jejich homogenní tepelné charakteristiky v celém objemu úložiště; při stavbě úložiště docházelo zčásti k dotvarování spár vyplněných TVG a materiál neměl stejnou hustotu.

Pro výslednou energetickou bilanci cyklického zatěžování teplotního úložiště je primární rozkmit teplot, nikoli absolutní hodnoty. I přes obvykle nižší modelové teploty je shoda velikosti amplitud kolísání teplot velmi dobrá. Modelem stanovená bilance poskytuje kvalitní výsledky.

Na Obr. 71 jsou vykresleny průběhy dodané energie, tepelných ztrát pláštěm a odebraného tepla proudícím vzduchem. Na Obr. 72 je zobrazena sumarizace výsledků po ukončení jednotlivých cyklů.



Obr. 71 Kumulativní průběh dodané energie, tepelných ztrát pláštěm a odebraného tepla - modelová simulace.

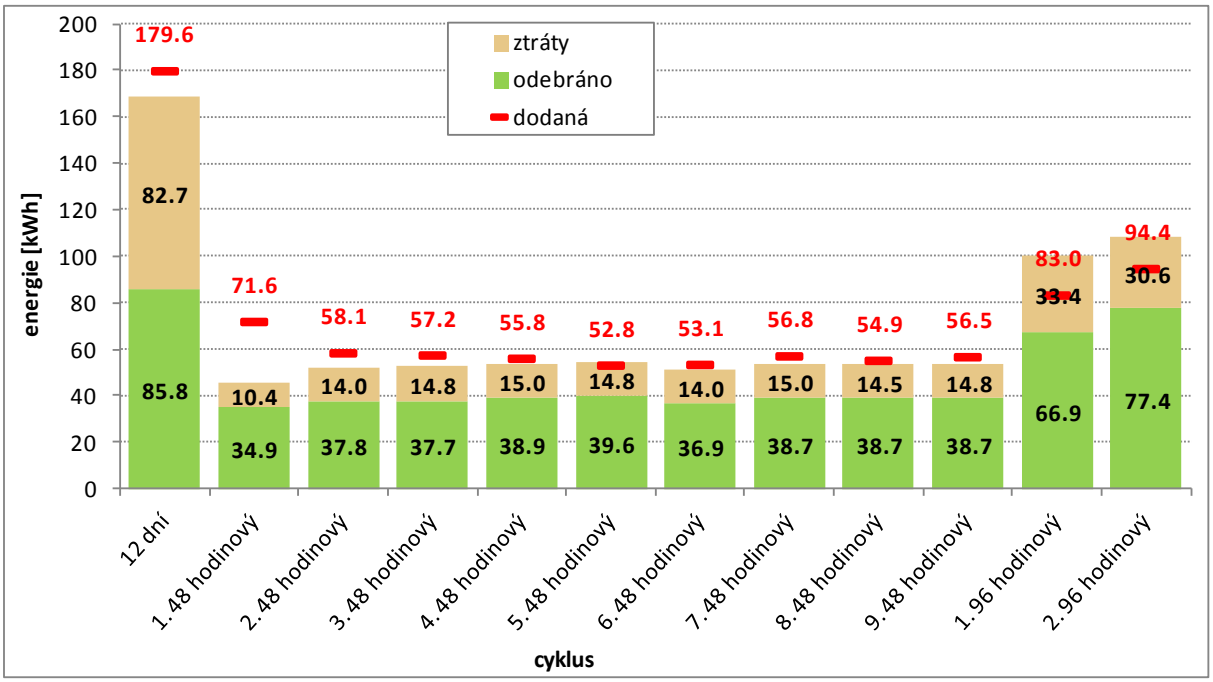
Při prvním prohřátí (fáze 1) bylo dodáno podstatně více tepla, než bylo následně ve třetí fázi odebráno. Příčinou je snaha o navození ustálených teplotních poměrů při plném nabití úložiště (fáze 2).

Po ustálení 48 hodinových cyklů bylo z průměrně dodaných 54 kWh vyfoukáno 39 kWh při ztrátách pláštěm 15 kWh (ztráta 28 %). Při dvou 96 hodinových cyklech nebylo cílem dosáhnout ustálení měřených cyklů - v obou realizovaných odběrech došlo k odčerpání tepla uloženého v předchozích 48 hodinových cyklech. Drobné nepřesnosti v modelové bilanci mohou být způsobeny numerickou integrací.

V Tab. 25 je provedeno bilanční porovnání naměřené a nasimulované energie jednotlivých cyklů. Nasimulovaná dodaná energie je průměrně o 5.9 % nižší.

Tab. 25 Měřený a modelový kumulativní výkon na konci jednotlivých cyklů.

	cyklus											
příkon [kWh]	**12 dní**	**1. 48 hodinový**	**2. 48 hodinový**	**3. 48 hodinový**	**4. 48 hodinový**	**5. 48 hodinový**	**6. 48 hodinový**	**7. 48 hodinový**	**8. 48 hodinový**	**9. 48 hodinový**	**1. 96 hodinový**	**2. 96 hodinový**
měřený	190.5	78.5	62.6	60.1	58.4	58.6	58.6	58.6	58.6	58.3	86.4	99.1
modelový	179.6	71.6	58.1	57.2	55.8	52.8	53.1	56.8	54.9	56.5	83.0	94.4



Obr. 72 Energetická bilance jednotlivých cyklů experimentu (modelová simulace).

5.6 Modelové porovnání alternativních materiálů úložiště

Zhodnocení přínosu TVG pro aplikace tepelných úložišť je možné provést na základě porovnání simulací jejich shodného režimu provozu při užití různých materiálů akumulačního jádra.

Teplené úložiště využívající konglomerát granitových kostek a TVG (v grafech označeno *granit + TVG*) bylo porovnáno s objemově totožným úložištěm využívající betonový nebo granitový monoblok. V simulacích byly uvažovány dva druhy betonů, jeden „běžný“, popsaný (Gil et al. 2010) a druhý „vysokoteplotní“ (v grafech označený *beton (DLR)*), vyvinutý v Německém středisku pro letectví a kosmonautiku (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. - zkratka DLR) určený pro aplikaci v tepelných úložištích s vysokou tepelnou kapacitou ve španělské solární elektrárně Plataforma Solar de Almería (Laing et. al 2006).

Tab. 26 Parametry simulovaných materiálů při teplotě 20 °C.

	součinitel tepelné vodivosti λ [W·m^{-1}K^{-1}]	měrná tepelná kapacita c_p [J·kg^{-1}K^{-1}]	hustota ρ [kg·m^{-3}]
beton	1.5	850	2200
beton (DLR)	1	916	2750

V Tab. 26 jsou uvedeny hodnoty materiálových parametrů zadaných do modelu. Pro granit z Panských Dubenek a TVG byl použit funkční vztah hodnot parametrů a teploty (viz Obr. 22), stejně jak v předchozích simulacích.

Porovnání materiálů bylo provedeno na identické modelové geometrii prototypu tepelného úložiště popsaného v kapitole 5.5 (Obr. 63). Ve variantě s granitovým nebo betonovým monoblokem je geometrie kostek nahrazena jednou krychlí o stejném objemu (strana krychle jádra a = 800 mm).

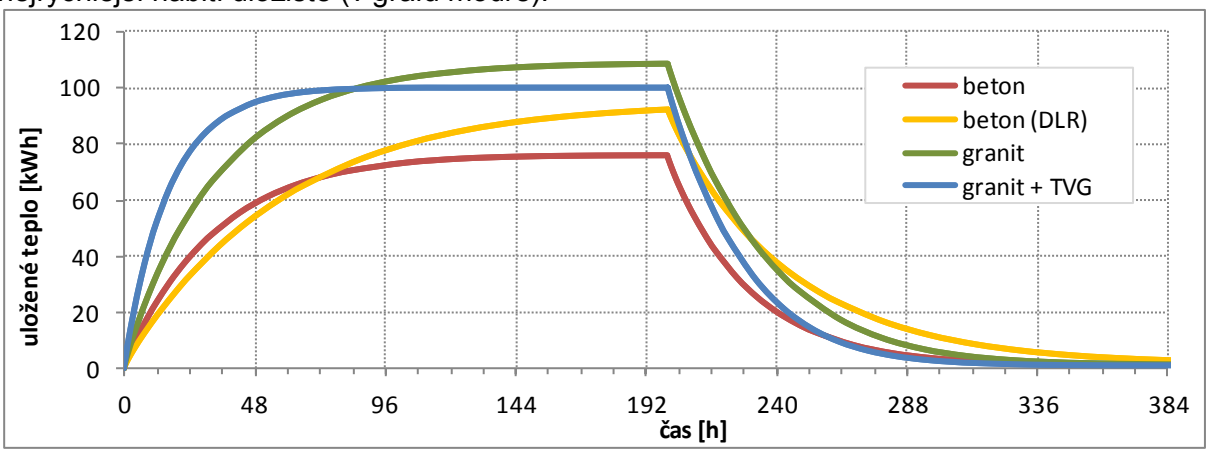
Pro srovnání úložné energie čtyř materiálových variant byly zvoleny tři scénáře.

1) Jednorázové nabíjení a vybíjení po dobu 200 hodin.
2) Cyklický režim nabíjení a vybíjení s délkou cyklu 24 hodin.

3) Cyklický režim nabíjení a vybíjení s délkou cyklu 48 hodin.

5.6.1 Jednorázové nabití

S cílem dosažení projektových teplot úložiště byl zadán scénář s délkou ohřevu 200 hodin a následným 200 hodinovým odběrem. Z vyneseného průběhu hodnot uloženého tepla (viz Obr. 73) s využitím různých materiálů je patrné, že užití TVG v kombinaci s granitem umožňuje nejrychlejší nabití úložiště (v grafu modře).



Obr. 73 Průběh hodnot uloženého tepla při 200 hodinovém cyklu

Po cca 84 hodinách nabíjení dochází k protnutí křivek akumulovaného tepla v granitovém monobloku a konglomerátu TVG s kostkami. Po tomto časovém okamžiku je v konglomerátu uloženo méně tepla. Při dvojnásobné době ohřevu vychází 10% nárůst nabyté kapacity granitového monobloku oproti konglomerátu. Příčina spočívá v poněkud menší schopnosti akumulace tepla v jednotkovém objemu TVG ve srovnání s jednotkovým objemem granitu z důvodu podstatně nižší objemové tepelné kapacity TVG. Menší absolutní nabití konglomerátu je vyváženo podstatně zvýšenou dynamikou úložiště, případně méně nákladným tepelným výměníkem (větší rozestup topných a odběrných prvků).

Obr. 74 Fotografie tepelného úložiště z betonu u sluneční elektrárny Plataforma Solar de Almería (Laing et al. 2006)

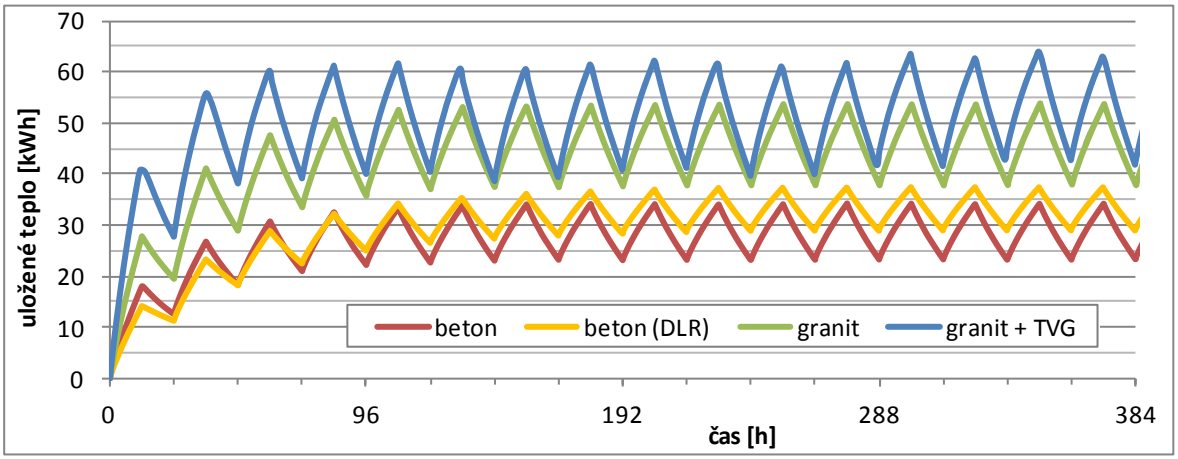
Při užití TVG je simulován rychlejší odběr uloženého tepla. Z průběhu hodnot uloženého tepla ve vysokoteplotním betonu (DLR) je patrné, že ani po 200 hodinách nabíjení nedošlo k ustálení a dosažení maximálního potenciálu. Nejpomalejší nabíjení je dáno jeho nejnižší tepelnou vodivostí. Opodstatnění využití tohoto betonu je při dlouhých dobách nabíjení a

odběru, nebo, jak je i patrno z fotografií prototypu německého úložiště (Obr. 74), při velmi hustém registru trubic tepelného výměníku. (Laing et al. 2006)

5.6.2 Cyklický režim 12/12 h

Scénář s 24 hodinovým cyklem se sestává z 12 hodin nabíjení a 12 hodin odběru. Ve všech materiálových variantách je zapotřebí 4 až 5 cyklů k ustálení pracovních teplot (Obr. 76) a uloženého množství tepla (Obr. 75).

Po 6. cyklu se hodnoty uloženého tepla a teplot již pohybují v ustálených mezích. Z pohledu hodnocení nejsou tolik důležité absolutní hodnoty, ale rozdíl mezi maximálním a minimálním nabitím. Tato hodnota udává množství uloženého a využitelného tepla při popsaném pracovním cyklu.



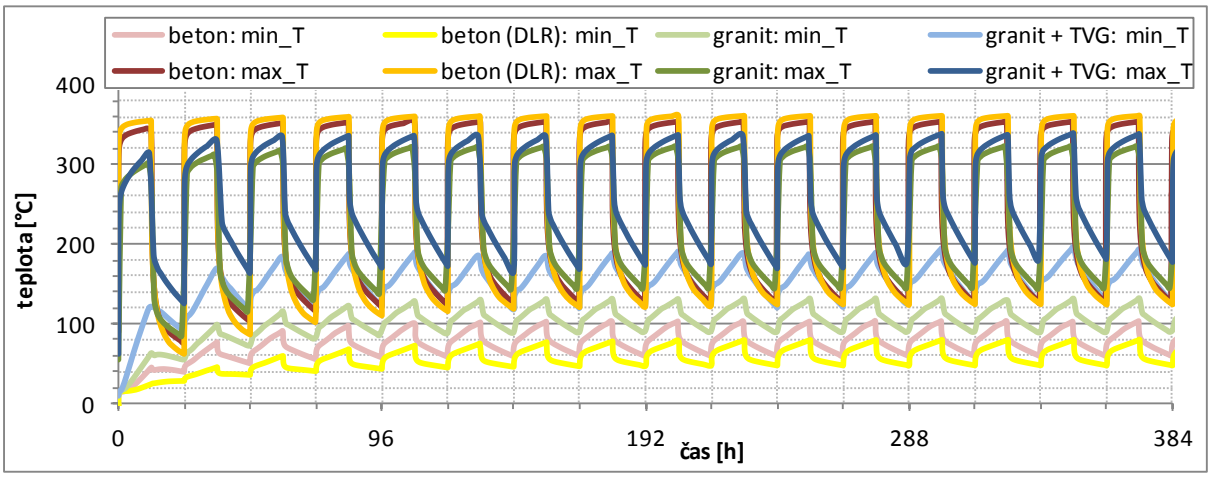
Obr. 75 Graf simulovaných průběhů uloženého tepla v tepelném úložišti, granitovém a betonovém monobloku.

Pro granitový monoblok se ustálené hodnoty uloženého tepla pohybují mezi hodnotami 37.7 (při vybití) a 53.7 kWh (po nabití). Rozdíl činní 16 kWh využitelného tepla. Simulované hodnoty pro betonový monoblok se po ustálení pohybují mezi minimem 23 kWh a maximem 34.2 kWh, což odpovídá 11.1 kWh uloženého tepla. Při simulaci vysokoteplotního betonu (DLR) byla obdržena nejmenší amplituda akumulovaného tepla. Hodnoty se pohybují mezi 29.1 a 37.6 kWh - využitelná zásoba tepla 8.5 kWh. Pro úložiště sestavené z granitových kostek a TVG se množství akumulovaného tepla pohybuje v intervalu 41.5 - 63.7 kWh, který odpovídá 22.2 kWh využitelného akumulovaného tepla. Podle modelu tak umělé úložiště s TVG umožňuje uložit o 31 % více tepla oproti granitovému monobloku při daném cyklickém využití úložiště.

Provedené výpočty dokládají vhodnou volbu zvoleného výplňového materiálu úložiště i přínos TVG. V grafu na Obr. 76 jsou vyneseny minimální a maximální teploty jádra úložiště pro daný časový okamžik.

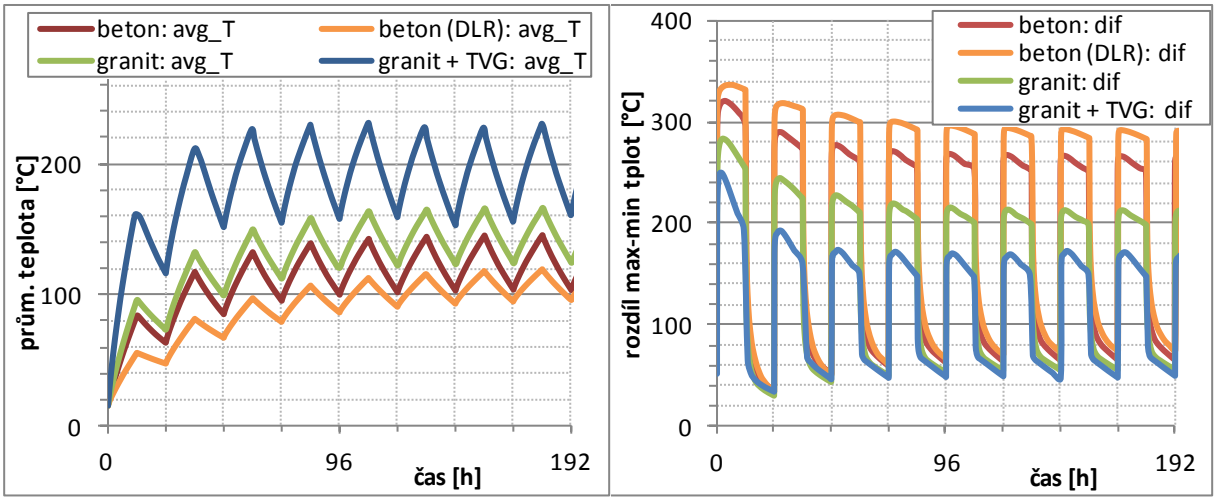
Větší rozdíly minimální a maximální teploty úložiště dokumentují jeho větší tepelné namáhání. Minimální teploty granitového monobloku (na Obr. 76 světle zeleně) v ustáleném režimu plnění a prázdnění teplem kolísají v rozmezí 85 až 135 °C. Minimální teploty jádra z kostek a TVG (na Obr. 76 světle modře) kolísá v ustáleném režimu v rozmezí 125 až 170 °C. Velikost rozkyvu minimálních teplot je pro obě varianty podobná (45 – 50 °C). Maximální teploty granitového monobloku (na Obr. 76 modře) kolísají v ustáleném režimu plnění a prázdnění v rozmezí 140 až 320 °C, teploty kostek s TVG byly simulovány v rozmezí 170 až 300 °C (na Obr. 76 zeleně). Tyto výsledky dokumentují, že v simulovaných scénářích způsobuje přítomný TVG lepší distribuci tepla (méně výrazné extrémy) a vyšší průměrnou provozní teplotu. Nejvyšší amplitudu maximálních teplot vykazuje vysokoteplotní betonový monoblok (123 – 360 °C), minimální teploty se pohybují mezi 47 a 81 °C. Maximální teploty v monobloku

z obyčejného betonu byly simulovány v rozmezí 130 – 350 °C, minimální teploty se pohybují mezi 55 a 100 °C.



Obr. 76 Graf průběhů simulovaných minimálních (min_T) a maximálních (max_T) teplot v jádru (viz Obr. 24) úložiště z monobloků nebo granitových kostek s TVG).

Na Obr. 77 jsou vlevo vyneseny průměrné teploty jádra úložiště, které de facto kopírují množství uloženého tepla. Vpravo na stejném obrázku je graf znázorňující rozdíl maximální a minimální teploty jádra v totožný okamžik. Ve fázi vybití je v jádru z kostek a TVG maximální rozdíl teplot cca 40 °C, v granitovém monobloku je to o 10 °C více. Výraznější rozdíl je po nabití, kdy rozdíly uvnitř granitového monobloku dosáhnou hodnoty přes 200 °C, v obyčejném betonu 270 °C a v jádru z vysokoteplotního betonu až 300 °C. Pro jádro s TVG rozdíl minimální a maximální teploty vychází pod 140 °C.



Obr. 77 Vlevo průběh průměrné teploty jádra (avg_T); vpravo průběh rozdílu maximální a minimální teploty jádra v daném okamžiku při 12h cyklickém provozu (dif).

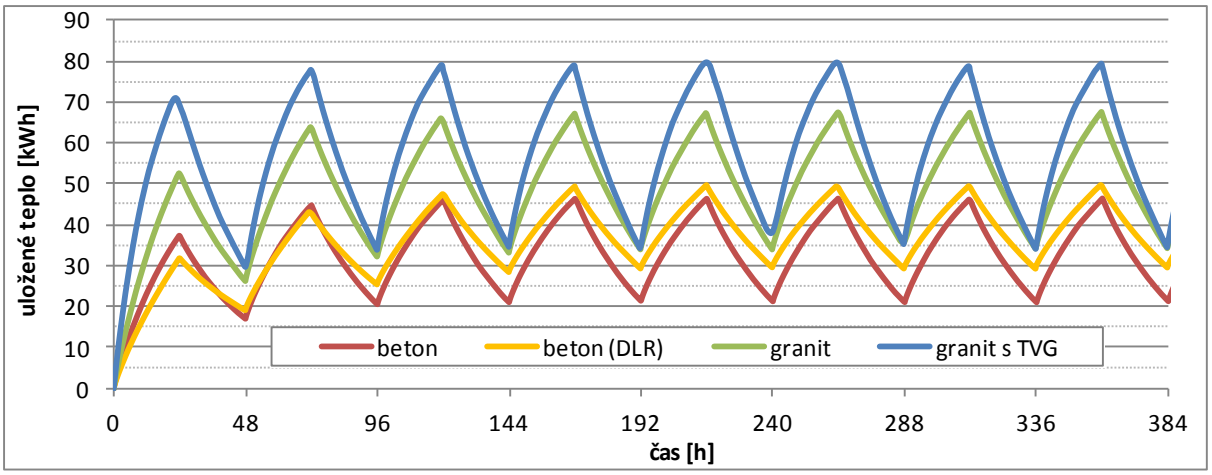
Simulace byly sestaveny tak, aby dlouhodobě nebyl překročen celkový příkon topidel 5 kW a zároveň aby lokálně nebyla překročena teplota 400 °C. Z provedených výpočtů vyplývá, že teplota úložiště při cyklu 12 hodin nedosáhne limitní teploty.

V rámci úvah o komerčním úložišti daná změna není zásadní problém - v komerčním úložišti mohou být zapojovány různé skupiny úložných jednotek s diverzifikovaným pracovním cyklem. Jinou schůdnou cestou je projekce takových úložných jednotek, u nichž rozmístění ohřevu a odběru umožní pracovat v rámci dvanáctihodinového cyklu.

5.6.3 Cyklický režim 24/24 h

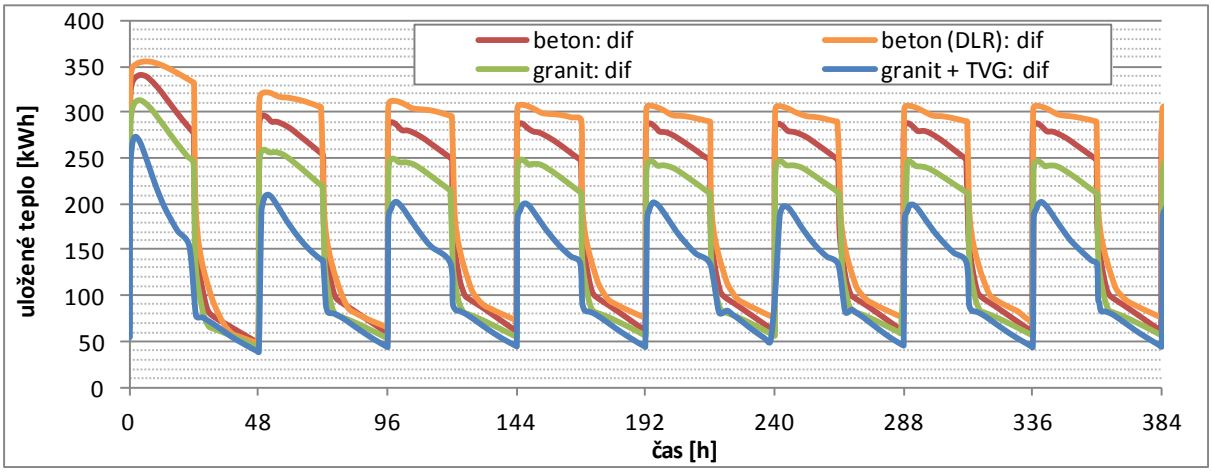
Na základě porovnání simulací s rozdílnou délkou cyklu nabíjení a vybíjení lze stanovit interval, pro který je přínos aplikace TVG optimální (pro danou geometrii).

Nabíjení a vybíjení úložiště bylo v simulacích prodlouženo na 24 hodin. Veškeré ostatní geometrické i fyzikální parametry úložiště byly zachovány. Průběh hodnot uloženého tepla je vynesen na Obr. 78. Při delším čase nabíjení je potřeba menší počet cyklů k ustálení hodnot maximálního a minimálního nabití. V tomto případě přibližně již po 96 hodinách (2 cykly) dojde k ustálení, při porovnání s režimem 12/12 h lze pozorovat, že k ustálení je potřeba přibližně stejná doba, ale poloviční počet cyklů.



Obr. 78 Průběh hodnot uloženého tepla v jednotlivých variantách, 48 hodinový cyklus.

Trendy v poměru jednotlivých variant jsou podobné, jako při 12 hodinovém režimu. Zásoby tepla v betonovém monobloku se pohybují od 21.4 kWh do 46.6 kWh s využitelná zásoba tepla 25.2 kWh. Teplo uložené v úložišti z vysokoteplotního betonu (DLR) se pohybuje v rozmezí 29.2 kWh po 49.5 kWh - využitelná zásoba tepla 20.3 kWh. V Granitovém monobloku je ve vybité fázi 34.2 kWh a po nabití 67.4 kWh tepla. Využitelné teplo v granitovém monobloku ze simulací vychází 33.2 kWh. Ve variantě odpovídající jádru sestávajícího z konglomerátu granitu a TVG, se kvazi ustálené hodnoty pohybují v rozmezí 34.1 a 79.3 kWh, což odpovídá zásobě 45.2 kWh využitelného tepla. Průběh popsaných hodnot je zobrazen na Obr. 79.



Obr. 79 Průběh rozdílů maximální a minimální teploty v jádru simulovaného úložiště.

Rozdíly maximálních a minimálních teplot úložiště jsou vyneseny v grafu na Obr. 79. Z grafu je patrné, že ve variantě s vysokoteplotním betonem jsou rozdíly teplot uvnitř jádra nejvyšší, naopak při užití TVG nejnižší.

5.6.4 Shrnutí variantních výsledků

Bylo zadáno celkem 12 simulací lišících se ve variantě použitého materiálu či zvoleného scénáře nabíjení a odběru tepla. V Tab. 27 jsou shrnuty simulované hodnoty využitelného tepla a procentuálně porovnány s variantou granitového monobloku. Jen v případě jednorázového nabíjení po dobu 200 hodin vychází nejlépe varianta s granitovým monoblokem. Příčina spočívá ve větší kapacitě (ve srovnání s úložištěm s TVG) a především v dostatečné době pro plné nabití i bez přítomnosti TVG.

Ve všech ostatních případech je pro konstrukci úložiště nejefektivnější použití TVG v kombinaci s granitem. Při porovnání variant pro cyklické scénáře byl stanoven přínos TVG na 36 až 38 % v množství uloženého tepla během stejně dlouhého provozního cyklu. Použití betonu by snížilo kapacitu identického úložiště o 24-30 % podle uvažovaného scénáře. Vysokoteplotní beton (DLR) se pro navrhované uspořádání úložiště jeví nevhodně. Z trendů lze předpovědět jeho vhodnost použití pouze pro dlouhé doby nabíjení nebo při odlišném způsobu ohřevu úložiště, zajišťujícím rychlejší distribuci tepla uvnitř jádra.

Tab. 27 Shrnutí výsledků tří scénářů nabíjení (jednorázové, cyklické 12/12h a cyklické 24/24h) a čtyř variant použitých materiálů úložiště.

scénář / varianta	jednorázové [kWh]	12/12h [kWh]	24/24h [kWh]	jednorázové	12/12h	24/24h
beton	75.9	11.1	25.2	-30.05%	-30.63%	-24.10%
beton (DLR)	92.6	8.5	20.3	-14.65%	-46.88%	-38.86%
granit	108.5	16.0	33.2	0.00%	0.00%	0.00%
granit + TVG	99.9	22.2	45.2	-7.93%	38.75%	36.14%

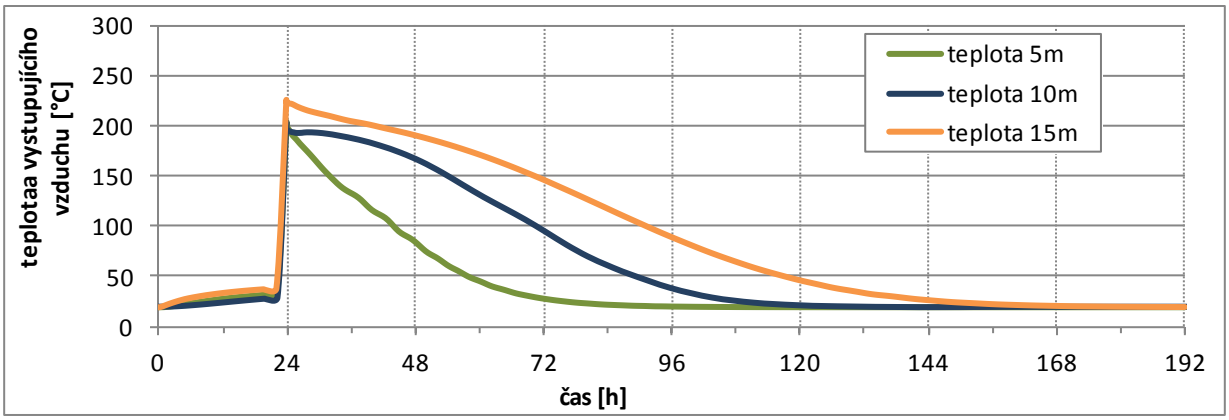
5.7 Možnosti navýšení teploty vystupují tekutiny

Pro účely praktického nasazení je možné návrh tepelného úložiště modifikovat s cílem zajistit optimální provoz. Základním parametrem modifikace je změna rozměrů. Touto změnou lze docílit řádově větší kapacitu úložiště a podstatně tak lze modifikovat i teplotu na výstupu z tepelného výměníku.

Udržení vyšších teplot vystupující teplonosné tekutiny z tepelného výměníku po delší časové období lze nejsnáze docílit při liniové geometrii úložiště. Z těchto důvodů byl sestaven matematický model úložiště ve tvaru kvádru a byla provedena předpověď průběhu teploty vystupující teplonosné tekutiny. V modelu byla zachována konstrukce tepelného jádra založená na granitových kostkách a na TVG. Tepelné jádro (i s výměníkem a topnými tyčemi) bylo prodlouženo na délku 5, 10 a 15 metrů.

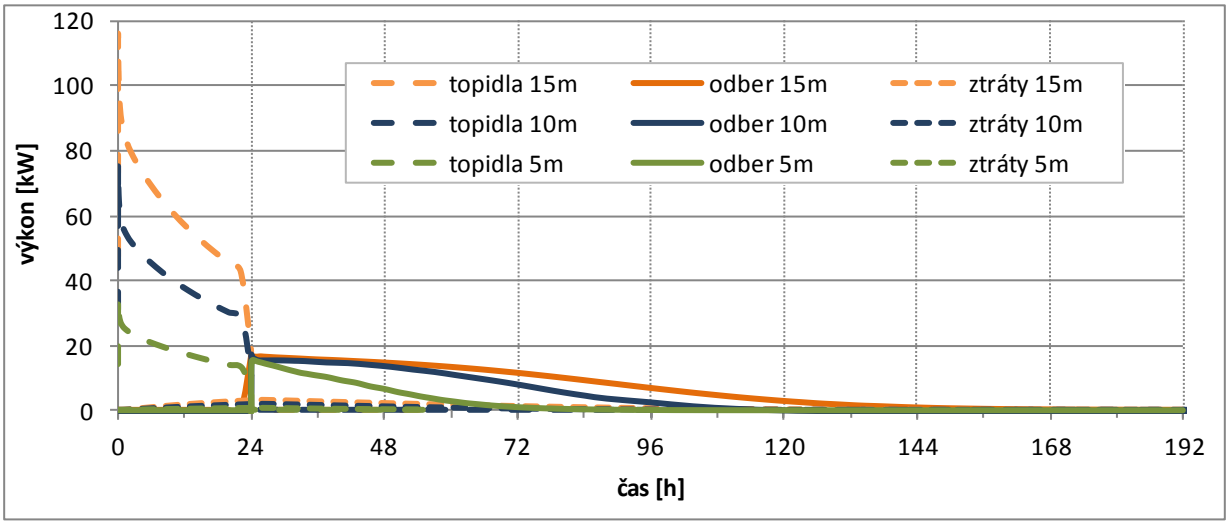
Simulace úložiště byly provedeny na zjednodušeném modelu (model neobsahuje rozdělovací a směšovací prvek vzduchotechniky). Ten byl z důvodů vysoké výpočetní náročnosti při simulaci proudění a zároveň malého vlivu na výsledek zanedbán. V modelu je uvažována symetrie ve dvou osách a je simulována pouze ¼ objemu úložiště (viz Obr. 83).

Ohřev úložiště byl simulován po dobu 24 hodin, odběr tepla následujících 168 hodin (7 dní) do úplného vyčerpání úložiště. Rychlost proudění byla zadána shodně s předchozími simulacemi 4.5 $m \cdot s^{-1}$. Na grafu z Obr. 80 je zobrazen průběh simulované teploty vystupujícího vzduchu. Po aktivaci odběru tepla z výměníku vystupuje vzduch s průměrnou teplotou nad 200 °C. Teplota 150 °C je podkročena po 8 hodinách odběru při délce jádra 5 m, pro délku 10 m je tato doba téměř 29 hodin. Při 15m jádru je 150 °C podkročeno až po 44 hodinách odběru. Další možnost regulace teploty výstupního média spočívá v regulaci rychlosti média v tělese výměníku.



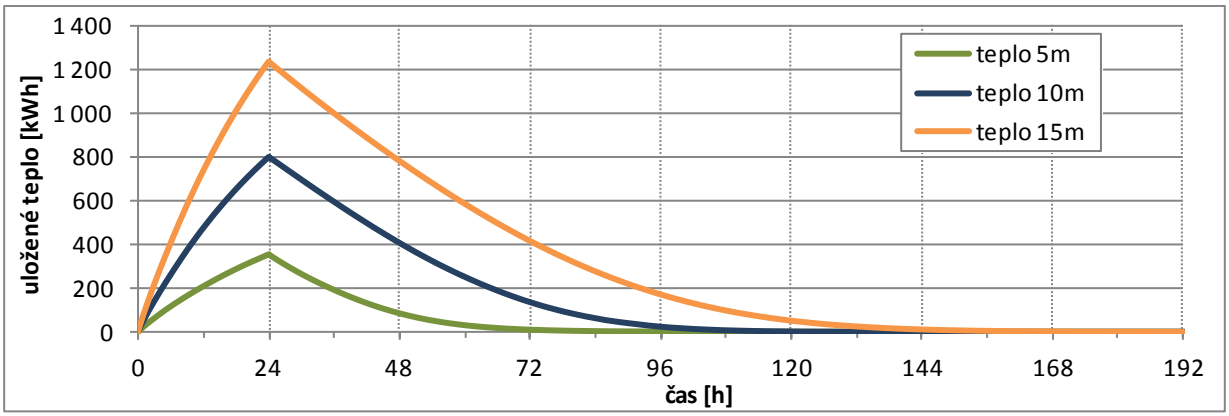
Obr. 80 Průběh teplot vystupujícího vzduchu z tepelného výměníku pro 5, 10 a 15 metrové jádro úložiště.

Pětimetrové úložiště na počátku plnění odebírá příkon přes 30 kW. Během 24 hodin dochází k jeho poklesu na 12 kW, příkon v dalších variantách je přibližně úměrný prodloužení úložiště. Počáteční odebírané teplo odpovídá výkonu 15 kW a téměř lineárně, během 48 hodin odběru (24 - 72), klesá až k nule. Tepelné ztráty pláštěm ve špičce činí 1.1 kW. Uvedené hodnoty jsou přepočteny pro celé úložiště. Během simulace bylo do úložiště doplněno 369 kWh tepla, z toho bylo následně odebráno 336 kWh. Celková ztráta pláštěm činila 33 kWh (9%). Průběh příkonu, ztrát a odebraného tepla je vynesen v grafu na Obr. 81.

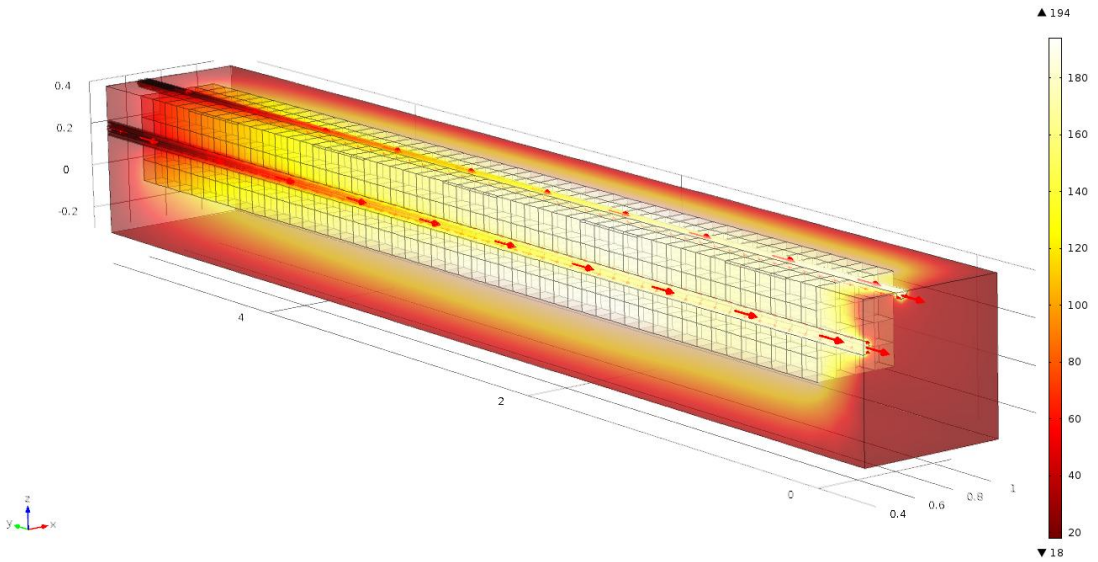


Obr. 81 Průběh tepelných toků ve třech variantních délkách úložiště. Je vynesena energie dodaná topidly, ztráty pláštěm a odebrané teplo teplonosnou tekutinou.

Množství uloženého tepla je přímo úměrné velikosti úložiště a přibližně odpovídá 0.4 MWh na 5 metrů úložiště při době nabíjení 24 hodin. Simulované hodnoty uloženého tepla jsou v grafu na Obr. 82. Ukázka rozložení teplot a jejich pokles v souvislosti se směrem proudění je na Obr. 83. Ze simulací lze vytušit, že návrhem geometrie úložiště lze snadno optimalizovat provoz pro konkrétní účel.



Obr. 82 Průběh uloženého tepla v modlu jádra 5, 10 a 15 metrového úložiště



Obr. 83 Rozložení teplot v řezu pětimetrovým tepelným úložištěm 20 hodin od počátku odběru.

6. Diskuze

K simulacím a numerickému vyhodnocení provedených experimentů byl použit program COMSOL Multiphysics. Program popisuje sledované jevy pomocí matematického zápisu fyzikálních vztahů. K řešení matematického problému je použito výpočetní metody konečných prvků.

Při analýze prvotních měření prohřívání horninových vzorků byl identifikován neočekávaně výrazný vliv tepelného odporu, který vzniká na styku dvou materiálů. Díky zavedení odporu do modelových simulací byla dosažena lepší shoda měření a výsledků modelů. Tento jev byl pozorován i ve všech následujících experimentech.

Při výzkumu horninových vzorků s TVG byl měřením i modelově prokázán pozitivní vliv TVG na rozložení teplot a zvýšení tepelného toku. V experimentu s granitovým blokem s umělou spárou vyplněnou v jedné polovině TVG a v druhé balotinou byl ověřen způsob instrumentace komplexnějších experimentů, způsoby měření, sběru dat a jejich zpracování. Při modelovém vyhodnocení byly stanoveny toky v každé z polovin bloku a toky (ztráty) přes hranice modelu. Při maximu byl tepelný tok do poloviny s TVG o 38 % vyšší, v průměru o 24 %, oproti toku do poloviny s balotinou. Spára tvořila 5 % objemu bloku. Při analýze tepelných toků přes hranice modelu byl identifikován výrazný únik tepla malými plochami ocelového rámu mimo tepelnou izolaci. Část rozdílů mezi měřenými hodnotami a simulací lze přisoudit mechanické degradaci TVG v těsné blízkosti topné patrony.

Ze sérií variantních jednodušších i komplikovanějších modelových úloh vyplynulo doporučené zastoupení TVG v tepelném úložišti a konstrukce tepelného výměníku pro odběr tepla z akumulačního jádra. Doporučené zastoupení TVG v tepelném úložišti bylo stanoveno v rozmezí 20 až 30 %. Jako dostatečný, vzhledem k funkci, konstrukce a nákladů, byl navrhnut vzdušný tepelný výměník sestávající se ze čtyř tenkostěnných trubic s průměrem 60 mm. Na základě předběžných simulací bylo také navrženo rozmístění monitorovacích teploměrů ve finálním experimentu.

Celý finální experiment s prototypem vysokoteplotního úložiště trval 48 dní. Následně byly zpracovány zaznamenané časové řady z 25 čidel teploty, 2 čidel rychlosti proudění na vstupu a výstupu ze vzdušného výměníku a celkového příkonu při ohřevu tepelného úložiště. Na základě dat byla provedena simulace experimentu numerickým modelem. Nejprve byl kalibrován stacionární stav při plném nabití. Model dobře reprezentoval tento stav. K nadhodnocení modelových teplot dochází téměř výhradně v dolní polovině jádra úložiště, naopak k podhodnocení teplot dochází v horní části. Maximální zaznamenaná odchylka teploty v monitorovacích bodech byla 11.8 °C při plném nabití úložiště. Následně byly provedeny časově závislé simulace reprezentující dobu celého experimentu. V tomto případě model podhodnocuje dodané množství tepla, v průměru za jednotlivé periody vychází chyba 5.9 %. Z vývoje měřených teplot a průběhu zaznamenaného příkonu topných tyčí pochází nepotvrzené podezření o opětovné degradaci TVG v okolí topné tyče č. 3. Díky modelové simulaci byla sestavena bilance celého experimentu sestávající se z dodaného tepla, tepelných ztrát pláštěm a odebraným teplem proudícím vzduchem. Ztráta izolací při cyklickém režimu tvořila 28 %. Za celou dobu experimentu bylo spotřebováno 928.51 kWh energie.

Z variantních simulací různých materiálů tepelného úložiště byl vyhodnocen přínos TVG. Při 24 hodinovém ohřevu dokáže tepelné úložiště z kompozitu granitu a TVG akumulovat 45 kWh tepla. Identické úložiště pouze z granitu by pojmulo za stejný časový úsek 33.2 kWh, úložiště z běžného betonu 25.2 kWh. Nárůst akumulovaného tepla je v řádu desítek procent.

Pro analýzu možností optimalizace teplot vystupujícího vzduchu při odběru tepla byly sestaveny modely s liniovou geometrií. Průmět jádra byl protáhnut ve směru trubic tepelného výměníku na délku 5, 10 a 15 metrů. Simulace prokazují možnost škálování potřebného vývoje teploty vystupujícího vzduchu. Při 5m jádru úložiště je podkročena teplota 150 °C

vystupujícího vzduchu po 8 hodinách, při 15m jádru je toto podkročení simulováno až po 29 hodinách odběru.

Vyvinutá technologie konglomerátu TVG s granitovým materiálem se jeví jako konkurence schopná při vhodném nasazení v solárních tepelných elektrárnách nebo při využití odpadního tepla v těžkém nebo energetickém průmyslu. Ve spolupráci s Univerzitním centrem energeticky efektivních budov z ČVUT bylo uvažováno o ukládání tepla z odpadních spalin a jejich opětovnému využití při předehřívání vstupujících surovin.

7. Závěr

V práci byl zpracován přínos nového materiálu - tepelně vodivého geopolymeru, při skladování tepla ve vysokoteplotních úložištích. V textu je provedena rešerše způsobů ukládání energie s důrazem na ukládání ve formě tepla. Byly popsány principy ukládání zjevného, latentního i termochemického tepla. V části věnované konkrétním typům tepelných úložišť byly popsány způsoby a technologie ukládání tepla při nízkých i vysokých teplotách. V rešeršní části práce je v neposlední řadě dokumentován výběr horninového materiálu vysokoteplotního úložiště a vývoj tepelně vodivého geopolymeru.

Vyhodnocení přínosu tepelně vodivého geopolymeru bylo provedeno metodou matematického modelování. Jak experimenty, tak samotné modelování postupovalo od jednodušího ke složitějšímu. Postupně byl zdokumentován vývoj znalostí a instrumentace experimentů a jejich vyhodnocení. Díky matematickému modelování jsou analyzovány experimenty s jednoduchými horninovými vzorky, středně velký experiment s blokem granitu s umělou spárou vyplněnou TVG až po samotný prototyp tepelného úložiště. Byl prokázán pozitivní vliv TVG na distribuci tepla v akumulačním jádru úložiště. Získané znalosti byly použity k extrapolaci výsledků a byly předpovězeny možnosti ukládání a odběru tepla ze středně velkých úložišť.

Ačkoli se může tepelné úložiště jevit na první pohled málo perspektivní, v kombinaci s fotovoltaickými články, v nasazení v průmyslových procesech při využití odpadního tepla, nebo zbytkového tepla spalin může konglomerát granitových hornin s TVG sloužit jako levný dočasný akumulátor, jinak v daný okamžik nevyužitelné energie.

8. Literatura

Abedin, A. H., Rosen M. A. (2012). Assessment of a closed thermochemical energy storage using energy and exergy methods, Applied Energy, vol. 93, 18–23.

Adam, D., and Markiewitz, R. (2009). Energy from Earth-coupled Structures, Foundations, Tunnels and Sewers,Geótechnique, vol 59, no. 3, 229-236.

Adinberg, R., Zvegilsky, D., Epstein, M. (2010). Heat transfer efficient thermal energy storage for steam generation. Energy Conversion and Management, 51(1), 9–15.

Al-Abidi, A. A., Bin Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Lim, C. H., Th, A. (2012). Review of thermal energy storage for air conditioning systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 5802–5819.

Alkilani, M. M., Sopian, K., Alghoul, M. a., Sohif, M., & Ruslan, M. H. (2011). Review of solar air collectors with thermal storage units. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1476–1490.

Allen, K. G., Von Backström, T. W., Kröger, D. G., Kisters, F. M. (2014). Rock bed storage for solar thermal power plants: Rock characteristics, suitability, and availability. Solar Energy Materials and Solar Cells, 126, 170–183.

Amori K. E. (2008). Numerical Simulation of Thermal Energy Storage System Using Phase Change Material for Free Cooling of Building, The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 8, No.1.

Anderson, R., Shiri, S., Bindra, H., Morris, J. F. (2014). Experimental results and modeling of energy storage and recovery in a packed bed of alumina particles. Applied Energy, 119, 521–529.

Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Mesolella, P., Tamburrino, S. (2012). Numerical investigation on sensible thermal energy storage with porous media for high temperature solar systems. Journal of Physics: Conference Series, 395.

Applied Precision (1999). ISOMET. User manual. Bratislava.

Ataer, E. (2006): Storage of thermal energy. In: Yalcin, A., Gogus, A. [eds]: Energy Storage Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford ,UK: 20s

Auto Fibre Craft (2008). Nano silver powder. [online] Dostupné z: http://www.nanosilver.in [cit. 9.11.2012]

Barton, N. G. (2013). Simulations of air-blown thermal storage in a rock bed. Applied Thermal Engineering, 55(1-2), 43–50.

Beasleyt, D. E., Clark, J. A. (1984). Transient response of a packed bed for thermal energy storage, 21(9), 1659–1669.

Benoit M., Mazet N., Neveu P (2014). Experimental investigation of an innovative thermochemical process operating with a hydrate salt and moist air for thermal storage of solar energy: Global performance. Applied Energy, 129, 177–186.

Bergman, T. L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011): Fundamentals heat mass transfers. JOHN WILEY & SONS, Hoboken.

Birch, F. (1942): Thermal conductivity and diffusivity, In: Handbook of Physical Constants. Pp. 243-266, Geological Society of America, Special Paper 36, New York.

Blahož, M., Kadlec, Z. (1996): Základy sdílení tepla. Edice SPBI SPEKTRUM., 109 s. ISBN 80-902001-1-7

Bouazza, A., Adam, D. (2012). Turning geostructures into sources of renewable energy. ANZ 2012 Conference Proceedings.

Brandl, H., (2013). Thermo-active Ground-Source Structures for Heating and Cooling, Procedia Engineering, 57, 9–18.

Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, Energy and Buildings, 39(2), 113-119.

Cabeza, L. F., Heinz, A., Streicher, W. (2005). Inventory of phase change materials (PCM). Report C2—IEA SHC Task 32. International Energy Association.

Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F. (2014). Numerical Investigation of a Packed Bed Thermal Energy Storage System with Different Heat Transfer Fluids. Energy Procedia, 45, 598–607.

Cibulka, I., Hnědkovský, L., Hynek, V. (2006). Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření. Ústav fyzikální chemie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha.

Clauser, Ch., (2003). Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, SHEMAT and Processing SHEMAT, Springer. Berlin.

COMSOL AB. (2012a). COMSOL Multiphysics – User's Guide, version 4.3, Stockholm.

COMSOL AB. (2012b). Heat Transfer Module – User's Guide, version 4.3, Stockholm.

Čermák, V., Rybach, L. (1982). Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks, in: Landolt - Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group V. 305-343. Springer. Berlin-Heidelberg.

Daschner, R., Binder, S., Mocker, M. (2013). Pebble bed regenerator and storage system for high temperature use. Applied Energy, 109, 394–401.

De Boer, R, Haije, W, Veldhuis, J, Smeding, S. (2004). Solid sorption cooling with integrated storage: the SWEAT prototype. In: 3rd International heat powered cycles conference—HPC, Larnaca, Cyprus.

Diersch, H-J.G. (2005). FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system, reference manual, WASY, Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin.

Dunn, R., Lovegrove, K., Burgess G. (2012). A Review of Ammonia-Based Thermochemical Energy Storage for Concentrating Solar Power, Proceedings of the IEEE 100(2), 391-400.

Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. Ben, Lassue, S., & Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Evans, A., Strezov, V., Evans, T. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 4141-4147.

Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy and Management, 45, 1597-1615.

Fernandes, D., Pitié, F., Cáceres, G., Baeyens, J. (2012). Thermal energy storage: „How previous findings determine current research priorities". Energy, 39(1), 246-257.

Fernandez, A.I., Martínez, M. , Segarra, M., Martorell, I., Cabeza, L.F. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells 94(10), 1723-1729.

Fleming, E., Wen, S., Shi, L., & da Silva, A. K. (2015). Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit. International Journal of Heat and Mass Transfer, 82, 273–281.

Foudhil, W., Dhifaoui, B., Jabrallah, S. B., Dutil, Y., & Rousse, D. R. (2012). Numerical Simulation of Thermal Storage by Latent and Sensible Heat in a Porous Vertical Channel: Performance Analysis and Comparison. Numerical Heat Transfer Part A: Applications, 62(12), 948–972.

Franěk, J., Dobeš, P., Dudíková, B., Gadas, P., Hanák, J., Klomínský, J., Konopásek, J., Martínek, K., Nahodilová, R., Toužimský, M., Trubač, J., Verner, K., Vondrovič, L., Vrána, S., Žáčková, E. (2012) Reverzibilní skladování energie. Zpráva za 2. etapu: Petrologická, petrofyzikální a mikrostrukturní charakteristika intaktních hornin: implikace pro výběr potencionálně vhodných lokalit, Česká geologická služba, Praha.

Frodl, S., Franzius, J. N., and Bartl, T. (2010). Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach. Geomechanics and Tunnelling, 3(5), 658-668.

Fukai, J., Hamada, Y., Morozumi, Y., Miyatake, O. (2003). Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: experiments and modeling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(23), 4513–4525.

Gaine, K., Duffy, A., 2010: A life cycle cost analysis of large-scale thermal energy storage technologies for buildings using combined heat and power. ARROW@DIT Conference Papers, Dublin Energy Lab, Dublin Institute of Technology, 1-11.

Gil, A., Medrano, M. Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L. F. (2010). State of art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 – Concepts, materials and modelization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(1),31-55.

Guo, C., Zhang, W. (2008). Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system. Energy Conversion and Management, 49(5), 919–927.

Hamada, Y., Ohtsu, W., Fukai, J. (2003). Thermal response in thermal energy storage material around heat transfer tubes: effect of additives on heat transfer rates, Solar Energy 75(4), 317-328.

Hasnain, S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. Energy Conversion and Management, 39(11), 1127–1138.

Heller, L., Gauché, P. (2013). Modeling of the rock bed thermal energy storage system of a combined cycle solar thermal power plant in South Africa. Solar Energy, 93, 345–356.

Herrmann, U., Kelly, B., Price, H. (2004). Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. Energy, 29(5-6), 883–893.

Hladký, R. (2012). Reverzibilní skladování energie. Zpráva za 2. etapu. Tepelné zatěžování horninových vzorků. Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i., Praha.

Hladký, R. (2013). Reverzibilní skladování energie. Zpráva za 3. etapu. Tepelné konstanty a tepelné zatěžování hornin. Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i., Praha.

Horai, K. (1971): Thermal conductivity of rock-forming minerales. Journal of Geophysical Research. 76 (5). 1278-1308.

Hot Disk AB. (2014). Testing Thermal Conductivity | TPS 2500 S. [online] Dostupné z: http://www.hotdiskinstruments.com/products/instruments-for-thermal-conductivity-measurements/tps-2500-s.html [cit. 8.2.2014]

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 19(3), 291–312.

Chidambaram, L. A., Ramana, A. S., Kamaraj, G., Velraj, R. (2011). Review of solar cooling methods and thermal storage options. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6), 3220–3228.

Iammakm K., Wongsuwanm W., Kiatsirirojm T. (2004). Investigation of modular chemical energy storage performance. In: Proceeding of the joint international conference on sustainable energy and environment (SEE).

Jaehning, D., Hausner, R., Wagner W., Isaksson C. (2006). Thermo-chemical storage for solar space heating in single-family house. In: Proceeding of Ecostock, New Jersey.

Kaviany, M. (2011). Essentials of Heat Transfer- Principles, Materials, and Applications Cambridge University Press, New York, ISBN 978-1-107-01240-0.

Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 115, 114–122.

Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, a., El Rhafiki, T., Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. Solar Energy Materials and Solar Cells, 120(PART A), 59–80.

Kuneš, J., (1989). Modelování tepelných procesů, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1-423.

Lachman, V. et al. (2014). Reverzibilní skladování energie. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích - Závěrečná zpráva za project. ISATech, s.r.o., Praha.

Laing, D., Steinmann, W.-D., Tamme, R., Richter, C. (2006). Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. Solar Energy, 80(10)

Lee, K. S. (2010). A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems. Energies, 3(6), 1320–1334.

Marval, Š., (2013). Bakalářská práce: Tepelná úložiště ve zvodni a jejich alternativy, Fakulta Životního Prostředí. Česká Zemědělská Univerzita v Praze. Praha.

Mauran, S., Lahmidi, H., Goetz, V. (2008). Solar heating and cooling by a thermochemical process. First experiments of a prototype storing 60 kW h by a solid/gas reaction. Solar Energy, 82, 623–36.

Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 - Case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56–72.

Mimouni, T., Dupray, F., and Laloui, L., (2014). Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel. Geothermics, 51, 380-387.

N'Tsoukpoe, K.E., Liu, H., Le Pierrès, N., Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. Renewable Sustainable Energy Reviews,13, 2385–96.

Najser, K., Kučera, P., Tichovská, M., Vojtěchová, A., Záruba, J. (2012). Reverzibilní skladování energie. Zpráva za 2. etapu. Geotechnické a hydrodynamické změny v temperovaných horninových matricích. Arcadis Geotechnica a.s., Praha.

Nam, Y., Ooka, R. (2010). Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment. Energy and Buildings, 42(1), 69–75.

Navarro, M. E., Martínez, M., Gil, A., Fernández, A. I., Cabeza, L. F., Olives, R., Py, X. (2012). Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 107, 131–135.

Nkwetta, D. N., Haghighat, F. (2014). Thermal energy storage with phase change material - A state-of-the art review. Sustainable Cities and Society, 10, 87–100.

Norazyk, A. (2009). Thermal Conductivity Mesurements of Graphite Samples, Colorado School of Mines, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, 1-33.

Nosek, J., Kvapilová, Š., Cádrová, L. (2012). Zpráva za 2. etapu Vývoj geopolymeru a vodivé nanohmoty. Ústav nových technologií a aplikované informatiky, Technická univerzita v Liberci, Liberec.

Nosek, J., Kvapilová, Š., Cádrová, L. (2013). Zpráva za 3. etapu Vývoj geopolymeru a vodivé nanohmoty. Ústav nových technologií a aplikované informatiky, Technická univerzita v Liberci, Liberec.

Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., Rodriguez-Hernandez, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. Applied Energy, 87(2), 390–397.

Paksoy, H. O., Gürbüz, Z., Turgut, B., Dikici, D., Evliya, H. (2004). Aquifer thermal storage (ATES) for air-conditioning of a supermarket in Turkey. Renewable Energy, 29(12), 1991–1996.

Pavekek, M. (2003). Termomechanika. Akademické nakladatelství CERM, Brno. ISBN 80-214-2409-5.

Petrunin, G. I., Popov, V. G. (1995). Temperature dependence of lattice thermal conductivity of Earth's mineral substance (English Translation). Physics of the solid earth, 30(7/8). Moscow University.

Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(7), 3341–3359.

Prasad, L., Muthukumar, P. (2013). Design and optimization of lab-scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application. Solar Energy, 97, 217–229.

Py, X., Calvet, N., Echegut, P., Bassada, C., Olives, R., Meffre, A., Veron, E., Ory, S. (2011). Recycled Material for Sensible Heat Based Thermal Energy Storage to be Used in Concentrated Solar Thermal Power Plants, Journal of Solar Energy Engineering, 133(3).

Py, X., Calvet, N., Olive,s R., Echegut, P., Bassada, C., Jay, F. (2009). Thermal storage for solar power plants based on low cost recycled material. Online 7.5.2014: http://www.researchgate.net/profile/Catherine_Bessada/publication/228474806_Thermal_storage_for_solar_power_plants_based_on_low_cost_recycled_material/file/5046351cd111911da4.pdf

Rálek, P., Hokr, H. (2012). Numerical Simulation of Temperature and Stress Fields in the Rock Heating Experiment, COMSOL Conference 2012 Milan Proceedings, COMSOL Inc., USA.

Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I. (1998). Handbook of Heat Transfer (3rd Edition). McGraw-Hill, New York.

Rühaak, W., Rath, V., Wolf, a., & Clauser, C. (2008). 3D finite volume groundwater and heat transport modeling with non-orthogonal grids, using a coordinate transformation method. Advances in Water Resources, 31(3), 513–524.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews,13(2), 318–45.

Singh, H., Saini, R. P., Saini, J. S. (2010). A review on packed bed solar energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), 1059–1069.

Socaciu, L. G. (2011). Seasonal sensible thermal energy storage solutions, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 10(19), 49-68.

Stitou, D., Mazet, N., Mauran, S. (2012). Experimental investigation of a solid/gas thermochemical storage process for solar air-conditioning. Energy, 41, 261–70.

Sun Innovations, Inc. (2012). Nanomaterial Store: Nano-Silver. [online] Dostupné z http://www.nanomaterialstore.com/nano-silver.php [cit. 9.11.2012]

Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W. D. (2004). Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough, Journal of Solar Energy Engineering 126(2), 794-800.

Tamme. R., Laing. D., Steinmann. W. D. (2003). Advanced Thermal Energy Storage Technology for Parabolic Trough. Proceedings of International Solar Energy Conference.

Tian, Y., Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy, 104, 538–553.

Trefry, M. G., Muffels, C. (2007). FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool. Ground Water, 45(5), 525–528.

Tyagi, V. V., Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings - a state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(6), 1146–66.

Unterberger, W., Hofinger, J., Gruenstaeudl, T., Ada, D. (2004). Utilization of Tunnels as Source of Ground Heat and Cooling -- Practical Applications in Austria, iC Group.

Vanhoudt, D., Desmedt, J., Van Bael, J., Robeyn, N., Hoes, H. (2011). An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. Energy and Buildings, 43(12), 3657–3665.

Vosteen, H.-D., Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 28(9-11), 499–509.

Walmsley, T. G., Walmsley, M. R. W., Atkins, M. J., Neale, J. R. (2014). Integration of industrial solar and gaseous waste heat into heat recovery loops using constant and variable temperature storage. Energy, 75, 53–67.

Waples, D.; W., Waples, J., S. (2004). A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks, Natural Resources Research, 13 (2).

Wellmann, F., Reid, L. (2014). Basin-scale geothermal model calibration : experience from the Perth Basin, Australia. Energy Procedia, 59, 382–389.

Werchau, C., Hötzl, H., & Stober, I. (2005). Groundwater circulation and heat transport in the crystalline basement – two numerical models and their interpretation. Geophysical Research Abstracts, 7.

Wiberg, N. E. (1983). Heat Storage in Aquifers Analyzed by the Finite Element Method. Ground Water, 21(2).

Xu, J., Wang, R. Z., Li, Y. (2013). A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. Solar Energy, 103, 610–638.

Ye, W. B., Zhu, D. S., Wang, N. (2011). Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit. Applied Thermal Engineering, 31(17-18), 3871–3884.

Zanganeh, G., Commerford, M., Haselbacher, A., Pedretti, A., & Steinfeld, A. (2014). Stabilization of the outflow temperature of a packed-bed thermal energy storage by combining rocks with phase change materials. Applied Thermal Engineering, 70(1), 316–320.

Zanganeh, G., Pedretti, A., Haselbacher, A., Steinfeld, A. (2015). Design of packed bed thermal energy storage systems for high-temperature industrial process heat. Applied Energy, 137, 812–822.

Zanganeh, G., Pedretti, A., Zavattoni, S., Barbato, M., Steinfeld, A. (2012). Packed-bed thermal storage for concentrated solar power – Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. Solar Energy, 86(10).

Zhao C. Y., Lu, W., Tian, Y. (2010). Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). Solar Energy, 84, 1402–1412.

Zhao, C. Y., Wu, Z. G. (2011). Thermal property characterization of a low melting-temperature ternary nitrate salt mixture for thermal energy storage systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(12), 3341–3346.

Zhao, W., Elmozughi, A. F., Oztekin, A., Neti, S. (2013). Heat transfer analysis of encapsulated phase change material for thermal energy storage. International Journal of Heat and Mass Transfer, 63, 323–335.

Zyvoloski, G. A., Robinson, B. A., Dash, Z. V., Kelkar, S., Viswanathan, H. S., Pawar, R. J., Stauffer, P. H. (2006). SOFTWARE USERS MANUAL for the FEHM Application Version 3.1.0. Los Alamos National Laboratory. Berkeley.

Seznam obrázků

OBR. 1 PŘEHLED MOŽNOSTÍ UKLÁDÁNÍ ENERGIE. PŘEVZATO Z MARVAL (2013). 2
OBR. 2 VLEVO JE ZNÁZORNĚNA KONDUKCE, KDY TEPLO PROCHÁZÍ PEVNOU LÁTKOU. UPROSTŘED JE KONVEKCE, KDY KAPALINA ODNÁŠÍ TEPLO VYZÁŘENÉ DESKOU. VPRAVO JE ZNÁZORNĚNA RADIACE Z POVRCHŮ, ČERVENÉ ŠIPKY ZNÁZORŇUJÍ SMĚR ŠÍŘENÍ TEPLA (BERGMAN ET AL., 2011). 6
OBR. 3 HODNOTY MĚŘENÉ TEPELNÉ KAPACITY HORNIN V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ: 1: GRANIT, 2: DIORIT, 3: DIABAS, 4: GABRO, 5: DUNIT, 6: HARZBURGIT, 7: SERPENTINIT . PŘEVZATO Z PETRUNIN ET POPOV (1995). 18
OBR. 4 ZÁVISLOST MĚRNÉHO TEPELNÉHO ODPORU HORNIN NA TEPLOTĚ: 1: GRANIT, 2: GRANIT, 3: DIORIT, 4: DIABAS, 5: DUNIT, 6: DUNIT, 7: GABRO, 8: SERPENTINIT, 9: HYPERSTENIT, 10: EKLOGIT, 11: SLÍDA. PŘEVZATO Z PETRUIN ET POPOV (1995) 19
OBR. 5 MĚŘENÁ ZÁVISLOST SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLOTĚ VYBRANÝCH HORNIN 24
OBR. 6 MĚŘENÉ ZÁVISLOST HODNOT OBJEMOVÉ TEPELNÉ KAPACITY NA TEPLOTĚ VYBRANÝCH HORNIN 25
OBR. 7 ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI A OBJEMOVÉ TEPELNÉ KAPACITY TVG NA TEPLOTĚ 27
OBR. 8 GRAFY Z VÝSTUPŮ TERMOGRAVIMETRIE. VLEVO 1. CYKLUS ZAHŘÁTÍ TVG NA 400 °C, VPRAVO 4. CYKLUS ZAHŘÁTÍ TVG NA 1000 °C 28
OBR. 9 MOŽNÉ PŘÍPADY KONVEKTIVNÍHO OCHLAZOVÁNÍ (COMSOL, 2012B) 35
OBR. 10 EXPERIMENTÁLNÍ SOUSTAVA – VLEVO A) ODPOROVÁ PLOTÝNKA; VPRAVO B) INDUKČNÍ VAŘIČ 42
OBR. 11 NAMĚŘENÁ DATA TEPLOTY; A) VLEVO EXPERIMENT S PŘEDEHŘÁTÍM (TP1), B) VPRAVO BEZ PŘEDEHŘÁTÍ (TP2), DATA POŘÍZENA ODPOROVÝM VAŘIČEM. 42
OBR. 12 GEOMETRIE MODELU ANALÝZY ROZDÍLNÝCH OKRAJOVÝCH PODMÍNEK 43
OBR. 13 VÝSLEDEK SIMULACE TP1 (S PŘEDEHŘÁTÍM HRANOLU): A) BEZ ZAHRNUTÍ VLIVU SPÁRY, B) SE SPÁROU H = 1 MM. 44
OBR. 14 VÝSLEDEK SIMULACE TP2; BEZ POČÁTEČNÍHO PŘEDEHŘÁTÍ HRANOLU. MODELOVÉ TEPLOTY A) V POROVNÁNÍ S MĚŘENÝMI DATY, B) V ŘEZU PODÉL SVISLÉ OSY. 44
OBR. 15 MĚŘENÁ DATA (NOSEK ET AL., 2012) V SOUSTAVĚ S INDUKČNÍM OHŘEVEM 45
OBR. 16 MODELOVÁ REPREZENTACE ÚVODNÍCH MĚŘENÍ HLINÍKOVÉHO HRANOLU S INDUKČNÍM OHŘEVEM 46
OBR. 17 POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH TEPLOT PŘI OHŘEVU VZORKU 46
OBR. 18 A) PRŮBĚH TEPLOT PODÉL ŘEZU HLINÍKOVÝM VZORKEM B) TEPELNÝ TOK V ČASE. 47

OBR. 19 DETAILY EXPERIMENTÁLNÍ SOUSTAVY: PŘI MĚŘENÍ VZORKU TEPELNĚ VODIVÉ HMOTY 47
OBR. 20 PRŮBĚH TEPLOT PŘI ZAHŘÍVÁNÍ VZORKU TVG PŘI ANALÝZE TEPELNÉ VODIVOSTI A VÝSLEDKY TŘÍ MODELŮ. V GRAFU JSOU VYNESENY PRŮBĚHY SIMULOVANÝCH TEPLOT PRO TVG SE ZADANOU TEPELNOU VODIVOSTÍ Λ = 5 $W \cdot M^{-1}K^{-1}$, Λ = 14 $W \cdot M^{-1}K^{-1}$ A Λ TVG = 20 $W \cdot M^{-1}K^{-1}$. 48
OBR. 21 EXPERIMENTY PROHŘÍVÁNÍ VÁLEČKŮ A) VLEVO ILUSTRAČNÍ FOTOGRAFIE PROHŘÍVANÉHO VZORKU (PÍSKOVEC) B) ROZMĚRY VÁLCOVÉHO HORNINOVÉHO VZORKU S MINI-VRTEM (ŽLUTĚ). (HLADKÝ, 2012) .. 49
OBR. 22 PRŮBĚH FUNKCÍ TEPELNÉ VODIVOSTI (Λ – PD_K A TVG_K) A KAPACITY (PD_CP A TVG_CP) V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ PRO GRANIT PANSKÉ DUBENKY (PD) A TEPELNĚ VODIVÉHO GEOPOLYMERU (TVG). 50
OBR. 23 MODELOVÁ GEOMETRIE PROHŘÍVÁNÍ HORNINOVÝCH VÁLEČKŮ S VYPLNĚNÝM MINI-VRTEM. 50
OBR. 24 PRŮBĚHY TEPLOT PŘI ZAHŘÍVÁNÍ VÁLCOVÉHO VZORKU, VLEVO BEZ MINI-VRTU, VPRAVO S VÝPLNÍ TVG. 51
OBR. 25 UKÁZKA MODELOVÉ SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ A VÝSLEDNÉ POLE TEPLOT V ČASE T = 7200 S. 52
OBR. 26 MODELOVÉ ROZLOŽENÍ A) VLEVO TEPLOT; B) VPRAVO TOKU TEPLA; V ŘEZU MODELU EXPERIMENTU S TVG V ČASE T = 7200 S. 52
OBR. 27 FOTOGRAFIE GRANITOVÉHO BLOKU SE ZAZUBENOU SPÁROU (ÚSMH) 53
OBR. 28 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU S GRANITOVÝM BLOKEM. VLEVO PŘÍPRAVA MONITOROVACÍCH TEPLOMĚRŮ; VPRAVO NANESENÍ TVG DO ZAZUBENÉ SPÁRY. (ÚSMH) 53
OBR. 29 SCHEMATICKÉ UMÍSTĚNÍ TEPLOTNÍCH ČIDEL - PŮDORYS A BOKORYS. 54
OBR. 30 FOTOGRAFIE Z PŘÍPRAVY TESTU TEPELNĚ VODIVÉHO GEOPOLYMERU NA GRANITOVÉM BLOKU. VLEVO GRANITOVÝ BLOK V OCELOVÉM RÁMU S PŘÍVODY K TOPIDLU A TEPLOMĚRŮM; VPRAVO JIŽ OSAZENÝ BLOK IZOLACÍ A MĚŘÍCÍ APARATUROU (FOTO ÚSMH) 54
OBR. 31 REPREZENTACE ZUBŮ UMĚLÉ SPÁRY V MODELOVÉ GEOMETRII - GRANIT: ŠEDIVĚ, VÝPLŇ SPÁRY: BÍLE. ŠÍŘKA ZUBU JE 23 MM. 55
OBR. 32 SCHÉMA MODELOVÉ GEOMETRIE EXPERIMENTU S GRANITOVÝM BLOKEM. 55
OBR. 33 GRAF TEPLOT ZAZNAMENANÝCH NA ČIDLECH BĚHEM PROHŘÍVÁNÍ GRANITOVÉHO BLOKU. PÍSMENY OZNAČENY PÁROVÉ TEPLOMĚRY (SYMETRICKY UMÍSTĚNÉ). 56
OBR. 34 NA HORNÍM GRAFU JE VYNESEN VÝKON TOPNÉ PATRONY, DVA SPODNÍ GRAFY ZNÁZORŇUJÍ PRŮBĚH TEPLOTY NA ČIDLECH T27 A T28 (OSA VPRAVO) A JEJÍ DERIVACI V ČASE (LEVÁ OSA) 57
OBR. 35 POZOROVANÉ TEPLOTNÍ VÝKYVY NA NĚKTERÝCH ČIDLECH. 59
OBR. 36 MĚŘENÉ (TEČKOVANÁ ČÁRA) A SIMULOVANÉ (PLNÁ ČÁRA) PRŮBĚHY TEPLOT NA VYBRANÝCH TEPLOMĚRECH. 60
OBR. 37 VLEVO A) PRŮBĚH MĚŘENÉHO PŘÍKONU TOPNÉ PATRONY A MODELOVÝCH TOKŮ DO POLOVINY HŘEBENE S TVG A BALOTINOU; VPRAVO B) MODELOVÉ TEPELNÉ ZTRÁTY POVRCHEM IZOLACE (2.013 M2) A OCELOVÉHO HÁMU (0.5198 M2). 60
OBR. 38 FOTOGRAFIE TOPNÉ PATRONY A OKOLNÍHO TVG POŘÍZENÁ PŘI ROZEBÍRÁNÍ GRANITOVÉHO BLOKU (ÚSMH). 61
OBR. 39 VLIV ZASTOUPENÍ TEPELNĚ VODIVÉHO GEOPOLYMERU NA VYBRANÉ CHARAKTERISTIKY. 61
OBR. 40 OKRAJOVÉ PODMÍNKY MODELŮ 62
OBR. 41 UKÁZKA RŮZNÉHO POČTU JEDNOCENTIMETROVÝCH SPÁR, VLEVO 10, VPRAVO 30. 62
OBR. 42 TABULKA USTÁLENÝCH TOKŮ A JEJICH VYNESENÍ V GRAFU. 63
OBR. 43 ROZDÍLNÝ SMĚR DOMINANTNÍHO TEPELNÉHO TOKU VE VARIANTÁCH F A F_KOLMO (RESP. G A G_KOLMO). 66
OBR. 44 POROVNÁNÍ PRŮBĚHU ULOŽENÉ ENERGIE V ÚLOŽIŠTI PŘI ROZDÍLNÉM SMĚRU TEPELNÉHO TOKU 66
OBR. 45 VLEVO TABULKA MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ; VPRAVO ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLOTĚ IZOLACE ROCKWOOL HD WIRED MAT. 68
OBR. 46 PRŮBĚH ENERGETICKÝCH TOKŮ V MODELECH. 69
OBR. 47 PLNĚNÍ A PRÁZDNĚNÍ AKUMULAČNÍHO JÁDRA PRO TŘI RŮZNÉ GEOMETRIE. 69
OBR. 48 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ VÝPOČTU, VLEVO PRŮBĚH ULOŽENÉHO TEPLA V JÁDRU ÚLOŽIŠTĚ; VPRAVO PRŮBĚH HODNOT ODBĚRU TEPLA. 70

OBR. 49 ROZLOŽENÍ TEPLOT V OSE ÚLOŽIŠTĚ PO 20 H OCHLAZOVÁNÍ. VLEVO ŘEŠENÍ APROXIMACI, VPRAVO S TURBULENTNÍM PROUDĚNÍM. 70
OBR. 50 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE 71
OBR. 51 FOTOGRAFIE ZE STAVBY AKUMULAČNÍHO JÁDRA. KONGLOMERÁT GRANITOVÝCH KOSTEK A TVG. (LACHMAN ET AL., 2014) 71
OBR. 52 ROZMĚRY LABORATORNÍHO PROTOTYPU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ BEZ VYOBRAZENÉHO VZDUŠNÉHO VÝMĚNÍKU. 72
OBR. 53 FOTOGRAFIE Z PRŮBĚHU VÝSTAVBY PROTOTYPU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. VLEVO JÁDRO ÚLOŽIŠTĚ BEZ ROZDĚLOVACÍHO PRVKU VZDUŠNÉHO VÝMĚNÍKU, VPRAVO JIŽ PROBÍHÁ ZAIZOLOVÁNÍ AKUMULAČNÍHO JÁDRA I SPOLU S PRVKY VÝMĚNÍKU. 73
OBR. 54 FOTOGRAFIE KONEČNÉ PODOBY PROTOTYPU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ S TVG. 73
OBR. 55 ZAZNAMENANÝ PRŮBĚH TEPLOT TOPNÝCH TYČÍ - FÁZE 1 A 2. 75
OBR. 56 ČASOVÝ PRŮBĚH TEPLOT PŘI TESTU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ Z VYBRANÝCH TEPLOMĚRŮ. 76
OBR. 57 ZÁZNAM TEPLOT VE VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ TRUBICI VZDUŠNÉHO VÝMĚNÍKU, ZLEVA DOPRAVA: CELÝ EXPERIMENT; JEDEN CYKLUS; DETAIL SPUŠTĚNÍ ODBĚRU. 77
OBR. 58 ZAZNAMENANÝ PRŮBĚH RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ NA VSTUPU A VÝSTUPU TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU. 78
OBR. 59 STANOVENÍ ZÁVISLOSTI PRŮMĚRNÉ A BODOVÉ RYCHLOSTI (VLEVO); PROFIL RYCHLOSTÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ V TRUBICI R = 0.062 M (VPRAVO). 78
OBR. 60 PŘÍKON TOPNÝCH TYČÍ V OBDOBÍ PRVNÍ A DRUHÉ FÁZE EXPERIMENTU (ŘÍZENÉ NABÍJENÍ, USTÁLENÝ STAV) 79
OBR. 61 KUMULATIVNÍ PŘÍKON PRO JEDNOTLIVÉ CYKLY OHŘEVU. 79
OBR. 62 ORIENTAČNÍ BILANCE EXPERIMENTU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. ODEBRANÉ TEPLO BYLO VYPOČTENO NA ZÁKLADĚ RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ MĚŘENÝCH PRANDTLOVOU TRUBICÍ – „ODBĚR PR“, NEBO ANEMOMETREM - „ODBĚR AN“. 80
OBR. 63 GEOMETRIE TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. JÁDRO ČERVENĚ, SOUSTAVA VZDUŠNÉHO TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU ZELENĚ 81
OBR. 64 NEPRAVIDELNÁ VÝPOČETNÍ SÍŤ KONEČNÝCH ELEMENTŮ - REPREZENTACE TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. 82
OBR. 65 ZAZNAMENANÁ TEPLOTA TOPNÝCH TYČÍ (KONEC FÁZE 2) PŘED ZAHÁJENÍM ŘÍZENÉHO ODBĚRU TEPLA. 83
OBR. 66 ROZDÍL MODELOVÝCH A MĚŘENÝCH TEPLOT NA JEDNOTLIVÝCH TEPLOTNÍCH ČIDLECH PŘI USTÁLENÉM STAVU 84
OBR. 67 GRAF PRŮBĚHU MĚŘENÉHO A SIMULOVANÉHO PŘÍKONU DO ÚLOŽIŠTĚ BĚHEM 1 A 2. FÁZE EXPERIMENTU. 85
OBR. 68 POROVNÁNÍ MĚŘENÉ A SIMULOVANÉ DODANÉ CELKOVÉ ENERGIE. 85
OBR. 69 MODELOVÁ BILANCE TOKŮ TEPLA BĚHEM 1., 2. A 3. FÁZE EXPERIMENTU. 86
OBR. 70 MODELOVÁ BILANCE ZÁSOB TEPLA EXPERIMENTU TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. 86
OBR. 71 KUMULATIVNÍ PRŮBĚH DODANÉ ENERGIE, TEPELNÝCH ZTRÁT PLÁŠTĚM A ODEBRANÉHO TEPLA - MODELOVÁ SIMULACE. 88
OBR. 72 ENERGETICKÁ BILANCE JEDNOTLIVÝCH CYKLŮ EXPERIMENTU (MODELOVÁ SIMULACE). 89
OBR. 73 PRŮBĚH HODNOT ULOŽENÉHO TEPLA PŘI 200 HODINOVÉM CYKLU 90
OBR. 74 FOTOGRAFIE TEPELNÉHO ÚLOŽIŠTĚ Z BETONU U SLUNEČNÍ ELEKTRÁRNY PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA (LAING ET AL. 2006) 90
OBR. 75 GRAF SIMULOVANÝCH PRŮBĚHŮ ULOŽENÉHO TEPLA V TEPELNÉM ÚLOŽIŠTI, GRANITOVÉM A BETONOVÉM MONOBLOKU. 91
OBR. 76 GRAF PRŮBĚHŮ SIMULOVANÝCH MINIMÁLNÍCH (MIN_T) A MAXIMÁLNÍCH (MAX_T) TEPLOT V JÁDRU (VIZ OBR. 24) ÚLOŽIŠTĚ Z MONOBLOKŮ NEBO GRANITOVÝCH KOSTEK S TVG). 92
OBR. 77 VLEVO PRŮBĚH PRŮMĚRNÉ TEPLOTY JÁDRA (AVG_T); VPRAVO PRŮBĚH ROZDÍLU MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ TEPLOTY JÁDRA V DANÉM OKAMŽIKU PŘI 12H CYKLICKÉM PROVOZU (DIF). 92
OBR. 78 PRŮBĚH HODNOT ULOŽENÉHO TEPLA V JEDNOTLIVÝCH VARIANTÁCH, 48 HODINOVÝ CYKLUS. 93
OBR. 79 PRŮBĚH ROZDÍLŮ MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ TEPLOTY V JÁDRU SIMULOVANÉHO ÚLOŽIŠTĚ. 93

OBR. 80 PRŮBĚH TEPLOT VYSTUPUJÍCÍHO VZDUCHU Z TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU PRO 5, 10 A 15 METROVÉ JÁDRO ÚLOŽIŠTĚ. 95
OBR. 81 PRŮBĚH TEPELNÝCH TOKŮ VE TŘECH VARIANTNÍCH DÉLKÁCH ÚLOŽIŠTĚ. JE VYNESENA ENERGIE DODANÁ TOPIDLY, ZTRÁTY PLÁŠTĚM A ODEBRANÉ TEPLO TEPLONOSNOU TEKUTINOU. 95
OBR. 82 PRŮBĚH ULOŽENÉHO TEPLA V MODLU JÁDRA 5, 10 A 15 METROVÉHO ÚLOŽIŠTĚ 96
OBR. 83 ROZLOŽENÍ TEPLOT V ŘEZU PĚTIMETROVÝM TEPELNÝM ÚLOŽIŠTĚM 20 HODIN OD POČÁTKU ODBĚRU. 96

Seznam tabulek

TAB. 1 TYPICKÉ HODNOTY SOUČINITELE KONVEKCE (BERGMAN ET AL., 2011) 8
TAB. 2 TABULKOVÉ HODNOTY KOEFICIENTU EMISIVITY (ZDROJ: HTTP://WWW.ENGINEERINGTOOLBOX.COM). ... 9
TAB. 3 HODNOTY TEPELNÝCH PARAMETRŮ PRO BĚŽNÉ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI UKLÁDÁNÍ ZJEVNÉHO TEPLA. PŘEVZATO Z TIAN ET ZHAO (2013). 10
TAB. 4 HODNOTY TEPELNÝCH PARAMETRŮ PRO BĚŽNÉ TEKUTINY POUŽÍVANÉ PŘI UKLÁDÁNÍ ZJEVNÉHO TEPLA PŘI VYSOKÝCH TEPLOTÁCH. PŘEVZATO Z TIAN ET ZHAO (2013). 11
TAB. 5 TABULKA TEPELNÝCH PARAMETRŮ POPSANÝCH PCM, „N.A“ ZNAČÍ NEDOSTUPNOST ÚDAJE. PŘEVZATO Z TIAN ET ZHAO (2013). 12
TAB. 6 TABULKA MATERIÁLŮ UŽÍVANÝCH PŘI TERMOCHEMICKÉ REAKCI. PŘEVZATO Z TIAN ET ZHAO (2013). 13
TAB. 7 PŘEHLED VZORKOVANÝCH LOKALIT, PŘEVZATO Z FRANĚK ET AL. (2012) 20
TAB. 8 VÝSLEDKY GEOMECHANICKÝCH ZKOUŠEK NA PRVOTNÍM SOUBORU VZORKŮ. PÓROVITOST (N), HYDRAULICKÁ VODIVOST (K), RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÝCH P (V_P) A S (V_S) VLN, PRUŽNOSTNÍ (E) A DEFORMAČNÍ (E_{DEF}) MODUL, PEVNOST V PROSTÉM TLAKU (Σ_{UC}) A PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU (Σ_{TS}). PŘEVZATO Z LACHMAN ET AL. (2014) 21
TAB. 9 VÝSLEDNÉ HODNOTY MĚŘENÉ TEPELNÉ VODIVOSTI Λ A OBJEMOVÉ TEPELNÉ KAPACITY C_V 23
TAB. 10 STANOVENÉ HODNOTY SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI Λ A OBJEMOVÉ TEPELNÉ KAPACITY C_V PRO TEPLOTY V ROZMEZÍ 20 – 400 °C. PŘEVZATO Z HLADKÝ (2013) 24
TAB. 11 MĚŘENÉ HODNOTY TEPELNÉ VODIVOSTI Λ A OBJEMOVÉ TEPELNÉ KAPACITY CV TEPELNĚ VODIVÉHO GEOPOLYMERU (TVG) 27
TAB. 12 TYPICKÉ HODNOTY SOUČINITELE KONVEKCE (BERGMAN ET AL., 2011) 37
TAB. 13 VLASTNOSTI SIMULOVANÝCH MATERIÁLŮ (* ODHADNUTO) 43
TAB. 14 TABULKA TEPELNÝCH KONSTANT UŽITÝCH V MODELU (* ODHADNUTO) 45
TAB. 15 FYZIKÁLNÍ PARAMETRY SIMULOVANÝCH MATERIÁLŮ. 49
TAB. 16 TABULKA MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ ZADANÝCH V MODELU GRANITOVÉHO BLOKU. 55
TAB. 17 TEPELNÉ CHARAKTERISTIKY VYSOKOTEPLOTNÍHO BETONU A LITÉ KERAMIKY (LAING ET AL. 2006). 62
TAB. 18 TABULKA PROMĚNNÝCH JEDNOTLIVÝCH VARIANT. 64
TAB. 19 PŘEHLED ULOŽENÉ ENERGIE V MODELOVÉ DOMÉNĚ PRO JEDNOTLIVÉ VARIANTY, SEŘAZENO DLE NAAKUMULOVANÉ ENERGIE. 65
TAB. 20 TABULKA PARAMETRŮ A VÝSLEDKŮ MODELŮ 2D GEOMETRIE. 66
TAB. 21 EXPERIMENT PROVOZU ÚLOŽIŠTĚ - VYMEZENÍ FÁZÍ PROVOZU. 74
TAB. 22 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY, HODNOTY JSOU UVEDENY PRO TEPLOTU 20 °C. 81
TAB. 23 STANOVENÉ TEPLOTY TOPNÝCH TYČÍ PRO STACIONÁRNÍ MODEL. 83
TAB. 24 TABULKA USTÁLENÝCH MĚŘENÝCH A MODELOVÝCH TEPLOT TEPLOTNÍCH ČIDEL. 84
TAB. 25 MĚŘENÝ A MODELOVÝ KUMULATIVNÍ VÝKON NA KONCI JEDNOTLIVÝCH CYKLŮ. 88
TAB. 26 PARAMETRY SIMULOVANÝCH MATERIÁLŮ PŘI TEPLOTĚ 20 °C. 89
TAB. 27 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ TŘÍ SCÉNÁŘŮ NABÍJENÍ (JEDNORÁZOVÉ, CYKLICKÉ 12/12H A CYKLICKÉ 24/24H) A ČTYŘ VARIANT POUŽITÝCH MATERIÁLŮ ÚLOŽIŠTĚ. 94