

Česká zemědělská univerzita v Praze

TF - katedra mechaniky a strojnictví

FAPPZ - katedra pedologie a ochrany půd



METODIKA PRO VYUŽITÍ PŮDY JAKO NÍZKOTEPLNÍHO ZDROJE ENERGIE TEPELNÝCH ČERPADEL

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Praha, 2015

Česká zemědělská univerzita v Praze

TF - katedra mechaniky a strojnictví

FAPPZ - katedra pedologie a ochrany půd



METODIKA PRO VYUŽITÍ PŮDY JAKO NÍZKOTEPLTNÍHO ZDROJE ENERGIE TEPELNÝCH ČERPADEL

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Praha, 2015

Adresa autorů:

prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc., doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra mechaniky a
strojnictví

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 - Suchdol

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových
a přírodních zdrojů, katedra pedologie a ochrany půd

Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchdol

Abstrakt

Tato metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci programu ALFA – 2. výzva, při řešení projektu č. TA02020991 „Optimalizace energetických parametrů horizontálních zemních výměníků tepelných čerpadel s ohledem na půdní a hydrologické podmínky lokality“. Řešiteli projektu byly Česká zemědělská univerzita v Praze a firma Veskom, spol. s r. o. se sídlem v Praze 10 Dolních Měcholupech.

Obsahem metodiky je analýza současného stavu řešení problematiky a výsledky dlouhodobého provozního ověřování možností využití energetického potenciálu zemního masivu ve funkci nízkopotenciálního zdroje energie pro tepelná čerpadla. Jednotlivé kapitoly metodiky se věnují tepelnému potenciálu zemního masivu, spolehlivosti energetického systému se zemním výměníkem, akumulaci energie v zemním masivu, transportu tepla do teplonosné kapaliny a nákladům na realizaci zemních výměníků. Dále také uplatnění metodiky a ekonomickým aspektům navrhovaných řešení. Součástí metodiky je rovněž doporučení pro realizaci zemních výměníků a příklady řešení.

Metodika má za cíl poskytnout poznatky a navrhnout opatření pro snížení dopadů antropogenních vlivů na životní prostředí a zvýšení spolehlivosti a konkurenceschopnosti tepelných čerpadel, jejichž nízkoteplotním zdrojem energie je zemní masiv.

Klíčová slova: tepelné čerpadlo, zemní masiv, zemní výměník tepla, teplota zemního masivu, tepelné charakteristiky zemního masivu, vytápění, ohřev teplé vody.

Oponenti:

prof. Ing. Karel Kabele, CSc., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra technických zařízení budov

Ing. Karel Trapl, Ph.D., Ministerstvo zemědělství České republiky, oddělení obnovitelných zdrojů energie a environmentálních strategií

OBSAH

ÚVOD	7
1 CÍL METODIKY	8
2 VLASTNÍ POPIS METODIKY	9
2.1 Typy zemních výměníků	9
2.2 Tepelný potenciál zemního masivu	10
2.2.1 Příklad: schopnost regenerace energetického potenciálu zemního masivu v období stagnace výměníku	16
2.2.2 Příklad: tepelné vlastnosti reprezentativních půd v ČR	18
2.3 Spolehlivost energetického systému	20
2.3.1 Příklad: teploty zemního masivu, měrná tepla a tepelné výkony odvedené zemnímu masivu v topném období	22
2.4 Akumulace energie v zemním masivu	25
2.4.1 Příklad: vliv povrchové vrstvy zemního masivu na jeho teplotní režim	26
2.5 Transport tepla do teplonosné kapaliny	28
2.5.1 Příklad: teploty, termodynamické a hydrodynamické vlastnosti teplonosných kapalin	32
2.5.2 Příklad: výpočet zemního výměníku pro rodinný dům	36
2.6 Náklady na realizaci zemních výměníků	38
2.6.1 Příklad: snížení nákladů na realizaci zemního výměníku aplikací získaných poznatků a výsledků ověřování	39
2.7 Závěry a doporučení vyplývající z provozních ověřování	40
3 SPECIFIKACE NOVOSTI POSTUPŮ	42
4 UPLATNĚNÍ METODIKY	43
5 EKONOMICKÉ ASPEKTY NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ	44
DEDIKACE	45
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
PUBLIKACE VZNIKLÉ V SOUVISLOSTI S ŘEŠENÍM PROBLEMATIKY	48
SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ	49
SUMMARY	51

ÚVOD

Příroda nabízí lidstvu nízkoteplotní zdroje energie. Je na lidstvu, zda a jak efektivně dokáže tyto zdroje využít. Nízkopotenciální přírodní energie jsou přístupné téměř vždy a všude. Původcem nízkopotenciální přírodní energie, s výjimkou energie geotermální, je převážně sluneční záření dopadající na povrch Země. Tato metodika se věnuje využití nízkopotenciální energie obsažené v povrchových vrstvách zemního masivu pro vytápění objektů a ohřev teplé vody pro sociální, respektive technologické účely. Technickými prostředky, které využívá při exploataci nízkopotenciální energie obsažené v zemním masivu, jsou tepelná čerpadla.

Energetický potenciál zemního masivu je využíván prostřednictvím horizontálních zemních výměníků, ve kterých se teplem obsaženým v zemním masivu ohřívá teplotonosná kapalina, která je přiváděna na výparník tepelného čerpadla a plní tak funkci jeho nízkoteplotního zdroje. Znalosti tepelných charakteristik zemního masivu, termodynamických a hydrodynamických vlastností používaných konfigurací zemních výměníků, vlastností teplotonosných kapalin a zejména vzájemných vazeb jsou nezbytnými poznatky umožňujícími optimalizovat návrh a provoz výměníků a provoz celého systému.

Z hlediska využitelného energetického potenciálu a životnosti celého energetického systému jsou rovněž důležité znalosti teplot zemního masivu, získaného tepla a tepelných toků v průběhu topného období a ohřevu teplé vody. Limitující může být v těchto systémech schopnost regenerace energetického potenciálu v průběhu stagnace výměníku, nebo jeho omezeného využívání v letním období.

Tato metodika se věnuje výše uvedeným aspektům ovlivňujícím energetické a ekologické efekty systémů tepelných čerpadel, jejichž nízkoteplotním zdrojem energie je zemní masiv. Uváděná doporučení a příklady řešení vycházejí z dlouhodobého ověřování na experimentálním pracovišti firmy Veskom, spol. s r. o. realizovaném v areálu firmy v Dolních Měcholupech a analýz poznatků prezentovaných v odborných a vědeckých domácích i zahraničních publikacích.

1 CÍL METODIKY

Souhrnným cílem metodiky je snížení dopadů antropogenních vlivů na životní prostředí a zvýšení spolehlivosti a konkurenceschopnosti tepelných čerpadel, jejichž nízkoteplotním zdrojem energie je půda (zemní masiv), obecně obnovitelných zdrojů energie.

Konkrétními dílčími cíli, naplňujícími cíl souhrnný, je:

1. Zabránění nevratným změnám tepelného potenciálu zemního masivu vyvolávajícím změny v rostlinných a živočišných společenstvech v zemním masivu.
2. Zvýšení spolehlivosti energetického systému a prodloužení doby využívání zemního výměníku.
3. Zvýšení akumulace sluneční energie v zemním masivu v období stagnace výměníku nebo jeho sníženého využívání.
4. Zvýšení transportu tepla ze zemního masivu do teplonosné kapaliny.
5. Snížení nákladů na realizaci zemních výměníků.

Výstupem metodiky jsou poznatky a doporučení pro návrh horizontálních zemních tepelných výměníků umožňujících zvýšit efektivitu zemních výměníků. Tyto poznatky a doporučení jsou využitelné v projekční a realizační praxi.

2 VLASTNÍ POPIS METODIKY

2.1 Typy zemních výměníků

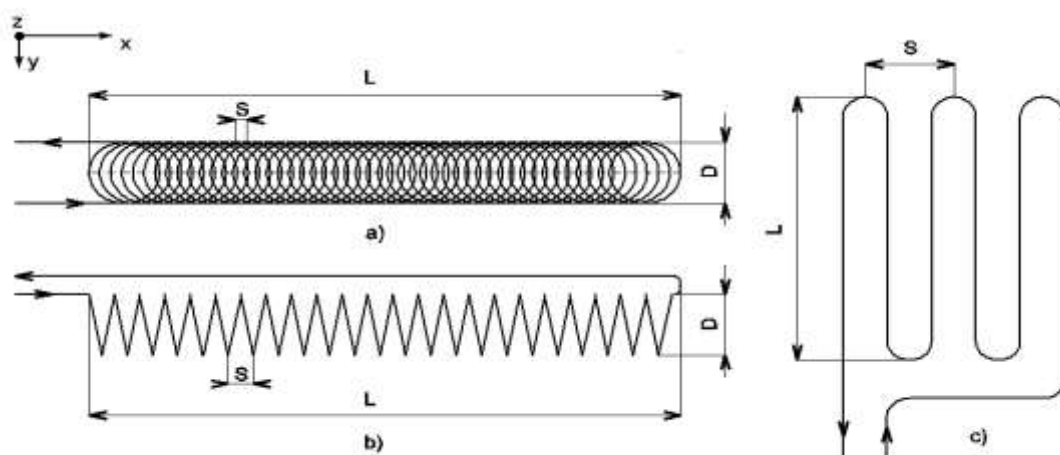
Tepelná čerpadla využívající horizontální zemní nebo vertikální horninové tepelné výměníky ve funkci nízkoteplotních zdrojů energie jsou, podle studie GSHP (2005), považovány za nejrychleji se rozvíjející aplikace obnovitelných zdrojů energie na světě.

Horizontální zemní výměníky tepla se realizují ve třech základních konfiguracích (Brandl, 2006), jako lineární, šroubovitě a typu Slinky. Trubky těchto výměníků, o průměrech 30-50 mm, bývají v závislosti na tepelných charakteristikách zemního masivu uloženy v hloubce 1,0-2,0 m. Průměry smyček výměníku se pohybují v rozmezí 0,5-2,0 m a rozteč bývá 0,1-0,5 m. U lineárních výměníků je rozteč trubek 1,0-1,5 m. Lineární výměníky (obr. 1c) čerpají teplo ze zemního masivu rovnoměrně. Vyžadují větší plochy pozemků, přesto jsou v ČR nejrozšířenější. Šroubovitě (obr. 1b) a spirálové výměníky typu Slinky (obr. 1a) se používají v lokalitách s omezenou plochou pozemku. Výjimečně, v případě skrývky, se používají výměníky ve tvaru meandru. Potřebná plocha pozemku je stejná jako u lineárního výměníku. Při této konfiguraci výměníku se vedle sebe střídají trubky vstupující a vystupující z výparníku.

V zahraničí (GSHP, 2005) jsou používány další typy konfigurací zemních výměníků:

- s 1 trubicí,
- se 2 trubicemi nad sebou,
- se 2 trubicemi vedle sebe,
- se 4 trubicemi apod.

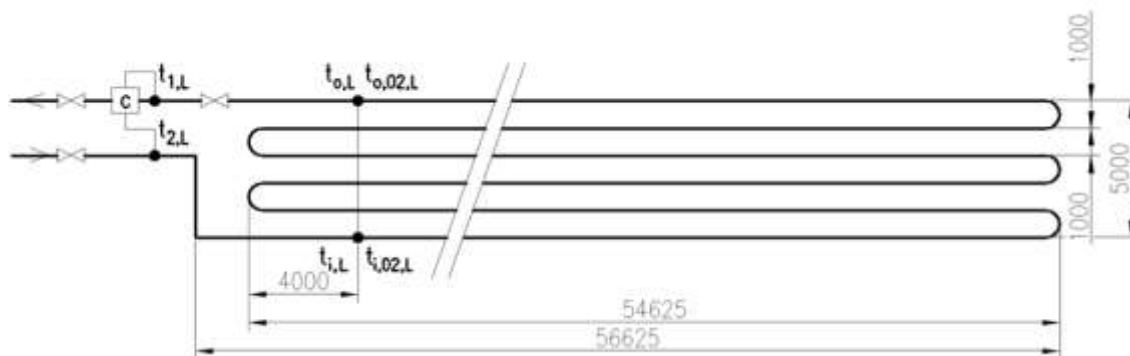
Za účelem naplnění dílčích cílů byly prováděny provozní experimenty se dvěma typy nejčastěji používaných horizontálních zemních výměníků: lineárním a typem Slinky (obr. 2 a obr. 3). Pro splnění dílčích cílů byla rovněž uskutečněna analýza současného stavu řešení problematiky zemních výměníků ve funkci nízkoteplotních zdrojů energie tepelných čerpadel v ČR a zahraničí.



Obr. 1: Konfigurace horizontálních zemních tepelných výměníků:

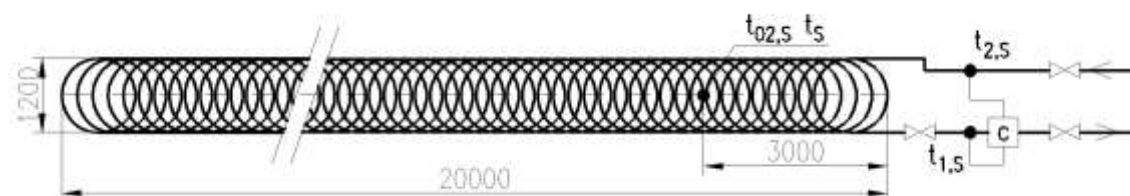
- a) typ Slinky,
- b) šroubovitý,
- c) lineární.

Lineární horizontální zemní výměník byl vyroben z polyetylenového potrubí PE 100RC 40 x 3,7 mm (LUNA PLAST a.s., Hořín, Česká Republika) odolného proti bodovému zatížení a vzniku trhlin. Nebyl uložen do pískového lože. Potrubí výměníku o celkové délce 330 m ($41,473 \text{ m}^2$) bylo instalováno v hloubce 1,8 m ve 3 smyčkách s roztečí 1 m. Délka jednotlivých smyček činila 54,62 m. Zemní masiv do hloubky přibližně 2 m tvořila tmavě hnědá písčitohlinitá půda, hrubozrnný štěrk, kamenná drť a úlomky cihel. Teplonosnou kapalinou protékající výměníkem byla směs 33 % etanolu a 67 % vody.



Obr. 2: Schéma lineárního zemního tepelného výměníku

$t_{o,L}$ – teplotní čidlo instalované v hloubce 1,8 m v blízkosti výstupního potrubí výměníku do výparníku tepelného čerpadla; $t_{i,L}$ – teplotní čidlo instalované v hloubce 1,8 m v blízkosti vratného potrubí výměníku z výparníku tepelného čerpadla; $t_{o,02,L}$; $t_{i,02,L}$ – teplotní čidla instalovaná v hloubce 0,2 m nad potrubími; $t_{1,L}$ – teplotní čidlo teplonosné kapaliny instalované na výstupním potrubí výměníku do výparníku tepelného čerpadla; $t_{2,L}$ – teplotní čidlo teplonosné kapaliny instalované na vstupním potrubí výměníku z výparníku tepelného čerpadla; C – elektronický měřič spotřeby tepla.



Obr. 3: Schéma zemního tepelného výměníku typu Slinky

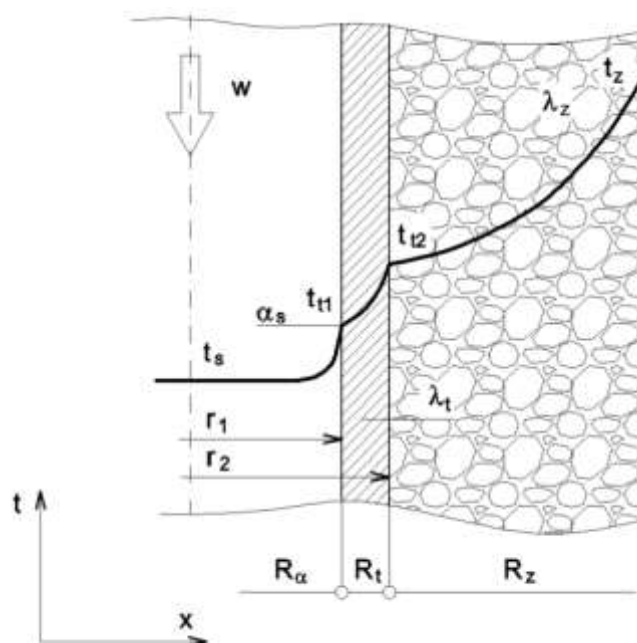
t_S – teplotní čidlo instalované v hloubce 1,5 m v oblasti výměníku; $t_{02,S}$ – teplotní čidlo instalované v hloubce 0,2 m nad výměníkem; $t_{1,S}$ – teplotní čidlo teplonosné kapaliny instalované na výstupním potrubí výměníku do výparníku tepelného čerpadla; $t_{2,S}$ – teplotní čidlo teplonosné kapaliny instalované na vstupním potrubí výměníku z výparníku tepelného čerpadla; C – elektronický měřič spotřeby tepla.

2.2 Tepelný potenciál zemního masivu

Tepelný režim zemního masivu je dán výdejem a příjmem tepelných toků. Mezi odvedené tepelné toky patří: radiace zemského povrchu, ochlazení zemního masivu okolním vzduchem, ochlazení výparem srážek a podzemní vody, sdílení tepla prosakující vodou, sdílení tepla do chladnějších horizontů zemního masivu, spotřeba tepla pro chemické reakce probíhající v zemním masivu, spotřeba tepla pro tání ledu a sněhu. K tepelným ziskům patří:

především dopadající sluneční záření, dále ohřev zemního masivu okolním vzduchem, teplo vznikající při kondenzaci vodní páry a absorpci vodní páry a plynů, ohřev zemního masivu spodní vodou, sdílení tepla z teplejších horizontů zemního masivu, teplo vznikající při chemických reakcích a biologických procesích, skupenské teplo tuhnutí ledu, zemský tepelný tok.

Amplitudy teploty mezi dnem a nocí přestávají být měřitelné ve vlhké půdě od hloubky 0,40 m a v suché půdě již asi od 0,23 m. Roční variace teplot mezi létem a zimou se u nás u suché půdy neprojeví již od hloubky 4,5 m a u vlhké půdy od hloubky asi 7 až 8 m. Pod touto mělkou zónou leží smíšená zóna, kde kolísá teplota $\pm 1^\circ\text{C}$ od průměrné roční teploty ovzduší. V ní se gravitační voda odvodňuje skalními puklinami k některé vodoteči a teprve pod ní stagnuje a ztrácí schopnost ovlivňovat teplotu okolních hornin. Od této hloubky stoupá teplota hornin rovnoměrně podle geotermického stupně, pokud ji nenaruší změna horniny, anebo tektonika a proudění podzemní vody (Čížek, 2005).



Obr. 4: Schéma procesů sdílení tepla v zemním masivu s odběrem tepla trubkou

λ_z – součinitel tepelné vodivosti zemního masivu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); λ_t – součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky výměníku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); α_s – součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky výměníku a teplotonosnou kapalinou ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$); R_z – tepelný odpor zemního masivu ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$); R_t – tepelný odpor stěny trubky výměníku ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$); R_α – tepelný odpor konvekce na vnitřní straně trubky ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$); r_1 – vnitřní poloměr trubky zemního výměníku (m); r_2 – vnější poloměr trubky zemního výměníku (m); w – rychlost proudění teplotonosné kapaliny ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); t_z – teplota zemního masivu ($^\circ\text{C}$); t_s – teplota teplotonosné kapaliny ($^\circ\text{C}$); t_{t1} – teplota vnitřního povrchu trubky zemního výměníku ($^\circ\text{C}$); t_{t2} – teplota vnějšího povrchu trubky zemního výměníku ($^\circ\text{C}$).

Mezi základní tepelné charakteristiky zemního masivu patří součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), který charakterizuje schopnost výměny tepla mezi sousedními

částicemi zemního masivu, dále měrná tepelná kapacita c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), respektive měrná objemová tepelná kapacita C ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), které vyjadřují schopnost jednotkové hmotnosti nebo objemu sdílet tepelnou energii. Rychlost šíření teplotních změn v zemním masivu charakterizuje součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita) a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Zabránit nevratným změnám tepelného potenciálu zemního masivu, ohrožujících spolehlivost celého energetického systému s tepelným čerpadlem, lze správným návrhem konfigurace zemního výměníku. Konfigurací výměníku se rozumí tvar a rozložení trubek výměníku, hloubka uložení výměníku v zemním masivu, rozteč trubek (u výměníku typu Slinky rozteč smyček) a průměr potrubí. Při konfiguraci výměníku je nutné zohledňovat výše uvedené tepelné charakteristiky zemního masivu (λ , c , a). Nesprávné dimenzování zemního výměníku má za následek nízkou teplotu, respektive nízké průtoky teplotnosné kapaliny. Výsledkem jsou provozní problémy a ne hospodárný chod tepelného čerpadla.

Teoretický rozbor problému sdílení tepla v zemním masivu s odběrem tepla trubkou vychází ze schématu na obr. 4.

Celkový tepelný odpor R je součtem jednotlivých tepelných odporů:

$$R = R_z + R_t + R_\alpha \quad (1)$$

V rovnici (1) je:

R_z – tepelný odpor zemního masivu ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

R_t – tepelný odpor stěny trubky výměníku ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

R_α – tepelný odpor konvekce na vnitřní straně trubky ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

Tepelný odpor zemního masivu R_z vyjádříme vztahem (Šorin, 1968):

$$R_z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot s}{\pi \cdot d_2} \sinh \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{s} \right) \right] \quad (2)$$

V rovnici (2) je:

R_z – tepelný odpor zemního masivu ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

λ_z – součinitel tepelné vodivosti zemního masivu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

s – rozteč trubek zemního výměníku (m),

d_2 – vnější průměr trubek zemního výměníku (m),

h – hloubka uložení trubek zemního výměníku (m).

Z rovnice (2) vyplývá:

- Při zvyšování λ_z , s , d tepelný odpor zemního masivu R_z klesá.
- Při zvyšování h tepelný odpor zemního masivu R_z vzrůstá.

Tepelný odpor stěny trubky výměníku R_t vyjádříme:

$$R_t = \frac{\frac{1}{\lambda_t} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

V rovnici (3) je:

R_t – tepelný odpor stěny trubky výměníku ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

λ_t – součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky výměníku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

d_1 – vnitřní průměr trubek zemního výměníku (m),

d_2 – vnější průměr trubek zemního výměníku (m).

Z rovnice (3) vyplývá:

- Při zvyšování λ_t tepelný odpor stěny trubky výměníku R_t klesá.

Tepelný odpor konvekce na vnitřní straně trubky R_α vyjádříme:

$$R_\alpha = \frac{1}{\pi d_1 \alpha_s} \quad (4)$$

V rovnici (4) je:

R_α – tepelný odpor konvekce na vnitřní straně trubky ($\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),

d_1 – vnitřní průměr trubek zemního výměníku (m),

α_s – součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky výměníku a teplotonosnou kapalinou ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

Z rovnice (4) vyplývá:

- Při zvyšování α_s tepelný odpor konvekce na vnitřní straně trubky R_α klesá.

Výkon horizontálního zemního výměníku je, vedle dále analyzovaných tepelných charakteristik zemního masivu, ovlivněn délkou trubek a plochou pozemku, na kterém je výměník instalován. Exaktně lze délku trubek zemního výměníku L pro vytápění objektu vypočítat podle rovnice (5). Rovnice je převzata z publikace Ground – Source Heat Pump Project Analysis Chapter (GSHP, 2005) a upravena pro podmínky ČR.

$$L = \Phi_{HL} \left[\frac{\frac{COP_n - 1}{COP_n} \cdot (R_t + R_\alpha + R_z \cdot F)}{t_{z,\min} - t_{tk,\min}} \right] \quad (5)$$

V rovnici (5) je:

Φ_{HL} – návrhový tepelný výkon (W),

COP_n – návrhový topný faktor tepelného čerpadla (-),

$F = \tau_p / \tau_{to}$ – koeficient využití tepelného čerpadla (-),

τ_p – doba provozu tepelného čerpadla (h),

τ_{to} – délka topného období (h),

$t_{z,min}$ – minimální teplota zemního masivu mimo výměník (°C),

$t_{tk,min}$ – minimální návrhová teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z výměníku (°C).

Hloubku uložení h horizontálních zemních výměníků doporučují praktici v rozmezí 1-2 m (Banks, 2012). Asociace německých inženýrů VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.; VDI, 2010) navrhuje pro mírné evropské (německé) podnebí hloubky 1,2-1,5 m, aby se zajistila akumulace tepla do zemního masivu v letním období. Hloubka uložení potrubí by měla zajistit:

- izolaci zemního výměníku od denních výkyvů teplot (které mohou proniknout do hloubky několika desítek centimetrů) a od nejhorších extrémních teplot v zimním období;
- uložení výměníku pod obvyklou zámraznou hloubkou v dané lokalitě (0,4 m) a podloží, s ohledem na dlouhotrvající nízké povrchové teploty v zimním období;
- uložení výměníku dostatečně blízko k povrchu zemního masivu z důvodu zachycení slunečního záření a indukovaných tepelných toků z povrchu do mělkých vrstev zemního masivu v letním období.

Hlubší uložení horizontálních zemních výměníků se doporučuje (Banks, 2012) v případech extrémních rozdílů teplot vzduchu nad zemským povrchem v zimním a letním období, případně když je vysoký součinitel teplotní vodivosti zemního masivu a (tedy když je vysoký součinitel tepelné vodivosti λ_z a nízká objemová tepelná kapacita C). Mělké uložení zemního výměníku je možno realizovat v případě, kdy je klima méně extrémní a součinitel teplotní vodivosti zemního masivu je nízký.

Mezi hlavními faktory, které ovlivňují výkon horizontálních zemních výměníků, patří počáteční teplota, součinitel tepelné vodivosti a objemová tepelná kapacita zemního masivu.

Tab. I: Součinitelé tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity běžných podloží a sybkých sedimentů (Banks, 2012)

	Součinitel tepelné vodivosti λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Objemová tepelná kapacita C (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)
Suchý písek / štěrk	0,3-1,2	1,2-1,7
Vlhký písek	0,7-2,0 (1,0-1,4)	1,6-2,2 (1,8)
Nasycený písek / štěrk	1,7-3,8 (2,4)	2,2-2,9 (2,5)
Suchý jíł	0,8-1,2	1,5-1,7
Mokrý jíł	0,9-2,2 (1,6-1,8)	1,6-2,8 (2,4)
Rašelina	0,2-0,7	0,5-3,8

Poznámka: Kurzívou jsou zobrazeny doporučené hodnoty.

Počáteční teplota zemního masivu se řídí průměrnou povrchovou teplotou zemního masivu. Vzhledem k tomu, že hloubky uložení horizontálního zemního výměníku se pohybují

pouze v rozmezí 1-2 m, se mění teplota zemního masivu podle ročního období. Při navrhování zemního výměníku tedy musíme brát v úvahu roční průběh teplot, střední teplotu povrchu půdy a součinitel tepelné vodivosti půdy.

Součinitel tepelné vodivosti zemního masivu je považován za parametr nejvíce ovlivňující tepelný výkon výměníku. Congedo et al. (2012) uvádějí, že při součiniteli tepelné vodivosti zemního masivu $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ byl tepelný výkon výměníku téměř dvojnásobný, než při tepelné vodivosti $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Typický zemní masiv, ve kterém je uložen výměník, se skládá z písku, šterku, hlíny (prachu) nebo jílu (respektive z jejich směsi v různých poměrech). Z různých zdrojů (Banks, 2012) jsou shrnuté tepelné vlastnosti sedimentů v tab. I.

Z tab. I je patrné, že součinitel tepelné vodivosti i objemová tepelná kapacita se zvyšují s obsahem vlhkosti. Také podíl písku, hlíny (prachu) a jílu v podloží se může v jednom místě výrazně lišit. Stanovení součinitele tepelné vodivosti použitého pro návrh horizontálního zemního výměníku může být problematické. Obvykle se provádí nějakou formou opatrného odhadu. Existuje několik technik pro stanovení součinitele tepelné vodivosti podloží v místě, které jsou popsány podrobněji v publikaci (HOLYMOOR, 2010). Součinitel tepelné vodivosti použitý pro návrh by měl být stanoven jako geometrický průměr 12 až 16 hodnot naměřených v různých místech dané lokality (Banks, 2012).

Vlhkost zemního masivu pozitivně ovlivňující součinitel tepelné vodivosti masivu můžeme zvýšit vytvořením hydroizolačního rozhraní pod tepelným výměníkem (ČZU, 2014). Umístění hydroizolačního rozhraní by mělo zajistit optimální vlhkost zemního masivu. Optimální vlhkost zemního masivu z hlediska hodnoty součinitele tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí 25-40 %. Zvýšení vlhkosti nad 50 % ovlivňuje součinitel tepelné vodivosti nevýznamně. Vlhkost zemního masivu pod 12,5 % má výrazně negativní vliv na součinitel tepelné vodivosti zemního masivu (Leong et al., 1998). Hydroizolační rozhraní vytvořené vodorovnou vrstvou jílu nebo hydroizolační fólií zpomalí odtok vody zachycené v oblasti výměníku. Tím dojde k nahrazení vzduchu v pórech zemního masivu vodou a ke zvýšení jeho součinitele tepelné vodivosti.

Provoz zemního výměníku může mít vliv na vlhkost zemního masivu a tím na součinitel tepelné vodivosti a objemovou tepelnou kapacitu. Na vychlazených trubkách zemního výměníku může kondenzovat voda, takže se sníží obsah vody v zemním masivu a také jeho součinitel tepelné vodivosti. Kondenzace rovněž snižuje tlak vodní páry v zemním masivu a vyvolává šíření další vodní páry k výměníku, která opět kondenzuje. Tento proces se v literatuře (Banks, 2012) nazývá migrací par. Jestliže bude výměník pracovat při záporných teplotách, kondenzovaná vlhkost může zmrznout a vytvořit obal okolo trubky výměníku. To zvýší součinitel tepelné vodivosti zemního masivu, protože led má vyšší tepelnou vodivost než voda. Vytvořením ledu se také uvolňuje latentní teplo ve výši $334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pokud je zemní výměník uložen pod dlážděnou plochou, nebo v blízkosti zastavěné plochy, existuje v tomto případě reálné nebezpečí expanze a zvedání zemního masivu. Je nutné si také uvědomit, že když se na trubkách zemního výměníku nahromadí velké množství ledu, znamená to, že výměník dlouhodobě pracuje při teplotách pod bodem mrazu, což je velmi neefektivní z hlediska topného faktoru tepelného čerpadla. Důležitým kritériem při navrhování je, aby se led okolo trubky nepřiblížil k paralelní trubce, nebo se nespojil s přirozeně zmrzlým zemním masivem v období zimních mrazů. Pokud k tomu dojde, existuje nebezpečí, že takto rozsáhlý zmrzlý zemní masiv neroztaje v letním období působením slunečního záření.

2.2.1 Příklad: schopnost regenerace energetického potenciálu zemního masivu v období stagnace výměníku

Výsledky čtyřletého ověřování v sezónním provozu, kdy byl výměník využíván pouze pro vytápění, ukázaly, že při správném návrhu konfigurace zemního výměníku vycházejícího z uvedené analýzy nedochází k nevratným změnám tepelného potenciálu zemního masivu.

Konfigurace ověřovaných výměníků jsou uvedeny na obr. 2 a obr. 3. V tab. II jsou uvedeny tepelné charakteristiky zemního masivu, ve kterém jsou výměníky uloženy. Tepelné charakteristiky zemního masivu, součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), objemová měrná tepelná kapacita C ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) a součinitel teplotní vodivosti a ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) byly při teplotě t ($^{\circ}\text{C}$) a objemové vlhkosti w (%) stanoveny v rostlém masivu přístrojem ISOMET 2104 (výrobce Applied Precision, Bratislava, Slovenská republika).

Tab. II: Tepelné charakteristiky zemního masivu

	Hloubka (m)							
	0.06	0.22	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.60
t ($^{\circ}\text{C}$)	13.36	12.76	12.42	12.66	12.73	12.65	13.64	13.83
w (%)	36.65	26.25	30.70	31.55	29.30	31.60	39.00	-
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.21	1.29	1.35	1.24	1.48	1.39	1.58	1.57
C ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	2.08	2.15	2.11	1.82	2.15	2.08	2.24	2.16
a ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0.583	0.602	0.640	0.678	0.688	0.672	0.704	0.727

Schopnost regenerace energetického potenciálu v období stagnace výměníku lze posoudit na základě počátečních a konečných teplot zemního masivu v oblasti výměníku v několika topných obdobích. Zejména snižování teplot zemního masivu na počátku topného období by bylo neklamnou známkou postupného snižování energetického potenciálu masivu a tedy i doby využití masivu jako zdroje energie pro tepelné čerpadlo. Výsledky měření jsou zpracovány v tab. III.

V grafu 1 jsou znázorněny průběhy teplot v období stagnace výměníků 27. 4. 2012-16. 9. 2012 (143 dní). V průběhu stagnace výměníků byly průměrná teplota okolního vzduchu $20,44^{\circ}\text{C}$, minimální $0,80^{\circ}\text{C}$, maximální $37,50^{\circ}\text{C}$.

Průběh teplot zemního masivu můžeme vyjádřit rovnicí vycházející z rovnice pro volné netlumené kmitání hmotného bodu:

$$t = \bar{t} + \Delta t_A \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + \varphi) \quad (6)$$

V rovnici (6) je:

t – teplota ($^{\circ}\text{C}$),

$\bar{t}$ – střední teplota ($^{\circ}\text{C}$),

Δt_A – amplituda oscilace kolem teploty $\bar{t}$ ($^{\circ}\text{C}$),

τ – počet dní od počátku měření (den),

φ – počáteční fáze kmitu (rad),

Ω – vlastní kruhová frekvence ($2 \cdot \pi / 365$ rad $\cdot$ den $^{-1}$).

Tab. III: Průměrné denní teploty zemního masivu na začátcích a koncích topných období

			Topné období	Datum	Teplota masivu $t_L; t_S$ (°C)	Rozdíl teplot $\Delta t_L; \Delta t_S$ (K)
Horizontální výměník	Lineární	Začátek topného období	2010 / 2011	30. 8. 2010	17,30	0,18
			2011 / 2012	7. 9. 2011	17,12	
			2012 / 2013	17. 9. 2012	16,88	0,24
		Konec topného období	2010 / 2011	22. 3. 2011	4,55	-0,28
			2011 / 2012	22. 3. 2012	4,83	
			2012 / 2013	22. 4. 2013	5,60	-0,77
	Typ Slinky	Začátek topného období	2010 / 2011	30. 8. 2010	18,40	-0,04
			2011 / 2012	7. 9. 2011	18,44	
			2012 / 2013	17. 9. 2012	16,90	1,54
		Konec topného období	2010 / 2011	22. 3. 2011	4,45	-1,58
			2011 / 2012	22. 3. 2012	6,03	
			2012 / 2013	22. 4. 2013	5,30	0,73

Teploty zemního masivu v období stagnace zemního výměníku znázorněné v grafu 1 lze vyjádřit rovnicemi:

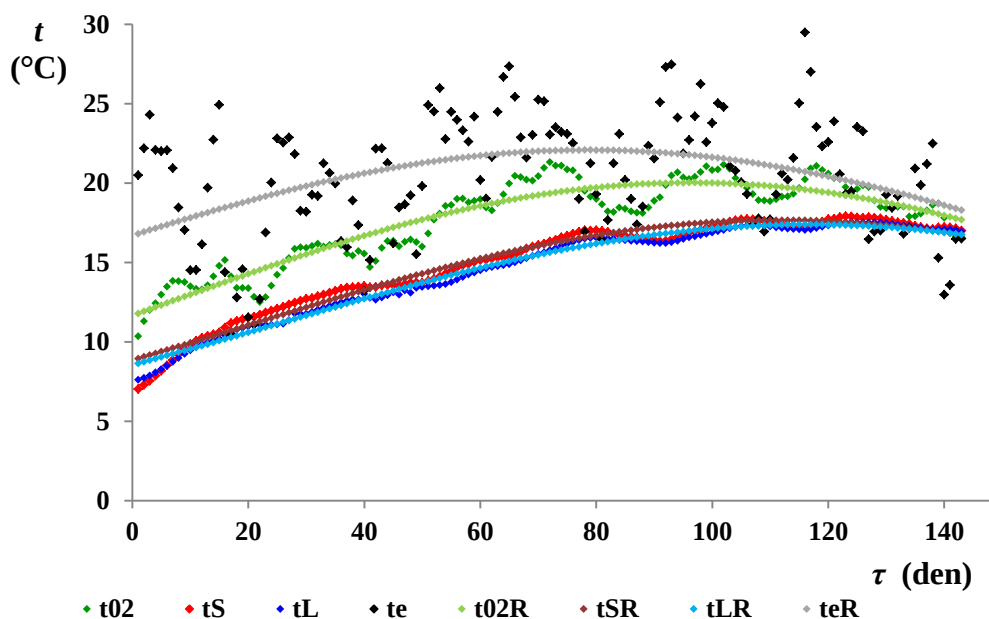
$$t_{02,R} = 12,341 + 7,683 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 6,194\right) \quad I_{02}^2 = 0,869 \quad (7)$$

$$t_{L,R} = 11,179 + 6,207 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 5,844\right) \quad I_L^2 = 0,989 \quad (8)$$

$$t_{S,R} = 11,107 + 6,555 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 5,930\right) \quad I_S^2 = 0,972 \quad (9)$$

V rovnicích (7-9) je:

I_{tr}^2 – index korelace (-)



Graf 1: Teploty v období stagnace výměníku 2012

V grafech 1 a 2 jsou znázorněny průměrné denní teploty dle schématu na obr. 2 a obr. 3, $t_L = (t_{o,L} + t_{i,L})/2$ a t_S . Rozdíly teplot $t_{o,02,L}$, $t_{i,02,L}$ a $t_{o,02,S}$ byly nevýznamné, proto je v grafech znázorněna teplota zemního masivu v hloubce 0,2 m pouze jednou křivkou t_{02} . V grafech jsou naměřené a vypočtené teploty okolního prostředí označeny t_e a $t_{e,R}$.

Rozdíly teplot na počátcích i koncích topného období ve sledovaných topných obdobích nejsou významné. Výsledky ověřování prokazují, že při vhodné konfiguraci výměníku lze půdní masiv považovat za stabilní zdroj nízkopotenciální energie s dlouhou životností.

2.2.2 Příklad: tepelné vlastnosti reprezentativních půd v ČR

V rámci řešení projektu TA02020991 byly stanoveny základní tepelné charakteristiky pro 17 reprezentativních druhů půd vyskytujících se v ČR (Kodešová a kol., 2013) a závislosti součinitele tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity C na objemové vlhkosti půdy w . K popisu závislostí byla použita analytická vyjádření.

Vztah mezi součinitelem tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a objemovou vlhkostí půdy w ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) je vyjádřen nelineární rovnicí (10), (Chung, Horton, 1987):

$$\lambda = b_1 + b_2 \cdot w + b_3 \cdot w^{0.5} \quad (10)$$

Parametry b_1 , b_2 , a b_3 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) jsou pro jednotlivé půdy uvedeny v tab. IV.

Tab. IV: Parametry pro výpočet součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) podle rovnice (10)

Typ půdy	Lokalita	b_1	b_2	b_3	R^2
Černice modální	Milčice	0,160	1,868	0,383	0,968
Černozem modální	Ivanovice na Hané	0,194	2,515	0,442	0,969
Černozem modální	Suchdol	0,184	2,423	0,248	0,986
Černozem arenická	Velké Chvalovice	0,263	7,505	-0,132	0,981
Šedozem modální	Čáslav	0,199	1,755	0,925	0,964
Hnědozem modální	Hněvčeves	0,216	1,982	0,969	0,971
Kambizem modální	Humpolec	0,186	1,872	0,683	0,957
Kambizem modální	Předbořice	0,199	2,312	0,412	0,979
Kambizem modální	Jince	0,204	2,469	0,615	0,976
Kambizem modální	Tábor	0,173	1,350	1,160	0,959
Kambizem dystrická	Vysoké nad Jizerou	0,177	1,304	0,663	0,981
Regozem modální	Semice	0,259	8,990	0,871	0,990
Spraš	Suchdol	0,193	2,191	0,618	0,945
Písek	Písková Lhota	0,286	-2,654	5,340	0,975
Zvětralá pararula	Tábor	0,213	1,076	1,128	0,957
Technozem 1	Měcholupy	0,254	2,204	0,493	0,917
Technozem 2	Měcholupy	0,231	1,547	1,213	0,877
Mulčovací kůra	-	0,096	0,739	-0,140	0,957

Vztah mezi objemovou tepelnou kapacitou C ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) a objemovou vlhkostí půdy w ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) je vyjádřen lineární rovnicí (11).

$$C = a + b \cdot w \quad (11)$$

Parametry a a b ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) jsou pro jednotlivé půdy uvedeny v tab. V.

Tab. V: Parametry pro výpočet objemové tepelné kapacity C ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) podle rovnice (11)

Typ půdy	Lokalita	a	b	R^2
Černice modální	Milčice	1,187	5,138	0,982
Černozem modální	Ivanovice na Hané	1,187	5,496	0,971
Černozem modální	Suchdol	1,087	4,922	0,980
Černozem arenická	Velké Chvalovice	1,173	5,020	0,921
Šedozem modální	Čáslav	1,168	4,569	0,961
Hnědozem modální	Hněvčeves	1,123	4,835	0,966
Kambizem modální	Humpolec	1,221	4,726	0,951
Kambizem modální	Předbořice	1,168	4,889	0,971
Kambizem modální	Jince	1,308	4,472	0,963
Kambizem modální	Tábor	1,054	5,139	0,945
Kambizem dystrická	Vysoké nad Jizerou	1,233	4,506	0,984
Regozem modální	Semice	1,314	5,293	0,958
Spraš	Suchdol	1,140	4,934	0,948
Písek	Písková Lhota	1,307	3,621	0,962
Zvětralá pararula	Tábor	1,207	4,324	0,959
Technozem 1	Měcholupy	1,363	4,987	0,949
Technozem 2	Měcholupy	1,394	4,089	0,976
Mulčovací kůra	-	0,413	4,274	0,951

2.3 Spolehlivost energetického systému

Výsledky provozních ověřování a analýza vědeckých a odborných publikací ukazují (Banks, 2012), že pro zajištění spolehlivosti zemního výměníku ve funkci nízkoteplotního zdroje energie a spolehlivosti celého energetického systému je nutné zohlednit následující faktory:

- Plocha zemního masivu s výměníkem musí být dostatečně velká, aby došlo v letním období k regeneraci energie odvedené v zimním období akumulací solárního a atmosférického tepla. Pro regeneraci může být rovněž důležitá tepelná energie dodávaná zemnímu masivu dešťovými srážkami.
- Potrubí zemního výměníku musí být dostatečně dlouhé, aby odpovídalo špičkovému zatížení pro vytápění (nebo chlazení).
- Hloubka uložení zemního výměníku musí být optimalizována jak z hlediska extrémních zimních teplot (abychom měli dostatečný objem zemního masivu jako zdroje tepla), tak i z hlediska akumulace tepla do zemního masivu během teplejších měsíců v roce.

- Půda by měla být dostatečně tepelně vodivá, aby efektivně přenášela teplo do teplosměnné plochy výměníku.
- Kontakt mezi zemním masivem a potrubím výměníku musí být efektivní z hlediska sdílení tepla.
- Potrubí výměníku by mělo být vyrobeno z materiálu, který je odolný, pevný a dostatečně tepelně vodivý.
- Teplonosná kapalina by měla účinně sdílet teplo ze stěny potrubí, neměla by být příliš viskózní, měla by mít nízkou toxicitu, měla by mít teplotu tuhnutí pod minimální provozní teplotou systému a v ideálním případě by měla být nehořlavá a biologicky odbouratelná.
- Primární okruh musí být vybaven pojistným ventilem, expanzní nádobou, filtrem a sestavou armatur pro napouštění a odvzdušnění výměníku.
- Primární okruh by měl pracovat s teplotním spádem teplonosné kapaliny 2-5 K.

Pro horizontální zemní výměníky se používá potrubí z plastu. Nejčastěji polyetylén (MDPE, HDPE), který má, mezi používanými plasty, jeden z nejvyšších součinitelů tepelné vodivosti, přičemž je pevný a odolný. Z rovnice (3) je patrný význam součinitele tepelné vodivosti stěny trubky výměníku λ_t . V tab. VI jsou z různých zdrojů (Banks, 2012) shrnuty hodnoty součinitelů tepelné vodivosti materiálů vhodných pro zemní výměníky. Základní životnost trubek používaných v ČR (PE100RC LUNA PLAST a.s., Hořín) je na základě normované pevnostní izotermy stanovena na min. 100 let/20 °C. Díky zvýšené odolnosti RC materiálů proti vzniku a šíření trhlin platí tento údaj i pro potrubí položená v náročných půdních podmínkách.

Tab. VI: Součinitelé tepelné vodivosti běžných potrubních materiálů zemních výměníků (Banks, 2012)

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Polyetylén o vysoké hustotě (HDPE)	0,45
Polyetylén obecný	0,42
Polyetylén o střední hustotě (MDPE)	0,40
Polypropylen	0,22
Polybutylen	0,22
Polyvinyl chlorid	0,23

Horizontální zemní výměníky pracují běžně při provozních tlacích 0,15-0,3 MPa. Pro jejich konstrukci by tedy měly být použity materiály se jmenovitým tlakem nejméně PN6 (0,6 MPa). Nejčastěji se používají potrubí o vnějším průměru 40 a více mm. Samozřejmě, různé průměry potrubí mají různé povrchové plochy, měrné tepelné kapacity a hydraulické odpory. Všechny tyto faktory je třeba vzít v úvahu při návrhu konfigurace výměníku a celého systému.

Existují různé konfigurace horizontálních zemních výměníků. Některé, např. typ Slinky, umožňují na poměrně malé ploše instalovat velkou teplosměnnou plochu zemního výměníku. Je však nutné si uvědomit, že důležitým cílem systému horizontálních zemních výměníků je zajistit, abychom v průběhu letního období získali dostatečné množství energie

ze slunečního záření a okolního prostředí, které využijeme v zimním období. Tepelná energie, kterou získáme, je limitována plochou zemního masivu s výměníkem. Tato plocha závisí na klimatu, druhu terénu, odvodnění a dalších faktorech lokality. S cílem zajistit dlouhodobou udržitelnost zdroje se v Německu (VDI, 2010) doporučuje, aby celkové množství tepla extrahovaného ze zemního masivu nepřesáhlo $50\text{--}70 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ za rok ($180\text{--}205 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$). U tepelného čerpadla pracujícího se sezónním topným faktorem 3,5 to odpovídá $70\text{--}98 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Tyto údaje je třeba vnímat v kontextu typických mírných evropských klimatických podmínek.

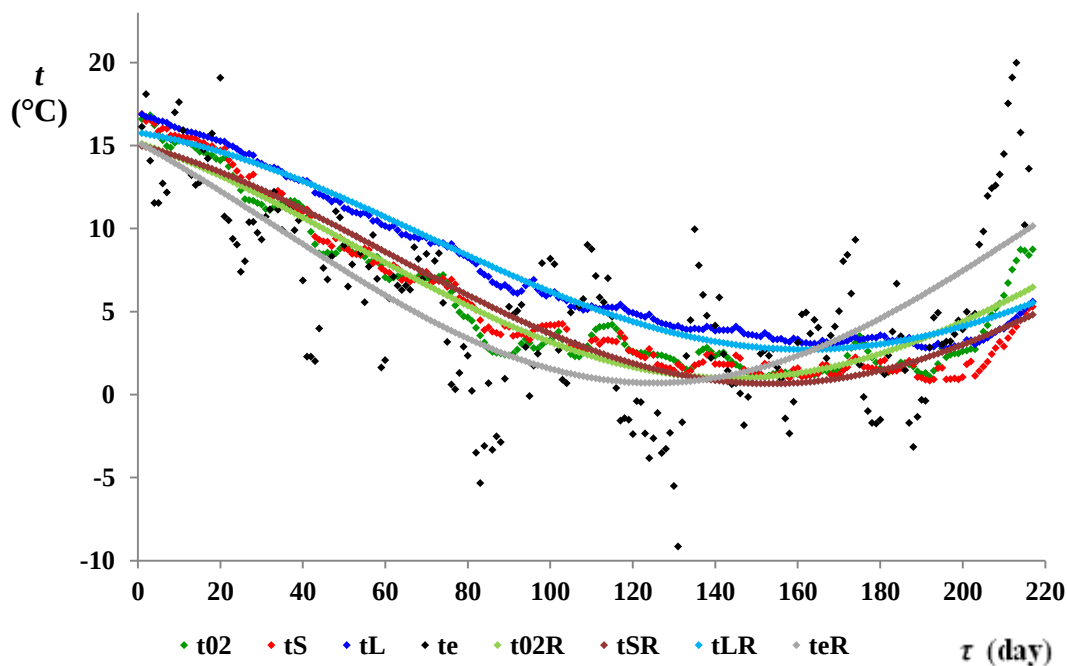
Při využití tepelného čerpadla nejen pro vytápění, ale i ohřev teplé vody (TV) se doporučuje zvýšit tepelný výkon kondenzátoru o $150\text{--}250 \text{ W}$ na 1 uživatele, v průměru o $200 \text{ W}\cdot\text{uživatele}^{-1}$. Při uvažovaném topném faktoru 3 a instalovaném tepelném výkonu zemního výměníku $16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (VDI, 2010) se zvýší plocha pozemku s lineárním zemním výměníkem (rozteč trubek 1 m) o $3,13\text{--}5,2 \text{ m}^2\cdot\text{uživatele}^{-1}$, v průměru o $4,17 \text{ m}^2\cdot\text{uživatele}^{-1}$. Při ohřevu TV tepelnými čerpadly se doporučuje použití speciálních dvouplášťových zásobníků, které mají velkou teplosměnnou plochu, ve vnějším plášti je větší množství topné vody, která slouží jako akumulátor a omezuje četnost spínání tepelného čerpadla. Jiným doporučovaným zásobníkem je tzv. negativní zásobník s energií naakumulovanou v topné vodě. TV se ohřívá průtokově ve vloženém velkoplošném měděném výměníku. Je tak minimalizována možnost vzniku bakterií *Legionella pneumophylis*.

TV se ohřívá celoročně, tedy i v letním období. Je však reálné předpokládat, že průměrný výkon $66,7 \text{ W}\cdot\text{uživatele}^{-1}$ odváděný v letním období zemnímu masivu pro ohřev TV neovlivní negativně proces akumulace tepelné energie v zemním masivu.

Zajímavý problém vznikne při uvažování dlouhodobého nepřetržitého provozu horizontálního zemního výměníku. Pro zjednodušení řešení je možné vycházet z dosažení limitního případu, že izotermické válcové plochy záporných teplot zemního masivu vytvořené okolo paralelních trubek lineárního výměníku se vzájemně dotknou. Energetický potenciál zemního masivu při rozteči trubek výměníku 1 m, tepelných charakteristikách dle tab. II (hloubka 1,6 m), $t_{z,min} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{tk,min} = -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, přepočtený na délku 1 m potrubí výměníku činí $3\,768 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-1}$. Průměrný měrný tepelný výkon odvedený půdnímu masivu 1 m^2 teplosměnné plochy výměníku dosahuje dle tab. V hodnoty $503,38 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$. Při přepočtu na 1 m délky trubky je odvedený výkon $63,24 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{den}^{-1}$. Energetický potenciál zemního masivu pak bude při nepřetržitém provozu tepelného čerpadla a uvedených podmínkách vyčerpán za 59,6 dne. Zvýšením rozteče trubek výměníku na 2 m se zvýší energetický potenciál přepočtený na délku 1 m potrubí výměníku na $15\,072 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-1}$. K jeho vyčerpání je za stejných podmínek třeba 238,8 dne.

2.3.1 Příklad: teploty zemního masivu, měrná tepla a tepelné výkony odvedené zemnímu masivu v topném období

V grafu 2 jsou znázorněny průměrné denní teploty zemního masivu s horizontálními výměníky (t_L , t_S , t_{02}) a průměrná denní teplota okolního vzduchu t_e v topném období 2012/2013. V průběhu topného období (17. 9. 2012–22. 4. 2013; 217 dní) byla průměrná teplota okolního vzduchu $5,47 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minimální $-15,80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, maximální $28,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Graf 2: Teploty zemního masivu v topném období 2012/2013

Teploty zemního masivu v topném období, znázorněné v grafu 2, lze vyjádřit rovnicemi:

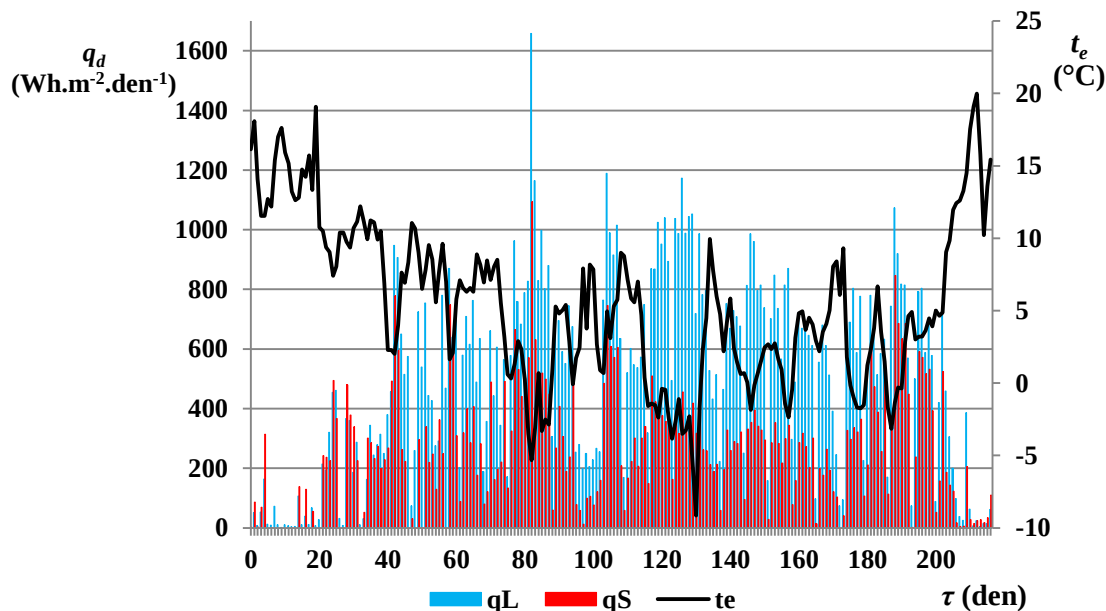
$$t_{02,R} = 8,924 + 7,934 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 2,232\right) \quad I_{02L}^2 = 0,941 \quad (12)$$

$$t_{L,R} = 9,461 + 6,746 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 1,925\right) \quad I_L^2 = 0,983 \quad (13)$$

$$t_{S,R} = 8,325 + 7,666 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \tau + 2,073\right) \quad I_S^2 = 0,961 \quad (14)$$

Rozdíly teplot půdy v oblasti horizontálních výměníků $t_L - t_S$ se pohybovaly v rozmezí $1,86 \pm 0,72$ K. V oblasti lineárního výměníku byly průměrné teploty půdního masivu $t_L = 7,39$ °C, v oblasti výměníku typu Slinky $t_S = 5,54$ °C. Nedosáhly, stejně jako v topném období 2011/2012, záporných hodnot. Pokles teplot půdního masivu v oblasti výměníku typu Slinky je větší než v oblasti výměníku lineárního. Minimální teplota půdy $t_{L,min} = 2,30$ °C v půdním masivu s lineárním výměníkem byla dosažena 192. den topné sezóny (28. 3. 2013) mezi 8:00 až 9:00 a v půdním masivu s výměníkem typu Slinky $t_{S,min} = 0,44$ °C, 193. den (29. 3. 2013) a 197. den (2. 4. 2013) den topné sezóny mezi 8:00 až 9:00. Po významnou část topného období jsou teploty půdního masivu $t_{L,R}, t_{S,R}$ vyšší, než teplota okolního vzduchu t_e . U lineárního výměníku je $t_L - t_e > 0$ v 68,68 % topného období a u výměníku typu Slinky v 53,05 % topného období. Ke zvýšení teploty zemního masivu dochází již na konci topného období při snížení odběru tepla souvisejícího s nárůstem teploty okolního vzduchu. Výsledky ověřování potvrzují výhody horizontálních zemních výměníků jako nízkoteplotních zdrojů energie oproti okolnímu vzduchu a to zejména z hlediska sezónního topného faktoru.

V grafu 3 jsou znázorněna tepla q_L , q_S odvedená půdnímu masivu 1 m^2 teplosměnné plochy výměníku za den a teplota okolního vzduchu t_e v topném období 2012/2013. V tab. VII jsou uvedeny průměrné, maximální a celkové hodnoty tepla odvedeného půdnímu masivu oběma horizontálními výměníky v topném období 2012/2013.



Graf 3: Tepla odvedená půdnímu masivu zemními výměníky v topném období 2012/2013

Tab. VII: Měrná tepla odvedená půdnímu masivu v topném období 2012/2013

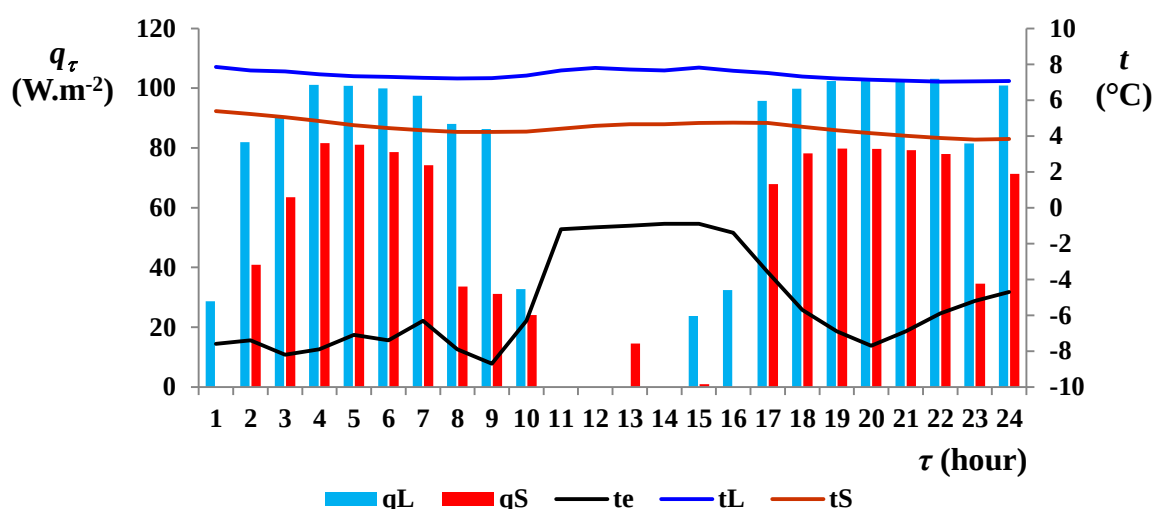
Měrná tepla odvedená půdnímu masivu	Lineární výměník	Výměník Slinky
Průměrná hodnota ($\text{Wh.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$)	503,38	264,25
Maximální hodnota ($\text{Wh.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$)	1 658,30	1093,47
Celkem za topné období (kWh.m^{-2})	109,23	57,34

Příklad tepelných výkonů q_L , q_S (W.m^{-2}) odváděných zemnímu masivu horizontálními výměníky, teploty t_L , t_S zemního masivu v oblasti výměníků a teploty okolního vzduchu t_e v zimním dnu s nejnižší průměrnou denní teplotou $-5,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ v topném období 2012/2013 jsou uvedeny v grafu 4. V průběhu dne (8. 12. 2012, 83. den topné sezóny) byla minimální teplota okolního vzduchu $-8,70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, maximální $-0,90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota půdního masivu v oblasti výměníku reaguje na denní změny měrného tepelného výkonu u lineárního výměníku v rozmezí $t_L = 7,41 \pm 0,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a u výměníku typu Slinky $t_S = 4,48 \pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hodnoty měrných tepelných výkonů a tepla odvedeného za 24 h (8. 12. 2012) půdnímu masivu, přepočtené na 1 m^2 teplosměnné plochy výměníku, jsou uvedeny v tab. VIII.

Tab. VIII: Měrné tepelné výkony a teplo odvedené půdnímu masivu za 24 h

Měrný tepelný výkon, teplo odvedené půdnímu masivu	Lineární výměník	Výměník typu Slinky
Průměrný výkon ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	68,84	45,54
Maximální výkon ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	103,12	81,66
Teplo odvedené za 24 h ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$)	1652,19	1092,98



Graf 4: Teploty zemního masivu a měrné tepelné výkony horizontálních výměníků v typickém zimním dnu

q_L – měrný tepelný výkon lineárního výměníku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); q_S – měrný tepelný výkon výměníku typu Slinky ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); t_e – teplota okolního vzduchu ($^{\circ}\text{C}$); t_L – teplota zemního masivu v oblasti lineárního výměníku ($^{\circ}\text{C}$); t_S – teplota zemního masivu v oblasti výměníku typu Slinky ($^{\circ}\text{C}$)

2.4 Akumulace energie v zemním masivu

Pokrytí povrchu zemního masivu ovlivňuje jeho teplotní i vodní režim. Znalost těchto režimů je zvláště důležitá při hodnocení efektu akumulace energie v zemním masivu při využívání horizontálních zemních výměníků tepla. Již návrh konfigurace zemního výměníku musí zohlednit efekt akumulace energie.

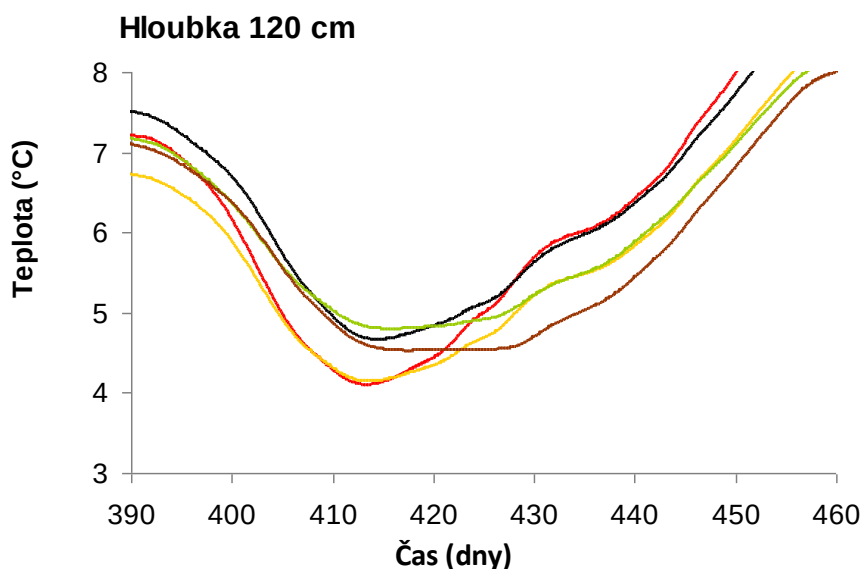
Dosud nebyla zpracována studie, která by posuzovala vliv různých druhů pokrytí povrchu zemního masivu na jeho teplotní a vodní režim. Některé studie se zabývají vlivem vlastností zemního masivu, např. pórovitostí (Demir a kol., 2009), vlhkostí (Leong a kol., 1998). Vlivem izolační vrstvy z recyklovaných pneumatik instalované na povrchu zemního masivu se zabývali Rezaei a kol. (2012). Výsledky ukázaly, že extrakce tepelného toku ze zemního masivu se vlivem naakumulované energie zvýšila v zimním období o 17 %.

Pro snížení teploty zemního masivu byly ověřovány vrstvy organických materiálů (Dahiya a kol., 2007) a také vrstvy šterku a písku (Wang a kol., 2011). Pro zvýšení teploty byly využity biologicky odbouratelné plastové fólie (Wang a kol., 2011).

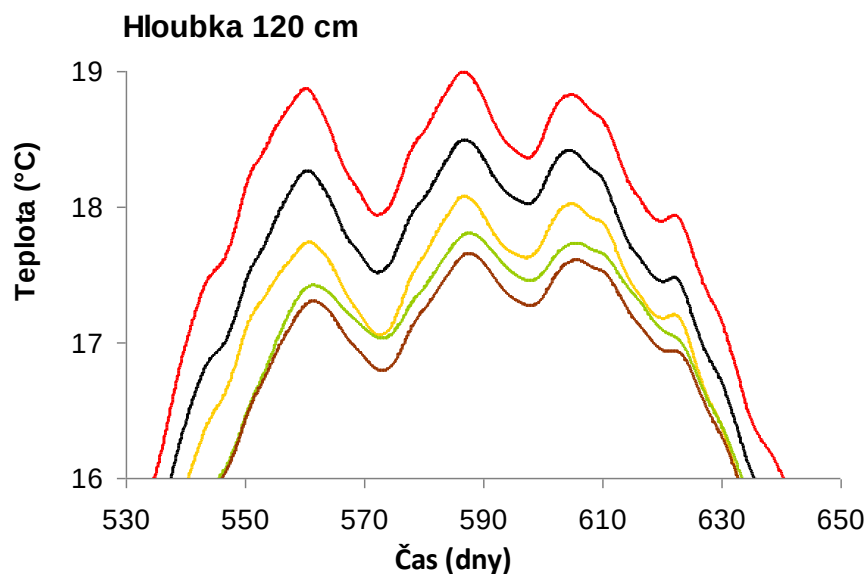
2.4.1 Příklad: vliv povrchové vrstvy zemního masivu na jeho teplotní režim

Cílem našich prací (Kodešová a kol. 2014) bylo kalibrovat model HYDRUS-1D pro simulaci vázané vody a teplotního režimu v zemním masivu s travnatým povrchem a použít tento model pro predikci vodního a teplotního režimu pod několika druhy pokrytí povrchů. Při modelování byly simulovány scénáře, kdy na povrchu byla: 1. tráva, 2. mulč, 3. čedičový štěrky, 4. písek, 5. dlažba. Jak dokládá graf 5, mohou rozdíly mezi teplotami simulovanými v hloubce 1,20 m v zimních měsících pod různými typy povrchů dosahovat téměř 1 K. Z hlediska energetického využití zemního masivu působil nejpříznivěji na zemní masiv v zimním období povrch s čedičovým štěrky. Povrch se v předjaří rychle zahřívá a tím docházelo i k rychlejšímu prohřívání zemních vrstev ve sledované hloubce. V zimních měsících působil zřejmě čedičový štěrky částečně jako izolace zabraňující ztrátě tepla, a proto teplota zemního masivu nepoklesla jako v případě, kdy na povrchu byla uvažována dlažba. Při uvažování betonové dlažby docházelo v předjaří k rychlému prohřívání zemního masivu a nejvyšší akumulaci energie v průběhu letních měsíců (graf 5). Lze také konstatovat, že v průběhu zimy poklesla teplota zemního masivu v hloubce 1,20 m za cca 25 dní na nižší hodnoty, než v případě štěrku, a to díky větším ztrátám tepla na povrchu. Z výsledků vyplývá, že čedičový štěrky na povrchu zemního masivu významně ovlivní efekt akumulace tepla.

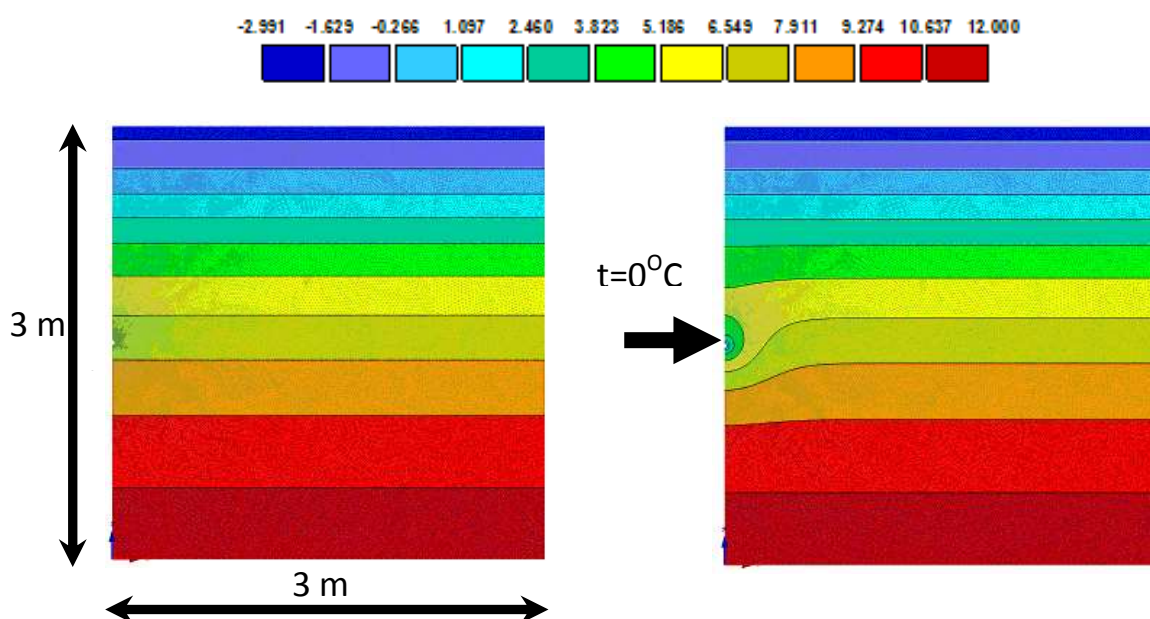
Minima teplot simulovaná pro scénáře, kdy na povrchu byla tráva nebo mulč, byla podobná minimu pro štěrky. Následné prohřívání půdy však bylo velmi pomalé (zvláště v případě mulče). Nejméně příznivá situace byla zjištěna v případě písku, kdy v průběhu zimy byly teploty nižší a půda se pomaleji prohřívala. V grafu 6 jsou také dokumentovány teploty simulované v průběhu léta 2014, které ukazují, že rozdíl teplot zemního masivu pro různé scénáře může být až 2 K.



Graf 5: Teploty zemního masivu simulované pomocí HYDRUS-1D v hloubce 120 cm pod trávou (zelená), pískem (žlutá), mulčovací kůrou (hnědá), štěrky (černá), betonovou dlažbou (červená) v období 25. 1. 2014-4. 4. 2014



Graf 6: Teploty zemního masivu simulované pomocí HYDRUS-1D v hloubce 120 cm pod trávou (zelená), pískem (žluté), mulčovací kůrou (hnědá), štěrkem (černá), betonovou dlažbou (červená) v období 13. 6. 2014-11. 10. 2014



Obr. 5: Teploty zemního masivu simulované pomocí HYDRUS-2D pro den 5. 1. 2012:

- a) teploty neovlivněné odběrem tepla,
- b) teploty ovlivněné odběrem tepla.

Povrchová teplota trubky výměníku byla uvažována 0 °C.

Na základě poznatků a dat získaných v průběhu kalibrace a následné aplikace 1D modelu byl pro danou lokalitu vytvořen dvourozměrný model půdního masivu, na kterém byl modelován vliv odběru tepla tepelným kolektorem na teplotu půdy v okolí kolektoru. Na obr. 5 je znázorněno rozložení teplot v půdě 5. 1. 2012 pro dva scénáře: a) půda

neovlivněná odběrem tepla; b) půda ovlivněná odběrem tepla při teplotě vnějšího povrchu trubky výměníku $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V grafu 7 je znázorněn pokles teploty zemního masivu v okolí kolektoru ve vertikálním a horizontálním směru, ve srovnání s teplotami zemního masivu bez odběru tepla, při teplotách $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na vnějším povrchu trubky výměníku.

Výsledky modelování vodního a teplotního režimu v zemním masivu, při různých druzích pokrytí povrchu masivu, vyústily v podání přihlášky užitého vzoru a patentu (ČZU, 2015).

2.5 Transport tepla do teplonosné kapaliny

Volba teplonosné kapaliny se řídí:

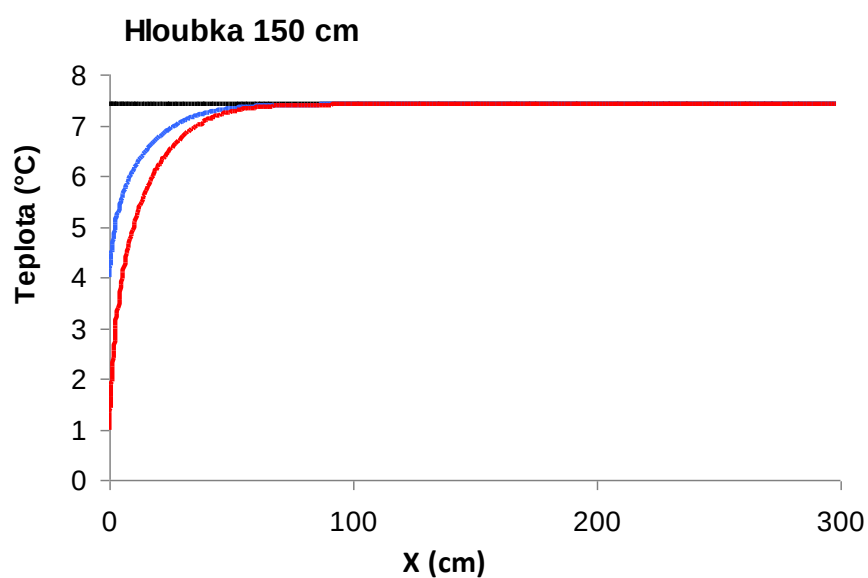
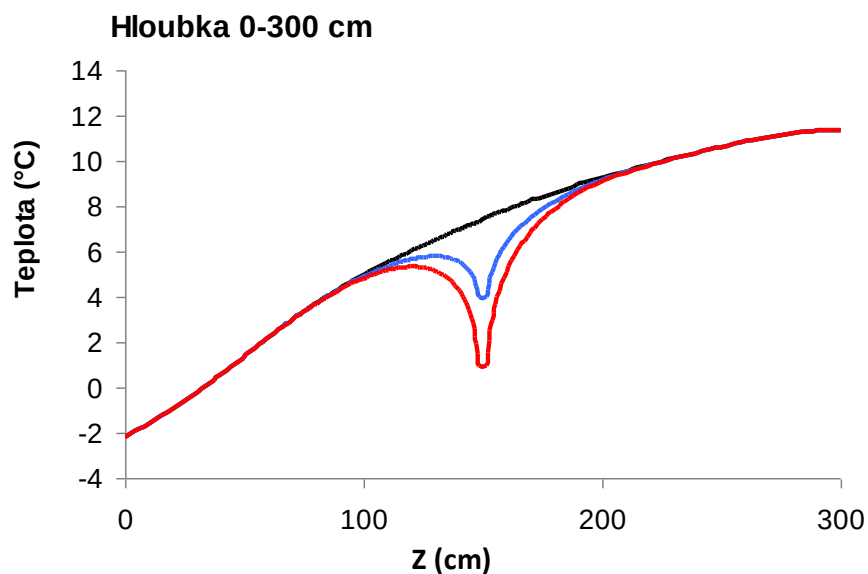
- předpokládanou teplotou provozu (pokud se očekává, že teplota tekutiny bude výrazně nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplonosnou kapalinou může být i voda),
- termodynamickými a hydrodynamickými vlastnostmi kapaliny,
- toxickými aspekty a místními, respektive vnitrostátními právními předpisy.

Limitní veličinou transportu tepla mezi zemním masivem a teplonosnou kapalinou je součinitel přestupu tepla mezi vnitřní stěnou trubky výměníku a teplonosnou kapalinou. V rovnici (4) a na obr. 4 je součinitel přestupu tepla označen α_s . Součinitel přestupu tepla je závislý na rychlosti proudění teplonosné kapaliny, teplotách vnitřní stěny trubky výměníku a teplonosné kapaliny, tvaru a rozměrech průřezu, kterým kapalina proudí, přenášeném tepelném výkonu a na tepelných charakteristikách teplonosné kapaliny. Zejména na součiniteli tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacitě a kinematické viskozitě teplonosné kapaliny.

Důležité je minimalizovat viskozitu teplonosné kapaliny, aby se snížil hydraulický odpor a zvýšila pravděpodobnost dosažení turbulentního proudění v trubce zemního výměníku tepla. V tab. IXa jsou z různých zdrojů (Banks, 2012; Melinder, 2010) shrnuty termodynamické a hydrodynamické vlastnosti vybraných nemrznoucích směsí. V tab. IXb je uvedena toxicita a biodegradabilita vybraných teplonosných kapalin (Banks, 2012; Melinder, 2010).

Z tabulky IXa můžeme vidět, že:

- viskozita teplonosné kapaliny roste se snižováním teploty (to je další důvod, abychom se vyhnuli provozu výměníku při záporných teplotách),
- viskozita teplonosné kapaliny roste s růstem koncentrace (klesajícím bodem tuhnutí),
- čím vyšší je navržená teplota vypařování, tím nižší koncentraci nemrznoucí směsi potřebujeme (stále však máme na mysli ochranu proti zamrznutí).



- teplota zemního masivu bez odběru tepla
- teplota zemního masivu při teplotě vnějšího povrchu trubky výměníku $t = 3\text{ °C}$
- teplota zemního masivu při teplotě vnějšího povrchu trubky výměníku $t = 0\text{ °C}$

Graf 7: Teploty zemního masivu v okolí výměníku simulované pomocí HYDRUS-2D pro den 5. 1. 2012

- a) vertikální řez půdním masivem, trubka výměníku je uložena na souřadnici $z = 150\text{ cm}$, na vnějším povrchu trubky výměníku jsou uvažovány povrchové teploty $t = 0\text{ °C}$ a $t = 3\text{ °C}$
- b) horizontální řez půdním masivem, trubka výměníku je představována svislou osou grafu a na vnějším povrchu trubky výměníku jsou uvažovány povrchové teploty $t = 0\text{ °C}$ a $t = 3\text{ °C}$

Tab. IXa: Termodynamické a hydrodynamické vlastnosti vybraných nemrznoucích směsí (Banks, 2012; Melinder, 2010)

Hmotnostní koncentrace (%)	Tekutina	Bod tuhnutí (°C)	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ ($10^{-3}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}$)	C ($\text{J}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
-	voda při 5 °C	0	0,570	1000	1,519	4202
-	látka při 0 °C	-	-	-	-	-
23,50	etylenglykol	-10	0,471	1035	3,530	3953
30,50	etylenglykol	-15	0,444	1046	4,380	3841
25,40	propylenglykol	-10	0,448	1026	5,640	3962
32,90	propylenglykol	-15	0,417	1035	8,320	3884
18,70	etanol	-10	0,455	977	5,000	4288
24,50	etanol	-15	0,425	972	6,050	4175
19,95	metanol	-15	0,462	973	3,230	3962
18,82	chlorid sodný	-15	0,548	1147	2,590	3916
23,90	octan draselný	-15	0,492	1129	3,340	3800
24,00	freezium	-15	0,510	1149	2,210	3838

Poznámka: Freezium je nový produkt založený na roztoku mravenčanu draselného.

V tab. X jsou uvedeny požadované rychlosti průtoku v lineárních trubkách nutné pro zajištění Reynoldsova čísla nad 2500 (čímž je definován začátek turbulentního proudění, vhodného pro efektivní sdílení tepla). Z uvedených hodnot vyplývá, že etylenglykol je z tradičních teplotnosných kapalin nejméně viskózní a tedy výhodný z hlediska dosažení turbulentního proudění a nižších hodnot hydraulického odporu. Bohužel je také toxický. Proto je použití etylenglykolu v zemních výměnících omežováno a v některých zemích je to dokonce zakázáno (např. Skandinávie a několik států v USA).

Turbulentní proudění teplotnosné kapaliny optimalizuje sdílení tepla a minimalizuje tepelný odpor potrubí výměníku. Rozměry trubek výměníku a složení teplotnosné kapaliny by tedy měly být zvoleny tak, aby se v době špičkového zatížení dosáhlo odpovídající hodnoty Reynoldsova čísla a tím byly minimalizovány hydraulické ztráty výměníku a náklady na čerpání teplotnosné kapaliny. Dosažení turbulentního proudění ovlivňuje i velikost teplosměnné plochy zemního výměníku a tedy i plochu pozemku.

Kvůli toxicitě etylenglykolu bylo ověřováno několik dalších teplotnosných kapalin (tab. IX, X). Anorganické roztoky solí (sodík, vápník nebo chlorid hořečnatý) nejsou považovány za toxické, nemají vysokou viskozitu a mohou mít body tuhnutí nižší než 0 °C. Jejich hlavním nedostatkem je, že působí agresivně. Organické soli (jako je mravenčan draselný nebo octan draselný) jsou méně agresivní a jejich využití může mít budoucnost. Nový komerční produkt Freezium je založen na mravenčanu draselném a deklaruje nízkou viskozitu.

Tab. IXb: Toxicita, biodegradabilita a obsah solí ve vybraných teplotně nosných kapalinách (Banks, 2012; Melinder, 2010)

Hmotnostní koncentrace (%)	Tekutina	Toxický?	Biodegradabilní?	Sůl?
-	voda při 5 °C	Ne		
-	látka při 0 °C	-	-	-
23,50	etylenglykol	Ano	Ano	Ne
30,50	etylenglykol	Ano	Ano	Ne
25,40	propylenglykol	Lehce	Ano	Ne
32,90	propylenglykol	Lehce	Ano	Ne
18,70	etanol	Lehce	Ano	Ne
24,50	etanol	Lehce	Ano	Ne
19,95	metanol	Ano	Ano	Ne
18,82	chlorid sodný	Lehce	Ne	Ano
23,90	octan draselný	Rel. lehce	Ano	Ano
24,00	freezium	Lehce	Ano	Ano

Tab. X: Požadovaný průtok (F_{turb}) pro realizaci získání turbulentního proudění ($Re > 2500$) v jednoduché, hydraulicky hladké trubce o rozměrech 40 × 3,7 mm a 32 × 3 mm (Banks, 2012)

Hmotnostní. koncentrace. (%)	Tekutina	Bod tuhnutí (°C)	$F_{turb.}$ 40mm (l·min ⁻¹)	$F_{turb.}$ 32mm (l·min ⁻¹)
-	voda při 5 °C	0	5,9	4,7
-	látka při 0 °C	-	-	-
23,50	etylenglykol	-10	13,1	10,5
30,50	etylenglykol	-15	16,1	12,9
25,40	propylenglykol	-10	21,2	17,0
32,90	propylenglykol	-15	31,0	24,8
18,70	etanol	-10	19,7	15,8
24,50	etanol	-15	24,0	19,2
24,00	freezium	-15	7,4	5,9

Propylenglykol je chemicky velmi podobný etylenglykolu, má nízkou toxicitu ($10 \times$ méně než etylenglykol). Je však extrémně viskózní a jeho použití může mít za následek vysoké hydraulické ztráty a obtíže při dosažení turbulentního proudění (Banks, 2012).

Etanol je biologicky odbouratelný a má vysokou objemovou tepelnou kapacitu. Je viskózní a jeho viskozita roste prudce při teplotách nižších než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Navíc nad některými koncentracemi se stává potenciálně hořlavý.

Zemní výměník musí být po instalaci podroben průtokové a tlakové zkoušce obvykle při tlaku 0,15-0,30 MPa. Horizontální zemní výměníky, uložené v relativně malé hloubce, jsou více náchylné k náhodnému poškození. Pokud dojde k úniku teplotnosné kapaliny ze zemního výměníku tak, že tlak klesne, nebo teplotnosná kapalina přestane cirkulovat, tepelné čerpadlo musí vypnout. Tím se zabrání poškození výparníku mrazem a také se minimalizuje únik kapaliny.

2.5.1 Příklad: teploty, termodynamické a hydrodynamické vlastnosti teplotnosných kapalin

Teploty teplotnosných kapalin v horizontálních výměnících (obr. 3 a obr. 4) v průběhu topné sezóny 2012/2013 jsou uvedeny v tab. XI.

Z tab. XI vyplývá, že minimální teploty teplotnosné kapaliny vystupující z výparníku tepelného čerpadla do výměníků se pohybovaly okolo $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jsou u obou výměníků téměř stejné. Průměrná teplota teplotnosné kapaliny vystupující z lineárního výměníku je vyšší než u výměníku typu Slinky.

Tab. XI: Teploty teplotnosné kapaliny v topném období 2012/2013

Typ výměníku	Teplota teplotnosné kapaliny ($^{\circ}\text{C}$)			
	proudění z výměníku		proudění do výměníku	
	průměrná	minimální	průměrná	minimální
Lineární	8.13	1.67	5.80	-2.09
Slinky	6.37	0.39	5.86	-2.02

Jak již bylo uvedeno, jednou z kritických veličin ovlivňujících sdílení tepla mezi půdním masivem a teplotnosnou kapalinou je součinitel přestupu tepla α_s ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Podle The Engineering ToolBox (2015) je bod tuhnutí běžně používané teplotnosné kapaliny (33 % $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ + 67 % H_2O) - $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky našich měření ukázaly, že minimální teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z tepelného čerpadla byla $-2,09\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vyhovující by tedy pro ověřované výměníky byla nižší koncentrace, např. 20 % etanolu, kdy teplota tuhnutí směsi je $-9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V grafech 8-11 jsou znázorněny závislosti termodynamických vlastností teplotnosné kapaliny při koncentraci etanolu 0 % (voda), 20 % a 33 % objemových na teplotě teplotnosné kapaliny t_{tk} .

Z průběhu závislostí vyplývá vyšší hustota ρ_{tk} , vyšší měrná tepelná kapacita c_{tk} a také vyšší součinitel tepelné vodivosti λ_{tk} teplotnosné kapaliny při nižší koncentraci. Kinematická viskozita ν_{tk} se s poklesem koncentrace teplotnosné kapaliny snižuje. Zvýšení hustoty, měrné

tepelné kapacity i součinitele tepelné vodivosti má pozitivní vliv na sdělený tepelný výkon i práci oběhového čerpadla okruhu výměníku. Nižší hodnota kinematické viskozity umožní při nižších rychlostech dosáhnout turbulentního proudění teplotnosné kapaliny.

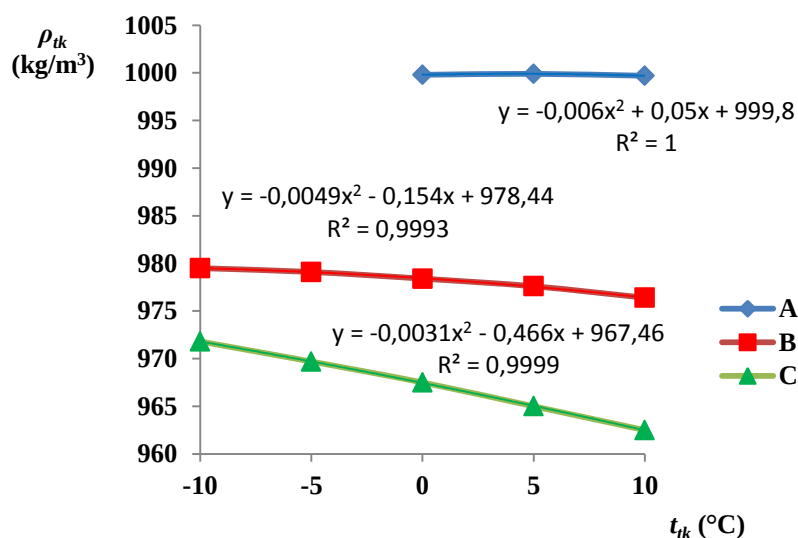
V tab. XII jsou zpracovány změny hydrodynamických a termodynamických veličin při změně koncentrace etanolu v teplotnosné kapalině z 33 % na 20%.

Termodynamické vlastnosti teplotnosné kapaliny byly stanoveny podle informační databáze a publikace (The Engineering ToolBox, 2013; Yajima, 2000). Hodnota Nusseltova kritéria byla vypočtena podle vztahů uváděných v renomované publikaci Recknagel et al. (2007).

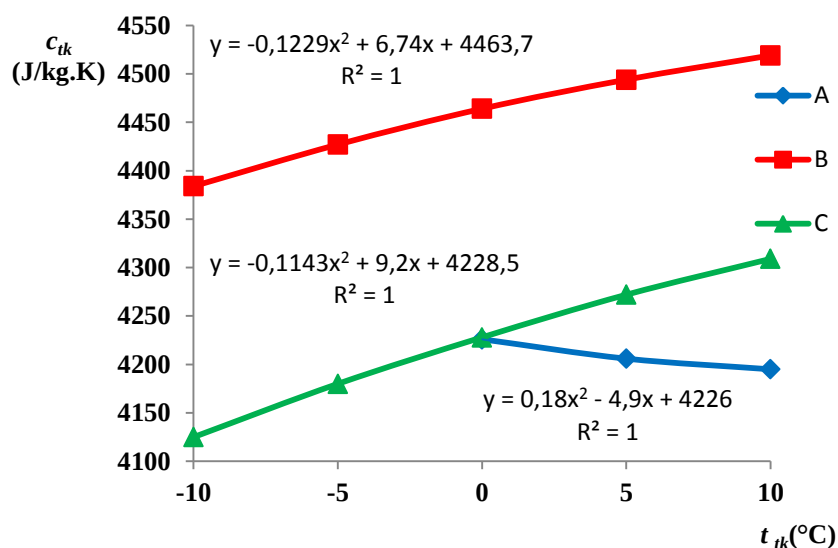
Hodnoty Reynoldsova kritéria ukazují, že při objemové koncentraci 33 % C_2H_6O + 67 % H_2O je proudění teplotnosné kapaliny v trubkách výměníků laminární. Při snížení koncentrace etanolu na 20 % se zvýšily hodnoty Re u výměníku lineárního o 44,28 % a u výměníku typu Slinky o 45,36 %. Při objemovém toku teplotnosné kapaliny $1,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ by u výměníku typu Slinky bylo téměř dosaženo turbulentního proudění. Snížení koncentrace etanolu v teplotnosné kapalině má tedy pozitivní vliv na druh proudění.

Součinitel přestupu tepla α_s se při snížení koncentrace etylalkoholu zvýšil o 14,13-15,18 % a při dosažení hranice turbulentního proudění až o 109,40 %.

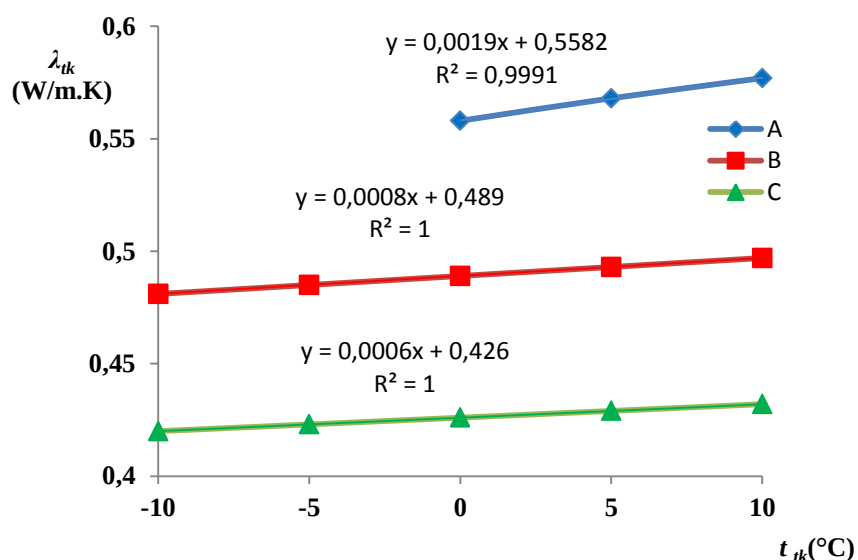
Výsledky ukazují, že pro dosažení turbulentního proudění teplotnosné kapaliny by snížení koncentrace etanolu mělo doprovázet zvýšení rychlosti proudění kapaliny.



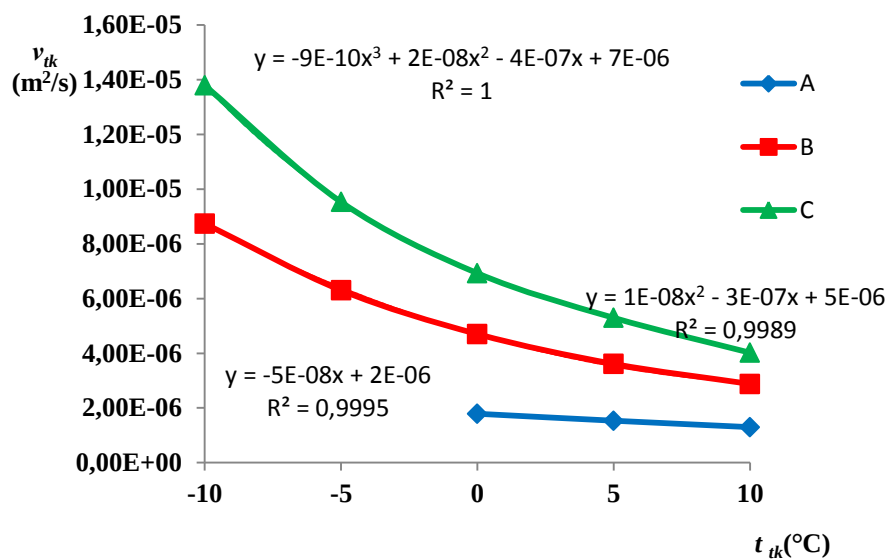
Graf 8: Závislost hustoty teplotnosné kapaliny ρ_{tk} na teplotě t_{tk}
A – koncentrace 0 % (voda); B – koncentrace 20 %; C – koncentrace 33 %



Graf 9: Závislost měrné tepelné kapacity teplotnosné kapaliny c_{tk} na teplotě t_{tk}
A – koncentrace 0 % (voda); B – koncentrace 20 %; C – koncentrace 33 %



Graf 10: Závislost součinitele tepelné vodivosti teplotnosné kapaliny λ_{tk} na teplotě t_{tk}
A – koncentrace 0 % (voda); B – koncentrace 20 %; C – koncentrace 33 %.



Graf 11: Závislost kinematické viskozity teplotnosné kapaliny ν_{tk} na teplotě t_{tk}
A – koncentrace 0 % (voda); B – koncentrace 20 %; C – koncentrace 33 %

Tab. XII: Hydrodynamické a termodynamické veličiny teplotnosné kapaliny

Typ výměníku	Objemová koncentrace etanolu (%)							
	33				20			
	Lineární		Slinky		Lineární		Slinky	
Objemový tok kapaliny $\times 10^{-4}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	1,72	0,833	1,72	0,833	1,72	0,833	1,72	0,833
Re	1400,71	678,60	1667,86	810,40	2021,05	979,13	2424,35	1177,98
Nu	4,223	3,951	4,523	4,123	4,186	3,930	8,240	4,092
α_s ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	55,73	52,14	79,91	72,84	63,51	59,63	167,33	83,13

2.5.2 Příklad: výpočet zemního výměníku pro rodinný dům

Návrhový tepelný výkon rodinného domu s podlahovým vytápěním při výpočtové venkovní teplotě $\vartheta_e = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$, činí $\Phi_{HL,i} = 8\text{ kW}$. Rodinný dům obývá 5 osob. Horizontální zemní výměník má být navržen pro tepelné čerpadlo, které dům vytápí a ohřívá teplou vodu (dále TV).

Při využití tepelného čerpadla i pro ohřev TV zvyšujeme požadovaný tepelný výkon o 0,2 kW na osobu. Celkový požadovaný tepelný výkon pak bude 9 kW. Tomuto tepelnému výkonu vyhovuje např. tepelné čerpadlo typu země - voda IVT GREENLINE C 9 s následujícími parametry:

- výkon při B0/W35, $Q_{\tau,B0/W35} = 9,1\text{ kW}$,
- příkon, $P_{\tau,B0/W35} = 2,0\text{ kW}$,
- topný faktor při B0/W35, $COP_{B0/W35} = 4,55$,
- výkon při B0/W50, $Q_{\tau,B0/W50} = 8,4\text{ kW}$,
- příkon, $P_{\tau,B0/W50} = 2,6\text{ kW}$,
- topný faktor při B0/W50, $COP_{B0/W50} = 3,23$.

Poznámka: B0 – teplota teplotnosné kapaliny přiváděné na výparník $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; W35, W50 – teplota topné vody na kondenzátoru $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ respektive $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Výpočet spotřeby tepla Q_{TV} pro ohřev TV

Při výpočtu je uvažována:

- vstupní teplota studené vody $t_1 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vstupní teplota teplé vody $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- spotřeba TV, $V = 0,05\text{ m}^3 \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$,
- měrná objemová tepelná kapacita vody $C = 1,163\text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

$$Q_{TV} = V \cdot C \cdot (t_2 - t_1) = 3396\text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Rozvod TV v rodinném domě nemá cirkulační oběh, uvažujeme tedy zvýšení spotřeby tepla o 15 %. Pak skutečná spotřeba tepla pro ohřev TV bude $Q_{TV,s} = 3\,905\text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Dobu provozu τ_{TV} tepelného čerpadla pro ohřev TV vypočteme ze vztahu:

$$\tau_{TV} = \frac{Q_{TV,s}}{Q_{\tau,B0/W50}} = 465\text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Výpočet spotřeby tepla Q_{vyt} pro vytápění

Podle www.tzb-info.cz činí při tepelné ztrátě objektu 8 kW, průměrné vnitřní výpočtové teplotě $t_{is} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, venkovní výpočtové teplotě $t_e = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$, střední denní venkovní teplotě pro začátek a konec otopného období $t_{em} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ roční spotřeba tepla pro vytápění $Q_{vyt} = 17\,600\text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Pro vytápění rodinného domu bude tepelné čerpadlo v provozu ročně:

$$\tau_{vyt} = \frac{Q_{vyt}}{Q_{\tau,B0/W35}} = 1934\text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Pro vytápění rodinného domu a ohřev TV pro 5 osob bude tepelné čerpadlo ročně v provozu celkem 2 399 h. Ve VDI (2001) je uváděna roční doba provozu tepelného čerpadla pro vytápění objektu 1 800 h a pro ohřev TV 600 h, celkem 2 400 h.

Výpočet délky potrubí L výměníku a plochy pozemku S

Požadovaný tepelný výkon výměníku pro vytápění $Q_{\tau,v,vyt}$ vypočteme ze vztahu:

$$Q_{\tau,v,vyt} = Q_{\tau,B0/W35} - P_{\tau,B0/W35} = 7,1 \text{ kW}$$

Tepelný výkon výměníku pro ohřev TV vypočteme ze vztahu:

$$Q_{\tau,v,TV} = Q_{\tau,B0/W50} - P_{\tau,B0/W50} = 5,8 \text{ kW}$$

Délku potrubí výměníku L vypočteme z vyššího požadovaného tepelného výkonu $Q_{\tau,v,vyp}$:

$$L = \frac{Q_{\tau,v,vyp}}{q_{\tau,L}} = 591 \text{ m}$$

Kde: $q_{\tau,L} = 12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ – měrný tepelný výkon 1 m trubky výměníku, převzato z VDI (2010) (tab. XI).

Výpočet délky trubek zemního výměníku L můžeme uskutečnit rovněž podle vztahu (5). Dosadíme-li do vztahu za: $\Phi_{HL} = 7\,100 \text{ W}$; $COP_n = 4,55$; $R_t = 0,072 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; $R_\alpha = 0,154 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; $R_z = 1,748 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; $\tau_p = 1\,934 \text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$; $\tau_{to} = (225 \text{ dní} \times 24) = 5\,400 \text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$; $F = 0,358$; $t_{z,min} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{tk,min} = -3 \text{ }^\circ\text{C}$, vychází délka trubek výměníku $L = 589,64 \text{ m}$. Tedy téměř shodně jako v předcházejícím postupu výpočtu.

Plochu pozemku s výměníkem S vypočteme rovněž z vyššího požadovaného tepelného výkonu $Q_{\tau,v,vyp}$:

$$S = \frac{Q_{\tau,v,vyp}}{q_{\tau,S}} = 355 \text{ m}^2$$

Kde: $q_{\tau,L} = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ – měrný tepelný výkon vztažený na 1 m^2 plochy pozemku s výměníkem, převzato z VDI (2010) (tab. XI).

Rozteč trubek výměníku s vypočteme z rovnice:

$$s = \frac{S}{L} = 0,6 \text{ m}$$

Pokud bychom měli k dispozici dostatečnou plochu pozemku, bylo by z hlediska energetického potenciálu výhodnější použít rozteč trubek výměníku 1 m. Při stejné délce trubek výměníku $L = 590 \text{ m}$ by plocha pozemku činila cca 590 m^2 .

2.6 Náklady na realizaci zemních výměníků

Horizontální zemní výměník je považován (Petit, Meyer, 1998; Benli, 2011) za jeden z nejvýhodnějších nízkoteplotních zdrojů energie pro tepelná čerpadla. Výkonnostní a ekonomické parametry tepelného čerpadla využívajícího horizontální zemní výměník jsou stejné nebo lepší jako při využití vertikálních horninových výměníků (uložených ve vrtech), ale za výrazně nižších pořizovacích nákladů (cca 20-50 % ceny vrtu).

Na velikost zemního výměníku a plochy, na které je instalován, mají zásadní vliv tyto faktory (Tepelná čerpadla IVT, 2008):

- návrhový tepelný výkon objektu (resp. celková spotřeba tepla objektu);
- typ a výkon tepelného čerpadla;
- druh zemního masivu (tepelné charakteristiky masivu);
- druh otopné soustavy (čím nižší je průměrná teplota topné vody, tím vyšší topný faktor).

Pro instalace do výkonu 12 kW se dimenzování primárního okruhu řídí ve Spolkové republice Německo podle směrnice VDI (2010), tab. XIII.

Tab. XIII: Měrné tepelné zisky odvedené 1 m² zemnímu masivu a 1 m trubky výměníku (VDI, 2010)

Podloží	Odvedený měrný výkon (W.m ⁻²) a (W.m ⁻¹) při:	
	provozu 1800 h/rok	provozu 2400 h/rok
Suchá nesoudržná zemina	10 a 5	8 a 4
Soudržné zeminy vlhké (šterky a písky)	20 – 30 a 15	16 – 24 a 12
Protékající spodní voda šterky a písky	40 a 20	32 a 16

Poznámka: Sloupec provozních 1 800 hodin/rok platí pro tepelná čerpadla pokrývající pouze potřebu vytápění objektu. Sloupec 2 400 hodin/rok se vztahuje na většinu instalací, kdy je použito tepelné čerpadlo pro vytápění a ohřev teplé vody pro sociální účely.

Ve výpočtových programech IVT s.r.o. jsou měrné tepelné zisky vztaženy na 1 m trubky výměníku, tab. XIV.

Tab. XIV: Měrné tepelné zisky odvedené zemnímu masivu 1 m trubky výměníku (Tepelná čerpadla IVT, 2008)

Typ zemního masivu	Odvedený tepelný výkon (W.m ⁻¹)
Vlhká zemina	25
Normální zemina	16
Suchá zemina (písek)	12

Potrubí zemních výměníků jsou ukládána většinou do výkopů prováděných bagrem (šířka výkopu 0,6-0,8 m), nebo rýhovačem (šířka výkopu 0,1-0,15 m). Je možné provést i kompletní skrývku a následné zahrnutí výměníku. Tato technologie je investičně náročnější,

proto se používá, jen když je výměník umístěn pod závažkou. Horizontální zemní výměník se nedoporučuje instalovat na plochách, kde se v budoucnu plánuje jakákoliv výstavba. Také je třeba zvážit proveditelnost výkopu. Problémy mohou nastat v místech, kde podloží tvoří skála, velké kameny, nebo písek. Aby bylo možné zemní výměník odvědušnit, je nutné jej uložit v rovině, respektive s malým sklonem od strojovny. Jinak je nutné instalovat na nejvyšších místech výměníku odvědušení. Z technologických důvodů (Tepelná čerpadla IVT, 2008) se nedoporučuje pokládat potrubí při teplotách pod 5 °C. Hrozí možnost poškození hadice, která je v nízkých teplotách velmi křehká.

S ohledem na velikost tlakových ztrát a tím spotřebu elektrické energie na pohon oběhových čerpadel je omezena délka jednotlivých smyček. Renomované firmy uvádějí přímo v projektových podkladech maximální délky smyček pro jednotlivé modely čerpadel. Pokud délka výměníku překračuje maximální povolenou délku pro jeden okruh, rozdělí se výměník na více paralelně spojených smyček. Při použití více kratších smyček se výrazně sníží tlaková ztráta primárního okruhu a tím spotřeba elektrické energie na pohon oběhového čerpadla (zvýší se tak topný faktor celého zařízení i tepelné zatížení výměníku).

V zemním výměníku může teplota teplotnosné kapaliny klesnout až na záporné teploty. Při ukládání zemního výměníku je tedy nutno dodržovat následující zásady (Tepelná čerpadla IVT, 2008):

- neinstalovat trubky výměníku souběžně s jinými rozvody (voda, elektrický proud, kanalizace);
- nutné křížení trubek výměníku s dalšími rozvody se musí provést s co největším odstupem a trubky výměníku tepelně izolovat;
- trubky výměníku tepelně izolovat do vzdálenosti 1-2 m od objektu;
- trubky výměníku při prostupu obvodovou zdí tepelně izolovat do vzdálenosti minimálně 1 m od objektu;
- každou trubku výměníku při prostupu obvodovou zdí opatřit chráničkou z PVC trubky vyspádanou směrem od domu. Na vnější straně zdi přesahuje chránička zeď o 10 cm.

Poznámka: Pro tepelné izolace je nutné použít kvalitní syntetický kaučuk s vysokou hodnotou difuzního odporu (m/s).

2.6.1 Příklad: snížení nákladů na realizaci zemního výměníku aplikací získaných poznatků a výsledků ověřování

Podle zkušeností pracovníků firmy Tepelná čerpadla IVT, s.r.o. se sídlem v Praze 4 činí v roce 2015 celkové náklady (včetně teplotnosné kapaliny) na realizaci lineárního tepelného výměníku s roztečí trubek 1 m v průměru 150,- Kč na 1 m² plochy pozemku, tedy při uvažované rozteči trubek výměníku 1 m, v podstatě na 1 m trubky výměníku.

Aplikací získaných poznatků, výsledků laboratorních a provozních ověřování můžeme dosáhnout snížení měrných nákladů na instalaci zemních výměníků. Například:

- Instalací hydroizolačního rozhraní dosáhneme zvýšení objemové vlhkosti půdy z 0,15 cm³·cm⁻³ na 0,30 cm³·cm⁻³. Výsledkem zvýšení objemové vlhkosti je zvýšení součinitele tepelné vodivosti zemního masívu z $\lambda_{z1} = 0,643 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

na $\lambda_{z2} = 1,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ze zvýšení součinitele tepelné vodivosti vyplývá snížení tepelného odporu zemního masivu z $R_{z1} = 2,847 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ na $R_{z2} = 1,748 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$.

- Snížení tepelného odporu trubky R_t lze dosáhnout použitím polyetylenových trubek (HDPE) o vysoké hustotě. Tyto trubky mají součinitel tepelné vodivosti stěny $\lambda_{t2} = 0,45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tepelný odpor $R_{t2} = 0,072 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Při použití polypropylenových trubek je součinitel tepelné vodivosti stěny $\lambda_{t1} = 0,22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tepelný odpor $R_{t1} = 0,148 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$.
- Snížením koncentrace etanolu z 33 % na 20 % dosáhneme při stejném objemovém toku zvýšení součinitele přestupu tepla mezi stěnou trubky a teplonosnou kapalinou z $\alpha_{s1} = 55,73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $\alpha_{s2} = 63,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Ze zvýšení součinitele přestupu tepla vyplývá snížení tepelného odporu konvekce z $R_{a1} = 0,175 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ na $R_{a2} = 0,154 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$.

Celkové tepelné odpory mezi zemním masivem a teplonosnou kapalinou činí $R_1 = 3,170 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ a $R_2 = 1,974 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Z rovnice (5) vyplývá, že snížením celkového tepelného odporu se dosáhne zkrácení délky potrubí téměř o 35 %.

Zmenšením plochy pozemku vhodným uložením zemního výměníku, trubek a nižší koncentrací teplonosné kapaliny se tedy dosáhne snížení nákladů na jeho realizaci a zejména, což má v praxi reálný význam, snížení plochy pozemku nutné pro instalaci výměníku.

2.7 Závěry a doporučení vyplývající z provozních ověřování

Monitorování teplot zemního masivu v letech 2011-2015 a analýza jejich změn v topných obdobích a období stagnace (Adamovský, 2015) ukázaly, že:

- Teploty půdního masivu v oblasti výměníků byly v topném období kladné. Kladné teploty půdního masivu umožňují využít vyšších teplot vypařování chladiva a tím i zvýšit topný faktor tepelného čerpadla. Vyšší hodnota topného faktoru má pozitivní vliv na spotřebu elektrické energie a životní prostředí, zejména z hlediska produkce CO_2 .
- Průběhy teplot půdního masivu v topném období lze s dostatečnou přesností vyjádřit jednoduchými rovnicemi (12), (13), (14). Znalost průběhu teplot půdního masivu v oblasti výměníku a na povrchu, nebo v jeho blízkosti tvoří, spolu se znalostí tepelných charakteristik půdního masivu a teplot okolního prostředí, důležité podklady pro řízení energetických systémů s tepelnými čerpadly.
- Ochlazení půdního masivu v oblasti výměníků bylo u lineárního výměníku menší než u výměníku Slinky.
- Teploty zemního masivu v oblasti obou výměníků byly po větší část topného období vyšší než teploty okolního prostředí. Výsledky ověřování tedy potvrzují výhody horizontálních zemních výměníků jako nízkoteplotních zdrojů energie oproti okolnímu vzduchu a to zejména z hlediska sezonního topného faktoru.
- Teploty půdního masivu ve 3 topných obdobích, zpracované v tab. III, ukazují, že rozdíly teplot na počátcích a koncích topných období nejsou u obou sledovaných výměníků významné. Výsledky ověřování naznačují, že půdní masiv lze považovat za stabilní nízkoteplotní zdroj energie s dlouhou životností.

- Průběhy teplot půdního masivu v období stagnace lze s dostatečnou přesností vyjádřit rovnicemi (7), (8), a (9).

Stanovení tepelných toků a množství tepla odvedeného půdnímu masivu horizontálními výměníky prokázalo, že:

- Měrné tepelné toky odvedené půdnímu masivu v topném období jsou u lineárního výměníku větší, než u výměníku typu Slinky. Vyšší odvedené tepelné toky u lineárního výměníku však nezpůsobují, díky většímu objemu zemního masivu, nižší teploty půdy v oblasti výměníku.
- Měrná tepla odvedená půdnímu masivu lineárním výměníkem jsou rovněž vyšší než u výměníku typu Slinky. Výsledky sledování dávají reálnou představu o množství energie, které za daných podmínek v systémech s horizontálními zemními výměníky masivu odvádíme. Při znalostech tepelných charakteristik půdy lze tak hodnotit energetický potenciál půdního masivu ve funkci nízkoteplotního zdroje energie pro tepelná čerpadla.
- Průměrné teploty teplotnosné kapaliny vystupující z lineárního výměníku byly vyšší než z výměníku typu Slinky. Minimální teploty teplotnosné kapaliny vstupující do výměníku byly u obou výměníků shodné a dosahovaly výjimečně záporných hodnot.
- V obou horizontálních zemních výměnících převládalo laminární proudění teplotnosné kapaliny. Významnou příčinou nevýhodného laminárního proudění teplotnosné kapaliny je vysoká koncentrace etanolu, která neodpovídá minimálním provozním teplotám teplotnosné kapaliny. Analýza problému ukázala, že snížení koncentrace etanolu má pozitivní vliv na součinitel přestupu tepla mezi teplotnosnou kapalinou a stěnou potrubí výměníku. Tento součinitel je jednou z veličin limitujících výkon zemních výměníků.

Víceletá provozní ověřování ukázala kladné i záporné stránky obou typů horizontálních zemních výměníků. Z hlediska výkonu i vlivu teplot na půdní masiv se lineární výměník jeví výhodnějším zdrojem energie pro tepelná čerpadla.

3 SPECIFIKACE NOVOSTI POSTUPŮ

Metodika reaguje na aktuální potřeby společnosti:

- snižování spotřeby fosilních paliv,
- snižování dopadů antropogenních vlivů na životní prostředí,
- zvýšení spolehlivosti a konkurenceschopnosti obnovitelných zdrojů energie.

Certifikovaná metodika pro využití půdy jako nízkoteplotního zdroje energie tepelných čerpadel nebyla dosud v ČR realizována, jedná se o novost jako takovou. Novost metodiky spočívá v uplatnění nových poznatků, její komplexnosti a zacílení.

Na základě analýzy současného stavu řešení problematiky a provozních experimentů byly získány nové poznatky:

1. upřesňující vliv konfigurace výměníků na tepelný potenciál zemního masivu,
2. pozitivně ovlivňující spolehlivost provozu výměníků a jejich dobu využívání,
3. pozitivně ovlivňující akumulaci energie v zemním masivu,
4. zvyšující transport tepla ze zemního masivu do teplonosné kapaliny,
5. snižující náklady na realizaci horizontálních zemních výměníků.

Novost metodiky v bodě 1 spočívá v konkrétní specifikaci vlivů konfigurace výměníku na dílčí tepelné odpory (R_b , R_z , R_a) a celkový tepelný odpor (R) mezi zemním masivem a teplonosnou kapalinou výměníku. Dále pak v určení vlivů tepelných charakteristik zemního masivu, teploty zemního masivu a provozu výměníků na tepelný potenciál zemního masivu.

Novost metodiky v bodě 2 spočívá zejména ve specifikaci faktorů ovlivňujících spolehlivost funkce horizontálních zemních výměníků a zpracování specializované mapy charakterizující tepelné vlastnosti půd (tepelnou vodivost a objemovou tepelnou kapacitu) v České republice. Dále pak v konkretizaci vlivu těchto faktorů na spolehlivost funkce výměníků.

Novost metodiky v bodě 3 spočívá v kalibraci modelu HYDRUS-1D a jeho využití pro predikci vodního a teplotního režimu v zemním masivu při různých materiálech pokrytí povrchu masivu. Dále pak ve specifikaci pokrytí, které pozitivně ovlivňuje efekt akumulace tepla.

Novost metodiky v bodě 4 spočívá v analýze termodynamických, hydrodynamických vlastností teplonosné kapaliny a specifikaci faktorů zlepšujících tyto vlastnosti. Dále pak v bližším určení limitní veličiny transportu tepla mezi zemním masivem a teplonosnou kapalinou a zhodnocení teplonosných kapalin z hlediska toxicity a biodegradability.

Novost metodiky v bodě 5 spočívá v určení faktorů majících vliv na velikost teplosměnné plochy výměníku a analýze možností zvýšení účinnosti výměníku s cílem snížení investičních nákladů. Dále pak ve specifikaci zásad ukládání výměníků.

4 UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika je určena projektantům, montážním firmám a uživatelům tepelných čerpadel, kteří se věnují využívání horizontálních zemních výměníků ve funkci nízkoteplotních zdrojů energie.

Metodika bude ihned po certifikaci uplatněna zejména prostřednictvím Asociace pro využití tepelných čerpadel v České republice, která je součástí Evropské asociace EHPA (European heat pump association). Členem asociace v České republice je 69 dodavatelských, výrobních a montážních firem, technických vysokých škol a zkušebních ústavů zabývajících se problematikou tepelných čerpadel. Tato organizace pořádá každoročně školení pro projektanty a montážní firmy o novinkách v této problematice. Dále bude využívána firmami Veskom, spol. s r. o. a IVT, s.r.o., organizační složka. Další využití je podmíněno nově uzavřenými smluvními vztahy mezi ČZU v Praze a dalšími zájemci. Metodika bude rovněž prezentována na přednáškách a seminářích pořádaných v rámci výstav (For Therm, For Energy, For Arch a dalších) a na přednáškách a cvičení studentů navazujícího magisterského studia a doktorských studijních programů České zemědělské univerzity v Praze i ČVUT v Praze.

5 EKONOMICKÉ ASPEKTY NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ

Z publikace (Bufka, 2015) vyplývá, že za posledních 5 let bylo v ČR instalováno v průměru ročně 2286 tepelných čerpadel typu země - voda. Jedná se o tepelná čerpadla, jejichž kompresor je poháněn elektrickou energií. Podle informací Asociace pro využití tepelných čerpadel v České republice využívá přibližně polovina těchto čerpadel jako nízkoteplotního zdroje energie pro výparník horizontální zemní tepelný výměník. Průměrný instalovaný výkon těchto tepelných čerpadel činí 12,07 kW. Uvedenému průměrnému instalovanému výkonu tepelného čerpadla odpovídá podle tab. XII a rovnice (5) plocha pozemku s lineárním výměníkem s roztečí trubek 1 m, 754 m².

Předpokládáme (viz 2.6.1), že realizací výsledků ověřování a analýz literárních poznatků týkajících se konfigurace zemního výměníku, specifikace faktorů ovlivňujících funkci výměníků, instalace hydroizolačního rozhraní a snížení koncentrace teplotnosných kapalin se dosáhne u lineárního výměníku minimálně úspory 5 % nákladů na realizaci. Při měrné ceně instalace lineárního výměníku 150 Kč·m⁻² bude úspora nákladů při realizaci tepelného čerpadla s průměrným výkonem 12,07 kW činit 5 655 Kč (37,7 m² × 150 Kč·m⁻²). Po zohlednění nákladů na vytvoření hydroizolační vrstvy a změn koncentrace teplotnosné kapaliny je dále uvažována úspora nákladů při realizaci tepelného čerpadla s průměrným výkonem 5 278 Kč (37,7 m² × 140 Kč·m⁻²).

Tab. XV: Ekonomické přínosy u uživatelů

Rok instalace	Počet instalací (ks)		Snížení plochy pozemku s výměníkem (m ²)		Úspora investičních nákladů (mil. Kč)	
	Nárůst instalací (%)		Nárůst instalací (%)		Nárůst instalací (%)	
	2,5	5,0	2,5	5,0	2,5	5,0
2016	1 200	1 230	45 240	46 371	6,334	6,492
2017	1 230	1 292	46371	48708	6,492	6,819
2018	1 261	1 357	47540	51159	6,656	7,162
2019	1 292	1 425	48708	53723	6,819	7,521
2020	1 324	1 496	49915	56399	6,988	7,896
Celkem	6 308	6 800	237 774	256 360	33,289	35,89

Při specifikaci vývoje realizací tepelných čerpadel v ČR je třeba vzít v úvahu ekonomické a environmentální aspekty. Jedná se především o úspory fosilních paliv a pozitivní vliv na životní prostředí, zejména z hlediska produkce emisí. Důležitým faktorem podpory tepelných čerpadel typu země – voda je hodnocení podle ČSN EN 14825 (14825) v aktivním režimu (SCOP_{on}, SCOP_{net}). Je reálné předpokládat, že tento způsob stanovení topných faktorů pozitivně ovlivní realizaci tepelných čerpadel typu země – voda na úkor typu vzduch – voda. Předpokládáme roční nárůst realizací tepelných čerpadel v rozmezí 2,5-5 %.

Náklady na řešení projektu činily 4 827 600 Kč. Z tab. XV vyplývá, že náklady na řešení projektu se při ročním nárůstu instalací o 2,5 %, respektive 5 % společnosti vrátí v prvním roce realizace výsledků.

DEDIKACE

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu č. TA02020991 „Optimalizace energetických parametrů horizontálních zemních výměníků tepelných čerpadel s ohledem na půdní a hydrologické podmínky lokality“ programu ALFA – 2. výzva, Technologické agentury České republiky. Projekt byl řešen v letech 2012-2015.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ADAMOVSKÝ, Daniel, NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKÝ, Radomír. Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers – The energy source for heat pumps. *Energy and Buildings*. 2015, **92**, 107-115. ISSN 0378-7788.
- BANKS, David. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Garsington Road, Oxford: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. ISBN 978-0-470-67034-7.
- BRANDL, Heinz. Energy foundations and other thermally active ground structures, *Géotechnique*. 2006, **56**, 81-122. ISSN 0016-8505.
- BENLI, Hüseyin. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating, *Energy Conversion and Management*. 2011, **52**, 581-589. ISSN 0196-8904.
- BUFKA, Aleš. *Tepelná čerpadla v roce 2013*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky [cit. 26. 1. 2015] Dostupné z: www.mpo.cz/dokument15013.html.
- CONGEDO, Pietro, Marco, COLANGELO, Gianpiero, STARACE, Giuseppe. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations, *Applied Thermal Engineering*. 2012, **33/34**, 24-32. ISSN 1359-4311.
- CREATIVE TEAM. *Ground-source heat pump project analysis*. RETScreen International, Clean Energy Decision Support Centre, Minister of Natural Resources Canada, 2005. ISBN 0-662-39150-0.
- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. Úprava uložení horizontálního zemního tepelného výměníku. Původci: Pavel NEUBERGER, Radomír ADAMOVSKÝ a Radka KODEŠOVÁ. Česká republika. Užitný vzor číslo 26913. 12. 5. 2014.
- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. Zához zemního tepelného výměníku. Původci: Pavel NEUBERGER, Radomír ADAMOVSKÝ, Radka KODEŠOVÁ, Petr BUREŠ. Česká republika. Užitný vzor číslo (v řízení). 2015.
- ČÍŽEK, Petr. Zemní tepelné výměníky tepelných čerpadel se neobejdou bez podzemní vody. *Vodní hospodářství*. 2005, **55**, 8, ISSN 1211-0760.
- ČSN EN 14825. *Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru – Zkoušení a klasifikace za podmínek částečného zatížení a výpočet při sezonním nasazení*. 1. Vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- DAHIYA, R., INGWERSEN, Joachim, STRECK, Thilo. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modeling. *Soil & Tillage. Research*. 2007, **96** (1-2), 52-63. ISSN 0167-1987.
- DEMIR, H., MOBEDI, Moghtada, ÜLKÜ, Semra. Effect of porosity on heat and mass transfer in a granular bed. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, **36**, 372-377. ISSN 0735-1933.
- HOLYMOOR. *Soil heat thermal conductivity survey assessment*. [Report CZC3/D1.0]: Holymoor Consultancy Ltd., Chesterfield, UK, 2010.
- CHUNG, Sang-Ok, HORTON Robert. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research*, 1987, **23**, 2175-2186. ISSN 1944-7973.

- KODEŠOVÁ, Radka, FÉR, Miroslav, KLEMENT, Aleš, NIKODÉM, Antonín, TEPLÁ, Daniela, NEUBERGER, Pavel, BUREŠ, Petr. Impact of various surface covers on water and thermal regime of Technosol. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**, 2272-2288. ISSN 1431-2174.
- KODEŠOVÁ, Radka, VLASÁKOVÁ, Miroslava, FÉR, Miroslav, TEPLÁ, Daniela, JAKŠÍK, Ondřej, NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKÝ, Radomír. Thermal properties of representative soils of the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 2013, **4/8**, 141-150. ISSN 1801-5395.
- LEONG, Wey, H, TARNAWSKI, Vladek, R, AITTOMAKI, Akseli. Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance. *International Journal of Refrigeration*. 1998, **21**, 595-606. ISSN 0140-7007.
- MELINDER, Åke. Properties of secondary working fluids for indirect systems. *International Journal of Refrigeration*. 2010, **33/8**, 1506-1512. ISSN 0140-7007.
- PETIT, P, J, MEYER, Josua, P. A techno-economic analysis between the performances of heat source air conditioners in South Africa, *Energy Conversion and Management*. 1998, **39**, 661-669. ISSN 0196-8904.
- RECKNAGEL, Hermann, E. SPRENGER, Eberhard, a SCHRAMEK Ernst-Rudolf. *Handbook for Heating and Air Conditioning*. (in Deutsch), 73 ed.; Publisher: Oldenbourg Industrieverlag München, Federal Republic of Germany, 2007.
- REZAEI, Behnam, Attaran., KOLAHDOUZ, Ebrahim, M., DARGUSH, Gary, F., WEBER, A.S., 2012. Ground source heat pump pipe performance with tire derived aggregate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**, 2844-2853. ISSN 0735-1933.
- ŠORIN, S. N. *Sdílení tepla*. 1vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1968.
- TEPELNÁ ČERPADLA IVT. *Projekční podklady 6.1*. [s. 43] Tepelná čerpadla IVT, s.r.o., ©2008.
- The Engineering ToolBox* [online] Ethanol Freeze Protected Water Solutions, [17. 3. 2015] Dostupné z: engineeringtoolbox.com/ethanol-water-d_989.html.
- VDI 4640-3:06-2010. *Thermal use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2010.
- VDI 4640-3:06-2001. *Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2001.
- WANG, Jihong, GONG, Shaogang, XU, Dashun, JUAN, S., MU, J., 2013. Numerical simulations and validation of water flow and heat transport in a subsurface irrigation system using HYDRUS-2D. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2013, **62**, 97-106. ISSN 0733-9437.
- YAJIMA, Tatsuo, MORIKAWA, Shuji. Measurement of Thermal Conductivity and Evaluation of Isobaric Specific Heat Capacity of Ethanol – Water Mixture by the Transiet Hot – Wire Method, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning*. 2000, **17**, 79-84. ISSN 1344-4905.

PUBLIKACE VZNIKLÉ V SOUVISLOSTI S ŘEŠENÍM PROBLEMATIKY

ADAMOVSKEÝ, Daniel, NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ, Radomír. Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers – The energy source for heat pumps. *Energy and Buildings*. 2015, **92**, 107-115. ISSN 0378-7788.

NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ, Radomír, Šed'ová, Michaela. Temperatures and Heat Flows in a Soil Enclosing a Slinky Horizontal Heat Exchanger. *Energies*. 2014, **7/2**, 972-978. ISSN 1996-1073.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. Úprava uložení horizontálního zemního tepelného výměníku. Původci: Pavel NEUBERGER, Radomír ADAMOVSKEÝ a Radka KODEŠOVÁ. Česká republika. Užiténý vzor číslo 26913. 12. 5. 2014.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. Zához zemního tepelného výměníku. Původci: Pavel NEUBERGER, Radomír ADAMOVSKEÝ, Radka KODEŠOVÁ, Petr BUREŠ Česká republika. Užiténý vzor číslo (v řízení). 2015.

KODEŠOVÁ, Radka, FÉR, Miroslav, KLEMENT, Aleš, NIKODÉM, Antonín, TEPLÁ, Daniela, NEUBERGER, Pavel, BUREŠ, Petr. Impact of various surface covers on water and thermal regime of Technosol. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**, 2272-2288. ISSN 1431-2174.

ŠEDOVÁ, Michaela, ADAMOVSKEÝ, Radomír, NEUBERGER, Pavel. Analysis of ground massif temperatures with horizontal heat exchanger. *Research in Agricultural Engineering*, 2013, **59/3**, 91-97. ISSN 1212-9151.

KODEŠOVÁ, Radka, VLASÁKOVÁ, Miroslava, FÉR, Miroslav, TEPLÁ, Daniela, JAKŠÍK, Ondřej, NEUBERGER, Pavel, ADAMOVSKEÝ, Radomír. Thermal properties of representative soils of the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 2013, **4/8**, 141-150. ISSN 1801-5395.

ADAMOVSKEÝ, Radomír, NEUBERGER, Pavel, ŠEDOVÁ, Michaela. Výsledky ověřování horizontálního zemního výměníku. *Topenářství, instalace*, 2013, **47/01**, 16-19. ISSN 1211-0906.

ADAMOVSKEÝ, Radomír, NEUBERGER, Pavel, MAŠEK, Lukáš, PAULI, Pavel. Ground mass temperature analysis with the Slinky type horizontal ground heat exchanger. In: *Proceedings of CLIMA 2013, The 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*. Prague: Congress Centre, 2013, 10 p. ISBN 978-80-260-4001-9.

ADAMOVSKEÝ, Radomír, NEUBERGER, Pavel, ŠEDOVÁ, Michaela. Horizontal ground heat exchangers – source of energy for heat pumps. In: *5th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2013*. Prague: Czech University of Life Sciences Prague, 2013, p. 45-50. ISBN 978-80-213-2388-9.

SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ

Značky	Popis	Jednotka
C	elektronický měřič tepla	-
C	měrná objemová tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; $\text{J} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
COP_n	návrhový topný faktor tepelného čerpadla	$\text{kWh} \cdot \text{kWh}^{-1}$
F_{turb}	průtok kapaliny při turbulentním proudění	$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$
I_{tr}^2	index korelace	-
L	délka trubky zemního výměníku	m
P_τ	příkon	kW
Q_{TV}	spotřeba tepla pro ohřev vody	$\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$
Q_{vyt}	spotřeba tepla pro vytápění	$\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$
Q_τ	tepelný výkon	kW
R	tepelný odpor	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
R^2	koeficient determinace	-
S	plocha pozemku	m^2
$SCOP_{net}$	topný faktor daného období v aktivním režimu bez záložního ohřívače	$\text{kWh} \cdot \text{kWh}^{-1}$
$SCOP_{on}$	topný faktor daného období v aktivním režimu	$\text{kWh} \cdot \text{kWh}^{-1}$
TV	teplá voda	-
V	spotřeba teplé vody	$\text{m}^3 \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$
a	součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
c	měrná tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d	průměr potrubí výměníku	m
h	hloubka uložení zemního výměníku	m
q	měrné teplo odvedené 1 m^2 teplosměnné plochy výměníku	$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$
q_τ	měrný tepelný výkon odvedený 1 m^2 teplosměnné plochy výměníku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
s	rozteč trubek zemního výměníku; skutečná	m
t	teplota	$^\circ\text{C}$
$\bar{t}$	střední teplota	$^\circ\text{C}$
w	objemová vlhkost zemního masivu	%; $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
Δt_A	amplituda oscilace kolem teploty	$^\circ\text{C}$
Δt	rozdíl teplot	K
Θ_e	výpočtová venkovní teplota	$^\circ\text{C}$
$\Phi_{HL,i}$	návrhový tepelný výkon objektu	W
Ω	vlastní kruhová frekvence	$2\pi/365 \cdot \text{rad} \cdot \text{den}^{-1}$
α	součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky výměníku a teplotou kapaliny	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ	dynamická viskozita	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
τ	čas	h; den
φ	počáteční fáze kmitu	rad

Indexy		
<i>L</i>	lineární zemní výměník	-
<i>S</i>	výměník typu Slinky	-
<i>TV</i>	teplá voda	-
<i>i</i>	vratné potrubí	-
<i>min</i>	minimální hodnota	-
<i>o</i>	výstupní potrubí	-
<i>p</i>	provoz	-
<i>s</i>	stěna trubky	-
<i>t</i>	stěna trubky výměníku	-
<i>tk</i>	teplonosná kapalina	-
<i>to</i>	topné období	-
<i>vyt</i>	vytápění	
<i>z</i>	zemní masiv	-
α	sdílení tepla konvekcí	-
<i>1</i>	potrubí ze zemního výměníku do výparníku; vnitřní průměr potrubí výměníku; vstupní	-
<i>2</i>	potrubí z výparníku do zemního výměníku; vnější průměr potrubí výměníku; výstupní	-
<i>02</i>	hloubka 0,2 m pod povrchem zemního masivu	-

SUMMARY

This methodology was created with financial support from the Technology Agency of the Czech Republic within the ALFA - 2 call in the project no. TA02020991 " Optimization of the energetic parameters of the horizontal ground heat exchangers with respect to soil and hydrological conditions at the specific location." Czech University of Life Sciences in Prague and the company Veskom, Ltd. based in Prague 10 Dolní Měcholupy were project investigators.

The content of the methodology is to analyze the current state of the art of the topic and the results of long-term operational testing options for the use of the energy potential of soil massif as the source of low-potential heat for heat pumps. Individual chapters are devoted to the methodology of the thermal potential of the soil massif, the reliability of the energy system with geothermal heat, energy storage in the massif, heat transfer to the heat carrier fluid and the cost of implementing the ground heat exchanger. Furthermore, the application of the methodology and economic aspects of the proposed solutions. Recommendations for the ground heat exchangers and their solutions are also part of the methodology.

The goal of the methodology is to provide knowledge and propose measures to reduce the anthropogenic impacts on the environment and increase the reliability and competitiveness of heat pumps, where the soil is low-temperature energy source.

Keywords: heat pump, soil massif, ground heat exchanger, soil temperature, soil thermal properties, heating, water heating

Název	Metodika pro využití půdy jako nízkoteplotního zdroje energie tepelných čerpadel
Autoři	prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc. doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D. prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.
Vydavatel	Česká zemědělská univerzita v Praze katedra mechaniky a strojnictví Technická fakulta katedra pedologie a ochrany půd Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
Vydání	2015
Náklad	50
Počet stran	52
Tiskárna	Powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6 – Suchbátka
ISBN	978-80-213-2559-3