



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**ZEMNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA - PROVOZNÍ REŽIMY
A JEJICH VLIV NA MIKROBIOLOGICKÁ RIZIKA**

GROUND HEAT EXCHANGERS - OPERATING STATES AND THEIR INFLUENCE ON
MICROBIOLOGICAL HAZARDS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

PH.D. THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Antonín Kolbábek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

BRNO 2016

KLÍČOVÁ SLOVA

Zemní výměník tepla, protimrazová ochrana, větrání, zpětné získávání tepla, mikrobiologická rizika

KEYWORDS

Air-to-ground heat exchangers, anti-frost protection, ventilation, heat recovery, microbiological hazards

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Obsah

OBSAH.....	3
ÚVOD.....	4
2 TEPLOVZDUŠNÉ VYTÁPĚNÍ A VĚTRÁNÍ NED A EPD	5
2.1 Zpětné získávání tepla	6
2.2 Protimrazová ochrana VZT zařízení.....	6
3 ZEMNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA PRO VZDUCHOTECHNICKÉ SYSTÉMY BUDOV	7
3.1 Vzduchový typ zemního výměníku tepla – základní koncepce, používané komponenty a uspořádání	7
3.2 Přímé a cirkulační provedení vzduchového ZVT	8
3.3 Kapalinové zemní výměníky.....	9
3.4 Návrh vzduchových zemních výměníků tepla	9
3.5 Teplota zeminy.....	10
4 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ BUDOV	10
4.1 Mikrobiální mikroklima a vzduchotechnika	11
4.2 Možné mikrobiologické riziko vzduchových ZVT.....	12
5 ZJEDNODUŠENÝ MODEL ZVT	13
5.1 Výpočetní postup	13
5.2 Vliv materiálu potrubí	14
5.3 Meteorologická data – klimatické databáze	16
5.4 Výsledky energetických simulací.....	16
6 EXPERIMENTÁLNÍ ZEMNÍ VZDUCHOVÝ VÝMĚNÍK TEPLA NA FAKULTĚ STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNĚ.....	19
6.1 Provozní režimy	20
6.2 Dlouhodobý monitoring provozních parametrů ZVT	21
7 MIKROBIOLOGICKÝ VÝZKUM VZDUCHOVÝCH ZEMNÍCH VÝMĚNÍKŮ TEPLA	26
7.1 Metoda stěrů	27
7.2 Gravimetrická metoda	29
7.3 Praktické zkušenosti s návrhem, provozem a využitím vzduchových zemních výměníků tepla.....	33
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
ABSTRAKT	41
ŽIVOTOPIS AUTORA	42

Úvod

V několika posledních letech vzniká, hlavně v EU, tlak na postupné snižování energetické náročnosti budov, spolu s větším využitím obnovitelných zdrojů energie. Ve směrnici Evropského parlamentu a Rady č. 2010/31/EU [1] je proto uvedeno, že do konce r. 2020 by měly být v celé EU všechny nově postavené budovy budovami s téměř nulovou spotřebou energie – využívající vlastní alternativní zdroje energie [2, 3]. Dnes se již běžně setkáváme s „*nízkoenergetickými*“ domy (NED) nebo domy „*energeticky pasivními*“ (EPD) [4, 5], jež jsou předstupněm těchto tzv. „*nulových*“ budov. Oproti dřívějším novostavbám u nich můžeme úplně upustit od klasické teplovodní otopné soustavy a dům vytápět teplovzdušně [6, 7]. Vzduchotechnická jednotka pak zároveň zajišťuje i komfortní větrání a s využitím vysoce účinného zpětného získávání tepla (ZZT) z odpadního vzduchu do značné míry redukuje tepelnou ztrátu větráním. Doplňkem teplovzdušného vytápěcího systému se často stává i předřazený vzduchový zemní výměník tepla (ZVT) [8, 9]. Ten zde slouží k prvotní úpravě větracího vzduchu, kdy ke své funkci využívá relativně stabilního teplotního rozvrstvení v dostatečné hloubce pod povrchem země. Hlavní funkcí zemního výměníku je však – alespoň v klimatické oblasti střední Evropy – protimrazová ochrana výměníku ZZT, u něhož za určitých podmínek hrozí zamrznutí kondenzátu z odváděného vlhkého vzduchu, který omezuje jeho funkci (resp. může vést až ke zničení celého výměníku).

Díky postupné aplikaci evropské směrnice se dá v budoucnu očekávat stále větší uplatnění komfortních ventilačních systémů s využitím ZZT a dalších souvisejících technologií (včetně ZVT). Důležitým posuzovacím kritériem bude jistě i kvalita přiváděného větracího vzduchu, který u vzduchového typu ZVT prochází i několik desítek metrů dlouhým potrubním systémem. Povrch potrubí se může během provozu zanášet, což spolu s možností kondenzace vzdušné vlhkosti může představovat pro přívodní vzduch určité riziko, zejména mikrobiologické. Doposud bylo v ČR publikováno jen několik výsledků mikrobiologického rozboru kvality interiérového vzduchu či staveb obecně, např. [10, 11]. Nejednalo se však primárně o zaměření na budovy s ventilačním systémem – tedy ani se zemním vzduchovým výměníkem. Přestože je po celé ČR realizováno již několik stovek zařízení (obdobně je tomu i v sousedním Slovensku) [12], stále není k dispozici relevantní studie, zabývající se právě hygienou zemních vzduchových výměníků tepla – jež by potvrdila či vyvrátila obecně uváděnou obavu z možné kontaminace přiváděného vzduchu.

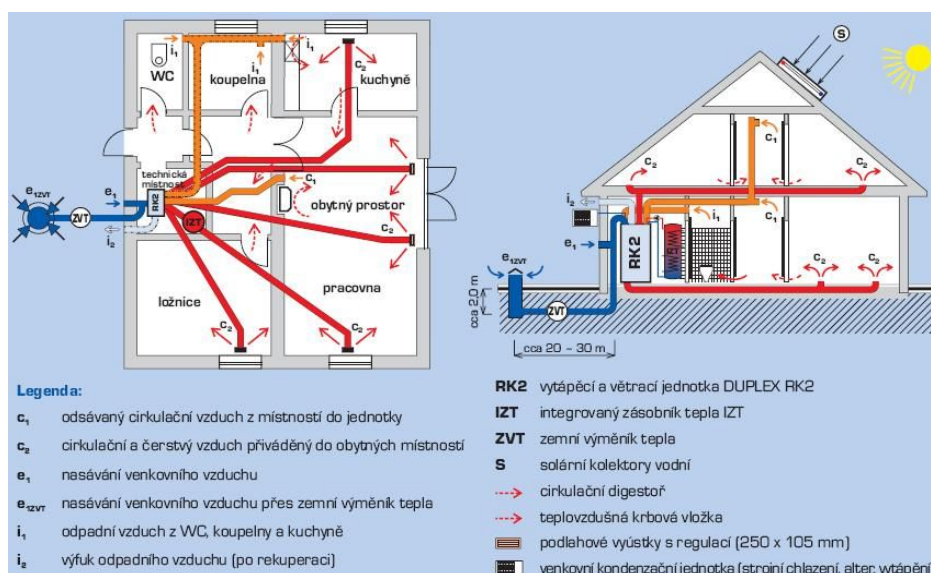
Předkládaná disertační práce je proto zaměřena převážně na terénní monitoring několika desítek již realizovaných větracích systémů (zejména rodinných domů) se vzduchovým ZVT v klimatických podmínkách České republiky. Zkoumané zemní výměníky jsou realizovány různými potrubními systémy, provozovány při různých větracích režimech v odlišných lokalitách (uvnitř měst a mimo nich) a jsou také různého stáří. Několik zkoumaných ZVT bylo vybudováno ze speciálního potrubního systému *Rehau Awadukt Thermo* [13, 14] s anti-mikrobiální úpravou povrchu, určeného výhradně pro aplikaci v ZVT. U tohoto potrubního systému byly ve dvou případech odběry provedeny jak před čištěním potrubní trasy, tak i po něm (v odstupu cca 2 měsíců). Některá jiná zařízení nebyla naopak od svého uvedení do provozu nikterak čištěna a kontrolována. Výzkum mikrobiologického znečištění ZVT proběhl dvěma metodami – pomocí stěrů z potrubí a sedimentace bioaerosolu na agarové misky – a odebrané biologické vzorky byly následně vyhodnoceny v nezávislé akreditované mikrobiologické laboratoři.

Mikrobiologický stav ZVT může být výrazně ovlivňován kondenzací vzdušné vlhkosti. Doposud však není k dispozici dostatečné množství dat z celoročního monitoringu tepelně-vlhkostního chování reálných ZVT. V zahraniční odborné literatuře byla publikována některá

data z monitoringu několika realizací (např. [15, 16]). Většinou se však jedná o data naměřená během několika málo dní, jež sloužila převážně pro validaci navržených numerických modelů. V rámci ČR publikoval některá data Ing. Pavel Kopecký, PhD., z ČVUT v Praze ve spolupráci s firmou *Atrea s.r.o.* [17, 18]. Tato práce navazuje na výše uvedené výsledky a prezentuje některá naměřená data z provozu experimentálního zemního výměníku tepla, vybudovaného na FSI VUT v Brně. Další možností, jak vytipovat podmínky, za nichž hrozí riziko kondenzace v zemním výměníku tepla, je použití numerické simulace. Vyvinuté modely však nejsou součástí běžných uživatelských knihoven, některé jsou za příplatek dostupné v nastavbových knihovnách. Autor tak v práci uvádí zjednodušený model vzduchového ZVT, jež je navržen v sw prostředí TRNSYS. Uvedeny jsou zde rovněž výsledky některých energetických simulací, přičemž je rozebrán i vliv různých klimatických databází na získané výsledky. Zmíněný model umožňuje řešit i cirkulační režim chlazení a vytápění.

2 Teplovzdušné vytápění a větrání NED a EPD

Dle směrnice EPBD II je do budoucna cílem dosáhnout nízké energetické náročnosti, a to při dosažení nákladově optimální úrovně v rámci životního cyklu budovy [1]. Z dnešního pohledu jsou to hlavně NED a EPD, u nichž by měly vícenáklady činit max. 10÷15 % [4, 19]. Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům je označení pro určitý energetický standard budovy, kterého dosáhneme splněním určitých kritérií [3, 20, 21] – přičemž již při návrhu musíme respektovat základní principy pasivního domu (např. dle [5, 19, 20, 22]). Kvalitní výplně otvorů zajišťující neprůvzdušnost (vzduchotěsnost) objektu [5, 19], spolu s kvalitní obálkou budovy, omezují kromě tepelné ztráty prostupem také tepelnou ztrátu větráním (infiltrací). Z tohoto důvodu již u NED/EPD nemůžeme spoléhat na přirozené větrání okny budovy a musíme přistoupit k aplikaci systému řízeného větrání [5, 6], který zajistí přívod čerstvého větracího vzduchu v požadované kvantitě i kvalitě (filtrace, ohřev atd.).



Obr. 2.1: Teplovzdušné cirkulační vytápění a větrání pro NED a EPD – podle [7]

Podle stupně pokrytí celkových tepelných ztrát rozeznáváme buď teplovzdušné větrání, nebo teplovzdušné vytápění – teplotním médiem se zde stává samotný větrací vzduch, přiváděný bezpodmínečně mechanicky. Systém tak zajišťuje jak vytápění, tak i nucené komfortní větrání celého objektu [21]. V prvním případě má vzduch stejnou nebo i nižší teplotu, než je požadovaná teplota v interiéru – zbylé tepelné ztráty pokrývá jiný systém, nejčastěji

otopná soustava. Do objektu se přivádí minimální množství čerstvého vzduchu, dané doporučenou intenzitou výměny vzduchu, případně min. množstvím větracího vzduchu na 1 osobu [5, 23, 24]. Při snížené tepelné ztrátě (tj. u EPD) můžeme použít teplovzdušného vytápění, kdy je teplota přiváděného vzduchu naopak vyšší (max. však 50 °C) – tak aby pokryl i tepelné ztráty obálkou budovy. Existuje i systém s cirkulací interiérového vzduchu (**obr. 2.1**), který zajistí pokrytí větší tepelné ztráty, aniž by se tím vnitřní vzduch nadměrně vysušoval. V letním období může být vzduchotechnika využívána i pro účinné noční větrání, tzv. „pasivní chlazení“ – nebo ve spojení se zemním výměníkem pro předchlazení objektu [6, 7, 25, 26]. Chladicí výkon ZVT je sice omezený, ale při správné koncepci EPD již není potřeba žádné další energeticky náročné klimatizační zařízení (většinou kompresorového typu).

2.1 Zpětné získávání tepla

Chceme-li zajistit nízkou energetickou náročnost budovy, musíme v systému nuceného větrání bezpodmínečně použít zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu. V technické praxi se používá místo výrazu ZZT také název „rekuperace tepla“. Nazpět můžeme získávat jak teplo citelné, tak i latentní – ve většině případů se však u rodinných domů využívá pouze zpětného zisku citelného tepla. Rozeznáváme dva způsoby ZZT – tzv. „pasivní rekuperaci tepla“ [25, 27, 28] a „aktivní rekuperaci tepla“ [27, 29, 30]. Pasivní rekuperace je historicky nejvíce využívána u malých větracích jednotek pro RD; realizovaná je nejčastěji zařízením s deskovými výměníky. V minulosti používané výměníky křížové, či křížové/ protiproudé dnes nahrazují účinnější výměníky protiproudé, resp. kanálové [6]. U deskových typů se teplo předává přes stěnu výměníku vedením, čímž je zamezeno míšení obou proudů a tím i přenos škodlivin, pachů apod. Při podnulových teplotách venkovního vzduchu zde ale hrozí zamrznutí kondenzátu vlhkosti z ochlazujícího se odpadního vzduchu, což mimo snížení účinnosti ZZT může vést až ke zničení celého výměníku. S využitím vysoce účinných protiproudých výměníků tento problém dnes narůstá na aktuálnosti. U jednotek s deskovým typem rekuperátoru se proto musí řešit i otázka protimrazové ochrany [31]. Pojmem „aktivní rekuperace“ se rozumí potřeba další energie pro uskutečnění procesu ZZT. Větrací jednotka je vybavena malým tepelným čerpadlem, které odebírá teplo odváděnému vzduchu a předeheřívá větrací vzduch, případně ohřívá vodu v integrovaném zásobníku tepla. Protože jsou oba proudy od sebe odděleny, nemusí se u nich řešit protimrazová ochrana. Výhodou jsou vyšší tepelné zisky, nevýhodou je vyšší pořizovací cena spolu s vyššími provozními náklady zařízení.

2.2 Protimrazová ochrana VZT zařízení

Pro správnou funkci rekuperačního výměníku je tedy zásadní zajistit, aby vstupní teplota čerstvého venkovního vzduchu do VZT jednotky byla nadnulová [23, 32, 33], což bývá řešeno většinou formou předeheřevu – např. elektrickým ohřívačem nebo externím kapalinovým okruhem. Možností je i použití vzduchového nebo kapalinového ZVT, který oproti předchozím variantám umožňuje i letní předchlazení větracího vzduchu. Jelikož předeheřev obecně snižuje úsporu energie dosaženou rekuperací tepla [17, 21, 32], je vhodné přívodní vzduch předeheřívat na nejnižší možnou úroveň, zajišťující odtok kondenzátu bez jeho namrznání – optimální je hranice kolem 0 °C. Možností protimrazové ochrany může být také vypínání větracího zařízení, obtok výměníku ZZT (příp. směšování proudů vzduchu) nebo změna otáček ventilátorů – tyto možnosti je ovšem potřeba u EPD brát pouze jako ochrannou funkci VZT jednotky, nikoliv jako provozní variantu. Další možností je použití speciálních membránových výměníků, umožňujících zpětný zisk vlhkosti. Tyto tzv. „entalpické“ výměníky jsou však investičně nákladnější a mají i omezenou životnost, takže se je nedoporučuje provozovat nepřetržitě po celý rok. To se řeší většinou jejich výměnou koncem zimního období za standardní výměník k VZT jednotce. Bonusem je zde vlhčení vzduchu, ale zase bez možnosti částečného chlazení v létě, jako je tomu u zemních výměníků.

3 Zemní výměníky tepla pro vzduchotechnické systémy budov

Díky akumulacním schopnostem zeminy dochází během kalendářního roku od jisté hloubky pod povrchem pouze k nepatrným změnám teploty [23, 26, 34–37]. V určitých fázích roku je tak teplota zeminy vyšší či nižší, než průměrná denní teplota okolního vzduchu. Této skutečnosti se běžně využívá v zemích s extrémními klimatickými podmínkami; od nepaměti ji též využívají tzv. „domy chráněné zemí“ [38], příp. sklepení různého charakteru (vinné sklípky atp.). Zemní výměníky tepla se v západní Evropě začaly objevovat již před více než 25 lety, hlavně v souvislosti s rostoucími cenami energie [39–41]; v ČR se ale začaly více rozšiřovat až v posledních cca deseti letech. Způsobil to zejména rozmach výstavby NED a EPD (např. [3, 42, 43]). Zde v zimním období slouží pro předehřev větracího vzduchu, v létě pro jeho předchlazení (jedná se o formu tzv. „nízkoenergetického chlazení“ [3, 21, 26]). Existují dva základní způsoby, jak teplo v zemině využít – přímo nebo nepřímo (tj. zprostředkovaně) [8, 9, 25, 40]. Způsob přímého využití energie zeminy reprezentují vzduchové typy zemních výměníků, nepřímého způsobu využívají typy kapalinové.

3.1 Vzduchový typ zemního výměníku tepla – základní koncepce, používané komponenty a uspořádání

Čerstvý venkovní vzduch zde prochází přímo samostatným potrubím, příp. potrubním systémem, uloženým v nezámrazné hloubce pod povrchem země. Vzduch si skrz výměník nasává sama větrací jednotka, proto se nemusí instalovat žádný přídavný ventilátor. Existuje nespočet řešení, jak vzduch do ZVT nasávat – např. nasávací (resp. kontrolní) šachtou se stříškou, samotnou nasávací stříškou, nasávací věží/sloupem, nasávacím boxem, příp. klasickou fasádní tvarovkou s protidešťovou žaluzií. Spolu se sáním do ZVT je povětšinou řešena i filtrace vzduchu, nejčastěji dvoustupňově. První, hrubý stupeň filtrace je řešen mřížkou z tahokovu nebo plastovou vstupní sítkou – následující druhý, jemnější stupeň tvoří výměnná filtrační tkanina třídy alespoň G4 [24]. Pro běžné rodinné domy se nejčastěji používají plastové kanalizační systémy s potrubím z neměkčeného PVC, polypropylenu nebo polyetylenu o jmenovitém průměru 150 ÷ 250 mm a celkové délce 25 až 45 m [13, 39, 41]. V podmínkách ČR je běžně zámrazná hloubka okolo 1 m, proto se doporučuje ZVT umístit alespoň do hloubky 1,5 ÷ 2 m. Zde se teplota pohybuje stabilně od 4 ÷ 8 °C v zimě po 10 ÷ 14 °C v létě [8], podle typu zeminy a charakteru povrchu. Potrubí může být vedeno přímo (příp. s mírnými zlomy) nebo může tvořit okružní trasu kolem objektu, případně zemní registr [41]. Kvůli vzájemnému negativnímu tepelnému ovlivnění by odstup mezi potrubími, resp. od okraje stavby měl být minimálně 1 m. Pro maximální využití potenciálu naakumulovaného tepla zeminy by měl být obsyp kolem potrubí výměníku tvořen vlhkou jílovitou zeminou [17, 25] nebo zeminou s podobnými vlastnostmi (tj. s vysokou tepelnou vodivostí a objemovou kapacitou). Z důvodu velkého podílu vzduchových mezer se nedoporučuje obsyp pískem nebo štěrkem.

Nevýhodou klasických kanalizačních trubek je jejich spojování pomocí hrdel s gumovým těsněním (max. délka trubky bývá většinou 5 m); zde hrozí potenciální problémy s těsností potrubní trasy, což je u vzduchových ZVT nepřijatelný stav. Dnes se však vyrábí i potrubí bez nutnosti spojování (např. ED *Geoflex* fy *Elektrodesign*) – jedná se o flexibilní plastové potrubí z PE o vnějším průměru 200 mm a celkové délce 35 m. Potrubí je tak vhodné i do míst např. s větší hladinou spodní vody. Při průchodu vzduchu zemním výměníkem v létě dochází kvůli nízké povrchové teplotě potrubí ke kondenzaci vlhkosti. Za určitých podmínek tak mohou u vzduchových výměníků vznikat problémy s hygienou (riziko tvorby plísní), což bývá hlavní otázka většiny potenciálních investorů. Z důvodu kondenzace musí být potrubí vedeno

s mírným spádem (cca 2 % [8]), zajišťujícím odtok kondenzátu do sběrné/kontrolní šachty, případně sifonu se zápachovou uzávěrkou. Řešením hygienické kvality se může stát použití speciálního potrubního systému *Awadukt Thermo* fy *Rehau* s antimikrobiální úpravou vnitřního povrchu – integrací iontů stříbra při výrobě [14]. Hrdlové spoje těchto trubek mají též speciální zámek, který minimalizuje pronikání nežádoucích škodlivin dovnitř potrubní trasy. Jelikož se jedná o speciální výrobek, certifikovaný výhradně pro aplikaci ve vzduchových ZVT, je tento produkt i finančně náročnější než obyčejné PVC kanalizační potrubí (vyráběné ve větších sériích). Potrubí zemního výměníku by však mělo být v každém případě přístupné pro pozdější kontrolu a hlavně čištění (ideálně alespoň 1 × ročně). Čištění se provádí nejčastěji protahováním čistícího přípravku (např. smotku z molitanu), namočeného v dezinfekčním roztoku, pomocí vestavěného lanka – pokud to potrubní trasa dovoluje. Zemní registr či okružní trasa kolem objektu je pak čištěna vysokotlakým proplachováním vodou nebo jednoduše zalitím výměníku vodou s příměsí dezinfekčního roztoku. Frekvenci a způsob čištění potrubí, příp. výměnu filtrů, určuje provozovatel (z čehož plynou i potenciální problémy při zanedbání péče o zařízení) a měly by odpovídat aktuálním podmínkám a stavu ZVT [25].

Je-li teplota zeminy nižší než teplota exteriérového vzduchu (nejčastěji po zimním provozu na začátku jara), je použití ZVT kontraproduktivní – obdobně je tomu v případě letního provozu, kdy je zemina teplejší než venkovní nasávaný vzduch (chladnější letní noci). V těchto případech je vhodnější vzduch nasávat přímo z fasády přes fasádní kus s protidešťovou žaluzií a tvarovku „T“ s klapkami, jež jsou nejčastěji ovládány servopohonem, příp. mechanicky. Přepínání sání fasáda/ZVT je nejčastěji řízeno automaticky, čidlem venkovní teploty [25]. Spodní interval přímého sání z fasády se většinou volí tak, aby teplota na vstupu do rekuperačního výměníku byla vždy nad bodem mrazu. Horní hranice se pak nastavuje vzhledem k riziku možného letního přehřívání budovy. Doporučený teplotní interval obtoku zemního výměníku tepla je v odborné literatuře udáván různě, např. $(0 \div 25)^\circ\text{C}$ dle [25], $(2 \div 20)^\circ\text{C}$ [7], $(15 \div 22)^\circ\text{C}$ [44] nebo také $(-4 \div 24)^\circ\text{C}$ [41]. Řízením chodu ZVT se tak optimalizuje energetická náročnost větrání (tj. využití potenciálu ZZT) a docílí se i částečné regenerace zeminy. Mnoho aplikací však pracuje i v kontinuálním režimu sání přes ZVT, tedy bez přepínání podle aktuálních klimatických podmínek.

3.2 Přímé a cirkulační provedení vzduchového ZVT

U přímého provedení ZVT větrací vzduch nejprve prochází přes sací element, umístěný mimo objekt – nejčastěji kontrolní šachtu, sací věž nebo box na zahradě. Následně prochází potrubím či potrubní sítí (registrem) a poté je nasáván do vzduchotechnické (větrací) jednotky [8]. Toto uspořádání je též nazýváno „klasický zemní výměník tepla“. Příklady některých konkrétních aplikací přímého typu ZVT u rodinných domů lze pro ČR nalézt např. v databázi pasivních domů [12]. Oproti přímému provedení umožňuje cirkulační varianta režim cirkulačního chlazení interiérového vzduchu, využívaný zejména v letním období. V běžné technické praxi se lze setkat se zkráceným označením „ZVT-c“. Ve výkopu jsou uloženy dvě potrubní trasy, tvořící uzavřenou cirkulační smyčku. Potrubí mohou být uložena nad sebou či vedle sebe – výkop může být tudíž i poloviční délky. Zásadní rozdíl oproti přímému typu je v tom, že se zde čerstvý větrací vzduch nasává vždy přes venkovní fasádní žaluzii [8]. Poté pokračuje buď přímo do vzduchotechnické jednotky, nebo do ZVT, a to dle aktuální venkovní teploty. Navíc je nutná pouze instalace speciální tvarovky s klapkami a sofistikovanější systém *MaR*. Pomocí zemního výměníku tak lze z interiéru odvádět část tepelné zátěže do zeminy; té navíc dodáváme tepelnou energii, kterou můžeme opět využít – dochází k „nucené regeneraci“ teplotního rozvrstvení zeminy. Pro dodržení minimálních hygienických podmínek větrání je v režimu cirkulačního chlazení čerstvý venkovní vzduch nasáván už jen v určitých pravidelných cyklech (např. 1 × 5 min/hod) [23–25, 33, 45].

Možná je též kombinace přímého a cirkulačního provedení, umožňující jak přímý průchod větracího vzduchu, tak i cirkulační chlazení vzduchu vnitřního. Tyto ZVT se obecně nazývají jako „hybridní“. Přepínání mezi oběma variantami může být automatické nebo manuální. Na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně je realizován cirkulační ZVT, jenž po modifikaci umožňuje provoz až 9 režimů (viz [46, 47]) – větrací vzduch může kromě cirkulační smyčky procházet buď jedním samostatným potrubím, a to ve dvou úrovních pod povrchem, nebo dvěma paralelními potrubími.

3.3 Kapalinové zemní výměníky

Kapalinový ZVT je tvořen uzavřeným potrubním okruhem tvořícím zemní plošný kolektor [9, 48] – obdobu horizontálních kolektorů pro tepelná čerpadla typu země/voda [26, 40]. V okruhu proudí nemrznoucí teplotnosná kapalina (solanka nebo speciální směs, např. propylen-glykol [25, 39]). V běžné technické praxi je tento typ nazýván též „solankový“ zemní výměník, příp. je používáno zkrácené označení „ZVT-k“. Nevýhodou je, že se použitá kapalina musí – kvůli postupné degradaci svých fyzikálních vlastností – jednou za $6 \div 8$ let kompletně vyměnit. Součástí okruhu jsou rovněž standardní topenářské prvky, jež zajišťují správnou funkci celého systému: čerpadlo, expanzní nádoba, zpětná klapka, pojistný, vypouštěcí/napouštěcí a odvzdušňovací ventil. Pro potrubní systém mohou být použity PE hadice, běžně používané na přípojky pitné vody (DN32) nebo investičně nákladnější hadice určené pro primární okruhy TC – s větší tepelnou vodivostí a větší odolností proti bodovému zatížení. Vedení o délce 100 m, uložené v hloubce 1,5 až 2 m pod terénem, pak postačí (dle typu zeminy) k předehřevu cca $200 \text{ m}^3/\text{h}$ nasávaného vzduchu [39]. Tato varianta umožňuje také cirkulační chlazení interního vzduchu v létě a nasávání vzduchu přes by-pass přímo do VZT jednotky (dle venkovní teploty). Teplo, resp. chlad je nasávanému vzduchu předáváno uvnitř budovy přes kompaktní výměník tepla typu kapalina/vzduch, umístěný nejčastěji na začátku vzduchotechnického řetězce – riziko možného mikrobiologického znečištění přiváděného vzduchu je proto menší než u vzduchové varianty. Z těchto důvodů se dnes investoři kloní stále častěji k instalaci kapalinových typů (nebo raději ZVT neinstalují vůbec). Některé aplikace kapalinových ZVT v ČR lze nalézt např. v elektronické databázi pasivních domů [12].

3.4 Návrh vzduchových zemních výměníků tepla

Vzhledem k omezenému potenciálu by se měl zemní výměník navrhovat podle konkrétní situace – hlavně s ohledem na zajištění funkce protimrazové ochrany výměníku ZZT a dobu svého využití. Existují určitá základní doporučení pro realizaci ZVT, např. [8, 9, 49], ta však nezajistí, že zemní výměník bude v reálném provozu zcela splňovat kladené požadavky. Pro návrh zemních výměníků rovněž existují zjednodušené softwarové nástroje (*PHLuft* nebo *PHPP* [21]), u nichž lze však měnit jen omezený počet vstupních parametrů. Dostatečně přesně a věrohodně můžeme daný projekt posoudit pouze s využitím vhodného výpočetního (simulačního) programu, jako je např. *TRNSYS* [50], *Energy+* [51] nebo *ESP-r* (např. [52]). K tomu je však potřeba mít k dispozici vstupní data co nejvíce odpovídající realitě. Jedním z hlavních parametrů vstupujících do simulace jsou vždy klimatická data, která můžeme získat z různých klimatických databází, např. *Meteonorm*, *Energy+* aj. [53] Přesnost simulace je dána také stupněm zjednodušení modelu (tj. zanedbáním vlivu nasávací šachty, odporu materiálu potrubí atp.). Reálný provoz ovlivňuje i uživatel, který vždy zařízení nemusí provozovat dle schématu použitého v energetické simulaci. V běžné praxi se vypočtená délka ZVT pro jistotu nadhodnotí, čímž se předejde „vymrznutí“ okolní zeminy a tím i postupné ztrátě výkonu výměníku v čase. Tato cesta však vždy znamená navýšení investičních nákladů (výkopové práce, delší potrubí atp.). Celková energetická výtěžnost (resp. výkon) zařízení se tím podstatně nezvýší, jelikož nárůst výstupní teploty vzduchu s přibývajícím délkou výrazně klesá. Při návrhu se vychází hlavně z parametrů zimního provozu – požadavkem je dodržení minimální

teploty vzduchu před vstupem do výměníku pro ZZT nebo požadovaná účinnost zemního výměníku [13, 49]. Rychlost proudění vzduchu uvnitř trubky by se měla pohybovat maximálně v rozmezí 1,5 až 2 m/s – tím se i značně zredukuje tlaková ztráta, resp. spotřeba energie pro pohon sacího ventilátoru [13]. Zvolenému objemovému průtoku pak odpovídá určitý průměr potrubí. Preferován je turbulentní režim proudění, zajišťující intenzivnější přestup tepla. Výhodné může být rozdělení požadovaného průtoku do více kratších paralelních potrubí o menším průměru – tzv. „registru“ [17, 49]. Při návrhu ZVT bychom vždy měli najít kompromis mezi optimálním poměrem tlakové ztráty, intenzitou přestupu tepla, rychlostí proudícího vzduchu a také investičními náklady [54] – k tomu se navíc musí optimalizovaný zemní výměník vejít na konkrétní pozemek.

3.5 Teplota zeminy

Znalost teplotního rozvrstvení pod povrchem země je pro správný návrh zemního výměníku zásadní. Jako ostatně u všech tepelných výměníků, je výkon ZVT podstatně závislý nejen na velikosti zařízení (tj. teplosměnné ploše), ale zejména na teplotách teplé a studené strany výměníku. V tomto případě se jedná o teploty zeminy v blízkém okolí potrubí a teplotu vzduchu vstupujícího do zemního výměníku (což je teplota venkovního vzduchu). Přesné teplotní rozvrstvení lze získat řešením parciální diferenciální rovnice pro trojrozměrný přenos tepla zeminou, kvůli časové náročnosti výpočtu se však běžně volí určitá zjednodušení. Při úvaze, že teplota zemského povrchu je rovna teplotě okolního vzduchu [55], lze analytickým řešením 1D neustáleného vedení tepla v polonekonečném homogenním tělese [50, 56] získat rovnici pro výpočet teplot zeminy v dané hloubce pod povrchem (nazývanou též „Kasuda formula“):

$$T_{gr}(z, \tau) = T_{ma} - A_{at} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot a_{gr}}}} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(\tau - \tau_{min} - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot a_{gr}}} \right) \right] \quad (1)$$

kde: A_{at} – roční amplituda průměrných denních teplot vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], a_{gr} – průměrná roční (zdánlivá) teplotní vodivost neporušené zeminy [$\text{m}^2 \cdot \text{den}^{-1}$], T_{gr} – teplota zeminy [$^{\circ}\text{C}$] v dané hloubce (z) [m] a čase (τ) [dny], T_{ma} – celoroční průměrná teplota venkovního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], τ_{min} – čas, kdy dochází k nejnižší (průměrné) teplotě na povrchu země (tj. od počátku kalendářního roku) [dny].

Této rovnici se při výpočtu teplotního rozvrstvení zeminy běžně využívá – je také implementována ve výpočetním modulu Type 77: „Simple Ground Temperature Profile“ simulačního programu TRNSYS [50].

4 Kvalita vnitřního prostředí budov

V dnešní moderní době lidé tráví v budovách (tj. v obytném a pracovním prostředí) podstatnou část svého aktivního života – uvádí se až 90 % denního času [10, 57]. Do popředí proto vystupuje význam působení vnitřního prostředí (tzv. mikroklimatu) budov na zdraví a psychiku člověka. Vnitřní prostředí můžeme rozložit na několik významných složek: tepelně-vlhkostní, oděrové, aerosolové, ionizační, toxické, mikrobiální [24, 45, 58]. Tyto pak spolu určují kvalitu vnitřního ovzduší (anglicky: IAQ, „Indoor Air Quality“ [59–61]). Hlavními složkami však jsou teplota a vlhkost [45], jež působí nejen na člověka, ale i na zvířata, technologie, potraviny a jiné materiály nacházející se uvnitř budovy [45, 62]. V NED a EPD je, díky nucené ventilaci, oproti stávající výstavbě zajištěna zpravidla vyšší kvalita vnitřního prostředí [4, 18, 63]. Tento fakt bývá jedním z argumentů ospravedlňujících vyšší pořizovací náklady na stavbu energeticky úsporného domu. Výsledky monitoringu kvality vnitřního mikroklimatu v bytech a bytových domech v podmínkách ČR jsou uvedeny např. v literatuře [10], [11] nebo [64].

Výše zmíněné hlavní složky vnitřního prostředí budov souvisí s existujícím vzduchovým polem, můžeme je proto výrazně ovlivnit způsobem větrání – zejména kontrolovaným (tj. nuceným). Přívod čerstvého venkovního vzduchu je nezbytný jednak k zajištění dodávky kyslíku potřebného pro dýchání člověka, dnes ale zejména ke snížení koncentrace nežádoucích škodlivin kontinuálně vznikajících v interiéru (hlavně vodní pára a CO₂) [10, 45, 58]. Přiváděná dávka vzduchu se proto značně navyšuje – jako přijatelné množství se doporučuje hodnota 25 m³/hod na 1 osobu [5, 24, 45], jež je pro pobytové místnosti stanovena *Vyhláškou o technických požadavcích na stavby č. 268/2009 Sb.* Podle ní musí být zajištěna též minimální intenzita větrání 0,5 h⁻¹ (tzn. kompletní výměna vzduchu 1× za 2 hod.). Větrací zařízení se musí, bez zásahů uživatelů, postarat o trvalou hygienicky nutnou výměnu vzduchu [5, 24] – tím se předejde hlavně škodám v důsledku vlhkosti, způsobené běžným užíváním obydlí (vaření, sprchování, sušení prádla, ...). Přitom se odvádí též všechny další škodliviny obsažené ve vzduchu – jako je prach, CO₂, různé oděry, těkavé organické látky (VOC) aj.



Obr. 4.1: Zanesený filtr cirkulačního vzduchu v teplotovzdušné VZT jednotce (foto: autor)



Obr. 4.2: Znečištěné lamely deskového rekuperačního výměníku pro ZZT (foto: autor)

4.1 Mikrobiální mikroklima a vzduchotechnika

Přechodem od přirozeného větrání k nucenému se dnes VZT systémy začínají prosazovat i v nových obytných budovách. Důležitou složkou vnitřního prostředí se potom stává tzv. *mikrobiální mikroklima*, jež tvoří zejména bioaerosoly (tj. bakterie, viry, plísňe a jejich spory) v pevné či kapalně formě [10, 45, 57, 59, 60, 65]. Původcem zhoršení mikrobiálního mikroklimatu se paradoxně mohou stát právě zařízení na úpravu vzduchu a jejich příslušenství [66] – VZT potrubí, filtry (**obr. 4.1**), deskové výměníky (**obr. 4.2**), zvlhčovače vzduchu apod. Příčinou je zpravidla špatný návrh spolu s nedostatečnou nebo nevhodnou údržbou zařízení. Zejména zkondenzovaná vlhkost vytváří spolu s nahromaděnými nečistotami vhodné podmínky pro vznik a růst nežádoucích mikroorganismů. Kvalita přiváděného vzduchu (IAQ) se na rozdíl třeba od pitné vody zpravidla pravidelně nekontroluje. Nevhodné mikrobiální mikroklima se tak může stát jednou z příčin tzv. „syndromu nemocných budov“ („*Sick Building Syndrome*“, SBS) [10, 23, 45, 66]. Důležitým kritériem se stává únosná koncentrace mikrobů a jiných polutantů – viz *Vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb.* [67], která stanovuje hygienické limity v pobytových místnostech. Stanovení koncentrace se provádí podle metodiky [68] – aktivním nasáváním přesného množství vzduchu pomocí tzv. *aeroskopu* se zachytem mikroorganismů na Petriho misce s živnou (agarovou) půdou. Po následné kultivaci v termostatu při konstantní teplotě (např. 37 °C) a v jasně definovaném časovém intervalu se pak počet narostlých kolonií přepočte na 1 m³ vzduchu prosátého vzorkovačem. Dle zmíněné vyhlášky jsou maximální povolené koncentrace určeny takto: 500 kolonie tvoří-

cích jednotek (KTJ, anglicky: CFU „Colony Forming Unit“) na 1 m³ nasátého vzduchu pro bakterie a 500 KTJ·m⁻³ pro plísň.

Při správném návrhu a údržbě systému řízeného větrání je v budově možné udržet vhodné mikrobiální mikroklima. Ve studii [69] bylo zjištěno, že u budovy větrané přirozeným způsobem je větší variabilita v počtu mikroorganismů než u klimatizované. Přiváděný vzduch je zde – díky filtraci na vstupu – zbaven prachu (tj. hlavního nosiče mikrobů) a dalších nečistot. Následkem toho dochází i k menšímu znečištění VZT potrubí, které je (po filtrech a zvlhčovačích) dalším rizikovým místem systému [70]. Nejčastěji detekované bakterie a plísň v přiváděném vzduchu jsou uvedeny například v práci [71]. Zde je také uvedeno, že ve vzduchotechnice je hlavním faktorem růstu bakterií a kvasinek teplota vzduchu – naopak při růstu plísní je hlavním faktorem vlhkost. Rychlost proudění má zase vliv na distribuci prachu a nečistot v potrubí, které jsou významným nosičem zmíněných mikroorganismů [72]. Metabolismus mikroorganismů vylučuje mikrobiální těkavé organické látky („Microbial Volatile Organic Compounds“, MVOC) [73], které mohou být též vhodným indikátorem jejich přítomnosti.

4.2 Možné mikrobiologické riziko vzduchových ZVT

Vzduchové zemní výměníky tepla jsou jedním ze vzduchotechnických zařízení, u nichž je riziko mikrobiologického znečištění nutno předpokládat. Teplotu povrchu potrubí nemůžeme nikterak ovlivnit a zabránit tak nežádoucí kondenzaci vzdušné vlhkosti. Numerické simulace provozu a některá měření z reálných aplikací kondenzaci potvrzují ([17, 32, 74, 75]). V souvislosti s rostoucím rozšířením teplovzdušných vytápěcích systémů pro energeticky úsporné domy roste i počet realizací zemních výměníků (a to nejen v ČR), proto byla provedena řešerše mikrobiologické problematiky vzduchových typů ZVT:

- V rámci ČR se tématu mikrobiologického znečištění ZVT dosud nikdo širěji nevěnoval, resp. žádné relevantní výsledky nebyly publikovány. Ing. Pavel Kopecký, Ph.D. z ČVUT Praha sice v minulosti prováděl odběry mikrobiologických vzorků ze dvou vzduchových zemních výměníků [76, 77], ale konkrétní data nebyla prozatím zveřejněna – hlavně z důvodu nereprezentativnosti statistického vzorku (zde pouze 2 odběry) a protichůdných výsledků. Další odběry již nebyly realizovány.
- V zahraničních zdrojích byly nalezeny pouze výsledky jedné rozsáhlejší studie ze Švýcarska, která se přímo věnuje mikrobiologickému hledisku vzduchových ZVT ([78, 79], souhrnně [80]). Studie sledovala 12 zemních výměníků tepla různých konstrukcí a materiálů, přičemž znečištění přiváděného vzduchu zde nebylo zjištěno. Vystupující vzduch byl naopak zpravidla méně znečištěn než vzduch nasávaný do potrubního systému. Výskyt choroboplodných zárodků uvnitř domu byl tak vůči koncentraci ve venkovním ovzduší nižší. Odběry byly prováděny pomocí aktivního nasávání štěrbinovým vzorkovačem (Casella/UK – obdoba zmíněného aeroskopu) se záchytem na Petriho misce. Jedná se ovšem o práci téměř 20 let starou (odběry realizovány v lednu ÷ říjnu 1996) v podmínkách zcela odlišných od ČR, přičemž se na studii odkazuje i většina příspěvků, kde je problematika hygieny vzduchových ZVT zmíněna (např. [17, 81]).
- V další publikaci je monitorována kvalita vzduchu v interiéru čtyř pasivních domů se vzduchovým ZVT v německém Norimberku [82]. Krátce je zde pojednáno také o obsahu plísní ve vnitřním ovzduší. Délka monitoringu činila cca 2 roky. Opět se zde potvrdilo snížení počtu mikroorganismů vůči stavu v exteriéru (při výměně filtrů a čištění potrubí ZVT 2× ročně). Uvedeno je i srovnání s klasickým domem s běžným větráním okny – s výsledkem, že větrací zařízení negativně neovlivňují kvalitu přiváděného vzduchu. Bohužel chybí další detailnější informace, včetně metodiky odběrů.

- Zdroj [83] krátce zmiňuje vzduchový ZVT pro „nulovou“ budovu na Tribhuvan University v Nepálském Kathmandu – jedná se však o výrazně odlišné prostředí oproti střední Evropě. Byly sledovány koncentrace bakterií a plísni ve třech místech (vstup a výstup ZVT, místnost) a opět i zde se díky filtraci vzduchu koncentrace znečištění postupně snižovala. Podrobnější informace k odběrům též nejsou v práci uvedeny.
- Poslední dohledaná práce [84] naopak uvádí, že ve dvou ze tří sledovaných švédských škol, vybavených vzduchovým ZVT, byla pozorována tvorba plísni. Opět i zde chybí podrobnější informace – není ani uvedeno, jestli byly na vstupu do zemního výměníku instalovány filtry atmosférického prachu a zda někdy došlo k čištění povrchu potrubí či dalších částí vzduchotechnického systému.

Omezené množství dostupných studií aktuálně nedovoluje jasně říci, zda vzduchové ZVT jsou z pohledu mikrobiologické kvality přiváděného vzduchu zcela nezávadné. Vysoká relativní vlhkost uvnitř potrubí, spolu se zaneseným a usazeným organickým materiálem, zvyšuje riziko tvorby biofilmu na stěnách potrubí – zejména plísni. V podmínkách ČR doposud nebyla publikována žádná obdobná práce, která by závěry ze zahraničních realizací ověřila. Proto byl v rámci řešení problematiky zemních výměníků autorem podán a následně přijat juniorský projekt VUT v Brně *FSI-J-12-24 „Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy“*. Výsledky monitoringu tak představují relevantní údaje, získané k této problematice v rámci ČR.

5 Zjednodušený model ZVT

Jelikož vyvinuté modely dostupné pro řešení problematiky zemních výměníků neumožňují vždy univerzální řešení výpočtu – chybí např. návaznost na další systémy (rekuperaci tepla [85], resp. na budovu samotnou) nebo řešení vlhkostní bilance v zemním výměníku tepla – byl pro vyhodnocení vlivu zemního výměníku tepla na provoz větrací jednotky s rekuperací tepla v sw prostředí TRNSYS 16.1 (tzn. *TRaNsient SYstem Simulation* [50]) vytvořen zjednodušený model ZVT. Navržený model vychází převážně z dat nízkoenergetického RD ve městě Studénka (prezentovaného např. v [32, 75, 86]) a umožňuje nastavovat různé parametry – geometrii ZVT, materiál potrubí, typ zeminy atp. Vstupní klimatická data mohou být primárně volena ze dvou základních databází, nebo je možné použít data uživatelsky definovaná (naměřená).

Při řešení bylo uvažováno několik zjednodušujících předpokladů – zejména byl použit zjednodušený model teplotního rozvrstvení zemského polomasivu (dle **rovnice (1)**). Předpokládá se, že v důsledku provozu ZVT není teplotní rozvrstvení příliš ovlivněno a závisí tak pouze na fyzikálních vlastnostech zeminy a venkovních teplotách vzduchu. Řeší se pouze přímá část výměníku, vliv nasávací šachty a svislých částí potrubí je zanedbán. Výstupní teplota vzduchu ze ZVT vychází z řešení rovnice přenosu tepla při vnitřním proudění vzduchu v potrubí s konstantní teplotou stěny [87]. Teplota vnitřního povrchu ZVT se uvažuje rovna aktuální teplotě zeminy v dané hloubce uložení pod povrchem. Tepelný odpor stěny je zohledněn odpovídajícím snížením hodnoty součinitele přestupu tepla z potrubí do vzduchu. Je také zanedbán vliv kondenzace vzdušné vlhkosti na teplotu povrchu uvnitř ZVT a vliv kondenzace v rekuperačním výměníku jednotky na účinnost ZZT. Fyzikální parametry zeminy a vzduchu se v průběhu simulace uvažují konstantní.

5.1 Výpočetní postup

Hlavními výstupy energetické simulace jsou teplota a měrná vlhkost vzduchu vystupujícího ze zemního výměníku. Výpočet výstupní teploty ze ZVT vychází – s uvažováním určitých zjed-

nodušujících předpokladů – z řešení přenosu tepla při vnitřním proudění vzduchu v kruhovém potrubí s konstantní teplotou stěny:

$$T_{a,OUT}(\tau) = T_{gr} - (T_{gr} - T_{a,E}) \cdot \exp\left(-\frac{S_{pipe}}{c_{p,a}(\bar{T}_{a,E})} \cdot \frac{\bar{\alpha}_{mod}}{\dot{m}_{a,pipe}}\right) \quad (2)$$

kde: T_{gr} – teplota stěny potrubí v dané hloubce uložení pod povrchem [$^{\circ}\text{C}$], $T_{a,E}$ – teplota vzduchu na vstupu do zemního výměníku tepla [$^{\circ}\text{C}$], S_{pipe} – vnitřní (teplosměnný) povrch zemního výměníku [m^2], $\dot{m}_{a,pipe}$ – hmotnostní průtok vzduchu (jednou větví ZVT) [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$], $c_{p,a}$ – měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] při střední teplotě $T_{a,E}$, $\bar{\alpha}_{mod}$ – tzv. „modifikovaný“ (resp. celkový) součinitel přestupu tepla zemina–vzduch [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] [17, 49].

Obdobně je tomu při výpočtu hustoty vodní páry ve vzduchu vystupujícím z potrubní trasy výměníku, kdy po určitých zjednodušeních můžeme říci, že množství zkondenzované vody je ovlivněno pouze transportem vodní páry z objemu procházejícího vzduchu ke stěně potrubí. Předpokládá se, že všechna zkondenzovaná vlhkost stéká na spodek potrubí a je odváděna do revizní šachty, odkud je čerpána mimo ZVT; zpětná evaporace zkondenzované vlhkosti není uvažována. Výstupní hustota vodních par se stanoví podle rovnice (3):

$$\bar{\rho}_{v,OUT}(\tau) = \rho_v''(T_w) + (\rho_{v,IN} - \rho_v''(T_w)) \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\beta}_v \cdot S_{pipe}}{\dot{V}_{a,pipe}}\right) \quad (3)$$

kde: $\rho_v''(T_w)$ – parciální hustota páry na stěně potrubí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], $\rho_{v,IN}$ – střední parciální hustota vodní páry na vstupu do ZVT [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], $\bar{\beta}_v$ – střední součinitel přestupu páry na povrchu s kondenzací [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], $\dot{V}_{a,pipe}$ – objemový průtok vzduchu ZVT (resp. jednou potrubní větví) [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$].

Známe-li výstupní teplotu vzduchu a hustotu vodní páry v něm obsažené, můžeme pomocí standardních psychrometrických výpočtů vypočítat měrnou vlhkost a měrnou entalpii vzduchu (vstupní hodnoty vypočteme z meteorologických dat). Poté se vypočte topný/chladicí výkon zařízení a celkové množství získaného tepla/chladu. Výpočtový model zjednodušeně řeší i kondenzaci vlhkosti z odváděného vzduchu v deskovém rekuperačním výměníku. Z výsledků uvedených v diplomové práci autora [32, 75] je patrné, že ke kondenzaci při ZZT dochází během téměř 50 % času – přičemž toto nastává převážně v zimním období. Protimrazová ochrana výměníku ZZT je proto v zimních měsících velmi potřebná.

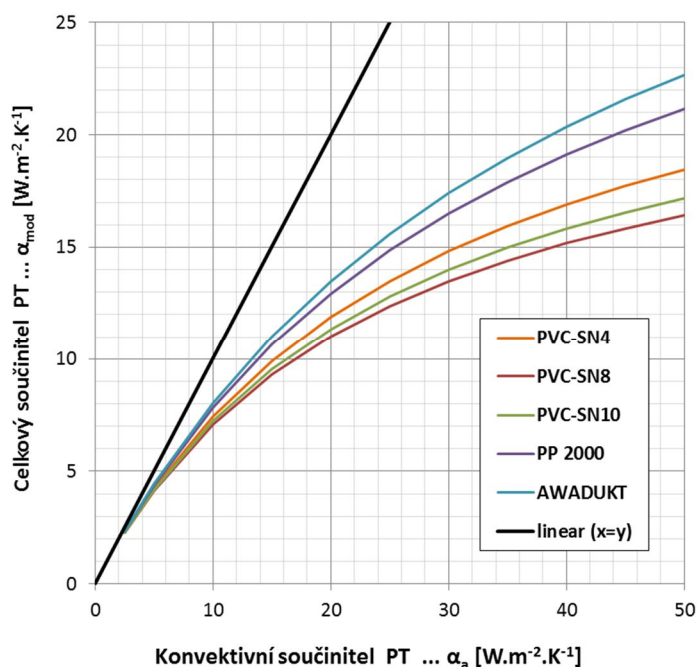
5.2 Vliv materiálu potrubí

Energetický přínos ZVT závisí na dvou skupinách parametrů. Jednak na těch, které ovlivnit nemůžeme – zde patří např. klimatická oblast, nadmořská výška, dispozice pozemku, typ okolní zeminy, hladina spodní vody atp. Při realizaci zemního výměníku ovšem existuje i řada parametrů, jež ovlivnit můžeme. Jedná se zejména o hloubku uložení, výslednou geometrii a typ ZVT (tj. klasický, cirkulační nebo kapalinový), celkovou délku výměníku, průměr potrubí – resp. rychlost proudění vzduchu uvnitř potrubí – a také použitý materiál, tedy potrubní systém. Vliv posledně jmenovaného parametru lze teoreticky analyzovat podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti materiálu trubky a tloušťky stěny.

Rozbor byl proveden pro pět typů plnostěnného plastového potrubí dimenze DN200, jež jsou nejčastěji používána pro zemní výměníky rodinných domů a aplikace středního rozsahu. Jedná se o „klasický“ plastový kanalizační systém z PVC (koextrudovaného) s únosností SN4 nebo SN8, plnostěnné PVC s SN10, kanalizační systém z polypropylénu (PP) a plnostěnný potrubní systém určený speciálně pro zemní výměníky tepla – **AWADUKT Thermo®** německé společnosti REHAU. Stěna potrubí představuje vždy určitý tepelný odpor, který snižuje

tepelný tok z/do zeminy. Tento jev lze, např. podle [17, 49], zohlednit zavedením tzv. „modifikovaného“ součinitele přestupu tepla *zemina–vzduch* ($\bar{\alpha}_{mod}$, viz **rov. (6)**). Jedná se o řešení sériového zapojení dvou tepelných odporů, přičemž tepelný odpor stěny potrubí je převeden na ekvivalentní konvektivní součinitel přestupu tepla α_p (**rov. (5)**). Namísto prostého součinitele přestupu tepla se pak v rovnici přenosu tepla v ZVT použije zmíněný modifikovaný součinitel přestupu tepla.

Závislost celkového součinitele přestupu tepla (SPT) na konvektivním SPT $\bar{\alpha}_a$ je pro jednotlivé typy plnostěnných potrubních systémů graficky znázorněna na **obr. 5.1**. Ze zobrazených průběhů je patrné, že při nízkých průtocích vzduchu v potrubí (a tedy i nízké hodnotě součinitele $\bar{\alpha}_a$) se celkový součinitel přestupu tepla pro jednotlivé typy potrubí liší pouze málo. Rozdíly mezi materiály PVC a PP se výrazněji projevují až cca od hodnoty $\bar{\alpha}_a = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; pod touto hodnotou činí relativní rozdíly max. 10 %. U zemních výměníků jsou ale vyšší rychlosti proudění nežádoucí – pro optimalizaci tlakových ztrát by rychlost vzduchu v potrubí neměla překročit 2÷3 m/s [13], což odpovídá právě hodnotám $\bar{\alpha}_a$ kolem $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Za těchto podmínek nehraje volba materiálu potrubí významnou roli.



$$\bar{\alpha}_a = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda_a}{D_{pipe}} \quad (4)$$

$$\alpha_p = \frac{2 \cdot \lambda_{pipe}}{D_{pipe} \cdot \ln \frac{D_N}{D_{pipe}}} \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_{mod} = \frac{\bar{\alpha}_a \cdot \alpha_p}{\bar{\alpha}_a + \alpha_p} \quad (6)$$

Obr. 5.1: Závislost celkového součinitele přestupu tepla zemina-vzduch na konvektivním součiniteli přestupu tepla pro vybrané typy potrubí DN200

S ohledem na uvedený rozbor vlivu potrubního materiálu byl pro experimentální vzduchový zemní výměník na VUT v Brně použit potrubní systém KG-Systém (PVC)® SN4. V době realizace (1. pololetí 2011) byla měrná cena 332,90 Kč/bm, potrubní systém Awadukt Thermo byl tak o cca 112 % dražší. Vzhledem k poměrně vysokým pořizovacím nákladům na celý ZVT [32, 75, 86] je PVC potrubí v současnosti používáno nejčastěji – v běžné praxi, alespoň co se týče ČR, hraje totiž významnou roli snaha investorů o minimalizaci investičních nákladů. Potrubí dle výrobce zajišťuje těsnost spojů při deformaci nebo vychýlení trubky, což pro daný účel zcela postačuje. Jelikož se však jedná o běžné kanalizační potrubí, je otázkou, zda hrdlové spoje s jednoduchým pryžovým těsněním jsou schopny dlouhodobě zajistit dokonalou těsnost vůči pronikání vody či nežádoucích škodlivin. Z tohoto důvodu většina realizačních firem doporučuje použití certifikovaného potrubí REHAU Awadukt Thermo [13, 44], které ovšem kvůli vysoké ceně vychází v poměru cena/výkon pro plnostěnná potrubí nejhůře [88]. Dnes se také pomalu začíná prosazovat flexibilní potrubní systém ED Geoflex (takto se reali-

zuje cca 30 ZVT/rok [89]). Tento systém je, díky malosériové výrobě, opět podstatně dražší než velkosériově produkované PVC a PP kanalizační trubky (oproti Awaduktu Thermo dokonce o cca 43 %). Nelze ho ovšem kvůli tomu zcela ztracovat – jedná se totiž o potrubí beze spojů, proto ho lze s výhodou použít i do lokalit s vysokou hladinou spodní vody, kde běžné kanalizační potrubí může mít problém s průsakem vody [90]. Záleží vždy na investorevi, jak hodnotí potenciální rizika a kolik je ochoten do svého zemního výměníku investovat.

5.3 Meteorologická data – klimatické databáze

Přesnost výsledků energetické simulace závisí jednak na stupni zjednodušení, ale hlavně na přesnosti vstupních dat, tj. okrajových podmínkách. Jedním z hlavních vstupních parametrů jsou klimatická data, jež jsou v průběhu let značně variabilní. Naměřená data z konkrétní lokality – hlavně teplota a vlhkost venkovního vzduchu – v daném konkrétním roce nejsou většinou k dispozici; pokud ano, nemusí být v odpovídající kvalitě a kvantitě. Pro několik málo meteorologických stanic v ČR jsou volně k dispozici některá průměrná měsíční [91], resp. aktuální on-line denní klimatická data [92]. Pro energetickou simulaci je však tento krok příliš dlouhý, ideální je mít data s hodinovým časovým krokem. Při energetických simulacích se proto nejčastěji využívá různých klimatických databází, např. *METEONORM* [93] či *ENERGY+* [94]. Jedná se o průměrné hodnoty za různě dlouhá časová období, modifikované tak, aby postihly i možné klimatické extrémy. Otázkou je, nakolik tato data navzájem korespondují a jak velký vliv budou mít případné rozdíly na celkové výsledky simulace. Proto byly provedeny energetické simulace provozu již zmíněného reálného zařízení ve městě Studénka (ve vzdálenosti cca 15 km od města Ostrava). Pro výpočet bylo využito dat obou klimatických databází (pro lokalitu Ostrava) a také dat volně přístupných na internetové stránce Českého hydrometeorologického ústavu pro nejbližší meteorologickou stanici Mošnov (nacházející se asi 5 km od zkoumaného objektu) [91].

5.4 Výsledky energetických simulací

Dále jsou uvedeny některé výsledky energetických simulací, provedených s využitím níže uvedeného zjednodušeného modelu. Simulován byl přerušovaný větrací režim s odlišným týdenním a víkendovým profilem [32, 75], vycházející z výsledků monitorování reálného provozu některých výměníků (např. [18, 95]). V souladu se skutečností byla uvažována jílovitá zemina s teplotní vodivostí $a_{gr} = 9,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Hlavními vstupními veličinami simulace byla teplota (suchého teploměru) a relativní vlhkost venkovního vzduchu, které spoluurčují tepelný výkon ZVT i případnou kondenzaci na povrchu potrubí v letním období. Venkovní teplota mimoto ovlivňuje i teplotní rozvrstvení zeminy (**rovnice (1)**) a tím i výstupní teplotu vzduchu ze ZVT a možnou dobu jeho využití. Tu však spoluurčuje i teplotní interval přímého nasávání venkovního vzduchu. Na základě rešerše byly zvoleny tři varianty přímého sání z fasády – **varianta A**: $<-4 \text{ až } 24> \text{ }^\circ\text{C}$, **varianta B**: $<0 \text{ až } 25> \text{ }^\circ\text{C}$, **varianta C**: $<2 \text{ až } 20> \text{ }^\circ\text{C}$. Např. pro Ostravu-Porubu se rozdíly ve využití zemního výměníku mezi jednotlivými variantami pohybují až kolem 25 %, tzn. asi 2200 provozních hodin (*varianta C* vs. *varianta A*). Při kombinaci zimního nastavení podle *varianty A* a letního nastavení podle *varianty B* vychází celkové využití zemního výměníku (tzn. zimní i letní) cca 21 % celoroční doby provozu. Pro další simulace byla již použita pouze standardní *varianta* nastavení přepínacích teplot $<0 \text{ až } 25> \text{ }^\circ\text{C}$ (*varianta B*).

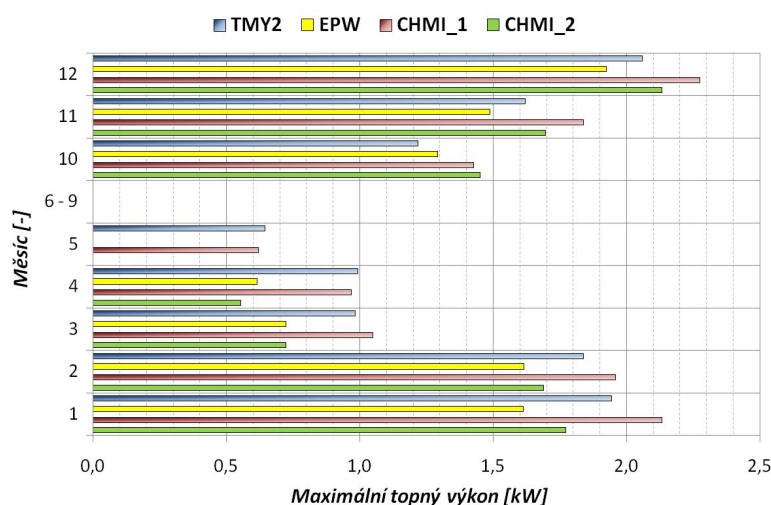
Pro posouzení vlivu klimatických dat byly řešeny následující čtyři varianty:

- 1) **TMY2** klimatická data z databáze METEONORM (Ostrava-Poruba) použita jak pro vstupní parametry vzduchu, tak pro výpočet teploty zeminy ($A_{at} = 10,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ma} = 8,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_{min} = 17 \text{ dní}$);

- 2) **EPW** dtto pro databázi ENERGY+ (Ostrava, $A_{at} = 10,0\text{ °C}$, $T_{ma} = 8,5\text{ °C}$, $\tau_{min} = 16$ dní);
- 3) **CHMI_1** vstupní parametry vzduchu z databáze METEONORM (Ostrava-Poruba), teplota zeminy vypočtena podle měsíčních dat meteostanice Mošnov ($A_{at} = 10,4\text{ °C}$, $T_{ma} = 9,2\text{ °C}$, $\tau_{min} = 31$ dní);
- 4) **CHMI_2** analogicky se vstupními parametry vzduchu z databáze ENERGY+ (Ostrava).

➤ Zimní přehřev

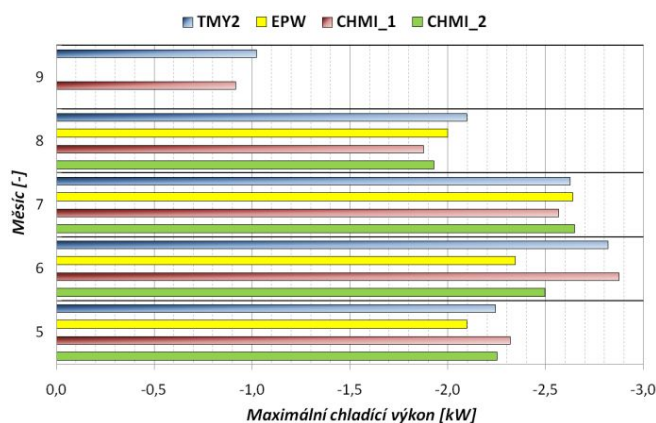
Maximální měsíční hodnoty topného výkonu zemního výměníku tepla jsou pro jednotlivé řešené varianty graficky uvedeny na **obr. 5.2**. Skutečný výkon je však vždy nutno předpokládat o něco nižší, v rozmezí cca $1,0 \div 1,5\text{ kW}$ [53], a to hlavně z důvodu zanedbání vlivu provozu výměníku na teplotu okolní zeminy. V reálném provozu může skutečný výkon zařízení výraznou měrou ovlivnit i vlhkost zeminy (přírozená nebo umělá), příp. další parametry, jako jsou okrajové podmínky na povrchu země (např. solární záření, rychlost větru, či typ povrchu – asfaltový povrch, dlážděný chodník, travní porost, ...). Z **obr. 5.10** je patrné, že nejvyššího topného výkonu dosahuje ZVT ve variantě „**CHMI_1**“, což je zřejmě zapříčiněno vyšší hodnotou časového posunu teplotního průběhu v zemině. To vede ke zvýšení aktuálního teplotního spádu mezi proudícím vzduchem a okolní zeminou a logicky též k navýšení aktuálního výkonu. Z porovnání variant „**TMY2**“, „**CHMI_1**“ resp. „**EPW**“, „**CHMI_2**“ vyplývá, jaký vliv má výpočet teploty zeminy z odlišných klimatických dat. Největší rozdíly nastávají v nejhladnějším období roku, tj. říjen–únor, v ostatních měsících jsou rozdíly zanedbatelné. Sumární hodnoty jsou uvedeny v **tab. 5.1** a **5.2**. Je rovněž patrné, že v období červen–září není již ZVT využíván pro přehřev, ale spíše pro předchlazení přiváděného vzduchu.



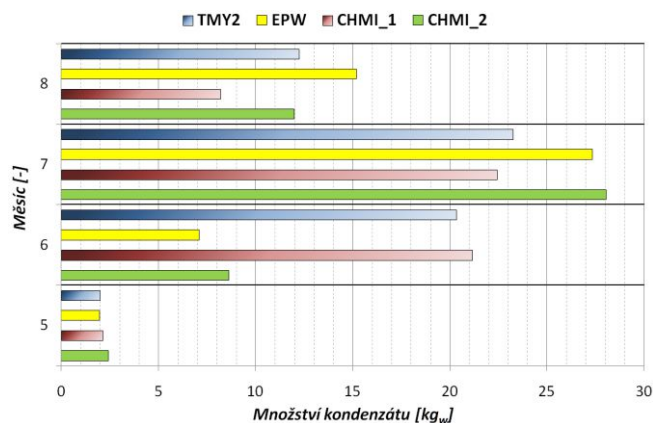
Obr. 5.2: Topný výkon ZVT v jednotlivých variantách energetické simulace – maximální měsíční hodnoty [53]

➤ Letní předchlazení

Maximální měsíční hodnoty chladicího výkonu zařízení jsou pro jednotlivé řešené varianty graficky uvedeny na **obr. 5.3**. Opět s přihlédnutím k zjednodušenému výpočtu teplotního rozvrstvení zeminy se dá skutečný chladicí výkon předpokládat v rozmezí $1,5 \div 2,0\text{ kW}$ [53]. Oproti zimnímu provozu ZVT jsou rozdíly výkonů mezi variantami „**TMY2**“, „**CHMI_1**“ resp. „**EPW**“, „**CHMI_2**“ jen minimální – významnější odchylky jsou však patrné mezi variantami „**TMY2**“ a „**EPW**“ pro měsíce červen a září (tj. pro databázová *meteodata*). Pro jednotlivé varianty se výrazněji liší též měsíční množství vzniklého kondenzátu (**obr. 5.4**) – již malé rozdíly teploty zeminy způsobí poměrně velkou změnu kondenzace vzdušné vlhkosti. Podstatný rozdíl nastává v důsledku odlišných hodinových dat i mezi variantami **TMY2** a **EPW** – měsíc červen, **obr. 5.4**.



Obr. 5.3: Chladicí výkon pro jednotlivé varianty simulace – maximální měsíční hodnoty [53]



Obr. 5.4: Měsíční množství zkondenzované vody ve vzduchovém zeminím výměníku [53]

➤ Celoroční bilance

Z hlediska celoroční bilance jsou nejpodstatnější tři veličiny: celková doba využití zeminího výměníku v zimním/letním období, celkové množství získané/odevzané energie a celkové množství vysrážené vody. Ty jsou pro jednotlivé varianty přehledně vyčísleny v **tab. 5.1**. Vzájemné porovnání některých variant simulací mezi sebou je uvedeno v **tab. 5.2**.

Tab. 5.1: Výsledky celoroční energetické simulace pro jednotlivé řešené varianty [53]

Variant	Doba využití zima/léto [h]		Získané teplo/chlad [kW·h]		Množství kondenzátu [kg _w]
TMY2	1646	133	568,3	126,8	57,8
EPW	1598	208	516,5	165,6	51,6
CHMI_1	1646	133	675,0	122,3	53,9
CHMI_2	1598	208	612,5	165,3	51,1

Tab. 5.2: Vzájemné porovnání celoročních výsledků jednotlivých řešených variant [53]

Variant	Doba využití zima/léto [h]		Získané teplo/chlad [kW·h]		Množství kondenzátu [kg _w]
EPW vs. TMY2	-2,9 %	+56,4 %	-9,1 %	+30,6 %	-10,7 %
CHMI_2 vs. CHMI_1	-2,9 %	+56,4 %	-9,3 %	+35,2 %	-5,2 %
CHMI_1 vs. TMY2	0 %	0 %	+18,8 %	-3,5 %	-6,7 %
CHMI_2 vs. EPW	0 %	0 %	+18,6 %	-0,2 %	-1,0 %

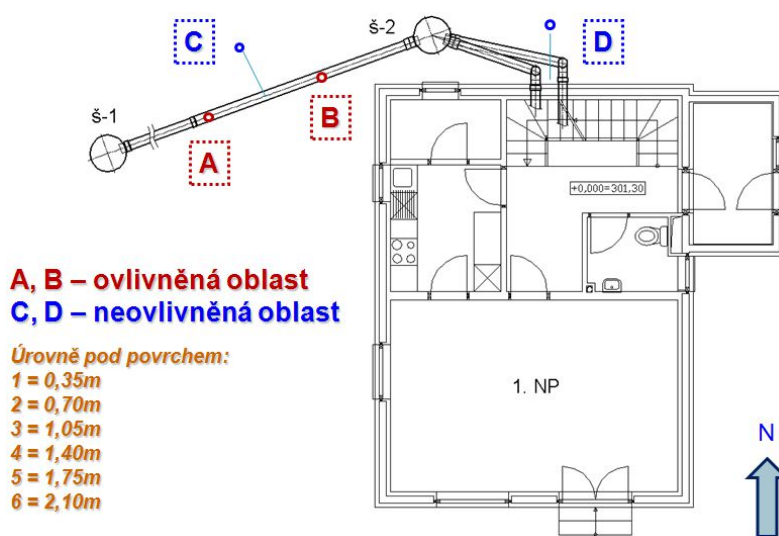
Z výsledků vyplývá, že při využití různých klimatických databází (viz první řádek: ENERGY+ vs. METEONORM) dosahují rozdíly celkového získaného tepla a celkového množství vzniklého kondenzátu přibližně 10 % – u celkového získaného chladu je to až 30 %. Ještě větší rozdíly jsou v celkové době využití ZVT během zimního/letního provozu, což je způsobeno především odlišnými hodnotami teploty a vlhkosti venkovního vzduchu. Dokládá to též porovnání variant „CHMI_2“ a „CHMI_1“, které obě vycházejí ze stejné aproximace teplotního rozložení v zemině. Simulace s větším časovým posuvem průběhu teplot („CHMI_1“ a „CHMI_2“) dává celoročně o cca 19 % vyšší množství získaného tepla než varianta s využitím hodinových klimatických dat („TMY2“ a „EPW“). Rozdíly v množství celkového získaného chladu v letním období jsou vzhledem k omezenému využití ZVT podstatně menší. Rovněž rozdíly v celkovém množství vysráženého kondenzátu jsou nepodstatné – u všech

variant je to vždy přes 50 kg_w/rok. Výsledky energetické simulace [32, 74] naznačují, že ke kondenzaci vzdušné vlhkosti v potrubí ZVT dochází v období květen až červen.

Přesnost výsledků energetické simulace je však do značné míry závislá na přesném stanovení okrajových podmínek. Poznamenejme také ještě, že teplo získané ze zemního výměníku tepla při jeho kombinaci s rekuperačním výměníkem se nerovná jeho energetickému přínosu; ten by vyplynul z porovnání celkové spotřeby energie v systému se zemním výměníkem tepla a bez něj, viz např. [32, 75, 95].

6 Experimentální zemní vzduchový výměník tepla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

Doposud bylo v ČR získáno málo praktických zkušeností s návrhem, provozem a následným monitoringem ZVT. Také z těchto důvodů byl na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně vybudován cirkulační vzduchový zemní výměník tepla (**obr. 6.1**). Jeho realizace proběhla převážně v rámci řešení projektu FRVŠ G1/3206/2011 „*Zemní výměník tepla jako nový prvek v technice prostředí*“ [96]. ZVT zde tvoří doplněk experimentálního nízkoenergetického domu větrání, jenž byl v roce 2004 vybudován v areálu FSI VUT v Brně [46, 47, 88]. Realizovaný ZVT je modifikovanou variantou cirkulačního typu zemního výměníku – díky geometrii, která byla vynucena hlavně využitelným prostorem v okolí budovy, tak vznikl „hybridní“ zemní výměník.



Obr. 6.1: Půdorys experimentálního ZVT, včetně umístění teplotních sond v zemi [47]

Tvořen je dvěma větvemi potrubí, jež jsou v zemním výkopu uloženy nad sebou v konstantních hloubkách cca 1,3 m a 2,0 m (bráno k osám potrubí); celková délka potrubní trasy činí cca 39 m. Na základě rozboru vlivu potrubního materiálu na potenciální výkon ZVT a finančních možností projektu FRVŠ bylo zvoleno běžné kanalizační potrubí z neměkčeného polyvinylchloridu, KG-System PVC® o průměru DN200. Během pokládky se všemi trubkami protáhla silonová prádelní šňůra, jež má sloužit k protahování čistícího přípravku. Jelikož budova není podsklepena, jsou obě větve zemního výměníku do objektu zaústěny přes fasádu objektu. Pro snazší čištění jsou na vstupu i výstupu ZVT (uvnitř budovy) umístěny čistící KG tvarovky. Na vstupní i výstupní větví jsou rovněž instalovány filtrační boxy s výměnným filtrem (vstup za fasádní žaluzii: filtrační vložka třídy G4; výstup: kapsový třídy G3). Filtrační kazeta, s výměnným kapsovým filtrem třídy G3, je též zabudována na vstupu do cirkulační

větvě chlazení ve 2.NP. Sání vzduchu je možné přepínat motoricky ovládanou T-klapkou buď z prostoru 2.NP (cirkulační režim pro chlazení vnitřního vzduchu v letním období) nebo přes protidešťovou nasávací žaluzii ve fasádě objektu (přímý režim pro přehřev větracího vzduchu v zimním období nebo jeho ochlazení v létě). Jelikož v experimentálním domku není instalována VZT jednotka, je na výstupní části ZVT umístěn potrubní radiální ventilátor, který je manuálně ovládaný pětistupňovým transformátorovým regulátorem otáček.

Zařízení dále umožňuje monitoring základních provozních parametrů a teplotního rozvrstvení zeminy. Pro měření teplot byly zvoleny termočlánky typu T, které byly vícebodově kalibrovány. Celkem bylo zhotoveno 24 ks termočlánekových čidel pro měření teplot zeminy a 6 ks pro měření teploty vzduchu v definovaných bodech potrubní trasy. Teplotní rozvrstvení v zemině je měřeno jak v oblasti ovlivněné provozem zemního výměníku (sondy „A“ a „B“; instalovány ve svislé ose výměníku po 1/3 vzdálenosti mezi oběma šachtami – viz **obr. 6.1**), tak v oblasti neovlivněné – ve vzdálenosti cca 2 m od potrubí, resp. fasády objektu (sondy „C“ a „D“). Každá sonda je osazena šesti termočlánky v hloubkách 0,35 m, 0,70 m, 1,05 m, 1,40 m (tj. těsně pod horním potrubím), 1,75 m a 2,10 m (tj. těsně pod spodním potrubím).

Po dokončení výkopových prací bylo **doc. Ing. Lumírem Mičou, Ph.D.** z FAST VUT v Brně provedeno odborné posouzení typu zeminy. Bylo odebráno několik vzorků z různých částí výkopu, přičemž základními rozborů bylo zjištěno, že se v převážné většině jedná o prachovitě písčitou jílovitou hlínu, tzv. „*spraš*“ [97]. Její tepelná vodivost a hustota je odhadována na $0,07 \div 0,80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, resp. $620 \div 1360 \text{ kg/m}^3$ [47]. Tento typ zeminy není pro ZVT zcela vhodný; vhodnější jsou půdy s vyšší tepelnou vodivostí. Dosažené hodnoty topného a chladicího výkonu je tak nutné brát spíše jako spodní hranici možností ZVT. Lze očekávat, že při vhodnějších podmínkách by bylo dosaženo lepších výkonových parametrů.

Součástí vybudovaného experimentálního zařízení je i měřicí a regulační aparatura, jež snímá a zaznamenává základní provozní parametry zemního výměníku v šesti měřicích uzlech ($1\times$ venkovní prostředí, vstup a výstup do/ze zemního výměníku, $2\times$ nasávací šachta a $1\times$ vstup do cirkulační větve). Mimo teploty je měřena také relativní vlhkost vzduchu (snímači vlhkosti typu **HH4000-003**). Objemový průtok vzduchu byl určen z průměrné rychlosti proudění uvnitř potrubí, měřené na výstupu ze ZVT žárovým anemometrem typu **Almemo FV A935-TH5**. Dále byla pomocí digitálního měřiče **Voltcraft Energy Logger 4000 CZ** měřena spotřeba elektrické energie pro pohon potrubního ventilátoru a přepínací „T“ klapky. Signály všech čidel byly do konce r. 2014 průběžně snímány měřicím modulem **Omega OMB-DAQ-56**, z něhož byla naměřená data stahována do řídicího počítače. V rámci řešení diplomové práce [98] byl poté začátkem r. 2015 tento systém nahrazen sofistikovanějším, na bázi měřicích modulů **National Instruments**, spolu s jednoduchou ovládací aplikací vytvořenou v programovacím jazyce *LabVIEW*.

6.1 Provozní režimy

Díky své dispozici je teoreticky možno ZVT provozovat až v devíti provozních režimech:

- 1) **základní větrací režim** – sání vzduchu přes protidešťovou žaluzii z fasády:

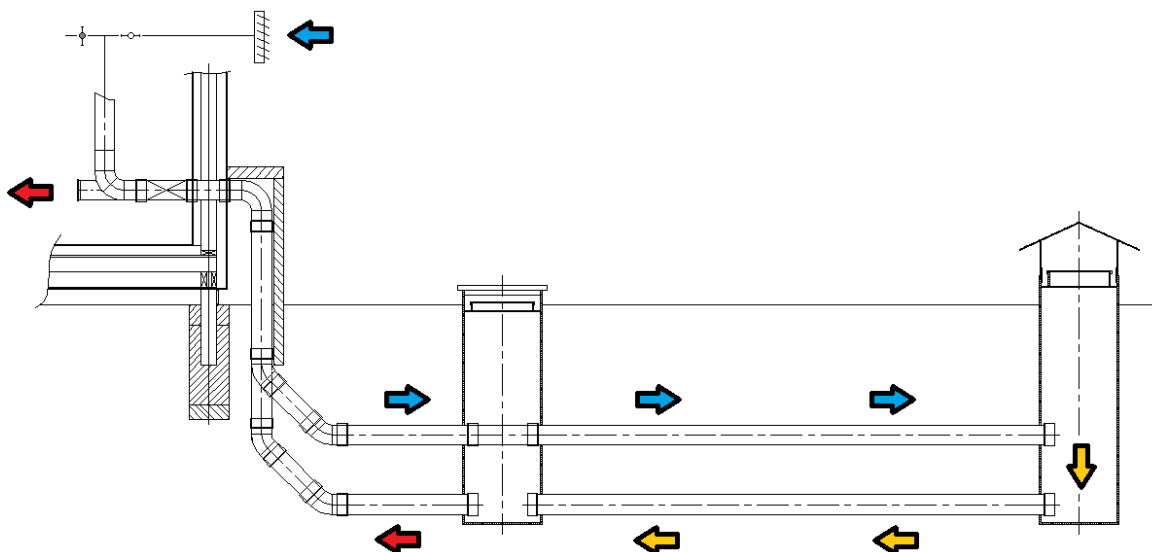
REŽIM A1 → průchod zemní smyčkou v plné délce cca 39 m (**obr. 6.2**, horním potrubím tam, dolním nazpět); **REŽIM A2** → jako A1, avšak s přehozením obou větví (dolní tam, horní zpět); **REŽIM A3** → průchod krátkou zemní smyčkou délky cca 6,5 m – po první (kontrolní) šachtu.

- 2) **zjednodušený větrací režim** – sání vzduchu nasávací šachtou:

REŽIM B1 → paralelní průchod oběma větvemi ZVT v poloviční délce (cca 21,5 m); **REŽIM B2** → jako B1, avšak s průchodem pouze dolní větvi; **REŽIM B3** → dtto B1, s průchodem pouze horní větvi.

3) **cirkulační režim chlazení** – nasávání vzduchu z haly v 2.NP:

REŽIM C1 → průchod zemní smyčkou v plné délce cca 39 m (horním potrubím tam, dolním nazpět); **REŽIM C2** → dtto C1, s přehozením obou větví; **REŽIM C3** → průchod krátkou zemní smyčkou délky cca 6,5 m – po první (kontrolní) šachtu.



Obr. 6.2: Základní větrací režim s nasáváním vzduchu z fasády objektu – režim A1

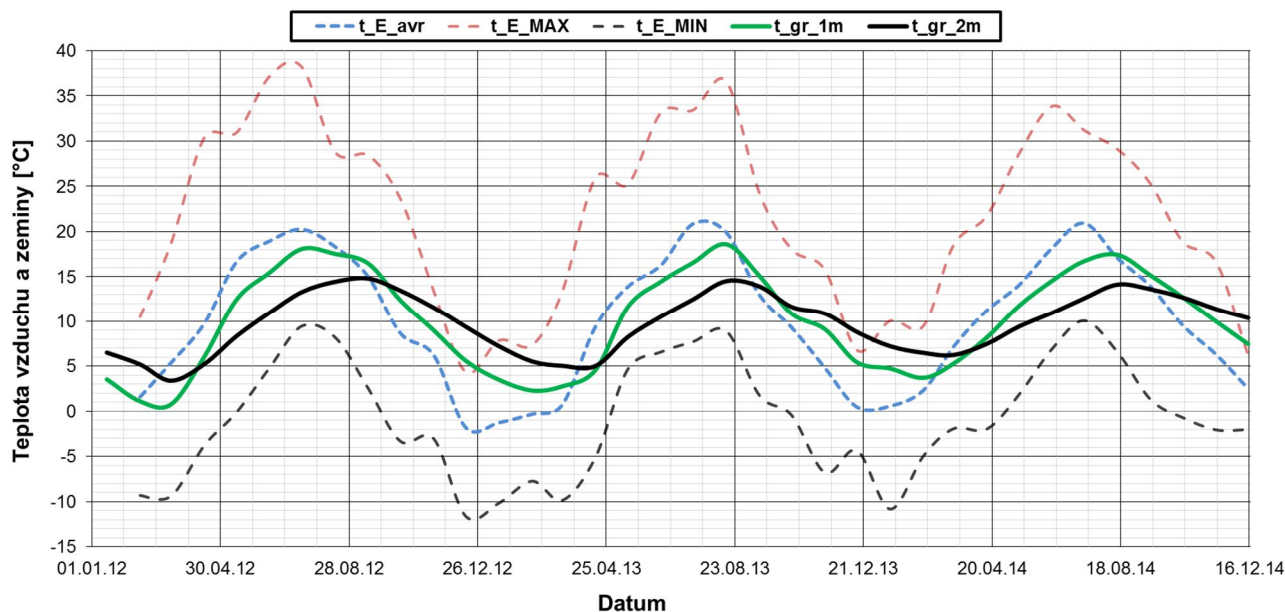
Převážně však budou využívány jen tři základní režimy (A1, B1 a C1), které se od sebe liší pouze místem nasávání vzduchu do ZVT (tj. fasádní žaluzie – **obr. 6.2**, nasávací šachta nebo sací větev v 2.NP). Další režimy lze zajistit menšími úpravami základních režimů, což představuje relativně jednoduché a rychlé operace.

6.2 Dlouhodobý monitoring provozních parametrů ZVT

Experimentální zařízení bylo dobudováno koncem r. 2011, přičemž teploty zeminy se začaly měřit již při samotné výstavbě ZVT. Teplota venkovního vzduchu se začala zaznamenávat až od února 2012. Teplota a relativní vlhkost vzduchu na vstupu a výstupu ZVT a relativní vlhkost venkovního vzduchu se začaly zaznamenávat až po spuštění ZVT dne 17. ledna 2013 – cca 1 rok tak docházelo k přirozené regeneraci teplotního rozvrstvení zeminy, porušeného při výkopu. Pro všechna čidla byla zvolena jednotná perioda záznamu dat – 1× za minutu. Z naměřených dat byly dále zpracovávány denní, měsíční a roční statistiky. Kvůli vyšší citlivosti měřicích modulů **Omega OMB-DAQ-56** na nestability napětí v elektrické síti docházelo občas k výpadkům měření (většinou v řádu několika málo hodin). Někdy však došlo také k dlouhodobému výpadku – naměřená data proto netvoří ucelenou řadu. Níže jsou prezentována některá naměřená a vyhodnocená data z dlouhodobého monitoringu experimentálního ZVT v období 2012 až 2014.

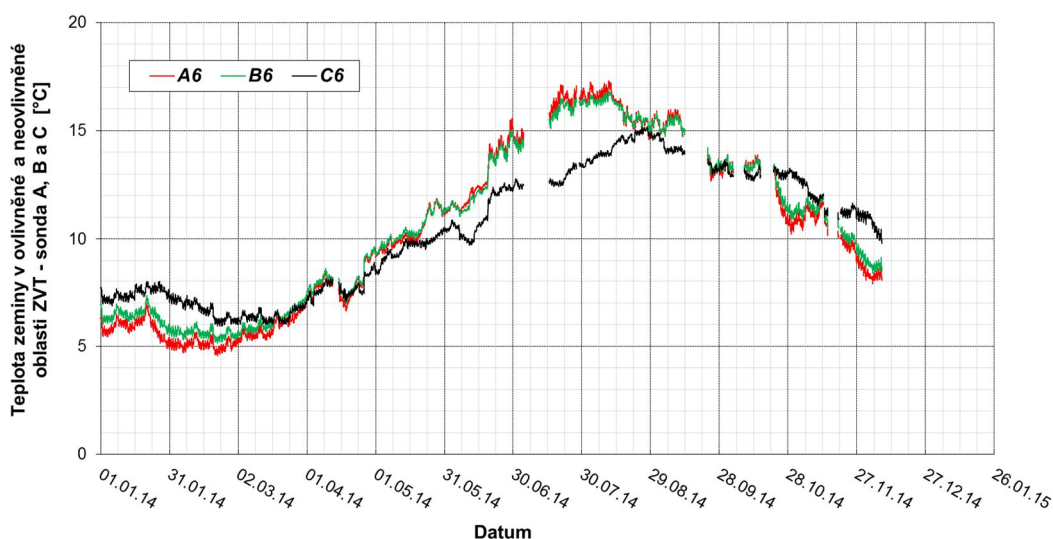
➤ **Teplota venkovního vzduchu a teplota zeminy**

Z hodinových průběhů teplotního rozdílu mezi venkovním vzduchem a zeminou v hloubce uložení potrubí je jasný převažující potenciál pro chlazení větracího vzduchu, k čemuž dochází již cca od půlky března (r. 2012 a 2014), resp. cca půlky dubna (r. 2013). Období chlazení vzduchu končí – pro všechny tři roky shodně – v průběhu září, kdy již začíná převažovat využití ZVT pro ohřev vzduchu. Tento stav trvá celé zimní období až cca do konce dubna daného roku. Využití zemního výměníku pro *cirkulační* chlazení interiérového vzduchu je díky dostatečně nízké teplotě zeminy prakticky celoroční.



Obr. 6.3: Průběhy průměrné, maximální a minimální denní teploty venkovního vzduchu („ t_E “) a průměrné denní teploty zeminy („ t_{gr} “) v hloubkách cca 1 a 2 m v období 2012÷2014

Průběhy denního minima, maxima a průměru teplot venkovního vzduchu a denní průměry teplot zeminy v hloubkách cca 1 a 2 m jsou uvedeny na **obr. 6.3**. Porovnání minimální a maximální teploty vzduchu s teplotami zeminy opět jasně ukazuje smysluplnost využití ZVT pro předehřev vzduchu v zimním období a jeho předchlazení v období letním. Zároveň vzniká otázka, zda je vůbec nutné provoz ZVT nějak řídit – je patrné že, během podstatné části zimní sezóny (cca od prosince do poloviny února) je celodenně teplota zeminy vyšší nebo přibližně rovna venkovní teplotě. Kontinuální provoz je minimálně z mikrobiologického hlediska vhodnější, jelikož proudící vzduch nesvědčí většině mikroskopických hub. Na druhou stranu kontinuální provoz zbytečně ochlazuje okolní zeminu; zda je či není tento vliv podstatný, se pokusí odpovědět následující odstavec.



Obr. 6.4: Teploty zeminy v oblasti ovlivněné (sondy „A“, „B“) a oblasti neovlivněné provozem ZVT (sonda „C“) v hloubce 2,10 m – r. 2014

➤ Teplota zeminy v oblasti ovlivněné a neovlivněné provozem ZVT

Z naměřených teplot zeminy je patrné, že podstatnější rozdíly nastávají v nejsvrchnější vrstvě zeminy, v blízkosti povrchu – zde kvůli povětrnostním vlivům, nesourodosti vegetace, sněho-

vé pokrývky apod. zde dochází k výrazným výkyvům během roku. Dále bylo zjištěno, že trvalým provozem ZVT dochází v zimních měsících k postupnému vychlazování zeminy (viz **obr. 6.4**). V letních měsících trvalý provoz naopak vede k postupnému ohřívání zeminy; přičemž změny v místě sondy „A“ jsou o něco vyšší než v místě sondy „B“. Relativní ohřátí zeminy je nejvyšší v hloubce 2,1 m během července až cca do půlky srpna. Rozdíly teplot v hloubce 1,75 m přibližně kopírují trend úrovně 2,10 m, ale rozkmit je zde o něco menší. Může to být způsobeno i umístěním obou čidel – nejnižší čidlo je vždy umístěno v těsné blízkosti spodního potrubí zemního výměníku, zatímco čidlo v úrovni 1,75 m je umístěno v zemském masivu přibližně uprostřed mezi oběma potrubími. Rozdíly teplot mezi oběma čidly v „neovlivněné“ oblasti (sondy „C“ a „D“) jsou způsobeny rozdílnými okrajovými podmínkami na povrchu země (oslunění). Je tedy vhodnější – pokud to dispozice pozemku dovolí – budovat zemní výměník na osluněném místě, kde si zajistíme vyšší teplotní potenciál pro zimní předehřev větracího vzduchu (prioritní ve středoevropském klimatickém pásmu).

Pro zimní provoz zemního výměníku je důležité znát nejnižší teplotu zeminy dosaženou v dané hloubce uložení potrubí ZVT – ta je totiž limitní pro předehřev vzduchu. V r. 2012, kdy ještě nebyl experimentální výměník v provozu, dosahovaly teploty v úrovni horní trasy potrubí (hloubka 1,3 m) hodnot v rozmezí cca (0,4 až 0,9) °C; v úrovni spodní potrubní trasy (2,0 m) byly teploty samozřejmě o něco málo vyšší, přibližně v rozmezí (2,3 až 3,0) °C. Pro zajištění funkce protimrazové ochrany zemního výměníku by tak mělo experimentální zařízení vyhovovat, což se v následujících dvou letech monitorovaného provozu potvrdilo. Po ustálení teplotního rozvrstvení zeminy a spuštění výměníku roku 2013 byla situace pro zimní předehřev ještě výhodnější – v úrovni horního potrubí ZVT se rozmezí minimálních teplot navýšilo na cca (0,4 až 2,4) °C, v úrovni spodního potrubí se hodnoty pohybovaly v rozmezí přibližně (2,8 až 4,7) °C. Následujícího r. 2014 došlo opět ke zvýšení na teploty cca (2,5 až 3,9) °C v horní úrovni, resp. (4,6 až 5,9) °C v úrovni dolní. Pro letní provoz ZVT jsou naopak důležité nejvyšší teploty zeminy v dané hloubce uložení, které jsou limitujícím faktorem pro chlazení nasávaného větracího, příp. cirkulačního vzduchu. Před uvedením zemního výměníku do trvalého provozu bylo v roce 2012 rozmezí maximálních teplot v úrovni horního potrubí cca (16,9 až 18,5) °C a přibližně (15,2 až 16,1) °C v úrovni potrubí spodního. V r. 2013 došlo vlivem trvalého provozu výměníku v letních měsících k výraznému nárůstu maxim, a to na 22,4 °C v úrovni horního, resp. 19,5 °C v úrovni spodního potrubí. Následujícího r. 2014 došlo v „ovlivněné“ oblasti opět ke snížení těchto maxim, a to přibližně na průměr let 2012 a 2013 – (16,6 až 19,6) °C v horní úrovni a (14,7 až 17,3) °C v úrovni spodní. Maximální teploty zeminy v roce 2013 lze proto považovat za výjimečné, způsobené mimořádně horkým počasím. V každém případě lze říci, že pro chlazení větracího vzduchu jsou tyto hodnoty zcela dostačující (proud vzduchu o teplotě nižší než 20 °C může působit až nepříjemně).

➤ Riziko kondenzace vlhkosti ve vzduchovém zemním výměníku

Při stanovení rizika kondenzace vycházíme ze stavu vlhkého vzduchu na vstupu do ZVT, dále je pak nutné znát povrchovou teplotu potrubí – tu v našem případě můžeme jednoduše odhadnout z naměřených teplot „ovlivněné“ zeminy. Pro zjednodušení uvažujeme, že aktuální povrchová teplota horního potrubí (jež je osově uloženo 1,3 m pod úrovní zeminy) je rovna průměru teplot zeminy v hloubce 1,40 m a 1,75 m pod povrchem (sondy „A“ a „B“). U spodního potrubí (osově uloženo 2,0 m pod zemí) se pak povrchová teplota uvažuje jako průměr aktuálních teplot zeminy v hloubkách 1,75 a 2,10 m (opět v místech „A“ a „B“). Změna rosného bodu vlivem postupné kondenzace (tj. odvlhčení vzduchu) není uvažována, takže stav na vstupu do ZVT je pro obě potrubí brán jako výchozí. Pokud je pak povrchová teplota nižší než teplota rosného bodu, bude zřejmě docházet ke kondenzaci.

Kvůli občasným problémům se záznamem a uložením nejsou v některých měsících dostupná kompletní data. Z naměřených hodnot však jasně vyplývá velký potenciál kondenzace začát-

kem jara (duben až květen) – nejspíše vlivem podchlazení zeminy po zimním režimu přehřevu vzduchu. Rozdělení na zimní a letní období uvádí **tab. 6.1**; zde je patrný rozdíl rizika u horního a spodního potrubí. Celkové riziko kondenzace v zimě bylo v obou letech záznamu asi 14 až 17 %, letní riziko kondenzace bylo o něco vyšší, cca 23 až 36 %. V létě r. 2013 však chybí téměř polovina dat, takže tento výsledek je nutno brát s rezervou. Celkově však lze říci, že ke kondenzaci vlhkosti v zemním výměníku může docházet v podstatě během každého měsíce v roce – snad s výjimkou prosince (kdy je zemina ještě relativně teplá avšak teploty venkovního vzduchu jsou ještě nízké).

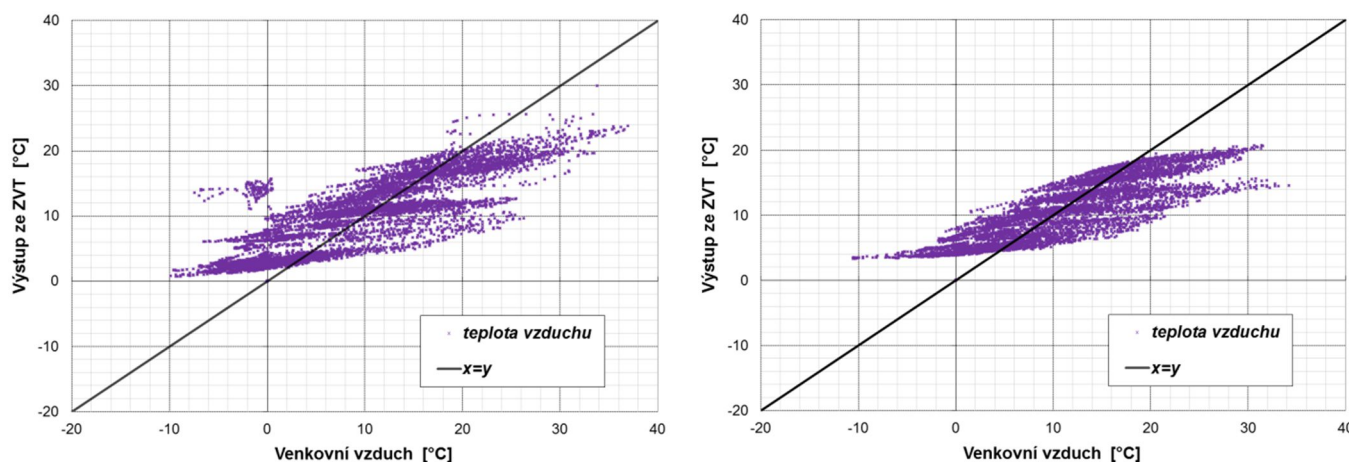
Tab. 6.1: Odhad kondenzace vlhkosti v ZVT v zimním a letním období let 2013 a 2014

Rok	2013		2014	
Období	ZIMA	LÉTO	ZIMA	LÉTO
Čas celkem [hod]	5 808	4 392	5 808	4 392
Data (T, RH) [hod]	5083	2522	4299	3787
Chybí data [%]	-12,5	-42,6	-26,0	-13,8
Horní potrubí:				
Kondenzace [hod]	801	806	740	877
Riziko [%]	15,8	32,0	17,2	23,2
Dolní potrubí:				
Kondenzace [hod]	709	918	680	1 127
Riziko [%]	13,9	36,4	15,8	29,8

Pozn.: „ZIMA“ = září÷duben, „LÉTO“ = duben÷září.

➤ **Vyhodnocení funkce ZVT jako protimrazové ochrany zařízení pro zpětné získávání tepla – zimní přehřev**

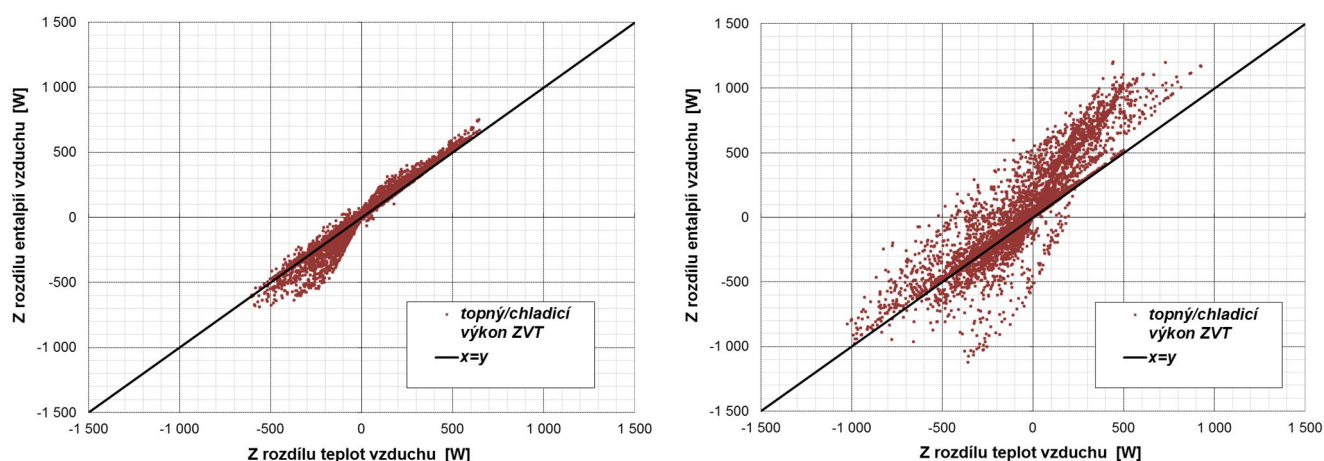
Z naměřených výstupních teplot ze zemního výměníku je jasné, že funkce protimrazové ochrany byla v obou letech provozu 100% splněna. Na **obr. 6.5** je provedeno grafické porovnání výstupních teplot vzduchu ze ZVT a venkovních teplot vzduchu. Rovnost obou hodnot rozděluje graf na dvě části – oblast ohřevu vzduchu (plocha nad přímkou $x = y$) a oblast chlazení vzduchu (plocha pod ní). Z obou grafů je názorně vidět, že při podnulových teplotách venkovního vzduchu je výstupní teplota vždy nad požadovanou hranicí 0 °C; v roce 2014 se dokonce stabilně pohybovala kolem cca 3 °C. Vlivem tepelných zisků/ztrát se totiž vzduch před vstupem do zemního výměníku vždy mírně přehřeje/předchladí, tudíž nasávací teplotu do ZVT lze volit mírně pod 0 °C.



Obr. 6.5: Porovnání výstupních teplot vzduchu ze ZVT a venkovních teplot v r. 2013 (vlevo) a v r. 2014 (vpravo); **ohřev** – body nad přímkou $x = y$, **chlazení** – body pod přímkou $x = y$

➤ Výkonové parametry experimentálního ZVT

Topný a chladicí výkon se stanovil z průměrného hodinového rozdílu teplot, resp. entalpií na vstupu a výstupu ZVT – a značně závisí na zvoleném větracím režimu. Vlivem tepelných zisků/ztrát ve vzduchotechnickém potrubí uvnitř objektu se také nasávaný venkovní vzduch před vstupem do zemní smyčky ohřeje/ochladí až o několik °C a reálný tepelný výkon celého zařízení může být odlišný. Negativně se projevuje také nevhodný typ zeminy, v níž je experimentální ZVT uložen (jílovitá spraš). Dosažené tepelné výkony (**obr. 6.6**) jsou tak nižší, než hodnoty získané energetickou simulací pro lokalitu Studénka (viz **kap. 5.4**). Topný výkon ZVT dosahoval – v závislosti na roční době a nastaveném průtoku vzduchu – cca 200 až 650 W, s maximy cca 800 až 900 W v září–říjnu 2014. V chladicím režimu měl výměník výkon cca 200 až 600 W, při vyšším průtoku vzduchu až (700÷1000) W. Maximální dosažený chladicí výkon činil přibližně 1300 W.



Obr. 6.6: Porovnání topných a chladicích výkonů ZVT vypočtených z rozdílu teplot a z rozdílu entalpií: pro r. 2013 (vlevo), pro r. 2014 (vpravo)

Průběhy topného a chladicího výkonu, stanovené na základě rozdílů entalpií, mají obdobný trend jako v případě výpočtu z prostého rozdílu teplot – určité rozdíly však nastávají kvůli zahrnutí vlhkostní složky. Na **obr. 6.6** je proto uvedeno srovnání obou variant výpočtu. Je patrné, že při nižších výkonech může chladicí výkon z rozdílu entalpií dosahovat 2,5× až 3× vyšších hodnot (vlivem kondenzace vody); při vyšších výkonech je rozptyl hodnot nižší – nachází se přibližně v rozmezí (40 až 85) %. Pro topný režim jsou výkony z rozdílu entalpií vyšší přibližně o (25 až 75) %. V r. 2014 však oproti r. 2013 panují jasné nesrovnalosti mezi tepelnými výkony z obou variant výpočtu. V topném režimu rozdíly dosahovaly až +2,7násobku ve srovnání s výpočtem z prostého rozdílu teplot – zřejmě kvůli zpětné evaporaci následující bezprostředně po období, kdy docházelo ke kondenzaci. V režimu chlazení byl dokonce tento rozdíl až 3,3násobný. Vyšší rozptyl proti předchozímu roku je možné přičíst také degradaci vlhkostních čidel [98], zejména čidla na vstupu do ZVT a čidla v exteriéru budovy.

➤ Termická a energetická (provozní) účinnost ZVT

Termická účinnost v % udává, jak moc se výstupní teplota ze ZVT blíží teplotě zeminy. V roce 2013 se termická účinnost v převážné míře pohybovala nad hodnotou 50 %, přičemž v následujícím roce 2014 tato hranice stoupla na 60 %. Nejvyšších účinností bylo dosahováno na jaře (březen–květen) a začátkem zimy (září–říjen), naopak v letních měsících se účinnost pohybovala spíše na hodnotách nižších. Provozní účinnost značí poměr množství získané tepelné energie ku spotřebovanému množství elektrické energie pro pohon celého zařízení – přibližně od půlky r. 2013 byla pravidelně zaznamenávána spotřeba elektrické energie expe-

rimentálního ZVT pro pohon radiálního potrubního ventilátoru a přepínací klapky sání. Pro zimní provoz se používá tzv. **faktor COP** („Coefficient of Performance“), pro letní provoz tzv. **faktor EER** („Energy Efficiency Ratio“). Topný/chladicí faktor byl – tak jako v předchozích kapitolách – vypočten jak z rozdílu teplot, tak z rozdílu entalpií vzduchu.

Z dostupných dat je patrné, že na jaře r. 2013 zemní výměník pracoval s maximálním chladícím faktorem dosahujícím až cca hodnoty 12. Přes léto byla hodnota faktoru EER obdobná jako na jaře, postupné snížení začalo od konce srpna, kdy narůstá provozní režim ohřevu vzduchu. Maximální topný faktor se pak začátkem podzimu pohyboval v rozmezí (5÷12), koncem listopadu 2013 však došlo k jeho poklesu na maximum cca 5, což pokračovalo i začátkem roku 2014. Přibližně koncem ledna došlo ke chvilkovému navýšení maxima topného faktoru, následně se ale jeho hodnota opět ustálila kolem 5. Na začátku podzimu a v průběhu zimy došlo k několika výkyvům, s maximem hodnot cca (8÷10). Začátkem jara 2014 opět narůstá využití režimu chlazení s hodnotou EER v rozmezí (5÷9). Maximální chladicí faktory dosažené v průběhu léta činily cca (8÷14), na podzim pak zase poklesly na rozmezí (4÷6). Topné a chladicí faktory zemního výměníku vypočtené z rozdílu entalpií vlhkého vzduchu vykazují obdobné trendy; obě veličiny však – kvůli rozdílům ve vypočtených tepelných výkonech – dosahují vyšších hodnot.

Tab. 6.2: Využití ZVT jako protimrazové ochrany pro zvolené přepínací teploty nasávání

Přepínací teplota sání do ZVT	-2 °C	0 °C	2 °C	Chybějící data
r. 2012 ÷ r. 2014	1528 h. / 21 969 h. (<i>≈ 7,0 %</i>)	3033 h. / 21 969 h. (<i>≈ 13,8 %</i>)	4660 h. / 21 969 h. (<i>≈ 21,2 %</i>)	4335 h. / 26 304 h. (<i>≈ -16,5 %</i>)

Pozn.: xxx h. / xxxx h. = počet hodin, kdy je venkovní teplota vzduchu nižší než nastavená přepínací teplota / počet hodin celkem. V závorce je uvedeno procentuální vyjádření.

➤ Využití ZVT při řízení provozu podle teploty nasávaného vzduchu

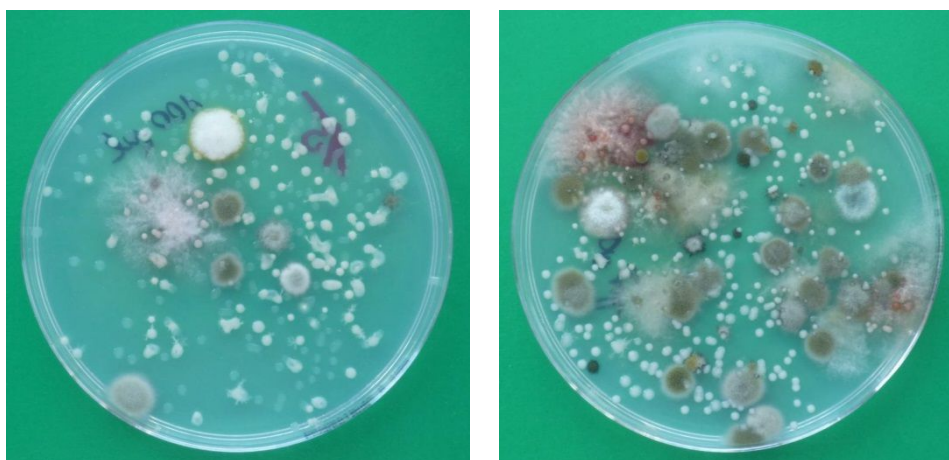
V **tab. 6.2** jsou rozebrány tři varianty nastavení přepínací teploty: -2 °C, 0 °C a +2 °C. S vyšší přepínací teplotou využití ZVT narůstá až na hodnotu cca 21 % (při +2 °C), naopak nastavení teploty na -2 °C vede k průměrnému využití přibližně jen 7 %. Přihlédneme-li k výši investičních nákladů, je to poměrně málo. Z tohoto pohledu se proto doporučit přepínací teplotu volit mírně nad nulou, kdy činí využití ZVT více než 20 %. Poznamenejme však, že za tři roky monitoringu chybí přibližně 17 % dat – reálné výsledky proto mohou být poněkud odlišné.

7 Mikrobiologický výzkum vzduchových zemních výměníků tepla

V rámci řešení projektu **FSI-J-12-24 „Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy“** byl proveden monitoring několika desítek vzduchových zemních výměníků tepla. Z celkem 165 dohledaných zařízení po celé ČR (v r. 2013) se podařilo přímo kontaktovat cca 1/3 majitelů, načež bylo provedeno 52 odběrů ze zemních výměníků v různých lokalitách (uvnitř i mimo město), různého stáří, z různých typů (materiálů) potrubí, různých větracích režimů atp. Cílem projektu bylo (mimo jiné) zjistit, zda se mezi sebou nějak výrazněji liší ZVT z různých potrubních systémů – hlavně „obyčejného“ odpadního potrubí **KG PVC** a stále častěji marketingově preferovaného produktu **Rehau Awadukt Thermo** z polypropylenů s antimikrobiální úpravou, dále zda má vliv stáří realizace či případná zanedbaná údržba vzduchotechnického systému. Pro vyslovení obecnějších závěrů se podařilo zajistit dostatečně reprezentativní statistický vzorek ZVT. V rámci

monitoringu byl také mezi majiteli proveden jednoduchý dotazníkový průzkum týkající se realizace a provozu jejich zemního výměníku (viz **kapitola 7.3**).

Odběry mikrobiologického materiálu byly realizovány osobně autorem práce, a to dvěma metodami: pomocí stěrů ze stěn potrubí a gravimetricky – usazováním bioaerosolu na Petriho misky s živnou půdou (agarem). Následné zpracování a vyhodnocení bylo již provedeno odbornou firmou, společností **IFCOR-99, s.r.o.** [99], v laboratoři akreditované ČIA. Ve většině případů byl proměřen i rychlostní profil v jedné rovině přírodního potrubí – pomocí sondy s žárovým anemometrem typu ALMEMO FV A935-TH5 napojené na univerzální ruční datalogger typu ALMEMO® 2470. Z naměřených hodnot rychlostí se následně stanovil přibližný objemový průtok větracího vzduchu, procházejícího přes ZVT. Při samotných odběrech byla za pomoci ručního digitálního Thermo-Hygro-Barometru typu C4130 zaznamenávána také teplota, relativní vlhkost a barometrický tlak vzduchu ve venkovním prostředí a uvnitř budovy.



Obr. 7.1: *Výkultivované kolonie z odebraného stěru č. 15 – vlevo: po 2 týdnech, vpravo: po 4 týdnech*

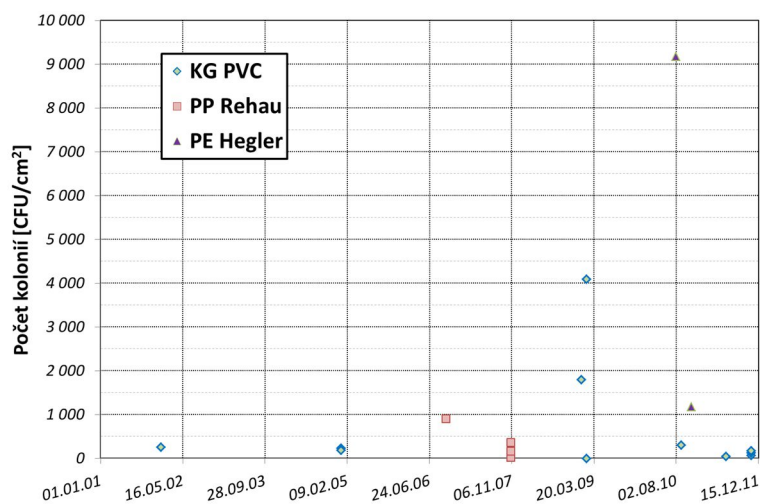
7.1 Metoda stěrů

Pro zemní výměníky tepla bohužel dosud neexistuje odborná metodika odběru mikrobiologických vzorků a hodnocení jejich mikrobiálního znečištění. V první etapě výzkumu byla proto zvolena jednoduchá (a rychlá) metoda stěru vzorků pomocí vatového tamponu z předem vymezené plochy vnitřního povrchu potrubí. Kvůli možnosti společného srovnání výsledných koncentrací znečištění se při stírání biologického materiálu dbalo na to, aby plocha stěru (v našem případě min. 5 cm²) byla pro všechny ZVT přibližně stejná. Stěry se realizovaly vždy na výstupu ze zemního výměníku tepla před rekuperačním výměníkem, resp. filtrem. Na každém výměníku byly vždy odebrány minimálně dva vzorky, pro alespoň částečnou eliminaci variability v místě stěru. Odebrané vzorky se v laboratoři přenesly do Petriho misek se dvěma různými živnými agarovými půdami (**CZD** – „Czapek Dox“, **SAB** – „Sabouraud Chloram-phenicol“) [90] a v termostatu byly za konstantní teploty 15 °C dva týdny kultivovány (viz **obr. 7.1**). Po ukončení kultivace byl spočten celkový počet narostlých kolonií (CFU – „Colony forming unit“) a stanovena průměrná hodnota měrného znečištění povrchu v jednotkách CFU/cm². Hodnoceny byly pouze směsné populace plísní, znečištění bakteriemi nebylo stanoveno.

Koncem r. 2012 mělo o účast v prvním kole odběrů zájem prvních 14 majitelů zemních výměníků tepla v Brně a blízkém okolí. Výměníky se nacházely převážně u samostatně stojících rodinných domů; pět z nich patřilo k bytovým jednotkám dvou pasivních řadových domů v Židlochovicích – ty byly realizovány z PP potrubí **Rehau Awadukt Termo** (se speciální

antimikrobiální úpravou vnitřního povrchu). Největší zastoupení však mělo nejlevnější a obecně nejpoužívanější potrubí **KG PVC** (7 ks), zbylé 2 ks byly vybudovány z korugovaného PE potrubí **Hekatherm** fy Hegler. Ve většině případů byla na vstupu ZVT instalována filtrace vzduchu, pouze ve čtyřech případech nikoliv. V době odběrů byl bohužel od svého uvedení do provozu vyčištěn jen experimentální zemní výměník FSI VUT – ostatní majitelé řešili pouze výměnu filtrů ve VZT jednotce (1× ročně), někteří při tom čistili i VZT jednotku a rekuperační výměník tepla. Převážná část monitorovaných zařízení se nacházela na okraji města, kde se dá předpokládat nižší míra okolního znečištění. Uvnitř města, v blízkosti vedlejší relativně rušné komunikace, se nacházela jen tři ze zkoumaných ZVT.

V říjnu a prosinci 2012 tak bylo odebráno celkem 18 mikrobiologických vzorků – 14× na výstupu ze zemního výměníku (tj. na vstupu do VZT jednotky), 2× v šachtách experimentálního ZVT a 2× z vody nalezené v potrubí dvou výměníků. Ve většině případů převažoval nárůst kolonií vláknitých hub různých rodů a druhů, tj. plísní. Zastoupeny zde byly běžné vzdušné a půdní mikroorganismy rodu *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium* a *Mucor*. U vzorků z odebrané vody však převažoval nárůst jednobuněčných mikroorganismů, tj. kvasinek. U dvou ZVT byly ve stěrech z potrubí detekovány kvasinky rodu *Rhodotorula*. Z finančních důvodů se další zařazení do rodů u ostatních vzorků neprovádělo.



Obr. 7.2: Počet vykultivovaných kolonií plísní v závislosti na době realizace (resp. stáří ZVT)

Na **obr. 7.2** je uvedeno grafické srovnání měrného počtu vykultivovaných kolonií plísní v závislosti na stáří jednotlivých zařízení. Výsledky nepotvrzují zvětšující se znečištění vlivem delšího provozu, a to navzdory tomu, že majitelé své ZVT dosud nečistili. Toto lze zřejmě přisuzovat kontinuálnímu sání vzduchu přes zemní výměník. V době odběrů byl nejstarší realizovaný zemní výměník cca 11 let starý a míra jeho mikrobiologického znečištění nikterak nevybočovala od ostatních zařízení. Naopak, znečištění patřilo k těm nižším, např. oproti jednomu ZVT z certifikovaného potrubí Awadukt Thermo dosahovalo jen cca $\frac{1}{4}$ hodnoty. Výsledky mikrobiologických rozborů tak nepotvrzují, že certifikované potrubí s antimikrobiální úpravou povrchu *Awadukt Thermo* se zásadně odlišuje od „obyčejného“ kanalizačního potrubí KG PVC. Nejednoznačný výsledek mezi potrubími KG PVC a PP Rehau je však s největší pravděpodobností zapříčiněn nedostatečnou údržbou zkoumaných ZVT. Pro správnou antimikrobiální funkci „postříbřeného“ povrchu musí být nutně procházející vzduch s tímto povrchem v permanentním kontaktu. Filtrace na vstupu vždy propouští do potrubní trasy určité množství částic (mikroprach), tudíž pokud se ZVT pravidelně nečistí, vytvoří se časem na jeho povrchu souvislá vrstva, jež „odstíní“ vliv stříbrných iontů zabudovaných v materiálu potrubí. Z tohoto pohledu je potřeba zemní výměník pravidelně čistit (mechanicky, tlakovou vodou atp.) – alespoň 1× ročně.

7.2 Gravimetrická metoda

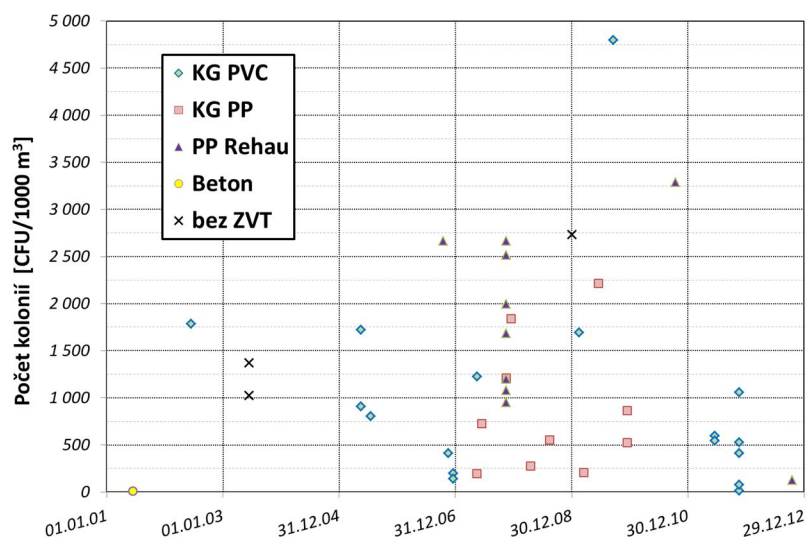
Kvůli velké citlivosti na volbu místa odběru – což je největší nevýhoda této metody – a také problematickému dodržení stejně velké plochy stěru byla pro další kolo mikrobiologických odběrů zvolena tzv. „gravimetrická metoda“, založená na prosté sedimentaci spor ze vzdušného aerosolu na Petriho misky se živným agarem. Tato metoda je navíc z uživatelského hlediska vhodnější, protože podstatný není mikrobiologický stav samotného zemního výměníku, ale spíše kvalita přiváděného vzduchu po průchodu celým VZT řetězcem (potrubí, filtry atd.). Metoda stěrů rovněž nereflektuje míru znečištění vzduchu nasávaného do ZVT, jež bývá ve většině případů vyšší než uvnitř budovy.

Ani na základě gravimetrické metody však nelze vyslovit jednoznačné závěry ohledně kvality vnitřního prostředí dle *Vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb.* [67], protože při odběrech nelze zajistit přesné množství „protekého“ vzduchu a kolmý dopad proudu na Petriho misku. Použity byly ověřené agary z předešlé metody (tj. CZD a SAB) [90]. Misky s CZD agarem byly následně kultivovány při 27 °C; kontrolní miska s agarem SAB (vkládaná pouze do větrací jednotky) sloužila pro určení případných patogenů – kultivace pak probíhala při zvýšené teplotě 37 °C. Po ukončení kultivace byl stanoven celkový počet narostlých kolonií (CFU); určeny byly opět pouze směsné populace plísní. Z počtu narostlých kolonií, změřeného objemového průtoku vzduchu a doby odběru se následně vypočetla hodnota měrného zachytu plísní na 1000 m³ nasátého vzduchu – takto lze mezi sebou jednotlivé odběry alespoň částečně porovnat. Vyhodnoceno a porovnáno bylo rovněž mikrobiální znečištění v nejvíce exponované místnosti domu dle určení majitele (zpravidla obývací nebo dětský pokoj). Referenční hodnota CFU je uvažována ze vzorku odebraného ve venkovním prostředí, poblíž vstupu do ZVT. Celkově tak na jeden zemní výměník připadaly min. 4 odběry; v některých případech byly odběry provedeny i z více míst. Zároveň se měřila i teplota, relativní vlhkost a barometrický tlak vzduchu ve venkovním a vnitřním prostředí.

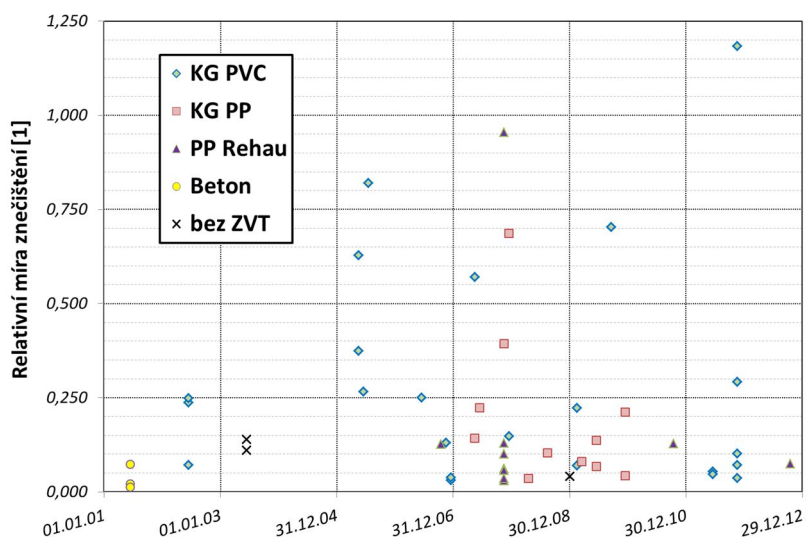
V tomto dalším kole odběrů se podařilo oslovit celkem 46 majitelů ZVT, z toho 35 se do výzkumu aktivně zapojilo. Většina nově zahrnutých zařízení navíc používala plnostěnné polypropylenové potrubí **KG PP 2000**, které u předešlé studie nebylo zastoupeno. Naopak potrubí PP Hegler již v druhém kole monitoringu bohužel nevystupovalo – očekávané porovnání s výsledky metody stěrů se proto nepodařilo realizovat. Přesto však bylo zastoupeno relativně široké spektrum vzduchových zemních výměníků, vesměs instalovaných v rodinných domech. Ve dvou případech se podařilo odebrat vzorky před a po čištění ZVT (navíc se ještě jednalo o „postříbřené“ potrubí PP Rehau), bylo tak možno zběžně posoudit vliv čištění na kvalitu přiváděného vzduchu. Provedeny byly i odběry ze tří domů na Zlínsku s nuceným větráním bez instalovaného ZVT.

Měrné hodnoty počtu vykultivovaných kolonií (CFU/1000 m³), seřazené podle stáří realizace jednotlivých monitorovaných zařízení, jsou uvedeny na **obr. 7.3**. Dosažené koncentrace mikrobiálního znečištění ve VZT jednotce opět nepotvrzují zvětšující se znečištění vlivem delšího provozu. Přitom pouze jen asi 1/3 z celkového počtu 35 výměníků byla od svého uvedení do provozu nějakým způsobem čištěna. Většinu majitelů objektů však zajímala informace, zda jejich zemní výměník nějak ovlivňuje mikrobiální mikroklima v interiéru budovy. Na **obr. 7.4** je grafické znázornění relativní míry mikrobiálního znečištění (tj. interiér vs. exteriér) v závislosti na typu potrubí a době realizace ZVT. Množství vykultivovaných CFU v interiéru bylo zpravidla nižší než ve venkovním prostředí; jen u jediného výměníku dosáhlo relativní znečištění vyšší hodnoty než 1,0. Bylo to ovšem dosaženo při nízkém počtu vykultivovaných kolonií (vztahených na jednotku času odběru – CFU/hod.) – ve venkovním prostředí 7, uvnitř budovy 8. Dá se tedy říci, že uvnitř i vně objektu bylo velmi kvalitní prostředí. Výsledky dalších odběrů u tohoto zařízení nenaznačují problém s mikrobiální kontaminací

v ZVT – v říjnu 2013 byla hodnota relativního znečištění 0,072 a v prosinci 0,293, tedy vždy nižší, než u inkriminovaného odběru v listopadu. Převážná část všech relativních hodnot se však nacházela pod hranicí 0,5 (pouze 7 případů nad ní), což potvrzuje obecně uváděné tvrzení o prospěšnosti mechanického větrání pro kvalitu vnitřního prostředí budov (mimo jiné i kvůli menší prašnosti a hluku z exteriéru).



Obr. 7.3: Měrný počet kolonií plísní vykultivovaných z větracího vzduchu ve VZT jednotce (na agaru CZD) v závislosti na typu a době realizace zařízení



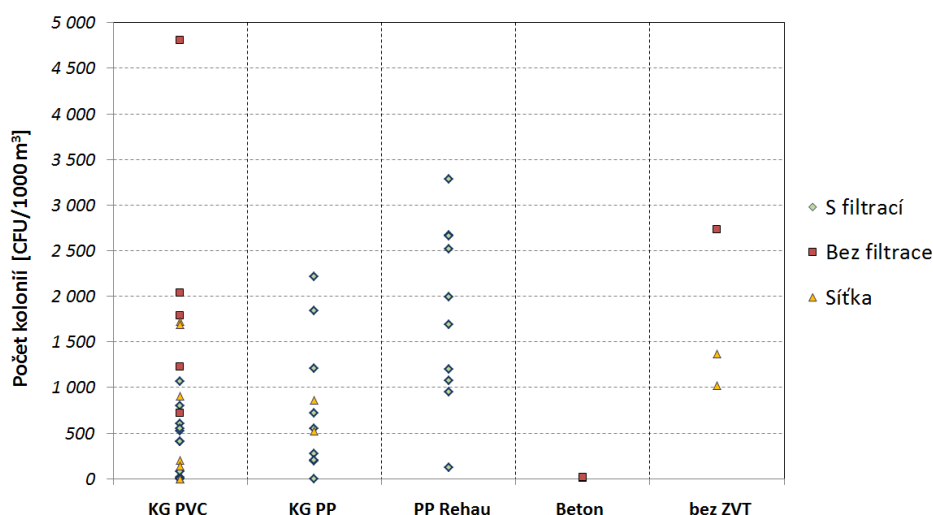
Obr. 7.4: Relativní míra mikrobiologického znečištění interiérového vzduchu v závislosti na době realizace

Roztřídění výsledků jednotlivých monitorovaných zařízení podle použitého potrubního systému je uvedeno na **obr. 7.5** a **7.6** – mimo jiné je zde také rozlišeno, jak je řešena filtrace na vstupu do ZVT. Měrné a relativní hodnoty mikrobiologického znečištění u jednotlivých zemních výměníků dosahují poměrně širokého spektra – průměrné hodnoty (a jejich porovnání s potrubím KG PVC) jsou uvedeny v **tab. 7.1**. Z grafického znázornění je patrné, že hodnoty měrného počtu kolonií u potrubí KG PVC a KG PP jsou velmi obdobné (nebereme-li v potaz jednu mimolehlou hodnotu); průměrná hodnota však u KG PP vychází o 17 % menší. U certifikovaného potrubí Rehau Awadukt Thermo byl dosažen o něco vyšší rozptyl hodnot, než pro obě zmíněná potrubí KG a průměrná hodnota zde v porovnání s „obyčejným“ PVC vychází

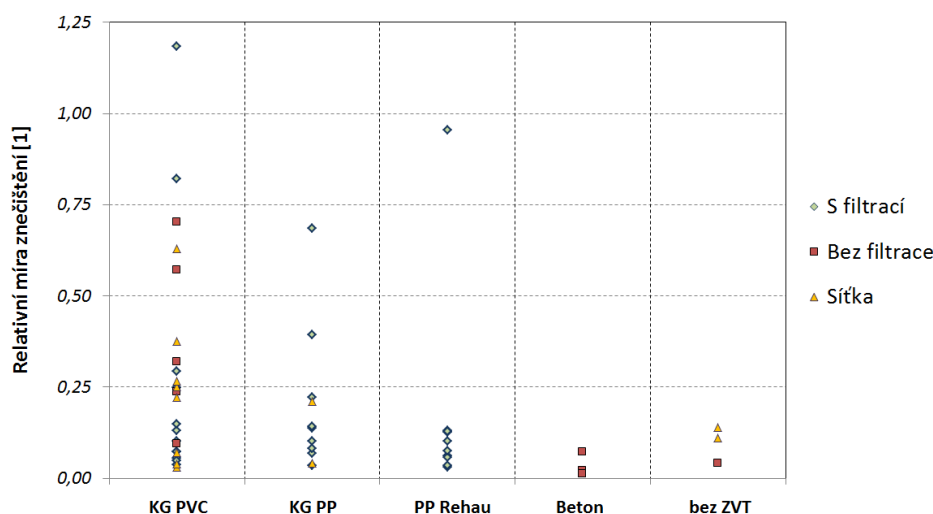
nečekaně o cca $\frac{3}{4}$ vyšší. Podobně jsou na tom i vzorky z domů bez ZVT; zde však by bylo pro objektivnější srovnání třeba provést vyšší množství odběrů (nyní pouze 3 vzorky).

Tab. 7.1: Průměrné hodnoty mikrobiálního znečištění dle použitého materiálu potrubí a porovnání s KG PVC

Míra znečištění	jednotka	KG PVC	KG PP	PP Rehau	Beton	Bez ZVT
<i>Měrná</i>	<i>[CFU/1000 m³]</i>	1037	860 (-17,0 %)	1816 (+75,2 %)	10 (-99,0 %)	1710 (+64,9 %)
<i>Relativní</i>	<i>[CFU_{IN}/CFU_{OUT}]</i>	0,281	0,193 (-31,3 %)	0,170 (-39,5 %)	0,036 (-87,2 %)	0,097 (-65,4 %)



Obr. 7.5: Měrný počet kolonií plísní vykultivovaných z větracího vzduchu ve VZT jednotce (na agaru CZD) v závislosti na materiálu potrubí



Obr. 7.6: Relativní míra mikrobiálního znečištění podle materiálu potrubí – výsledky kultivace na agaru CZD

Srovnáme-li relativní míru znečištění (**obr. 7.6**) – tj. mikrobiální kvalitu v interiéru – pro různé typy potrubí pak nejlépe vycházejí (až na jeden případ mimolehlé hodnoty) zemní výměníky z potrubí PP Rehau. Průměrné relativní znečištění zde dosahuje o cca 40 % nižší hodnoty než v případě potrubí KG PVC. O něco hůře vychází potrubí KG PP s cca o 1/3 nižší průměrnou hodnotou v porovnání s KG PVC (viz **tab. 7.1**). Převážná většina interiérů však má cca poloviční mikrobiální znečištění, než jaké bylo stanoveno ve venkovním prostředí, což mů-

žeme připsat hojnému využívání nuceného větrání s filtrací přiváděného/větracího, příp. i cirkulačního vzduchu.

Podle metodiky pro odběr vzorků pomocí aeroskopu [68] je hranicí hygienické závažnosti hodnota 2,0, tedy případ, kdy je uvnitř budovy dvojnásobná koncentrace mikroorganismů než ve venkovním prostředí. Naštěstí k této situaci u žádného domu nedošlo (naopak ve většině případů bylo uvnitř znečištění podstatně nižší než venku). V některých případech však byly na miskách s kontrolním agarem SAB vykultivovány potenciální patogeny. Jednalo se o „běžné“ půdní a vzdušné mikroorganismy; nejčastěji byly zastoupeny rody *Penicillium*, *Mucor* a *Aspergillus* (konkrétně druhy *flavus*, *fumigatus* a *versicolor*). Exaktní porovnání jednotlivých zemních výměníků, resp. odebraných vzorků, je v podstatě nemožné – hlavně kvůli nejednotným venkovním podmínkám (např. teplota a vlhkost) a rozdílnému přístupu majitelů k provozu a údržbě. Reprezentativní statistický vzorek tvoří pouze potrubí **KG PVC** (25 vzorků); pro potrubí **KG PP** (11 vzorků) a **PP Rehau** (10 vzorků) by do budoucna bylo vhodné počty minimálně zdvojnásobit. Podle výsledků z několika odběrů u experimentálního zemního výměníku FSI VUT je patrné kolísání mikrobiálního znečištění v čase a potvrzuje se snižující tendence v podzimních a zimních měsících. Srovnáním dvou odběrů realizovaných před a po vyčištění ZVT – cca 2 měsíčním odstupem – lze rámcově říci, že po vyčištění prvního zemního výměníku kleslo znečištění ve větrací jednotce cca na 1/2; v případě druhého výměníku byl pokles nižší – cca na 2/3 původní hodnoty. Relativní znečištění vnitřního prostředí kleslo přibližně ve stejném duchu (-57,7 %, resp. -44,4 %). Porovnáním s výsledky experimentálního výměníku FSI VUT – který nebyl v danou dobu čištěn (naposledy na jaře 2012) a u kterého se vzorky odebíraly přibližně ve stejném termínu – můžeme konstatovat, že pokles nebyl způsoben čištěním potrubí a údržbou větrací jednotky, ale spíše přirozeným poklesem biologického znečištění na podzim; čištění má zřejmě až druhotný význam. Vysvětlení je možné opět hledat v řízení provozu ZVT; všechna tři zařízení byla provozována s kontinuálním sáním přes zemní výměník, takže spory zřejmě neměly čas se na povrchu usadit a začít se rozmnožovat. Počet odběrů je prozatím nízký, proto by bylo vhodné tuto domněnku ověřit dalšími odběry.

Na závěr se zaměříme na to, zda má nějaký vliv použité řešení filtrace na vstupu do potrubí zemního výměníku tepla. Obecně lze říci, že výměnnou filtrační tkaninu zde mělo každých cca 6 z 10 monitorovaných zemních výměníků a alespoň síťku, pro zachycení hrubých nečistot a hmyzu, měly pak další cca 2 z 10 ZVT. Celkově tak byla nějakým způsobem řešena filtrace v cca 77 % případů. V **tab. 7.2** jsou uvedeny souhrnné výsledky podle jednotlivých kategorií.

Tab. 7.2: Průměrné hodnoty mikrobiálního znečištění dle řešení filtrace u ZVT

Míra znečištění	Jednotka	S filtrem	Bez filtru	Jen síťka	Bez filtru + síťka
<i>Měrná</i>	<i>[CFU/1000 m³]</i>	1105	1482 (+34,1 %)	940 (-15,0 %)	1211 (+9,6 %)
<i>Relativní</i>	<i>[CFU_{IN}/CFU_{OUT}]</i>	0,219	0,231 (+5,6 %)	0,206 (-5,9 %)	0,213 (-2,7 %)

Z **obrázku 7.5** je vidět, že měrné znečištění ve VZT jednotce dosahuje u většiny výměníků bez filtrační tkaniny (alespoň v případě nejčastěji zastoupeného potrubí KG PVC) hodnot blízkých nebo vyšších, než je průměr v dané kategorii. Průměrné měrné znečištění u výměníků bez jakékoliv filtrace je asi o 1/3 vyšší než u výměníků s výměnnou filtrační tkaninou. Překvapivé je zjištění měrného znečištění u výměníků pouze se sítkou na vstupu; zde totiž byla detekována o 15 % nižší hodnota než v případě zařízení s filtry. Sloučíme-li dohromady výměníky bez filtrační tkaniny a se sítkou na vstupu, rozdíl průměrných hodnot mezi výmě-

níky s a bez filtru klesne na pouhých cca 10 % (poslední sloupec **tab. 7.2**). U míry relativního znečištění nedochází k tak dramatickým rozdílům a rozdíly se pohybují v řádu jednotek procent (**tab. 7.2**).

7.3 Praktické zkušenosti s návrhem, provozem a využitím vzduchových zemních výměníků tepla

Za účelem shromáždění praktických informací o realizaci a provozu ZVT byl v rámci plánování odběrů zaslán jednotlivým majitelům jednoduchý dotazník, jehož cílem bylo zmapovat jejich objektivní i subjektivní zkušenosti. Otázky se týkaly zejména následujících informací:

- důvod realizace ZVT,
- termín realizace (uvedení do provozu) a přibližné investiční náklady,
- typ zemního výměníku (klasický, cirkulační), základní dimenze, okolní zemina,
- použitý potrubní systém,
- realizace kontrolní šachty, způsob čištění ZVT a řešení odvodu kondenzátu,
- přepínání sání z fasády do ZVT a nastavený teplotní interval,
- lokalita a okolní podmínky (vysoká hladina spodní vody, radon, ...),
- používaný větrací režim (provozní podmínky),
- řešení filtrace na vstupu do ZVT a ve větrací jednotce,
- údržba ZVT a větrací jednotky (frekvence výměny filtrů, čištění výměníků, ...),
- provozní problémy (zatékání vody, kumulace kondenzátu, ...),
- doporučení dalším investorům.

Výsledky tohoto krátkého průzkumu lze shrnout následovně:

- **Důvod realizace** – podle získaných odpovědí byly zemní výměníky zpravidla navrženy v rámci projektu, tj. na základě doporučení architekta či projektanta (26×); poměrně významná část uživatelů se nicméně pro jejich použití rozhodla na základě vlastního uvážení po nastudování dané problematiky (14×).
- **Stáří realizace** – v době provádění průzkumu (3.Q/2013) byla většina zemních výměníků v provozu 5 až 10 let (realizace do r. 2003: 5 ZVT; 2004 ÷ 2008: 24 ZVT; 2009 ÷ 2013: 16 ZVT); nejstarší dva zkoumané výměníky byly zprovozněny v r. 2000.
- **Druh ZVT** – z celkového počtu 46 zemních vzduchových výměníků pouze jeden umožňuje cirkulační chlazení interiérového vzduchu; naprostá většina je přímého (klasického) provedení, umožňujícího pouze nasávání větracího vzduchu. Kapalínové typy ZVT (v okolí Brna např. RD Habrovany [12]) nebyly do výzkumu zahrnuty.
- **Potrubní systém** – nejčastěji bylo použito plastové potrubí typu KG PVC (22×) nebo KG PP 2000 (12×), dále následuje REHAU Awadukt Thermo (8×); ve třech případech bylo použito potrubí Hekatherm EWT-R a u jednoho ZVT (MZK Brno) je vzduch nasáván přes vybetonovaný meziprostor (tzv. akumulární komoru) pod budovou.
- **Sání do ZVT** – většina oslovených majitelů má instalovanu T-tvarovku se servo-pohonem klapky pro řízené přepínání sání vzduchu dle nastavené venkovní teploty (28 ZVT); přímé sání (tj. sání pouze přes samotný zemní výměník) bylo zjištěno v cca 38 % případech (17 ZVT).
- **Teplota přepínání fasáda/ZVT** – přesné nastavení teplotního intervalu přepínání bohužel většinou majitelé neznají, jelikož je prováděl servisní technik při zprovoznění VZT systému. Teplota sání pro zimní předehřev byla uváděna nejčastěji 0 °C (5×), dále pak 5 °C (3×), 4 °C (2×), 2 °C (1×) a -5 °C (1×). Přepínací teplota pro letní předchlazení byla udávána následovně: 20 °C (3×), 22 °C (4×), 24 °C (3×) a 25 °C (2×).

- **Řešení odvodu kondenzátu** – naprostá většina výměníků má spádování potrubí do nějaké sběrné šachty, odkud se kondenzát samovolně odpařuje, příp. je jednou za čas odčerpáván mimo zemní výměník. Ve dvou případech se autor setkal také s řešením pomocí přirozeného vsaku do zeminy, přes šterkové lože v perforované kontrolní šachtě. Toto řešení nicméně nelze doporučit, jelikož se při zvýšené hladině spodní vody může do potrubní trasy dostat voda, případně může do domu pronikat i radon.
- **Filtrace na vstupu do ZVT** – pouze u šesti zemních výměníků tepla (tj. v 15 % případů) není řešena filtrace vzduchu na začátku potrubní trasy; v ostatních případech je instalován buď výměnný tkaninový filtr (26 ZVT – nejčastěji filtr třídy G4) nebo alespoň síťka pro zamezení vstupu hrubých nečistot (6 ZVT).
- **Umístění/lokalita** – monitorované zemní výměníky jsou vybudovány nejčastěji v okrajových částech velkých měst (např. Brno, Olomouc a Zlín) nebo menších městech (celkem 23×); uvnitř města 5× a na vesnici 12×.
- **Investiční náklady** – přesnou cenu za realizaci většina majitelů neudává (ZVT byl zpravidla součástí celého projektu); odhady jsou uváděny nejčastěji v rozmezí 15 000,– až 35 000,– Kč (7×) a 50 000,– až 80 000,– Kč (6×). U experimentálního ZVT se investiční náklady vyšplhaly až na cca 119 000,– Kč [47], to bylo ovšem způsobeno jednak dodatečnou realizací na již hotovém objektu a také unikátní konstrukcí celého zařízení.
- **Provozní režim** – zpravidla je uváděn kontinuální provoz rekuperační jednotky, kdy dokonce řada uživatelů nechává vzduchotechniku běžet celoročně na 1. nebo 2. stupeň s občasným přepnutím na nejvyšší (3.) stupeň (při vzniku větší zátěže, např. příchodu návštěvy). Setkat se lze i s přístupem vypínání nuceného větrání v letním období a větrání objektu přirozeným způsobem; v tomto případě však nemůžeme ZVT využít pro předchlazení větracího vzduchu – celkové využití investice pak klesá.
- **Údržba vzduchotechnického systému RD** – výměna filtrů ve větrací jednotce je prováděna nejčastěji 1× až 2× do roka (zpravidla před zimním obdobím a na konci jara), příp. jsou alespoň mechanicky očištěny (vyklepáním či vysátím; příp. vypráním samotné filtrační tkaniny). Autor se však setkal i s několika případy, kdy filtry nebyly po celou dobu několikaletého provozu měněny ani čištěny – viz např. **obr. 4.1**. Někteří majitelé u příležitosti výměny filtrů čistí i plastový rekuperační výměník tepla a podle možností vysají nebo omyjí i vnitřek VZT jednotky.
- **Údržba zemního výměníku** – samotné potrubí zemního výměníku většina uživatelů nečistí vůbec nebo jen velmi zřídka; pouze 8 ZVT bylo nějakým způsobem vyčištěno v období do 1 roku před mikrobiologickými odběry (tzn. v r. 2012). Do 2 let před odběry bylo pak vyčištěno 9 ZVT a do 3 let celkem 10 ZVT, což je jen ¼ z celkového počtu zkoumaných zařízení. Zbylá část výměníků byla vyčištěna jen před uvedením do provozu nebo nebyla čištěna vůbec. Pouze 5 majitelů uvedlo, že svůj ZVT čistí pravidelně alespoň 1× ročně – čištění je prováděno tlakovou vodou nebo párou (WAP), příp. proplachem dezinfekčním roztokem. Po provedení odběrů v létě r. 2013 se dva majitelé rozhodli své výměníky po dlouhé době vyčistit; tyto dva případy byly využity a bylo provedeno ještě druhé kolo odběrů, kvůli ověření vlivu čištění. Obecně se dá říci, že díky provedení mikrobiálního monitoringu se majitelé o stav svých zemních výměníků začali více zajímat, což je jistě ku prospěchu věci.
- **Provozní problémy** – jako častá provozní komplikace bývá udáváno zaplavení výměníku vodou, majitelé ji však přesně nedokáží rozeznat od přirozené tvorby kondenzátu. V 9 případech majitelé uvedli zaplavení ZVT povrchovou či spodní vodou, nejčastěji po příválových deštích nebo po jarním tání. V jednom případě musel být ZVT dokonce odpojen, protože se zateklou vodu nepodařilo zcela odčerpat. Dva majitelé také uvedli zamrznutí rekuperačního výměníku během provozu VZT jednotky, a to hlavně kvůli to-

mu, že jejich zemní výměník nebyl v provozu (vlivem poruchy nebo nesprávně nastaveného teplotního intervalu sání). Při odběrech byl také ve dvou případech detekován problém s přepínací T-klapkou, kdy vlivem její nefunkčnosti byl vzduch z fasády nasáván rovnou do větrací jednotky, i když měl být správně nasáván přes zemní výměník tepla. Jeden majitel občas zaznamenává viditelnou plíseň na sběrné vaně kondenzátu uvnitř větrací jednotky – to je z provozního hlediska zcela nepřijatelné, i když zvýšené znečištění vzduchu uvnitř budovy nebylo zaznamenáno. Majiteli lze nicméně doporučit, aby situaci dále sledoval a zejména zajistil správný odvod kondenzátu mimo větrací jednotku. Poslední zmiňovaný provozní problém nastal, při když pravidelném čištění potrubní trasy došlo k nechtěnému proříznutí plastového 90° kolena zabudovaným lanem, jenž táhlo připevněný čistící přípravek.

- **Celkové hodnocení** – převážná většina uživatelů hodnotí využití ZVT kladně (16× bylo uvedeno, že po získaných zkušenostech by si majitel zemní výměník do daného objektu pořídil znova). Nejčastěji je oceňován letní provoz, kdy v budovách s nízkou letní tepelnou zátěží dokáže ZVT po většinu času (s ohledem na jeho omezený chladicí výkon, jenž činí cca 1÷3 kW [75, 100]) vytvořit příjemné klima i bez využití dodatečné klimatizace. Jen 4× bylo uvedeno, že by si majitel již ZVT nepořídil (zejména kvůli vyšším investičním nákladům a složitější realizaci); v ostatních případech majitelé nedokáží zcela posoudit, zda je pro ně zemní výměník výhodný či ne.

Závěr

Předkládaná disertační práce se zabývá zemními výměníky tepla (ZVT), zejména vzduchového provedení, které se v České republice začaly ve větším rozsahu používat teprve cca od r. 2000 jako součást systémů teplovzdušného vytápění a větrání v nízkoenergetických, příp. energeticky pasivních domech. Jejich hlavní funkcí zde byla protimrazová ochrana následné rekuperační jednotky, založená na využití relativně stabilního teplotního rozvrstvení v dostatečné hloubce pod povrchem země, což při vynaložení minimálních provozních nákladů umožňuje předejít větracímu vzduchu v zimě a přechodných obdobích roku, resp. jeho předchlazení v létě. Letní provoz ovšem s sebou může přinést problém s mikrobiologickou kvalitou přiváděného vzduchu kvůli potenciální kondenzaci vzdušné vlhkosti na povrchu potrubí ZVT, která se může stát živnou půdou pro různé mikroorganismy. To bývá také investory uváděno jako hlavní důvod, proč zemní vzduchový výměník tepla nerealizovali.

Teoretická část práce se proto zabývá nízkoenergetickými a energeticky pasivními domy, teplovzdušnými vytápěcími systémy a zemními výměníky tepla, zejména z hlediska jejich návrhu. Dále pak kvalitou vnitřního prostředí budov a jejím hodnocením z mikrobiologického hlediska. V praktické části je popsán zjednodušený simulační model ZVT a některé jím získané výsledky, zejména vliv různých parametrů na dosahované energetické úspory a využití ZVT. Stěžejní částí práce jsou **kapitoly 6 a 7**. **Kapitola 6** popisuje experimentální vzduchový zemní výměník tepla v cirkulačním provedení, vybudovaný autorem s podporou projektu **FRVŠ G1/3206/2011** „Zemní výměník tepla jako nový prvek v technice prostředí“ na FSI VUT v Brně. Instalovaný měřicí a regulační systém umožnil získat cenné experimentální poznatky o chování ZVT, které doplnily doposud poměrně skoupé literární údaje. Na základě dlouhodobě měřených dat (2012-2014) lze konstatovat, že hlavní funkci ZVT (tj. protimrazovou ochranu následného výměníku ZZT) plní zařízení bez problémů; výstupní teploty vzduchu se pohybují spolehlivě nad bodem mrazu. Reálně naměřené tepelné výkony nicméně dosahují oproti zpracovaným energetickým simulacím nižších hodnot. To je způsobeno hlavně ne zcela vhodným typem zeminy, v níž je potrubí zemního výměníku uloženo. Přesto dosahuje vybudované zařízení příznivé provozní účinnosti – topný faktor COP se pohybuje (při

výpočtu výkonů z rozdílů teplot vzduchu) v rozmezí 5÷12, chladicí faktor EER pak v rozmezí 5÷9. V případě alternativního výpočtu z rozdílu entalpií vlhkého vzduchu (tzn. se započtením vlivu kondenzace, resp. vypařování vlhkosti) vykazují obě veličiny obdobné trendy, avšak s vyššími hodnotami. Získané výsledky navíc umožní zpřesnit návrh zemních výměníků tepla, resp. jejich energetické simulace.

Hlavním přínosem disertační práce je však monitoring mikrobiálního znečištění několika desítek již provozovaných vzduchových zemních výměníků tepla, a to pomocí dvou metod odběru vzorků: 1) stěrem z povrchu potrubí ZVT, 2) sedimentací bioaerosolu na Petriho misky s živnou agarovou půdou. Vzorky byly následně kultivovány a vyhodnoceny ve specializované laboratoři IFCOR-99 v Brně; hodnocen byl počet narostlých kolonií (tzv. CFU – Colony Forming Unit). Metoda stěrů, zvolená pro pilotní studii, se pro hodnocení mikrobiologického znečištění ZVT ukázala jako nevhodná; navíc zde bylo zastoupeno poměrně malé množství zařízení. Zastoupeny zde byly tři rozdílné potrubní systémy: **KG PVC** (25 vzorků), **KG PP** (11 vzorků) a **PP Rehau** s antimikrobiální úpravou (10 vzorků). Zařízení se nacházela v různých lokalitách (uvnitř a mimo město, na vesnici), s různým přístupem k filtraci nasávaného vzduchu (výměníky bez filtru, s filtrem či pouze se sítkou) i k údržbě vzduchotechnického systému. V potrubích byly detekovány běžné vzdušné a půdní mikroorganismy rodu *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium* a *Mucor*. U vzorků odebraných ze dvou výměníků (č. 7 a 11) se objevily kvasinky rodu *Rhodotorula*. Přesné zařazení do příslušných rodů se kvůli omezenému rozpočtu u dalších vzorků neprovádělo. Pilotní studie nepotvrdila výrazně nižší koncentrace znečištění u výměníků realizovaných ze speciálního potrubí **PP Rehau** (s antimikrobiální úpravou povrchu); stáří zemních výměníků se na výsledcích také téměř neprojevovalo.

Pro další etapu mikrobiologického monitoringu – sedimentační metodu – se podařilo zajistit i další typ plnostěnného potrubí – **KG PP**. Odběry byly prováděny na vstupu do vzduchotechnické jednotky (tj. na výstupu ze ZVT), ve venkovním prostředí (poblíž místa nasávání vzduchu do ZVT) a v nejvíce frekventované místnosti domu (podle určení majitele). Souběžně s odběry byly měřeny okolní podmínky a – alespoň přibližně – i průtok vzduchu v ZVT. U odběrů z VZT jednotky se počet narostlých kolonií přepočtl na 1000 m³ nasátého vzduchu pro alespoň přibližné porovnání dosažených výsledků mezi sebou. Z počtu vykultivovaných mikroorganismů v interiéru a exteriéru se pak stanovila relativní míra mikrobiálního znečištění uvnitř budovy. Ve vnitřním prostředí bylo ve většině případů zjištěno podstatně nižší znečištění než venku. V několika případech však zde byly vykultivovány potenciální patogeny; jednalo se nicméně o „běžné“ půdní a vzdušné mikroorganismy (nejčastěji rodu *Penicillium*, *Mucor* a *Aspergillus*, konkrétně druhy *flavus*, *fumigatus* a *versicolor*). Ve dvou případech (výměníky s „postříbřeným“ potrubím **PP Rehau**) se podařilo odebrat vzorky před a po vyčištění trasy zemního výměníku; bylo tak možno zběžně posoudit vliv čištění na kvalitu přiváděného vzduchu. Výsledky prvotně naznačují snížení znečištění ve VZT jednotce cca na 1/2 až 2/3 původních hodnot. Přihlédneme-li však k nízkým koncentracím mikrobiálního znečištění experimentálního výměníku FSI VUT (jenž nebyl čištěn) v přibližně stejném období, lze dosažené výsledky připsat spíše přirozenému poklesu mikrobiologického znečištění vzduchu v podzimních měsících roku; čištění má zřejmě až druhotný význam. Další příčinou může být kontinuální sání vzduchu přes zemní výměník – spory tak nemají čas se na povrchu potrubí usadit a začít se rozmnožovat. Nárůst mikrobiálního znečištění vlivem delší doby provozu se taktéž neprokázal; přitom pouze jen asi 1/3 z celkového počtu 35 zkoumaných výměníků byla od svého uvedení do provozu nějakým způsobem čištěna. U výměníků realizovaných z potrubí **PP Rehau** byly ve větrací jednotce nečekaně naměřeny vyšší měrné koncentrace než u „obyčejného“ potrubí **KG PVC**. Relativní míra mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy – která je pro uživatele nejpodstatnější – však byla u tohoto speciálního potrubí nejnižší. Druhá nejnižší byla v průměru dosažena u potrubí

KG PP, až poté následovalo **KG PVC**. Relativní míra znečištění se však u převážné části monitorovaných budov pohybovala pod hranicí 0,5 – znamená to, že uvnitř bylo ve většině případů podstatně nižší znečištění než venku, což dokazuje obecné tvrzení o pozitivním vlivu mechanického větrání na kvalitu vnitřního prostředí.

Metodický pokyn pro hodnocení mikrobiologického znečištění ZVT doposud neexistuje; relevantní hodnocení mikrobiální kvality vnitřního prostředí (odpovídající *Vyhlášce MZ č. 6/2003 Sb.*) by bylo nutné provést na základě aktivního nasávání vzduchu aeroskopem – zcela jednoznačný názor o vlivu zemních výměníků tepla na kvalitu vnitřního prostředí budov proto zatím nelze vyslovit. Použitá sedimentační metoda odběru vzorků se nicméně podle názoru autora předepsané metodě blíží. Na základě získaných výsledků tedy konstatuje, že monitorované zemní výměníky nepředstavují riziko zvýšení mikrobiálního znečištění interiéru budov – a to navzdory tomu, jak uživatelé přistupují k údržbě (resp. spíše neúdržbě) celého VZT řetězce. Tomu může mj. napomáhat kontinuální sání vzduchu přes zemní výměník (tzn. trvalé proudění vzduchu potrubím), které mnozí uživatelé provozují.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle disertační práce, vymezené při státní doktorské zkoušce, byly zcela splněny. Za hlavní přínos práce považuje autor především výsledky mikrobiologického monitoringu vzduchových zemních výměníků tepla, který nebyl dosud v podmínkách ČR proveden. Dílčí výsledky práce byly rovněž součástí řešení následujících projektů, na nichž se autor během doktorského studia podílel:

- hlavní řešitel projektu **FRVŠ G1/3206/2011** „*Zemní výměník tepla jako nový prvek v technice prostředí*“,
- hlavní řešitel juniorského projektu specifického výzkumu VUT v Brně **FSI-J-12-24** „*Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy*“,
- spoluřešitel projektu **GAČR 101/09/H050** „*Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí*“,
- spoluřešitel projekt specifického výzkumu VUT v Brně **FSI-S-11-6** „*Komplexní modelování interakce člověka a prostředí v kabinách dopravních prostředků a obytných prostorech a návrhové nástroje (tzv. Human Centered Design)*“.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřevádění) [online]. Strasbourg, 2010 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:CS:PDF>.
- [2] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Úsporné zdroje energie: informační list o pasivních domech [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-08-12]. Dostupné z: http://www.pasivnidomy.cz/data/09_Zdroje_energie.pdf.
- [3] TYWONIAK, Jan. Nízkoenergetické domy 3: nulové, pasivní a další. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 195 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3832-1.
- [4] NAGY, E. Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům. Bratislava: Jaga group, 2009, 207 s. ISBN 978-80-8076-077-9.
- [5] FEIST, W. Nízkoenergetický dům: Úspory energie v bytové výstavbě budoucnosti. Ostrava: HEL, 1994, 184 s.
- [6] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Větrání a teplovzdušné vytápění: informační list o pasivních domech [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-08-12]. Dostupné z: http://www.pasivnidomy.cz/data/06_Vetrani_vytapeni.pdf.
- [7] ATREA s.r.o., Prospekt teplovzdušné vytápění, větrání s rekuperací tepla [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/ke-stazeni-divize-vetrani-teplovzduzne-vytapeni-rodinnych-domu-bytu>.
- [8] ATREA s.r.o., Zemní výměník tepla [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/ke-stazeni-divize-vetrani-teplovzduzne-vytapeni-rodinnych-domu-bytu>.
- [9] ATREA s.r.o., Zemní výměník tepla – provedení „Solanka“ [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/ke-stazeni-divize-vetrani-teplovzduzne-vytapeni-rodinnych-domu-bytu>.
- [10] BEDNÁŘOVÁ, Petra a Jana KREJSOVÁ. Zdravé domy pro zdravé lidi. 1. vyd. V Českých Budějovicích: Vysoká škola

technická a ekonomická, 2008, 116 s. ISBN 978-80-903888-9-5.

- [11] Hrazdilová, Marie. Zdravé bydlení. Pasivní domy 2005, Vyd. 1. Brno: Centrum pasivního domu, 2005.
- [12] Centrum pasivního domu: Databáze pasivních domů v České republice. [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/katalog-pasivnich-domu>.
- [13] Chichmanov, Ivan. Zemní kolektor – nový prvek v systémech řízeného větrání budov [online]. [cit. 2012-08-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2047-zemni-kolektor-novy-prvek-v-systemech-rizeneho-vetrani-budov>.
- [14] Rehau: AWADUKT Thermo, Systém tepelné výměny vzduchu s využitím teploty země pro kontrolovatelné větrání objektů [online]. [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: http://www.lonicera.cz/_foto/60789_AWADUKT_Thermo_CZ-komplet.pdf.
- [15] Eicker, U. at al. Limits and potentials of office building climatisation with ambient air. Energy and Buildings, Volume 38, Issue 6, June 2006, Pages 574–581.
- [16] Hollmuller, Pierre, Lachal, Bernard. BURIED PIPE SYSTEMS WITH SENSIBLE AND LATENT HEAT EXCHANGE: VALIDATION OF NUMERICAL SIMULATION AGAINST ANALYTICAL SOLUTION AND LONG-TERM MONITORING. 9th Conference of International Building Performance Simulation Association, Ecole polytechnique de Montréal: August 15-18 2005, pp. 411-418.
- [17] KOPECKÝ, Pavel. Hygro-thermal performance of earth-to-air heat exchangers: numerical model, analytical and experimental validation, measurements in-situ, design. Praha, 2008, 137 s. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Tywoniak, CSc.
- [18] TYWONIAK, Jan. Sledování energetických vlastností pasivních domů. 1. vyd. Praha: Grada pro Katedru konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, 2012. ISBN 978-80-247-4277-9.
- [19] BÁRTA, Jan. Základní principy konceptu pasivního domu. Pasivní domy 2005: 18.-19.10.2005 Brno. Vyd. 1. Brno: Centrum pasivního domu, 2005.
- [20] PREGIZER, D. Zásady pro stavbu pasivního domu. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 126 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-2431-7.
- [21] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Podklady pro Kurz Navrhování pasivních domů, 2. část - Vytápění a větrání. Brno: CPD, 10. Října 2012.
- [22] NAGY, E. Nízkoenergetický ekologický dům. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2002, 289 s. ISBN 80-889-0574-5.
- [23] DANIELS, Klaus. Technika budov: příručka pro architekty a projektanty. 1. čes. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 519 s. ISBN 80-889-0563-X.
- [24] SZÉKYOVÁ, Marta. Větrání a klimatizace. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2006, 359 s. ISBN 80-807-6037-3.
- [25] ATREA s.r.o., Teplovzdušné vytápění, větrání a chlazení [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/teplvzduzne-vytapeni-vetrani-a-chlazení>.
- [26] PETRÁŠ, Dušan. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2008, 207 s. ISBN 978-80-8076-069-4.
- [27] NILAN s.r.o. – Poradna – Pasivní a aktivní rekuperace [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/poradna/pasivni-a-aktivni-rekuperace.htm>.
- [28] NILAN s.r.o. – Produkty – Pasivní rekuperace vzduchu [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/produkty/pasivni-rekuperace>.
- [29] NILAN s.r.o. – Produkty – Aktivní rekuperace vzduchu [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/produkty/aktivni-rekuperace>.
- [30] TAUSH, s.r.o. – Kompaktní jednotky Drexel und Weiss [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.taush.cz/produkty/komfortni-ventilace-s-rekuperaci-tepla/kompaktni-jednotky>.
- [31] ADAN - úspory energie, s.r.o. Posuzování protimrazové ochrany a její výběr [online]. [cit. 2012-08-14]. Dostupné z: http://www.adan.cz/files/ADAN_vyber_protimrazove_ochrany.pdf.
- [32] KOLBÁBEK, A. Energetická simulace vlivu zemního výměníku tepla na provoz rekuperační jednotky teplovzdušného vytápění. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Dr. ing. Michal Jaroš.
- [33] VRÁNA, J. Technická zařízení budov v praxi. 1. vyd. Praha: Grada, 2007, 331 s. ISBN 978-80-247-1588-9.
- [34] Salah, El-Din M. M. On the heat flow into the ground. Renewable En., Vol. 18, Issue 4, December 1999, Pages 473–490.
- [35] OLEŠKOWICZ-POPIEL, Czesław, WOJTKOWIAK, Janusz, PRĘTKA, Ilona. Effect of surface cover on ground temperature season's fluctuations, FOUNDATIONS OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. No. 2. 2002.
- [36] Florides, Georgios, Kalogirou, Soteris. Measurements of Ground Temperature at Various Depths. Proceedings of the SET 2004, 3rd. International Conference on Sustainable Energy Technologies, Nottingham, UK.
- [37] Pouloupatis, P. D., Florides, G., Tassou, S. Measurements of ground temperatures in Cyprus for ground thermal applications. Renewable Energy, Volume 36, Issue 2, February 2011, Pages 804–814.
- [38] Frkal, Luděk. Domy chráněné zemí. Vyd. 2. Brno: Computer Press, 2009, vii, 94 s. ISBN 978-80-251-2745-2.
- [39] Michael, Klaus. Zemní výměník tepla k předehřívání vzduchu v zimě a předchlazení vzduchu v létě. Pasivní domy 2007, Vyd. 1. Brno: Centrum pasivního domu, 2007. ISBN: 978-80-254-0126-2.
- [40] Georgios, Florides, Soteris, Kalogirou. Ground heat Exchanges – A review of systems, models and applications. Renewable Energy, Volume 32, Issue 15, December 2007, Pages 2461-2478.

- [41] Eberhard, Paul. Využití zemních výměníků tepla ve spojení se zařízením pro bytové větrání a rekuperaci tepla [online]. [cit. 2012-08-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2772-vyuziti-zemnich-vymeniku-tepla-ve-spojzeni-se-zarizenim-pro-bytove-vetrani-a-rekuperaci-tepla>.
- [42] TYWONIAK, J. Nízkoenergetické domy: principy a příklady. 1. vyd. Praha: Grada, 2005, 193 s. ISBN 80-247-1101-X.
- [43] MORÁVEK P. Nový systém teplovzdušného vytápění s řízeným větráním obytných budov a jeho výpočtový model. In: Sborník konf. „Klimatizace a větrání 2004“. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2004, s. 245–259.
- [44] Thevenard, Didier. Bibliographic Search on the Potential of Earth Tubes. Numerical Logics Inc. Canada: 2007.
- [45] JOKL, M.. Zdravé obytné a pracovní prostředí. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002, 261 s. ISBN 80-200-0928-0.
- [46] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Nový experimentální zemní výměník tepla FSI VUT. In 20. konference Klimatizace a větrání 2012. Praha: STP, 2012. s. 93-98. ISBN: 978-80-02-02375- 3.
- [47] JAROŠ, M.; KOLBÁBEK, A. Nový experimentální zemní výměník tepla FSI VUT [online]. [cit. 2014-07-13]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-rodinnych-domu/9501-novy-experimentalni-vymenik-tepla-fsi-vut>. TZB-info, 2013, roč. 2013, č. 3, ISSN: 1801- 4399.
- [48] ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o., Zemní kapalinový výměník ED-KZ-R [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/zemni-kapalinovy-vymenik-ed-kz-r>.
- [49] KOPECKÝ, Pavel. Návrh dimenzí zemních výměníků tepla. Vytápění, větrání, instalace 3 (2008), s 124-128.
- [50] TRNSYS 16.1, Manuál k simulačnímu programu.
- [51] Zukowski, Mirosław. ASSESSMENT OF THE COOLING POTENTIAL OF AN EARTH-TUBE HEAT EXCHANGER IN RESIDENTIAL BUILDINGS. The 8th International Conference ENVIRONMENTAL ENGINEERING, May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania, ISSN 2029-7092 online.
- [52] Hybrid Energy Systems in Future Low Carbon Buildings - Earth to air heat exchange through buried pipes [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/09-10/Hybrid_systems/earthtoair.htm.
- [53] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Vliv vstupních klimatických dat na výsledky energetické simulace zemního výměníku tepla. In Alternativní zdroje energie 2012. Kroměříž: STP, 2012. s. 149-157. ISBN: 978-80-02-02393- 7.
- [54] De Paepe, M., Janssens, A. Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. Energy and Buildings, Volume 35, Issue 4, May 2003, Pages 389–397.
- [55] Mihalakakou, G. at al. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. Solar Energy, Vol. 60, Issue 3–4, March–April 1997, Pages 181–190.
- [56] Mihalakakou, G., at al. On the heating potential of buried pipes techniques - application in Ireland. Energy and Buildings, Volume 24, Issue 1, 1996, Pages 19–25.
- [57] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Kvalita vnitřního prostředí: informační list o pasivních domech [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-08-12]. Dostupné z: http://www.pasivnidomy.cz/data/07_Kvalita_vnitriho_prostredi.pdf.
- [58] Morávek, Petr. Mikroklima pasivních domů. Pasivní domy 2006, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2006.
- [59] HESELTINE, Elisabeth a Jerome ROSEN. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Copenhagen: WHO, c2009, xvi, 228 p. ISBN 978 92 890 4168 3.
- [60] WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. Copenhagen: WHO, c2010, xxv, 454 p. ISBN 92-890-0213-1.
- [61] Clausen, Geo. Ventilation, good indoor air quality and rational use of energy: Report No. 23. prep. by Working Group 16. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. ISBN 92-894-5664-7.
- [62] RULÍK, Martin. Mikrobiální biofilmy. 1. vyd. Olomouc: UP v Olomouci, 2011, 447 s. ISBN 978-80-244-2747-8.
- [63] BROTKOVÁ, Klára a Aleš BROTÁNEK. Jak se žije v nízkoenergetických a pasivních domech. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 300 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3969-4.
- [64] Sanace plísní v bytech: program MPO ČR na podporu výzkumu a vývoje "regenerace panelových domů". 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2001, 43 s. ISBN 80-86364-54-2.
- [65] Wanner H. U. Biological particles in indoor environments: Report No. 12. prep. by Working Group 5. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1993.
- [66] Kohoutová, Jarmila. Klimatizace – Zdravotní rizika a prevence. Interní medicína pro praxi 2008; 10(5), s. 231-232.
- [67] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. ze dne 16. prosince 2002, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb.
- [68] Klánová, Kateřina. Standardní operační postupy pro vyšetřování mikroorganismů v ovzduší a pro hodnocení mikrobiologického znečištění ovzduší ve vnitřním prostředí, Acta hygienica, epidemiologica et microbiologica číslo 1/2002, Praha: SZÚ 2002, ISSN 0862-5956.
- [69] Parat, Sylvie at al. Multivariate analysis comparing microbial air content of an air-conditioned building and a naturally ventilated building over one year. Atmospheric Environment, Vol. 31. No. 3, pp 441-449, 1997.
- [70] Lu, Z., at al. Microorganisms and particles in AHU systems: Measurement and analysis. Building and Environment, Volume 44, Issue 4, April 2009, Pages 694–698.
- [71] Li, Angui, at al. Experimental study on microorganism ecological distribution and contamination mechanism in supply air ducts. Energy and Buildings, Volume 47, April 2012, Pages 497–505.

- [72] Chao, Hsing Jasmine at al. Dustborne fungi in large office buildings. *Mycopathologia* 154: 93–106, 2001.
- [73] Korpi, Anne at al. Microbial growth and metabolism in house dust. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 40, No. 1 (1997) 19-27.
- [74] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Vliv provozních režimů zemních výměníků tepla na možné riziko vzniku plísní. In *Budovy a prostředí 2010*. Brno: 2010. s. 187-193. ISBN: 978-80-214-4155-2.
- [75] JAROŠ, M.; KOLBÁBEK, A. Energetický a ekonomický přínos zemního výměníku tepla v teplovzdušném vytápěcím systému s rekuperací. *Vytápění, větrání, instalace*, 19 (5): 222–228, 2010. ISSN: 1210-1389.
- [76] ing. Pavel Kopecký, PhD. - ČVUT Praha - osobní emailová komunikace ze dne 2011-11-07.
- [77] Wasserbauer, R. - Kopecký, P. - Ryparová, P. - Mikroflóra zemních výměníků tepla, In: XVI. mezinárodní konference ekologie a nové stavební hmoty a výrobky. Brno: VUSTAH - Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012, s. 124-127. ISBN 978-80-87397-11-4.
- [78] Flückiger Barbara. Microbial investigations and allergen measurements in ground-coupled earth-to-air heat exchangers. 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, UK, Garston, BRE 1999.
- [79] Flückiger Barbara at al. Hygienic Aspects of Ground-coupled Air Systems. *Indoor Air* 1998; 8: 197–202, ISSN 0905-6947.
- [80] Flückiger, Barbara at al. Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1997.
- [81] Kopecký, Pavel. Zemní výměník tepla – vyhodnocení měřených dat a tepelně-vlhkostní simulace. *Pasivní domy 2007*, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2007. ISBN: 978-80-254-0126-2.
- [82] Münzenberg, Uwe, Thumulla, Jörg. Kvalita vzduchu v místnostech pasivních domů. [online]. [cit. 2012-08-20]. Dostupné z: http://www.enviros.cz/udrzitelna_vystavba/nizkoenergeticka_a_nizkonakladova_vystavba/studentstva_soutez/2007/Bernd-Woters/CZ-Mz.pdf.
- [83] Bhattarai, Rabindra Nath at al. Use of earth air tunnel HVAC system in minimizing indoor air pollution. *Air Quality Monitoring and Management, proceedings of Better Air Quality 2004*.
- [84] Stahl, Fredrik. Preheating of supply air through an earth tube system - Energy demand and moisture consequences. 6th Nordic Symposium, Building Physics 2002.
- [85] GIESELER, U. D. J., at al. Cost efficiency of ventilation systems for low-energy buildings with earth-to-air heat exchange and heat recovery. *Proceedings of the Intern. Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, Toulouse (2002), pp. 577-582.
- [86] JAROŠ, M.; KOLBÁBEK, A. Vliv zemního výměníku tepla na provoz rekuperační jednotky teplovzdušného vytápění. In 19. konference Klimatizace a větrání 2010. Praha: STP, 2010. s. 55-62. ISBN: 978-80-02-02202-2.
- [87] INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 4th ed. New York: Wiley, 1996, xxiii, 886 s. ISBN 04-713-0460-3.
- [88] Kolbábek, A.; Jaroš, M. Experimentální vzduchový zemní výměník tepla a jeho technické provedení. In 31. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky 2012. Mikulov: VUT v Brně, 2012. s. 107-110. ISBN: 978-80-214-4529-1.
- [89] Ing. Martin Hendrich - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o. - osobní emailová komunikace ze dne 2016-02-16.
- [90] Kolbábek A., Podklady k juniorskému projektu VUT v Brně: FSI-J-12-24 „Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy“.
- [91] ČHMÚ - Historická data - Měsíční data [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_9_Mesicni_data&last=false.
- [92] ČHMÚ - Aktuální informace o počasí na části území České republiky - [online]. [cit. 2014-07-18]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/PR/grafy/br/grafy-ams-lnk.htm>.
- [93] Meteonorm, Meteonorm Software [online] [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.meteonorm.com/en>.
- [94] Energy+, Energy Simulation Software – Weather Data, Europe WMO Region 6: Czech Republic [online] [cit. 2012-08-25]. Dostupné z: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=CZE/cname=Czech%20Republic.
- [95] Kopecký, Pavel. K energetickému přínosu zemního výměníku tepla. *Pasivní domy 2006*, Vyd.1. Brno: CPD, 2006.
- [96] Kolbábek A., Podklady k projektu FRVŠ G1/3206/2011 „Zemní výměník jako nový prvek v technice prostředí“.
- [97] doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D. - Ústav geotechniky, FAST VUT v Brně - emailová komunikace ze dne 2012-03-10.
- [98] BIELIK, J. Měřicí a regulační systém vzduchového zemního výměníku tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.
- [99] Klinické laboratoře IFCOR-99, s.r.o. [online]. [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.ifcor.cz>.
- [100] JINDRÁK, M. Vnitřní prostředí EPD – zkušenosti z čtyřletého provozu. In: *Pasivní domy 2008*. Brno: Centrum pasivního domu, 2008, s. 379–384.

Abstrakt

Předkládaná disertační práce se zabývá zemními výměníky tepla (ZVT) a jejich vlivem na hygienickou kvalitu přiváděného vzduchu a mikrobiální mikroklima v interiéru budov. V teoretické části práce je uveden současný stav poznání v oblasti teplovzdušného vytápění, resp. větrání nízkoenergetických a pasivních domů a zemních výměníků tepla se zaměřením na větrací systémy rodinných domů. Další kapitola se zabývá kvalitou vnitřního prostředí budov a vlivem vzduchotechnických systémů na toto mikroklima.

V experimentální části práce jsou prezentovány některé výsledky simulace provozu vzduchového zemního výměníku tepla, získané s využitím zjednodušeného modelu, a data z dlouhodobého monitoringu experimentálního ZVT, vybudovaného v rámci práce na FSI VUT v Brně. Dále jsou vyhodnoceny výsledky mikrobiologického výzkumu několika desítek již provozovaných vzduchových zemních výměníků tepla, provedeného s využitím dvou různých metod odběru vzorků – pomocí stěrů ze stěny potrubí a sedimentační (gravimetrickou) metodou. V závěru jsou uvedeny praktické zkušenosti uživatelů i poznatky autora, týkající se návrhu, provozu a využití vzduchových zemních výměníků tepla.

Summary

This thesis deals with the Air to Ground Heat Exchangers (AGHEX) and their effects on the hygienic quality of the supplied air and the microbial microclimate in the interior of buildings. The theoretical part focuses on current findings and knowledge in the field of warm air heating, ventilation of the low-energy and energy passive houses and ground heat exchanger for the ventilation systems to family houses. The next chapter deals with the quality of the indoor environment and the influence on HVAC systems on the building microclimate.

The experimental part of the thesis presents the results of energy simulations of operation of air to ground heat exchanger, obtained using the simplified model, and the data from long-term monitoring of experimental AGHEX built at FME BUT. Furthermore, the results of microbiological research of several already operating air to ground heat exchangers are evaluated. The research was carried out using two different sampling methods: the method using swabs taken from the pipe wall, and the sedimentation (gravimetric) method. The conclusion part mentions the practical experiences of users and knowledge of the author relating to the design, operation and use of air to ground heat exchangers.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje:

Jméno a příjmení **Antonín Kolbábek**
 E-mail Antonin.Kolbabek@spoluzaci.cz
 Telefon +420 604 555 208
 Datum narození 19. července 1985
 Národnost Moravská



Vzdělání:

Datum **2009 – dosud**
 Stupeň Doktorský
 Obor Konstrukční a procesní inženýrství
 Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Datum **2007 – 2009**
 Stupeň Magisterský
 Obor Technika prostředí
 Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Datum **2004- 2007**
 Stupeň Bakalářský
 Obor Strojní inženýrství
 Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Pracovní zkušenosti:

Datum **2013 – dosud**
 Pozice Samostatný zkušební technik
 Organizace Strojírenský zkušební ústav, s.p. (Brno)
 Obor činnosti Zkušebnictví, certifikace, přednášková činnost
 Hlavní aktivity Tepelná čerpadla, HVAC, akustika

Projekty Spolupráce na projektu GAČR 101/09/H050 "Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí"
 Spolupráce na projektu FSI-S-11-6 "Komplexní modelování interakce člověka a prostředí v kabinách dopravních prostředků a obytných prostorách a návrhové nástroje" (tzv. *Human Centered Design*)
 Hlavní řešitel projektu FRVŠ 3206 "Zemní výměník tepla jako nový prvek v technice prostředí"
 Hlavní řešitel juniorského projektu FSI-J-12-24 "Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy"

Mimo pracovní aktivity člen Společnosti pro techniku prostředí (od r. 2010)
 člen Občanského sdružení Zelené bydlení/člen správní rady (od r. 2011)

Dovednosti:

PC MS Office, Auto CAD, TRNSYS
 Jazyky Čeština, Angličtina