



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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Antonín Kolbábek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

BRNO 2016



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.

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

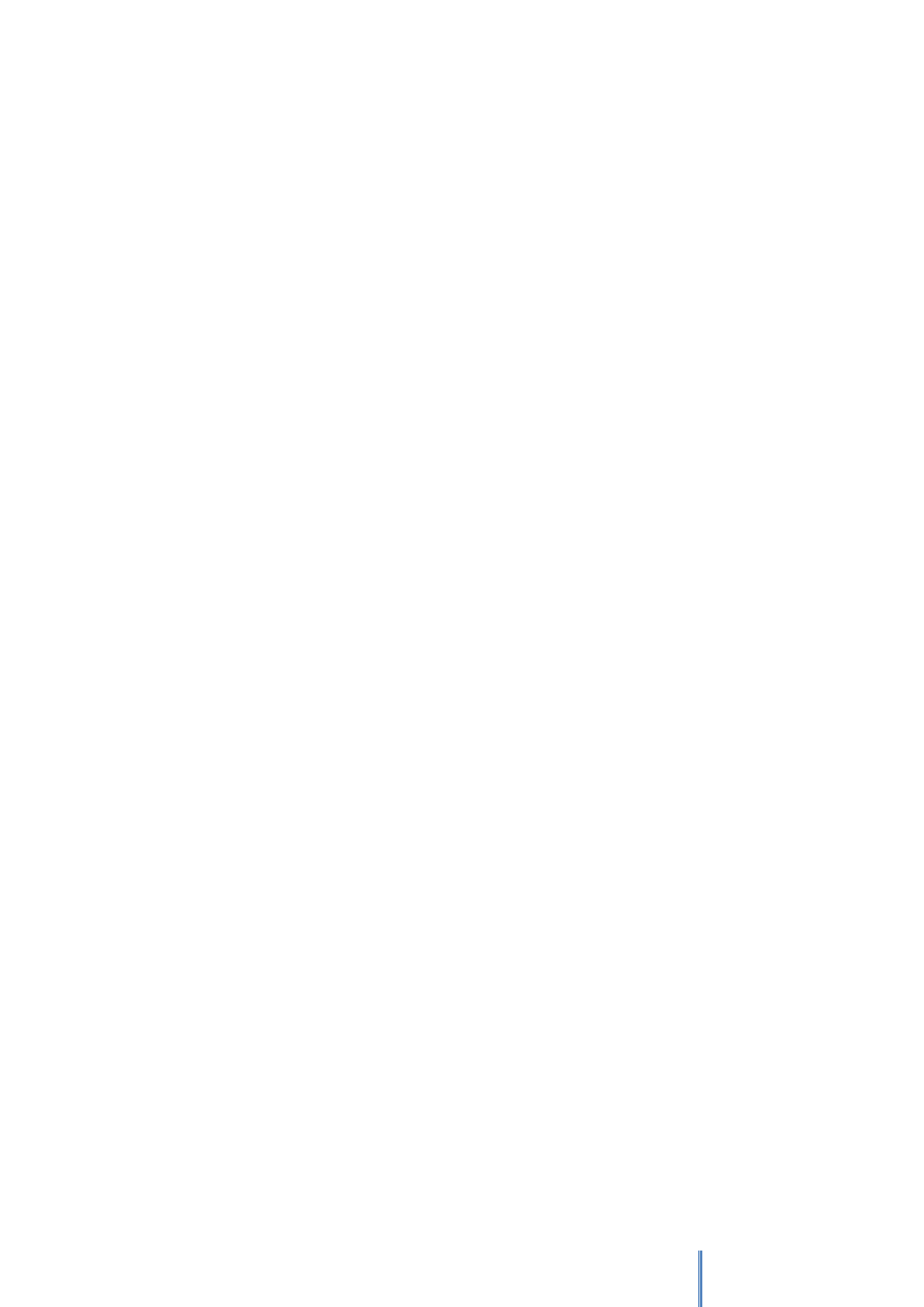
KOLBÁBEK, A. Zemní výměníky tepla – provozní režimy a jejich vliv na mikrobiologická rizika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 190 s., 18 s. příloh
Vedoucí disertační práce doc. Dr. Ing. Michal Jaroš.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci Zemní výměníky tepla – provozní režimy a jejich vliv na mikrobiologická rizika vypracoval samostatně pod vedením školitele **doc. Dr. Ing. Michala Jaroše** a školitele specialisty **prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D.**, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 13. října 2016

.....
Ing. Antonín KOLBÁBEK



Poděkování

Děkuji svému školiteli **doc. Dr. Ing. Michalu Jarošovi** za konzultace, odborné vedení, cenné rady a připomínky a také za trpělivost, kterou mě zasvětil do problematiky vědecké činnosti. Za totéž bych rád poděkoval i školiteli specialistovi **prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D.**, který mi taktéž vždy rád věnoval svůj čas.

Děkuji také **prof. Ing. Miroslavu Jíchovi, CSc.** a **prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc.** za možnost účastnit se řešení jejich vědeckých projektů, které přispěly ke zdárné realizaci experimentálního zemního výměníku tepla FSI VUT v Brně.

Můj dík patří rovněž **RNDr. Boženě Jandové, CSc.** z mikrobiologické laboratoře *IFCOR 99, s.r.o. – pobočka Brno*, která vyhodnocovala všechny odebrané terénní vzorky a s níž jsem mnohokrát konzultoval problematiku mikrobiologické části této práce.

Chci poděkovat i všem kolegům z FSI VUT v Brně, s nimiž jsem konzultoval dílčí úkoly práce či otázky vědecké činnosti, především **doc. Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D.**, jehož připomínky byly pro mne vždy přínosné a inspirující.

Zejména však musím vřele poděkovat **všem majitelům** zemních výměníků tepla, s nimiž jsem spolupracoval a bez jejichž vstřícnosti by tato práce nemohla vzniknout. Dík patří také všem, kteří byli tak laskavi a poskytli mi cenné kontakty na majitele zemních výměníků v ČR.

V neposlední řadě děkuji své **rodině** za finanční a morální podporu po čas celého studia i **přátelům**, kteří mi v průběhu studia byli oporou.

Ing. Antonín KOLBÁBEK



Věnování

Tuto práci bych rád věnoval k uctění památky pana **Dr. Ing. Josefa Příhody** (1952-2008), ředitele VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou v letech 1999-2008. Ten mě jako první – při mém studiu oboru strojírenství na průmyslovce, kterou v té době vedl – přivedl k vědecké činnosti, a to při řešení několika studentských projektů, za což mu patří velký dík. Jeho nápady a vize byly nadčasové a pro mne (jako začínajícího studenta techniky) velmi podnětné; zejména v oblasti alternativních a obnovitelných zdrojů energie byly jeho plánované projekty vždy krokem vpřed.

Čest jeho památce!





Obsah

OBSAH	11
VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	13
1 ÚVOD.....	15
2 NÍZKOENERGETICKÉ A ENERGETICKY PASIVNÍ DOMY.....	19
2.1 Teplovzdušné vytápění a větrání	20
2.2 Zpětné získávání tepla	22
2.3 Protimrazová ochrana VZT zařízení.....	25
3 ZEMNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA PRO VZDUCHOTECHNICKÉ SYSTÉMY BUDOV	29
3.1 Vzduchový typ zemního výměníku tepla – základní koncepce, používané komponenty a uspořádání.....	30
3.2 Přímé provedení vzduchového ZVT.....	36
3.3 Cirkulační provedení vzduchového ZVT	36
3.4 Hybridní provedení vzduchového ZVT	38
3.5 Kapalinové zemní výměníky	38
3.6 Návrh vzduchových zemních výměníků tepla	39
3.7 Teplota zeminy	41
4 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ BUDOV	45
4.1 Vliv intenzity větrání.....	45
4.2 Mikrobiální mikroklima a vzduchotechnika	47
4.3 Možné mikrobiologické riziko vzduchových ZVT	49
4.4 Radonová problematika ZVT	50
5 ZJEDNODUŠENÝ MODEL ZVT	53
5.1 Základní popis modelu a zjednodušující předpoklady.....	53
5.2 Meteorologická data – klimatické databáze	56
5.3 Výpočetní postup	62
5.4 Vliv materiálu potrubí	68
5.5 Výsledky energetických simulací.....	72

6 EXPERIMENTÁLNÍ ZEMNÍ VZDUCHOVÝ VÝMĚNÍK TEPLA NA FAKULTĚ STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNĚ	77
6.1 Základní popis zařízení a jeho realizace	78
6.2 Provozní režimy.....	90
6.3 Dlouhodobý monitoring provozních parametrů ZVT	94
7 MIKROBIOLOGICKÝ PRŮZKUM VZDUCHOVÝCH ZEMNÍCH VÝMĚNÍKŮ TEPLA	127
7.1 Metoda stěrů	130
7.2 Gravimetrická metoda.....	136
7.3 Diskuse.....	151
8 PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI S NÁVRHEM, PROVOZEM A VYUŽITÍM VZDUCHOVÝCH ZEMNÍCH VÝMĚNÍKŮ TEPLA	153
8.1 Dotazníková studie.....	153
8.2 Příklady realizací ZVT a poznatky z jejich provozu	156
9 ZÁVĚR	173
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	177
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	181
SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ	189
PŘÍLOHY	191

Vymezení cílů disertační práce

Na základě závěrů státní doktorské zkoušky lze dílčí cíle disertační práce formulovat do následujících bodů:

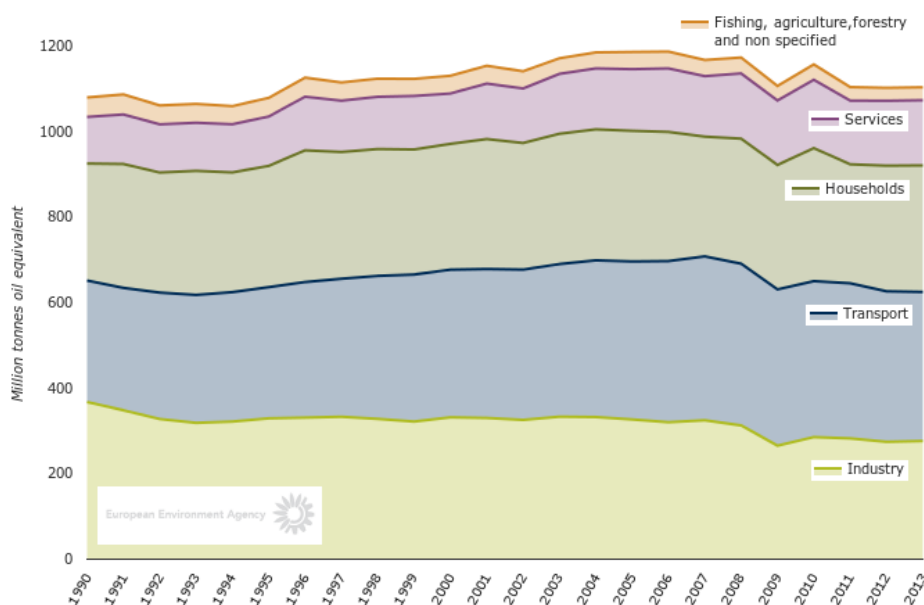
- rešerše mikrobiologické problematiky vzduchových zemních výměníků tepla;
- vyhodnocení mikrobiologického stavu již provozovaných zařízení v podmínkách České republiky (zejména v blízkém okolí pracoviště autora);
- monitoring a vyhodnocení tepelně-vlhkostního chování experimentálního vzduchového zemního výměníku tepla na FSI VUT v Brně;
- posouzení funkce zemního výměníku jako protimrazové ochrany následujících vzduchotechnických zařízení.

Cílem práce bylo vytvořit ucelený pohled na aktuální stav poznání v oblasti vzduchových zemních výměníků tepla určených pro aplikaci ve vzduchotechnických systémech převážně rodinných domů. Autor zde předkládá vyhodnocená provozní data z monitoringu experimentálního zařízení na **FSI VUT v Brně** a na jejich základě hodnotí funkci protimrazové ochrany následných vzduchotechnických zařízení. Hlavní přínos disertační práce však autor shledává ve vyhodnocení mikrobiologické kvality přívodního vzduchu z několika desítek již provozovaných vzduchových zemních výměníků tepla. Rozbory zahrnovaly výměníky různých potrubních systémů a různého stáří. Výsledky takto rozsáhlého výzkumu doposud nebyly v ČR publikovány – přičemž je to jedna ze základních otázek, jež nejvíce zajímá případné investory při řešení úvodní koncepce větrání/vytápění energeticky úsporného objektu.

KAPITOLA 1

Úvod

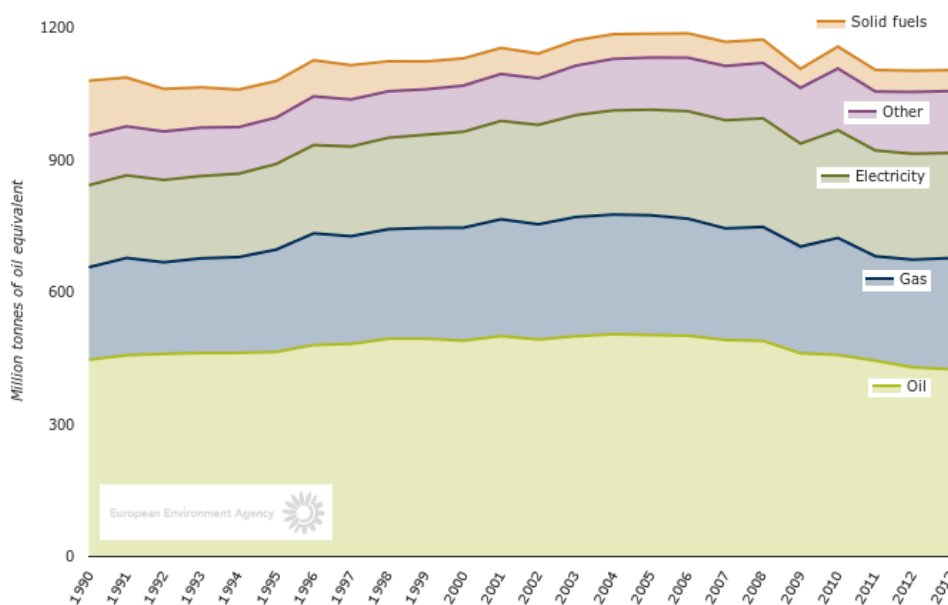
Při pohledu na dlouhodobé rozdělení celkové spotřeby energie v Evropě (**obr. 1.1**) je patrné, že domácnosti patří mezi tři segmenty s nejvyšší spotřebou [1]. Je odhadnuto, že v Evropské unii (EU) budovy jako celek spotřebovávají asi 40 % veškeré energie [2, 3] a jsou zodpovědné za přibližně 30 % emisí nežádoucího skleníkového plynu CO₂ – k tomu také vytvářejí cca 40 % veškerého člověkem produkovaného odpadu [3]. Převážná většina spotřebované energie (cca 66 %) podle *Eurostatu* pochází z neobnovitelných zdrojů, tj. ropy, zemního plynu a uhlí (**obr. 1.2**) [1]. Postupně se zvyšující energetická spotřeba je tak např. jednou z příčin neustálého růstu cen energií, jež činí někdy i několik procent ročně. Stále aktuálnější se dnes stává i otázka narůstajícího znečišťování životního prostředí a negativních problémů s tím spojeným. Z tohoto důvodu vzniká, hlavně v EU, tlak na postupné snižování energetické náročnosti budov a větší využití obnovitelných zdrojů energie (OZE) – solární, větrná, geotermální atp.



Obr. 1.1: Konečná spotřeba energie v EU-28 – rozdělení podle odvětví v období 1990-2013; převzato z [1] (r. 2013: celkem $1,104 \times 10^9$ TOE; 1 TOE (tuna olejového ekvivalentu) = 41,868 GJ)

Přepracovaná **směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2010/31/EU** o energetické náročnosti budov (zkráceně nazývaná též „*EPBD II*“) [2] mimo jiné v článku 9 uvádí, že do konce r. 2020 by měly být v celé EU všechny nově postavené budovy budovami s téměř

nulovou spotřebou energie (tzn. „nulové“ ve smyslu celoroční bilance) s využitím vlastních alternativních zdrojů energie [4-8]. Tyto domy vycházející z koncepce budovy tzv. pasivního energetického standardu [4, 8-12] jsou zpravidla doplněny aktivním systémem zajišťujícím výrobu elektrické energie pro vlastní spotřebu objektu či následný prodej do sítě. Takovýchto staveb je nyní realizováno jen několik desítek, většinou jde pouze o experimentální objekty sloužící k ověření nových stavebních koncepcí a technologií.



Obr. 1.2: Konečná spotřeba energie v EU-28 – rozdělení podle druhu paliva v období 1990-2013 (r. 2013: Oil + Gas + Solid fuels = 65,68 %); převzato z [1]

Dnes se setkáváme spíše s „nízkoenergetickými“ domy (NED) nebo domy „energeticky pasivními“ (EPD) [4, 6-11, 20]. Oproti dřívějším novostavbám mají kvalitnější tepelněizolační obálku, jsou takřka vzduchotěsné a vzhledem k velmi nízkým tepelným ztrátám je u nich otopná soustava redukována na minimum. Proto se může u těchto staveb od klasické teplovodní otopné soustavy úplně upustit a dům vytápět pouze teplovzdušně [13-17, 20]. Vzduchotechnická jednotka pak zajišťuje zároveň i komfortní větrání, přičemž následným využitím účinné rekuperace tepla se do značné míry redukuje i tepelná ztráta větráním. Po rekuperaci se přiváděný vzduch dohřeje už jen o několik málo stupňů nad požadovanou vnitřní teplotu.

Doplňkem teplovzdušného vytápěcího systému se zpětným získáváním tepla (ZZT) se často stává předřazený vzduchový zemní výměník tepla (ZVT), např. [4, 6-13, 18-20], jež zajistí další snížení energetických nároků větrání. Zemní výměník využívá relativně stabilního teplotního rozvrstvení v dostatečné hloubce pod povrchem země – umožňuje tak předehřev větracího vzduchu v zimě a přechodných obdobích roku, resp. jeho předchlazení v létě [13, 21, 22, 62]. Některé konstrukce umožňují i cirkulační chlazení vnitřního vzduchu, z čehož plynou další možné energetické úspory [21]. Hlavní funkcí ZVT – alespoň v klimatické oblasti střední Evropy – je však protimrazová ochrana rekuperačního výměníku tepla. Zde totiž za určitých podmínek hrozí zamrznutí kondenzátu z odváděného vlhkého vzduchu a následné snížení účinnosti zpětného získávání tepla, resp. v horším případě až zničení celého

výměníku. Větrací, příp. i cirkulační vzduch se může ohřívat buď přímo [13, 18], průchodem potrubním systémem v zemi, nebo zprostředkovaně – přes kompaktní výměník nemrznoucí kapalina/ vzduch [13, 19]. Tento typ má sice menší energetickou (provozní) účinnost, ale snadněji se čistí a udržuje.

Díky postupné aplikaci evropské směrnice **EPBD II**, jakož i obecnému trendu výstavby budov s velmi nízkou energetickou náročností se dá v budoucnu očekávat stále větší uplatnění komfortních ventilačních systémů s využitím ZVT a dalších souvisejících technologií (včetně zemních výměníků tepla). Důležitým posuzovacím kritériem bude jistě i kvalita přiváděného větracího vzduchu, který u vzduchového 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 přivodní vzduch určité riziko, zejména mikrobiologické.

Doposud bylo v ČR publikováno jen několik výsledků mikrobiologického rozboru kvality interiérového vzduchu či staveb obecně, např. [23-28]. Nejednalo se však primárně o zaměření na budovy s ventilačním systémem – natožpak se zemním vzduchovým výměníkem. Přestože je po celé ČR realizováno již několik stovek zařízení (obdobně je tomu i v sousedním Slovensku) [29], 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 (viz např. [30, 32]). Mikrobiologické problematice ZVT se šířeji věnuje pouze jedna starší zahraniční studie [33-35]. Lze se tak zatím opírat jen o výsledky dosažené téměř 20 let v minulosti, k tomu v podmínkách zcela odlišných od ČR.

Tato disertační práce je proto z hlavní části zaměřena na terénní monitoring několika desítek již realizovaných větracích systémů rodinných domů se vzduchovým ZVT v klimatických podmínkách České republiky – k dispozici jsou údaje z poměrně rozsáhlého vzorku (**kapitola 7**). Podařilo se vyhodnotit také zařízení u dvou bytových domů a dvou větších objektů pro veřejné služby. Zkoumané zemní výměníky jsou realizovány různými potrubními systémy, provozovány při různých větracích režimech v odlišných lokalitách (uvnitř města a mimo něj) a jsou také různého stáří. Několik zkoumaných ZVT bylo vybudováno ze speciálního potrubního systému **Rehau Awadukt Thermo** [36, 37] s anti-mikrobiální úpravou povrchu, určeného výhradně pro aplikaci v ZVT. U tohoto potrubního systému byly ve dvou případech odběry vyhodnoceny 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. Ověření mikrobiologické kvality přivodního vzduchu proběhlo dvěma metodami – pomocí stěrů a sedimentace na agarové misky – a odebrané biologické vzorky byly následně vyhodnoceny v nezávislé akreditované mikrobiologické laboratoři.

Jak již bylo uvedeno výše, 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 zemních výměníků tepla. V zahraniční odborné literatuře byla publikována některá data z monitoringu několika realizovaných ZVT (např. [38-44]). 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. [21, 54, 96-99, 195, 196]. 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. Té se již běžně využívá při řešení energetické stránky ZVT (např. simulačního programu **TRNSYS** [73, 174, 176]). Vyvinuté modely však nejsou součástí běžných uživatelských knihoven, některé jsou za příplatek dostupné v nastavbových knihovnách. Výpočtový model cirkulačního ZVT však nebyl prozatím nikde publikován. Autor tak v **kapitole 5** uvádí zjednodušený model vzduchového zemního výměníku, jež je navržen v softwarovém 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.

KAPITOLA 2

Nízkoenergetické a energeticky pasivní domy

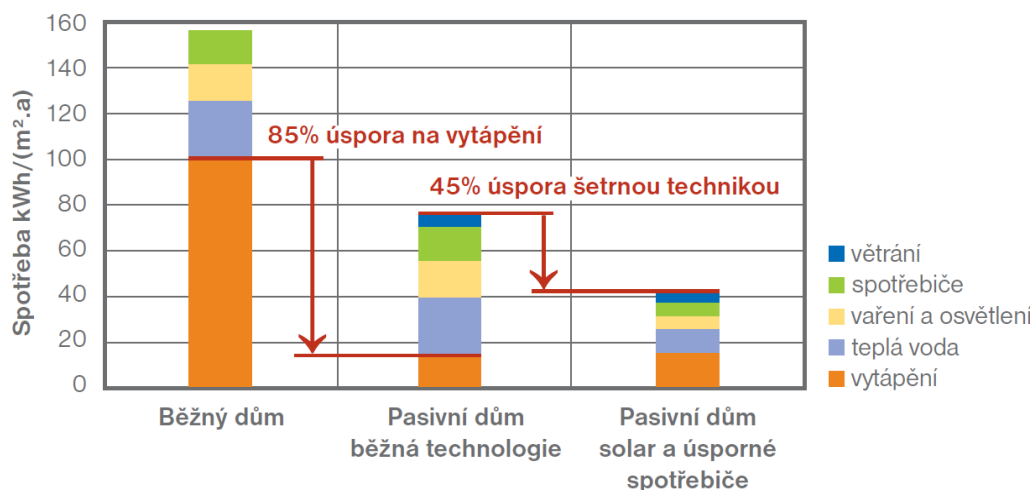
Z analýzy energetické spotřeby v EU mezi lety 1990 až 2013 vyplývá, že celková spotřeba energií postupně narůstá; průměrně asi o 0,1%/rok [1]. Spotřeba domácností (tj. vytápění/chlazení, příprava teplé vody, elektřina atd.) se za toto období zvýšila přibližně o 8,2 % (**obr. 1.1**). Sektor služeb navýšil svoji celkovou spotřebu o téměř 40 % a patří mu tak první místo v rychlosti růstu spotřeby. V největší míře vzrostla spotřeba elektrické energie; mezi lety 1990 až 2013 činil nárůst asi 28 %. Hlavním důvodem je větší míra používání elektrických spotřebičů (telefony, počítače, kopírky, projekory, ...), osvětlovací techniky, ale např. i energeticky náročné klimatizace. Přitom ve větších administrativních budovách lze pro chlazení s výhodou využít i jiných technik, nežli nejčastěji používaného kompresorového chlazení – jedná se o tzv. „*pasivní chlazení*“ [41, 42, 45], využívající např. zemního výměníku tepla, noční předchlazení objektu, účinné stínění slunečního záření atp.

Snižování energetické náročnosti budov je neúčinnější, a zároveň i nejsnazší, již ve fázi návrhu. Při rekonstrukcích starších objektů je třeba na problematiku pohlížet komplexně, jinak nebude dosaženo plánovaných úspor energií. Dle směrnice *EPBD II* je do budoucna cílem dosáhnout nízké energetické náročnosti, a to při dosažení nákladově optimální úrovně v rámci životního cyklu budovy [2]. Z dnešního pohledu jsou to hlavně domy nízkoenergetické a také energeticky pasivní, u nich by měly vícenásobky činit max. 10÷15 % [7, 12]. Nízkoenergetický (NED) a energeticky pasivní dům (EPD) je označení pro určitý energetický standard budovy, kterého dosáhneme splněním následujících tří základních kritérií [9-11, 20, 45]:

- roční měrná potřeba tepla na vytápění:
 - do 50 kWh/(m²·rok) pro NED,
 - do 15 kWh/(m²·rok) pro EPD (oboje platí pro klimatické podmínky střední Evropy),
- celková neprůvzdušnost objektu n_{50} (tj. při tlakovém rozdílu 50 Pa):
 - do 1,0 h⁻¹ pro domy nízkoenergetické,
 - do 0,6 h⁻¹ pro domy energeticky pasivní,
- celková měrná spotřeba primární energie:
 - do 250 kWh/(m²·rok) pro NED,
 - do 120 kWh/(m²·rok) pro EPD.

Abychom takovýchto hodnot dosáhli, musíme již při návrhu respektovat základní principy pasivního domu (např. dle [6, 8, 12, 20]). Při stavbě samotné pak musíme dbát hlavně na dodržení technologických postupů řemeslných prací i použití odpovídajících

stavebních materiálů a technologií. Podíl jednotlivých složek spotřeby energie se v NED/EPD výrazně mění – narůstá složka ohřevu teplé vody a složka větrání (**obr. 2.1**). Kvalitní výplně otvorů zajišťující neprůvzdušnost (vzduchotěsnost) objektu [4, 8, 12], 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 [8, 13], který zajistí přívod čerstvého větracího vzduchu v požadované kvantitě i kvalitě (filtrace, ohřev atd.).



Obr. 2.1: Rozdělení spotřeby energie pro EPD a běžný dům; převzato z [5]

2.1 Teplovzdušné vytápění a větrání

Na rozdíl od běžných domů s velkou tepelnou ztrátou a klasickou otopnou soustavou (tj. s vodou jako nosičem tepelné energie) se u NED/EPD běžně s výhodou využívá teplovzdušné vytápění [14-17]. Teplonosným médiem se zde stává větrací vzduch, který do těchto takřka vzduchotěsných staveb musíme bezpodmínečně přivádět mechanicky – systém tak zajišťuje jak vytápění, tak i nucené komfortní větrání celého objektu [45]. Podle stupně pokrytí celkových tepelných ztrát (způsobených větráním a prostupem tepla) pak rozeznáváme:

➤ Teplovzdušné větrání

Do objektu se přivádí minimální množství čerstvého vzduchu, dané doporučenou intenzitou výměny vzduchu, příp. minimálním množstvím větracího vzduchu na osobu [8, 46-49]. Přiváděný vzduch má v tomto případě stejnou nebo i nižší teplotu, než je požadovaná teplota v interiéru – zbylé tepelné ztráty pokrývá jiný systém, nejčastěji otopná soustava. Toto řešení se využívá převážně u NED, kde by pro pokrytí celé tepelné ztráty budovy bylo třeba neúměrně vysokého průtoku vzduchu (v zimních měsících by pak docházelo k nežádoucímu vysušování interiérového vzduchu) [50, 51].

➤ Teplovzdušné vytápění

Díky nižší tepelné ztrátě můžeme v EPD použít teplovzdušného vytápění, kdy teplota přiváděného vzduchu je naopak vyšší (max. však 50 °C), aby se pokryla i ztráta

prostupem tepla [14]. Systémy teplovzdušného vytápění se pak dále dělí na koncept bez cirkulace a s cirkulací interního vzduchu [7, 13, 45]:

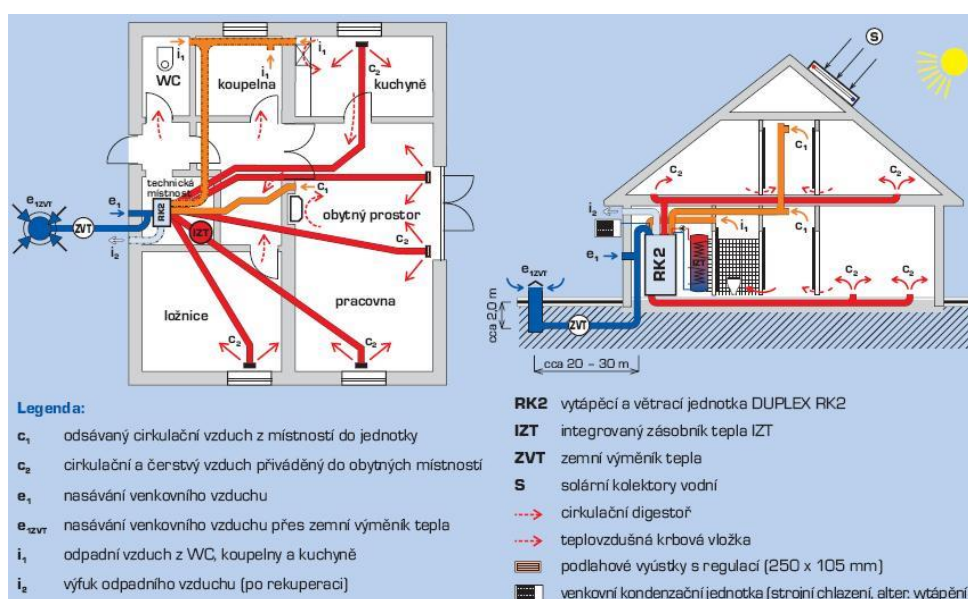
a) bez cirkulace

Tento systém se používá zejména v zahraničí (Německo, Rakousko, ...). Zařízení pracuje v čistě větracím režimu – odsávaný vzduch z místností s velkou koncentrací škodlivin (kuchyně, koupelna, WC) je po průchodu rekuperačním výměníkem vyfouknut ven, opačně je do budovy nasáván čerstvý vzduch. Hlavně v zimním období je zde třeba vyměňovat větší množství vzduchu, než je nutné, což vede k nežádoucímu vysušování vzduchu v místnosti [50, 51]. Tímto systémem nelze v podmínkách ČR zcela pokrýt tepelné ztráty objektu, musí se pak kombinovat s dodatečným zdrojem tepla.

Pro dosažení dalších energetických úspor při srovnatelné kvalitě vnitřního mikroklimatu, spolu se zamezením vysušování vzduchu, se postupně vžila koncepce tzv. „proplachovacího/kaskádového“ větrání [45, 52]. Zde se větrací vzduch přivádí pouze do ložnic a dětských pokojů, takže celkový průtok přiváděného vzduchu je nižší. Odtud vzduch prochází do dalších obytných místností (obývací pokoj, pracovna, apod.) a dále přes chodby do místností s odtahem.

b) s cirkulací

(nazývaný též systém dvouzónový – viz **obr. 2.2**) obsahuje oproti předchozí variantě v určitých místnostech (s nižším výskytem škodlivin) další samostatnou větev odtahu, přičemž zde odsátý vzduch se vrací zpátky do VZT jednotky. Zde se filtruje, dohřívá, mísí s čerstvým větracím vzduchem a následně rozvádí zpět do všech místností. Lze tak pokrýt i větší tepelnou ztrátu, aniž by se vnitřní vzduch nadměrně vysušoval. Tímto systémem je možno zamezit zbytečnému ohřívání větracího vzduchu v době nepřítomnosti osob; objekt se pak vytápí cirkulačně s minimálním přívodem větracího vzduchu (např. 1× 10 min/hod).



Obr. 2.2: Teplovzdušné cirkulační vytápění a větrání pro NED a EPD – podle [17]

V letním období může být vzduchotechnika využívána i pro účinné noční větrání, tzv. „pasivní chlazení“ – nebo ve spojení se ZVT pro účinné předchlazení objektu [13, 16, 17, 53]. Chladicí výkon ZVT je sice omezený, ale při správné koncepci EPD již není potřeba žádné další energeticky náročné klimatizační zařízení (většinou kompresorového typu) – zemní výměník by měl sám postačit pro udržení teploty v interiéru pod přijatelných 26 °C.

2.2 Zpětné získávání tepla

Pro budovy s extrémně nízkou spotřebou tepla je zásadní dokonalé vyřešení a realizace vzduchotěsné obálky budovy. Každý nekontrolovaný přívod/odvod vzduchu je doprovázen nežádoucí energetickou ztrátou. Již samotné větrání je spojeno s velkou energetickou ztrátou – např. při uvažování průměrné intenzity výměny vzduchu $0,5 \text{ h}^{-1}$ může činit tepelná ztráta větráním až kolem $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ (dle velikosti objektu) [13]. Pokud tedy chceme dodržet kritérium měrné roční potřeby tepla, musíme v systému nuceného větrání bezpodmínečně použít zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu. Tepelné ztráty větráním se pak sníží na přijatelných $5 \div 8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Celková účinnost ZZT do značné míry závisí také na vzduchotěsnosti obálky budovy [54], proto se při hodnocení zavedlo další kritérium, a to celkové neprůvzdušnosti obvodového pláště budovy n_{50} (měřeno při tlakovém rozdílu 50 Pa).

Nazpět můžeme získávat jak teplo citelné, tak i teplo latentní (při přenosu vlhkosti). Existuje několik způsobů, jak toho docílit [46-49] – ve většině případů se však u rodinných domů využívá pouze zpětného zisku citelného tepla. Přenos vlhkosti umožňují pouze některá zařízení (např. speciální typy membránových výměníků [7, 45, 55, 56], nazývané též výměníky entalpické). V technické praxi se používá místo výrazu ZZT také název rekuperace tepla. Rozeznáváme dva způsoby, jakým získat nazpět teplo z odpadního vzduchu – tzv. „pasivní rekuperací tepla“ [16, 57, 58] a „aktivní rekuperací tepla“ [57, 59, 60]. Uvádíme zde možnosti určené hlavně pro centrální větrání energeticky úsporných RD.

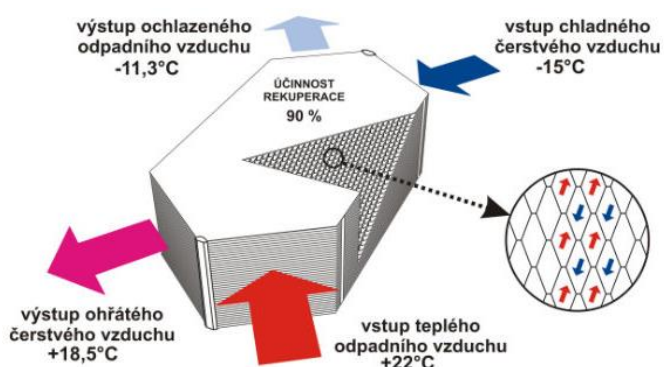
➤ Pasivní rekuperace:

Historicky nejvíce využívaná u malých větracích jednotek pro RD, realizovaná nejčastěji zařízením s deskovými výměníky. V minulosti používané výměníky křížové, či křížové/protiproudé, dnes nahrazují účinnější výměníky protiproudé, resp. kanálové [13]. Méně často se pak setkáváme s výměníky rotačními (určenými převážně pro průmyslové aplikace). U deskových typů se teplo předává přes stěnu výměníku vedením (**obr. 2.3**) – je tedy zamezeno míšení obou proudů a tím i přenosu škodlivin, pachů apod. Materiálem desek bývá plast, který je oproti kovu ekonomičtější.

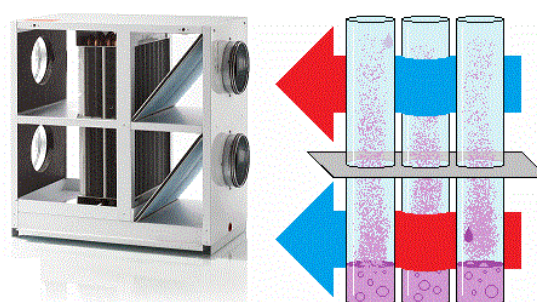
Při určitých podmínkách (podnulové teplotě venkovního vzduchu) zde ale hrozí zamrznutí kondenzátu vlhkosti z odpadního vzduchu, což negativně působí na výslednou účinnost ZZT a může vést až ke zničení celého výměníku. S využitím vysoce účinných protiproudých výměníků tento problém dnes narůstá na aktuálnosti. U jednotek s deskovým typem rekuperátoru se proto musí řešit i otázka protimrazové ochrany [61]. Zásadní je zajistit, aby vstupní teplota čerstvého venkovního vzduchu do zařízení VZT byla větší nebo rovna 0 °C [46, 49, 62] – blíže viz **kapitola 2.3**. U rotačních výměníků se teplo předává nejprve do akumulární hmoty a až posléze přiváděnému

čerstvému vzduchu; umožňují i přenos vzdušné vlhkosti. Z důvodu možného přenosu pachů a jiných škodlivin se u RD používají minimálně. V ČR se tak převážně využívá deskových protiproudých rekuperačních výměníků. Existují i řešení pro lokální (ostrovni) větrání s rekuperací tepla, kdy každá místnost má ve stěně instalovanu malou větrací jednotku s keramickým rekuperačním výměníkem (jako akumulátorem tepla) [13]. Zařízení funguje na postupném přepínání sání a výfuku. Lokální jednotky proto musí být vhodně spárovány, takže jedna vždy nasává a druhá vyfukuje (po přepnutí je tomu naopak).

Další možností pro pasivní ZVT je využití tzv. „teplých trubíc“, které fungují na principu změny skupenství pracovní látky (o vhodném bodu varu a nastaveném pracovním tlaku), a to samočinně, bez potřeby dodávky další elektrické energie. Většinou se jedná o externí box s několika desítkami teplých trubíc, který se instaluje před VZT jednotku – zde jsou na vstupu a výstupu do/ze zařízení integrovány také výměnné filtry [63]. Odpadní vzduch prochází spodní částí, kde je nejprve filtrován, poté předává teplo zkapalněné pracovní látce (např. čpavek, CO₂), která se tak odpařuje a její páry stoupají vzhůru (**obr. 2.4**). V horní části prochází studený větrací vzduch, jenž odebírá teplo horkým parám, ty díky tomu zkondenzují a stékají zpět do dolní části trubice, kde se celý proces znovu opakuje. Dělicí deska obou proudů je i v tomto případě dokonale utěsněna, takže nedochází k negativnímu promíchávání odpadního a čerstvého vzduchu, jako je tomu u rotačních výměníků.



Obr. 2.3: Deskový protiproudý výměník pro ZVT z odpadního vzduchu [16]



Obr. 2.4: Teplé trubice pro ZVT z odpadního vzduchu [63]

➤ Aktivní rekuperace:

Pojmem „aktivní“ se rozumí potřeba další energie pro uskutečnění ZVT. Větrací jednotka je vybavena malým tepelným čerpadlem, které odebírá teplo odváděnému vzduchu a předeřívá větrací vzduch (**obr. 2.6**), případně ohřívá teplou vodu v integrovaném zásobníku tepla (IZT) – viz **obr. 2.5**. „Kompaktní jednotky“ [60] jsou zařízení velikosti větší ledničky, která zajišťují větrání, filtraci/ohřev/chlazení vzduchu i ohřev teplé vody. Protože jednotka umožňuje také chlazení vzduchu v létě, je předřazení ZVT neefektivní. Nemusí se též řešit protimrazová ochrana (oba proudy jsou od sebe odděleny). Výhodou jsou vyšší tepelné zisky, nevýhodou je vyšší pořizovací cena spolu s vyššími provozními náklady zařízení.

Vezmeme-li v potaz tzv. „výkonový faktor“ větrací jednotky se ZZT (tj. množství získané energie/elektrický příkon jednotky), pro zařízení s pasivní rekuperací vychází tento faktor 5 až 24, u zařízení s tepelným čerpadlem „pouze“ 1,5 až 4,5 [7]. Z tohoto pohledu – spolu s uvážením poměrně vysokých investičních nákladů – se více prosadilo využití pasivní rekuperace. S postupně klesajícími investičními náklady a narůstající poptávkou komplexního řešení u některých zákazníků se však začíná prosazovat i aktivní forma rekuperace tepla. Některá moderní zařízení pak kombinují jak pasivní, tak i aktivní formu rekuperace (**obr. 2.5**).



Obr. 2.5: Kompaktní VZT jednotka s aktivní i pasivní rekuperací tepla a IZT pro teplou vodu [59]



Obr. 2.6: Větrací jednotka s aktivní rekuperací typu vzduch/vzduch [59]

Do této kategorie je možné zařadit i systémy s pomocným kapalinovým okruhem [46, 47]. Do přívodního a odvodního potrubí jsou instalovány kompaktní tepelné výměníky typu vzduch/voda, které jsou propojeny potrubním systémem, v němž proudí teplotná kapalina. K přenosu tepla je zde třeba práce oběhového čerpadla (napájeného elektrickou energií – tj. s vysokým koeficientem přepočtu na primární energii), které zajišťuje pohyb teplotného média mezi oběma výměníky. Tímto je možno zajistit ZZT i mezi proudy vzduchu, které nejsou v bezprostřední blízkosti – což u deskových výměníků nelze. Zmíněného principu se využívá převážně v průmyslových aplikacích, kde jsou vyšší teploty odpadního vzduchu, tedy i teplotní spády na výměnících. Při správném návrhu a provozu není nutné použití nemrznoucí kapaliny, oba proudy jsou od sebe bezpečně odděleny.

2.3 Protimrazová ochrana VZT zařízení

Existuje několik způsobů, jak zajistit ochranu deskového výměníku pro zpětný zisk tepla při venkovních podmínkách ohrožujících jeho funkci a chod [46-49, 61]. Každé řešení má své specifické výhody a nevýhody, volba vždy záleží na konkrétní situaci. Protimrazová (tepelná) ochrana však musí spolehlivě fungovat až do nejnižších teplot, obvykle se vyskytujících v dané lokalitě (pro ČR, tj. střeoevropské klima cca -15 °C) [56]. Jelikož obecně snižuje účinnost zpětného zisku tepla, a tím i dosaženou úsporu energie [21, 45, 62, 64], je vhodné přívodní vzduch předeřívat na nejnižší možnou úroveň, zajišťující odtok kondenzátu bez jeho namrzání – optimální je hranice kolem 0 °C.

Možnosti protimrazové ochrany výměníku pro ZZT jsou pak následující:

- **Vypnutí zařízení**

Pokud venkovní teplota klesne pod určitou hranici (např. 0 °C), větrací jednotka se automaticky vypne z provozu. Nejjednodušší, avšak nejméně vhodné řešení tepelné ochrany – nevětrá se, takže vzniklé škodliviny (vodní pára, pachy, ...) se hromadí uvnitř objektu, což je z hlediska kvality vnitřního prostředí nepřijatelné.
- **Obtok výměníku ZZT**

Oproti předchozímu o něco příznivější varianta – je zajištěno větrání, ale vzduch obtéká rekuperační výměník by-passem, takže nedochází ke ZZT a teplý odpadní vzduch uniká bez užitku ven z objektu, což je pro EPD zcela nevhodné řešení. Obtok je realizován pomocí přepínací klapky, přičemž ve VZT jednotce mohou být instalovány i další klapky, které zajišťují protimrazovou ochranu, např. formou cirkulace nebo směšování odpadního a přívodního vzduchu (pro rodinné domy použitelný pouze jednoduchý obtok přes by-pass).
- **Směšování**

Minimální teploty přívodního vzduchu do zařízení je dosaženo přimícháním části teplého odpadního vzduchu. Z důvodu rizika možného přenosu škodlivin do čerstvého větracího vzduchu není u RD tohoto způsobu využíváno – směšování je vhodné pouze pro průmyslové aplikace s nízkým výskytem nežádoucích škodlivin.
- **Změna otáček ventilátorů**

Snížením otáček přívodního ventilátoru při dosažení určité minimální teploty odpadního vzduchu vystupujícího ze ZZT (nebo dosažení určité tlakové difference) se zmenší množství přiváděného vzduchu, čímž dochází k nucenému odmražení teplem z odváděného vzduchu. V objektu tak vzniká tlaková nerovnováha (podtlak), vedoucí k nežádoucímu přisávání studeného venkovního vzduchu netěsnostmi v konstrukci. Přisátý vzduch však neprochází výměníkem pro ZZT (obdobně jako u řešení obtokem, viz výše) a musí ho dohřát otopná soustava – to vede k dodatečné potřebě tepelné energie. Při využití interiérové křbové vložky zde kvůli podtlaku hrozí nebezpečný zpětný tah spalin do obytných místností. Zmíněnou možnost je třeba brát pouze jako ochrannou funkci (využívá jí regulace většiny VZT jednotek), nikoliv jako provozní.

Další možností je předřadit systému další výměník, který přívodní vzduch předeřuje a zajistí tak stále podmínky zabraňující namrzání deskového rekuperátoru.

➤ Elektrický přehřev

Do potrubí před VZT jednotku se instaluje externí box s elektrickou odporovou spirálou (**obr. 2.7**), která je zapínána pouze v případě, kdy výstupní teplota vzduchu z výměníku ZZT klesne pod nastavenou hodnotu (většinou postačí 0 °C). Přívod elektrického proudu je z bezpečnostního důvodu vázán též na chod VZT jednotky, jinak by hrozilo přehřátí topného elementu (příp. termický rozpad usazeného prachu). Jelikož je k ohřevu využito nejušlechtlejšího zdroje energie (tj. elektřiny), spolu s vysokým faktorem přeměny primární energie, musí se u EPD tento způsob volit uvážlivě.



Obr. 2.7: Externí elektrický přehřev pro VZT jednotky [58]

➤ Přehřev pomocí externího kapalinového okruhu

Namísto elektrického ohřivače je v potrubí před vstupem do vzduchotechnické jednotky instalován externí výměník tepla typu kapalina/vzduch (**obr. 2.8 a 2.9 vpravo**), napojený např. na integrovaný zásobník tepla (IZT). Kapalinový výměník může být integrován také přímo do vzduchotechnické jednotky (**obr. 2.8 vlevo**). Jako teplotonosné látky je nutné použít vhodnou nemrznoucí kapalinu (např. propylen-glykol), jinak by výměník sám zamrzl a neplnil tak požadovanou ochrannou funkci.



Obr. 2.8: Přehřev pomocí kompaktního nízkoteplotního výměníku typu vzduch/voda [13]

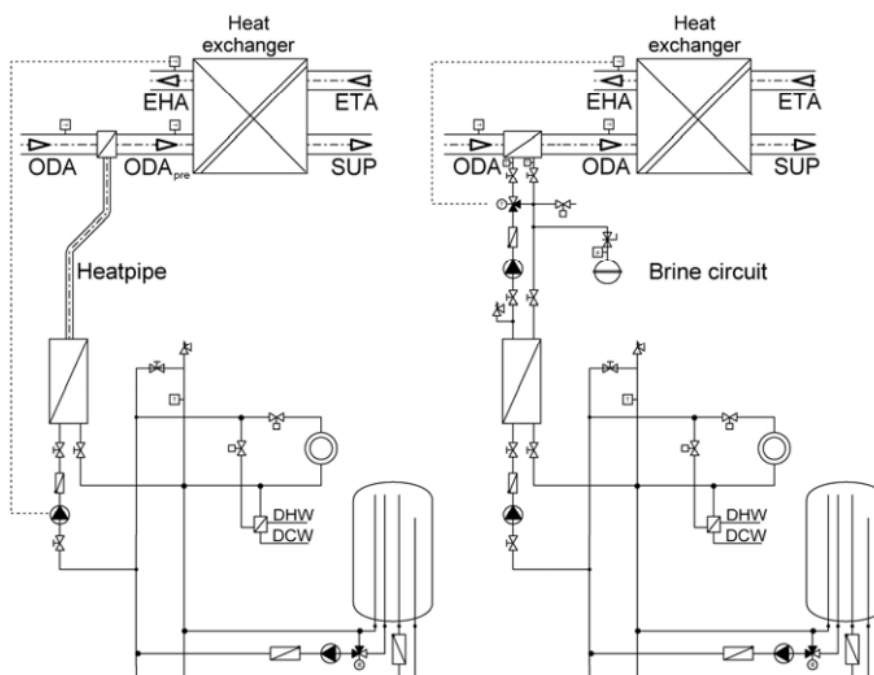
➤ Přehřev pomocí vzduchového nebo kapalinového ZVT

Pokud se ochrana proti zámruzu řeší již ve fázi návrhu základní koncepce větrání a vytápění, lze k přehřevu s výhodou využít i zemních výměníků tepla – vzduchového nebo kapalinového (blíže viz **kap. 3.1 až 3.5**). Oproti předchozím variantám můžeme

navíc pomocí zemního výměníku zajistit i letní předchlazení větracího vzduchu, nebo též využít cirkulačního chlazení vnitřního vzduchu (pokud to VZT jednotka umožňuje).

➤ Využití výměníku se zpětným ziskem vlhkosti

Jak bylo zmíněno výše, existují též speciální rekuperační výměníky, např. membránové (materiálem lamel je papír či textilie [45]), které jsou schopny z odpadního vzduchu přenášet i určitou část vlhkosti (dle [7] až 65 %). Díky tomu ve výměníku nedochází k tak intenzivní kondenzaci jako u klasického typu, nevyžaduje se přehřev nebo instalace ZVT. Tyto tzv. „*entalpické*“ výměníky jsou však investičně nákladnější a mají i omezenou životnost (dle materiálu membrány), 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. Možné je též použít VZT jednotky s rotačními/regeneračními výměníky [52], které jsou méně náchylné k zamrznutí a umožňují též zpětný zisk vlhkosti.



Obr. 2.9: Přehřev větracího vzduchu s využitím tepelné trubice (vlevo) a pomocí externího hydraulického okruhu s nemrznoucí kapalinou (vpravo); převzato z [52]

➤ Využití „termosifonu“ a tepelných trubic

Nejnovejší způsob řešení protimrazové ochrany výměníku ZVT byl vyvinut na univerzitě v Innsbrucku [52], přičemž se využívá externího chladivového okruhu (**obr. 2.9** vlevo) bez nutnosti vynaložení další energie na jeho pohon (kompresor, ventil atp.). Oběh chladiva je zajištěn přirozeným odparem a následnou kondenzací ve výměníku umístěném v proudu přívodního vzduchu. Zpětný tok tekutého chladiva probíhá buď vlivem gravitace (u varianty tzv. „*termosifonu*“) nebo díky kapilárnímu vztlínání v připravených drážkách výměníku (příp. kapilárním knotem) – tento případ reprezentují tepelné trubice [52]. Teplonosnou látkou může být např. amoniak, CO₂ nebo

v určitých případech i voda. Regulace je řešena trojcestným termostatickým ventilem, jenž je ovládán dálkovým čidlem umístěným v proudu odváděného vzduchu za výměníkem pro ZZT (tzn. teplota by zde měla být nadnulová).

KAPITOLA 3

Zemní výměníky tepla pro vzduchotechnické systémy budov

Zemní výměníky tepla (ZVT) využívají přirozené teplo jednoho z možných přírodních zdrojů nízkoteplotní energie – zemské kůry. Ve většině případů jsou ZVT použity jako tepelné výměníky primárního okruhu pro tepelná čerpadla (TČ) typu země/voda [46, 53, 65-67], kde zde slouží jako zdroj energie pro nízkoteplotní vytápěcí systémy budov nebo ohřev teplé či bazénové vody. Konstruovány jsou buď jako plošné kolektory (tzv. „*mělká geotermie*“ [46]) nebo hloubkový vrt (příp. několik oddělených vrtů). V prvním případě je využito tepla naakumulovaného v průběhu roku – většina energie pochází ze slunečního záření, dopadajícího na povrch země [68]. Naopak v případě vertikálních vrtů je ve větší míře využíváno tepelného toku z nitra Země, teplo z povrchu nehraje takovou roli.

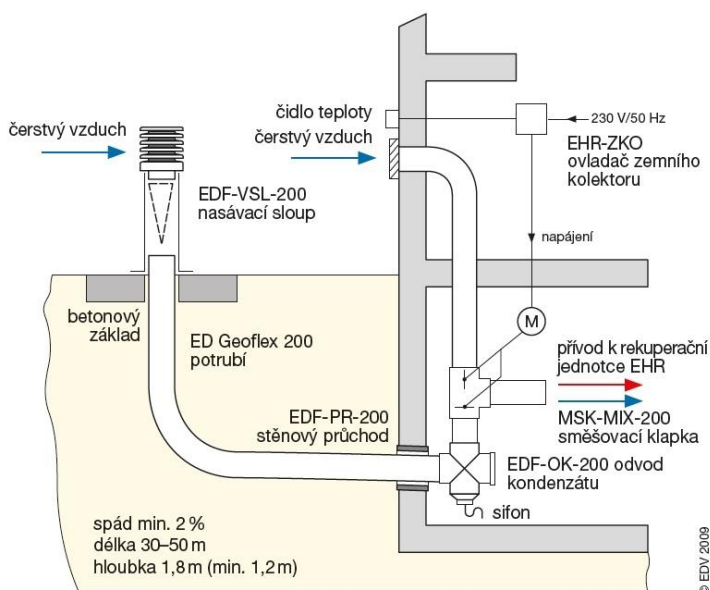
Díky akumulačním schopnostem zeminy dochází během kalendářního roku od jisté hloubky pod povrchem (blíže viz **kapitola 3.7**) pouze k nepatrným změnám teploty [46, 53, 69-72]. V určitých fázích roku je tak teplota zeminy vyšší či nižší, než průměrná denní teplota okolního vzduchu. Této skutečnosti se již běžně využívá v zemích s extrémními klimatickými podmínkami, např. k chlazení přívodního/větracího vzduchu v pouštních oblastech [73, 74] nebo pro úpravu větracího vzduchu v zemědělských sklenících v jižních oblastech Evropy [38, 75, 76]. Zemních výměníků využívají také některé velké kancelářské budovy, kde místo energeticky náročné klimatizace chladí přívodní větrací vzduch [41, 42, 77]. Lze však nalézt některé další možné, někdy až netradiční aplikace ZVT – jako např. chlazení kondenzátoru klimatizační jednotky v teplých oblastech přívodem vzduchu přes zemní výměník tepla [78], chlazení místnosti s velkými interními tepelnými zisky (zde z provozu elektroniky) [79] nebo úpravu vzduchu pro chovné budovy hospodářských zvířat [40]. Akumulačních vlastností zeminy od nepaměti využívají též tzv. „*domy chráněné zemí*“ (např. [80, 81]) nebo sklepení různého charakteru (např. vinné sklípky).

Zemní výměníky tepla se v západní Evropě začaly objevovat již před více než 25 lety, hlavně v souvislosti s rostoucími cenami energie [22, 65, 82]. V ČR se tato možnost využití přirozeného zemského tepla, které je relativně zdarma, začala více rozšiřovat až v posledních cca deseti letech. Způsobil to zejména rozmach výstavby nízkoenergetických a pasivních domů, kde se ZVT běžně instalují jako doplněk teplovzdušných vytápěcích a větracích systémů (např. [9-11, 83, 84]). Zde v zimním období slouží pro předehřev větracího vzduchu (jež je nutný jako protimrazová ochrana vzduchotechnických komponent) nebo jeho předchlazení v letním období. Letní provoz (při dostatečném stínění budovy) tak přispívá k přirozenému klimatizování objektu – jedná se o formu tzv. „*nízkoenergetického chlazení*“ [11, 45, 53].

Existují dva základní způsoby, jak teplo v zemině využít – přímo nebo nepřímo (tj. zprostředkovaně) [16, 18, 19, 65]. Způsob přímého využití energie zeminy reprezentují vzduchové typy zemních výměníků (neboli „otevřené systémy“), naopak nepřímého způsobu využívají typy kapalinové (tedy „systémy uzavřené“).

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 nezamrzné hloubce pod povrchem země (viz **obr. 3.1a** až **obr. 3.2c**). V běžné technické praxi se vzduchový typ ZVT nazývá též „zemním registrem“. Jelikož je vzduch po celou dobu v kontaktu s povrchem potrubí, dochází tím přímo k jeho teplotní úpravě. Vzduch si skrz výměník nasává sama větrací jednotka, proto se nemusí instalovat žádný přídavný ventilátor. Dle aktuálních teplotních poměrů je proudícímu vzduchu odnímáno nebo předáváno teplo z/do obklopující zeminy. Podle dosavadních praktických zkušeností je, při optimálních podmínkách, možno pomocí jednoho zemního výměníku tepla vzduch v zimě ohřát až o 20 °C a v létě ochladit až o 12 °C [36, 82].



Obr. 3.1a: Přímý typ ZVT se směšovací klapkou čerstvého vzduchu, např. provedení dle [85]



Obr. 3.1b: Potrubí ED Geoflex 200 pro přímý typ ZVT (foto: autor)

V odborné publikaci [46] je vzduchový typ výměníku nazýván též „tepelným kanálem“, přičemž je zde zmíněn i další možný typ jeho konstrukce, tzv. „tepelný labyrint“. Jedná se o cíleně vytvořený prostor pod budovou – zde betonové kanály v suterénu pro městské divadlo v německém Heilbronn – kterým prochází čerství větrací vzduch a ohřívá se (nebo ochlazuje) ode dna a přilehlých konstrukcí labyrintu (s akumulací funkcí). Tyto konstrukce jsou ale vzhledem k vysokým investičním nákladům vhodné spíše pro větší budovy s velkou spotřebou větracího vzduchu (kanceláře, divadla, obchodní domy atp.). Vysoké provozní náklady technologie klimatizace (převážně kompresorové) přírodního vzduchu je zde předurčují k velké úspoře provozních nákladů. Obdobné řešení je realizováno také

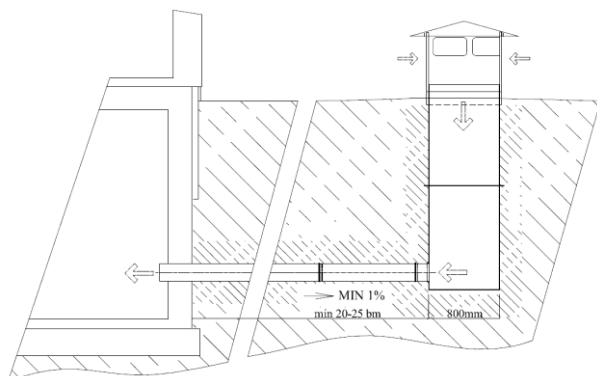
v Moravské zemské knihovně v Brně (MZK), kde nasávaný vzduch proudí v uměle vytvořené železobetonové dutině v podzákladí budovy, cca 10 m pod povrchem země [86].

Obvyklá sestava ZVT pro rodinné domy sestává z:

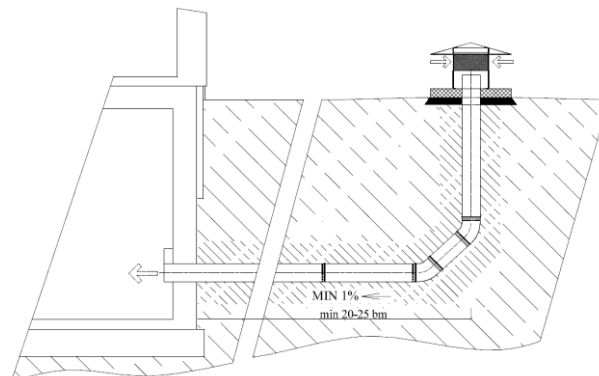
➤ **Nasávání vzduchu a filtrace**

Pro zemní výměníky je dnes na trhu k dostání již několik různých druhů nasávacích komponent – konkrétní použití záleží na zvolené konfiguraci potrubní trasy. Ta se do jisté míry odvíjí od dispoziční situace na pozemku a jeho terénního převýšení. Spolu se sáním ZVT je povětšinou řešena i filtrace vzduchu. Nejčastěji se lze setkat s:

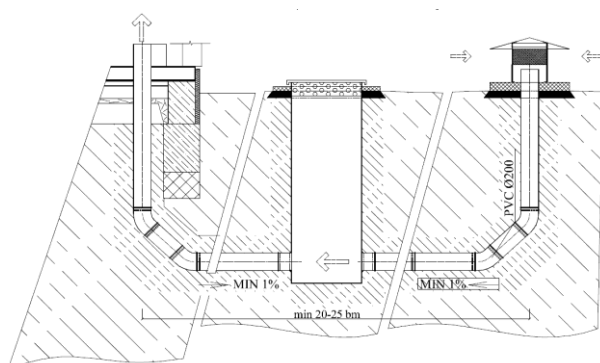
- nasávací (resp. kontrolní) šachtou se stříškou – viz **obr. 3.2a** a **obr. 3.4**;
- nasávací stříškou – **obr. 3.2b**;
- nasávací věží/sloupem – např. **obr. 3.1a**, **obr. 3.5**, **obr. 3.10** a **obr. 3.13**;
- nasávacím boxem – **obr. 3.6**;
- klasickou fasádní tvarovkou s protidešťovou žaluzií – viz **obr. 3.3**, **obr. 3.15** a **obr. 3.17**.



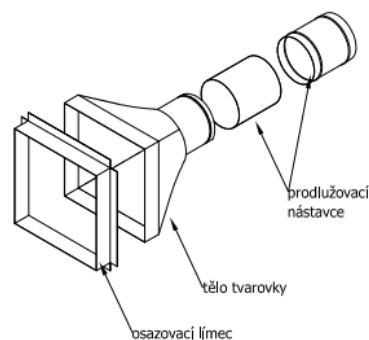
Obr. 3.2a: Přímý typ ZVT, varianta pro podsklepený objekt – spád pozemku k šachtě, dle [18]



Obr. 3.2b: Přímý typ ZVT, varianta pro podsklepený objekt – spád pozemku k budově [18]



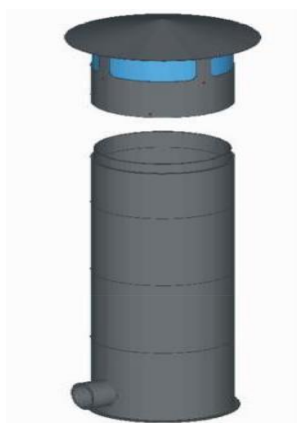
Obr. 3.2c: Přímý typ ZVT, varianta pro nepodsklepený objekt – libovolný spád pozemku [18]



Obr. 3.3: Cirkulační typ ZVT – sání pomocí fasádního kusu (s protidešťovou žaluzií) [16]

Proti znečištění potrubí ZVT (hlavně vnikání prachu, pylu nebo drobného hmyzu) je nadzemní kryt šachty (věže, boxu) vybaven filtrací, většinou dvoustupňovou. První, hrubý stupeň filtrace je řešen mřížkou z tahokovu nebo plastovou vstupní sítí – následující druhý,

jemnější stupeň tvoří výměnná filtrační tkanina třídy alespoň G4 [47]. Možné řešení filtrace na vstupu do nasávací věže je na **obr. 3.11**. Ve filtračním boxu je též možné, namísto klasického tkaninového filtru, použít kazetový typ s papírovou výstelkou [86]. Kryt nasávací šachty s přesahem stříšky zamezuje také vnikání dešťové vody do výměníku. Nasávací místo by nemělo být umístěno tam, kde hrozí nasátí vlhkého či kontaminovaného vzduchu (kanalizace, zahradní jezírko, kompost apod.) – obdobně jako u klasické vzduchotechniky [46, 47, 49]. Nemělo by také probíhat v bezprostřední blízkosti zemského povrchu, kde hrozí nežádoucí nasátí větrem zviřeného prachu, listí a jiných nosičů různých mikroorganismů [82].



Obr. 3.4: Nasávací šachta se stříškou s filtrační tkaninou [18]



Obr. 3.5: Nasávací věže s integrovaným filtrem – varianta dle [37]



Obr. 3.6: Nasávací box s filtrem [37]

Jelikož jsou standardní součástí VZT jednotek výměnné filtry, mohla by se filtrace na vstupu do zemního výměníku vynechat a spoléhat se pouze na filtraci za ZVT (autorovi jsou známy takové realizace). Obecně se však tato možnost nedoporučuje, protože potrubím prochází sám větrací vzduch – tento pak dýchají lidé uvnitř budovy. Při realizaci nasávání a filtrace přírodního vzduchu je tak vhodné postupovat s jistou dávkou obezřetnosti.

➤ **Potrubní systémy pro ZVT**

Pro běžné rodinné domy se nejčastěji používají plastové kanalizační systémy s potrubím z neměkčeného PVC, polypropylenu nebo polyetylenu (**obr. 3.7** až **obr. 3.9**) o jmenovitém průměru 150 ÷ 250 mm a celkové délce 25 až 45 m [22, 36, 82]. Možné je použít i potrubí betonové, kameninové, litinové nebo vlákno-cementové [35, 82, 87]. Materiál potrubí by měl dobře vést teplo, proto nejsou pro aplikaci ZVT zcela vhodná potrubí s pěnovým jádrem – tzv. „koextrudovaná“ [36]. Kvůli provozní těsnosti by také použité potrubí mělo mít vysokou hodnotu krátkodobé kruhové tuhosti SN (kN/m²), aby vzniklou deformací profilu spoje nepronikala dovnitř podzemní voda, příp. radon z podloží. Běžné PVC potrubí se vyrábí v třídě SN4 a SN8, odolnější trubky z PP (s větší tloušťkou stěny) jsou ve třídě SN8 a výše.

Nevýhodou klasických kanalizačních trubek je také 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 (viz např. **obr. 3.1b**) – 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. Hendikep zvlněného vnějšího povrchu (**obr. A.2**, tzv. „*korugovaná trubka*“ [36]), který vede oproti plnostěnnému potrubí k několikanásobně většímu odporu proti vedení tepla, je částečně eliminován více jak 3× vyšším součinitelem tepelné vodivosti u PE (oproti klasickému neměkčenému PVC – blíže viz **kapitola 5.4**).



Obr. 3.7: KG Systém – PVC (SN4 nebo SN8) [88]



Obr. 3.8: Potrubí KG 2000 POLYPROPYLEN (SN8) [88]



Obr. 3.9: Potrubí REHAU Awadukt Thermo (SN8) [37]

Za určitých podmínek mohou při letním provozu vzduchových výměníků vznikat problémy s hygienou (riziko tvorby plísní v důsledku kondenzace vzdušné vlhkosti na stěnách potrubí), což bývá hlavní otázka většiny potenciálních investorů. Řešením se může stát použití speciálního potrubního systému Awadukt Thermo firmy REHAU (**obr. 3.9**) s antimikrobiální úpravou vnitřního povrchu – integrací iontů stříbra při výrobě [37]. Hrdlové spoje těchto trubek mají též speciální zámek (detail viz **obr. 3.12**), který minimalizuje pronikání nežádoucích škodlivin dovnitř potrubní trasy. Jelikož se jedná o speciální výrobek, certifikovaný výhradně pro aplikaci vzduchových ZVT, je tento produkt i finančně náročnější než obyčejné PVC kanalizační potrubí (vyráběné ve větších sériích). Tím pak mohou neúměrně narůst celkové investiční náklady na realizaci výměníku, proto je nutné vždy zvážit jeho přínos v poměru k nákladům (viz **kapitola 5.4**).



Obr. 3.10: Hlavice nasávací věže – varianta dle [85]



Obr. 3.11: Výměnný kapsový filtr pro nasávací věž [85]

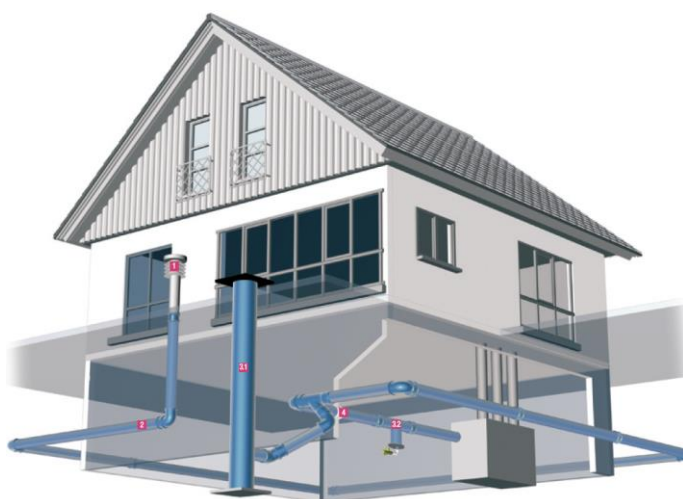


Obr. 3.12: Zámkový spoj systému Awadukt Thermo [37]

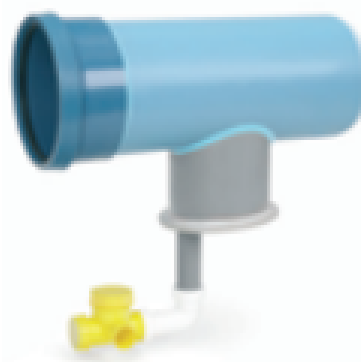
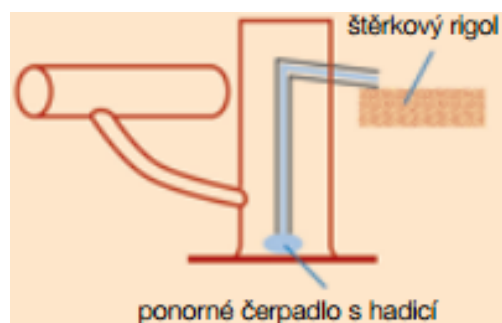
Potrubí bývá obvykle uloženo 1,5 až 2 m pod povrchem, tj. v nezámrzné hloubce. Může být vedeno přímo, případně s mírnými zlomy (snadnější čištění), nebo může tvořit okružní trasu kolem objektu – případně zemní registr (**obr. 3.20**) [82, 89]. Odstup mezi potrubími, resp. od okraje stavby, by měl být minimálně 1 m (kvůli vzájemnému negativnímu tepelnému ovlivnění). Pro maximální využití potenciálu naakumulovaného tepla zeminy by měl být obsyp kolem potrubí výměníku tvořen vlhkou jílovitou zeminou [16, 21] nebo zeminou s podobnými vlastnostmi (vysoká tepelná vodivost, vysoká objemová kapacita). Z důvodu velkého podílu vzduchových mezer se nedoporučuje obsyp pískem nebo štěrskem.

➤ Odvod kondenzátu a údržba

Zejména v letním období nastávají situace, kdy má povrch potrubí teplotu nižší, než je aktuální teplota rosného bodu – při průchodu vzduchu zemním výměníkem z něj tudíž kondenzuje vlhkost. Vzniklý kondenzát stéká ze stěn potrubí a drží se na dně trubek. Z tohoto důvodu musí být potrubí vedeno s mírným spádem (cca 2 % [18]), zajišťujícím odtok kondenzátu do sběrné/kontrolní šachty (**obr. 3.2a**), případně sifonu se zápachovou uzávěrkou (**obr. 3.14** dole; pro variantu spádování do sklepního prostoru viz **obr. 3.2b**). Pokud tuto skutečnost při pokládce potrubí opomeneme, vytvoříme tím ve stojícím kondenzátu vhodné podmínky pro vznik a vývoj nežádoucích mikroorganismů, což může vést i k následnému znehodnocení větracího vzduchu nepříjemným zápachem. Mikroby se mohou dále šířit vzduchotechnickým systémem a negativně působit na lidské zdraví, potraviny či materiál uvnitř budovy [90, 91]. Při pokládce a následném zásypu výkopu by se měla zemina dostatečně ztuhnout, aby se vlivem jejího postupného sedání potrubí nepropadlo a neovlivnilo se tak potřebné vsypávání s důsledky uvedenými výše.



Obr. 3.13: Řešení odvodu kondenzátu pomocí sběrné šachty; provedení podle [37]



Obr. 3.14: Odvod kondenzátu – řešení pro: exteriér (nahore), interiér (dole) [37]

Potrubí zemního výměníku musí být přístupné pro pozdější kontrolu a hlavně kvůli jeho čištění (ideálně alespoň 1 × ročně). Slouží k tomu zmíněná kontrolní šachta nebo též prostor ve sklepě objektu – dle konfigurace. Kontrolní šachta bývá většinou svařena z kruhových plastových skruží (nejčastěji z PP), minimálně průměru DN800, umožňujícím relativně snadný přístup a manipulaci [92].

Čištění se provádí nejčastěji protahováním čistícího přípravku (např. smotku z molitanu, **obr. 6.10** a **6.11** nebo také **obr. A.13**), namočeného v dezinfekčním roztoku, pomocí vestavěného lanka – pokud to však potrubní trasa dovoluje (pouze mírné zlomy s využitím 45° potrubních kolen). Konfigurace zemního registru (např. **obr. 3.20**) či okružní trasy kolem objektu je čištěna vysokotlakým proplachováním vodou nebo jednoduše zalitím výměníku vodou s příměsí dezinfekčního roztoku. Použitá kapalina, s příměsí chloru či jiných chemikálií, se v tomto množství nemůže vypouštět do kanalizace (vedoucí většinou do čističky odpadních vod) – celkový zalitý objem ZVT bývá přes 1000 l – a v ideálním případě by se měla ekologicky zlikvidovat. Frekvence a způsob čištění potrubí, příp. výměna všech filtrů, jsou zcela závislé na provozovateli/majiteli (z čehož plynou i potenciální problémy při zanedbání péče o zařízení) a měly by odpovídat aktuálním podmínkám a stavu ZVT [16].

Existuje i možnost řešení odvodu kondenzátu dle **obr. 3.13**, kdy je kondenzát shromažďován ve sběrné neprůchozí šachtě (v tomto případě o DN315 – viz též **obr. 3.14** nahoře), ze které je následně odčerpáván ponorným čerpadlem s automatickým vypnutím podle výšky vodní hladiny.

➤ Řízení provozu ZVT dle venkovní teploty vzduchu

Při provozu zařízení nastávají v průběhu roku situace, kdy je vhodnější nasávat přímo venkovní vzduch, bez teplotní úpravy průchodem přes zemní výměník. 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). Totéž platí v případech malého rozdílu teplot zeminy a vzduchu v exteriéru, tj. při nízkém ΔT . V těchto případech je vhodnější vzduch nasávat přímo z fasády přes fasádní kus s protidešťovou žaluzií (**obr. 3.3**) a tvarovku „T“ s klapkami (např. **obr. 3.1a**), jež jsou nejčastěji ovládány servopohonem, příp. mechanicky. Přepínání sání fasáda/ZVT je nejčastěji řízeno automaticky, čidlem venkovní teploty [16]. Existuje i možnost řešit přímé nasávání přes jednoduchý fasádní kolektor na jižní osluněné straně budovy v zimním období a naopak ze zastíněné fasády v létě [93]. Z důvodu náročnější realizace, omezené architektury a složitější regulace se této možnosti běžně nevyužívá.

Jak již bylo zmíněno výše, rekuperace tepla z odpadního vzduchu funguje jedině tehdy, pokud není ve vzduchotechnické jednotce zamrzlý výměník pro ZZT. Spodní interval přímého sání z fasády se proto 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÷25) °C dle [16], (2÷20) °C [17], (15÷22) °C [94] nebo také (-4÷24) °C [82]. Z důvodu určitého přehřevu vzduchu v potrubní trase před vstupem do VZT jednotky je možné nasávat i vzduch o mírných podnulových teplotách.

Řízením chodu ZVT se tak optimalizuje energetická náročnost větrání (tj. využití potenciálu ZZT) a docílí se i částečné regenerace zeminy. Některé aplikace však pracují i v kontinuálním režimu sání přes ZVT, tedy bez přepínání podle aktuálních klimatických podmínek (**kap. 7**).

3.2 Přímé provedení vzduchového ZVT

Toto uspořádání je též nazýváno „*klasický zemní výměník tepla*“. U přímého provedení ZVT větrací vzduch nejprve prochází přes sací element, umístěný mimo objekt – nejčastěji kontrolní šachtu, sací věž nebo box na zahradě (**obr. 3.2a÷c**). Následně prochází potrubím či potrubní sítí (registrem) a poté je nasáván do vzduchotechnické (větrací) jednotky [18]. Pokud je dům podsklepený a spád pozemku jde směrem k objektu (**obr. 3.2b**), můžeme upustit od kontrolní/sběrné šachty a vzduch do potrubní sítě nasávat přímo, pouze přes nadzemní kryt s filtry, čímž se výrazně sníží investiční náklady. V případě nových novostaveb, které jsou většinou nepodsklepené, je ale nutné realizovat ZVT s kontrolní nebo alespoň sběrnou šachtou (**obr. 3.2c**), která zajistí shromažďování vzniklého kondenzátu. Konkrétní řešení se vždy odvíjí od dispozice na pozemku, zejména jeho spádování. Při vhodné venkovní teplotě lze vzduch nasávat přímo do VZT jednotky přes venkovní žaluzii (**obr. 3.3**). Nutné je ovšem vytvořit průchod sacího potrubí skrz fasádu a nainstalovat přepínací „T-kus“ s klapkami a servopohonem. Příklady některých konkrétních aplikací přímého typu ZVT u rodinných domů lze pro ČR nalézt např. v databázi pasivních domů [29]. Provedení velkého zemního výměníku Centra ekologických aktivit ve Sluňákově (nedaleko Olomouce) uvádí práce [9, 21]. Další větší aplikace ZVT je v Praze-Chodov, kde vzduch z podzemního kanálu – betonový tubus o Φ 2m a délky cca 400 m – provětrává meziprostor dvojité fasády u administrativní budovy prodejního a servisního centra společnosti *Daimler Chrysler Automotive Bohemia* [31]; tímto se efektivně sníží náklady na strojní chlazení.

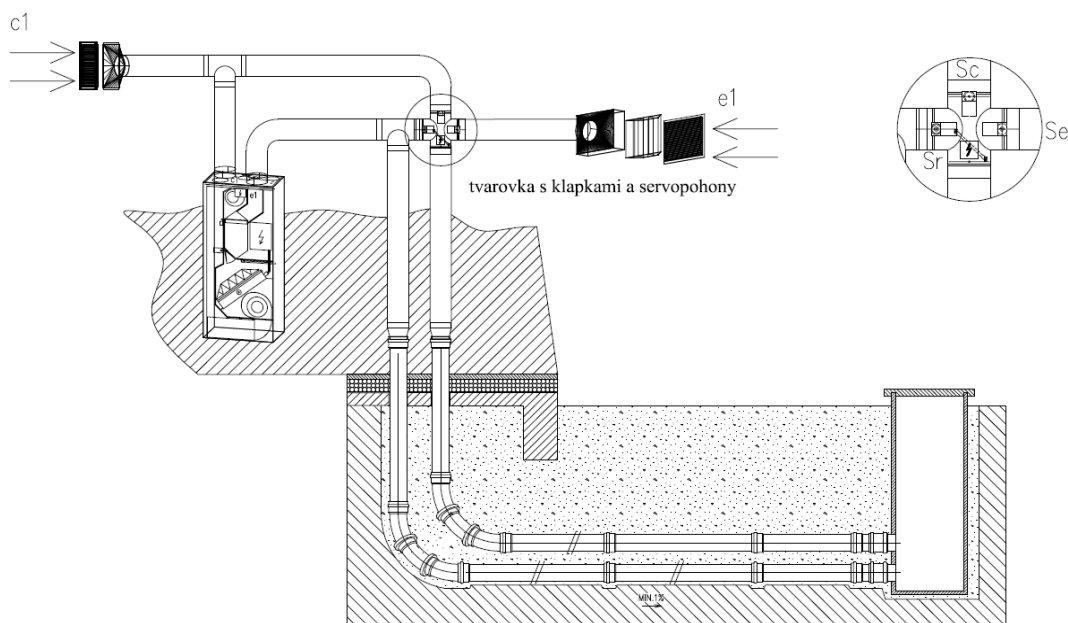
3.3 Cirkulační provedení vzduchového ZVT

V běžné technické praxi se lze setkat se zkráceným označením „ZVT-c“. Oproti přímému provedení tato varianta umožňuje režim cirkulačního chlazení interiérového vzduchu, využívaný zejména v letním období. Z toho plynou další možné energetické úspory [95]. Ve výkopu jsou uloženy dvě potrubní trasy, tvořící uzavřenou cirkulační smyčku. Potrubí mohou být uložena nad sebou (**obr. 3.15**) či vedle sebe (**obr. 3.16**) – výkop může být tudíž i poloviční délky. Zásadní rozdíl oproti přímému typu je v tom, že se zde čerstvý větrací vzduch vždy nasává přes venkovní fasádní žaluzii (viz **obr. 3.3**) [18]. Poté pokračuje buď přímo do vzduchotechnické jednotky, nebo do zemního výměníku, a to dle aktuální venkovní teploty. Navíc je nutná pouze instalace speciální tvarovky s klapkami a sofistikovanější systém *MaR*.

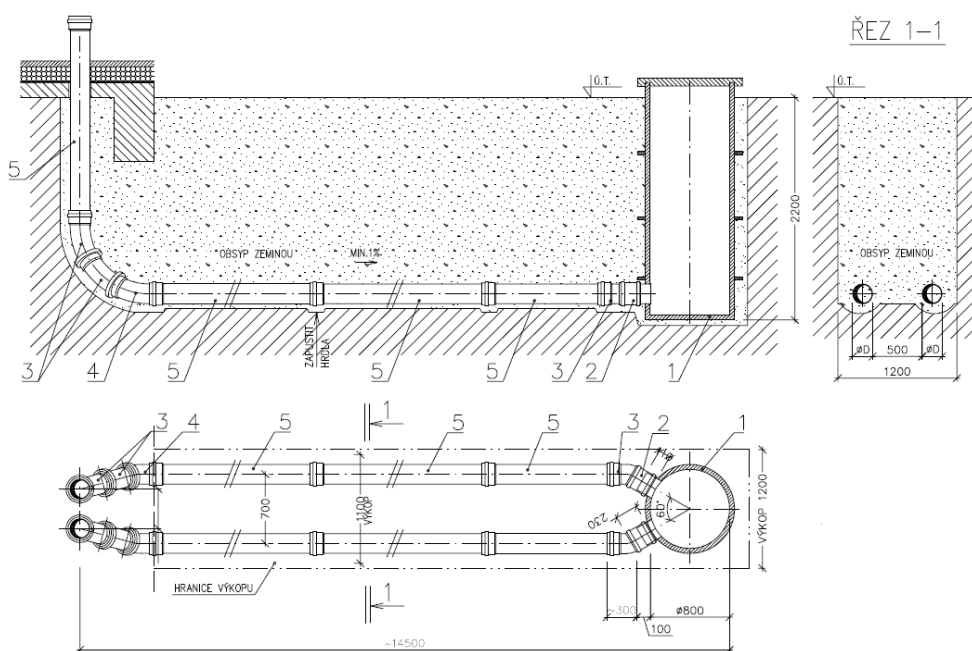
Cirkulačního režimu chlazení se dá s výhodou využít též v zimním období, kdy například vlivem vaření nebo příchodem návštěvy krátkodobě vzrostou vnitřní tepelné zisky. Pomocí zemního výměníku se tak z interiéru odvádí část této tepelné zátěže do zeminy; té navíc dodáváme tepelnou energii, kterou opět můžeme 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) [16, 46-49, 90].

3 Zemní výměníky tepla pro vzduchotechnické systémy budov

Součástí zemního výměníku je plastová kontrolní šachta (obdobně jako u přímého provedení ZVT), ale místo nasávací stříšky je zde vzduchotěsný odnímatelný kryt a pochozí betonový poklop (viz např. **obr. A.14**). Šachta slouží ke sběru a odvodu kondenzátu, pro pravidelnou kontrolu potrubí ZVT a jeho čištění (ideálně 1× ročně). První realizací cirkulačního typu ZVT byl (v podmínkách ČR) zemní výměník pro EPD v Rychnově u Jablonce nad Nisou [54, 95-99]. Obdobné zařízení, umožňující cirkulační chlazení, je vybudováno také na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Příklady dalších aplikací lze opět nalézt v databázi EPD [29]; toto provedení ale není tak rozšířené, jako klasický (přímý) typ.



Obr. 3.15: Cirkulační typ ZVT – varianta s potrubím nad sebou, dle [18]



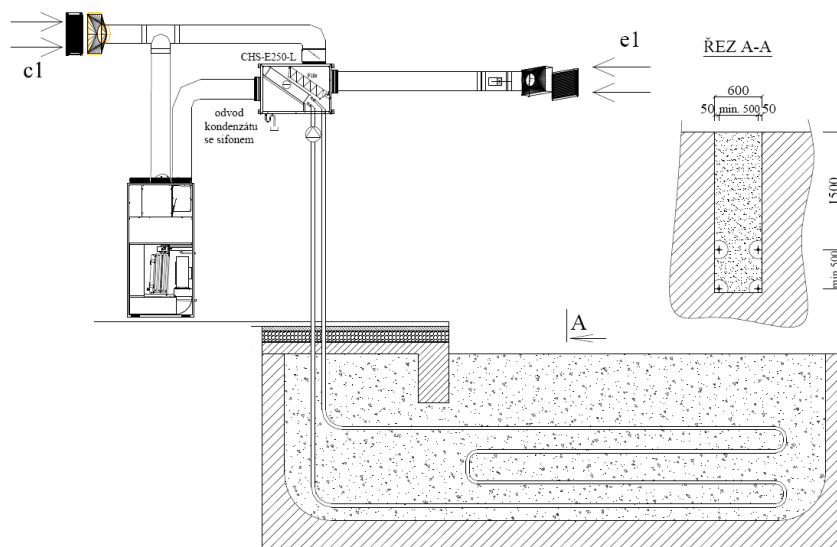
Obr. 3.16: Cirkulační typ ZVT – varianta s potrubím vedle sebe, dle [18]

3.4 Hybridní provedení vzduchového ZVT

Možná je též kombinace přímého a cirkulačního provedení ZVT, umožňující jak přímý průchod větracího vzduchu, tak i cirkulační chlazení vzduchu vnitřního. Přepínání mezi oběma variantami může být automatické nebo manuální (jednoduchou mechanickou úpravou zařízení – např. propojením jednotlivých potrubí ohebnou hadicí dle **obr. A.11**, apod.). Cirkulační ZVT na FSI VUT v Brně (viz [A8, A10-A13, A15]), zmíněný v předchozí podkapitole, je možné po modifikaci provozovat v několika režimech: větrací vzduch může kromě cirkulační smyčky procházet buď jedním samostatným potrubím, a to ve dvou úrovních pod povrchem, nebo dvěma paralelními potrubími – blíže viz **kap. 6.2**. Taktéž uvedený ZVT-c pro EPD v Rychnově [21, 99] můžeme zařadit do kategorie „hybridní“.

3.5 Kapalinové zemní výměníky

Kapalinový ZVT (**obr. 3.17**) je tvořen uzavřeným potrubním okruhem tvořícím zemní plošný kolektor [19, 100] – obdobu horizontálních kolektorů pro tepelná čerpadla (TČ) typu země/voda [53, 65]. V okruhu proudí nemrznoucí teplotná kapalina (solanka nebo speciální směs, např. propylen-glykol [16, 22]). 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 ÷ 8 let kompletně vyměnit (v objemu cca 100 l). Součástí okruhu jsou rovněž standardní topenářské prvky, jež zajišťují správnou funkci celého systému: čerpadlo, expanzní nádoba, zpětná klapka, pojistný, vypouštěcí/napouštěcí a odvzdušňovací ventil.

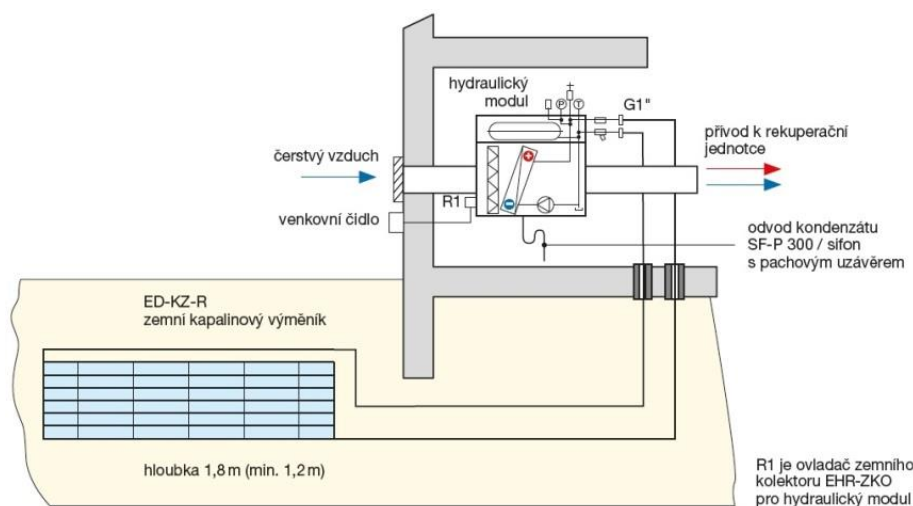


Obr. 3.17: Zemní výměník tepla – kapalinový typ, provedení podle [19]

Pro potrubní systém mohou být použity PE hadice, běžně používané na přípojky pitné vody (DN32). Možností je i použití speciálních (tedy i investičně nákladnějších) hadic s větší tepelnou vodivostí a větší odolností proti bodovému zatížení, určených pro primární okruhy TČ – otázkou je však poměr cena/výkon. Vedení o délce 100 m, uložené v hloubce 1,5 až 2 m pod terémem, pak postačí (dle typu zeminy) k předehřevu cca 200 m³/h nasávaného vzduchu

[22]. V případě delších tras se kvůli hydraulickým poměrům volí raději dvě paralelní smyčky o poloviční délce (max. do 100 m). Potrubí může být položeno také několikrát vedle sebe/nad sebou – při dodržení minimálního odstupu 50 cm. Tato varianta umožňuje (stejně jako ZVT-c) cirkulační chlazení interního vzduchu v létě. Ve zvoleném teplotním intervalu je venkovní vzduch možné nasávat přes venkovní žaluzii pomocí by-passu přímo do VZT jednotky. Teplo, resp. chlad je nasávanému vzduchu předáváno uvnitř budovy přes kompaktní výměník tepla typu kapalina/vzduch, umístěný nejčastěji na začátku vzduchotechnického řetězce. Některé aplikace tohoto typu ZVT v ČR lze nalézt např. v elektronické databázi pasivních domů [29].

Oproti vzduchové variantě je zde tedy větrací vzduch ohříván nepřímo, neprochází žádným potrubím pod zemí – riziko možného mikrobiologického znečištění přiváděného vzduchu je proto menší než u vzduchové varianty. Odpadají tak částečně starosti s hygienou a problémy s ní spojené (spád potrubí, čerpání kondenzátu apod.). Z těchto důvodů se dnes investoři kloní stále častěji k instalaci kapalinových ZVT (nebo raději zemní výměník neinstalují vůbec).



Obr. 3.18: Zemní výměník tepla – kapalinový typ, provedení dle [100]

V dnešní době se pro tuto aplikaci začínají používat speciální boxy – tzv. „hydromodul“, který obsahuje všechny potřebné komponenty kapalinového okruhu a řeší také filtraci přivodního vzduchu (obr. 3.17 a 3.18). Při ochlazení vzduchu v letních měsících vzniká na povrchu výměníku kondenzát, musí zde proto být jímka s odvodem přes sifon do kanalizace. Pro kontrolu a následné čištění je v přivodním potrubí vyžadován inspekční otvor – většinou realizovaný v technické místnosti, kvůli dobré přístupnosti.

3.6 Návrh vzduchových zemních výměníků tepla

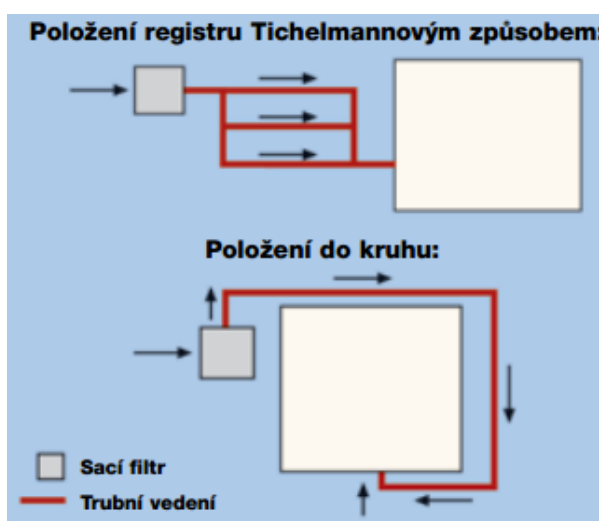
Vzhledem k omezenému potenciálu by se měl zemní výměník navrhovat podle konkrétní situace – s ohledem na zajištění požadovaných parametrů (tj. hlavně funkce protimrazové ochrany) a dobu svého využití. Existují určitá základní doporučení pro realizaci ZVT, např. [18, 19, 95], ta však nezajistí, že zemní výměník bude v reálném provozu zcela splňovat kladené požadavky. Pro návrh zemních výměníků rovněž existují zjednodušené

3 Zemní výměníky tepla pro vzduchotechnické systémy budov

softwarové nástroje (*PHLuft* nebo *PHPP* [45]), u nichž však lze 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* [101], *Energy+* [103] nebo *ESP-r* (např. [102]). 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 – ta jsou však v průběhu jednotlivých let velmi variabilní a značně se mění s lokalitou (např. Vysočina vs. jižní Morava). Při energetických simulacích se proto většinou využívá různých klimatických databází (*Meteonorm*, *Energy+* aj.). [A9] Ty obsahují pro různé lokality průměrná roční klimatická data za určité časové období – většinou 10 let a více. Přesnost simulace je dána také stupněm zjednodušení modelu (např. zanedbáním vlivu nasávací šachty, odporu materiálu potrubí atp.). Reálný provoz ovlivňuje i uživatel, který zařízení nemusí vždy provozovat dle schématu nastaveného v energetické simulaci (intenzita větrání, vnitřní zisky, ...). V běžné praxi se vypočtená délka ZVT pro jistotu nadhodnotí, čímž se předejde „vymrznutí“ okolní zeminy [104] a tím i postupné ztrátě výkonu výměníku v čase. Tato cesta však vždy znamená navýšení investičních nákladů (výkopové práce, bednění výkopu, aj.). Celková energetická výtěžnost (resp. výkon) zařízení se tím podstatně nezvýší, jelikož nárůst výstupní teploty vzduchu s přibývajícím délkou výrazně klesá.



Obr. 3.19: Sběrné potrubí zemního registru (foto z instalace [37])



Obr. 3.20: Možné trasy potrubního vedení – podle [37]

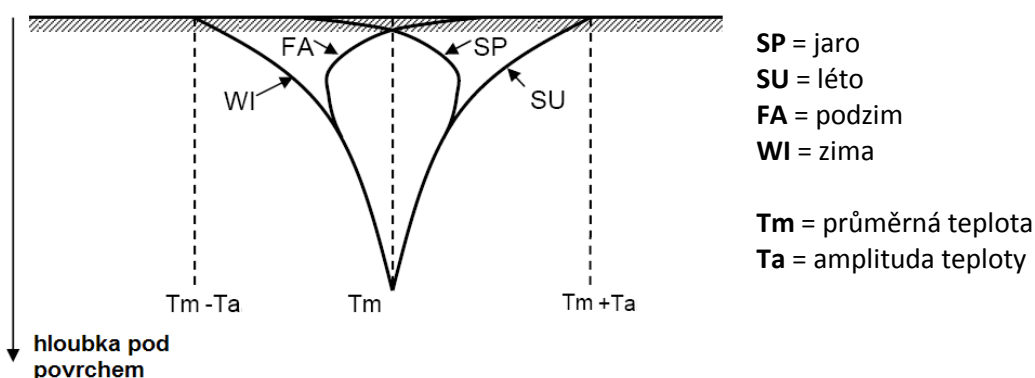
Při návrhu se vychází hlavně z parametrů zimního provozu – požadavkem je dodržení minimální teploty vzduchu před vstupem do výměníku pro ZZT nebo požadovaná účinnost zemního výměníku [36, 95]. Požadované změny teploty se dosáhne dostatečným setrváním vzduchu v potrubí. Rychlost proudění vzduchu uvnitř trubky by se tak měla pohybovat maximálně v rozmezí 1,5 až 2 m/s – tímto se i značně zredukuje tlaková ztráta, resp. spotřeba energie pro pohon sacího ventilátoru [36]. 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“ (obr. 3.19, obr. 3.20 nahoře) [21, 95]. Při návrhu ZVT bychom vždy měli najít kompromis mezi optimálním poměrem tlakové ztráty, intenzitou přestupu tepla, rychlostí proudícího vzduchu a také investičními náklady [105] – k tomu se navíc musí optimalizovaný zemní výměník vejít na konkrétní pozemek.

Dále při návrhu musíme respektovat určitá specifika, kterými se zajistí správná funkce zařízení a předejde se případným problémům při provozu. Zásadním požadavkem je těsnost potrubí vůči pronikání spodní vody či zemním plynům (zejména radonu). Jelikož je zemní potrubí předřazeno před VZT jednotku, vzniká uvnitř podtlak, který by netěsnostmi nasával zmíněné škodliviny a tím znehodnocoval kvalitu přiváděného vzduchu. Vodotěsně a plynotěsně musí být také řešeno sání do zemního výměníku a jeho vstup přes konstrukci do budovy. Potrubní materiál (viz kapitola 3.1) by měl vykazovat vysokou kruhovou a podélnou pevnost, jež zajistí tvarovou stálost při hutnění zeminy a tím následně zabráni nežádoucímu „zvlnění“ potrubí. Případné deformace jsou nevhodné z hlediska odvodu kondenzátu a porušení těsnosti hrdlových spojů s následnými problémy zmíněnými výše.

3.7 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). Z dlouhodobého pohledu jsou tyto dvě veličiny svázané – v důsledku proměnných klimatických podmínek na povrchu a akumulační schopnosti zeminy se totiž v zemském polomasivu v průběhu roku tvoří časový teplotní profil, tzv. „teplotní trychtýř“ (viz obr. 3.21) [46, 71, 72, 106].



Obr. 3.21: Obecné schéma průběhu teplot zeminy pod povrchem; převzato z [101]

Podle dlouhodobě naměřených hodnot můžeme svrchní vrstvu zemského povrchu rozdělit na tři hlavní oblasti/zóny [106]:

- **zóna povrchu** – dosahuje hloubky cca 1 m, teplota zeminy zde značně kolísá a je velmi závislá na krátkodobých změnách povětrnostních podmínek;
- **mělká zóna** – zabírá oblast hlubokou cca 1÷8 m (lehké, suché půdy) nebo až 20 m (těžké, vlhké písčité půdy), teplota je téměř konstantní a blíží se průměrné roční teplotě vzduchu, teplotní rozvrstvení je závislé hlavně na sezónním cyklu počasí;
- **hluboká zóna** – asi 8÷20 m hluboko je teplota prakticky konstantní, přičemž s narůstající vzdáleností od povrchu pomalu stoupá, podle geotermálního stupně (cca 30 °C/km, viz např. [68]).

Přesné teplotní rozvrstvení lze získat řešením parciální diferenciální rovnice pro trojrozměrný (3D) přenos tepla zeminou (viz **rovnice (1a)**). K tomu je ovšem nutno znát přesné okrajové podmínky na povrchu [107] – nejlépe přímo povrchovou teplotu země. Zjednodušením **rovnice (1a)** můžeme řešit pouze jednorozměrný (1D) přenos tepla zeminou ve směru hloubky (souřadnice z), čímž vznikne **rovnice (1b)**:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c_{p,gr} \cdot \rho_{gr} \cdot T) = \lambda_{gr} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{1}{a_{gr}} \cdot \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} \quad (1b)$$

kde: a_{gr} – teplotní vodivost (difusivita) zeminy [$m^2 \cdot s^{-1}$],

$c_{p,gr}$ – měrná tepelná kapacita zeminy při konstantním tlaku [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

τ – čas [s],

T – teplota [°C], pozn. $T = f(x, y, z, \tau)$,

x, y, z – kartézské souřadnice [m],

λ_{gr} – součinitel tepelné vodivosti zeminy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

ρ_{gr} – hustota zeminy [$kg \cdot m^{-3}$].

Okrajové podmínky na povrchu lze následně zjednodušit použitím periodického sinusového průběhu (průměrné) teploty vzduchu během roku. Časový průběh povrchové teploty T_{sur} je možné vypočítat vyřešením **rovnice (2)**, s využitím zjednodušujících členů **CE, LR, SR** a **LE** pro měrné tepelné toky (dosazení např. podle literatury [68, 107]):

$$-\lambda_{gr} \cdot \frac{\partial T_{sur}}{\partial z} \Big|_{z=0} = CE - LR + SR - LE \quad (2)$$

kde: **CE** – hustota tepelného toku přirozenou konvekcí mezi okolním vzduchem a zemským povrchem [$W \cdot m^{-2}$],

LR – hustota tepel. toku emitovaná z povrchu země dlouhovlnným zářením [$W \cdot m^{-2}$],

SR – hustota tepelného toku krátkovlnného (slunečního) záření, pohlceného zemským povrchem [$W \cdot m^{-2}$],

LE – hustota tepelného toku důsledkem odpařování vody z povrchu země [$W \cdot m^{-2}$].

Model byl validován oproti hodinovým teplotám naměřeným v řeckých Athénách a v irském Dublinu za období 10 let (1981–1990), a to pro dva typy povrchů – holina a krátký

travní porost – s velmi dobrou shodou. Teplota zeminy je tak závislá jednak na vlastnostech povrchu (vegetace, sníh, dlažba, asfaltová komunikace atp.) a také jeho interakci s okolím [65, 69, 70, 108, 109] – tzn. klimatických podmínkách (teplota a vlhkost vzduchu, intenzita větru a slunečního záření, srážky atp.). Dalšími důležitými faktory jsou pak geologické složení (tj. půdní typ), struktura půdy (viz **obr. A.4**) a její vlhkost. Ty společně určují fyzikální vlastnosti zeminy [110], z nichž zase vyplývá její teplotní vodivost:

$$a_{gr} = \frac{\lambda_{gr}}{\rho_{gr} \cdot c_{p,gr}} \quad (3)$$

Při úvaze, že teplota zemského povrchu T_{sur} je rovna teplotě okolního vzduchu T_a [107], lze analytickým řešením 1D neustáleného vedení tepla (**rov. (1b)**) v polonekonečném homogenním tělese získat **rovnici (4a)** [101, 111]:

$$T_{gr}(z, \tau) = T_{ma} - A_{at} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot a_{gr}}}} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(\tau - \tau_{min} - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot a_{gr}}} \right) \right] \quad (4a)$$

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].

Pozn. Pro jednoduchost výpočtu je zde čas zadáván ve dnech od počátku roku a teplotní vodivost a_{gr} má tak jednotku [$\text{m}^2 \cdot \text{den}^{-1}$].

Tato rovnice (nazývaná též „Kasuda formula“) slouží pro zjednodušený výpočet teplotního rozvrstvení zeminy a při výpočtech se jí běžně využívá. Zmíněného postupu je využito též v simulačním programu TRNSYS, kde je rovnice implementována ve výpočetním modulu Type 77: „Simple Ground Temperature Profile“ [101]. Zjednodušeně lze pak říci, že teplota zeminy kolísá kolem určité střední hodnoty (T_{ma}) s amplitudou (A_{at}), jež je s narůstající hloubkou (z) tlumena a oproti průběhu teploty vzduchu časově posunuta. Ve skutečnosti se, vzhledem k okrajovým podmínkám (**rov. (2)**), povrchová teplota zeminy nerovná teplotě okolního vzduchu. Při výpočtu teplotního rozvrstvení zeminy se tak lze setkat s **rovnici (4b)** – tzv. „Buggs’s formula“, což je mírně poupřavená forma **rovnice (4a)**:

$$T_{gr}(z, \tau) = (T_{ma} \pm \Delta T_{ma}) - 1,07 \cdot k_v \cdot A_{at} \cdot e^{-0,00031552 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a_{gr}}}} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot \left(\tau - \tau_{min} + 0,018335 \cdot z \cdot \sqrt{\frac{1}{a_{gr}}} \right) \right] \quad (4b)$$

kde: ΔT_{ma} – diferenciál teploty zeminy, tj. rozdíl mezi průměrnou teplotou zeminy v „hluboké zóně“ (cca 10 m) a průměrnou teplotou vzduchu za několikaleté období [$^{\circ}\text{C}$],

k_v – koeficient vegetace [-]; zohledňuje okrajovou podmínku u přestupu tepla vzduch/zemina.

Zmíněný způsob řešení byl použit v práci [106], kde byl vzorec adaptován pro severní polokouli. Výsledek výpočtu byl validován pro klimatickou oblast polské Poznaň, s dobrou shodou vůči experimentálně naměřeným datům ze dvou vrtů v místech s různými povrchy (v tomto případě trávník a parkoviště pokryté kostkami).

Vlastnosti některých druhů zemin a hornin lze nalézt v odborné literatuře, např. [66, 68, 71, 110, 112]. Nejvhodnější zeminou pro obsyp potrubí zemního výměníku je ta, jež má velkou objemovou kapacitu spolu s vysokým součinitelem tepelné vodivosti [21]. Z tohoto pohledu je žádoucí vyšší přirozená vlhkost zeminy, naopak zcela nevhodná je suchá písčítá zemina. Vlhkost a teplota půdy jsou v několikacentimetrové svrchní vrstvě vzájemně svázány lineární závislostí [113] – pro větší vzdálenosti pod povrchem je ale situace složitější. Zemní vlhkost v zimních měsících způsobuje nežádoucí promrzání zeminy [114-116], čímž je pak narušena funkce zemního výměníku jako protimrazové ochrany. V podmínkách ČR je běžně zámrazná hloubka okolo 1 m pod povrchem, 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 [18], podle typu zeminy a charakteru povrchu. Z toho je na první pohled patrný omezený topný/chladicí výkon zemního výměníku. Položíme-li potrubní trasu např. v blízkosti základů objektu, topný výkon se, vlivem tepelných ztrát ze suterénu [112, 117], může o něco navýšit. Teplota půdy je zde v zimním období vyšší než na volném prostranství mimo zástavbu. Chladicí výkon díky tomu naopak o něco klesne, ale zásadnější je zimní režim provozu. Tímto však můžeme ušetřit (někdy i nemalé) investiční náklady za výkopové práce a realizaci potřebného bednění. Taktéž v blízkosti vedení kanalizačního potrubí bývá teplota zeminy vyšší. Je však nutné dbát určité míry opatrnosti, aby do ZVT z kanalizace nepronikal nepříjemný zápach, případně prosakující znečištěná voda. Existuje i varianta umístění potrubní trasy přímo do základů budovy – autorovi jsou známy některé realizace ([86], blíže viz kapitola 7).

KAPITOLA 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 [23, 118]. Do popředí proto vystupuje význam působení vnitřního prostředí (tzv. *mikroklimatu*) budov na zdraví a psychiku člověka. Vnitřní prostředí můžeme (např. podle [47, 48, 90, 91, 119]) rozložit na několik významných složek:

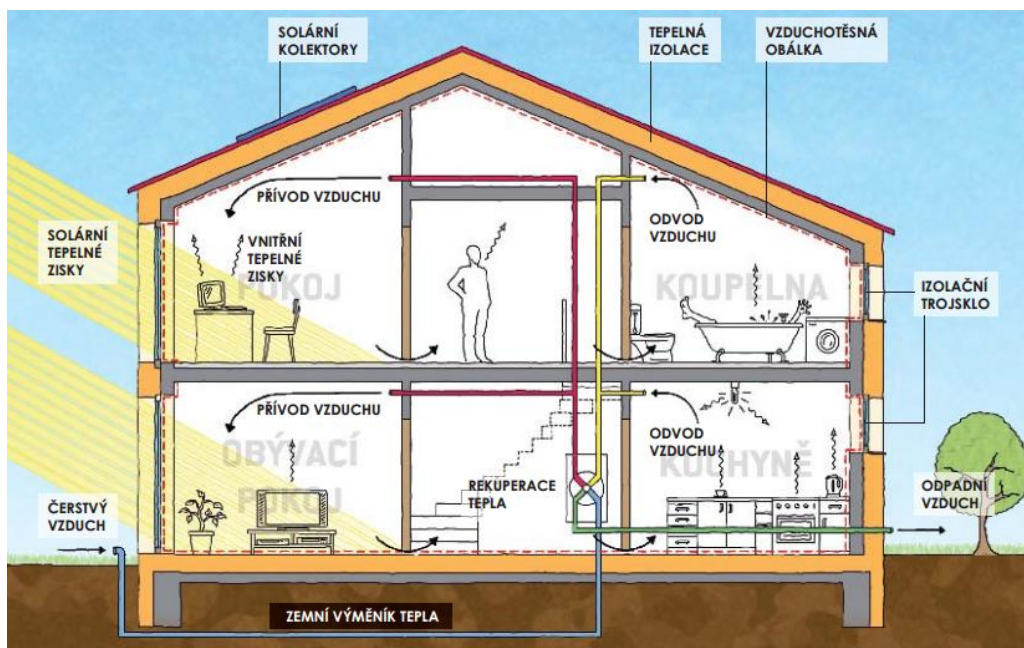
- **tepelně-vlhkostní,**
- **odérové,**
- **aerosolové,**
- **ionizační,**
- **toxické,**
- **mikrobiální.**

Tyto pak spolu určují kvalitu vnitřního ovzduší (anglicky: IAQ, „*Indoor Air Quality*“ [120-122]). Mezi další, důležité složky interního mikroklimatu, patří složka světelná, akustická nebo elektromagnetická [90, 91, 118]. Podle toho, jak jednotlivé složky prostředí působí na uživatele budov, hovoříme o pohodě tepelné, vlhkostní, světelné, akustické (hluk a vibrace) atp. [13, 90]. Všechny zmíněné složky pak dohromady určují celkovou kvalitu vnitřního prostředí (anglicky: IEQ, „*Indoor Environmental Quality*“ [123]). Hlavními složkami však jsou teplota a vlhkost [90], jež působí nejen na člověka, ale i na zvířata, technologie, potraviny a jiné materiály nacházející se uvnitř budovy [25, 26, 90, 124-126]. Vnitřní mikroklima má také zásadní vliv na životnost stavebních materiálů (resp. životnost budovy samotné). Na rozdíl od exteriérového prostředí ho můžeme v jistých mezích upravovat. Zejména teplota a vlhkost vzduchu se navzájem úzce ovlivňují a podmiňují. V nízkoenergetických a pasivních domech je, díky nucené ventilaci, oproti stávající (běžné) výstavbě zajištěna zpravidla vyšší kvalita vnitřního prostředí [7, 99, 127]. 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 [23], [26] nebo [27].

4.1 Vliv intenzity větrání

Výše zmíněné hlavní složky vnitřního prostředí budov souvisí s existujícím vzduchovým polem. Můžeme je proto výrazně ovlivnit způsobem větrání, zejména kontrolovaným (tj. nuceným), viz **kapitola 2.1**. Zvláště u dobře utěsněných objektů, jakými jsou NED a EPD

(obr. 4.1), je zajištění kvalitního větrání zcela nezbytné – navrhuje se zásadně nucený způsob. Přívod čerstvého venkovního vzduchu je nezbytný jednak k zajištění dodávky kyslíku potřebného pro dýchání člověka (postačuje cca 6 až 9 m³/hod na 1 osobu [50]), dnes ale zejména ke snížení koncentrace nežádoucích škodlivin kontinuálně vznikajících v interiéru (hlavně vodní pára a CO₂) [23, 90, 119]. Přiváděná dávka vzduchu se proto značně navyšuje – jako přijatelné množství se doporučuje hodnota 25 m³/hod na 1 osobu [8, 47, 90], 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.).



Obr. 4.1: Základní koncept a technologie pasivního domu; převzato z [128]
– uváděn je i zemní výměník tepla –

Větrací zařízení se musí, bez zásahů uživatelů, postarat o trvalou hygienicky nutnou výměnu vzduchu [8, 47, 48] – 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. Jako jednoduchý ukazatel kvality vnitřního mikroklimatu může pak sloužit koncentrace CO₂ nebo relativní vlhkost (RH) [54, 90, 129]. Uznávaným limitem koncentrace CO₂ v interiéru, jako indikátoru znečištění/kvality ovzduší lidskými oděry, je z historického hlediska tzv. „Pettenkoferovo kritérium“, které doporučuje maximální hodnotu 0,1 % (tzn. 1000 ppm = 1 l/m³, nebo též 1,8 g/m³). Zmíněná vyhláška č. 268 je o něco benevolentnější a udává, že koncentrace nesmí překročit hodnotu 1500 ppm. V běžné technické praxi (zejména zateplené budovy s novými těsnými okny bez nucené ventilace – např. školní budovy [130] nebo panelové domy [131]) se lze setkat i s mnohem vyššími naměřenými hodnotami [118, 129]. Uvedený stav je však, z hlediska lidského zdraví, možno akceptovat pouze ve výjimečných případech, a to jen krátkodobě. Dále by se ze zdravotního hlediska měla hodnota RH pohybovat v rozsahu 40 ÷ 60 % [23, 90, 132]. Při těchto hodnotách je

minimalizován růst mikroorganismů v interiéru a u člověka ještě nedochází k nežádoucímu vysušování sliznic.

4.2 Mikrobiální mikroklima a vzduchotechnika

Vzduchotechnická a klimatizační zařízení jsou již dávno běžnou součástí administrativních budov, velkých nákupních center nebo výrobních hal. Většina parametrů interního ovzduší – teplota, vlhkost a koncentrace CO₂ – je kontinuálně monitorována a upravována tak, aby byla zajištěna pohoda vnitřního mikroklimatu [133, 134]. Přejedem od přirozeného větrání k nucenému se dnes ale vzduchotechnika začíná 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 kapalné formě [23, 90, 118, 120, 121, 135]. Původcem zhoršení mikrobiálního mikroklimatu se paradoxně mohou stát právě zařízení na úpravu vzduchu a jejich příslušenství [136-140] – VZT potrubí, filtry (**obr. 4.2**), deskové výměníky (**obr. 4.3**, **obr. 8.18** vlevo), 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. Prvotním cílem je tedy zajistit, aby nedocházelo ke kondenzaci vodní páry na povrchu stavebních konstrukcí a jiných součástí budovy – tím, že povrchy budou „teplé“ a nedojde k podkročení teploty rosného bodu (viz např. soubor stavebních norem ČSN 73 0540 *Tepelná ochrana budov*).



Obr. 4.2: Zanesený filtr cirkulačního vzduchu v teplovzdušné VZT jednotce (foto: autor)



Obr. 4.3: Znečištěné lamely deskového rekuperačního výměníku pro ZVT (foto: autor)

Dalším, neméně důležitým kritériem je únosná koncentrace mikrobů a jiných polutantů, viz *Vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb.* [141], která stanovuje hygienické limity v obytných místnostech. Stanovení koncentrace se provádí podle metodiky [142] – aktivním nasáváním vzduchu pomocí tzv. *aeroskopu* (**obr. 4.5**) se zachytem mikroorganismů na Petriho misce s živnou (agarovou) půdou a jejich následnou kultivací při dané teplotě. Přístroj dokáže nasávat přesně definované objemové množství vzduchu, a to v několika regulačních stupních – typicky např. 30 l/min [35]. Po nastaveném času odběru

vzorku (např. 5 min) a kultivaci misek v termostatu (při určité konstantní teplotě, např. 37 °C, v jasně definovaném časovém intervalu) se pak dají narostlé kolonie jednoduše přepočítat na 1 m³ vzduchu prosátého vzorkovačem. Dle zmíněné vyhlášky jsou maximální povolené koncentrace určeny takto: 500 kolonie tvořících jednotek (KTJ, anglicky: CFU „*Colony Forming Unit*“ [143]) na 1 m³ nasátého vzduchu pro bakterie a 500 KTJ·m⁻³ pro plísně. Dále je stanovena limitní hodnota pro výskyt roztočů ve vnitřním prostředí staveb na 2 µg alergenů (nebo 0,6 mg guaninu) na jeden gram prachu vysátého z lůžek, čalouněného nábytku a koberců [141].

Kvalita přiváděného vzduchu (IAQ) se na rozdíl třeba od pitné vody zpravidla pravidelně nekontroluje. Mikroorganismy pak negativně působí na lidské zdraví [90, 123, 132, 137, 144-148], s čímž následně souvisí i lidská produktivita v pracovním procesu. Nevhodné mikrobiální mikroklima se tak může stát jednou z příčin tzv. „syndromu nemocných budov“ („*Sick Building Syndrome*“, SBS) [23, 46, 90, 136, 137, 149]. Mikroby dále mohou znehodnocovat i stavební a jiné materiály uvnitř budov [25, 125, 126], což má zřejmý nežádoucí ekonomický dopad [122, 147]. Je však třeba zmínit, že existují také mikroorganismy, které jsou člověku neškodné nebo dokonce pro něj prospěšné – s výhodou se jich využívá např. v potravinářství, zdravotnictví, čištění odpadních vod apod.

Při správném návrhu a údržbě systému řízeného větrání je v budově možné udržet vhodné mikrobiální mikroklima. Jedním z hlavních úkolů by mělo být zamezení kondenzace vzdušné vlhkosti v celém systému ventilace. Ve studii [150] 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 vzduchotechnického potrubí, které je (po filtrech a zvlhčovačích) dalším rizikovým místem systému [151]. Potrubí by proto mělo mít inspekční otvory pro snadný přístup a být v pravidelných intervalech čištěno [122, 152]. Mimo mechanického čištění, kterým z povrchu odstraníme usazený prach a jiné nečistoty, lze kvalitu přiváděného vzduchu zlepšit tzv. *fyzikální sterilizací* [153, 154]. Pomocí germicidní výbojky (tj. UV zářením) umístěné ve VZT potrubí se značně redukuje přítomnost bakterií, kvasinek a plísní. Možným řešením je také využití materiálů s antimikrobiální úpravou povrchu – tohoto řešení je však dnes využíváno spíše pro speciální aplikace, např. ve zdravotnictví.

Nejčastěji detekované bakterie a plísně v přiváděném vzduchu jsou uvedeny například v práci [155]. Zde je také uvedeno, že ve vzduchotechnice je hlavním faktorem při 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 [133]. Metabolismus mikroorganismů vylučuje mikrobiální těkavé organické látky („*Microbial Volatile Organic Compounds*“, MVOC) [156], které mohou být též vhodným indikátorem jejich přítomnosti. Podle [157] by vyhodnocení biologických kontaminantů pomocí rozborů filtrů ze vzduchotechnických jednotek mohlo být možnou alternativou pro dlouhodobé sledování odběrových vzorků ze vzduchu (např. místo aktivního nasávání vzduchu pomocí aeroskopu).

4.3 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 – zejména během letního provozu ZVT (chlazení větracího či cirkulačního vzduchu). Numerické simulace provozu a některá měření z reálných aplikací kondenzaci potvrzují ([21, 62, A6, A7]). S provozem zemních výměníků je u nás – na rozdíl od zahraničí (Německo, Rakousko, Švýcarsko aj.) – obecně méně zkušeností a otázka hygienického rizika se stává jedním z prvních dotazů případných investorů [30-32]. Vnitřní mikroklima budov se dnes zpravidla řeší pouze ve vztahu k teplotě, vlhkosti a koncentracím CO₂ nebo VOC [23, 54, 119, 121, 129, 158]. Jelikož v souvislosti s rostoucím rozšířením teplovzdušných vytápěcích systémů pro energeticky úsporné domy roste i počet realizací zemních výměníků (a to nejen v ČR), byla provedena rešerše 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 [159, 160], ale konkrétní data nebyla prozatím zveřejněna – hlavně z důvodu nereprezentativnosti statistického vzorku (požadováno je několik desítek odběrů, zde pouze 2) 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 ([33, 35], souhrnně [34]). 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 šterbinovým vzorkovačem (Casella/UK – obdoba zmíněného aeroskopu, viz **obr. 4.4**) se zachytem na Petriho misce. Jedná se ovšem o práci téměř 20 let starou (odběry realizovány v lednu ÷ říjnu 1996), přičemž se na studii odkazuje i většina příspěvků, kde je problematika hygieny vzduchových ZVT zmíněna (např. [21, 87, 97]).
- V další publikaci je monitorována kvalita vzduchu v interiéru čtyř pasivních domů se vzduchovým zemním výměníkem tepla v německém Norimberku [161]. 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 [162] krátce zmiňuje vzduchový ZVT pro „energeticky nulovou“ budovu na Tribhuvan University v Nepálském Kathmandu – jedná se však o výrazně odlišné prostředí, než je ve střední Evropě. Byly sledovány koncentrace bakterií a plísní ve třech místech (vstup do ZVT, výstup ze ZVT, místnost) a opět i zde se díky filtraci vzduchu koncentrace znečištění postupně snižovala. Podrobnější informace k odběrům nejsou v práci též uvedeny.

- Poslední dohledaná práce [77] naopak uvádí, že ve dvou ze tří sledovaných švédských škol, vybavených vzduchovým ZVT, byla pozorována tvorba plísní. 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.



Obr. 4.4: Štěrbínový vzorkovač pro odběr vzduchu (Casella/UK) – převzato z [163]



Obr. 4.5: Aeroskop MAS-100 Eco®, průtok 100 l/min (MBV AG/Switzerland) – převzato z [164]

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 plísní. Chování konečného uživatele zařízení má proto zcela zásadní význam na kvalitu přivodního vzduchu. Avšak pouze jeden ze čtyř dohledaných zdrojů zmiňuje určitý problém s tvorbou mikroorganismů, v ostatních zmíněných případech bylo vše v pořádku. Otázkou také zůstává, zda toto platí všeobecně – např. v případě zanedbané údržby (absence či opožděná výměna filtrů, nižší frekvence čištění potrubní trasy atd.).

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, prezentované v kapitole 7, tak představují relevantní údaje, získané k této problematice v rámci ČR.

4.4 Radonová problematika ZVT

U vzduchových typů zemních výměníků tepla hrozí ještě jedno významné riziko. Vzduchotechnická jednotka si vzduch přes potrubní síť nasává sama, v potrubí je tedy kontinuálně vytvořen podtlak. V geologicky příhodných místech to může – při případné netěsnosti – způsobit nežádoucí pronikání radonu z podloží a jeho následný transport do interiéru (stejný problém představuje např. kanalizační potrubí nebo jiné inženýrské sítě,

popř. světlíky, větrací šachty apod.). Radon (přesněji řečeno jeho izotop ^{222}Rn) je přírodní radioaktivní bezbarvý nehořlavý plyn, bez chuti a zápachu – tzn. i nezjistitelný lidskými smysly [23, 90, 121]. Vzniká přirozeným rozpadem uranu a sám o sobě není zdraví škodlivý, jeho dceřiné produkty (např. polonium, bizmut, olovo) však ano. Tyto meziprodukty se ve vnitřním ovzduší snadno spojují s přítomnými pevnými či kapalnými částicemi, čímž vytvoří nebezpečný radioaktivní aerosol, který mohou přítomní obyvatelé snadno vdechnout. Dceřiné produkty se dále rozpadají a při tom vyzařují i vysoké dávky zdraví škodlivého záření alfa a beta. Jelikož se radon snadno rozpouští ve vodě (tj. i v tělních tekutinách), může se rychle rozšířit do celého organismu.

V důsledku postupného utěšňování nových či rekonstruovaných budov výměnou starých oken za nová – velmi těsná – vzniká v interiéru problém nejen s nahromaděnou vlhkostí, ale též s nahromaděným radonem (resp. jeho meziprodukty), unikajícím z geologicky aktivnějšího podloží. Pro budovy vybavené nuceným systémem větrání to ale nemusí znamenat až tak podstatné riziko, protože zde je vzduch průběžně vyměňován za čerstvý. Některé stavební úřady dokonce u těchto budov nevyžadují zvýšenou radonovou ochranu, i když se objekt nachází na pozemku s vyšším radonovým indexem [86]. Určitá obava může vznikat u budov s větrací jednotkou umožňující cirkulační režim vytápění/chlazení, nacházejících se na pozemku s větším výskytem radonu. Pro tento případ je možno doporučit (v rámci tzv. „*principu předběžné opatrnosti*“) realizaci účinného protiradonového opatření spodní stavby.

Problematice radonové zátěže se krátce věnuje i zmíněná práce [161], pojednávající o kvalitě interního vzduchu několika pasivních domů v Norimberku. Nebylo zde však potvrzeno, že by při instalaci vzduchového zemního výměníku neúměrně rostla koncentrace radonu uvnitř budovy. Naopak, díky efektivnější řízené výměně vzduchu jsou koncentrace spíše nižší. Nutné je ovšem zajistit, aby se vzduch do ZVT nenasával v blízkosti země, kde bývají koncentrace radonu obzvláště vysoké. Na základě pouze jediného monitoringu však nelze učinit obecný závěr o radonové problematice ZVT – do hry totiž vstupuje více parametrů (geografické místo, typ použitého potrubí, protiradonová opatření, způsob větrání, ...).

Protože **projekt FSI-J-12-24** se zabýval pouze mikrobiologickým hlediskem ZVT, v rámci řešení nebyla koncentrace radonu u monitorovaných zařízení hodnocena. Autor nicméně jednal se zástupci Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO) o možnosti monitoringu radonové zátěže zemních vzduchových výměníků tepla v ČR [165]. Na podzim roku 2013 bylo dohodnuto jedno zkušební měření na předem vytipovaném zařízení – z časových, ale hlavně z finančních důvodů však nebylo realizováno.

KAPITOLA 5

Zjednodušený model ZVT

Pro výpočty parametrů zemních výměníků tepla lze zvolit několik rozdílných přístupů. S postupným zvyšováním výkonu výpočetní techniky se dnes stále častěji přechází od původních analytických jednorozměrných modelů (viz [166-169]) k numerickým více-rozměrným modelům – např. [39, 43, 110, 170-173]. Existují také modely smíšené, jež kombinují numerické řešení přenosu tepla zeminou s analytickým řešením výstupní teploty vzduchu ze ZVT [21]. Při výpočtu se většinou vychází z řešení teplotního pole v polonekonečném tělese (viz kapitola 3.7), vystaveném definovaným okrajovým podmínkám (*zemský povrch* → *klimatická data*; *povrch uloženého potrubí ZVT* → *větrací režim*).

Literární zdroje týkající se zemních výměníků tepla můžeme zjednodušeně rozdělit [21] na ty, které řeší:

- **modelování ZVT** – např. [73, 76, 77, 79, 89, 170-172, 174, 175];
- **srovnání vypočtených dat s experimentálně naměřenými** – např. [38-40, 43, 87, 173, 176, 177];
- **hodnocení, návrh a provozní zkušenosti z reálných aplikací** – např. [21, 41, 42, 44, 105, 110, 178].

Vyvinuté modely jsou v převážné míře použitelné pouze pro řešení konkrétní aplikace, převážná většina z nich je také s přijatelnou shodou validována oproti experimentálně naměřeným datům. Často však chybí návaznost modelu zemního výměníku na další systémy (např. rekuperaci tepla [179]), resp. na budovu samotnou. Problém také nastává v řešení vlhkostní problematiky uvnitř potrubí, většinou je simulována pouze výstupní teplota ze ZVT. Vzhledem k očekávané kondenzaci na povrchu potrubí (viz např. [21, 176]) je pro letní chod podstatná i simulace stavu vodní páry, který je důležitý pro spojitost s možným růstem mikroorganismů v ZVT. Algoritmus řešení použitý v práci [21] se jeví jako dostatečný a zde prezentovaný zjednodušený model z něj proto vychází.

5.1 Základní popis modelu a zjednodušující předpoklady

Vybudování ZVT obecně nebývá levnou záležitostí, cena za kompletní realizaci se nejčastěji pohybuje mezi 50÷100.000,- Kč [92]. Z tohoto pohledu je vhodné provést předběžné ekonomické posouzení, zejména při kombinaci zemního výměníku se systémem zpětného získávání tepla, kdy si obě zařízení do jisté míry energeticky – a tím pádem i ekonomicky – konkurují [62, 96]. Pohlížíme-li na budovaný zemní výměník jako na investici, je vhodné porovnat celkové vynaložené náklady s energetickými a ekonomickými úsporami,

jež následně přináší. Za nejspolehlivější nástroj stanovení předpokládané spotřeby energie (nejen v budovách) je v současnosti považována komplexní energetická simulace, využívající některý z ověřených výpočetních programů (**kapitola 3.6**) [180]. Pro vyhodnocení vlivu zemního výměníku tepla na provoz větrací jednotky s rekuperací tepla byl tak v programovém prostředí TRNSYS 16.1 (tzn. *TRaNsient SYstem Simulation* [101]) vytvořen zjednodušený model ZVT a následně zpracovány některé energetické simulace [62].

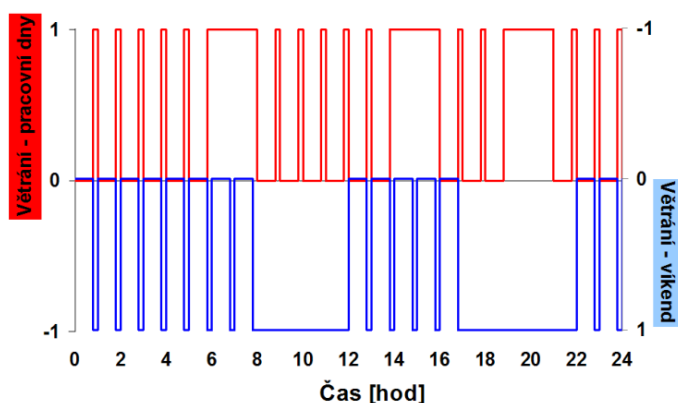
Navržený model vychází převážně z dat nízkoenergetického RD ve městě Studénka (severní Morava), prezentovaného např. v [62, A1, A4, A7]. Primárně byl model navržen pro řešení pouze přímého typu vzduchového ZVT [62], s menšími úpravami se však dá dnes model použít i pro vzduchový zemní výměník v cirkulačním provedení nebo typ kapalínový. Je možno zvolit materiál zeminy, materiál potrubí a geometrii výměníku (tzn. průměr, délku a počet potrubí); vzájemná interakce sousedních potrubí není ale uvažována. Vstupní klimatická data mohou být primárně volena ze dvou základních databází, nebo je možné použít data uživatelsky definovaná (naměřená) – viz **kapitola 5.2**. V modelu lze nastavit jak teplotní interval přímého sání z fasády, tak i dohřev na požadovanou teplotu vzduchu v interiéru. Rekuperace tepla se vypíná v případě, kdy teplota přívodního vzduchu stoupne nad 22 °C (vzduch poté proudí obtokem/by-passem výměníku ZVT). Řešení mohou být celkem 4 varianty [A1, A5, A7], přičemž jedna z nich představuje ohřev větracího vzduchu s rekuperací tepla a předeřevem pomocí ZVT (příp. jeho předchlazením a obtokem výměníku pro ZVT). Řešené varianty ohřevu větracího vzduchu jsou pak rozděleny na tři dílčí, po sobě následující kroky:

- **předeřev vzduchu v zemním výměníku tepla,**
- **ohřev vzduchu rekuperací tepla z odpadního vzduchu,**
- **následný dohřev na požadovanou vnitřní teplotu.**

Výše uvedený simulovaný zemní výměník je vytvořen z potrubního systému *KG 2000 POLYPROPYLEN* [88] o průměru DN 200, s celkovou délkou cca 30 m. Potrubí obklopuje zemina jílovitého typu, průměrná hloubka uložení je 1,825 m (bráno ke středu/ose potrubí). Venkovní vzduch je nasáván přes nasávací šachtu s hlavicí a filtry do potrubí a následně do teplovzdušné cirkulační jednotky *DUPLEX RK 1800/420* (výrobce Atrea s.r.o.) [16, 17], která je vybavena křížovým rekuperačním výměníkem pro zpětné získávání tepla. Do jednotky lze alternativně nasávat vzduch přímo z fasády, dle aktuálně nastaveného intervalu teplot. Konečný dohřev vzduchu po rekuperaci zajišťuje teplovodní ohříváč, napojený na integrovaný zásobník tepla s elektrickými topnými patronami na noční proud. Při řešení bylo uvažováno několik níže uvedených zjednodušujících předpokladů:

- Byl použit zjednodušený model teplotního rozvrstvení zemského polomasivu (dle **rov. (4a)**, **kap. 3.7**). Předpokládá se, že není v důsledku provozu ZVT teplotní rozvrstvení příliš ovlivněno a závisí tak pouze na fyzikálních vlastnostech zeminy a venkovních teplotách vzduchu (bez vlivů solární radiace, evaporace vody, proudění větru apod.). Vlhkostní poměry v zemině jsou také zanedbány. Toto zjednodušení bylo zvoleno z důvodu jednoduchosti výpočtu; zahrnutí vlivu zemního výměníku na okolní zeminu by vyžadovalo řešení třírozměrného vedení tepla, což by zbytečně komplikovalo výpočet. Lze navíc předpokládat, že při přerušovaném provozu (viz např. **obr. 5.1**) nebude vliv ZVT na teplotu zeminy až tak významný.

- Řeší se pouze přímá část výměníku, vliv nasávací šachty a svislých částí potrubí je zanedbán – uvažuje se zde konstantní hloubka uložení potrubí ZVT, rovná průměru hloubky uložení na začátku a konci potrubní trasy.
- Výstupní teplota vzduchu ze ZVT vychází z řešení rovnice přenosu tepla (8a) při vnitřním proudění vzduchu v potrubí s konstantní teplotou stěny [181]. Teplota vnitřního povrchu ZVT se rovná aktuální teplotě zeminy (T_{gr}) v dané hloubce uložení pod povrchem; tato teplota je stanovena pomocí rovnice (4a). Tepelný odpor stěny je zohledněn odpovídajícím snížením hodnoty součinitele přestupu tepla z potrubí do vzduchu – viz rovnice (8b), resp. rovnice (28).
- Je zvolen mírně podtlakový režim větrání (lze však uživatelsky měnit), možné je zvolit odlišný týdenní a víkendový profil větrání (kontinuální nebo cyklické větrání, viz obr. 5.1) pro zimní a letní provoz. Účinnost ZZT byla uvažována konstantní, dle objemového průtoku vzduchu proudícího přes ZVT.



Obr. 5.1: Denní průběh simulovaného provozu větrání v pracovních a nepracovních dnech – pro zimní období [A7]

- Byl také zanedbán vliv kondenzace v rekuperačním výměníku jednotky na účinnost ZZT (hlavně během zimního provozu) a vliv kondenzace vzdušné vlhkosti na teplotu povrchu uvnitř ZVT (při provozu v létě).

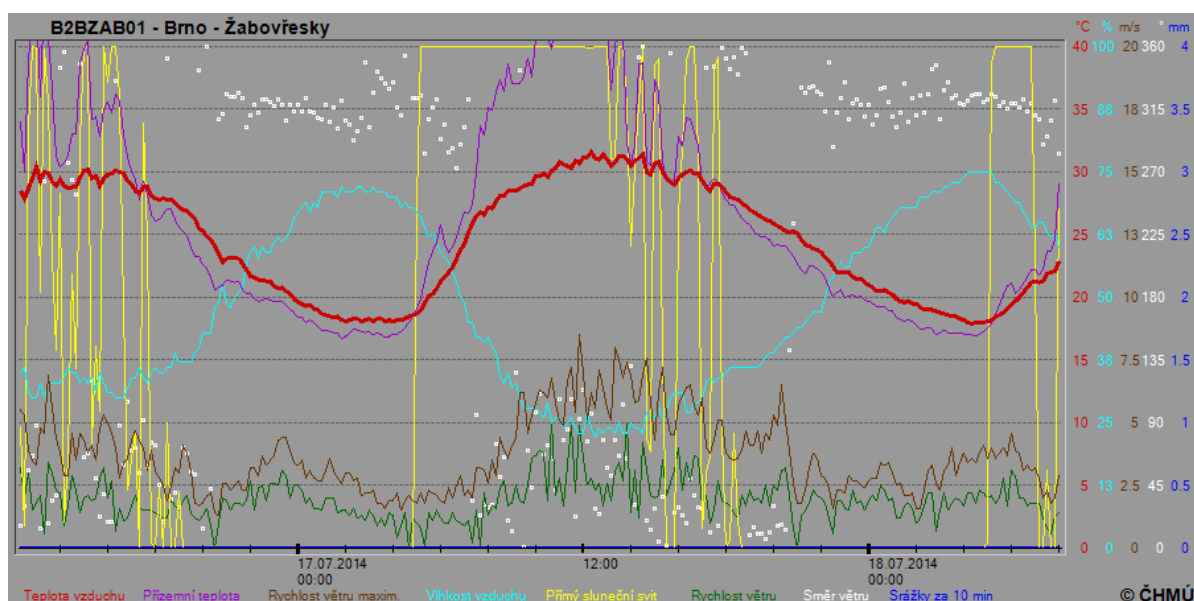
Tab. 5.1: Fyzikální vlastnosti tří základních druhů zeminy – podle [21]

Druh zeminy	λ_{gr} [W/m·K]	ρ_{gr} [kg/m ³]	$c_{p,gr}$ [J/kg·K]	C_{gr} [MJ/m ³ ·K]	a_{gr} [m ² /s]
Hlinitá	2,30	1 650	2 850	4,703	$4,89 \cdot 10^{-7}$
Jílovitá	1,28	1 500	880	1,320	$9,70 \cdot 10^{-7}$
Písčitá	0,93	1 780	1 390	2,474	$3,76 \cdot 10^{-7}$

- Fyzikální parametry zeminy lze volit pro několik základních typů (např. dle tab. 5.1). Pro zjednodušení se tyto parametry v průběhu simulace uvažují konstantní. Taktéž fyzikální vlastnosti nasávaného vzduchu jsou uvažovány konstantní (stanoveny pro teplotu 10 °C, tj. cca průměrnou celoroční teplotu v ČR).

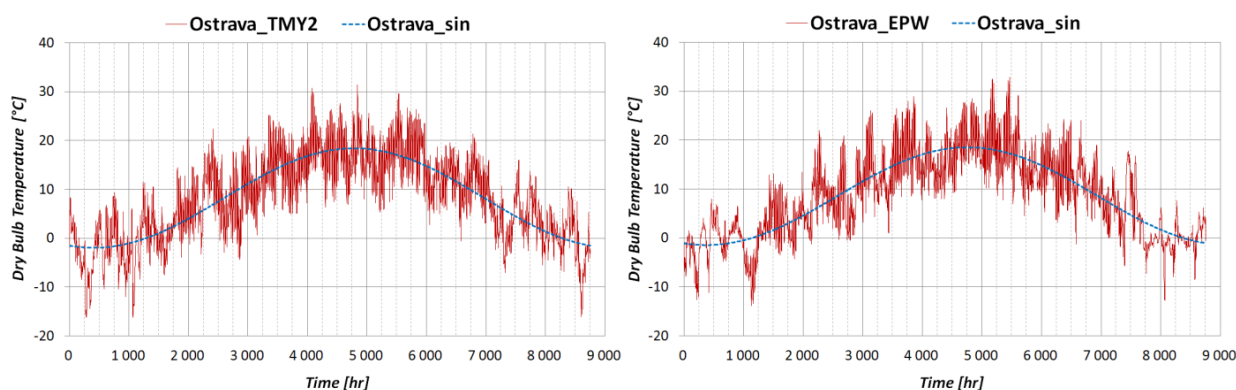
5.2 Meteorologická data – klimatické databáze

Přesnost výsledků energetické simulace závisí jednak na stupni zjednodušení, ale hlavně na přesnosti (kvalitě) vstupních dat, tj. okrajových podmínkách. Jedním z hlavních vstupních parametrů bývají klimatická data, která jsou ovšem v průběhu let značně variabilní. Naměřená data z konkrétní lokality – teplota a vlhkost venkovního vzduchu, solární záření, rychlost proudění vzduchu, dešťové/sněhové srážky, výška sněhové pokrývky, atd. – 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 klimatická data [182]. Pro energetickou simulaci je však měsíční krok příliš dlouhý, potřebná jsou zpravidla data s minimálně denním časovým krokem. Denní klimatická data některých lokalit dostupná on-line na internetu (např. **obr. 5.2**) jsou sice v dostatečném časovém rozlišení, ale jsou přístupná pouze v grafické podobě – bylo by nutné je složitě odečítat a přepisovat do tabulkové podoby, vhodné k dalšímu zpracování.

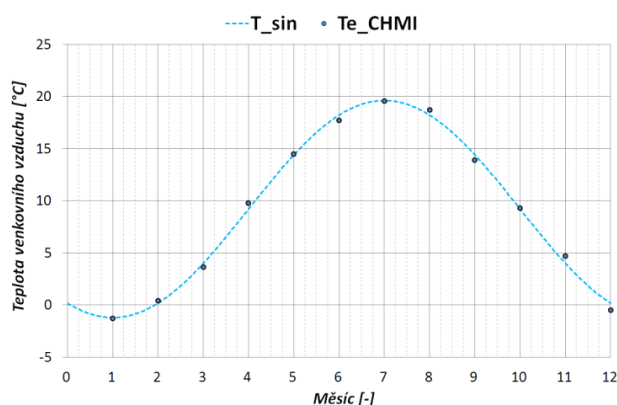


Obr. 5.2: Aktuální on-line klimatické veličiny z data 2014-07-17 pro meteorologickou stanici Brno-Žabovřesky (236 m n. m.) – okres Brno-město; převzato z [183]

Při energetických simulacích se proto nejčastěji využívá různých klimatických databází, např. *METEONORM* [184] či *ENERGY+* [185]. Zde jsou k dispozici roční klimatická data s hodinovým časovým krokem (**obr. 5.3**) v různých datových formátech – pro první uvedenou databázi je to formát **.TMY2* (*Typical Meteorological Year/Version 2*), pro druhou **.EPW* (*Energy+ format*). Jedná se vždy o hodinové hodnoty, zprůměrované za různě dlouhá časová období (ideálně více než 10 let) – modifikované tak, aby postihly i možné klimatické extrémny [186]. Otázkou může být, nakolik tato data navzájem korespondují a jak velký vliv budou mít případné rozdíly na celkové výsledky energetické simulace. Níže jsou proto prezentovány výsledky energetické simulace provozu již zmíněného reálného zařízení ve městě Studénka, popsaného v předchozí kapitole. Pro výpočet bylo využito dat obou klimatických databází a také dat volně přístupných na internetové stránce Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) [182].



Obr. 5.3: Hodinové hodnoty teploty venkovního vzduchu v lokalitě Ostrava-Poruba a jejich proložení funkcí cosinus – vlevo: databáze *METEONORM* [184]; vpravo: databáze *ENERGY+* [185]



Obr. 5.4: Průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu dle ČHMÚ pro meteorologickou stanici Mošov a jejich proložení funkcí cosinus (data z let 1998÷2010; zdroj: [182])

➤ Teplota a vlhkost venkovního vzduchu

Hlavními vstupními veličinami simulace jsou teplota (v tomto případě teplota suchého teploměru) a relativní vlhkost venkovního vzduchu, které spoluurčují tepelný výkon zemního výměníku i případnou kondenzaci na povrchu potrubí v letním období. Venkovní teplota mimoto ovlivňuje i teplotní rozvrstvení zeminy – **rovnice (4a)** – a tím následně i výstupní teplotu vzduchu ze ZVT a možnou dobu jeho využití. Databáze *ENERGY+* obsahuje oproti databázi *METEONORM* podstatně méně lokalit; pro ČR jsou k dispozici pouze data pro Prahu a Ostravu. V našem případě však můžeme bez problémů využít obou, protože simulovaný ZVT leží ve vzdálenosti cca 15 km od města Ostrava (s obdobnou nadmořskou výškou). Nejbližší meteorologická stanice Mošov, jejíž naměřená měsíční data lze i relativně snadno dohledat (*stanice spadající pod správu ČHMÚ*), se nachází asi 5 km od zkoumaného objektu. To je pro energetickou simulaci ideální situace, k níž však obvykle dochází jen zřídkakdy.

Roční průběh průměrné teploty venkovního vzduchu pro lokalitu Ostrava-Poruba je zobrazen na **obr. 5.3**; přičemž nalevo je uveden průběh z databáze *METEONORM*, napravo pak průběh z databáze *ENERGY+*. V obou případech se jedná o průměrná hodinová data, z kterých je však názorně vidět i celoroční průběh kolísající kolem určité střední hodnoty. Z těchto dat lze získat zjednodušený celoroční průběh průměrných teplot vzduchu, potřebný pro výpočtový model teplot v zemském polomasivu (**kap. 3.7, rovnice (5)**).

K proložení dat funkcí cosinus byl v našem případě použit *Curve Fitting Tool-box™* programu *MATLAB*; výsledné průběhy jsou patrné z uvedeného **obrázku 5.3** (modrá křivka). Tatáž aproximace byla provedena i pro průměrné měsíční teploty vzduchu v meteostanici Mošnov (**obr. 5.4**) a další lokality v ČR, dostupné hlavně v klimatické databázi *METEONORM*. Souhrnný přehled parametrů provedené goniometrické aproximace je uveden v **tabulce 5.2**.

$$T_{a,E}(\tau) = T_{ma} - A_{at} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot (\tau - \tau_{min}) \right] \quad (5)$$

kde: $T_{a,E}(\tau)$ – průměrná denní teplota venkovního vzduchu v den τ [°C],
 T_{ma} – průměrná celoroční teplota venkovního vzduchu [°C],
 A_{at} – amplituda celoročního průběhu průměrných denních teplot vzduchu [°C],
 τ – aktuální čas [dní, od počátku roku],
 τ_{min} – čas, kdy dochází k minimu průměrné denní teploty venkovního vzduchu [dní, od počátku roku].

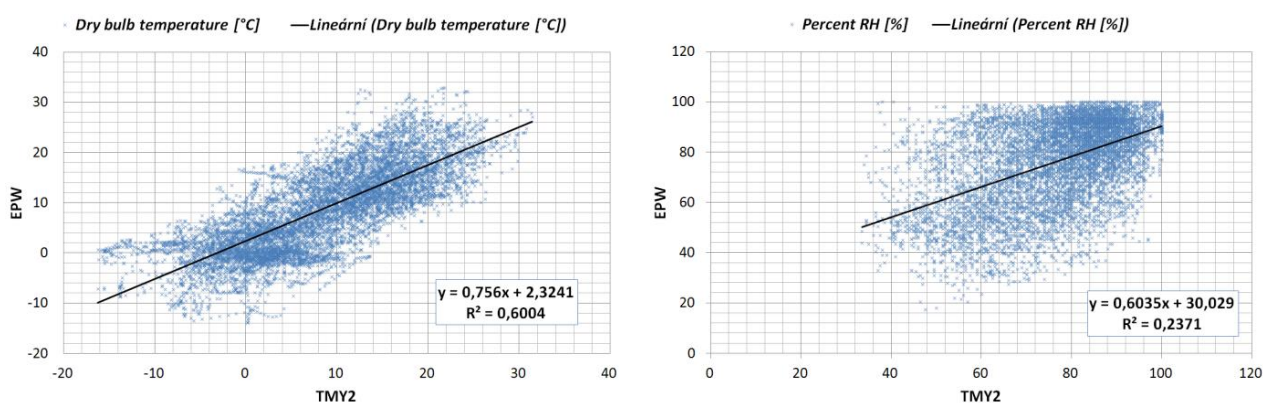
Tab. 5.2: Zpracovaná klimatická data pro vybrané lokality v ČR – proložení funkcí cosinus (sw *MATLAB*); zdroj dat: databáze *METEONORM*, *ENERGY+* a webové stránky ČHMÚ

Lokalita	Nadmořská výška [m n. m.]	Zdroj dat	T_{ma} [°C]	A_{at} [°C]	τ_{min} [d]	Spolehlivost R^2 [-]	Využití ZVT *) [%]
Brno	241	METEONORM	8,6	10,6	15,4	0,7209	20,7
Doksany	159	METEONORM	8,5	10,1	16,4	0,6932	19,3
Hradec Králové	285	METEONORM	8,3	10,4	19,3	0,6866	21,1
Churáňov	1126	METEONORM	5,1	8,9	21,5	0,6312	28,1
Kramolín	534	METEONORM	7,3	9,8	17,4	0,6840	22,6
Kuchařovice	339	METEONORM	8,2	10,4	16,3	0,7194	21,0
Liberec	400	METEONORM	7,3	9,5	19,2	0,6750	21,5
Ostrava	256	ENERGY+ (1982–1998)	8,2	10,2	16,8	0,6823	20,2
Ostrava-Poruba	242	METEONORM	8,5	10,0	15,8	0,6902	20,3
Mošnov	251	ČHMÚ (1998–2010)	9,2	10,4	30,6	0,9966	---
<i>Praha</i>	366	<i>ENERGY+ (1984–1999)</i>	7,9	9,7	16,8	0,6791	21,4
<i>Praha</i>	364	<i>METEONORM</i>	8,1	9,8	14,9	0,6677	20,2
<i>Praha-Karlov</i>	261	<i>ČHMÚ (1998–2010)</i>	10,5	10,2	28,8	0,9970	---
Přerov	211	METEONORM	8,3	10,1	15,7	0,6867	20,0
Přibyslav	536	METEONORM	6,8	10,0	16,8	0,6897	24,5
Svratouch	737	METEONORM	5,9	10,1	18,0	0,7171	27,9
Ústí nad Labem	376	METEONORM	8,1	9,9	16,8	0,7223	19,4
Ústí nad Orlicí	402	METEONORM	7,4	10,1	16,4	0,6854	22,3

*) pro nasávání vzduchu mimo ZVT v intervalu <0 až 25> °C; 100 % = 8760 h.

V předposledním sloupci **tabulky 5.2** je pro vypočtenou funkci cosinus též uvedena hodnota spolehlivosti R^2 . Pro hodinová data z klimatických databází se její hodnota pohybuje kolem $0,63 \div 0,72$. Je to dáno značnou variabilitou teplot – viz **obrázek 5.3** – v daném datovém souboru jsou totiž obsaženy i extrémní hodnoty za určité časové období, které pak výsledek opticky „zkreslují“. Naopak pro průměrné měsíční hodnoty (tj. lokality Mošnov a Praha-Karlov) je variabilita minimální (**obr. 5.4**) a spolehlivost se blíží jedné; většina proložených hodnot leží blízko vypočtené funkce. Dále je v posledním sloupci tabulky uvedeno využití zemního výměníku při zvoleném intervalu teplot sání (blíže viz další podkapitola). Z hodnot je jasně vidět, že při možnosti přepínání ZVT dle venkovní teploty je zařízení využito ani ne po 1/3 roku, což je při vynaložené investici překvapivě málo. Zmíněné platí pro přímé typy zemních výměníků, u cirkulačního provedení ZVT je využití samozřejmě vyšší – nárůst lze ale předpokládat pouze v řádu několika procent.

Zajímavé je též srovnání aproximací teplot z obou klimatických databází pro lokality Praha a Ostrava-Poruba. U databáze ENERGY+ je průměrná celoroční teplota vzduchu (T_{ma}) u obou lokalit o něco nižší než u databáze METEONORM (Praha: $-0,2$ °C, Ostrava: $-0,3$ °C). V řádu jednotek procent se rozchází také amplituda celoroční teploty vzduchu (A_{at}): Praha: $-1,0$ %, Ostrava: $+2,0$ %. Se zmíněnými dvěma lokalitami z klimatických databází je dále možné porovnat i klimatická data ČHMÚ (lokality Praha-Karlov a Mošnov). Největší odchylky nastávají u průměrné celoroční teploty, kde rozdíl hodnot ČHMÚ vůči ENERGY+ pro Prahu činí $+2,6$ °C (vůči METEONORM je to pak $+2,4$ °C). Pro Ostravu (resp. Mošnov) jsou odchylky sice menší, stále se však pohybují kolem $+(0,7 \div 1,0)$ °C. Opět i v tomto porovnání dosahují rozdíly v celoročních amplitudách teplot řádu jednotek procent; maximální rozdíl ($+5,2$ %) nastává při srovnání dat ČHMÚ a ENERGY+ u lokalit Praha-Karlov a Praha.



Obr. 5.5: Porovnání klimatických dat lokality Ostrava-Poruba dle databází METEONORM (TMY2) a ENERGY+ (EPW); vlevo teplota venkovního vzduchu [°C], vpravo relativní vlhkost venkovního vzduchu [%]

Je patrné, že celoroční průběhy průměrných teplot venkovního vzduchu, zpracované z obou klimatických databází, se od sebe poněkud liší – nehledě na odlišnost dat Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Na **obr. 5.5** jsou mezi sebou porovnána generovaná hodinová data teploty a relativní vlhkosti venkovního vzduchu z obou databází; uvedena je i rovnice regresní přímky a odpovídající hodnota spolehlivosti R^2 (oba parametry byly získány pomocí programu MS EXCEL). Názorně je z nich vidět, že oba datové soubory spolu příliš nekorelují; obzvláště data relativní vlhkosti venkovního vzduchu se významně rozcházejí.

Jelikož parametry teplotní aproximace vstupují do **rov. (4a)** pro výpočet teplotního rozvrstvení zeminy, dojde využitím různých zdrojových dat i k jisté odchylce výstupních hodnot z energetické simulace. Vliv použitých klimatických dat na výsledek simulace bude rozebrán dále v **kapitole 5.5**.

➤ **Využití zemního výměníku tepla**

Z hlediska maximalizace energetického přínosu ZVT není žádoucí, aby výměník pracoval v nepřetržitém provozu – zvláště pak v kombinaci s větrací jednotkou s vysoce účinným výměníkem pro ZVT. Při daném průtoku v potrubí je výstupní teplota vzduchu ze zemního výměníku mimo jeho geometrie závislá také na aktuální teplotě okolní zeminy a na vstupní teplotě vzduchu (**rov. (8b)**). Teplota zeminy v úrovni zemního výměníku většinou nebývá měřena, proto se v nejjednodušší variantě režim provozu ZVT volí pouze dle venkovní teploty vzduchu [16]. Jak již bylo zmíněno dříve, doporučený teplotní interval, kdy lze nasávat venkovní vzduch přímo (viz **kapitola 3.1**), se liší dle použitého literárního zdroje. Spodní teplota intervalu (tj. pro zimní provoz zařízení) by měla zajistit hlavně protimrazovou ochranu větrací jednotky, proto by se tato hodnota měla pohybovat kolem 0 °C. Jako minimální spodní hranici, při které ještě nedochází k zamrznání rekuperačního výměníku, uvádí např. článek [82] teplotu -3 °C; naopak v [96] je uvedena teplota 4 °C – což je blíže běžné praxi. Pro další hodnocení tak byly na základě literární rešerše zavedeny následující varianty přímého sání z fasády do VZT jednotky:

- **varianta A:** <-4 ÷ 24> °C,
- **varianta B:** <0 ÷ 25> °C,
- **varianta C:** <2 ÷ 20> °C.

Přímým nasáváním se optimalizuje energetická náročnost větrání a docílí se i částečné regenerace teplotního rozvrstvení zeminy. Mimo vymezený interval se nasávaný vzduch ohřívá nebo ochlazuje pomocí zemního výměníku tepla. V reálném provozu si uživatel může nastavení teplot zvolit podle doporučení projektanta či svého uvážení – z něj poté vyplyne i doba provozu zemního výměníku, tj. doba jeho celkového využití. Celkový chod (provoz) zařízení můžeme tedy rozdělit na tři dílčí části:

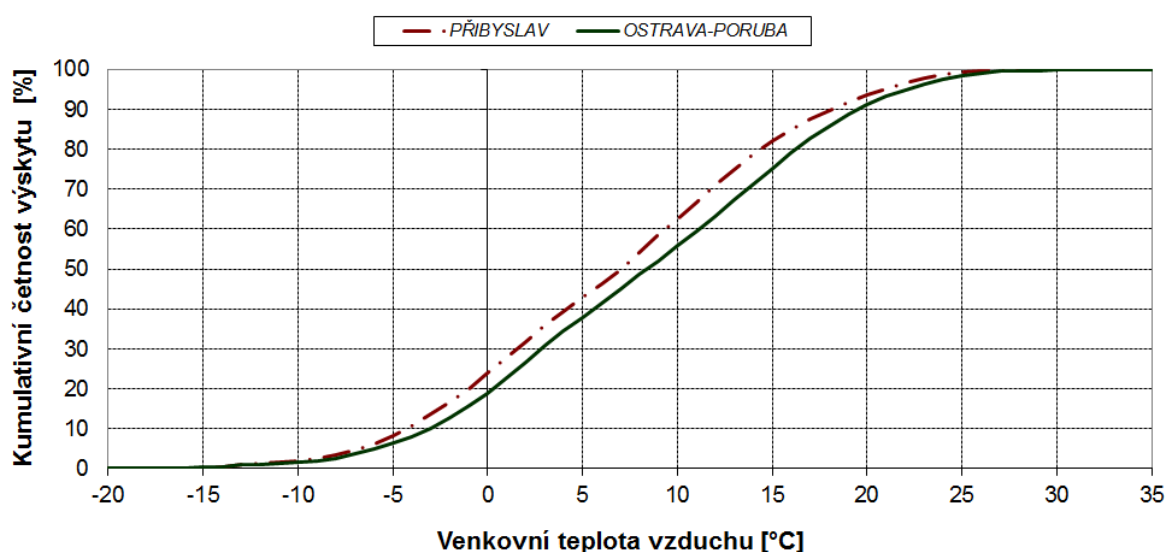
- **zimní provoz výměníku,**
- **ZVT mimo provoz,**
- **letní provoz výměníku.**

Součet doby zimního a letního chodu pak určuje celkové využití ZVT, které by v nejlepším případě mělo být optimalizováno, aby investice do relativně „nákladného“ zařízení byla alespoň odůvodnitelná. Procentuální využití jednotlivých režimů chodu zemního výměníku tepla je pro několik lokalit v ČR uvedeno v **tab. 5.3**. Celkovou procentuální dobu využití pro dohledaná data klimatických lokalit shrnuje **tabulka 5.2**. Z obou je patrné, že vliv klimatu na dobu využití ZVT není v podmínkách ČR (tj. středoevropského klimatu) nijak významný; rozdíly jsou většinou v řádu jednotek procent. Větší rozdíly nastávají pouze v oblastech s „drsnějším“ klimatickým podnebím (např. Churáňov, Svatouch či Příbyslav), kde se doba využití pro zimní předeřev vzduchu pohybuje i nad 25 % chodu zařízení (tedy více jak 3 měsíce z celého kalendářního roku). Z tohoto pohledu je také realizace ZVT v těchto klimaticky exponovaných lokalitách výhodnější.

Tab. 5.3: Doba využití jednotlivých režimů ZVT pro některé lokality ČR – spínací teploty dle varianty B [184]

Místo	Zimní chod		Mimo provoz		Letní chod		Celkové využití ZVT	
	[hod]	[%]	[hod]	[%]	[hod]	[%]	[hod]	[%]
Kuchařovice	1 685	19,24	6 920	79,00	155	1,77	1 840	21,00
Liberec	1 805	20,61	6 879	78,53	76	0,87	1 881	21,47
Přibyslav	2 088	23,84	6 612	75,48	60	0,68	2 148	24,52
Praha	1 669	19,05	6 987	79,76	104	1,19	1 773	20,24
Ostrava-Poruba	1 646	18,79	6 981	79,69	133	1,52	1 779	20,31
PRŮMĚR	1 778,6	20,31	6 875,8	78,49	105,6	1,21	1 884,2	21,51

Obecně největší podíl tvoří vždy zimní chod zařízení; naopak doba letního provozu ZVT nedosahuje v středoevropských podmínkách ani 2 %. Důvod je vidět z procentuálního výskytu venkovních teplot vzduchu (**obr. 5.6**). Teploty pod bodem mrazu je dosahováno cca (20 ÷ 25) % celkového ročního času, teplot nad 20 °C potom cca 10 %. Pokud je to tedy možné, je výhodnější zemní výměník realizovat v cirkulačním provedení [54], kdy se díky cirkulačnímu chlazení vnitřního vzduchu v létě jeho využití navýší. Tímto též přispějeme i k rychlejší regeneraci teplotního rozvrstvení zeminy, jež je povětšinou „narušeno“ provozem výměníku v zimním období.



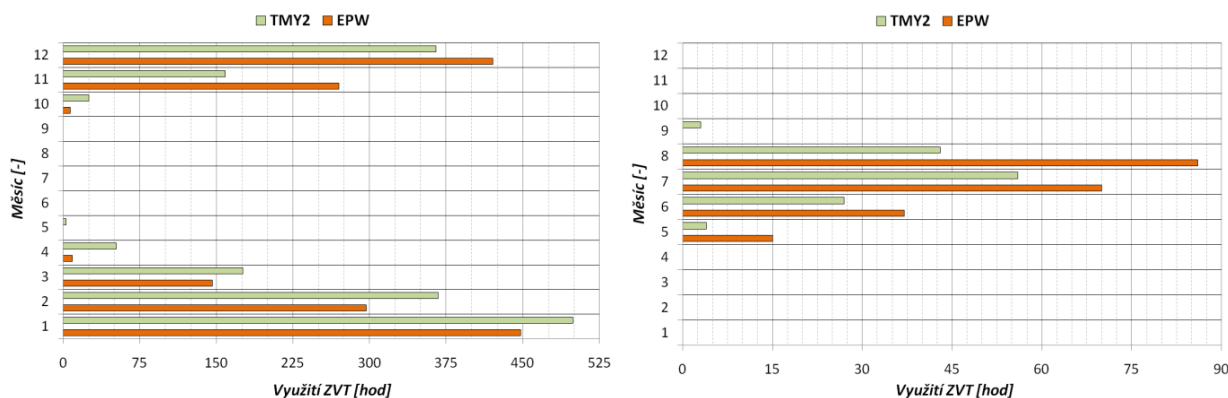
Obr. 5.6: Typický průběh kumulativní četnosti výskytu venkovních teplot; zdroj: databáze METEONORM (*.TMY2)

Významnější vliv na celkovou dobu využití ZVT má nastavení intervalu teplot přímého sání vzduchu přes fasádu, tzn. obtoku ZVT (čtvrtý a pátý sloupec **tabulky 5.4**). Pro Ostravu-Porubu (resp. nedalekou lokalitu Studénku) se největší rozdíl doby chodu pohybuje až kolem 25 %, tzn. asi 2200 provozních hodin (*varianta C vs. varianta A*). Z hlediska využití rekuperace tepla a také protimrazové ochrany rekuperačního výměníku vyhovuje horní hranice nasávání přes ZVT nastavená na 0 °C [62]. V podmínkách ČR zase postačuje pro letní chlazení spodní hranice nasávání 24 °C. Při kombinaci zimního nastavení **varianty A** a letního nastavení **varianty B** by pak celkové využití zemního výměníku bylo cca 21 % roku.

Tab. 5.4: Doba využití jednotlivých režimů ZVT pro klimatickou lokalitu Ostrava-Poruba pro různé varianty nastavení intervalu teplot přímého sání; klimatická data dle databáze METEONORM [184]

Varianta	Zimní chod		Mimo provoz		Letní chod		Využití ZVT	
	[hod]	[%]	[hod]	[%]	[hod]	[%]	[hod]	[%]
A	698	7,97	7 844	89,54	218	2,49	916	10,46
B	1 646	18,79	6 981	79,69	133	1,52	1 779	20,31
C	2 328	26,58	5 674	64,77	758	8,65	3 086	35,23

Na základě hodinových dat z databází *METEONORM* a *ENERGY+* pro klimatickou oblast Ostrava dále posoudíme celkové měsíční rozložení provozu zkoumaného zařízení ve městě Studénka (**obr. 5.7**). Opět i zde názorně vidíme, že ZVT je v největší míře využíván pro přehřev vzduchu v zimním období; ke chlazení vzduchu v létě dochází pouze omezeně (*zmíněné platí pro variantu sání B*). Z uvedeného rozboru také vyplývá, že dochází k podstatným odlišnostem mezi daty z obou použitých klimatických databází (patrně již dříve na **obrázku 5.5**). Data *ENERGY+* dávají při zimním režimu vyšší využití ZVT na konci roku (listopad–prosinec); naopak u databáze *METEONORM* je tomu na začátku roku (leden–duben). Ještě větší jsou odchylky ve výsledcích u letního provozu (**obr. 5.7**, vpravo). Celková doba využití zemního výměníku v zimě a v letním období je uvedena v posledním sloupci **tabulky 5.2**. Nutno ovšem podotknout, že zde není uvažován cirkulační režim chlazení vnitřního vzduchu, který daný typ zařízení neumožňuje.

**Obř. 5.7:** Celková doba využití ZVT pro lokalitu Ostrava-Poruba s využitím klimatických dat z databází *METEONORM* (*TMY2*) a *ENERGY+* (*EPW*), sání z fasády: varianta B; vlevo – zimní provoz, vpravo – letní provoz (bez cirkulace)

5.3 Výpočetní postup

Hlavními výstupy energetické simulace jsou teplota a měrná vlhkost vzduchu vystupující ze zemního výměníku. Dle standardních psychrometrických výpočtů se pak z obou určí konečná entalpie vzduchu $h_{a,OUT}$, resp. celkový tepelný výkon zařízení \dot{Q}_{ZVT} . Při výpočtu výstupní teploty ze ZVT se – s uvažováním určitých zjednodušujících předpokladů, viz **kapitola 5.1** – vychází z přenosu tepla při vnitřním proudění vzduchu v kruhovém potrubí

s konstantní teplotou stěny. Obdobně je tomu při výpočtu hustoty vodní páry ve vzduchu vystupujícího z potrubní trasy výměníku (hlavně v letních měsících při jeho ochlazení).

➤ Teplota venkovního vzduchu

Do výpočtu vstupuje aktuální teplota (suchého teploměru) z vybrané klimatické databáze v hodinovém kroku (např. **obrázek 5.3**). Případně můžeme použít i vlastní naměřená hodinová data – nejlépe přímo z dané lokality.

➤ Teplota zeminy v dané hloubce pod povrchem

Pro zvolený typ zeminy, s uvážením vypočtených parametrů aproximace průměrné teploty venkovního vzduchu (**tab. 5.2**), můžeme následně dle **rovnice (4a)** vypočítat aktuální teplotu zeminy v dané hloubce pod povrchem. Oproti venkovní – tj. „budicí“ – teplotě je amplituda teploty zeminy s rostoucí hloubkou postupně tlumena a také fázově, resp. časově, posunuta. Útlum teplotních změn je vyjádřen tzv. „hloubkou penetrace“:

$$z_p = \sqrt{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot \frac{a_{gr}}{\pi}} = \sqrt{31,536 \cdot 10^6 \cdot \frac{a_{gr}}{\pi}} \quad (6)$$

Rovnici (4a) pro výpočet teplotního rozvrstvení můžeme následně zjednodušit na **rovnici (7)**; parametry útlumu a fázového posunu teploty v zemině jsou zde jasně patrné:

$$T_{gr}(z, \tau) = T_{ma} - A_{at} \cdot e^{-\frac{z}{z_p}} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \cdot (\tau - \tau_{min}) - \frac{z}{z_p} \right] \quad (7)$$

➤ Teplota vzduchu na výstupu ze ZVT

Jak už bylo řečeno dříve, uvažuje se při výpočtu, že teplota stěny potrubí T_w je po celé délce konstantní a rovna aktuální teplotě zeminy v dané hloubce pod povrchem T_{gr} . Uvažuje se též, že teplota vzduchu nasávaného do potrubí ZVT je stejná jako aktuální teplota venkovního vzduchu $T_{a,E}$ (viz **kapitola 5.2**). Zanedbán je tak vliv nasávací (příp. kontrolní) šachty nebo v případě cirkulačního provedení ohřátí vzduchu při jeho průchodu potrubím v interiéru – zde je vzduch nejprve nasáván fasádní žaluzií a až po průchodu potrubní trasou v technické místnosti prochází do ZVT. Za výše uvedených zjednodušujících předpokladů je pak teplota výstupní vzduchu z výměníku dána vztahem:

$$T_{a,OUT}(\tau) = T_w - (T_w - T_{a,IN}) \cdot \exp \left(-\frac{S_{pipe}}{\dot{m}_{a,pipe} \cdot c_{p,a}(\bar{T}_{a,E})} \cdot \bar{\alpha}_a \right) \quad (8a)$$

resp.

$$T_{a,OUT}(\tau) = T_{gr} - (T_{gr} - T_{a,E}) \cdot \exp \left(-\frac{S_{pipe}}{c_{p,a}(\bar{T}_{a,E})} \cdot \frac{\bar{\alpha}_{mod}}{\dot{m}_{a,pipe}} \right) \quad (8b)$$

kde: T_w – teplota stěny potrubí v dané hloubce uložení pod povrchem [°C],

$T_{a,IN}$ – teplota vzduchu na vstupu do ZVT [°C],

S_{pipe} – vnitřní (teplosměnný) povrch zemního výměníku tepla [m²]; v případě více-násobného potrubí rovno povrchu jedné větve ZVT,

$\dot{m}_{a,pipe}$ – hmotnostní průtok vzduchu (jednou větví) [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
 $c_{p,a}$ – měrná tep. kapacita vzduchu za konst. tlaku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], při střední teplotě $T_{a,E}$,
 $\bar{\alpha}_a$ – konvektivní součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
 $\bar{\alpha}_{mod}$ – tzv. „modifikovaný“ (neboli celkový) součinitel přestupu tepla zemina–vzduch [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] = $\bar{\alpha}_{gr-a}$ [21, 95],

Pro potrubí kruhového průřezu platí:

$$S_{pipe} = O_{pipe} \cdot L_{pipe} = \pi \cdot D_{pipe} \cdot L_{pipe} \quad (9)$$

kde: O_{pipe} – vnitřní obvod potrubí [m],
 L_{pipe} – celková délka potrubí ZVT [m],
 D_{pipe} – vnitřní průměr potrubí (tj. světlost) [m] = D_i .

$$D_{pipe} = D_N - 2 \cdot \delta_{pipe} \quad (10)$$

kde: D_N – jmenovitý průměr potrubí [mm] = D_o ,
 δ_{pipe} – tloušťka stěny potrubí [mm].

Zavedením bezrozměrného parametru NTU pro výpočty tepelných výměníků můžeme rovnici (8b) ještě zjednodušit na výslednou rovnici (12):

$$NTU = \frac{S_{pipe}}{c_{p,a}(\bar{T}_{a,E})} \cdot \frac{\bar{\alpha}_{mod}}{\dot{m}_{a,pipe}} \quad (11)$$

$$T_{a,OUT}(\tau) = T_{gr} - (T_{gr} - T_{a,E}) \cdot \exp(-NTU) \quad (12)$$

kde: NTU – tzv. „Number of Transfer Units“ [-].

Výstupní teplota vzduchu z výměníku se tedy s jeho rostoucí délkou exponenciálně přibližuje teplotě okolní zeminy (v dané roční době a hloubce uložení) a účinnost tepelného výměníku η_{ZVT} se blíží 100 %, neboť vztah (12) lze upravit do tvaru:

$$T_{a,OUT}(\tau) = T_{a,E} + (T_{gr} - T_{a,E}) \cdot (1 - \exp(-NTU)) = T_{a,E} + (T_{gr} - T_{a,E}) \cdot \eta_{ZVT} \quad (13)$$

Tepelná účinnost zemního výměníku je pak:

$$\eta_{ZVT} = \frac{T_{a,OUT} - T_{a,E}}{T_{gr} - T_{a,E}} = 1 - \exp(-NTU) \quad (14)$$

Kromě geometrie ZVT (tzn. celkové teplosměnné plochy, rovnice (9)), povrchové teploty uloženého potrubí a teploty na vstupu do zemního výměníku určuje výstupní teplotu také průtok vzduchu, který výrazně ovlivňuje mj. konvektivní součinitel přestupu tepla $\bar{\alpha}_a$. Ten pak – spolu s tepelným odporem stěny potrubí – určuje, kolik tepla přejde z okolní zeminy do proudícího vzduchu. Vliv různých potrubních materiálů bude rozebrán v následující kapitole.

Pro výpočet střední hodnoty součinitele přestupu tepla na vnitřním povrchu potrubí ZVT byla použita *Dittus–Boelterova* rovnice, vhodná pro případ plně vyvinutého turbulentního proudění v kruhovém potrubí [181]:

$$\overline{Nu}_D \equiv \frac{\bar{\alpha}_a \cdot D_{pipe}}{\lambda_a} = 0,023 \cdot \overline{Re}_D^{0,8} \cdot Pr_a^n \quad (15)$$

kde: \overline{Nu}_D – střední Nusseltovo číslo [-] (jako charakteristický rozměr je použit D_{pipe}),
 λ_a – součinitel tepelné vodivosti vzduchu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
 \overline{Re}_D – střední Reynoldsovo číslo [-]; uvažovanému průtoku vzduchu $\dot{V}_a = 330 \text{ m}^3/h$ odpovídá $\overline{Re}_D = 45\,800$),
 Pr_a – Prandtlovo číslo vzduchu [-],
 n – bezrozměrný exponent režimu provozu [-];
 $n = 0,4$ pro ohřev vzduchu, $n = 0,3$ pro jeho chlazení.

$$\overline{Re}_D = \frac{\bar{w}_a \cdot D_{pipe}}{\nu_a} \quad (16)$$

$$\bar{w}_a = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\dot{V}_{a,pipe}}{D_{pipe}^2} \quad (17)$$

$$Pr_a = \frac{\nu_a}{\alpha_a} \quad (18)$$

kde: \bar{w}_a – střední rychlost proudění v potrubí [m/s],
 ν_a – kinematická viskozita vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 α_a – součinitel teplotní vodivosti vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 $\dot{V}_{a,pipe}$ – objemový průtok vzduchu ZVT (resp. jednou potrubní větví) [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Fyzikální vlastnosti vzduchu byly určeny pro suchý vzduch o průměrné teplotě $10 \text{ }^\circ\text{C}$ [181], odpovídající přibližně průměrné roční teplotě venkovního vzduchu v ČR – předpokládá se, že nízký zimní obsah vodních par výsledky prakticky neovlivní.

➤ Hustota vodní páry vystupující ze ZVT

V reálném provozu proudí v zemním výměníku tepla vždy vlhký vzduch, proto musíme energetickou simulaci rozšířit o výpočet kondenzace vodní páry na povrchu potrubí. Jelikož přesný výpočet kondenzace uvnitř ZVT – po celé délce potrubní trasy – je značně složitý, bylo opět použito určitých zjednodušení [A5, A7]. Předpokládá se, že veškeré teplo, uvolněné při kondenzaci, je odvedeno do okolní zeminy – takto výměník svým provozem neovlivní okolí (tj. teplotu stěny) [A7]. Množství zkondenzované vody je pak ovlivněno pouze transportem vodní páry z objemu procházejícího vzduchu ke stěně potrubí. Podle teorie mezních vrstev (např. dle [181]) je uvedený přenos látky popsán kritériální rovnicí obdobného tvaru jako pro přenos tepla (rov. (15) a (18)). Střední Nusseltovo číslo \overline{Nu}_D (rov. (15)) je zde však nahrazeno středním Sherwoodovým číslem \overline{Sh}_D a Prandtlovo číslo Pr_a číslem Schmidtovým Sc_v – viz rovnice (19) a (20).

$$\overline{Sh}_D \equiv \frac{\overline{\beta}_v \cdot D_{pipe}}{\delta_{v-a}} = 0,023 \cdot \overline{Re}_D^{0,8} \cdot Sc_v^n \quad (19)$$

kde: \overline{Sh}_D – střední Sherwoodovo číslo [-] (charakteristický rozměr je opět D_{pipe}),
 $\overline{\beta}_v$ – střední součinitel přestupu páry na povrchu s kondenzací [$m \cdot s^{-1}$],
 δ_{v-a} – binární součinitel difúze vodní páry ve vzduchu [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 Sc_v – Schmidtovo číslo [-], (index „v“ je zde používán ve významu „vapor“ = pára).

$$Sc_v = \frac{\nu_a}{\delta_{v-a}} \quad (20)$$

Díky kondenzaci vodní páry na stěnách ZVT dochází k postupnému snižování jejího obsahu v procházejícím proudu vzduchu. Uvažuje-li se, že ke kondenzaci dochází na celém vnitřním povrchu potrubí (s konstantní teplotou stěny T_w), bude na něm konstantní i parciální hustota vodní páry – která, za předpokladu termodynamické rovnováhy mezi kapalnou a plynnou fází, odpovídá hustotě sytých par při teplotě stěny T_w [A7]. 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 tedy není uvažována (ve skutečnosti ale do určité míry ovlivňuje teplotu procházejícího vzduchu)¹. Tepelný odpor vzniklého tenkého vodního filmu zanedbáváme. Výsledný průběh střední hustoty páry po délce výměníku je pak analogický **rovnici (8a)**; hustota vodních par se zjednodušeně předpokládá konstantní v každém dílčím průřezu ZVT:

$$\frac{\Delta \rho_v(x, \tau)}{\Delta \rho_{v,IN}} = \exp\left(-\frac{\overline{\beta}_v \cdot O_{pipe}}{\dot{V}_{a,pipe}} \cdot x\right) \quad (21)$$

$$\Delta \rho_v(x, \tau) = \overline{\rho}_v(x) - \rho_{v,w} = \overline{\rho}_v(x) - \rho_v''(T_w) \quad (22a)$$

$$\Delta \rho_{v,IN} = \rho_{v,IN} - \rho_{v,w} = \rho_{v,IN} - \rho_v''(T_w) \quad (22b)$$

kde: $\Delta \rho_v(x, \tau)$ – rozdíl střední parciální hustoty vodní páry (v objemu procházejícího vzduchu ve vzdálenosti x [m] od počátku potrubí) a parciální hustoty páry na stěně potrubí [$kg \cdot m^{-3}$],
 $\Delta \rho_{v,IN}$ – rozdíl těchto hustot pro $x = 0$ m [$kg \cdot m^{-3}$] (tj. na vstupu do potrubí).

Výstupní hustota vodních par $\overline{\rho}_{v,OUT}$ se stanoví **rovnici (23)**, z níž se obvyklým postupem určí její parciální tlak a následně měrná vlhkost vzduchu $x_{a,OUT}$ na výstupu ze ZVT:

¹ Podle výsledků Ing. Kopeckého z ČVUT v Praze [97] je ovšem skutečná evaporace mnohem menší než simulovaná – to lze přičíst tomu, že ke zpětnému vypařování dochází pouze na dně potrubí, kam stéká kondenzát, nikoliv na celém povrchu zemního výměníku. Tento proces je obtížné simulovat, neboť by musel být řešen i odtok kondenzátu po spádu ZVT. Zanedbání zpětné evaporace je víceméně oprávněné – vzhledem k experimentálním výsledkům z měření reálného provozu [21, 97, 99].

$$\bar{\rho}_{v,OUT}(\tau) = \rho_v''(T_w) + (\rho_{v,IN} - \rho_v''(T_w)) \cdot \exp\left(-\frac{\bar{\beta}_v \cdot S_{pipe}}{\dot{V}_{a,pipe}}\right) \quad (23)$$

Celkové množství zkondenzované vody určíme podle **rovnice (24)**:

$$\dot{m}_{W,ZVT} = \dot{V}_{a,pipe} \cdot (\bar{\rho}_{v,OUT} - \rho_{v,IN}) = \dot{m}_{a,sv} \cdot (x_{a,OUT} - x_{a,IN}) \quad (24)$$

kde: $\dot{m}_{W,ZVT}$ – hmotnostní tok vlhkosti zkondenzované v ZVT [$\text{kg}_w \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\dot{m}_{a,sv}$ – hmotnostní průtok suchého vzduchu zemním výměníkem [$\text{kg}_{sv} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $x_{a,IN}$ – měrná vlhkost vzduchu na vstupu do ZVT [$\text{kg}_w \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$],
 $x_{a,OUT}$ – měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze zemního výměníku [$\text{kg}_w \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$].

Uvedený model kondenzace není zcela přesný, stejné vztahy jsou ale v podstatě použity pro postupný výpočet změn teploty a vlhkosti ve výpočetním modelu ZVT prezentovaném Ing. Kopeckým z ČVUT v Praze [21]. Přesné řešení by bylo možné pouze pomocí detailní, časově a HW náročné numerické simulace proudění s využitím metod CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

➤ Topný a chladicí výkon zemního výměníku

Známe-li výstupní teplotu vzduchu a hustotu vodní páry v něm obsažené, můžeme pomocí psychrometrických výpočtů jednoduše vypočítat měrnou entalpii vlhkého vzduchu $h_{a,OUT}$ (vstupní hodnotu vypočteme z meteorologických dat). Poté se vypočte topný/chladicí výkon zařízení a celkové množství získaného tepla/chladu:

$$\dot{Q}_{ZVT} = \dot{m}_{a,sv} \cdot (h_{a,OUT} - h_{a,IN}) \quad (25)$$

$$Q_{ZVT} = \dot{Q}_{ZVT} \cdot \tau_{ZVT} \quad (26)$$

kde: \dot{Q}_{ZVT} – topný výkon ZVT (pro $\dot{Q}_{ZVT} > 0$: $h_{a,OUT} > h_{a,IN}$), chladicí výkon (pro $\dot{Q}_{ZVT} < 0$: $h_{a,OUT} < h_{a,IN}$) [W],
 $h_{a,IN}$ – měrná entalpie vlhkého vzduchu na vstupu do ZVT [$\text{J} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$],
 $h_{a,OUT}$ – měrná entalpie vlhkého vzduchu na výstupu ze ZVT [$\text{J} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$],
 Q_{ZVT} – množství získaného tepla/chladu [J],
 τ_{ZVT} – doba chodu ZVT [s].

➤ Kondenzace v rekuperačním výměníku

Výpočtový model zjednodušeně řeší i kondenzaci vlhkosti z odváděného vzduchu v deskovém rekuperačním výměníku. Použity jsou běžné psychrometrické výpočty pro mokré chlazení, blíže viz [62]. Z výsledků uvedených v diplomové práci autora [62, A7] je patrné, že ke kondenzaci při ZVT dochází během téměř 50 % času – přičemž toto nastává převážně v zimním období. Protimrazová ochrana výměníku ZVT je proto v zimních měsících velmi potřebná. V letním období se kondenzace vyskytuje jen zřídka.

5.4 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. Nyní se zaměříme na posledně jmenovaný parametr a teoreticky rozebereme, do jaké míry je množství získané energie závislé na zvoleném typu potrubí – zjednodušeně podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti materiálu trubky a tloušťky stěny. Pro dosažení stejného tepelného výkonu výměníku by měla být nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti materiálu potrubí λ_{pipe} kompenzována větší délkou potrubní trasy, tj. navýšením času setrvání vzduchu v tepelném výměníku τ_{in-out} (viz rovnice (27)):

$$\tau_{in-out} = \frac{\pi \cdot D_{pipe}^2}{4} \cdot \frac{L_{pipe}}{\dot{V}_{a,pipe}} \quad (27)$$

Tab. 5.5: Základní technické parametry vybraných plastových potrubních systémů dimenze DN200 [37, 88]

Parametr	Jednotka	KG-Systém (PVC) [®]			KG 2000 Polypropylen [®]	AWADUKT Thermo
		-coex-	-coex-	-full wall-		
Kruhová únosnost (SN)	[kN/m ²]	4	8	>10	8	8
Oblast použití	[°C]	-20 ÷ 60	-20 ÷ 60	-20 ÷ 60	-20 ÷ 90	-20 ÷ 60
Měrná hmotnost trubky	[kg/bm]	3,54	4,26	---	4,90	4,20
Tloušťka stěny δ_{pipe}	[mm]	4,9	5,9	5,9	6,2	7,0
Tepelná vodivost λ_{pipe}	[W/(m ² ·K)]	0,15 ⁽¹⁾	0,15 ⁽¹⁾	0,15	0,22	0,28
Fiktivní součinitel h_{pipe}	[W/(m ² ·K)]	29,30	24,47	26,21	36,64	41,49
Celkový součinitel $\bar{\alpha}_{mod}$ ⁽²⁾	[W/(m ² ·K)]	7,456	7,099	7,239	7,856	8,058
Čas průchodu ZVT ⁽³⁾	[s]	17,9	17,5	17,5	17,4	17,1
Průměrná rychlost v potrubí ⁽²⁾	[m/s]	1,955	1,997	1,997	2,010	2,045
exp (-NTU) ⁽⁴⁾ ; viz rovnice (12)	[-]	0,098 (výchozí)	0,113 (+14,4 %)	0,108 (+9,5 %)	0,090 (-8,7 %)	0,086 (-12,4 %)
Účinnost ZVT ⁽²⁾ η_{ZVT}	[%]	90,2 (výchozí)	88,7 (-1,7 %)	89,2 (-1,1 %)	91,0 (+0,9 %)	91,4 (+1,3 %)
Měrná cena za 1 bm ⁽⁵⁾ pro 2.Q/2012	[Kč/m]	389,30 (výchozí)	592,10 (+52,1 %)	---	836,90 (+115,0 %)	704,00 (+80,8 %)
Měrná cena za 1 bm ⁽⁵⁾ 1.Q/2015	[Kč/m]	349,90 (výchozí)	333,70 (-4,6 %)	505,60 (+44,5 %)	649,00 (+85,5 %)	778,70 (+122,5 %)

⁽¹⁾ katalogová hodnota 0,15 W/(m·K) odpovídá spíše plnostěnnému PVC potrubí (SN10), ve skutečnosti bude hodnota díky pěnovému jádru ve stěně potrubí o něco nižší [88] – při výpočtu exp (NTU) je tak uvažováno s hodnotou 0,14 W/(m·K);

- (2) platí pro konvektivní součinitel přestupu tepla $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, což odpovídá průtoku cca $220 \div 230 \text{ m}^3/\text{h}$ (dle typu potrubí);
 (3) platí pro délku potrubí 35 m, průtok vzduchu $200 \text{ m}^3/\text{h}$, hustotu vzduchu $1,20 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $c_{p,a} = 1009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
 (4) platí pro objemový průtok $200 \text{ m}^3/\text{h}$ a délku potrubí 35 m;
 (5) stanoveno z ceny 5 m potrubí (pro AWADUKT Thermo a KG-Systém (PVC)® SN10 – tzv. „Vollwand“ – z ceny 6 m);
 cena uvedena včetně 20 % DPH k 2.Q/2012, pro 1.Q/2015 včetně 21 % DPH [37, 88, 92, 188].

Pro konstrukci zemních výměníků tepla můžeme využít několik typů potrubí: betonové, kameninové, vlákno-cementové, litinové nebo nejčastěji plastové (z PVC, PP nebo PE), blíže viz **kapitola 2.1**. Zcela nevhodné pro aplikaci u ZVT jsou logicky potrubí s pěnovým jádrem, která mají dobré tepelně-izolační vlastnosti a jsou tak určena pro jiné realizace. Dále je posouzen vliv materiálu šesti možných typů potrubí, jež mohou být – a jsou – pro vzduchové zemní výměníky nejčastěji využívána (**tabulka 5.5 a 5.6**). Rozbor je proveden pro potrubí dimenze DN200, jež se nejčastěji používá pro zemní výměníky rodinných domů a aplikace středního rozsahu.

Tab. 5.6: Porovnání parametrů flexibilního plastového potrubí beze spojů s „klasickými“ potrubními systémy (dimenze DN200) [37, 85, 88]

Parametr	Jednotka	KG-Systém (PVC)® -coex-	AWADUKT Thermo	ED Geoflex (HEKATHERM-EWT-R)
Kruhová únosnost (SN)	[kN/m ²]	4	8	>8
Oblast použití	[°C]	-20 ÷ 60	-20 ÷ 60	---
Tepelná vodivost λ_{pipe}	[W/(m·K)]	0,15	0,29	0,50
Čas průchodu ZVT ⁽¹⁾	[s]	17,9	17,0	14,8
Průměrná rychlost v potrubí ⁽¹⁾	[m/s]	1,955	2,058	2,363
Měrná cena za 1 bm ⁽²⁾ pro 2.Q/2012	[Kč/m]	389,30 (výchozí)	704,00 (+80,8 %)	---
Měrná cena za 1 bm ⁽²⁾ 1.Q/2015	[Kč/m]	349,90 (výchozí)	778,70 (+122,5 %)	1007,90 (+188,1 %)

(1) platí pro délku potrubí 35 m a průtok $200 \text{ m}^3/\text{h}$;

(2) pro KG-Systém (PVC)® SN4 stanoveno z ceny 5 m potrubí, pro systém AWADUKT Thermo stanoveno z ceny 6 m potrubí, pro ED Geoflex stanoveno z ceny 35 m flexibilního potrubí – ceny uvedeny včetně 20 % DPH k 2.Q/2012, pro 1.Q/2015 včetně 21 % DPH [37, 85, 86, 88, 188].

Jedná se o „klasický“ plastový kanalizační systém z PVC (koextrudovaný) s únosností SN4, SN8 či plnostěnné PVC s SN10, kanalizační systém z polypropylénu (PP) a plnostěnný potrubní systém určený speciálně pro zemní výměníky tepla – **AWADUKT Thermo**® německé společnosti REHAU (potrubí z PP s postříbřeným vnitřním povrchem kvůli eliminaci možného mikrobiologického znečištění vzduchu, s dvojestupňovým těsněním). Pro náročnější realizace, např. oblasti s vysokou hladinou spodní vody či s vysokým stupněm radonové zátěže, je možné využít i bezspojového potrubí z PP ve formě flexibilní hadice **ED GEOFLEX 200/175** společnosti ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o., určeného taktéž speciálně pro aplikace v zemních výměnících [187] (**tab. 5.6**). Tento produkt lze nalézt i pod obchodním názvem **HEKATHERM-EWT-R** společnosti HEGLER Plastik GMBH (SRN) – jedná se však v podstatě

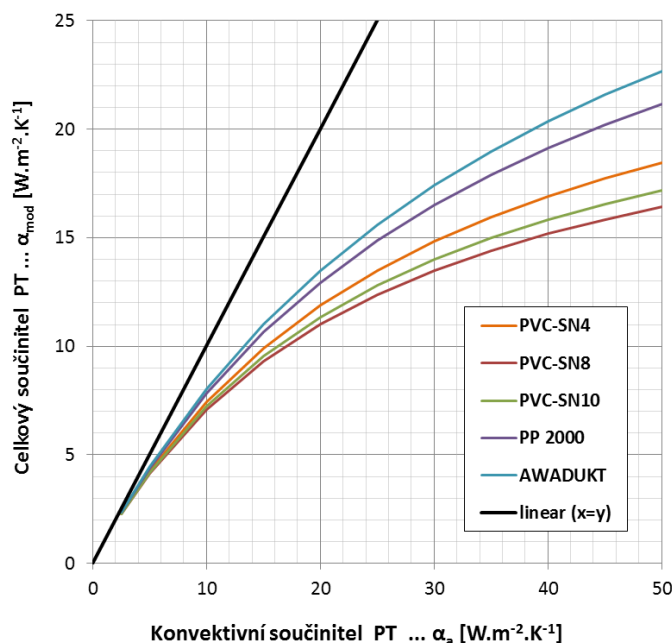
o stejný potrubní systém, pouze pod jiným označením. Porovnání hlavních parametrů, resp. poměr cena/výkon, s „klasickými“ systémy uvádí **tab. 5.6**.

Otázkou je, zda je vhodnější použít zmíněného speciálního antimikrobiálního potrubí (tj. i dražšího) z materiálu o vyšší tepelné vodivosti (viz např. [37, A10]) nebo se spokojit s levnější PVC variantou. Stěna potrubí vždy představuje určitý (nezanedbatelný) tepelný odpor, který snižuje tepelný tok z/do zeminy. Tento negativní jev lze, např. podle [21, 95], zohlednit zavedením tzv. „modifikovaného“ (celkového) součinitele přestupu tepla zemina–vzduch ($\bar{\alpha}_{mod}$, viz **rovnice (28)**). Jedná se o výsledné řešení sériového zapojení dvou tepelných odporů, přičemž tepelný odpor stěny potrubí je převeden na ekvivalentní konvektivní součinitel přestupu tepla α_p (**rovnice (30)**):

$$\bar{\alpha}_{mod} = \frac{\bar{\alpha}_a \cdot \alpha_p}{\bar{\alpha}_a + \alpha_p} \quad (28)$$

$$\bar{\alpha}_a = \frac{Nu_D \cdot \lambda_a}{D_{pipe}} \quad (29)$$

$$\alpha_p = \frac{2 \cdot \lambda_{pipe}}{D_{pipe} \cdot \ln \frac{D_N}{D_{pipe}}} = \frac{2 \cdot \lambda_{pipe}}{D_i \cdot \ln \frac{D_o}{D_i}} \quad (30)$$



Obr. 5.8: Závislost celkového součinitele přestupu tepla zemina–vzduch na konvektivním součiniteli přestupu tepla pro vybrané typy potrubí DN200

Zmíněný modifikovaný součinitel přestupu tepla $\bar{\alpha}_{mod}$ se pak použije v **rovnici (8a)** namísto prostého součinitele přestupu tepla $\bar{\alpha}_a$. Výsledný vztah pro výstupní teplotu ze ZVT,

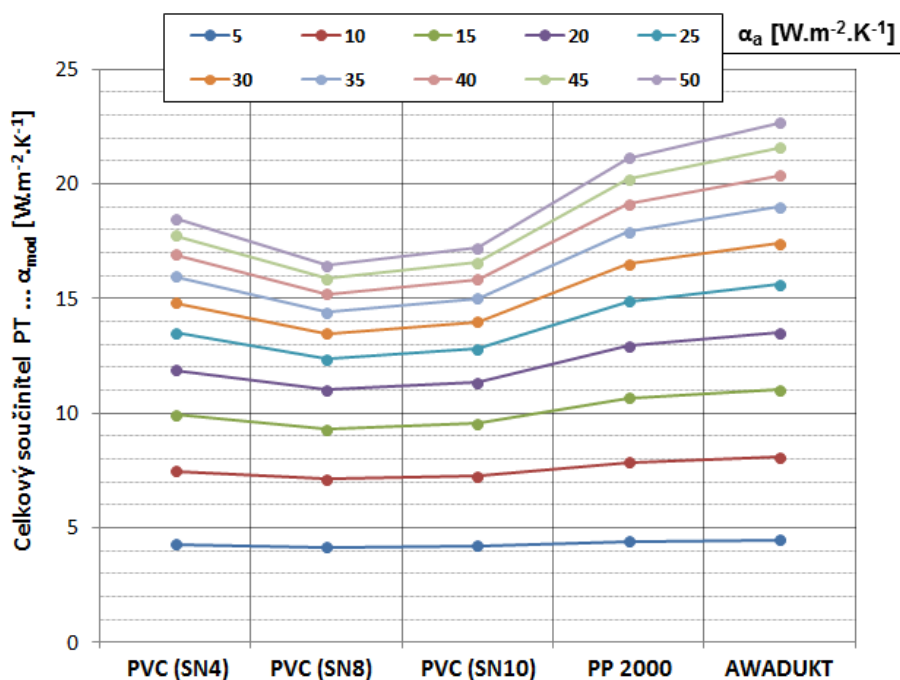
se zohledněním přenosu tepla (PT) *zemina* → *potrubí* → *vzduch*, je tak dán rovnicí (8b). Závislost celkového součinitele přestupu tepla $\bar{\alpha}_{mod}$ na konvektivním $\bar{\alpha}_a$ pro jednotlivé typy plnostěnných potrubních systémů je graficky znázorněn na obr. 5.8.

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 [36], což odpovídá právě hodnotám $\bar{\alpha}_a$ kolem $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (viz tabulka 5.7). Za těchto podmínek nehraje volba materiálu potrubí významnou roli. V tab. 5.7 je pak dále uvedeno, jaký vliv má objemový průtok na rychlost proudění vzduchu v potrubí w_a , konvektivní součinitel $\bar{\alpha}_a$ a měrnou tlakovou ztrátu p_z pro doporučený průměr DN200 u systému KG-PVC (SN4) – pro ostatní typy potrubí budou výsledky obdobné. Zvýrazněny jsou předpokládané hodnoty průtoku pro větrací/cirkulační režim (200/500 m³/h). Na obrázku 5.9 jsou mezi sebou graficky porovnány obvyklé typy potrubí z hlediska konvektivního a celkového součinitele přestupu tepla – výsledky opět potvrzují výše zmíněné. Je zde patrné i výrazné snížení $\bar{\alpha}_{mod}$ při vyšších průtocích, kdy v porovnání s konvektivním součinitelem vychází celková hodnota méně než poloviční (viz též lineární průběh $x = y$ na obr. 5.8).

Tab. 5.7: Vliv objemového průtoku vzduchu na další parametry proudění – kanalizační potrubí KG-PVC (SN4), dimenze DN200

$\dot{V}_{a,pipe}$ m ³ /h	$\bar{\alpha}_a$ W/(m ² ·K)	w_a m/s	p_z Pa/m
100	5,1	0,978	0,09
200	8,9	1,955	0,31
300	12,3	2,933	0,62
400	15,4	3,911	1,03
500	18,5	4,888	1,53
750	25,5	7,332	3,14
1000	32,1	9,777	5,27

Při realizaci zemního výměníku by cílem mělo být, aby exponent v rovnici (8b) byl minimální – pak se bude výstupní teplota více blížit aktuální teplotě zeminy v dané hloubce uložení. Z tohoto pohledu je i při nižších průtocích výhodnější použít potrubní systém s lepší tepelnou vodivostí. Předem je však nutné posoudit všechny důležité aspekty realizace ZVT, výši investičních nákladů a poměr cena/výkon (poslední řádek tabulky 5.6). Přihlédneme-li k omezené době využití ZVT (kap. 5.2) a požadované nízké rychlosti proudění, je z tohoto pohledu prozatím stále nejvýhodnější „obyčejný“ potrubní kanalizační systém KG-System (PVC)[®] SN4 s nižší hodnotou tepelné vodivosti [A10]. Pro detailnější hodnocení energetického přínosu ZVT s různými typy potrubí by bylo nutno provést energetické simulace jeho provozu. Jelikož je však chod ZVT ve většině případů řízen podle aktuální venkovní teploty a pracuje pouze omezenou dobu (zima, léto), jeví se uvedená metodika hodnocení vlivu materiálu jako dostačující.



Obr. 5.9: Závislost celkového (modifikovaného) součinitele přestupu tepla zemina-vzduch na hodnotě konvektivního součinitele PT pro 5 typů plnostěnných potrubních systémů (vztaženo k DN200)

S ohledem na výše uvedený rozbor vlivu potrubního materiálu byl pro experimentální vzduchový zemní výměník na VUT v Brně (**kapitola 6**) použit potrubní systém KG-System (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 [62, A1, A7] je toto 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 [36, 94], které ovšem kvůli vysoké ceně vychází v poměru cena/výkon pro plnostěnná potrubí nejhůře [A10]. Dnes se také pomalu začíná prosazovat flexibilní potrubní systém ED Geoflex (takto se realizuje cca 30 ZVT/rok [187]). Tento systém je, díky malosériové výrobě, opět podstatně dražší než velkosériově produkováné 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 [86]. Záleží vždy na investrovi, jak hodnotí potenciální rizika a kolik je ochoten do svého zemního výměníku investovat.

5.5 Výsledky energetických simulací

V této kapitole jsou uvedeny některé výsledky energetických simulací, provedených na zjednodušeném modelu prezentovaném v **kap. 5.1**. Základní parametry simulovaného

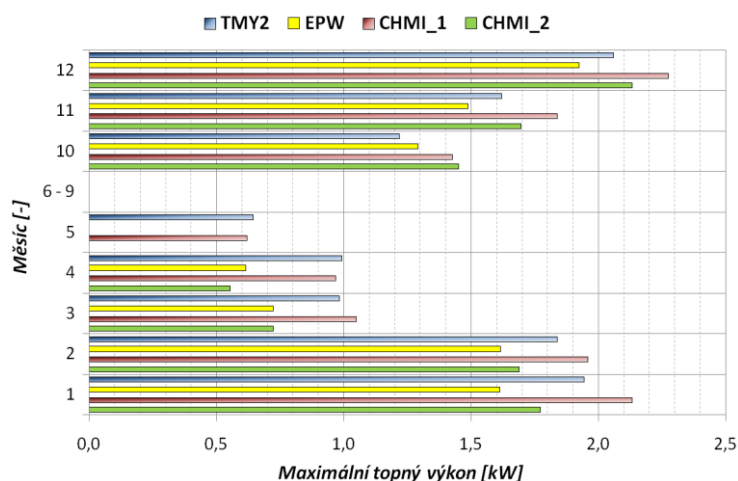
ZVT jsou shrnuty v **tab. 5.8**. Zkoumán byl hlavně vliv vstupních klimatických dat na výsledky simulace pro lokalitu Ostrava [A9] (tj. databáze METEONORM a ENERGY+). Simulován byl přerušovaný větrací režim s odlišným týdenním a víkendovým profilem [62, A7], vycházející z výsledků monitorování reálného provozu některých výměníků (např. [96, 99]). Kontinuální větrání probíhá během pracovních dnů v ranních, odpoledních a večerních hodinách, o víkendech a státních svátcích během dopoledne a večer. Po zbytek dne se větrá přerušovaně, v tomto případě 12 min/h. Průměrná intenzita větrání tak činí 0,4, resp. 0,5 h⁻¹. Interval teplot pro přímé nasávání venkovního vzduchu byl zvolen (0 ÷ 25) °C. V souladu se skutečností byla uvažována jílovitá zemina s teplotní vodivostí $a_{gr} = 9,7 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

Tab. 5.8: Parametry simulovaného zemního výměníku pro NED Studénka [62, A7]

Zemní výměník tepla – přímý typ		Zemina – jílovitá	
Rozměry (d × L)	DN 200 × 30 m	λ_{gr}	1,28 W/(m·K)
Tloušťka stěny	6,2 mm	ρ_{gr}	1 500 kg/m ³
Materiál potrubí	KG 2000 Polypropylen [®]	$c_{p,gr}$	880 J/(kg·K)
Tepelná vodivost	0,22 W/(m·K)	C_{gr}	1,32 MJ/(m ³ ·K)
Průměrná hloubka	1,825 m	a_{gr}	$9,7 \cdot 10^{-7}$ m ² /s

S využitím dostupných klimatických dat pro Ostravu a Mošnov 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 ($A_{at} = 10,2$ °C, $T_{ma} = 8,2$ °C, $\tau_{min} = 17$ dní);
- 2) **EPW** dtto pro databázi ENERGY+ (Ostrava, $A_{at} = 10,0$ °C, $T_{ma} = 8,5$ °C, $\tau_{min} = 16$ dní);
- 3) **CHMI_1** vstupní parametry vzduchu z databáze METEONORM (Ostrava-Poruba), teplota zeminy vypočtena podle měsíčních dat meteostanice Mošnov ($A_{at} = 10,4$ °C, $T_{ma} = 9,2$ °C, $\tau_{min} = 31$ dní);
- 4) **CHMI_2** analogicky se vstupními parametry vzduchu z databáze ENERGY+ (Ostrava).



Obr. 5.10: Topný výkon ZVT v jednotlivých variantách energetické simulace – maximální měsíční hodnoty [A9]

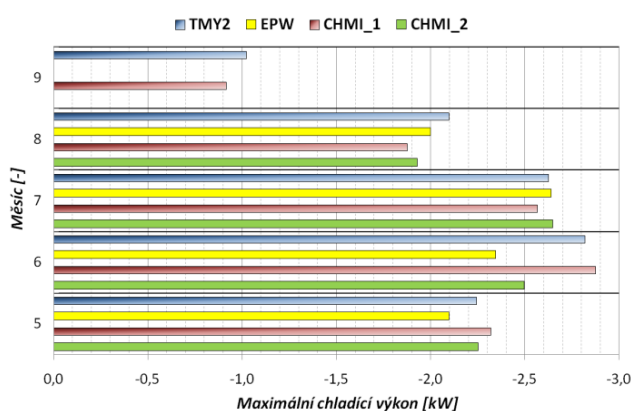
➤ Zimní přehřev

Maximální měsíční hodnoty topného výkonu zemního výměníku tepla jsou pro jednotlivé řešené varianty graficky uvedeny na **obrázku 5.10**. Skutečný výkon je však vždy nutno předpokládat o něco nižší, v rozmezí cca 1,0÷1,5 kW [A9], a to hlavně z důvodu zanedbání vlivu provozu výměníku na teplotu okolní zeminy v průběhu simulace. V reálném provozu může skutečný výkon zařízení výraznou měrou ovlivnit i vlhkost zeminy (přirozená 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, ...).

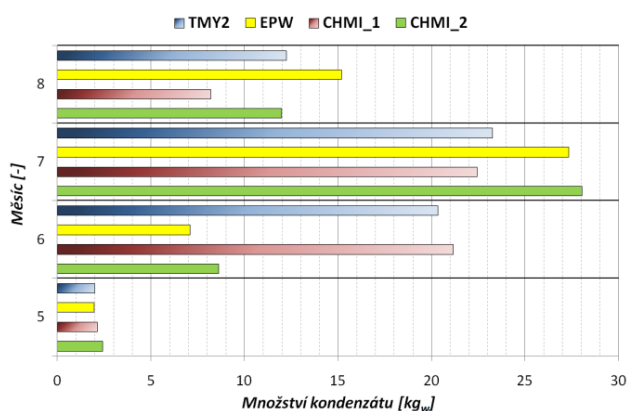
Z **obr. 5.10** je patrné, že nejvyššího topného výkonu dosahuje ZVT ve variantě „**CHMI_1**“, což je zřejmě zapříčiněno vyšší hodnotou fázového posunu teplotního průběhu v zemině. To vede ke zvýšení aktuálního teplotního spádu (ΔT) mezi proudícím vzduchem a okolní zeminou a logicky též k navýšení aktuálního 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 nejchladnějším období roku, tj. říjen až únor, v ostatních měsících jsou rozdíly zanedbatelné. Sumární hodnoty jsou uvedeny v **tab. 5.9** a **5.10**. Je rovněž patrné, že v období červen až září není již zemní výměník využíván pro přehřev, ale spíše pro předchlazení přiváděného vzduchu – viz též celkové využití ZVT na **obrázku 5.7**.

➤ Letní předchlazení

Maximální měsíční hodnoty chladicího výkonu zařízení jsou pro jednotlivé řešené varianty graficky uvedeny na **obr. 5.11a**. Opět s přihlédnutím k zjednodušenému výpočtu teplotního rozvrstvení zeminy se dá skutečný chladicí výkon předpokládat v rozmezí 1,5 ÷ 2,0 kW [A9]. 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 *meteo*data). Pro jednotlivé varianty se výrazněji liší též měsíční množství vzniklého kondenzátu (**obr. 5.11b**) – již malé rozdíly teploty zeminy způsobí poměrně velkou změnu kondenzace vzdušné vlhkosti. Podstatný rozdíl nastává v důsledku odlišných hodinových dat (např. **obr. 5.5** nebo **tab. 5.2**) i mezi variantami **TMY2** a **EPW** – měsíc červen, **obr. 5.11b**.



Obr. 5.11a: Chladicí výkon pro jednotlivé varianty simulace – maximální měsíční hodnoty [A9]



Obr. 5.11b: Měsíční množství zkondenzované vody ve vzduchovém zemním výměníku [A9]

➤ Celoroční bilance

Z hlediska celoroční bilance jsou nejpodstatnější 3 veličiny: celková doba využití zemního výměníku v zimním/letním období, celkové množství získané/odevzdané energie a celkové množství vysrážené vody. Ty jsou pro jednotlivé varianty přehledně vyčísleny v **tab. 5.9**. Vzájemné porovnání některých variant simulací mezi sebou je uvedeno v **tabulce 5.10**.

Tab. 5.9: Výsledky celoroční energetické simulace pro jednotlivé řešené varianty [A9]

Varianta	Doba využití zima/léto		Získané teplo/chlad		Množství kondenzátu
	[h]		[kW·h]		[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

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 (**obr. 5.5**). 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 [62, A6] naznačují, že ke kondenzaci vzdušné vlhkosti v potrubí ZVT dochází v období květen až červen.

Tab. 5.10: Vzájemné porovnání celoročních výsledků jednotlivých řešených variant [A9]

Varianta	Doba využití zima/léto		Získané teplo/chlad		Množství kondenzátu
	[h]	[h]	[kW·h]	[kW·h]	[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 %

Přesnost výsledků energetické simulace je však do značné míry závislá na přesném stanovení okrajových podmínek. Poznamenejme také ještě, že teplo získané 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. [62, 96, A7].

V následující kapitole budou prezentovány některé výsledky monitoringu reálného vzduchového zemního výměníku tepla, které budou dány do kontextu s výsledky energetických simulací zde uvedených.

KAPITOLA 6

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

Ve vzduchotechnických systémech budov nemají zemní výměníky tepla takové masové využití jako ostatní prvky TZB – nejsou proto příliš rozšířeny ani v povědomí laické či odborné veřejnosti. Studenti příslušných technických oborů (např. oboru Technika prostředí na FSI VUT v Brně) by však měli mít z výuky alespoň základní znalosti o možných alternativních řešeních a jejich konkrétních aplikacích v reálné praxi. Jedním z nich je i úprava větracího vzduchu pro rodinné domy, nebo i větší objekty s využitím přirozeného tepla/chladu zemského polomasivu pomocí různých typů zemních výměníků tepla. Doposud bylo také v ČR získáno málo praktických zkušeností s návrhem, provozem a následným monitoringem ZVT.

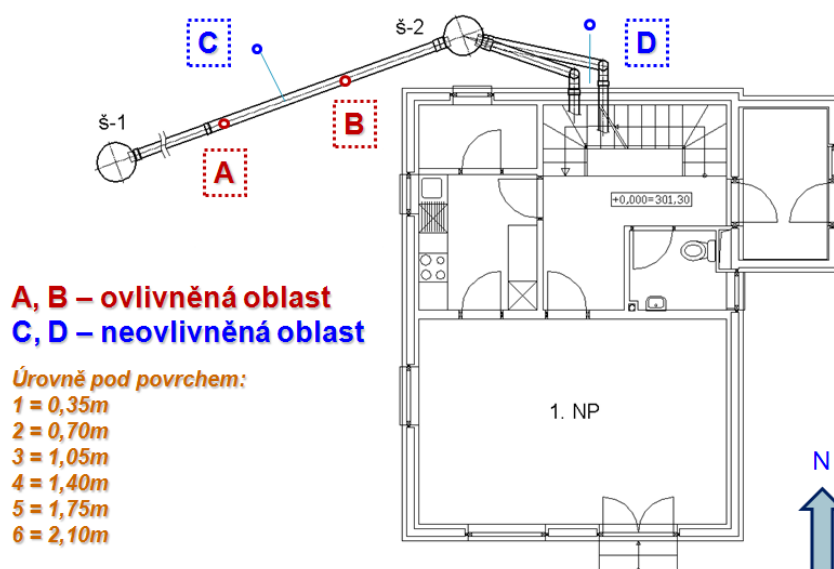


Obr. 6.1: Experimentální dům větrání VUT v Brně (oranžově) – dispozice pozemku;
zdroj: www.MAPY.cz

Z těchto důvodů byl na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně vybudován cirkulační vzduchový zemní výměník tepla (**obr. 6.1 až 6.3**). Jeho realizace proběhla převážně v rámci řešení projektu FRVŠ G1/3206/2011 „Zemní výměník jako nový prvek v technice prostředí“ [92] jako doplňku experimentálního nízkoenergetického domu větrání, jenž byl v roce 2004 vybudován v areálu FSI VUT v Brně [189, A8, A10, A11, A12].

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

Toto experimentální zařízení je modifikovanou variantou cirkulačního typu zemního výměníku (viz např. **obr. 3.15**) a díky své geometrii, která byla vynucena hlavně využitelným prostorem v okolí nízkoenergetického domku, umožňuje realizovat až devět provozních režimů. Zařízení dále umožňuje monitoring základních provozních parametrů a teplotního rozvrstvení zeminy v místě výměníku a jeho blízkém okolí.



Obr. 6.2: Půdorys experimentálního ZVT, včetně umístění teplotních sond v zemině [A12]

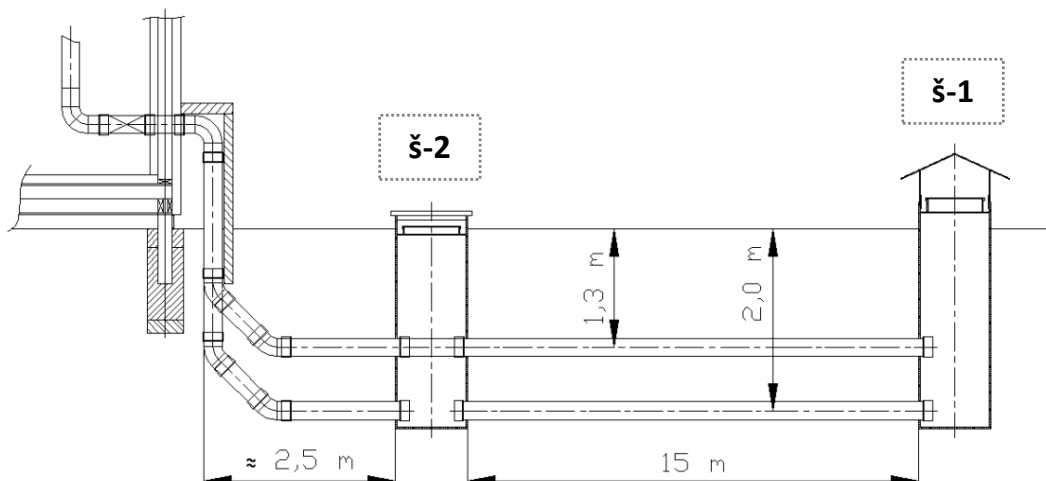
6.1 Základní popis zařízení a jeho realizace

Vzhledem k dispozici pozemku, omezenému venkovnímu prostoru v blízkosti experimentálního domku a uloženým inženýrským sítím byl zemní výměník vybudován v severozápadní části pozemku (**obr. 6.1**). Kvůli napojení ZVT do objektu bylo nutno zvolit lomený půdorys (**obr. A.1**). Vzhledem k tomu, že je pozemek mírně spádován směrem k domu, který není podsklepen [189], se musela vyřešit zásadní otázka zajištění sběru a odvodu vznikajícího kondenzátu. Zalomení se tak realizovalo přidavnou plastovou šachtou o průměru DN800 (viz „š-2“, **obr. 6.2**) pro snazší čištění potrubí, odkud se bude kondenzát odčerpávat, příp. i měřit jeho množství. Výměník je tvořen dvěma větvemi potrubí, jež jsou v zemním výkopu uloženy nad sebou (**obr. 6.3**) v konstantních hloubkách cca 1,3 m a 2,0 m (bráno k osám potrubí). Další plastová šachta, již standardní nasávací s průměrem DN800 a s hlavicí („š-1“ na **obr. 6.2** a **6.3**), je využita k propojení obou potrubních tras (**obr. A.11**). Oproti standardnímu provedení je šachta mírně poupravena – na její vrch byl přivařen vzduchotěsný odnímatelný poklop (**obr. A.15**). Obě šachty (výrobce *BMTO GROUP a.s., Liberec*) byly vyrobeny na zakázku, přímo pro daný experimentální výměník tepla.

Vznikl tak „hybridní“ zemní výměník, jež kombinuje přímý a cirkulační typ ZVT a může pracovat i v několika dalších režimech (**kap. 6.2**). Sání vzduchu je možné přepínat motoricky ovládanou „T-klapkou“ typu **TKR 200/200/200 Pr LM230** (výrobce *Atrea, Jablonec nad Nisou*) buď z prostoru 2.NP (tj. cirkulační režim pro ochlazení vnitřního

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

vzduchu v letním období) nebo přes protidešťovou nasávací žaluzii na fasádě objektu zvenčí (tj. přímý režim pro predehřev větracího vzduchu v zimním období nebo jeho ochlazení v létě). Jelikož v experimentálním domku není instalována vzduchotechnická jednotka, jež by zajistila pohyb vzduchu, je na výstupní části ZVT umístěn potrubní radiální ventilátor **RM 200L** (výrobce *ELEKTRODESIGN ventilátory, Praha*). Nasáváním vzduchu přes zemní výměník tepla tak v potrubí vzniká podtlak. Ventilátor je ovládán manuálně pětistupňovým regulátorem otáček **REV 1.5 A IP54** (taktéž od fy *ELEKTRODESIGN*).



Obr. 6.3: Rozvinutý řez experimentálním zemním výměníkem tepla [A12]

Na základě rozboru vlivu potrubního materiálu na potenciální výkon ZVT (viz **kap. 5.4**) a finančních možností projektu FRVŠ bylo zvoleno běžné kanalizační potrubí z neměkčeného polyvinylchloridu, KG-Systém PVC® (výrobce *WAVIN Osma, Kostelec nad Labem*) o průměru DN200. Dodejme také, že se v běžné praxi jedná o nejpoužívanější potrubní systém; dosažené výsledky tak bude možné i zobecnit. Kvůli minimalizaci spojů – tj. snížení rizika průsaku spodní vody – se zvolily 5 m trubky, tj. nejdelší vyráběné. Celková délka zemního výměníku činí cca 39 m (2× 15 m mezi šachtami + jeho připojení). Jelikož budova není podsklepena, jsou obě větve zemního výměníku do objektu zaústěny přes fasádu objektu (**obr. A.12**). Pro snazší čištění jsou na vstupu i výstupu ZVT (uvnitř budovy) umístěny čisticí KG tvarovky (**obr. 6.18**). Na vstupní a výstupní větvi potrubí zemního výměníku jsou rovněž instalovány filtrační boxy (kazety) s výměnným filtrem – vstup za fasádní žaluzii: filtrační vložka/třída G4; výstup: kapsový/ třída G3. Filtrační kazeta, s výměnným kapsovým filtrem třídy G3, je též zabudována na vstupu do cirkulační větve chlazení ve 2. NP (**obr. 6.17** a **A.16**).

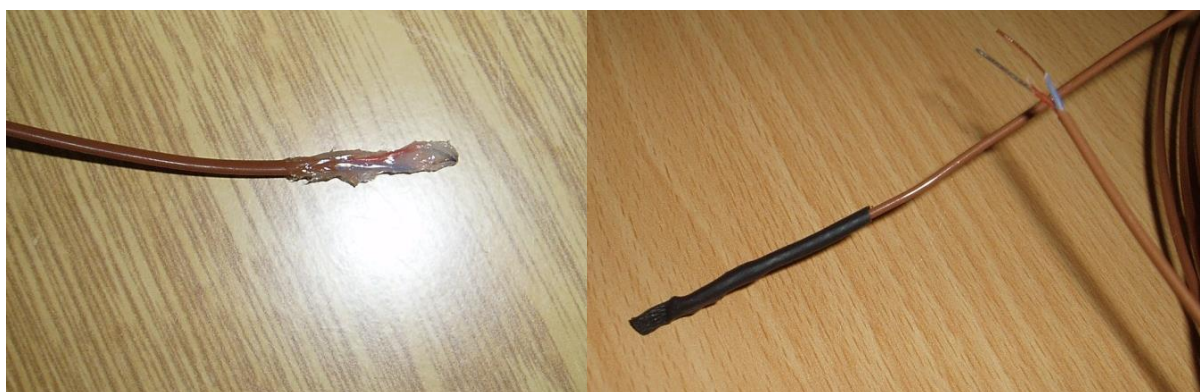
Níže je stručně popsán postup budování experimentálního zařízení spolu s několika doprovodnými fotografiemi – zbylá fotodokumentace je součástí **přílohy A** – a některými postřehy z jednotlivých fází realizace.

➤ Příprava a kalibrace termočlánků

Pro měření jednotlivých teplot byly zvoleny termočlánky typu T, individuálně zhotovené z termočlánekového drátu typu **T-T-24-1000** (výrobce *OMEGA Engineering, USA*). Jedná se

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

o svazek dvou vodičů (měď-konstantan) s průměry drátů 0,5 mm a vnější neoflonovou PFA izolací. Oba vodiče byly na jednom konci bodově svařeny pomocí svářečky termočlávkových drátů **TL-WELD** (výrobce *OMEGA Engineering, USA*). Jednotlivé termočlánky měly délky 3,0 m až 26,9 m (**tab. A.1**). Svařený konec obou drátů byl, po ověření funkčnosti termočlánku, izolován proti vlhkosti a mechanickému namáhání (kvůli uložení většiny čidel v zemině) pomocí silikonového tmelu (**obr. 6.4** vlevo) a po jeho vytvrdnutí zataven do smršťovací bužírky (**obr. 6.4** vpravo). Celkem bylo takto zhotoveno 24 ks termočlávkových čidel pro měření teploty zeminy a 6 ks termočlávkových čidel pro měření teploty vzduchu v definovaných bodech potrubní trasy ZVT. Celková délka použitého drátu činila téměř 465 m. Teplotní rozvrstvení v zemině je měřeno jednak v oblasti ovlivněné provozem zemního výměníku (viz **obr. 6.2** – sondy „A“ a „B“; instalovány ve svislé ose výměníku v rozteči 1/3 délky mezi oběma šachtami), tak i v oblasti neovlivněné provozem – ve vzdálenosti cca 2 m od potrubí, resp. fasády objektu (sondy „C“ a „D“).



Obr. 6.4: Příprava teplotních čidel: ochrana svaru termočlánku silikonovým tmelem (vlevo), finální ochrana konce termočlánku pomocí smršťovací bužírky (vpravo) – foto: autor



Obr. 6.5: Kalibrace termočlávků pro měření teploty v zemině – foto: autor

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

Následně byla všechna čidla několikabodově kalibrována v přenosné blokové kalibrační pístce **CL1000A-230V** (výrobce *OMEGA Engineering, USA* – viz **obr. 6.5**) a ve vodní lázni, jejíž teplota byla měřena přesným odporovým teploměrem **Testo 735** se sondou Pt100 (výrobce *Testo Inc., USA*). Termočlánky pro umístění v zemině byly z časových důvodů kalibrovány pouze tříbodově, při teplotách 5 °C, 25 °C a 40 °C. Naopak teplotní čidla pro vzduch byla kalibrována při teplotách 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C a 30 °C. Kalibrační křivky všech čidel jsou uvedeny v příloze A (**tab. A.2** a **A.3**). Kvůli nedostupnosti kalibračního zařízení pro nízké teploty nebyly realizovány kalibrace v podnulovém rozsahu teplot.

➤ **Příprava teplotních sond**

Před započítím instalačních prací ZVT bylo třeba připravit čtyři teplotní sondy pro měření teplotního rozvrstvení zeminy (**obr. 6.6**) – zejména sond „A“ a „B“, jež se musely zabudovat zároveň s pokládkou obou větví ZVT. Sondy byly vyrobeny ze standardních dřevěných truhlářských prvků; jednotlivé termočlánky byly umístěny na dřevěné kolíky ve vzdálenosti cca 15 cm od těla sondy. Každá sonda je osazena šesti termočlánky pro měření teploty v několika úrovních pod povrchem (viz **obr. 6.7**). Zvolen byl konstantní rozestup čidel po 35 cm – měřeny jsou tak teploty v úrovních 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).



Obr. 6.6: Příprava zemní sondy „A“ pro měření teplot v zemině (v oblasti ovlivněné ZVT); foto: autor



Obr. 6.7: Usazená zemní sonda „B“ (v pozadí je patrná zadní – nasávací šachta a sonda „A“); foto: autor

➤ Výkopové práce

Již při návrhu zemního výměníku tepla bychom si měli ověřit, zda na daném pozemku nevedou inženýrské sítě (nebo další prvky uložené pod zemí), které by pak případně kolidovaly s potrubní trasou výměníku či jinak omezovaly realizaci. Při plánování trasy experimentálního ZVT (**obr. A.1** přílohy) se přihlíželo ke skutečnosti, že na pozemku vede z nedaleké vodárny páteřní vodovodní potrubí pro areál FSI VUT v Brně a kanalizační potrubí pro odvod srážkové vody. Poloha potrubí výměníku tak byla zvolena rovnoběžně s plotem oddělujícím sportovní areál, ve vzdálenosti cca 4 m (**obr. 6.1**). Hlavní výkopové práce realizované firmou *IMOS Brno, a.s.* proběhly dne 6.9.2011 během necelých 4 hodin. I přes všechna předběžná opatření se při výkopu, v hloubce asi 1 m pod povrchem, nečekaně narazilo na pět svazků elektrických kabelů, sloužících k napájení osvětlení sousedícího sportovní areálu (viz **obr. 6.7** a **6.8**). Před ukončením výkopu, cca 2 m pod povrchem, se zase narazilo na zmiňované vodovodní potrubí, jež podle dostupných plánů mělo vést dále od hranice pozemku. Zde se také v horní vrstvě výkopu nacházel nesourodý zásyp z kamenů, hlíny a betonového odpadu v tloušťce cca 0,5 m (**obr. 6.9**) – dokonce byl vykopán i jeden kompaktní betonový panel rozměru 3,0 × 1,5 × 0,2 m a několik menších kusů dalších panelů (**obr. A.5**).



Obr. 6.8: Realizace výkopových prací ZVT (v popředí jsou vidět kabely pro napájení osvětlení sousedícího sportovní areálu VUT v Brně; foto: autor



Obr. 6.9: Skladba zeminy v blízkém okolí horní/nasávací šachty „š-1“, patrná je nesourodost prvních cca 0,5 m zeminy pod povrchem – foto: autor –

Jelikož je spodní potrubí osově uloženo v hloubce 2 m pod povrchem, bylo nutné výkop provést do hloubky alespoň 2,3 m, přičemž pro snazší instalaci jednotlivých pětimetrových kusů potrubí (á 18 kg/ks) byla šíře výkopu zvolena 60 cm. Výkop o rozměrech 1,25 × 1,25 m pro usazení jednotlivých šachet (DN 840 × 2200) mm, byl proveden do hloubky cca

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

2,5 m. Dohromady to představuje cca 30 m³ vytěžené zeminy, kterou bylo třeba během realizace ZVT na pozemku uskladnit – což za situace, kdy je zemní výměník budován dodatečně, může představovat určitý problém. Nutné je též počítat s tím, že po instalaci ZVT zbude určitá část vytěžené zeminy (v našem případě cca 3,6 m³); ta poté byla s výhodou použita na finální terénní úpravy kolem experimentálního domku (**obr. A.10**). Při takovéto hloubce je rovněž nezbytné stěny ihned po výkopu zajistit proti sesuvu (viz např. **obr. 6.13** a **A.9**). Další úpravy byly provedeny v těsné blízkosti objektu (odsekání části betonového základu, ruční odkopání části zeminy tam, kde se nedostala lžice bagru).

Po dokončení výkopových prací bylo **doc. Ing. Lumírem Mičou, Ph.D.** ze Stavební fakulty VUT v Brně provedeno odborné posouzení typu zeminy. Bylo odebráno několik vzorků z různých částí výkopu, přičemž základními rozbory bylo zjištěno, že se v převážné většině jedná o prachovitě písčitou jílovitou hlínu, tzv. „*spraš*“ (zemina hnědožluté barvy; pevná, drobná s pórovitou strukturou a s obsahem uhličitánu vápenatého (CaCO₃) ve formě bělavých žilek [190]). Její tepelná vodivost a hustota je odhadována na 0,07 ÷ 0,80 W/(m·K), resp. 620 ÷ 1360 kg/m³ [A12]. Tento typ zeminy není pro ZVT zcela vhodný; vhodnější jsou půdy s vyšší tepelnou vodivostí (viz **tab. 5.1**). Bylo proto zvažováno i zalití okolí trubek bentonitovou směsí, z finančních a technologických důvodů se však toto řešení neuskutečnilo. Dosažené hodnoty topného a chladicího výkonu, uvedené v **kap. 7**, je tak nutné brát spíše jako spodní hranici možností ZVT. Lze očekávat, že při vhodnějších podmínkách by bylo dosaženo lepších výkonových parametrů.



Obr. 6.10: Čištění potrubí před pokládkou;
foto: autor



Obr. 6.11: Molitanový přípravek na čištění potrubí;
foto: autor

➤ Čištění potrubí

Plastová kanalizační potrubí nebývají při svém uskladnění povětšinou chráněna proti případnému zaprášení či vniku jiných nečistot, je proto vhodné je před samotnou pokládkou vyčistit (**obr. 6.10**). K tomu byl vytvořen čisticí přípravek ve formě stočeného molitanového pásu, s průměrem o něco málo větším, než má samotné potrubí (**obr. 6.11**). Do potrubí bylo následně zavedeno ocelové lanko pro protažení přípravku namočeného do teplé vody s běžným kuchyňským saponátem. Přípravek byl protahován potrubím, dokud nezůstal molitan čistý. Obdobným způsobem (s poněkud upraveným přípravkem, viz **obr. A.13**) bylo potrubí čištěno opět na jaře r. 2012 – tedy čtvrt roku po uvedení zařízení do provozu. Kvůli následným plánovaným mikrobiologickým odběrům (blíže viz **kap. 7**) bylo upuštěno od použití agresivních desinfekčních přípravků na bázi chlóru.

➤ Pokládka potrubí, šachet a připojení ZVT k experimentálnímu domu

Instalace samotného zemního výměníku začala usazením a zaměřením kontrolní šachty „š-2“ (**obr. 6.12 a A.6**) a šachty nasávací „š-1“. Kvůli probíhajícím kabelům pro osvětlení se nasávací šachta musela usadit o něco hlouběji, než bylo původně plánováno (**obr. A.8**). Tím však její horní okraj sahal již pod úroveň okolního terénu – jediným řešením bylo dodatečně navýšit tubus šachty, a to přivařením další plastové skruže výšky 30 cm. Při této příležitosti technici výrobce také přivařili na vrch šachty „š-1“ odnímatelný vzduchotěsný plastový poklop (obdobný jako u „š-2“, viz **obr. A.15** přílohy), s nímž původně nebylo počítáno. Úpravou tak vznikl již několikrát zmiňovaný „hybridní“ typ zemního výměníku. Pozice kontrolní šachty se též musela neplánovaně upravit, a to kvůli posunu prostupů potrubí přes fasádu (nosné sloupky dřevostavby byly umístěny odlišně od projektové dokumentace).



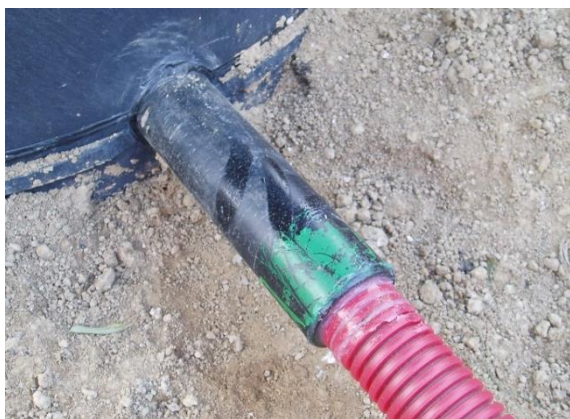
Obr. 6.12: Usazování kontrolní šachty „š-2“; foto: autor



Obr. 6.13: Příprava na pokládku spodního potrubí, vepředu kontrolní šachta „š-2“ – foto: autor

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

Další neplánovaná situace nastala při instalaci potrubí – nesprávný průměr prostupů do šachet se řešil vložením redukce (přechodky litina/PVC, viz **obr. A.7**). Napojení na vstupní otvory šachty jsou tak realizována bez gumového těsnění a meziprostor je těsněn pouze pomocí silikonového tmelu. Bude proto průběžně sledováno, zda do výměníku nezateká. Jednotlivá potrubí se pak postupně připojovala směrem od spodní šachty k horní (**obr. 6.13**). Napojení na obě redukce v horní šachtě bylo provedeno pomocí PVC přesuvky.



Obr. 6.14: Pokládka plastové chráničky pro čidla TRHx z nasávací šachty „š-1“ a teplotních sond „A“, „B“ a „C“

Obr. 6.15a,b: Řešení vstupu chráničky do obou šachet a svazky termočlánků ze zemních sond „A“, „B“ a „C“; foto: vše autor

Během pokládky se všemi třemi trubkami protáhla silonová prádelní šňůra, jež bude sloužit k protahování čistícího přípravku. Přejechod vodorovného potrubí do svislé polohy se z důvodu snazšího čištění realizoval dvěma 45° koleny, přechod svislého potrubí do vodorovné polohy je proveden již standardně 90° kolenem (**obr. A.12**). Mezi kontrolní šachtou a domem je opět v obou potrubních větvích zavedena plastová šňůra pro možnost následného čištění. Hned u stěny jsou pak instalovány čistící KG tvarovky (**obr. 6.16**) pro snazší přístup do potrubí; zde jsou v každém potrubí umístěna i čidla měření teploty a vlhkosti (tzn. „TRHx“) na vstupu a výstupu do/ze zemního výměníku (viz **obr. A.3** přílohy) Ze zpětného pohledu by však bylo vhodnější čistící tvarovky instalovat také na venkovní část ZVT – zmíněné koleno totiž značně ztěžuje pohyb šňůry táhnoucí čistící přípravek.

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

Termočlánkové dráty jednotlivých teplotních sond byly pro snazší manipulaci vloženy do spirálové plastové elektrikářské chráničky (**obr. 6.15b**). Proti mechanickému poškození v zemině byly následně tyto svazky ještě vloženy do ohebné dvouplášťové korugované chráničky **KF 09040 BB - KOPOFLEX®** (výrobce *KOPOS KOLÍN, Kolín*), určené pro ochranu všech druhů energetických a telekomunikačních vedení (viz **obr. 6.15a**). Flexibilní HDPE hadice o vnitřním průměru 32 mm s protaženými několika svazky byla následně uložena v hloubce cca 50 cm pod povrchem (**obr. 6.14** a **6.18**). Zmíněnou chráničkou byly propojeny i obě šachty, z nichž vedou kabely teplotně-vlhkostních čidel.



Obr. 6.16: Vstup a výstup do/ze zemního výměníku a jednoduchý VZT rozvod v přízemí (foto: autor)



Obr. 6.17: Sání cirkulačního vzduchu z haly ve 2.NP (foto: autor)

➤ VZT rozvod uvnitř domku

Jelikož v experimentálním domku nebylo instalováno žádné vzduchotechnické zařízení, musel být pro zemní výměník zhotoven jednoduchý VZT rozvod. Bylo zvoleno klasické falcované potrubí (SPIRO) z pozinkovaného plechu o průměru DN200. K uchycení větší části rozvodu byla využita konstrukce dřevěných schodů (**obr. 6.16**), pod nimiž potrubí zemního výměníku ústilo. Do fasády objektu byl proražen otvor pro nasávací tvarovku s fasádní žaluzií (**obr. A.21** a **A.22**), odkud bude vzduch nasáván v základním větracím režimu. Následně byl připojen regulátor otáček ventilátoru, servopohon přepínací „T“ klapky (**obr. A.18** přílohy) a mezi filtrační box a potrubní ventilátor vložena škrtková klapka pro možnost jemnější regulace (**obr. A.17**). Z důvodů lehké konstrukce dřevostavby a celkové dispozice místností nebyl oproti plánu realizován rozvod přívodního vzduchu ze ZVT do obou pokojů v 2. NP a prezentační místnosti v přízemí. Potrubní ventilátor tak

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

vzduch ze zemního výměníku vyfukuje pouze do haly vedle schodišťového prostoru, odkud se samovolně šíří po celém objektu. Vzhledem k tomuto faktu je obtížné stanovit skutečný přínos ZVT v cirkulačním režimu chlazení – nehledě k nízké vzduchotěsnosti objektu [92].

➤ **Terénní úpravy**

Po uložení dolní větve ZVT byl výkop postupně ručně zasypáván (**obr. A.9**), přičemž nejbližší okolí trubek a teplotních sond se ručně zahazovalo hlínou zbavenou větších kamenů a nečistot, aby se předešlo případnému budoucímu namáhání trubek vlivem sedání zeminy. Mezitím se jednotlivé vrstvy postupně hutnily sešlapáváním a proléváním vodou, čímž se omezilo rychlé sesedání zeminy, které by jinak hrozilo, kdyby se výkop pouze jednoduše zaházel. Vrchní vrstva výkopu o hloubce cca 1 m už se zasypávaly mechanicky za pomoci traktorbagru; finální terénní úpravy provedeny pomocí těžké techniky (**obr. A.10**). Do nasávací šachty „š-1“ se při té příležitosti nedopatřením dostalo několik hrstí hlíny (viz **obr. A.23**), proto se šachta musela následně vyčistit.



Obr. 6.18: Instalace zemní sondy „D“ (nahore);
foto: autor

Obr. 6.19: Výkop pro zemní sondu „C“ a její
finální umístění ve výkopu (vlevo); foto: autor

Výkop a instalace dvou zemních sond, měřících teplotu v neovlivněné oblasti, se prováděly až dodatečně – sondy „C“ začátkem listopadu 2011 (viz **obr. 6.19**), sondy „D“ začátkem prosince 2011 (**obr. 6.18**). Následné zahazování se provádělo také ručně,

příčemž se postupovalo pečlivě po vrstvách s postupným hutněním, stejně jako tomu bylo v případě pokládky samotného potrubí. Všechny chráničky s protaženými přívody čidel byly poté svedeny do jednoho místa – viz **obr. 6.20** – a odkud přes fasádu do společného rozvaděče měřicí techniky. Po ukončení terénních úprav byl kolem místa prostupu potrubí vytvořen box s deseticentimetrovou voděodolnou tepelnou izolací (**obrázek A.22** přílohy), jenž zabraňuje tepelným ztrátám/ziskům z přívodních potrubí. Proti nežádoucímu zatékání srážkové vody byl box opatřen stříškou z pozinkovaného plechu.

➤ Měření a regulace

Součástí vybudovaného experimentálního zařízení je i měřicí a regulační aparatura, jež snímá a zaznamenává základní provozní parametry zemního výměníku v šesti měřicích uzlech (1× venkovní prostředí, vstup a výstup do/ze zemního výměníku, 2× nasávací šachta a 1× vstup do cirkulační větve). Mimo teploty je snímána také relativní vlhkost vzduchu (RH) – pro její stanovení jsou použity snímače vlhkosti typu **HIH4000-003** (**obr. 6.20** a **obr. A.3**; výrobce *Honeywell, USA*). Kalibrace nebyla třeba, jelikož kalibrační konstanty jsou dodávány přímo se samotnými čidly (**tab. A.4** přílohy). Před zabudováním však byla ověřena jejich funkčnost. Měření teploty zeminy (včetně kalibrace čidel) ve 24 měřicích uzlech již bylo zmíněno v předchozích kapitolách.



Obr. 6.20: Teplotně-vlhkostní čidlo „TRH5“ na vstupu do ZVT (foto: autor)

Objemový průtok vzduchu proudícího výměníkem \dot{V}_{ZVT} je určen z průměrné rychlosti proudění uvnitř potrubí – rychlost je měřena na výstupu ze ZVT (v místě zúžení potrubí na DN160) pomocí vestavěné sondy s žárovým anemometrem typu **Almemo FV A935-TH5** (výrobce *Ahlborn, Německo*). Pro všech pět regulačních stupňů ventilátoru byl proměřen rychlostní profil ve svislé a kolmé ose, z něhož se následně stanovila průměrná rychlost v potrubí \bar{w}_{avr} (tj. v měřicím uzlu), resp. průměrná rychlost v potrubí zemního výměníku o DN200 (\bar{w}_{ZVT} , viz **tab. 6.1**). Ta je pro nastavený stupeň regulace zahrnuta do dalších výpočtů jako konstantní hodnota. Totéž měření bylo následně provedeno pro částečně uzavřenou škrtecí klapku (**tab. 6.2**).

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

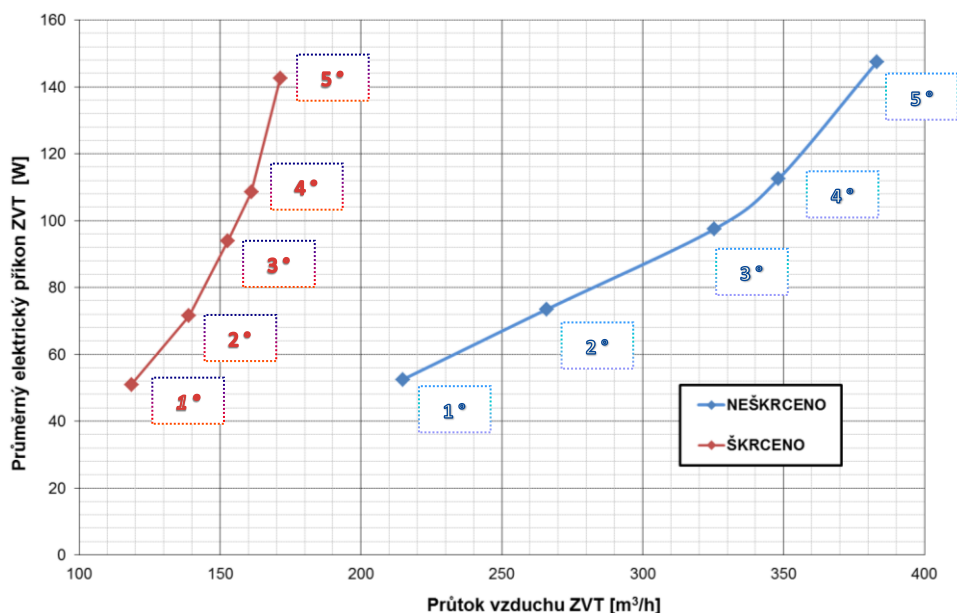
Tab. 6.1: Parametry pro jednotlivé stupně regulace – klapka plně otevřena [92]

Nastavení regulace:		1°	2°	3°	4°	5°
\bar{w}_{avr}	[m/s]	3,289	4,072	4,983	5,331	5,866
\bar{w}_{ZVT}	[m/s]	2,628	3,254	3,982	4,260	4,688
\dot{V}_{ZVT}	[m ³ /h]	214,9	266,0	325,5	348,2	383,2
P_{el}	[W]	52,5	73,5	97,5	112,5	147,5

Tab. 6.2: Parametry pro jednotlivé stupně regulace – částečně škrcená klapka [92]

Nastavení regulace:		1°	2°	3°	4°	5°
\bar{w}_{avr}	[m/s]	1,814	2,126	2,338	2,467	2,623
\bar{w}_{ZVT}	[m/s]	1,450	1,699	1,868	1,972	2,096
\dot{V}_{ZVT}	[m ³ /h]	118,5	138,9	152,7	161,1	171,4
P_{el}	[W]	51,0	71,5	94,0	108,5	142,5

Dále je pomocí digitálního měřiče **Voltcraft Energy Logger 4000 CZ** (výrobce *Conrad Electronic, Německo*) měřena spotřeba elektrické energie pro pohon potrubního ventilátoru a přepínací „T“ klapky. Průměrné elektrické příkony P_{el} jsou též uvedeny v **tab. 6.1** a **6.2**; závislost elektrický příkon-objemový průtok procházející ZVT názorně uvádí **obr. 6.21**. Detailní data o průměrné denní spotřebě elektrické energie během provozu zařízení jsou uvedena v následujících kapitolách.



Obr. 6.21: Přibližná závislost elektrického příkonu experimentálního ZVT na nasávaném objemovém průtoku vzduchu; proměřeno 2013-03-12 [92]

Signály všech čidel byly do konce r. 2014 průběžně měřeny měřicím modulem **Omega OMB-DAQ-56** (výrobce *OMEGA Engineering, USA*), z něhož byla naměřená data stahována přes USB port do řídicího počítače (**obr. A.19**). Všechna naměřená data jsou archivována pro další zpracování. V rámci řešení diplomové práce [191] byl poté začátkem r. 2015 tento systém nahrazen sofistikovanějším, na bázi měřicích modulů **National Instruments** (USA), spolu s jednoduchou ovládací aplikací vytvořenou v programovacím jazyce *LabVIEW* (**obr. A.20**).

Na základě naměřených provozních dat bude možno posoudit vhodnost zemního výměníku jako protimrazové ochrany zařízení pro zpětný zisk tepla v podmínkách ČR. Data mohou v budoucnu sloužit jako relevantní podklad pro navrhování vzduchových ZVT a hodnocení jejich energetického, příp. ekonomického přínosu. K tomu mohou být využita i další data vnitřního a venkovního prostředí, měřená v rámci jiných projektů VUT (např. venkovní teplota a relativní vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, směr a rychlost větru, intenzita slunečního záření, intenzita srážek apod. [192]).

6.2 Provozní režimy

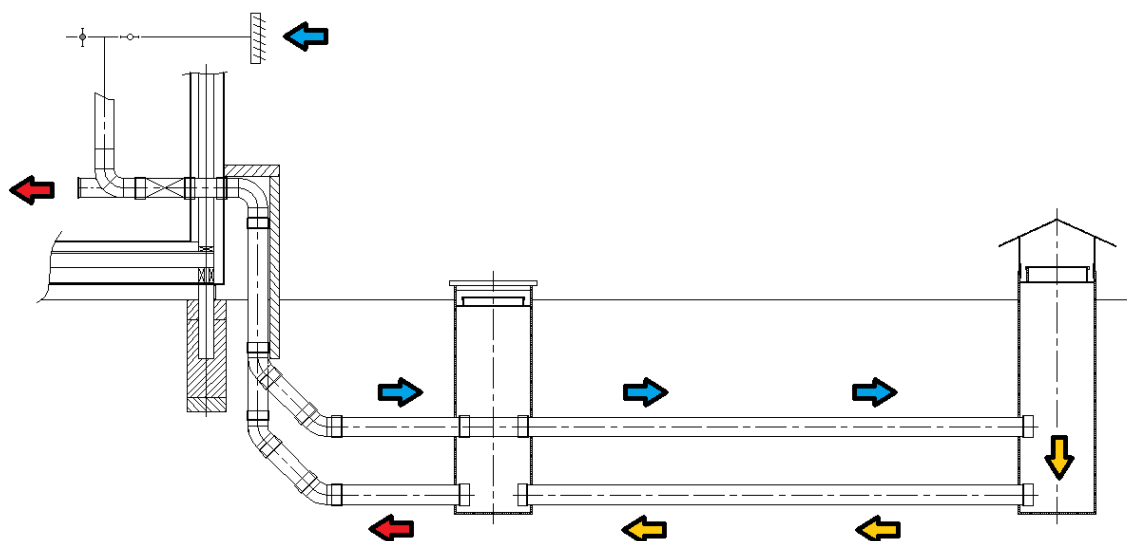
Díky své dispozici a upravené nasávací šachtě „š-1“ (**obr. A.15**) je teoreticky možno zařízení provozovat až v devíti provozních režimech:

➤ **základní větrací režim** – sání vzduchu přes protidešťovou žaluzii z fasády:

REŽIM A1 → průchod zemní smyčkou v plné délce cca 39 m (horním potrubím tam, dolním nazpět), **obr. 6.22**;

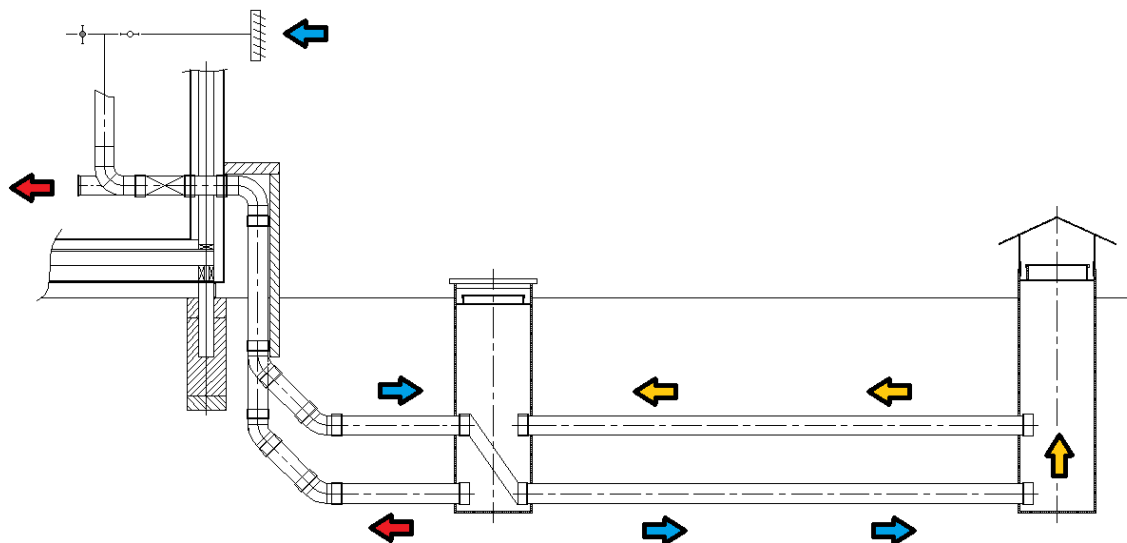
REŽIM A2 → jako A1, avšak s přehozením obou větví (dolní tam, horní zpět), viz **obr. 6.23**;

REŽIM A3 → průchod krátkou zemní smyčkou délky cca 6,5 m – po první (kontrolní) šachtu, **obr. 6.24**.

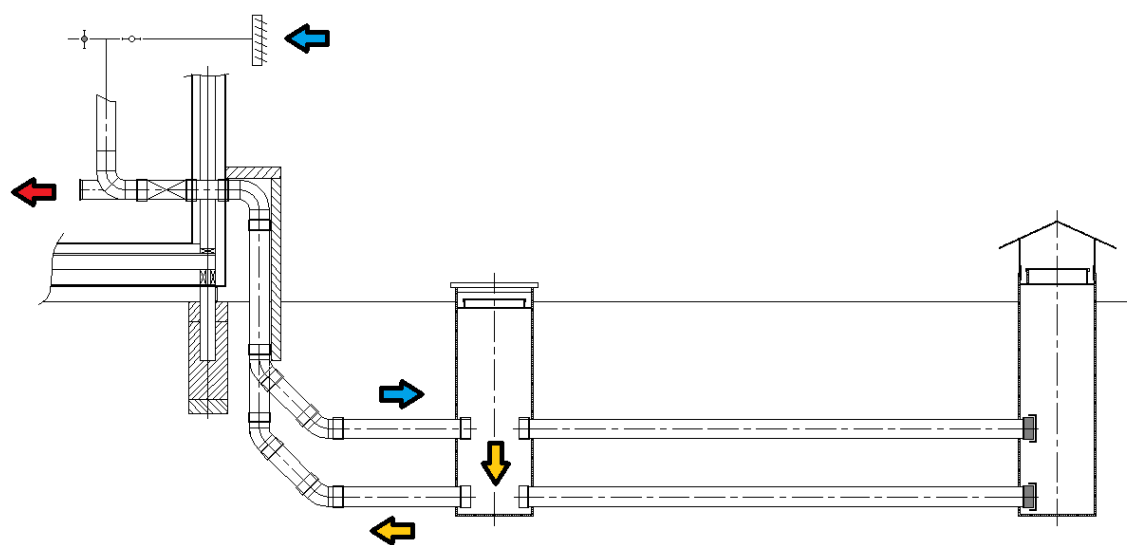


Obr. 6.22: Základní větrací režim s nasáváním vzduchu z fasády objektu – režim A1

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



Obr. 6.23: Základní větrací režim s nasáváním vzduchu z fasády objektu, přehozená potrubí – režim A2



Obr. 6.24: Základní větrací režim s nasáváním vzduchu z fasády objektu, krátká smyčka – režim A3

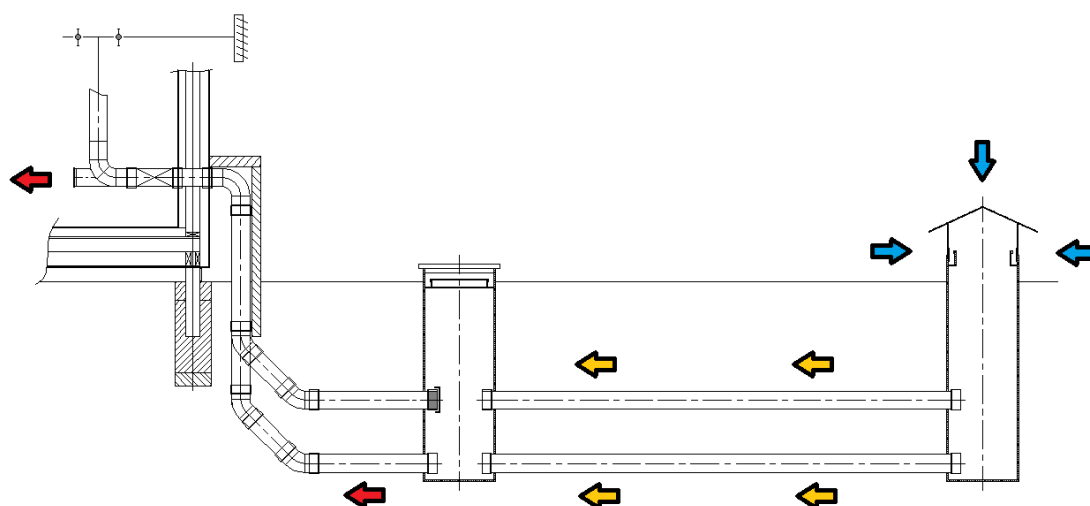
➤ **zjednodušený větrací režim** – sání vzduchu nasávací šachtou:

REŽIM B1 → paralelní průchod oběma větvemi zemního výměníku tepla v poloviční délce cca 21,5 m – obr. 6.25;

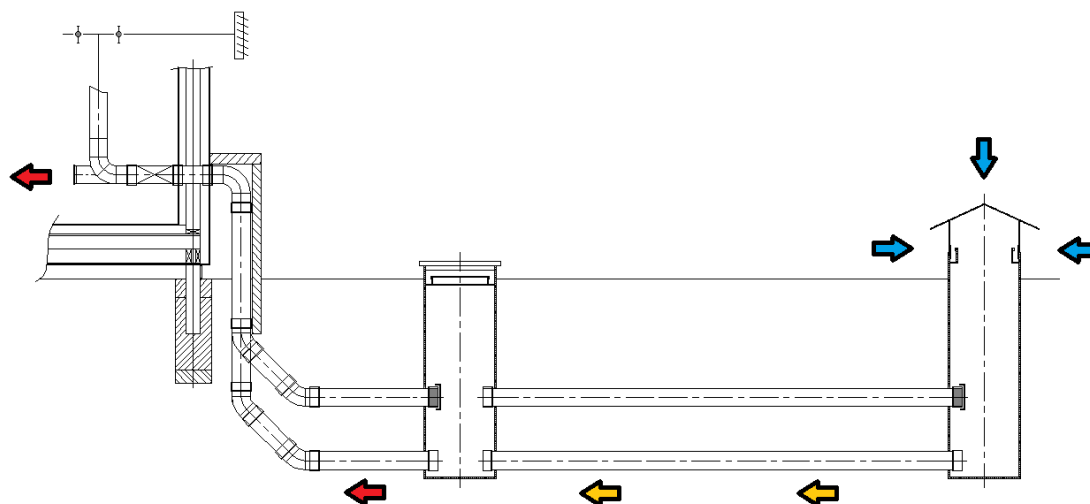
REŽIM B2 → jako B1, avšak s průchodem pouze dolní větví, viz obr. 6.26;

REŽIM B3 → dtto B1, s průchodem pouze horní větví, obr. 6.27.

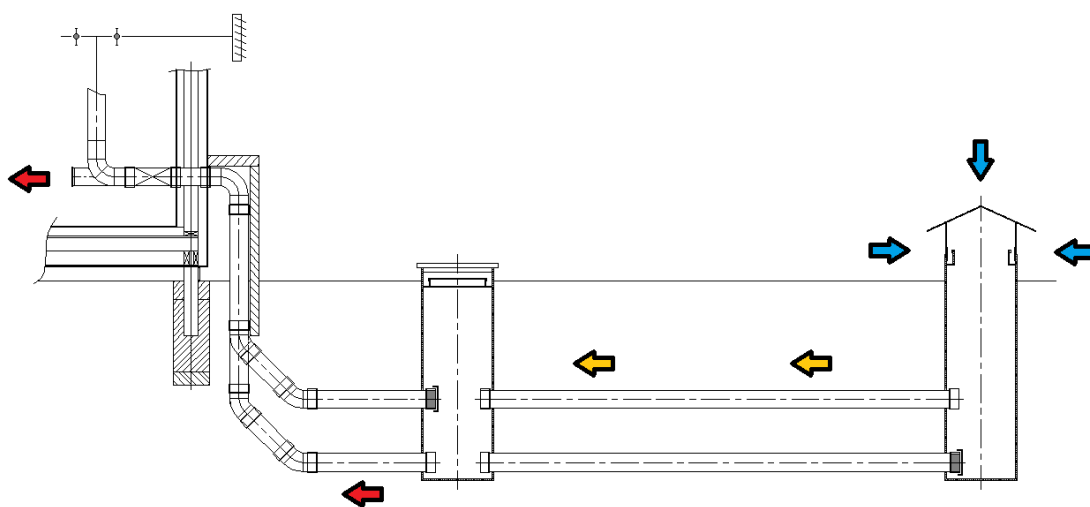
6 Experimentální zemní vzduchový výměník tepla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně



Obr. 6.25: Zjednodušený větrací režim se sáním vzduchu nasávací šachtou „š-1“ – režim B1



Obr. 6.26: Zjednodušený větrací režim se sáním vzduchu nasávací šachtou „š-1“, poloviční délka – režim B2



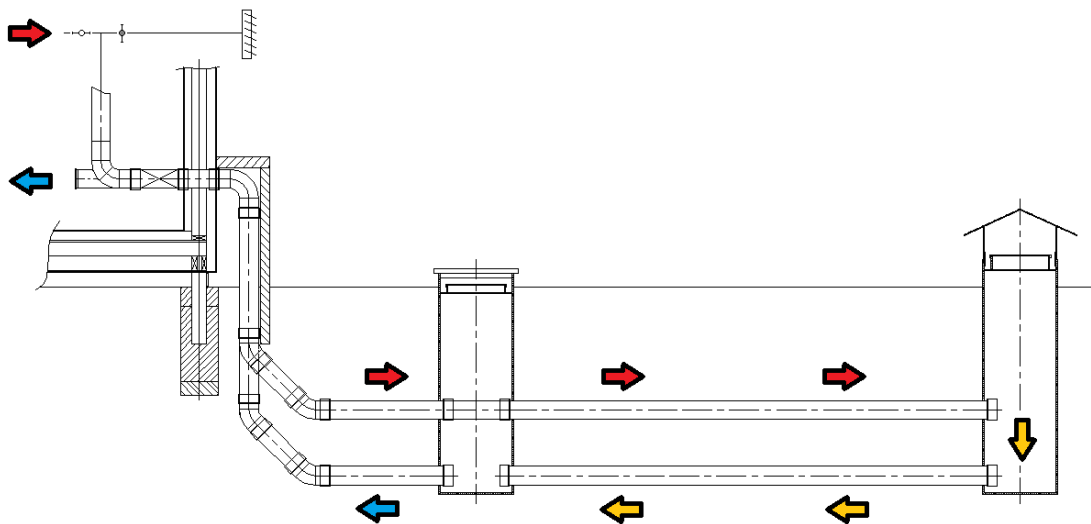
Obr. 6.27: Zjednodušený větrací režim se sáním vzduchu nasávací šachtou „š-1“, poloviční délka – režim B3

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

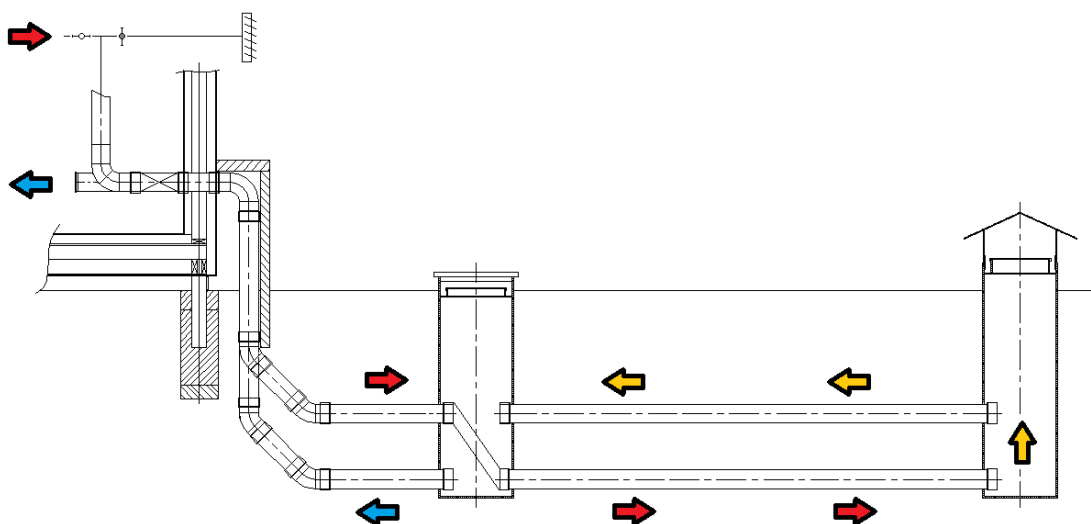
REŽIM C1 → průchod zemní smyčkou v plné délce cca 39 m (horním potrubím tam, dolním nazpět) – **obr. 6.28**;

REŽIM C2 → dtto C1, s přehozením obou větví (dolní tam, horní zpět), viz **obr. 6.29**;

REŽIM C3 → průchod krátkou zemní smyčkou délky cca 6,5 m – po první (kontrolní) šachtu, **obr. 6.30**.



Obr. 6.28: Cirkulační režim chlazení s nasáváním vzduchu v 2.NP – režim C1

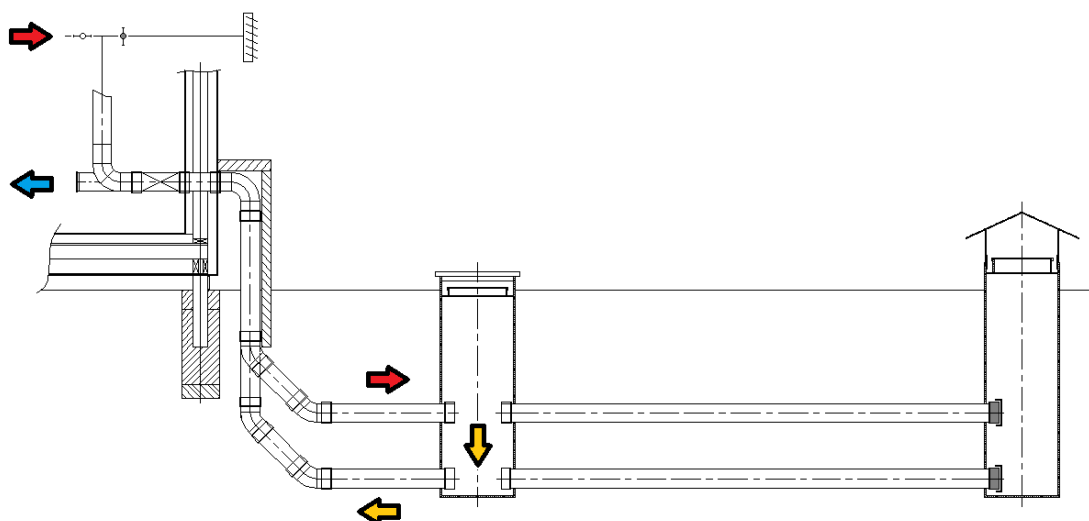


Obr. 6.29: Cirkulační režim chlazení s nasáváním vzduchu v 2.NP, přehozené potrubí – režim C2

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. 6.22**, nasávací šachta – **obr. 6.25** nebo sací větev v 2.NP – **obr. 6.28**). Další režimy lze zajistit menšími úpravami zmíněných základních režimů, což představuje relativně jednoduché a rychlé

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

operace – jako je např. zaslepení potrubí pomocí hrdlových zátek, propojení potrubí v revizní šachtě „š-2“ (obdobně jako na **obr. A11**) nebo odstranění vzduchotěsného poklopu v horní/nasávací šachtě (**obr. A15**). Namísto vzduchotěsného poklopu je možné vložit i filtrační tkaninu, která po prvotním průchodu větracího vzduchu nasávací hlavicí (s tkaninovým filtrem) může zajistit další stupeň filtrace. Tímto lze omezit znečištění potrubního systému – ovšem za cenu o něco vyšších tlakových ztrát.



Obr. 6.30: Cirkulační režim chlazení s nasáváním vzduchu v 2.NP, krátká smyčka – režim C3

Chladicí režim C3 – s průchodem cirkulačního vzduchu krátkou smyčkou – je spíše teoretický, protože při letním chlazení je kvůli menšímu rozdílu teplot mezi vzduchem a zemínou potřeba delší potrubní trasy. K zajištění požadovaného chladicího výkonu je rovněž třeba i vyšších průtoků vzduchu. Tepelná účinnost zemního výměníku v režimu A3 by zřejmě byla také nízká. Přehození průchodu horním a dolním potrubím v režimech A2 a C2 může mít za určitých situací význam, k tomu by bylo ale třeba měřit i teploty zeminy v daných hloubkách uložení, což v běžné praxi nebývá zvykem. Také přímé sání pomocí nasávací šachty jednou větví ZVT v poloviční délce (režimy B2 a B3) není ideální – při průtoku $200 \text{ m}^3/\text{h}$ bude vzduch mezi jednotlivými šachtami proudit pouhých 7,7 s (při rychlosti 1,96 m/s) namísto 15,3 s (resp. 0,98 m/s) při paralelním průtoku oběma větvemi (tzn. při polovičním průtoku každou větví), což povede k jeho menšímu ohřátí/ochlazení.

6.3 Dlouhodobý monitoring provozních parametrů ZVT

V dalších kapitolách jsou postupně prezentována některá naměřená a vyhodnocená data z dlouhodobého monitoringu zemního výměníku tepla v období 2012 až 2014. Experimentální zařízení bylo dobudováno koncem r. 2011, přičemž teploty zeminy (zemní sondy „A“ a „B“) se začaly měřit již při samotné výstavbě ZVT, kdy se postupně zasypával výkop výměníku – poté se zapojily i zemní sondy „C“ a „D“. Teplota venkovního vzduchu se kvůli chybějící kalibraci začala zaznamenávat až od poloviny února 2012, data z počátku roku proto chybí. Teploty na vstupu a výstupu zemního výměníku tepla a relativní vlhkosti

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

ze všech tří „vzduchových“ čidel 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. Provozní režimy v období let 2013÷2014 s odpovídajícími objemovými průtoky vzduchu jsou uvedeny v **tab. 6.3** a **6.4**.

Tab. 6.3: Provozní režimy experimentálního ZVT v r. 2013

1.1.-16.1.	17.1.-21.2.	21.2.-19.6.	26.2. a 19.6.	19.6.-26.7.	26.7.-29.7.
<i>mimo provoz</i>	214,9 m ³ /h (1° NŠ/v)	118,5 m ³ /h (1° Š/v)	152,7 m ³ /h (3° Š/v)	325,5 m ³ /h (3° NŠ/v)	<i>mimo provoz</i>
29.7.-14.8.	14.8.-18.8.	18.8.-19.8.	20.8.-26.8.	26.8.-25.10.	25.10.-5.11.
325,5 m ³ /h (3° NŠ/v)	214,9 m ³ /h (1° NŠ/v)	383,2 m ³ /h (5° NŠ/c)	325,5 m ³ /h (3° NŠ/v)	214,9 m ³ /h (1° NŠ/v)	<i>mimo provoz</i>
5.11.-20.11.	20.11.-11.12.	11.12.-18.12.	18.12.-31.12.	---	---
214,9 m ³ /h (1° NŠ/v)	118,5 m ³ /h (1° Š/v)	<i>mimo provoz</i>	118,5 m ³ /h (1° Š/v)	---	---

Pozn.: „NŠ“ = neškrveno (plný průtok ZVT), „Š“ = škrveno (částečně škrčená klapka na výstupu ZVT);

„v“ = základní větrací režim (režim A1), „c“ = cirkulační režim chlazení (režim C1).

Tab. 6.4: Provozní režimy experimentálního ZVT v r. 2014

1.1.-19.6.	19.6.-3.11.	3.11.-13.11.	13.11.-5.12.	5.12.-13.12.	13.12.-31.12.
118,5 m ³ /h (1° Š/v)	325,5 m ³ /h (3° NŠ/v)	266,0 m ³ /h (2° NŠ/v)	214,9 m ³ /h (1° NŠ/v)	118,5 m ³ /h (1° Š/v)	<i>mimo provoz</i>

Pozn.: „NŠ“ = neškrveno (plný průtok ZVT), „Š“ = škrveno (částečně škrčená klapka na výstupu ZVT);

„v“ = základní větrací režim (režim A1), „c“ = cirkulační režim chlazení (režim C1).

Jelikož měřicí modul **Omega OMB-DAQ-56** neumožňuje jednotlivé kanály vzorkovat v různých frekvencích, byla pro všechna čidla (tj. vzduch a zemina) zvolena jednotná perioda záznamu dat – 1× za minutu. Minutová frekvence sběru dat je volena hlavně kvůli měření teploty a vlhkosti vzduchu, jež mají vyšší variabilitu v čase. U teplot zeminy se dá předpokládat nižší variabilita během dne a dostačuje tedy znát průměrné hodinové teploty. Hodinové průměry jsou pak zpracovány i pro všechna měření parametrů vzduchu. Z nich byly dále zpracovány denní, měsíční a roční statistiky.

Zařízení bylo v provozu také v r. 2015. Kvůli úpravám měřicího zařízení v rámci řešení diplomové práce [191] (výměna původních měřicích modulů **OMEGA Engineering** za moduly **National Instruments**) však chybí data z poslední čtvrtiny roku. Proto jsou data vyhodnocena pouze z let 2012 až 2014.

➤ Teplota venkovního vzduchu a teplota zeminy

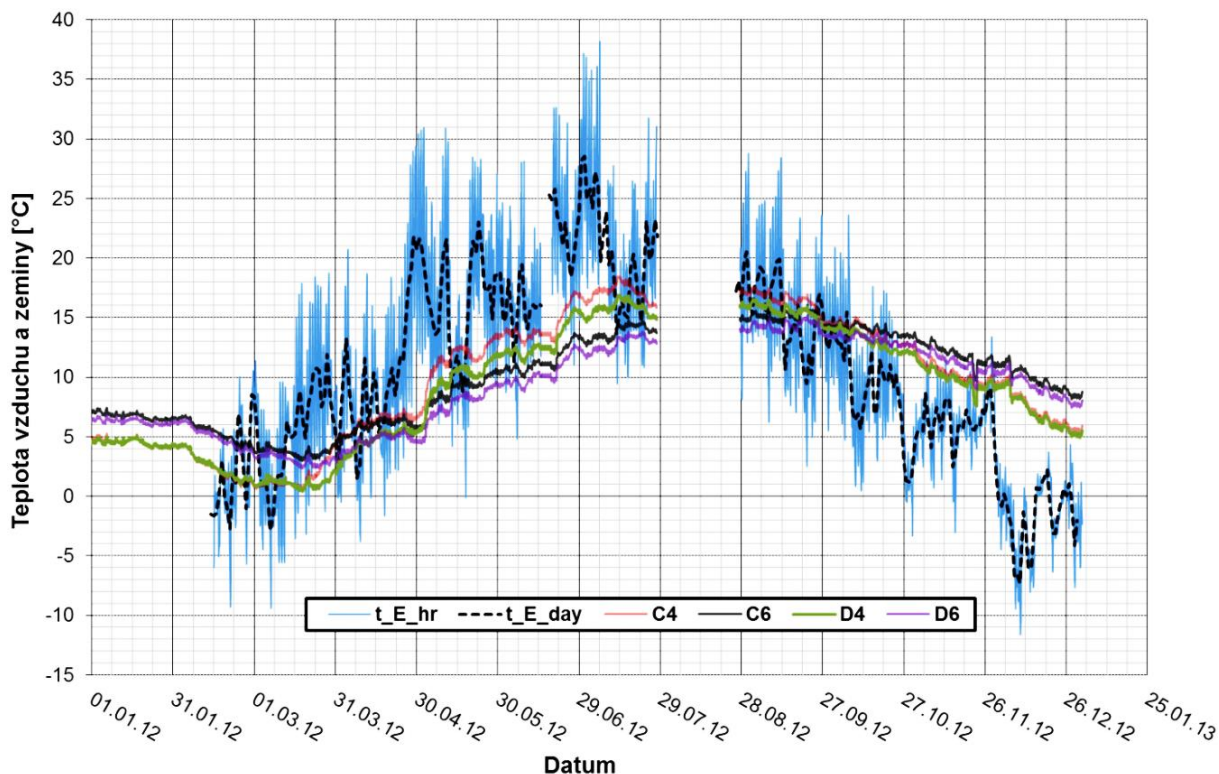
Kvůli vyšší citlivosti měřicích modulů **Omega OMB-DAQ-56** k nestabilitám napětí v elektrické síti docházelo občas k výpadkům měření – většinou v řádu několika málo hodin. Někdy však došlo i k dlouhodobému výpadku (viz **obr. 6.31** až **6.33**); chybí tak kompletní celodenní data v následujících obdobích roku:

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

r. 2012 → 28.7. až 26.8.;

r. 2013 → 7.6. až 18.6., 23.7., 28.7., 5.10. až 6.10., 21.12. až 28.12.;

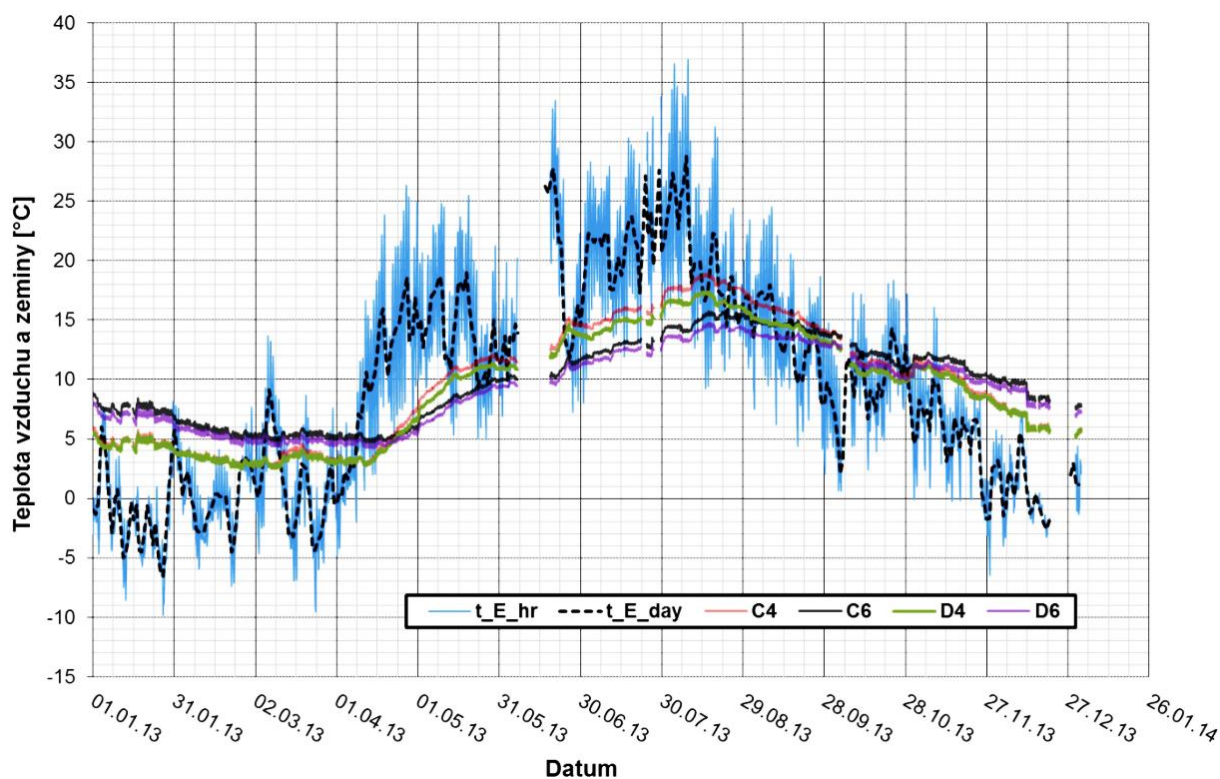
r. 2014 → 13.4., 5.7. až 14.7., 28.7., 13.9. až 22.9., 4.10. až 8.10., 16.10. až 20.10., 15.11. až 17.11., 9.12. až 31.12.



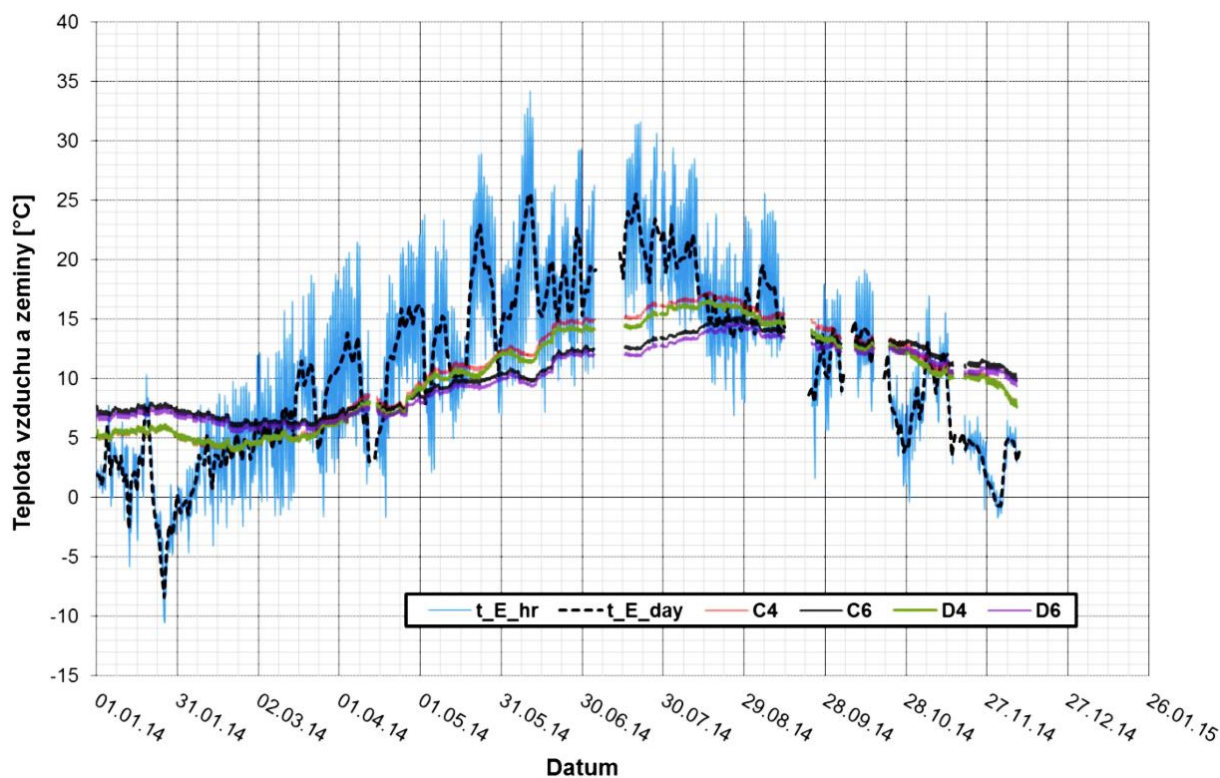
Obr. 6.31: Průměrné teploty r. 2012: venkovní vzduch (hodinová data – „t_E_hr“, denní data – „t_E_day“), neovlivněná zemina v hloubce 1,4 m (hodinová data – „C4“, „D4“) a v hloubce 2,1 m („C6“, „D6“)

Na **obr. 6.31** jsou uvedeny průběhy průměrné hodinové a denní teploty venkovního vzduchu a průměrné hodinové teploty zeminy ze čtyř čidel, umístěných přibližně v úrovni horního a dolního potrubí zemního výměníku tepla, v roce 2012. Patrná je značná variabilita teplot na straně vzduchu a jasná „stabilita“ teplot zeminy, což bylo však předpokládáno. V období duben÷září dochází k určitému rozdílu mezi teplotami zeminy měřenými v místech „C“ a „D“. To je zřejmě způsobeno samotným umístěním jednotlivých zemních sond, kdy sonda „C“ leží na celodenně osluněném místě bez významného stínění okolních objektů, naopak zemní sonda „D“ je umístěna na severní straně pozemku za experimentálním domem větrání – zde bývá často stín, jenž vrhá tato dvojpodlažní budova (viz **obr. 6.2**). Rozdíl mezi teplotami zeminy v oblasti ovlivněné a neovlivněné provozem zemního výměníku bude diskutován dále. Pro roky 2013 a 2014 jsou průběhy teplot uvedeny na **obr. 6.32** a **6.33**; i zde je patrný určitý rozdíl mezi teplotami měřenými sondami „C“ a „D“. Období, kdy ke ztelnější změně dochází, se v r. 2013 zkrátilo o cca 1 měsíc (tj. květen÷září) a dosahované rozdíly jsou také menší, než tomu bylo v r. 2012. V roce 2014 jsou rozdíly v teplotách zeminy již téměř zanedbatelné.

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

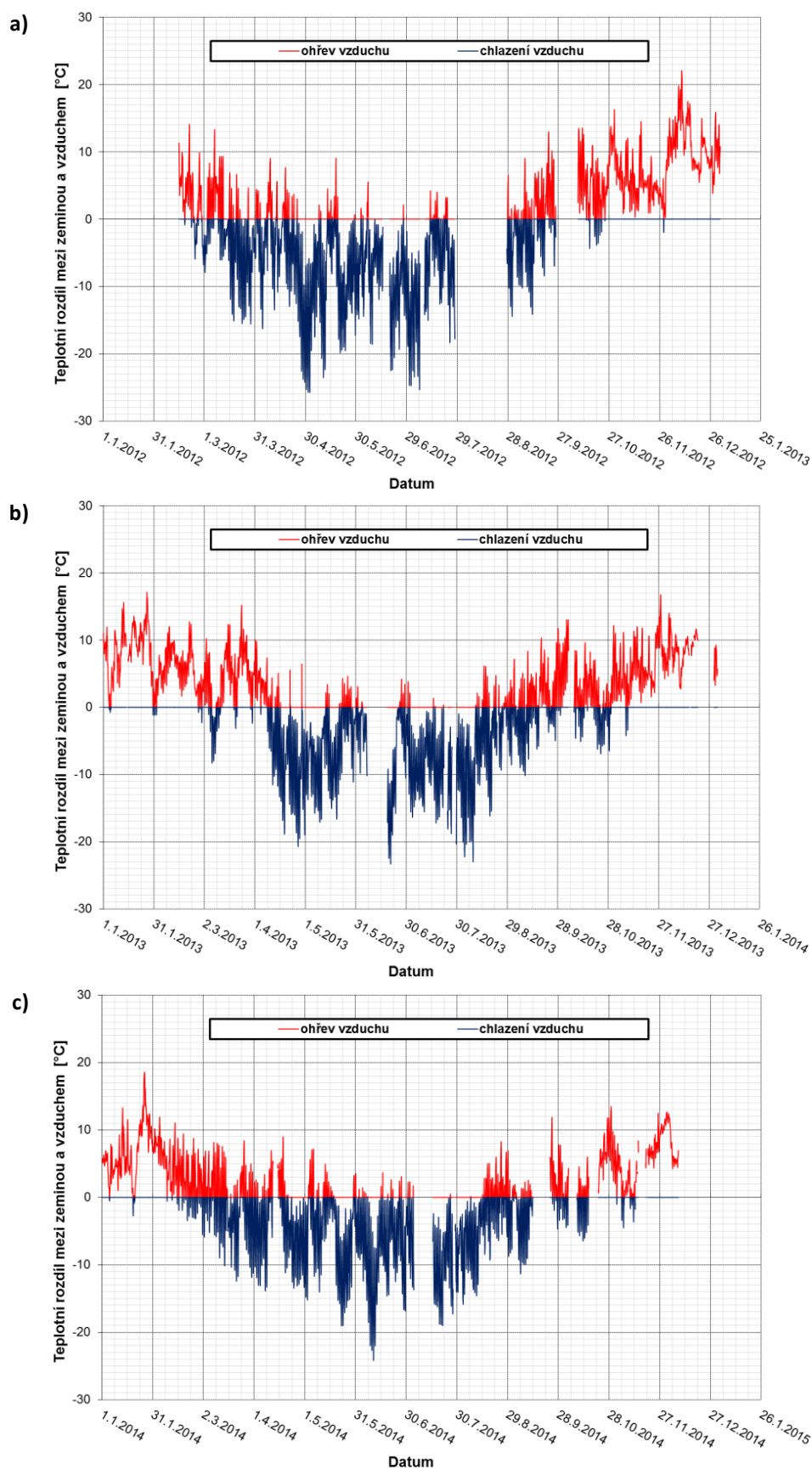


Obr. 6.32: Průměrné teploty r. 2013: venkovní vzduch (hodinová data – „t_E_hr“, denní data – „t_E_day“), neovlivněná zemina v hloubce 1,4 m (hodinová data – „C4“, „D4“) a v hloubce 2,1 m („C6“, „D6“)



Obr. 6.33: Průměrné teploty r. 2014: venkovní vzduch (hodinová data – „t_E_hr“, denní data – „t_E_day“), neovlivněná zemina v hloubce 1,4 m (hodinová data – „C4“, „D4“) a v hloubce 2,1 m („C6“, „D6“)

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

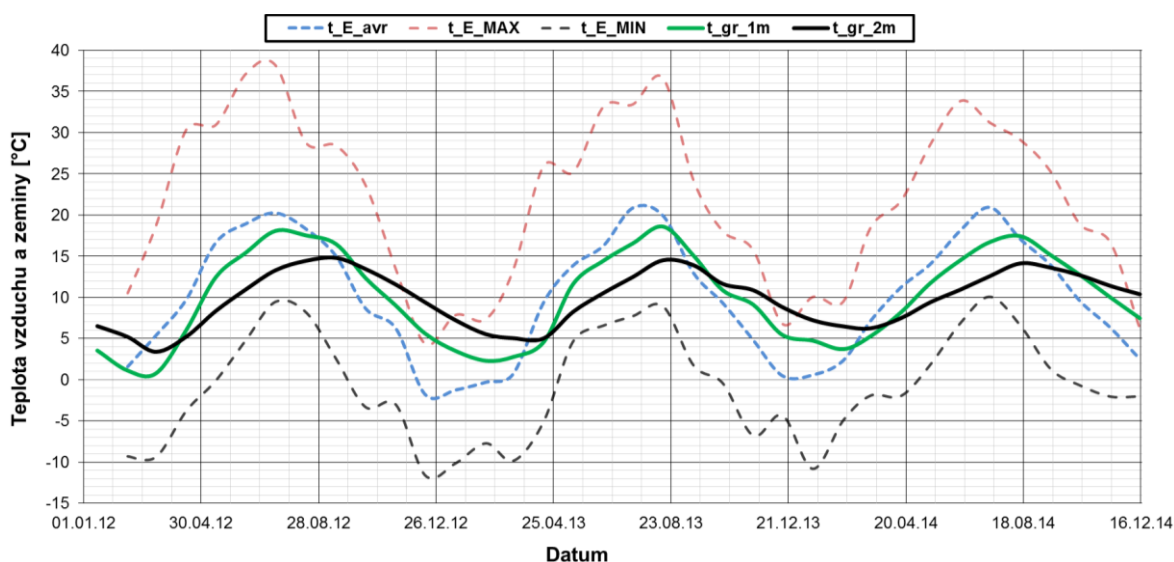


Obr. 6.34: Rozdíl mezi průměrnou teplotou neovlivněné zeminy (hloubka cca 2 m) a teplotou venkovního vzduchu; a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

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

Z teplotního rozdílu mezi venkovním vzduchem a zeminou v hloubce uložení potrubí lze usuzovat na potenciál využití ZVT. Na **obr. 6.34** jsou proto uvedeny dosažené teplotní rozdíly v letech 2012÷2014. Rozdíl je vztažen k průměrné teplotě zeminy naměřené teplotními sondami „C“ a „D“ v hloubce 2,1 m – což přibližně odpovídá hloubce uložení spodního potrubí experimentálního výměníku (viz **obr. 6.3**).

Z průběhů 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). Využití zemního výměníku pro *circulační* chlazení interiérového vzduchu je díky dostatečně nízké teplotě zeminy prakticky celoroční. Období pro možné 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. Jelikož teplota zeminy nebývá standardně u provozovaných zemních výměníků měřena, sání do výměníků se nejčastěji řídí podle venkovní teploty nebo se vzduch nasává kontinuálně (bez řešení přepínání *fasáda/ZVT*). Do prosince r. 2014 byl zemní výměník provozován kontinuálně (s výjimkami dle **tab. 6.3** a **6.4**). Přepínání sání v závislosti na venkovní teplotě vzduchu bylo realizováno až v rámci řešení diplomové práce [191] v r. 2015.

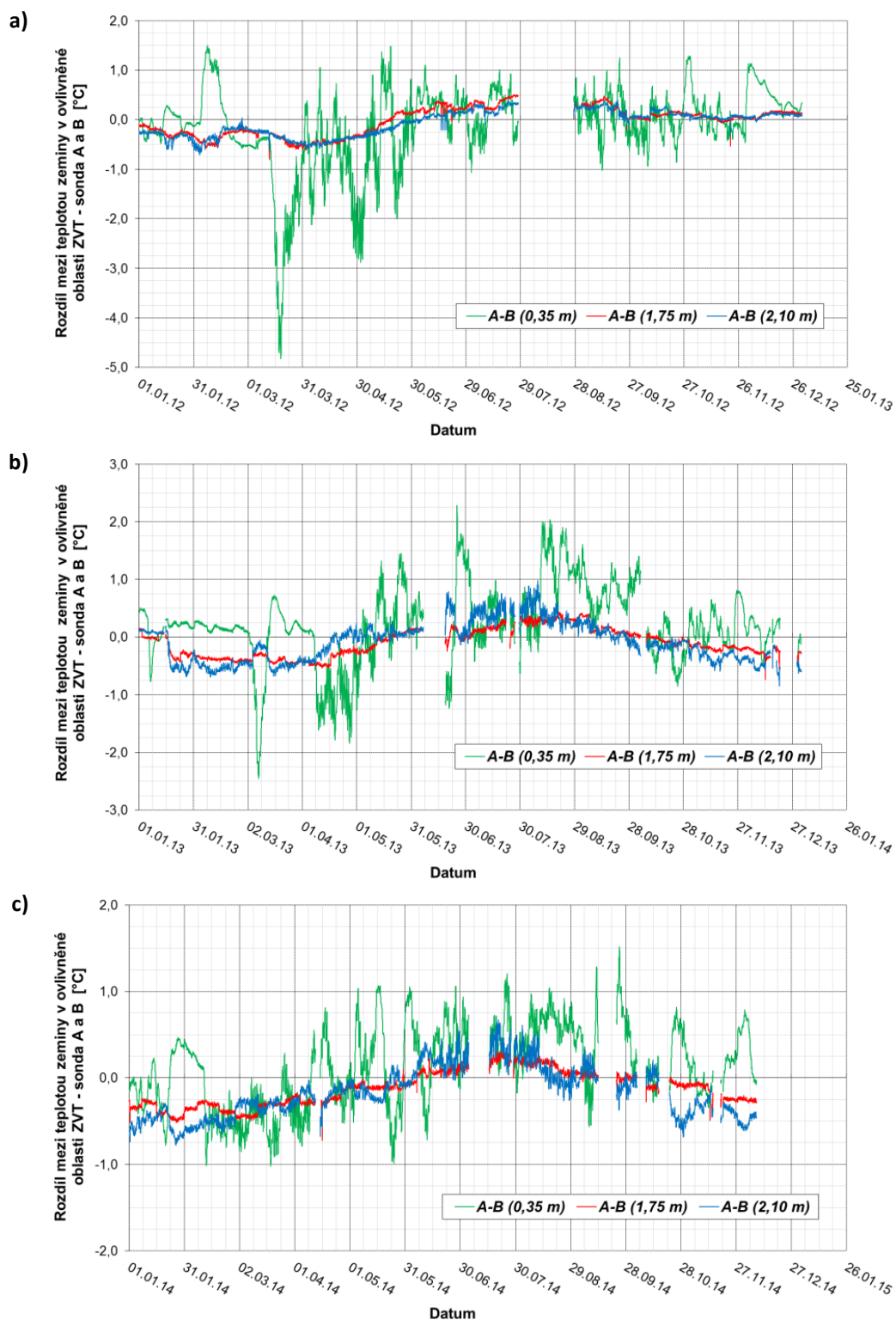


Obr. 6.35: Průběhy průměrné, maximální a minimální denní teploty venkovního vzduchu („t_E“) a průměrné denní teploty zeminy („t_{gr}“) v hloubkách cca 1 a 2 m v období 2012÷2014

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. 6.35**. Minimální a maximální denní teplota zeminy je velice blízká hodnotě denního průměru, proto není na obrázku uvedena. Porovnání minimální a maximální teploty vzduchu s teplotami zeminy opět jasně ukazuje smysluplnost využití ZVT pro předehřev vzduchu v zimním období a předchlazení vzduchu v období letním. Zároveň vzniká otázka, zda je vůbec nutné provoz ZVT nějak řídit – jak je patrné z **obrázku 6.35**, během podstatné části zimní sezóny (cca od prosince do poloviny února) je celodenně teplota zeminy vyšší nebo přibližně rovna venkovní teplotě. Kontinuální provoz ZVT je minimálně z mikrobiologického hlediska vhodnější, jelikož proudící vzduch nesvědčí většině mikroskopických

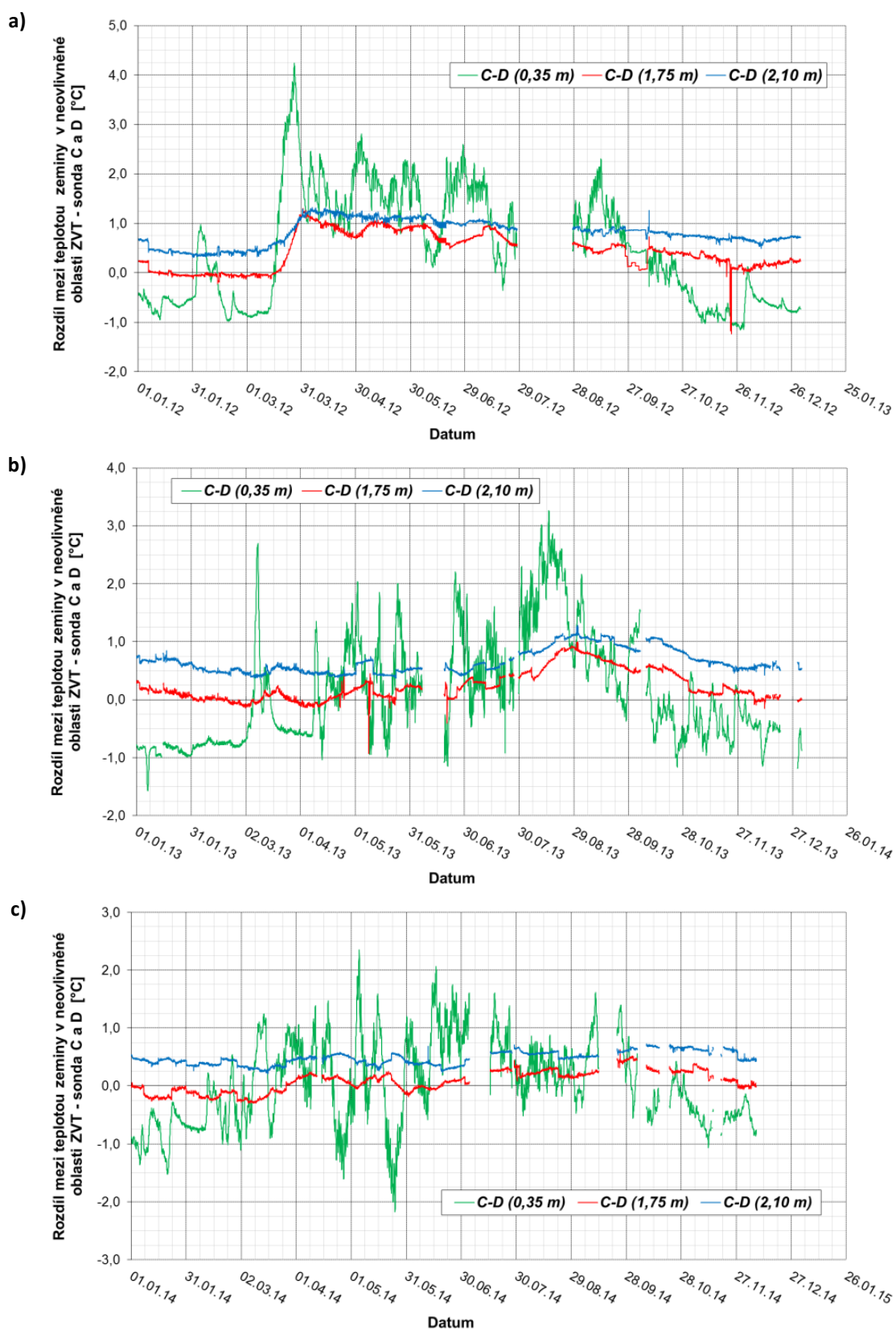
6 Experimentální zemní vzduchový výměník tepla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

hub. Na druhou stranu kontinuální provoz ZVT zbytečně ochlazuje okolní zeminu. Na otázku, zda je či není tento vliv podstatný, se pokusí odpovědět následující kapitola.



Obr. 6.36: Rozdíly teplot zeminy měřených sondami „A“ a „B“ (oblast ovlivněná provozem ZVT) a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

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



Obr. 6.37: Rozdíly teplot zeminy měřených sondami „C“ a „D“ (oblast neovlivněná provozem ZVT)
a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

➤ Teplota zeminy v oblasti ovlivněné a neovlivněné provozem ZVT

Kvůli zjištění, jak svým provozem zemní výměník ovlivňuje teplotu okolní zeminy, byly instalovány dvě teplotní sondy v oblasti ovlivněné provozem ZVT (sondy „A“ a „B“) a dvě sondy v oblasti neovlivněné (sondy „C“ a „D“) – viz **obr. 6.2**. Na **obr. 6.36** a **6.37** jsou uvedeny rozdíly teplot naměřených jednotlivými sondami ve třech hloubkách uložení v letech 2012÷2014. Rozdíly mezi teplotami zeminy naměřenými v místech „A“ a „B“ (obě v oblasti ovlivněné provozem ZVT) ukazuje **obr. 6.36** – zeleně je uvedena teplota svrchní vrstvy zeminy (v hloubce 35 cm), červená značí rozdíl teplot v úrovni 175 cm pod povrchem (tj. přibližně mezi horním a spodním potrubím), modrá pak rozdíl teplot v úrovni těsně pod spodním potrubím (v hloubce 210 cm). V r. 2012 nebyl ještě zemní výměník tepla v trvalém provozu, takže rozdíly teplot v úrovních 1,75 m a 2,10 m jsou obdobné – max. 0,5 °C v zimě a 0,4 °C v létě (**obr. 6.36a**). Koncem roku 2012 a začátkem roku 2013 (**obr. 6.36b**) se zde teplotní rozvrstvení stabilizovalo tak, že rozdíly jsou minimální (cca 0,1 °C). Podstatnější rozdíly nastávají v nejsvrchnější vrstvě, v blízkosti zemského povrchu – zřejmě kvůli povětrnostním vlivům, nesourodosti okolní vegetace a sněhové pokrývky apod. dochází k výrazným výkyvům během roku. To pokračuje v letech 2013 a 2014, nicméně i zde se rozdíl postupně snižuje.

Na **obr. 6.36b** je pak jasně patrné spuštění ZVT do trvalého provozu v půlce ledna 2013, kdy dochází skokově ke zvýšení rozdílu teplot nejhlubších dvou čidel (v hloubkách 1,75 m a 2,10 m), tzn. v blízkosti obou potrubí ZVT. Trvalým provozem zemního výměníku tepla dochází v zimních měsících k postupnému vychlazení zeminy; v místě teplotní sondy „A“ je však ochlazení vyšší než v místě sondy „B“, tudíž rozdíly v uvedených grafech nabývají záporných hodnot. V roce 2013 je tomu tak cca do půlky května; opětovně dochází k záporným rozdílům přibližně od začátku října (**obr. 6.36b**) a toto období trvá až do začátku června 2014 (viz **obr. 6.36c**). Propad do záporných hodnot pak nastává opět od půlky října (podobně jako v r. 2013).

Průměrné měsíční teploty ovlivněné zeminy v hloubce 2,10 m a průměrná teplota venkovního vzduchu v letech 2012÷2014 jsou uvedeny v **tab. 6.5** až **tab. 6.7** a opět potvrzují již zmíněné zimní podchlazení v místě sondy „A“. Navíc je patrné, že minima a maxima se vlivem provozu výměníku posouvají směrem k začátku roku. V letních měsících trvalý provoz zemního výměníku naopak vede k postupnému ohřívání zeminy, takže teplota v místě sondy „A“ je vyšší než v místě sondy „B“ (rozdíl A-B nabývá kladných hodnot). Vyšších rozdílů se dosahuje v hloubce 2,10 m pod povrchem, přičemž nejmarkantnější změny nastávají vždy v průběhu 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 umístěním obou čidel, kdy nejnižší čidlo (sondy „A“ a „B“) je vždy umístěno v těsné blízkosti spodního potrubí zemního výměníku, zatímco čidlo v úrovni 1,75 m je umístěno v zemském masivu mezi oběma potrubími.

Srovnáme-li rozdíly mezi teplotami zeminy v oblasti mimo zemní výměník (sondy „C“ a „D“, viz **obr. 6.37** a **tab. B.1÷3**), je situace poněkud jiná. Začátkem r. 2012, tzn. několik měsíců po zasypání celého výkopu a provedení finálních terénních úprav, docházelo ještě k postupné stabilizaci (tj. přirozené „*regeneraci*“) teplotního rozvrstvení zemského polo-masivu do té doby, než se zemina začala oteplovat díky narůstajícímu slunečnímu záření (viz **obr. 6.31** a **obr. 6.37a**). Skokově tak teplotní rozdíl narostl o cca 1,2 °C v úrovni 1,75 m

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

pod povrchem a o cca 0,6 °C v úrovni 2,10 m. Poté již teplotní rozdíl C-D nabýval vesměs kladných hodnot s občasnými odchylkami ve svrchní vrstvě zeminy – teplota v místě „C“ byla tedy o něco vyšší než v místě „D“, a to o cca 0,3÷1,2 °C v hloubce 2,1 m (s vyššími rozdíly během extrémně teplého léta r. 2013), o něco méně v hloubce 1,75 m. Zde naopak v některých obdobích r. 2014 došlo k opačnému stavu (teplota „C“ nižší než teplota „D“). Celkově lze tyto rozdíly přičíst existujícímu rozdílu okolních podmínek obou měřicích míst (zejména stínění přilehlé budovy, jak bylo diskutováno dříve). K nejmarkantnějším rozdílům teplot dochází i zde v blízkosti zemského povrchu (úroveň 35 cm – viz **obr. B.2** až **obr. B.5** přílohy). Průměrné měsíční teploty neovlivněné zeminy v hloubce 2,10 m a průměrná teplota venkovního vzduchu v letech 2012÷2014 jsou uvedeny v **tab. 6.5** až **6.7** (resp. **tab. B.1** až **B.3**) a potvrzují stabilně nižší teplotu zeminy v místě sondy „D“.

Tab. 6.5: Průměrné měsíční teploty zeminy (hloubka 2,1 m) a venkovního vzduchu během r. 2012

Oblast:	Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Čidlo												
Ovlivněná zemina	A	6,1	5,0	3,4	5,4	8,4	11,0	13,3	14,5	14,6	13,7	11,6	9,3
	B	6,5	5,3	3,8	5,8	8,6	10,9	13,1	14,2	14,4	13,5	11,6	9,2
Neovlivněná zemina	C	6,7	5,4	3,7	5,8	8,9	11,5	13,8	14,9	15,1	13,9	11,9	9,7
	D	6,3	5,0	3,1	4,6	7,8	10,5	12,8	14,0	14,4	13,0	11,2	9,0
Vzduch	t _E	---	1,6	5,4	9,8	16,6	18,9	20,2	18,3	15,0	8,7	6,2	-1,8

Pozn.: **červeně** – minimum, **zeleně** – maximum.

Tab. 6.6: Průměrné měsíční teploty zeminy (hloubka 2,1 m) a venkovního vzduchu během r. 2013

Oblast:	Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Čidlo												
Ovlivněná zemina	A	6,0	3,6	4,0	5,2	9,6	12,6	15,7	17,6	14,8	11,5	10,0	7,6
	B	6,2	4,1	4,4	5,3	9,6	12,4	15,3	17,2	14,7	11,7	10,3	8,0
Neovlivněná zemina	C	7,5	5,8	5,3	5,2	8,5	10,8	12,8	15,0	14,4	12,1	11,2	9,1
	D	6,9	5,3	4,8	4,8	8,0	10,3	12,2	14,0	13,4	11,2	10,6	8,5
Vzduch	t _E	-1,3	-0,3	0,7	9,4	13,9	16,3	20,8	19,9	12,9	9,3	4,8	0,5

Pozn.: **červeně** – minimum, **zeleně** – maximum.

Tab. 6.7: Průměrné měsíční teploty zeminy (hloubka 2,1 m) a venkovního vzduchu během r. 2014

Oblast:	Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Čidlo												
Ovlivněná zemina	A	5,9	5,1	5,9	7,9	10,3	12,8	16,0	16,0	14,5	12,4	10,3	8,3
	B	6,4	5,6	6,2	8,1	10,5	12,7	15,7	15,9	14,5	12,6	10,7	8,8
Neovlivněná zemina	C	7,4	6,7	6,4	7,7	9,6	11,1	12,9	14,4	13,9	12,3	11,6	10,6
	D	7,0	6,3	6,1	7,2	9,2	10,8	12,3	13,9	13,3	13,0	11,2	10,1
Vzduch	t _E	0,6	2,3	7,2	11,2	14,0	18,2	20,9	17,1	13,9	9,5	6,3	2,5

Pozn.: **červeně** – minimum, **zeleně** – maximum.

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

Rozdíly teplot mezi oběma čidly v „neovlivněné“ oblasti tedy nejsou způsobeny provozem zemního výměníku, ale okrajovými podmínkami na povrchu země. Z tohoto pohledu je vhodnější – pokud to dispozice pozemku dovolí – budovat zemní výměníky na místech osluněných, kde si tak zajistíme vyšší teplotní potenciál pro zimní přehřev větracího vzduchu, jež je ve středoevropském klimatickém pásmu prioritní. Z trendů na **obr. 6.36a** až **obr. 6.36c** je naopak jasně patrný vliv trvalého provozu ZVT na teplotní rozdíly mezi oběma čidly v „ovlivněné“ oblasti – což bylo ale od začátku předpokládáno.

Tab. 6.8: Minimální, maximální a průměrné roční teploty zeminy v období 2012÷2014 (hodinová data)

Oblast	Hloubka [m]	Minimum [°C]			Maximum [°C]			Průměr [°C]		
		2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014
Ovlivněná – sonda A –	0,35	-4,55	-1,15	-0,24	25,37	25,82	22,09	8,73	9,37	10,71
	0,70	-2,37	-0,39	0,95	21,62	23,59	20,68	8,87	9,38	10,58
	1,05	-0,68	0,13	1,93	19,94	23,01	20,00	9,18	9,51	10,54
	1,40	0,58	0,36	2,52	17,12	22,29	19,49	8,94	9,25	10,13
	1,75	1,46	1,56	3,53	16,11	20,30	18,02	9,12	9,50	10,20
	2,10	2,66	2,82	4,57	15,55	19,46	17,30	9,30	9,76	10,26
Ovlivněná – sonda B –	0,35	-5,43	-1,34	-0,47	26,06	25,85	21,82	8,88	9,16	10,59
	0,70	-2,03	-0,47	0,83	21,78	23,56	20,54	9,04	9,30	10,56
	1,05	-0,55	0,04	1,78	19,61	23,27	20,10	9,10	9,34	10,49
	1,40	0,94	0,72	2,74	17,18	22,37	19,56	9,17	9,50	10,44
	1,75	1,82	2,00	3,91	15,85	20,01	17,77	9,15	9,60	10,33
	2,10	3,03	3,42	5,14	15,28	18,52	16,81	9,37	9,85	10,44
Neovlivněná – sonda C –	0,35	-5,54	-1,14	-0,18	26,14	25,76	21,63	8,95	9,27	10,62
	0,70	-1,95	0,10	1,52	22,77	22,57	19,88	9,36	9,53	10,66
	1,05	-0,46	1,47	3,19	20,94	20,82	18,89	9,84	9,82	10,82
	1,40	0,57	2,44	3,86	18,46	18,92	17,27	9,58	9,64	10,41
	1,75	1,80	3,76	4,90	16,67	17,29	16,19	9,69	9,74	10,33
	2,10	2,97	4,69	5,94	16,06	15,75	15,17	9,71	9,75	10,16
Neovlivněná – sonda D –	0,35	-5,63	-0,34	0,58	24,26	24,59	21,28	8,45	9,14	10,60
	0,70	-1,40	0,74	2,24	20,50	20,78	19,43	8,57	9,26	10,53
	1,05	-0,65	1,56	3,12	18,31	18,70	17,59	8,52	9,11	10,18
	1,40	0,40	2,44	3,89	16,88	17,40	16,56	8,81	9,08	10,04
	1,75	1,75	3,82	5,00	16,18	16,60	16,02	9,26	9,50	10,25
	2,10	2,33	4,21	5,46	15,20	14,78	14,69	8,90	9,09	9,69
	MIN	-5,63	-1,34	-0,47	15,20	14,78	14,69	8,45	9,08	9,69
	MAX	3,03	4,69	5,94	26,14	25,85	22,09	9,84	9,85	10,82

Pozn.: **červeně** – roční minimum, **zeleně** – roční maximum.

V **tab. 6.8** jsou pro jednotlivé monitorované roky uvedeny minimální, maximální a průměrné roční teploty zeminy, získané ze všech dvaceti čtyř čidel zemních sond. Pro zimní provoz zemního výměníku je důležité znát nejnižší teplotu zeminy dosaženou v dané hloubce uložení potrubí ZVT – tato je totiž, za předpokladu dostatečně dlouhé potrubní trasy, limitní pro přehřev 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 i následně potvrdilo v následujících dvou letech monitorovaného provozu (viz dále). Po ustálení teplotního rozvrstvení zeminy a spuštění výměníku roku 2013 byla situace pro zimní přehřev 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 hodnoty cca (2,5 až 3,9) °C v horní úrovni, resp. (4,6 až 5,9) °C v úrovni dolní.

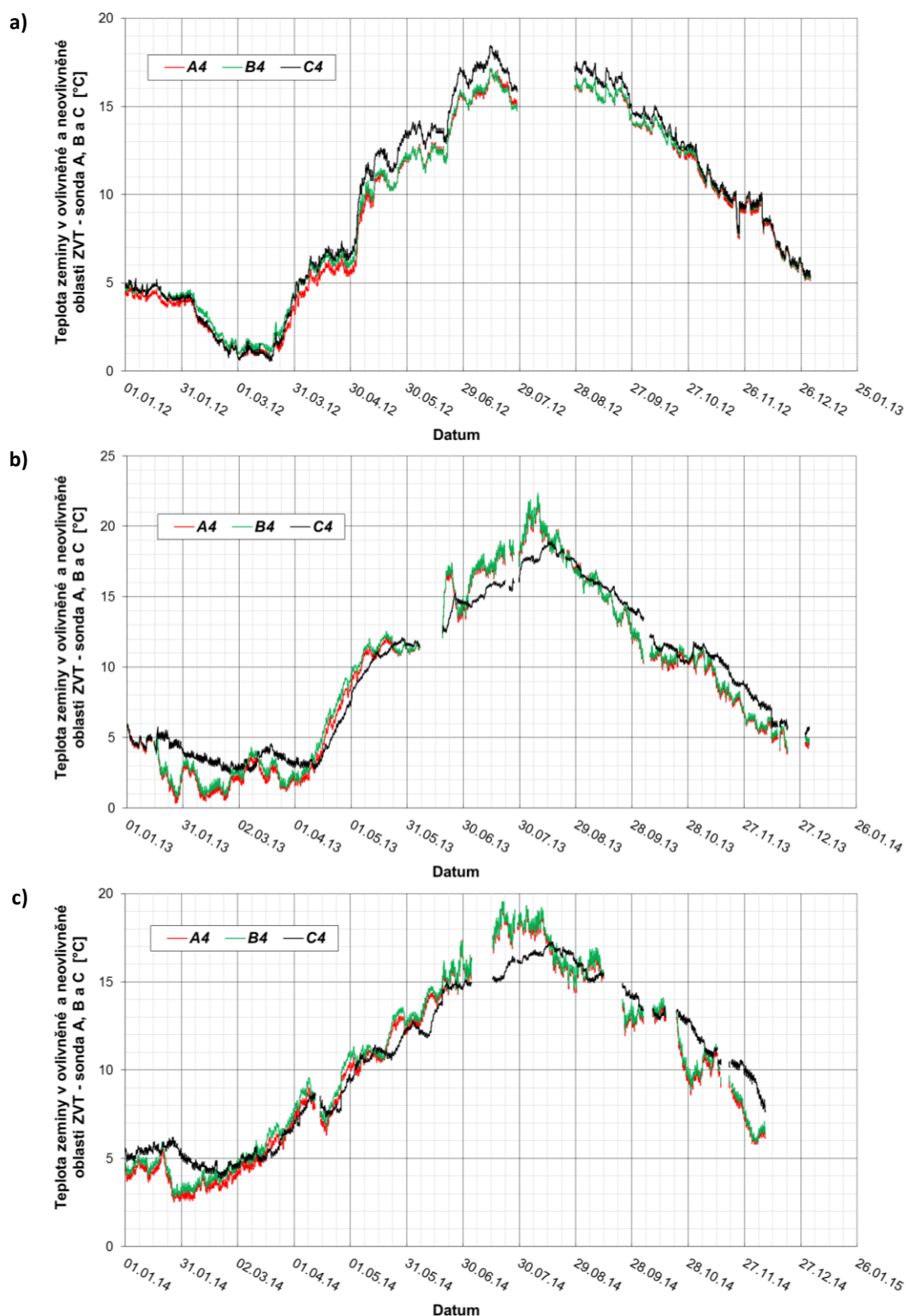
Pro letní provoz ZVT je naopak důležité znát nejvyšší teplotu zeminy dosaženou v dané hloubce uložení, která je tentokrát limitujícím faktorem pro dostatečné ochlazení nasávaného větracího, příp. cirkulačního vzduchu. Před uvedením zemního výměníku do trvalého provozu bylo v roce 2012 rozmezí maximálních 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 v oblasti sond „A“ a „B“ (**tab. 6.8**), 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 – cca (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 totiž působit až nepříjemně).

Jelikož byl experimentální zemní výměník tepla provozován v téměř kontinuálním režimu větrání, došlo vlivem převažujícího chladicího potenciálu (viz např. **obr. 6.34**) k mírnému ohřevu zemského polomasivu v blízkosti uloženého potrubí – tedy v místě teplotních sond „A“ a „B“. Jasně je to patrné z **tab. 6.8**, kde každý rok dochází k postupnému nárůstu průměrné teploty zeminy. Ze srovnání r. 2013 a 2012 vyplývá nárůst cca 0,3 °C v hloubce 1,4 m (tj. úroveň horního potrubí) a přibližně 0,5 °C v hloubce 2,1 m (tj. v úrovni spodního potrubí). V místě sondy „C“ je v obou úrovních změna zanedbatelná (cca 0,1 °C), v místě sondy „D“ lze pak pozorovat nárůst o (0,2 až 0,3) °C. Srovnáme-li roky 2014 a 2013, je nárůst průměrné teploty v úrovni horního potrubí o něco vyšší, než tomu bylo v předchozích letech, konkrétně o cca 0,9 °C (opět vliv teplého léta 2013). U spodního potrubí je nárůst obdobný – (0,5 až 0,6) °C. Mimo výměník je v hloubce 1,4 m nárůst (0,8 až 1,0) °C, v hloubce 2,1 m pak o (0,4 až 0,6) °C. Během 2 let provozu tedy průměrná teplota zeminy v okolí ZVT narostla o cca 1,2 °C (v úrovni horního potrubí), resp. o přibližně 1,0 °C (v úrovni potrubí spodního).

Názorněji je postupné ohřátí zeminy v jednotlivých úrovních pod povrchem vidět na **obr. 6.38** až **6.40**. Zde je uvedeno srovnání naměřených teplot zemních sond „A“ a „B“ se sondou „C“, které všechny leží relativně blízko sebe. Teplotní sonda „D“ je vynechána

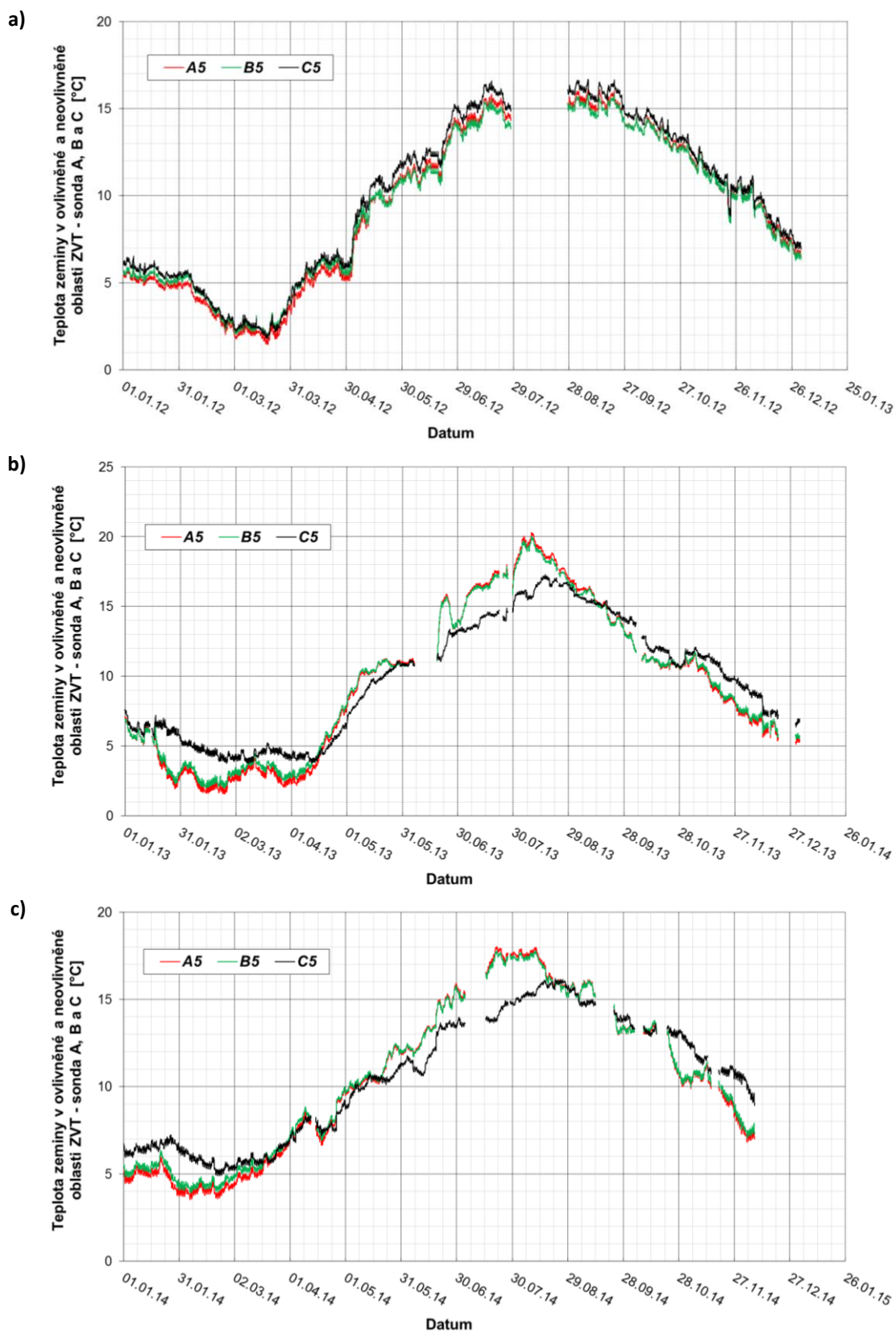
6 Experimentální zemní vzduchový výměník tepla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

neboť permanentně vykazuje nižší teploty než sonda „C“ (viz výše). Srovnávány byly rozdíly ve třech posledních úrovních, tj. 1,40 m, 1,75 m a 2,10 m pod povrchem.



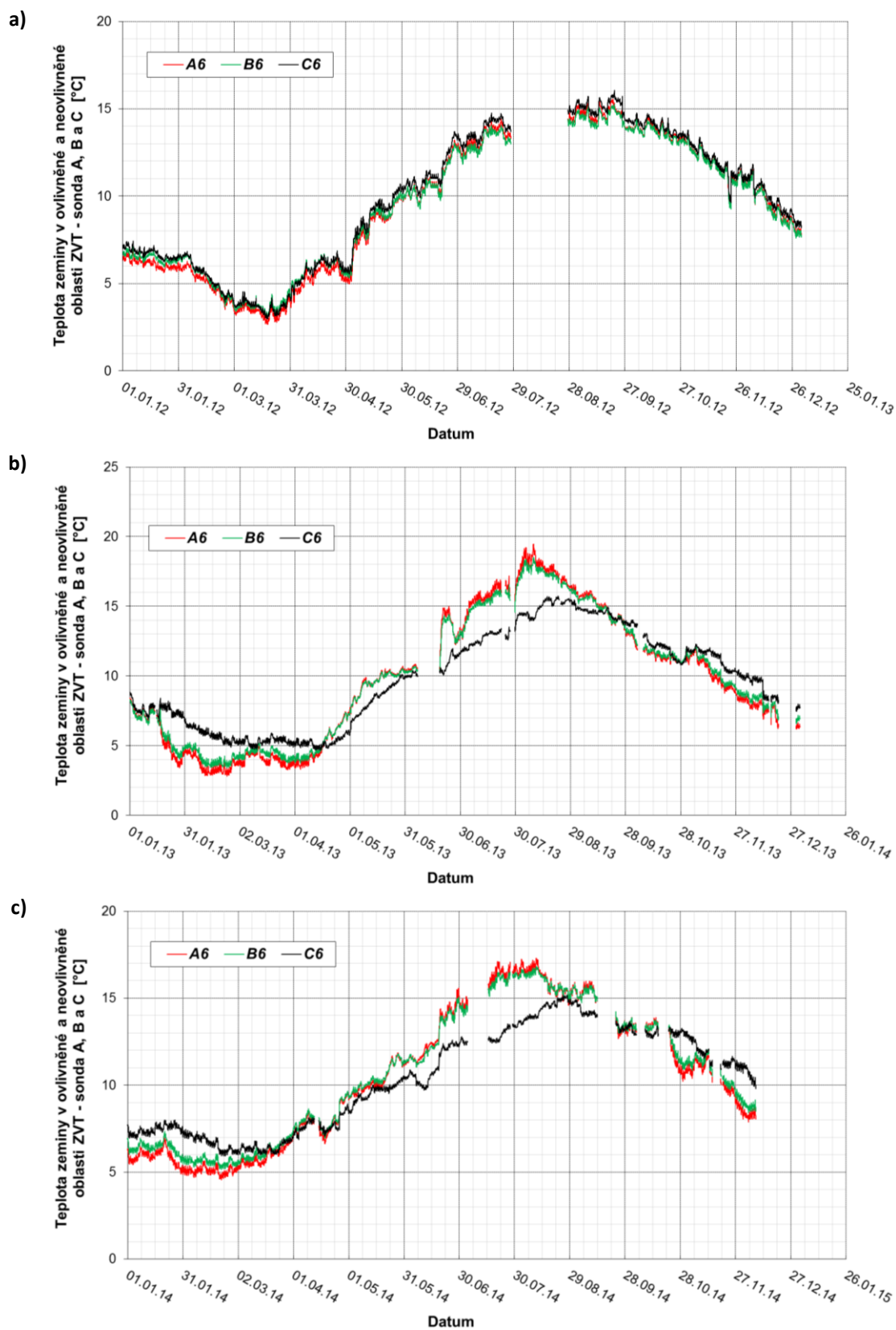
Obr. 6.38: Teploty zeminy v oblasti ovlivněné (sondy „A“, „B“) a oblasti neovlivněné provozem ZVT (sonda „C“) v hloubce 1,40 m; a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

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



Obr. 6.39: Teploty zeminy v oblasti ovlivněné (sondy „A“, „B“) a oblasti neovlivněné provozem ZVT (sonda „C“) v hloubce 1,75 m; a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

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



Obr. 6.40: Teploty zeminy v oblasti ovlivněné (sondy „A“, „B“) a oblasti neovlivněné provozem ZVT (sonda „C“) v hloubce 2,10 m; a) r. 2012, b) r. 2013, c) r. 2014

Z průběhů naměřených teplot r. 2012 je na **obr. 6.38a**, **6.39a** a **6.40a** vidět jasný společný trend ve všech třech úrovních, s minimálními rozdíly mezi sebou. Díky akumulacím vlastnostem zeminy se změny teplot s postupující hloubkou stále zmenšují. Dá se říci, že teplota zeminy v úrovni ZVT byla shodná s tou mimo zemní výměník – je to dáno odloženým spuštěním ZVT. Trvalý provoz výměníku totiž začal až v půlce ledna 2013, což je poznat i z průběhů teplot na **obr. 6.38b**, **6.39b** a **6.40b**. Postupným odvodem tepla do nasávaného větracího vzduchu klesá teplota zeminy v místě sond „A“ a „B“. Uvedený stav trvá přibližně do začátku dubna 2013, kdy se zemina v okolí ZVT začne mírně ohřívat a v polovině dubna již převyší teplotu v neovlivněné oblasti. Výraznější nárůst teplot zeminy pak nastává s převažujícím letním chlazením vzduchu od půlky června 2013 cca do konce srpna (hlavně v hloubce 1,75 a 2,10 m). V polovině srpna 2013 se teploty v ovlivněné a neovlivněné oblasti zhruba vyrovnají; pokles v okolí výměníku nastává opět od poloviny listopadu 2013 (max. 3 °C). Podobný průběh vykazuje i r. 2014 (**obr. 6.38c**, **6.39c** a **6.40c**). Maximální letní rozdíly teplot v ovlivněné a neovlivněné oblasti činí 4÷8 °C. Od konce roku 2014 již naměřené data chybí, takže další pokračování průběhů není známo.

➤ Riziko kondenzace vlhkosti ve vzduchovém zemním výměníku

Pro stanovení rizika kondenzace se musí nejprve určit stav vlhkého vzduchu (tj. tlak, teplota a vlhkost) na vstupu do zemního výměníku a jemu odpovídající teplota rosného bodu. Dále je pak nutné znát povrchovou teplotu potrubí, na němž hrozí potenciální kondenzace vzdušné vlhkosti – tu můžeme u experimentálního ZVT jednoduše odhadnout z naměřených teplot „ovlivněné“ zeminy. Pokud je povrchová teplota nižší než teplota rosného bodu, bude zřejmě docházet ke kondenzaci.

Jak bylo již zmíněno dříve, jsou pro stanovení vlhkosti vzduchu použity senzory relativní vlhkosti **HIH-4000-003** s lineárním napěťovým výstupem, jejichž napájecí napětí 5 V (DC) je zajištěno stabilizovaným zdrojem. Měřicí rozsah vlhkostních čidel je (0 až 100) % s přesností 3,5 % RH, přičemž rozsah pracovních teplot činí (-40 až 85) °C. Pro podmínky podnulových teplot s vyšší relativní vlhkostí (nad 50 %) je však provoz omezen na méně než 50 hodin, jinak rapidně klesá odolnost čidla, s potenciální hrozbou jeho poškození. Toto se pravděpodobně stalo u teplotně-vlhkostní sondy „TRH4“ pro měření parametrů exteriérového vzduchu, jelikož zde se naměřené vlhkosti (po přepočtu z výstupního napětí) často pohybovaly nad hranicí 100 % RH. V roce 2015 bylo proto instalováno nové čidlo teplota-relativní vlhkost [191].

Z naměřeného výstupního napětí senzoru V_{OUT} se odpovídající hodnota relativní vlhkosti RH_{sensor} vypočte dle **rovnice (31a)**. Jelikož přesné napájecí napětí V_{supply} všech čidel „TRHx“ není v rámci monitoringu měřeno, je uvažováno s tím, že je stabilně 5 V – pro něž při teplotě 25 °C výrobce dodává i kalibrační konstanty „zero offset“ a „slope“ (viz **tab. A.4** přílohy). Poté je nutné provést ještě korekci na vliv teploty T_a při měření; vztah pro stanovení výsledné relativní vlhkosti RH_{true} tak udává **rovnice (31b)**:

$$RH_{sensor} = \frac{V_{OUT} - \left(\frac{V_{supply}}{V_{5V}} \cdot \text{zero offset} \right)}{\frac{V_{supply}}{V_{5V}} \cdot \text{slope}} \cong \frac{V_{OUT} - \text{zero offset}}{\text{slope}} \quad (31a)$$

$$RH_{true} = \frac{RH_{sensor}}{1,0546 - 0,00216 \cdot T_a} \cong \frac{\frac{V_{OUT} - zero\ offset}{slope}}{1,0546 - 0,00216 \cdot T_a} \quad (31b)$$

kde: V_{OUT} – měřené výstupní napětí senzoru RH [V],
 V_{supply} – napájecí napětí, jež dodává stabilizovaný zdroj [V],
 V_{5V} – napájecí napětí 5 V (DC), ke kterému jsou vztaženy kalibrační křivky čidla [V],
zero offset – kalibrační konstanta, udávající napětí při relativní vlhkosti 0 % [V],
slope – kalibrační konstanta čidla, udávající lineární nárůst napětí při stoupající relativní vlhkosti [mV/%RH],
 T_a – teplota vlhkého vzduchu v místě měření RH [°C].

Po výpočtu relativní vlhkosti již můžeme dle **rovnice (32)** určit měrnou vlhkost vzduchu při dané teplotě $x_a(T_a)$ a k ní dále odpovídající teplotu rosného bodu:

$$x_a(T_a) = 0,622 \cdot \frac{\varphi_a \cdot p_p''(T_a)}{p_b - \varphi_a \cdot p_p''(T_a)} \quad (32)$$

kde: φ_a – relativní vlhkost vzduchu [%]; tzn. v našem případě: $\varphi_a = RH_{true}$,
 $p_p''(T_a)$ – parciální tlak sytých par ve vzduchu [Pa] při dané teplotě T_a ,
 p_b – barometrický tlak vlhkého vzduchu [Pa].

Parciální tlak sytých par ve vlhkém vzduchu s narůstající teplotou roste exponenciálně a odborná literatura tuto závislost udává různě; nejčastěji jsou výpočetní vztahy rozděleny pro teploty podnulové a nadnulové (viz např. [47]):

$$p_p''(T_a \leq 0^\circ\text{C}) = \exp\left(28,557 - \frac{5951,3855}{268,78 + T_a}\right) \quad (33a)$$

$$p_p''(T_a \geq 0^\circ\text{C}) = \exp\left(23,58 - \frac{4044,6}{235,628 + T_a}\right) \quad (33b)$$

kde: $p_p''(T_a \leq 0^\circ\text{C})$ – tlak nasycených vodních par nad ledem [Pa] v teplotním rozsahu $-20^\circ\text{C} \leq T_a \leq 0^\circ\text{C}$,
 $p_p''(T_a \geq 0^\circ\text{C})$ – tlak nasycených vodních par nad vodní hladinou [Pa] v teplotním rozsahu $0^\circ\text{C} \leq T_a \leq 80^\circ\text{C}$,
 T_a – teplota [°C].

Naopak barometrický tlak vzduchu je nejčastěji udáván v závislosti na nadmořské výšce v daném místě, např. podle [47]:

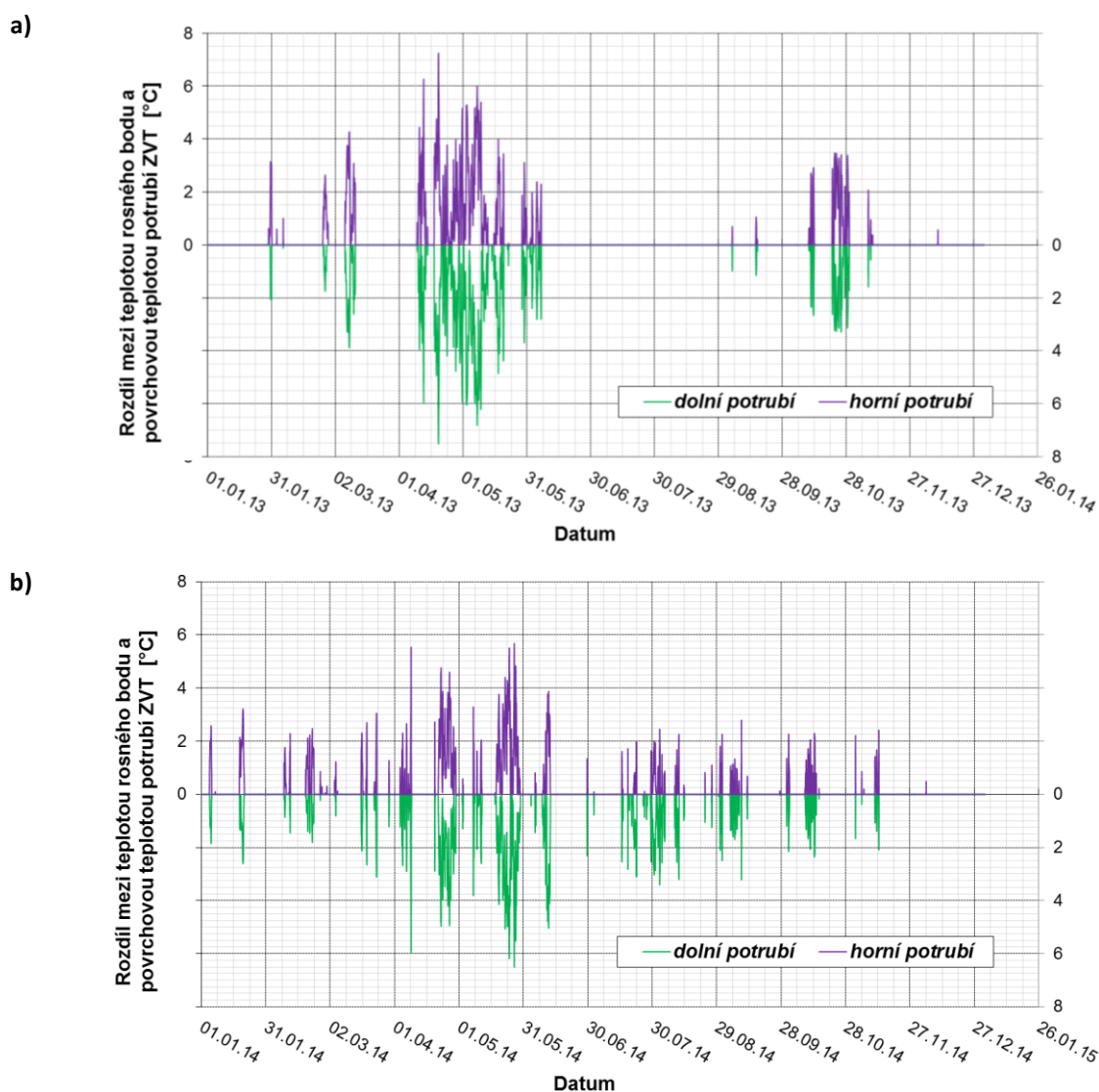
$$p_b = 101,323 \cdot \frac{16000 - H}{16000 + H} \quad (34)$$

kde: p_b – průměrný barometrický tlak [kPa],
 H – výška nad hladinou moře [m n.m.].

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

Pro město Brno se udává nadmořská výška v rozmezí (190 až 479) m n.m [197], průměrná hodnota tak činí přibližně 335 m, čemuž odpovídá průměrný barometrický tlak **97,167 kPa**. S touto hodnotou se uvažuje v dalších výpočtech. Při ochlazování na teplotu rosného bodu T_{DP} zůstává měrná vlhkost konstantní – úpravou **rovnice (32)** tak získáme rovnici pro výpočet rosného bodu:

$$x_{a,IN} = x_{DP} = 0,622 \cdot \frac{1 \cdot p_p''(T_{DP})}{p_b - 1 \cdot p_p''(T_{DP})} \Rightarrow T_{DP} \quad (35)$$



Obr. 6.41: Odhad rizika kondenzace vlhkosti v ZVT – výpočet z rozdílu odhadu povrchové teploty potrubí a teploty rosného bodu: a) r. 2013, b) r. 2014

Dále pro zjednodušení uvažujeme, že aktuální povrchová teplota horního potrubí (jež je osově uloženo 1,3 m pod úrovní zeminy) je rovna průměru aktuální teploty 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 pod povrchem, opět v místech „A“ a „B“. Změna

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

rosného bodu vlivem postupné kondenzace (tj. odvlhčení vzduchu) není uvažována, takže stav na vstupu do ZVT je pro obě potrubí brán jako výchozí.

Na **obrázku 6.41** je graficky uvedeno, kdy se dá předpokládat riziko kondenzace v obou potrubích experimentálního ZVT. Kondenzace nastane, pokud je teplota povrchu potrubí nižší než teplota rosného bodu, proto je na obrázku uveden odhad jejich rozdílu; přesná povrchová teplota potrubí není totiž měřena. Z průběhů je jasně vidět, že vždy začátkem jara (tj. duben až květen) nastává velký potenciál kondenzace – nejspíše vlivem podchlazení zeminy po zimním režimu přehřevu vzduchu. Také v dalších měsících nastávají podmínky způsobující kondenzaci, ale teplotní rozdíly jsou již nižší. Souhrnný měsíční rozpis odhadu kondenzace (počet hodin a % času) v obou potrubních větvích ZVT pro roky 2013 a 2014 je uveden v **tab. 6.9** a **6.10**.

Tab. 6.9: Riziko kondenzace vlhkosti v ZVT v jednotlivých měsících r. 2013

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Čas celkem [hod]	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Data (T, RH) [hod]	360	672	744	720	744	138	0	200	720	667	720	480
Chybí data [%]	-51,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-80,8	-100,0	-73,1	0,0	-10,3	0,0	-35,5
Horní potrubí:												
Kondenzace [hod]	38	71	109	345	378	68	---	0	15	195	24	4
Riziko [%]	10,6	10,6	14,7	47,9	50,8	49,3	---	0,0	2,1	29,2	3,3	0,8
Dolní potrubí:												
Kondenzace [hod]	17	38	101	351	454	96	---	0	17	175	10	0
Riziko [%]	4,7	5,7	13,6	48,8	61,0	69,6	---	0,0	2,4	26,2	1,4	0,0

Pozn.: červeně – chybí data z části měsíce, zeleně – data za celý měsíc v pořádku.

Tab. 6.10: Riziko kondenzace vlhkosti v ZVT v jednotlivých měsících r. 2014

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Čas celkem [hod]	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Data (T, RH) [hod]	744	672	744	653	744	720	445	744	481	418	417	170
Chybí data [%]	0,0	0,0	0,0	-9,3	0,0	0,0	-40,2	0,0	-33,2	-43,8	-42,1	-77,2
Horní potrubí:												
Kondenzace [hod]	86	123	75	256	273	71	97	113	67	91	40	2
Riziko [%]	11,6	18,3	10,1	39,2	36,7	9,9	21,8	15,2	13,9	21,8	9,6	1,2
Dolní potrubí:												
Kondenzace [hod]	74	74	64	275	340	107	155	171	79	91	23	0
Riziko [%]	9,9	11,0	8,6	42,1	45,7	14,9	34,8	23,0	16,4	21,8	5,5	0,0

Pozn.: červeně – chybí data z části měsíce, zeleně – data za celý měsíc v pořádku.

Pro stanovení rizika kondenzace je potřeba znát současně teploty a vlhkosti vzduchu i teploty zeminy. V průběhu dlouhodobého monitoringu však občas nastávaly problémy se záznamem a uložením dat, proto v některých měsících nejsou kompletní data dostupná (viz třetí řádek **tab. 6.9** a **6.10**). Zjištěná data přesto potvrzují výraznou jarní kondenzaci. 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. 6.11: Odhad kondenzace vlhkosti v ZVT v zimním a letním období let 2013 a 2014

Rok	2013		2014	
	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
<i>Horní potrubí:</i>				
Kondenzace [hod]	801	806	740	877
Riziko [%]	15,8	32,0	17,2	23,2
<i>Dolní potrubí:</i>				
Kondenzace [hod]	709	918	680	1 127
Riziko [%]	13,9	36,4	15,8	29,8

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

V následující **tabulce 6.11** jsou výsledky ještě rozděleny na zimní a letní období. Ze srovnání počtu hodin, kdy dochází ke kondenzaci, je patrný rozdíl rizika u horního a spodního potrubí – v zimním provozu ZVT kondenzuje častěji vlhkost na povrchu horního potrubí, pro letní provoz je tomu právě naopak. 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. I přes určité výpadky v záznamu jsou však získané výsledky cenné, protože naměřená data z dlouhodobého monitoringu tepelně-vlhkostního chování ZVT doposud v ČR chyběla.

Tab. 6.12: Minimální, maximální a průměrná roční teplota venkovního vzduchu a vzduchu nasávaného a vystupujícího ze zemního výměníku – období 2012÷2014

Teplota vzduchu:	Minimum [°C]			Maximum [°C]			Průměr [°C]		
	2012 ^{*)}	2013	2014	2012 ^{*)}	2013	2014	2012 ^{*)}	2013	2014
Exteriér	-11,63	-9,86	-10,53	38,17	36,94	34,20	10,27	9,12	10,84
Vstup do ZVT	---	-7,69	-8,60	---	35,59	32,20	---	10,36	11,18
Výstup ze ZVT	---	0,68	3,28	---	29,94	20,65	---	10,12	10,53

^{*)} v r. 2012 nebyl ZVT v provozu, takže vstupní a výstupní teplota není uvedena.

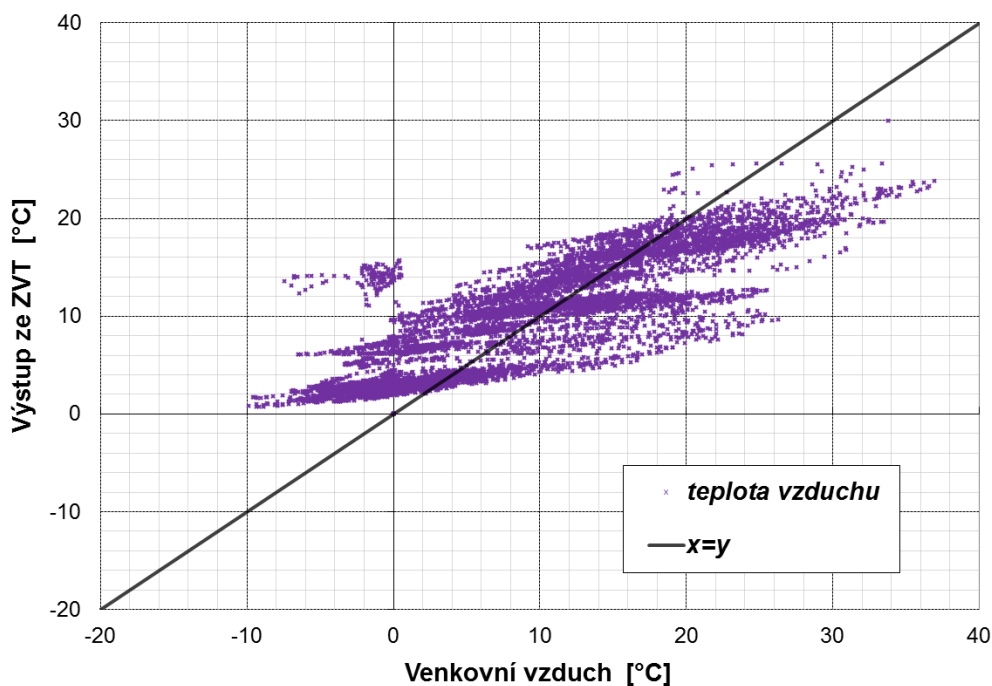
➤ Vyhodnocení funkce ZVT jako protimrazové ochrany zařízení pro zpětné získávání tepla – zimní předehev

Jedním z hlavních důvodů, proč si lidé budují zemní výměníky tepla, je zajištění protimrazové ochrany rekuperačního výměníku tepla ve VZT jednotce. K tomu by měla být při zimním provozu dosažena minimální výstupní teplota ze zemního výměníku okolo 0 °C.

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

Výstupní teplota však ve většině případů není sledována a ZVT je řízen jen podle aktuální venkovní teploty. **Tabulka 6.12** proto prezentuje naměřená dlouhodobá data z experimentálního výměníku tepla v letech 2013 až 2014. V zimě 2013/2014 bylo také plánováno provést krátký monitoring teplot vzduchu na výstupu několika zemních výměníků v blízkém okolí pracoviště autora (*Brno-Bystrc, Brno-Ivanovice, Brno-Kníničky, Brno-Obřany, Jinačovice, Křtiny a Veverské Knínice*; viz **kapitola 7**) – z organizačních a časových důvodů se však monitoring nepodařilo provést.

Z hodnot minimální výstupní teploty ze zemního výměníku je jasné, že funkce protimrazové ochrany byla v obou letech provozu 100% splněna. Zajímavé je též srovnání minimální teploty venkovního vzduchu s minimem teploty na vstupu do výměníku (resp. přesněji řečeno na vstupu do zemního potrubí). Vlivem tepelných zisků se totiž vzduch před vstupem do zemního výměníku vždy mírně přehřeje – v našem případě v přibližně 3 m dlouhém vzduchotechnickém potrubí, vedoucím v interiéru budovy. Zmíněné ohřátí činilo cca $+2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ v roce 2013 a přibližně $+2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ v r. 2014. Z tohoto pohledu je možno u výměníků s možností přepínání sání volit prahovou teplotu i mírně pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V letním období je tomu naopak, vlivem tepelných ztrát dochází k mírnému ochlazení nasávaného vzduchu. Na základě porovnání maxim naměřených teplot v exteriéru a na vstupu do výměníku lze říci, že ochlazení činilo přibližně $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ v roce 2013 a cca $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ v r. 2014.

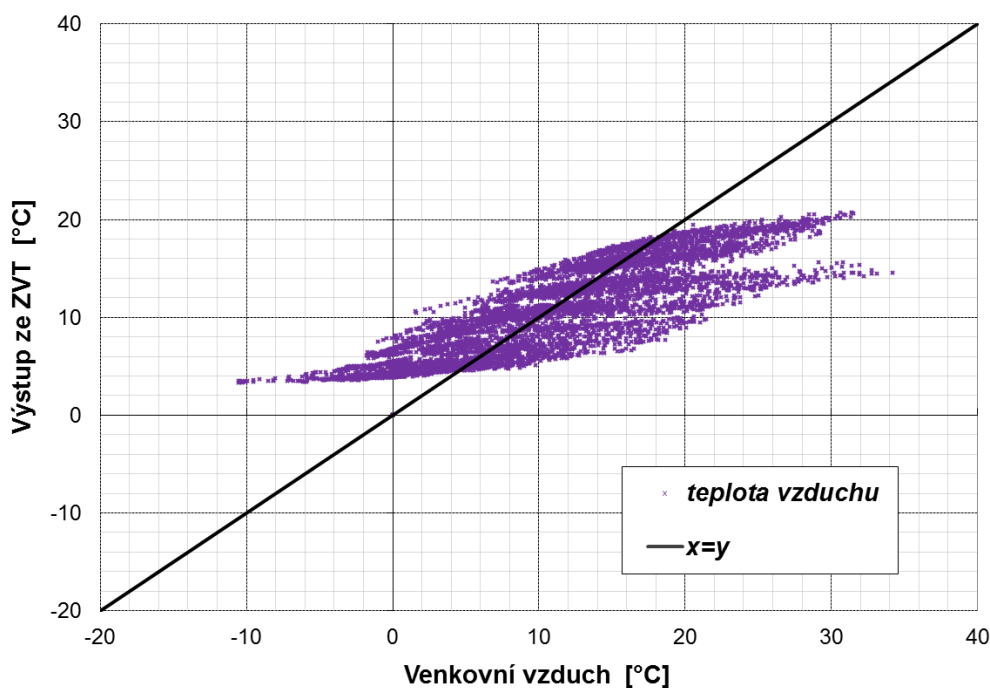


Obr. 6.42: Porovnání výstupních teplot vzduchu ze ZVT a venkovních teplot v r. 2013 – **ohřev:** body nad přímkou $x = y$, **chlazení:** body pod přímkou $x = y$

Na **obr. 6.42** a **6.43** je provedeno grafické porovnání výstupních teplot vzduchu ze zemního výměníku tepla 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 (**obr. 6.43**).

Graf z roku 2013 vykazuje oproti r. 2014 větší variabilitu hodnot, což je s největší pravděpodobností dáno větším počtem různých provozních režimů v průběhu roku 2013 (viz **tab. 6.3** a **6.4**). Shluk hodnot, ležících mimo hlavní oblast v levé části **obr. 6.42** – který se na **obr. 6.43** nevyskytuje – je způsoben odstávkou ZVT v půlce prosince 2013. Několik jednotlivých bodů, ležících mimo hlavní oblast hodnot v horní části **obr. 6.42**, reprezentuje naopak cirkulační chlazení interiérového vzduchu z konce srpna 2013. Čidlo pro měření venkovní teploty je umístěno v těsné blízkosti budovy, na tepelně-izolačním krytu exteriérového potrubí ZVT před vstupem do objektu (**obr. A.22** přílohy). Z tohoto důvodu může být ve skutečnosti teplota venkovního (tj. nasávaného) vzduchu v zimě o něco málo nižší. Důležitější je však teplota na výstupu z výměníku, která byla vždy nad bodem mrazu. Její čidlo je umístěno přímo v ose potrubí, ihned za vstupem do objektu, takže jeho údaje by měly být relevantní.



Obr. 6.43: Porovnání výstupních teplot vzduchu ze ZVT a venkovních teplot v r. 2014 – **ohřev**: body nad přímkou $x = y$, **chlazení**: body pod přímkou $x = y$

➤ Tepelný výkon ZVT

Standardně se topný, resp. chladicí výkon stanovuje z rozdílu teplot ΔT_a na vstupu a výstupu zemního výměníku tepla:

$$\dot{Q}_{ZVT} = \dot{m}_{a,ZVT} \cdot \overline{c_{p,a}} \cdot \Delta T_a = \dot{m}_{a,ZVT} \cdot \overline{c_{p,a}} \cdot (T_{a,OUT} - T_{a,IN}) \quad (36)$$

kde: $\dot{m}_{a,ZVT}$ – hmotnostní tok vzduchu procházejícího potrubím ZVT [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\overline{c_{p,a}}$ – střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu při konst. tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Hmotnostní tok vzduchu proudícího potrubím zemního výměníku se určí z objemového průtoku:

$$\dot{m}_{a,ZVT} = \rho_a \cdot \dot{V}_{ZVT} \quad (37)$$

kde: \dot{V}_{ZVT} – objemový průtok vzduchu procházejícího potrubím ZVT [$m^3 \cdot s^{-1}$],
 ρ_a – hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$].

Hustotu vzduchu stanovíme ze známých stavových veličin (např. na vstupu do zemního výměníku) pomocí stavové rovnice:

$$\rho_a = \frac{p_b}{r_a \cdot T_{a,IN}} \quad (38)$$

kde: $T_{a,IN}$ – absolutní teplota vzduchu na vstupu ZVT [K],
 r_a – měrná plynová konstanta vzduchu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Pozn. Pro přesný výpočet by zde bylo nutné určit přesné parametry ($c_{p,a}$, r_a) pro vlhký vzduch dané relativní vlhkosti; v technické praxi se však většinou použijí odpovídající hodnoty pro suchý vzduch (tj. $c_{p,a} = 1010 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $r_a = 287,04 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

Známe-li však teplotu a vlhkost na vstupu i výstupu ZVT, lze tepelný výkon stanovit na základě rozdílu entalpií vlhkého vzduchu:

$$\dot{Q}_{ZVT} = \dot{m}_{a,sv} \cdot \Delta h_a = \dot{m}_{a,sv} \cdot (h_{a,OUT} - h_{a,IN}) \quad (39)$$

kde: $\dot{m}_{a,sv}$ – hmotnostní tok suchého vzduchu [$kg_{s.v.}$], který vypočteme z odpovídající parciální hustoty ρ_a a objemového průtoku $\dot{V}_{a,pipe}$:

$$\dot{m}_{a,sv} = \frac{\dot{V}_{a,pipe} \cdot \rho_a}{1 + x_a} \quad (40)$$

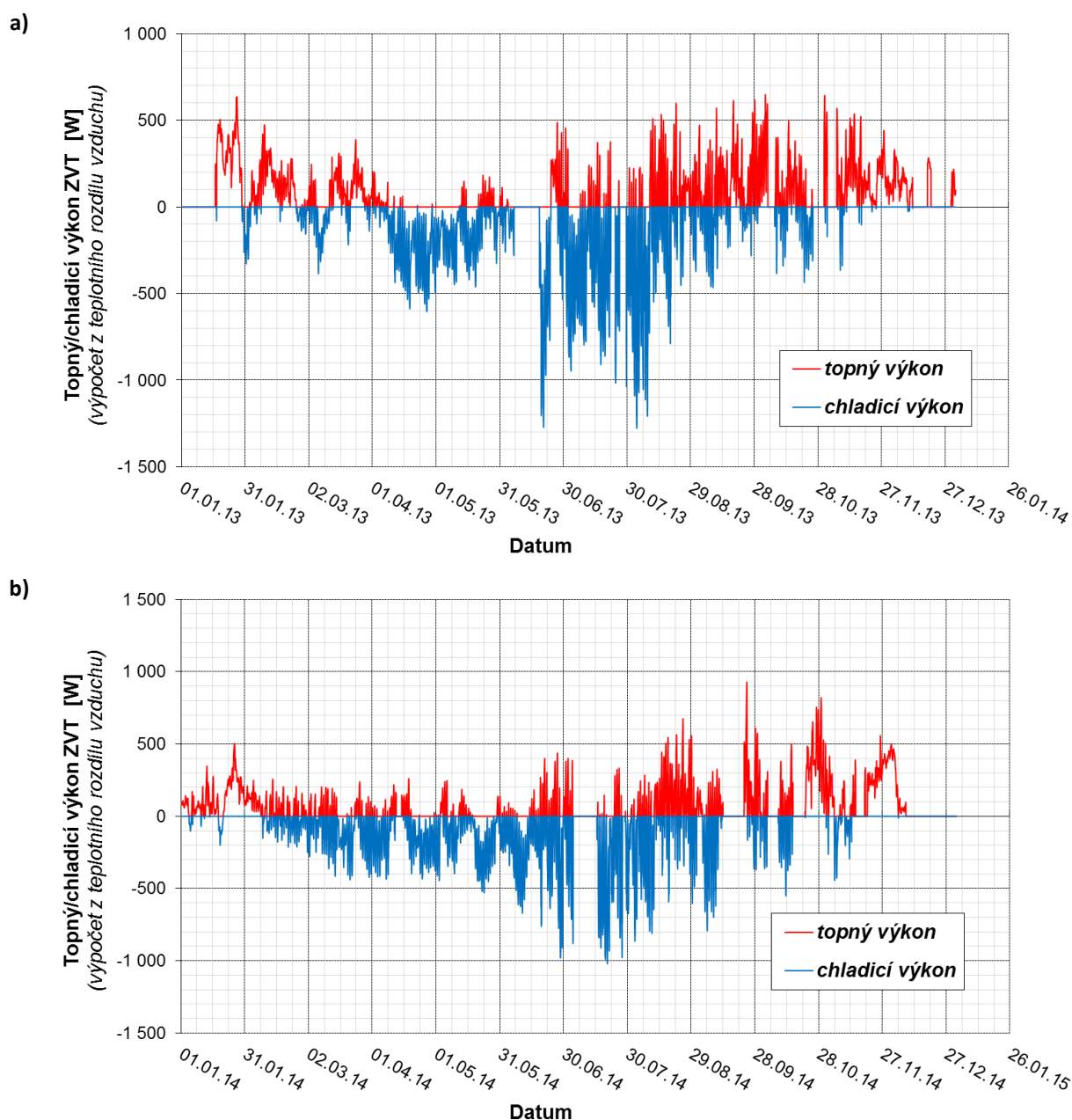
Měrnou entalpii vzduchu vypočteme z běžně užívaného psychrometrického vztahu:

$$h_a = 1,01 \cdot t_a + x_a \cdot (2500 + 1,84 \cdot t_a) \quad (41)$$

kde: h_a – měrná entalpie vlhkého vzduchu [$kJ/kg_{s.v.}$],
 t_a – teplota vlhkého vzduchu [$^{\circ}C$],
 x_a – měrná vlhkost vzduchu [$kg_w/kg_{s.v.}$].

Dále jsou uvedeny průběhy topného a chladičného výkonu v letech 2013 až 2014 pro obě varianty výpočtu – tj. a) z rozdílu teplot, b) z rozdílu entalpií. Kvůli častějším výpadkům měření vlhkostních čidel v r. 2013 však chybí ve druhém případě více hodnot, než u výpočtu z rozdílu teplot (celkem 13 % dat vlhkostí pro rok 2013, resp. 18 % pro rok 2014; blíže viz kapitola „Chybějící data z monitoringu“).

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



Obr. 6.44: Průběh topného a chladicího výkonu experimentálního ZVT
a) v r. 2013, b) v r. 2014

a) Výpočet z teplotního rozdílu:

Na **obr. 6.44** je prezentován topný, resp. chladicí výkon, stanovený z hodinových průměrů naměřených vstupních a výstupních teplot zemního výměníku tepla. Je patrný převažující trend topného výkonu v zimním období roku a naopak chladicího výkonu v období letním. Po spuštění výměníku začátkem r. 2013 (viz **obr. 6.44a**) se topný výkon pohyboval maximálně do cca 650 W, od začátku dubna poklesl na cca poloviční hodnotu. Od dubna totiž postupně začal převažovat chladicí režim ZVT, s maximálním výkonem pohybujícím se v rozmezí (400÷600) W, a to až do konce května. Navýšení objemového průtoku cca v půlce června mělo za následek nárůst chladicího výkonu (přibližně na dvojnásobek),

trvajícím do poloviny srpna – maximální dosažený chladicí výkon byl cca 1300 W. Poté začal opět převažovat topný režim ZVT s výkonem pohybujícím se v rozmezí (200÷650) W. Po snížení průtoku na cca polovinu se od půlky listopadu 2013 topný výkon snížil na rozsah přibližně (200÷300) W, ke chlazení vzduchu již téměř nedocházelo.

Vlivem nízkého průtoku vzduchu v ZVT na začátku r. 2014 se rozmezí topného výkonu pohybovalo kolem (100÷250) W, a to až do půlky května (**obr. 6.44b**). Od půlky března přitom začal převažovat chladicí režim, s dosahovaným chladicí výkonem (200÷400) W, do cca půlky května, kdy došlo k jeho mírnému navýšení na (500÷600) W. Přibližně v půlce června byl podstatně navýšen objemový průtok vzduchu ZVT, což mělo za následek další navýšení chladicího výkonu (cca do půlky září) – maximum se pohybovalo v rozmezí (700÷1000) W. Od půlky srpna 2014 se zase začal postupně prosazovat režim ohřevu vzduchu, s průměrným dosahovaným výkonem cca (300÷600) W. Maximální hodnota výkonu byla naměřena přibližně (800÷900) W koncem září, resp. koncem října. Snížením průtoku začátkem listopadu klesl topný výkon na (250÷500) W, ke chlazení vzduchu již téměř nedocházelo. Od 13. prosince do konce r. 2014 byl výměník mimo provoz, takže data tepelných výkonů chybí.

Prezentované tepelné výkony jsou stanoveny z teplot vzduchu naměřených na vstupu a výstupu ZVT, čímž jsou výsledky poněkud zkresleny – vlivem tepelných zisků/ztrát ve vzduchotechnickém potrubí uvnitř objektu se totiž nasávaný venkovní vzduch před vstupem do zemní smyčky až o několik °C přehřeje, resp. předchladí (viz např. **tab. 6.12**) – reálný tepelný výkon celého zařízení je tak vyšší. Negativně se projevuje také nevhodný typ zeminy, v níž je experimentální zemní výměník uložen (jílovitá spraš). Dosažené tepelné výkony jsou tak nižší, než hodnoty získané energetickou simulací pro lokalitu Studénka (**kapitola 5.5**).

b) Výpočet z rozdílu entalpií:

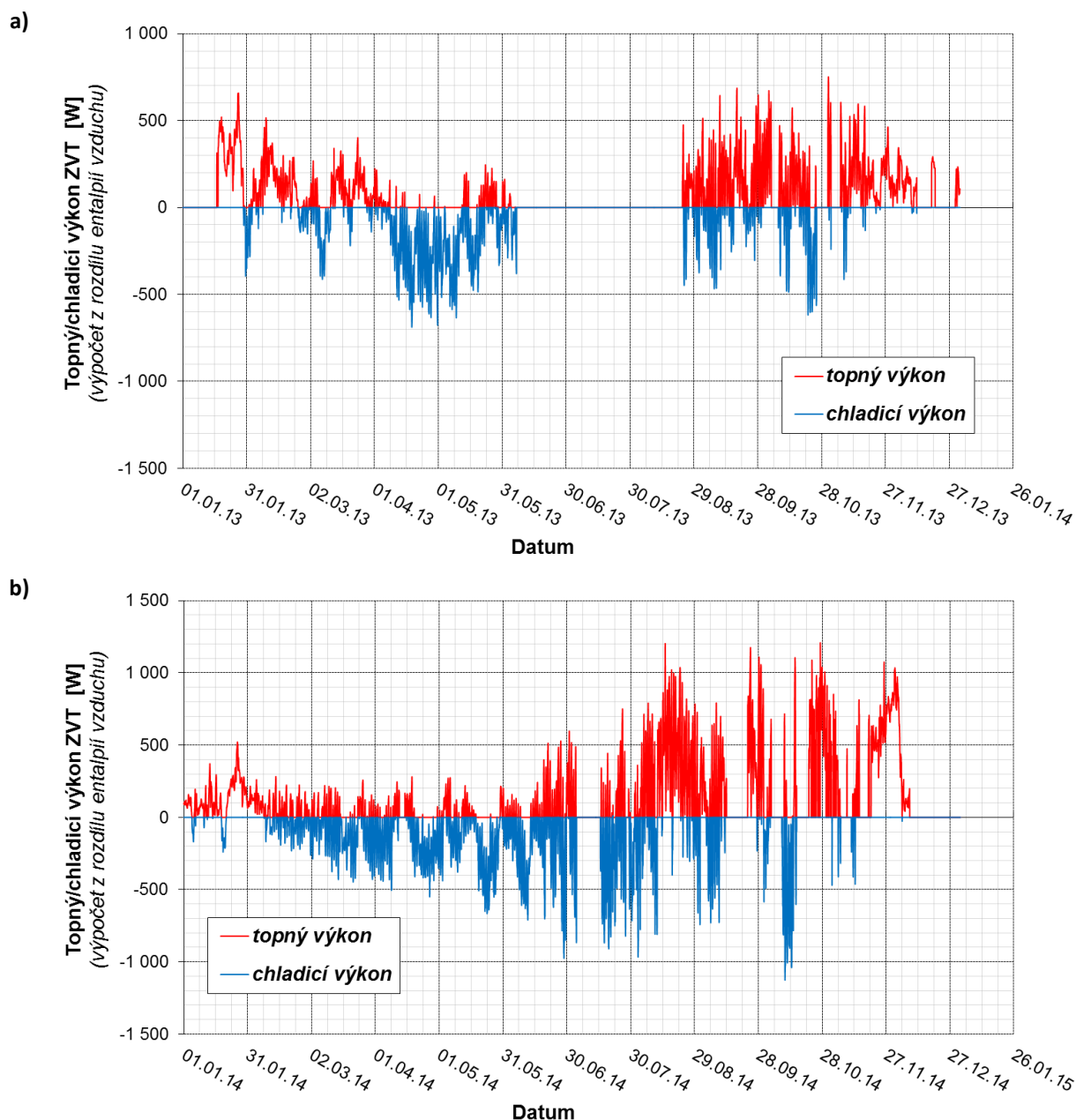
Průběhy topného a chladicího výkonu, stanovené na základě rozdílů entalpií, mají obdobný trend jako v případě výpočtu z prostého rozdílu teplot (**obr. 6.45**). Určité rozdíly nastávají kvůli zahrnutí vlhkostní složky, proto je na následujícím **obr. 6.46** uvedeno srovnání obou variant výpočtu. V případě shody by všechny body ležely na **přímce $x = y$** ; k tomu však ve skutečnosti došlo jen v několika málo případech.

V roce 2013 nicméně panuje velmi dobrá shoda mezi oběma způsoby výpočtu (**obrázek 6.46a**). V režimu letního chlazení jsou však u varianty výpočtu z rozdílu entalpií dosahovány – v důsledku zahrnutí latentního tepla kondenzace vodní páry – vyšší chladicí výkony, než je tomu u výpočtu z rozdílu teplot. Při nižších výkonech tak může chladicí výkon z rozdílu entalpií dosahovat 2,5× až 3× vyšších hodnot; 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 (**obr. 6.46b**) 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.

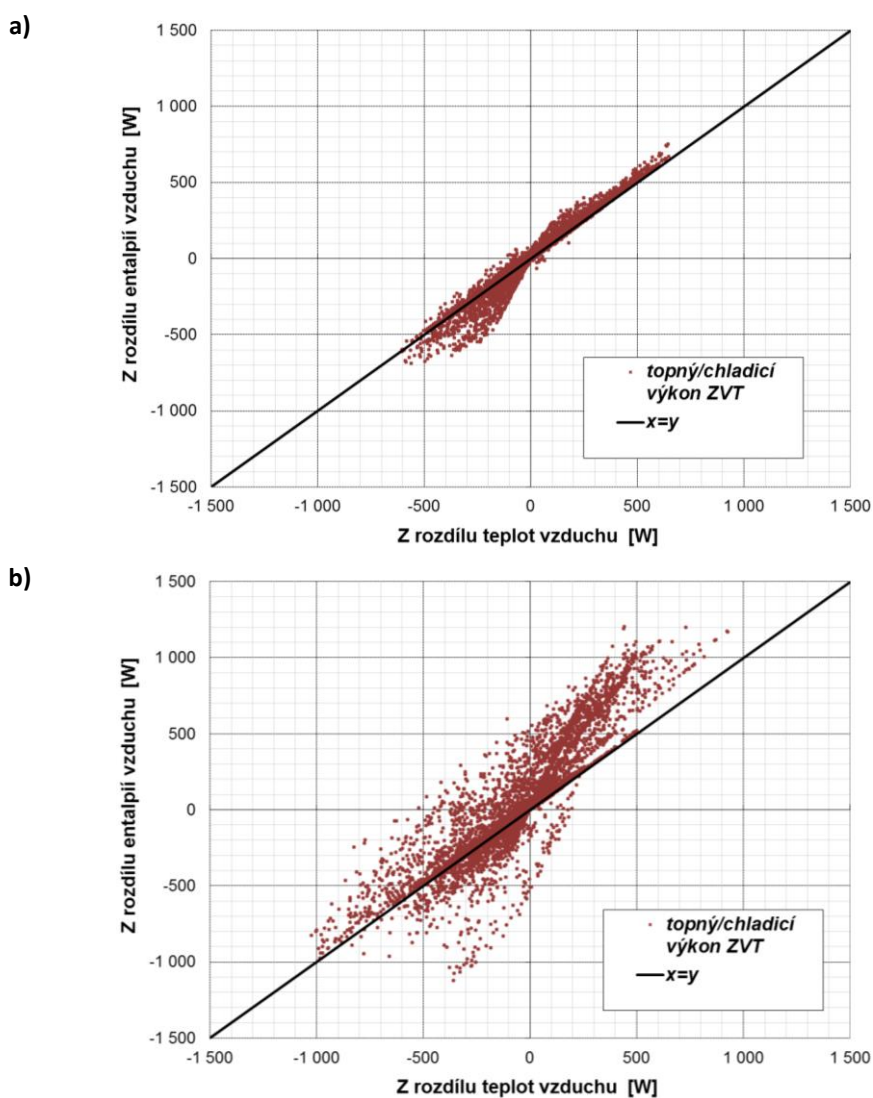
6 Experimentální zemní vzduchový výměník tepla na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

Jelikož zemní výměník tepla nemá po celé své délce konstantní teplotu stěny potrubí, nastávaly občas i situace, kdy při režimu chlazení docházelo k nárůstu měrné vlhkosti (tzn. docházelo k vypařování vody) a naopak k jejímu poklesu v režimu topném (část vlhkosti zkondenzovala). Vyšší rozptyl proti předchozímu roku lze částečně přičíst degradaci vlhkostních čidel [191], zejména čidla na vstupu do ZVT a čidla v exteriéru budovy – použitá čidla totiž mají při vysoké relativní vlhkosti omezenou provozní dobu při podnulových teplotách vzduchu. Potvrdit by to bylo ale možné až po vyhodnocení dat z r. 2015.



Obr. 6.45: Průběh topného a chladičího výkonu experimentálního ZVT
a) v r. 2013, b) v r. 2014

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



Obr. 6.46: Porovnání topných a chladicích výkonů ZVT vypočtených z rozdílu teplot a z rozdílu entalpií: a) pro r. 2013, b) pro r. 2014

➤ Termická účinnost ZVT

Uvážíme-li, že venkovní vzduch – nasávaný do zemního výměníku tepla – se může ohřát/ochladit maximálně na aktuální teplotu okolní zeminy (v dané hloubce uložení potrubí ZVT), lze z naměřených dat jednoduše určit aktuální termickou účinnost výměníku:

$$\eta_{ZVT} = \frac{T_{a,OUT} - T_{a,E}}{T_{gr} - T_{a,E}} \quad (42)$$

kde: η_{ZVT} – termická účinnost zemního vzduchového výměníku [1],

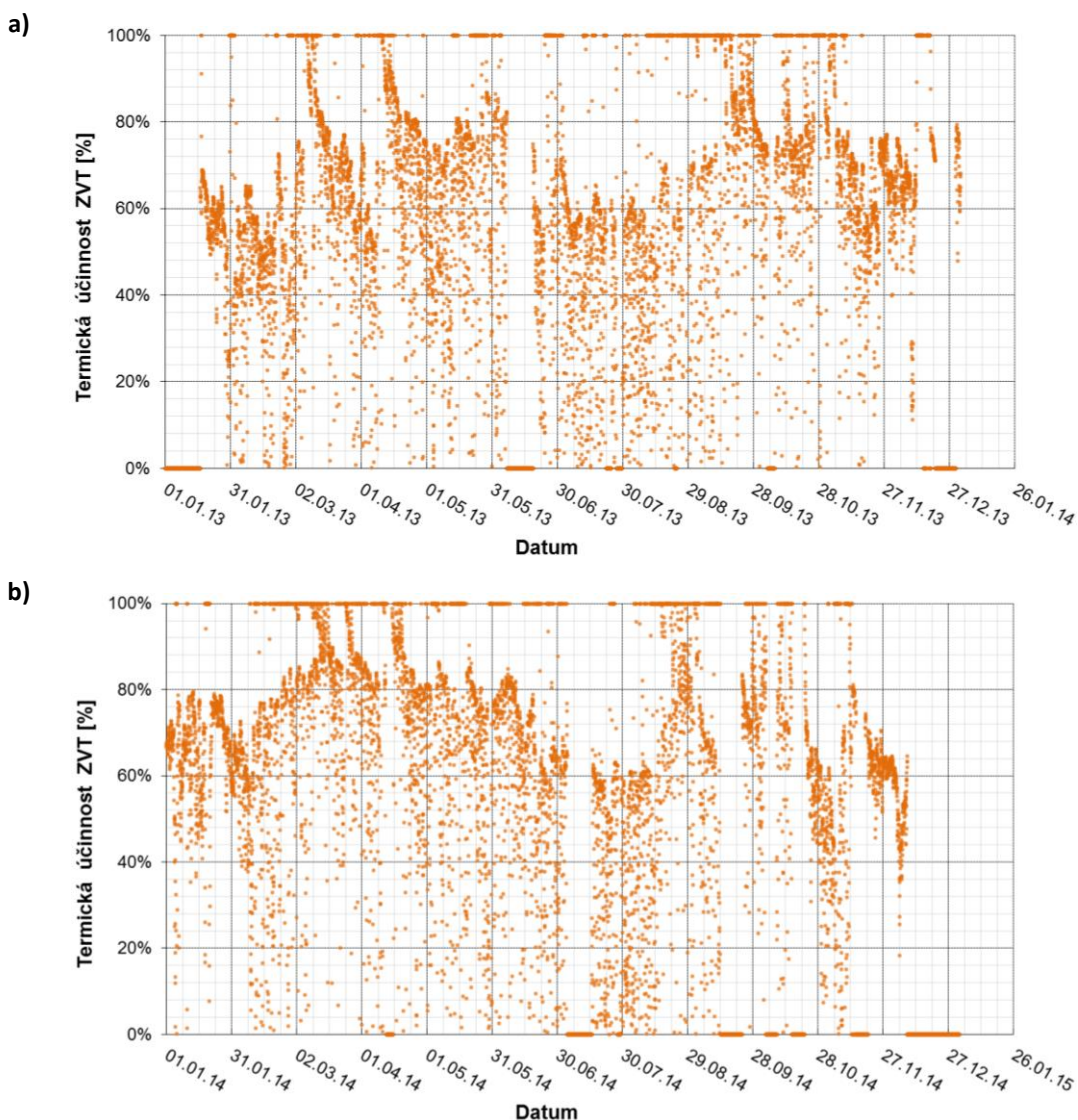
$T_{a,OUT}$ – výstupní teplota vzduchu ze ZVT [°C],

$T_{a,E}$ – teplota venkovního vzduchu [°C],

T_{gr} – teplota zeminy v dané hloubce uložení potrubí ZVT [°C].

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

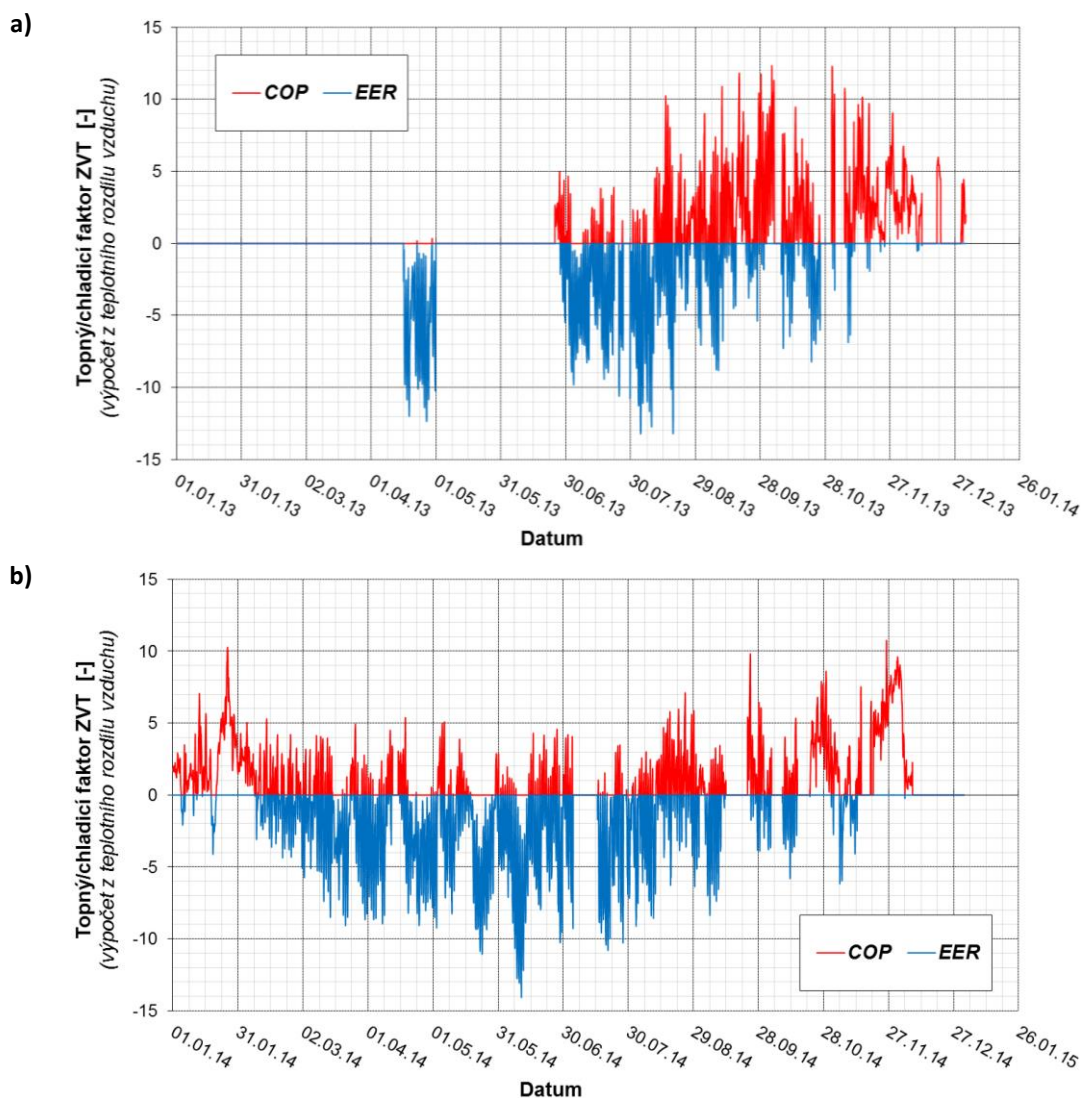
V našem případě je aktuální teplota zeminy uvažována jako průměrná teplota zeminy v hloubce 2,1 m (tzn. přibližně v ose spodního potrubí ZVT), naměřená oběma zemními čidly v „neovlivněné“ oblasti (čidla „C“ a „D“). Na **obr. 6.47** jsou vykresleny grafy vypočtené termické účinnosti pro oba monitorované roky. Je patrné, že v roce 2013 se účinnost v převážné míře pohybovala nad hodnotou 50 %, 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.



Obr. 6.47: Termická účinnost experimentálního ZVT: a) v r. 2013, b) v r. 2014

Pokud bychom chtěli dosáhnout vyšších hodnot tepelné účinnosti, museli bychom navýšit celkovou délku trasy ZVT, ovšem za cenu určitého zvýšení investičních i provozních nákladů. Nutno však dodat, že experimentální výměník byl po oba roky provozován v kontinuálním režimu sání – v případě řízení sání dle venkovní teploty, případě cyklického větrání v zimním období, by byly výstupní teploty ze ZVT poněkud odlišné a tím by

i termická účinnost ZVT dosahovala jiných hodnot. Hranici investičních nákladů volí investor, ten je však dále limitován dispozicí pozemku, proto se při realizaci vždy musí najít určitý kompromis.



Obr. 6.48: Topné a chladicí faktory ZVT: a) v r. 2013, b) v r. 2014 (výpočet z rozdílu teplot)

➤ Energetická (provozní) účinnost ZVT

Hodnocení smysluplnosti realizace zemního výměníku tepla můžeme provést i na základě provozní účinnosti – jako tomu bývá u jiných elektrických zařízení, např. tepelných čerpadel (výkonové parametry dle ČSN EN 14511) – dle poměru množství získané tepelné energie ku spotřebovanému množství elektrické energie pro pohon celého zařízení. Pro zimní provoz se používá tzv. **faktor COP** („Coefficient of Performance“) dle **rovnice (43)**, naopak pro letní provoz tzv. **faktor EER** („Energy Efficiency Ratio“) dle **rovnice (44)**:

$$COP_{ZVT} = \frac{Q_{ZVT(+)}}{P_{el}} \quad (43)$$

$$EER_{ZVT} = \frac{Q_{ZVT(-)}}{P_{el}} \quad (44)$$

kde: COP_{ZVT} – topný faktor zemního výměníku tepla [1],

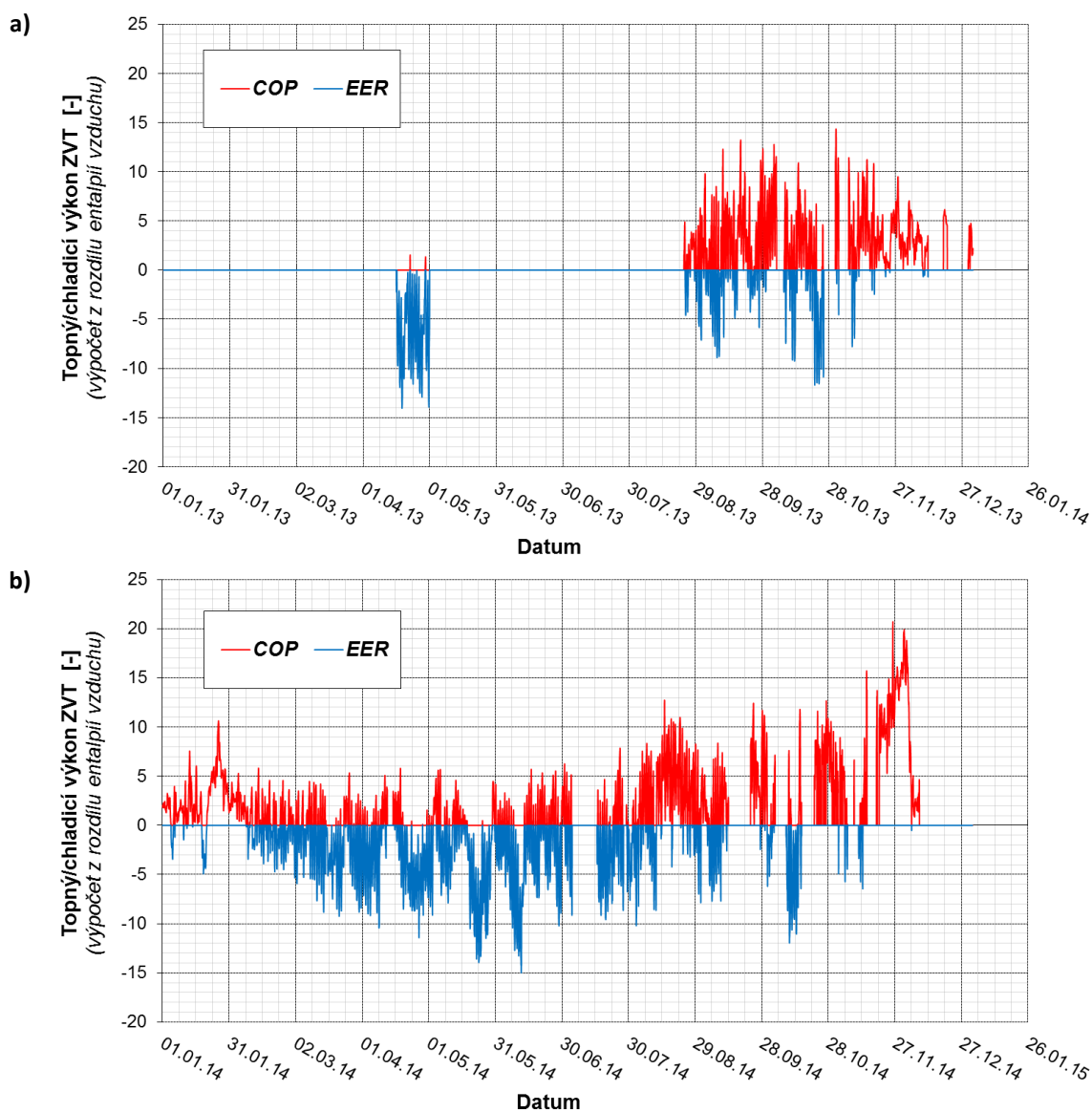
EER_{ZVT} – chladicí faktor ZVT [1],

$Q_{ZVT(+)}$ – průměrný topný výkon zemního výměníku tepla [W],

$Q_{ZVT(-)}$ – průměrný chladicí výkon ZVT [W],

P_{el} – průměrný elektrický příkon k pohonu celého ZVT (tj. ventilátor, klapka, ...) [W].

Přibližně od půlky roku 2013 byla pravidelně zaznamenávána spotřeba elektrické energie experimentálního ZVT pro pohon radiálního potrubního ventilátoru a přepínací klapky sání. Ze zaznamenané denní spotřeby se určil průměrný denní elektrický příkon zemního výměníku a následně se dopočetly faktory COP a EER. Topný/chladicí faktor byl – tak jako v předchozích kapitolách – vypočten jak z rozdílu teplot, tak z rozdílu entalpií vzduchu.



Obr. 6.49: Topné a chladicí faktory ZVT: a) v r. 2013, b) v r. 2014 (výpočet z rozdílu entalpií)

a) Výpočet tepelného výkonu z teplotního rozdílu:

Z **obr. 6.48a** je patrné, že na jaře r. 2013 zemní výměník pracoval s maximálním chladicím faktorem dosahujícím až cca hodnoty 12; tedy z 1 kWh spotřebované elektrické energie získal až 12 kWh energie tepelné. Předtím, a poté opět až cca do konce června, údaje o spotřebě energie chybí. 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 (**obr. 6.48b**) 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).

b) Výpočet tepelného výkonu z rozdílu entalpií:

Topné a chladicí faktory zemního výměníku vypočtené z rozdílu entalpií vlhkého vzduchu na vstupu a výstupu ze ZVT vykazují obdobné trendy (**obr. 6.49**); obě veličiny však – kvůli rozdílům ve vypočtených tepelných výkonech – dosahují vyšších hodnot.

➤ Využití ZVT při řízení provozu podle teploty nasávaného vzduchu

Z naměřených teplot venkovního vzduchu (**obr. B.1**) lze usoudit, jak by byl zemní výměník využíván v případě řízení sání dle venkovní teploty. Přepínání je vhodné kvůli energetické konkurenci ZVT s rekuperací tepla z odpadního vzduchu, pro jejíž zajištění by měl mít nasávaný vzduch teplotu alespoň 0 °C. Jak již bylo diskutováno dříve, vlivem tepelných zisků uvnitř budovy dochází k mírnému předeřevu proudícího vzduchu již uvnitř přívodního potrubí ZVT. Přepínání tak lze nastavit i na mírně podnulové teploty (např. -2 °C).

Tab. 6.13: 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	450 h. / 6810 h. (≈ 6,6 %)	851 h. / 6810 h. (≈ 12,5 %)	1293 h. / 6810 h. (≈ 19,0 %)	1974 h. / 8784 h. (≈ -22,5 %)
r. 2013	842 h. / 7979 h. (≈ 10,6 %)	1586 h. / 7979 h. (≈ 19,9 %)	2281 h. / 7979 h. (≈ 28,6 %)	781 h. / 8760 h. (≈ -8,9 %)
r. 2014	236 h. / 7180 h. (≈ 3,3 %)	596 h. / 7180 h. (≈ 8,3 %)	1086 h. / 7180 h. (≈ 15,1 %)	1580 h. / 8760 h. (≈ -18,0 %)
r. 2012 ÷ r. 2014	1528 h. / 21 969 h. (≈ 7,0 %)	3033 h. / 21 969 h. (≈ 13,8 %)	4660 h. / 21 969 h. (≈ 21,2 %)	4335 h. / 26 304 h. (≈ -16,5 %)

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.

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

V **tabulce 6.13** jsou rozebrány tři varianty nastavení přepínací teploty: $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je logické, že s vyšší přepínací teplotou využití zemního výměníku narůstá – a to až na hodnotu cca 21 % při $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak nastavení teploty na $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vede k průměrnému využití ZVT přibližně 7 %. Přihlédneme-li k výši investičních nákladů, je to poměrně málo. Z tohoto pohledu ze 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 odlišné.

➤ **Chybějící data z monitoringu**

V **tabulce 6.14** je procentuálně vyjádřeno, kolik teplotních dat zeminy chybí v jednotlivých letech monitoringu. Vyjma roku 2012 jsou známa data alespoň z 82 % času z celého roku, což je pro další vyhodnocení dostačující. V **tabulce 6.15** je vyhodnocení chybějících dat parametrů vzduchu (**T** – teplota, **RH** – relativní vlhkost). Zde jsou již větší výpadky, zejména u čidel vlhkostí – známa jsou data alespoň ze 70,4 % času celého roku.

Tab. 6.14: Chybějící data teplot zeminy – monitoring ZVT z období let 2012÷2014

Čidlo:	„ovlivněná oblast“		„neovlivněná oblast“	
	A1 až A6	B1 až B6	C1 až C6	D1 až D6
r. 2012	-8,4 %	-8,4 %	-8,4 %	-8,4 %
r. 2013	-8,9 %	-8,9 %	-8,9 %	-8,9 %
r. 2014	-18,0 %	-18,0 %	-18,0 %	-18,0 %

Tab. 6.15: Chybějící data parametrů vzduchu – monitoring ZVT z období let 2012÷2014

Čidlo:	Venkovní vzduch		Vstup do ZVT ^{*)}		Výstup ze ZVT ^{*)}	
	T _e	RH _e	T _{in}	RH _{in}	T _{out}	RH _{out}
r. 2012	-22,5 %	-100,0 %	---	---	---	---
r. 2013	-8,9 %	-29,6 %	-13,0 %	-29,6 %	-13,0 %	-29,6 %
r. 2014	-18,0 %	-20,6 %	-18,0 %	-20,6 %	-18,0 %	-20,6 %

^{*)} v r. 2012 nebyl ZVT v provozu, takže parametry na vstupu a výstupu ZVT nebyly měřeny.

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

KAPITOLA 7

Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

Jak již bylo zmíněno dříve, mikrobiologické problematice ZVT se na odborné úrovni v podmínkách ČR dosud nikdo širěji nevěnoval. Z tohoto důvodu byl autorem podán a v roce 2012 schválen juniorský projekt specifického výzkumu VUT v Brně *FSI-J-12-24 „Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy“*. Projekt se primárně zaměřil pouze na vzduchové zemní výměníky tepla, u nichž se dá předpokládat vyšší pravděpodobnost mikrobiálního znečištění. V rámci řešení tohoto projektu byly nejprve z dostupných zdrojů na internetu – převážně z databáze domů **Centra pasivního domu** [29] a realizací firmy **Karon, s.r.o.** (jednáno s *Ing. Stanislavem Karáskem*, majitelem společnosti) – dohledány některé již realizované nízkoenergetické a energeticky pasivní domy, resp. stavby se zemními výměníky tepla; celkem bylo v r. 2013 dohledáno 165 zařízení. Podle informací společnosti **ELEKTRODESIGN ventilátory s.r.o.** (dodavatele potrubního systému *ED GEOFLEX 200/175*) je ale v ČR budováno cca 30 zemních výměníků ročně [187], proto se dá aktuálně v ČR očekávat již několik stovek realizací ZVT. Oficiální informace o realizacích ZVT z české pobočky nadnárodní společnosti **REHAU, s.r.o.** a výrobce kanalizačního KG potrubí, společnosti **Gebr. Ostendorf – OSMA zpracování plastů, s.r.o.**, se nepodařilo získat.

Poté následovala obtížnější část projektu – shánění přímých kontaktů na majitele dotyčných staveb, nejčastěji zprostředkovaně, přes projektanta nebo dodavatele stavby. Původně byl plánován jen monitoring ZVT v blízkém okolí řešitelského pracoviště, avšak z důvodu nesnadného kontaktování majitelů blízkých objektů, resp. jejich odmítnutí zapojit se do pilotní studie byly nakonec do monitoringu zahrnuty i zemní výměníky z větších vzdáleností – nejdále cca 120 km od Brna. Celkový přehled všech zařízení, u nichž se podařilo kontaktovat majitele (cca 1/3), a přehled základních technických parametrů ZVT (dle jimi poskytnutých informací) jsou uvedeny v **tab. 7.1**.

Nakonec tak 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 polypropylenu s antimikrobiální úpravou (dále jen „**PP Rehau**“), dále zda má vliv stáří realizace či případná zanedbaná údržba vzduchotechnického systému. Pro vyslovení obecnějších závěrů se tak 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).

Tab. 7.1: Přehled základních parametrů zkoumaných ZVT

č.	Doba realizace	Lokalita	Typ ZVT ^{a)}	Přepínání sání z fasády	Potrubní systém	Dimenze zařízení ^{b)}			Typ okolní zeminy
						DN	L	H	
1	11/2011	Brno – FSI VUT	P + C	Ano	KG PVC	200	39	1,3/2,0	Jíl-spraš
2	2002	Zlín-Louky	P	Ne	KG PVC	315	25	1,0÷1,5	Jíl-spraš
3	2005	Zlín-Louky	P	Ne	KG PVC	200	10	2,5	Jíl-spraš
4	08/2010	Břeclav	P	Ne	PE Hegler	200	35	2,0÷2,5	Hlinitá
5	06/2011	Brno-Bystrc	P	Ne	KG PVC	200	25	2,0	Jílovitá
6	02/2009	Brno-Obřany	P	Ano	KG PVC	200	22	2,0÷2,2	Jíl-spraš
7	09/2010	Křtiny	P	Ne	KG PVC	200	32	0,8÷5,5	Břidlice
8	01/2009	Popice	P	Ne	KG PVC	160	35	1,1÷1,2	Jíl-spraš
9	11/2007	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
10	11/2007	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
11	11/2007	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
12	11/2007	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
13	10/2006	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
14	11/2010	Břeclav	P	Ne	PE Hegler	200	35	2,0÷2,5	Hlinitá
15	12/2009	Veverské Knínice	P	Ano	KG PP 2000	200	30	2,0	Jílovitá + obsyp
16	2000	Květná u Poličky	P	Ano	KG PVC	200	30	3,0	Jílovitá
17	2000	Květná u Poličky	P	Ano	KG PVC	200	30	3,0	Jílovitá
18	10/2010	Rapotice	P	Ne	PP Rehau	200	40	2,5	Jílovitá + kámen
19	2002	Brno-Žebětín	P	Ne	KG PVC	250	40	1,1÷1,2	Beton (v základech)
20	05/2005	Brno-Kníničky	P	Ano	KG PVC	200	40	1,8	Jíl-spraš
21	06/2006	Brněnské Ivanovice	P	Ano	KG PVC	200	40	3,5	Jíl-spraš
22	12/2007	Lednice	P	Ano	KG PP 2000	200	25	2,2	Jílovitá
23	10/2012	Ondratice	P	Ano	PP Rehau	200	36	1,6÷2,0	Jílovitá
24	11/2006	Myslejovice	P	Ano	KG PVC	200	22	2,0	Jílovitá
25	2009	Prostějovičky	P	Ano	KG PP 2000	200	33	2,0	Jílovitá
26	2009	Prostějovičky	P	Ano	KG PP 2000	200	33	2,0	Jílovitá
27	08/2008	Prostějov-Čechovice	P	Ano	KG PP 2000	200	22	1,8	Jílovitá
28	07/2005	Chomoutov	P	Ano	KG PVC	200	22	2,0	Stěrko-písčítá
29	2010	Štarnov	P	Ano	KG PP 2000	200	22	2,0	Jílovitá
30	05/2007	Bělkovice-Laštany	P	Ano	KG PP 2000	200	25	2,0	Stěrko-jílovitá
31	11/2007	Litovel	P	Ano	KG PP 2000	200	22	2,5	Hlinitá
32	04/2008	Hlinsko	P	Ano	KG PP 2000	200	20	3,0	Jílovitá
33	03/2009	Pavlov u Veselí	P	Ano	KG PP 2000	200	25	2,0	Hlino-písčítá
34	12/2007	Křenůvky	P	Ano	KG PVC	200	30	3,0	Jílovitá (spodní voda)

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

35	06/2007	Mohelnice	P	Ano	KG PP 2000	200	22	3,0	Hlinitá
36	11/2007	Židlochovice	P	Ne	PP Rehau	315	21	2,1	Navážka
37	05/2007	Jinačovice	P	Ano	KG PVC	200	13	2,0	Beton (v základech)
38	2005	Soběšice	P	Ano	KG PVC ^{d)}	200	20	3,2	Šotolina (obsyp-jíl)
39	12/2006	Horka nad Moravou	P	Ano ^{d)}	KG PVC	200	7× 35	/ ^{e)}	Navážka
						200	8× 35	/ ^{e)}	
40	2001	Brno-MZK	P	Ano ^{d)}	Meziprostor pod základy	/ ^{f)}	/ ^{f)}	10	Betonová komora
41	2011	Střítěž u Třince	P	Ne	PE Hegler	200	35	2,0	Hlíno-kamenitá
42	08/2008	Studénka	P	Ano	KG PP 2000	200	30	1,8	Jílovitá
43	/	Studenec	P	/	KG PVC	/	/	/	/
44	2007	Hradčany	P	Ne	KG PVC	/	/	/	/
45	08/2010	Nový Malín	P	Ano	KG PVC	200	24	2,3÷2,8	Jílovitá
46	2008	Šebetov	P	Ano	KG PVC	200	20	0,5÷1,9	Jílovitá

Pozn.: a) „P“ – přímý (tj. klasické provedení), „C“ – cirkulační.

b) DN = průměr potrubí [mm], L = celková délka potrubní trasy [m], H = průměrná osová hloubka uložení potrubí [m].

c) Z důvodu porušeného potrubí ZVT a zatékání vody do výměníku byl vnitřní povrch plastového potrubí dodatečně strojově vyztužen nánosem sklo-laminátové vrstvy (majitel nechtěl po finálních úpravách znovu kopat na zahradě).

d) Možnost směšování vzduchu nasávaného z fasády a přes zemní výměník tepla.

e) Hloubka uložení je pro každou trubku různá – potrubní trasa je vedená ve třech úrovních pod povrchem zemního valu za budovou (tj. pod svažující se zeminou), nejvrchnější potrubí jsou vždy uloženy více než 1,5 m hluboko.

f) Vzduch je z dvojité fasády nasáván do cca 0,5 m vysokého vybetonovaného meziprostoru mezi podlahou sklepa (strojovny vzduchotechniky) a základy budovy – touto tzv. „akumulační komorou“ je nasáván do VZT jednotky k další úpravě.

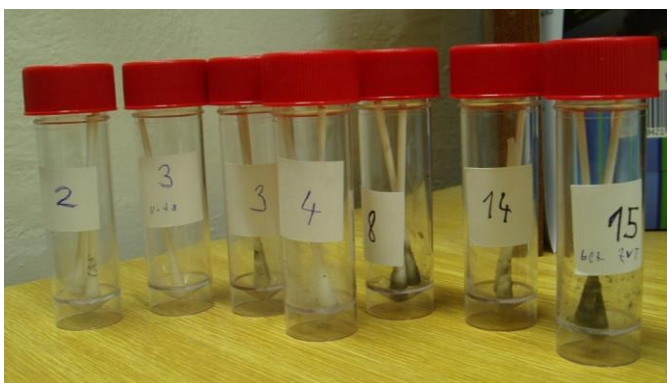
Odběry mikrobiologického materiálu byly realizovány osobně autorem práce, a to dvěma metodami – pomocí stěrů a gravimetricky; následné zpracování a vyhodnocení bylo již provedeno odbornou firmou, společností **IFCOR-99, s.r.o.** [193], v laboratoři akreditované ČIA (podle ČSN EN ISO 15189 – Zdravotnické laboratoře – Požadavky na kvalitu a způsobilost; *evídována pod č. M 8106*). Vyhodnocení všech rozborů prováděla **RNDr. Božena Jandová, CSc.** z laboratoře klinické mykologie pobočky Brno-Viniční. Sběr vzorků a jejich další zpracování prováděli vždy stejní pracovníci, rovněž metodika jednotlivých dílčích odběrů byla pro všechny výměníky stejná; laboratoře společnosti **IFCOR-99** mají zavedený systém managementu jakosti (odpovídající zmíněné normě ČSN EN ISO) a pravidelně se účastní externí kontroly kvality. Níže uvedené výsledky mikrobiologického monitoringu tak představují relevantní informace k této problematice v rámci ČR.

Ve většině případů byl proměřen i rychlostní profil v jedné rovině přívodního potrubí – pomocí sondy s žárovým anemometrem typu **ALMEMO FV A935-TH5** napojené na univerzální ruční data-logger typu **ALMEMO® 2470** (výrobce **AHLBORN GmbH, SRN**). 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** (**COMET SYSTEM, s.r.o., ČR**) zaznamenávána také teplota, relativní vlhkost a barometrický tlak vzduchu ve venkovním prostředí (v blízkosti sání ZVT) a uvnitř budovy – viz např. **obr. C.7**. Teplota na povrchu potrubí zemního výměníku a potrubí vzduchotechniky nebyla měřena.

7.1 Metoda stěrů

Pro zemní výměníky tepla bohužel dosud neexistuje odborná metodika odběru mikrobiologických vzorků a hodnocení jejich mikrobiálního znečištění. S ohledem na splnění cílů projektu *FSI-J-12-24* byla proto mikrobiologická problematika zemních výměníků tepla nejprve konzultována s předními odborníky oboru, zejména **RNDr. Kateřinou Klánovou, CSc.** ze Státního zdravotního ústavu v Praze [86].

V první etapě výzkumu byla zvolena jednoduchá (a rychlá) metoda stěru vzorků pomocí vatového tamponu (**obrázek 7.1**) z předem vymezené plochy vnitřního povrchu potrubí. Z důvodu 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 vstupu do VZT jednotky – tj. 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.



Obr. 7.1: Odebrané mikrobiologické vzorky uložené ve sterilním obalu

Odebrané vzorky se následně uložily do sterilního obalu a neprodleně odevzdaly do laboratoře k dalšímu zpracování. Zde se vatové tampony namočily (za stálého třepání) na 60 minut do fyziologického roztoku se smáčedlem, výluh se pak naředil do pěti koncentrací s následným vyočkováním do předem připravených Petriho misek se dvěma různými živnými agarovými půdami (**CZD** – „*Czapek Dox*“, **SAB** – „*Sabouraud Chloram-phenicol*“, viz dále) [86]. Tyto misky se nakonec vložily do termostatu, kde byly dva týdny kultivovány za konstantní teploty 15 °C. Po ukončení kultivace byl spočten celkový počet narostlých kolonií (CFU – „*Colony-forming unit*“) a stanovena průměrná hodnota měrného znečištění povrchu v jednotkách CFU/cm² – viz **tab. 7.2**. Hodnoceny byly pouze směsné populace plísní, znečištění bakteriemi nebylo stanoveno.

Koncem r. 2012 mělo o účast v prvním kole odběrů zájem prvních 14 majitelů vzduchových zemních výměníků tepla (viz č. 1-14 **tab. 7.1**) 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. Tyto 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 (obdobu potrubního systému ED geoflex fy *Elektrodesign*). Do této studie byl samozřejmě zařazen i experimentální zemní výměník na FSI VUT v Brně (č. 1), na kterém byly kontinuálně měřeny provozní parametry (**kap. 6**). V říjnu a prosinci 2012 tak bylo odebráno celkem 18 mikrobiologických vzorků (**tab. 7.2**) – 14× na výstupu ze zemního výměníku (tj. na vstupu do vzduchotechnické jednotky), 2× v šachtách zemního výměníku č. 1 a 2× z vody nalezené v potrubí ZVT (výměníky č. 3 a 6). K tomu byl odebrán i jeden porovnávací stěr ze vstupního potrubí větracího vzduchu do vzduchotechniky domu bez zemního výměníku (nacházejícího se nedaleko Zlína, mezi zkoumanými výměníky č. 2 a 3).

Tab. 7.2: Výsledky pilotní studie mikrobiologického znečištění ZVT z podzimu r. 2012 – metoda stěrů [A14]

č. vzorku	Datum odběru	Filtrace na vstupu	Čištění ZVT	Přepínání z fasády	Okolní podmínky ^{a)}	Míra znečištění ^{b)} [CFU/cm ²]
1a						60
1b	13.12.2012	Ano – G3	Jaro 2012	Ano	OM	130
1c						170
2	6.10.2012	Ne	nikdy	Ne	OM	250
3a						225
3b	6.10.2012	Ne	nikdy	Ne	OM	180
4	6.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	UM	9175
5	4.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	OM	45
6a						~ 0
6b	4.10.2012	Ne	nikdy	Ano	OM	4090
7	4.10.2012	Ne	nikdy	Ne	V	300
8	8.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	UM	1800
9	3.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	OM	20
10	3.10.2012	Ano – F7	nikdy	Ne	OM	20
11	3.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	OM	360
12	3.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	OM	160
13	3.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	OM	900
14	6.10.2012	Ano – G4	nikdy	Ne	UM	1175
X ^{d)}	6.10.2012	Ano – G4	---	---	OM	4050

Pozn.: a) „OM“ – okraj města, „UM“ – uvnitř města, „V“ – vesnice.

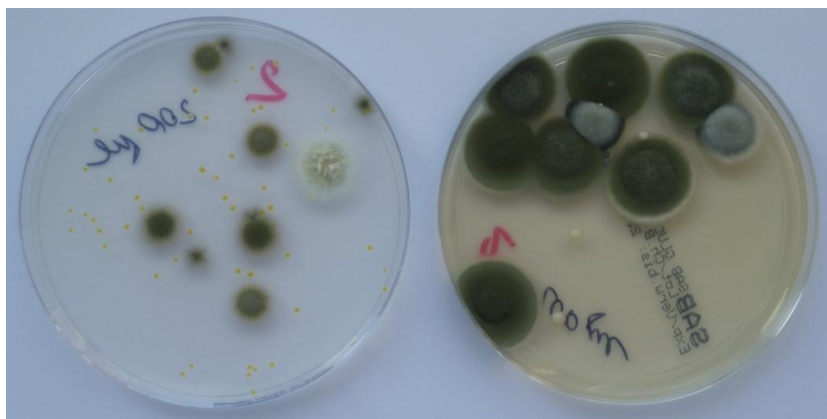
b) CFU – Colony Forming Unit (česky: KTJ – Kolonie Tvořící Jednotku).

c) Stěr odebrán v domě s nuceným větracím systémem, ale bez zemního výměníku tepla.

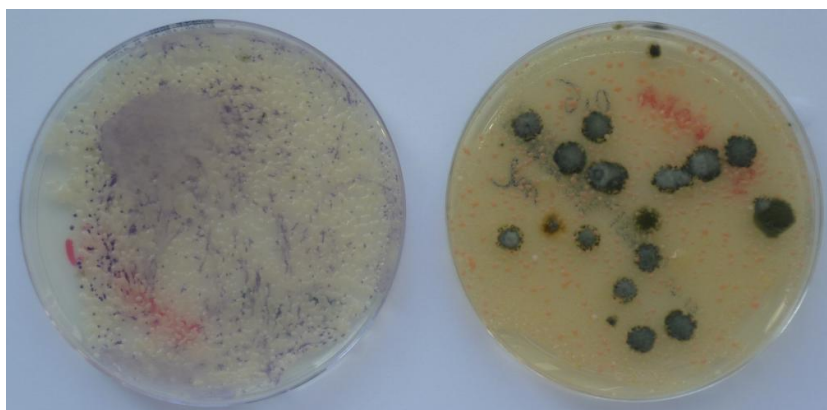
U experimentálního zemního výměníku VUT byl navíc proveden i stěr ze stěny sběrné a kontrolní šachty (viz **tab. 7.2**, označení „1b“ a „1c“). Jelikož v době odběrů byla v kontrolních šachtách výměníků č. 3 a 6 objevena voda, odebral se zde z přítomné vody další mikrobiologický vzorek, nesoucí označení „b“. U výměníku č. 3 (**obr. 7.3**) se nejspíše jednalo o kontinuální průsak dešťové nebo podzemní vody vlivem nevhodné konstrukce kontrolní šachty (betonové kanalizační skruže, **obr. 8.2** vlevo). Majitelé v tomto případě vodu v ZVT dosud nepostřehli, ani nikterak neodčerpávali; z důvodu dlouhodobé zahraniční cesty celé rodiny je totiž tento dům, resp. zemní výměník, více než rok nevyužívaný a vzducho-

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

technika s vytápěcím systémem vypnutá. V druhém případě (**obr. 7.4**) se nepodařilo zjistit zdroj vody ve výměníku – s největší pravděpodobností se jednalo o průsak spodní vody do potrubní trasy výměníku (**obr. 8.22** vlevo); zůstatek kondenzátu po letním provozu ZVT je vlivem trvalého provozu vzduchotechniky méně pravděpodobný. Všechny ostatní výměníky byly v době odběru zcela suché. Někteří majitelé ovšem v průběhu roku potvrzují určité problémy s průsaky vody do potrubní trasy [86], zejména při zvýšené hladině spodní vody po dlouhodobých deštivých obdobích či jarním tání sněhu.



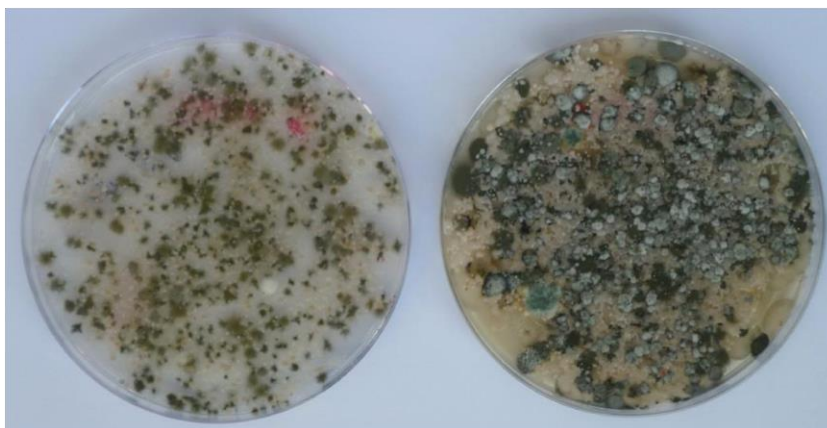
Obr. 7.2: Vykultivované kolonie z odebraného stěru na ZVT č. 2 – vlevo: agar CZD, vpravo: agar SAB



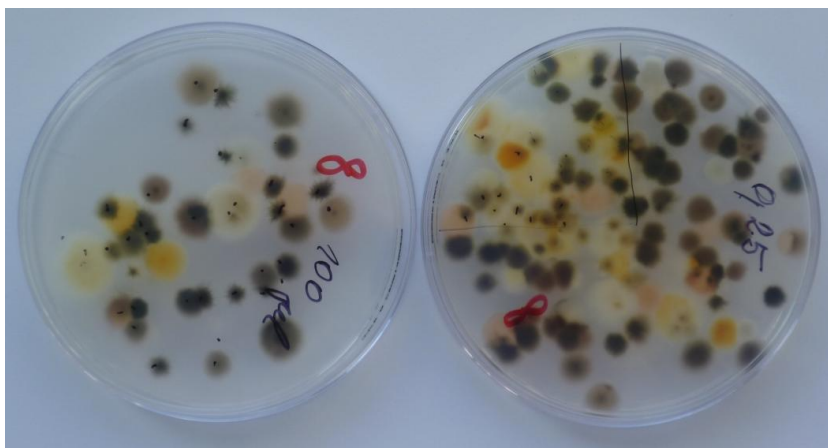
Obr. 7.3: Vykultivované kolonie z odebraného vzorku na ZVT č. 3 – vlevo: agar CZD, vpravo: agar SAB (nahore případ stěru z potrubí, dole případ rozboru z vody)

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

Celkový počet vykultivovaných kolonií plísní, vztažených na 1 cm² odebraného stěru, udává poslední sloupec **tabulky 7.2**. Příklady některých Petriho misek s vyočkovanými a narostlými koloniemi bakterií a plísní jsou uvedeny na **obr. 7.2 až 7.6**. Ve většině případů převažuje nárůst kolonií vláknitých hub různých rodů a druhů, tj. plísní (modrozelené oblasti). Zastoupeny zde byly běžné vzdušné a půdní mikroorganismy rodu *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium* a *Mucor*. U vzorků z odebrané vody však převažuje nárůst jednobuněčných mikroorganismů, tj. kvasinek (drobné bílé kolonie na **obr. 7.3, 7.4 a 7.6**). U výměníků č. 7 a 11 byly ve stěrech z potrubí detekovány kvasinky rodu *Rhodotorula*. Z finančních důvodů se další zařazení do rodů plísní a kvasinek u ostatních vzorků neprovádělo.



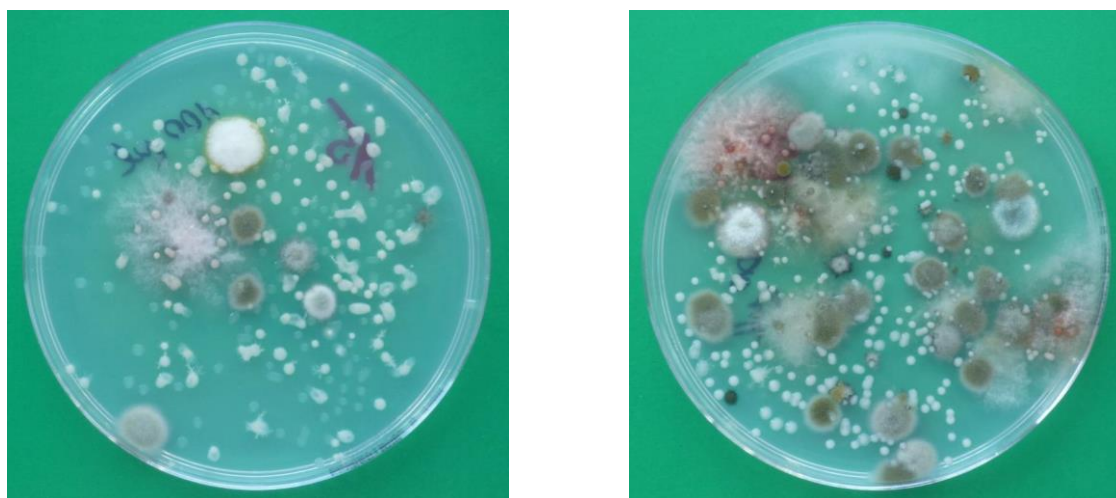
Obr. 7.4: Vykultivované kolonie z odebraného vzorku vody na ZVT č. 6 – vlevo: agar CZD, vpravo: agar SAB



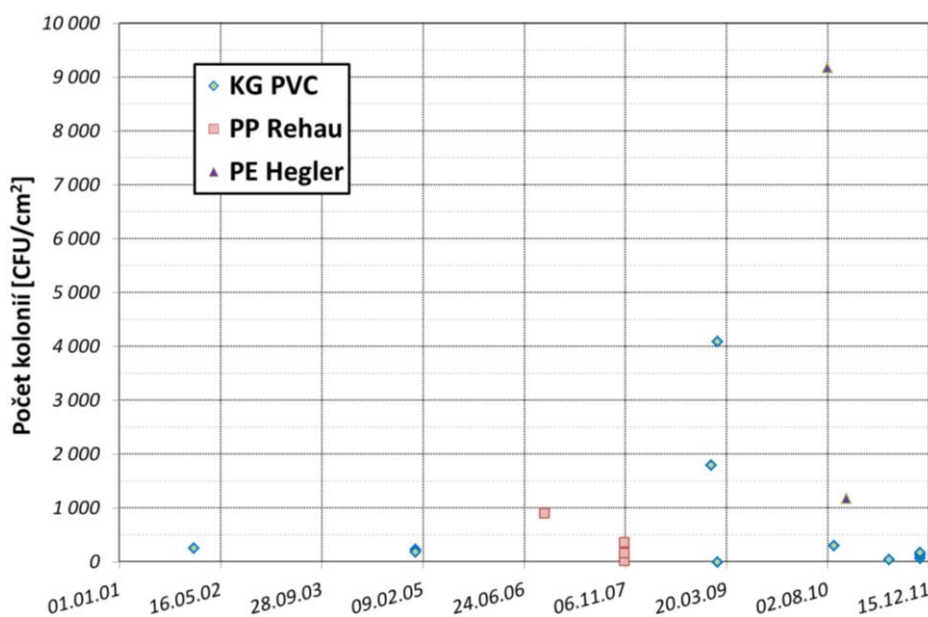
Obr. 7.5: Vykultivované kolonie z odebraného stěru na ZVT č. 8 (obojé agar CZD)

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 (č. 1) – ostatní majitelé řeší pouze výměnu filtrů ve VZT jednotce (1× ročně), někteří při tom čistí i vzduchotechnickou jednotku a rekuperační výměník tepla (viz **kap. 8.1**). Převážná část monitorovaných zařízení se nachází na okraji města, kde se dá předpokládat nižší míra okolního znečištění. Uvnitř města, v blízkosti vedlejší relativně rušné komunikace, se nachází jen tři ze zkoumaných ZVT (č. 4, 8 a 14).

V dalším textu bude posouzen vliv délky provozu zemního výměníku a vlivu materiálu na celkové detekované znečištění u jednotlivých monitorovaných ZVT.



Obr. 7.6: Vykultivované kolonie (agar CZD) z odebraného stěru č. 15 – vlevo: po 2 týdnech, vpravo: po 4 týdnech



Obr. 7.7: Počet vykultivovaných kolonií plísní v závislosti na době realizace (resp. stáří ZVT)

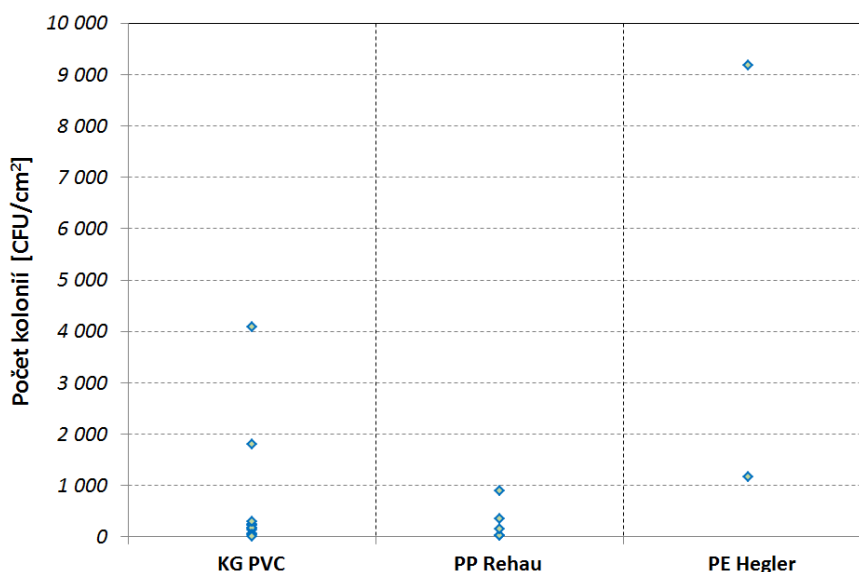
➤ Znečištění dle stáří realizace

Na **obr. 7.7** je uvedeno grafické srovnání 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 – řízené přepínání sání do ZVT (dle venkovní teploty) mají pouze výměníky č. 1 a 6. Stálým prouděním vzduchu se totiž zkondenzovaná vlhkost rychle odpaří zpět do vzduchu a plísně tak nemají potřebný zdroj vlhkosti pro svůj růst. Jelikož filtrační tkanina na vstupu do ZVT není schopná zachytit všechny nečistoty (viz **obr. C.5** vpravo), dochází vždy k určitému průniku prachu do vzduchotechnické jednotky –

z tohoto důvodu by se nemělo zapomínat na instalaci a pravidelnou výměnu filtru na vstupu VZT jednotky. Tím se zajistí, aby se nežádoucí znečištění nedostávalo do rekuperačního výměníku, vzduchotechnických rozvodů a dále do interiéru domu.

Zanedbatelné mikrobiologické znečištění bylo v této počáteční studii stanoveno pouze u stěru z potrubí výměníku č. 6; přitom tento nemá na vstupu do ZVT instalovánu žádnou výměnnou filtrační tkaninu (pouze síťku proti vniknutí větších částic a hmyzu) a v odebrané vodě se mikrobiologická kontaminace potvrdila – viz **tab. 7.2**, vzorek „6b“. Zde však bylo, při počáteční kontrole celého zařízení, na fasádní tvarovce sání za protidešťovou žaluzií (**obr. 8.16** vpravo) zjištěno větší množství bílého (zřejmě stavebního) prachu. Stejný prach byl patrný také na plastovém potrubí ZVT vstupujícím do domu (např. **obr. 8.17** vlevo). Tato vrstva prachu – pocházející nejspíše z doby realizace hrubých vápenných omítek a následných dokončovacích prací v domě, příp. stavebních prací v okolí domu – zřejmě v místě stěru vytvořila zásadité prostředí, jenž nedovolilo přežít usazeným sporům plísní. Překvapivě také další výměník bez vstupní filtrace vzduchu (č. 7) nedopadl nejhůře. Vysvětlení lze hledat v relativně nedávné instalaci (cca 2 roky) nebo jeho výhodnější poloze na konci vesnice – daleko od rušné komunikace a dalších zdrojů znečištění.

V době těchto 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 zemnímu výměníku z certifikovaného potrubí Awadukt Thermo č. 13 dosahovalo cca ¼ hodnoty.



Obr. 7.8: Počet vykultivovaných kolonií plísní v závislosti na použitém potrubním systému

➤ Znečištění dle materiálu potrubí

Dále se zaměříme na to, jaký vliv na mikrobiologické znečištění má použitý potrubní systém. Výsledky jsou proto dle materiálu potrubí seřazeny do tří skupin (viz **obr. 7.8**). Z realizovaných stěrů – ale bez vzorků odebraných z šachet a vody – tak vycházejí jednotlivé průměrné hodnoty CFU/cm² (**tab. 7.3**).

Tab. 7.3: Srovnání jednotlivých typů potrubních systémů

Typ potrubí:	KG PVC	PP Rehau	PP Hegler
Průměrná hodnota [CFU/cm ²]	383	292	5175
Procentuální porovnání s KG PVC	---	-24 %	+1252 %

Z **obr. 7.8** – pomineme-li výsledek z rozboru vody zemního výměníku č. 6 – je na první pohled vidět, že certifikované potrubí s antimikrobiální úpravou povrchu *Awadukt Thermo* se zásadně neodlišuje od „obyčejného“ kanalizačního potrubí KG PVC. Průměrná hodnota znečištění je u tohoto speciálního potrubí sice o cca ¼ nižší (viz srovnávací tabulka výše), to je ale způsobeno hlavně „*mimolehlou*“ hodnotou znečištění u výměníku č. 8 z KG PVC – jenž je (zřejmě kvůli nasávání vzduchu do ZVT v blízkosti rušné komunikace) 6× vyšší než je druhá nejvyšší hodnota znečištění u výměníku z téhož typu potrubí (č. 7). Pokud bychom tuto výjimečnou hodnotu do statistického vzorku nezahrnuli, byla by situace odlišná – průměrné mikrobiální znečištění u potrubí KG PVC by vycházelo 147 CFU/cm², což je cca ½ hodnoty průměrného znečištění u potrubí PP Rehau. Pro jednoznačný závěr by bylo nutné rozšířit statistický vzorek minimálně na 25 ks od každého typu potrubí.

Nejednoznačný výsledek mezi KG PVC a PP Rehau je s největší pravděpodobností zapříčiněn nedostatečnou údržbou u zkoumaných zemních výměníků. Pro správnou antimikrobiální funkci „*postříbřeného*“ povrchu musí být nutně procházející vzduch s tímto povrchem v permanentním kontaktu. Jak však bylo zmíněno již dříve, filtrace na vstupu vždy propouští do potrubní trasy určité množství částic (mikropach – viz **obr. C.5** vpravo). Pokud se ZVT pravidelně nečistí, vytvoří se časem na povrchu souvislá vrstva, jenž „*odstíní*“ vliv stříbrných iontů zabudovaných v materiálu potrubí. Z tohoto pohledu je potřeba zemní výměník pravidelně čistit (mechanicky, tlakovou vodou atp.) – alespoň 1× ročně.

U systému PE Hegler (potrubí Hekatherm) se může zdát, že způsobuje problémy s vyššími koncentracemi mikrobiologického znečištění. Je to dáno jednak nízkým počtem odebraných vzorků – podařilo se zajistit pouze dva ZVT ze stejné lokality a identické konstrukce – ale s velkou pravděpodobností je to spíše zapříčiněno nevhodným umístěním filtračního boxu v potrubní trase (např. **obr. C.4** vlevo). Ten je zde umístěn uvnitř technické místnosti, v těsné blízkosti podlahy, přičemž je instalován v nevýhodné vertikální poloze. Větší nečistoty zachycené na filtrační tkanině se tak mohou po čase uvolnit (např. po vypnutí větrací jednotky) a padat směrem dolů, zpět do zemního výměníku. Protože se v tomto případě (ZVT č. 4 a 14) stěry z potrubí odebíraly právě pod filtračním boxem (**obr. C.4** vpravo), mohlo zde být potrubí více znečištěné a výsledné koncentrace tedy podstatně vyšší.

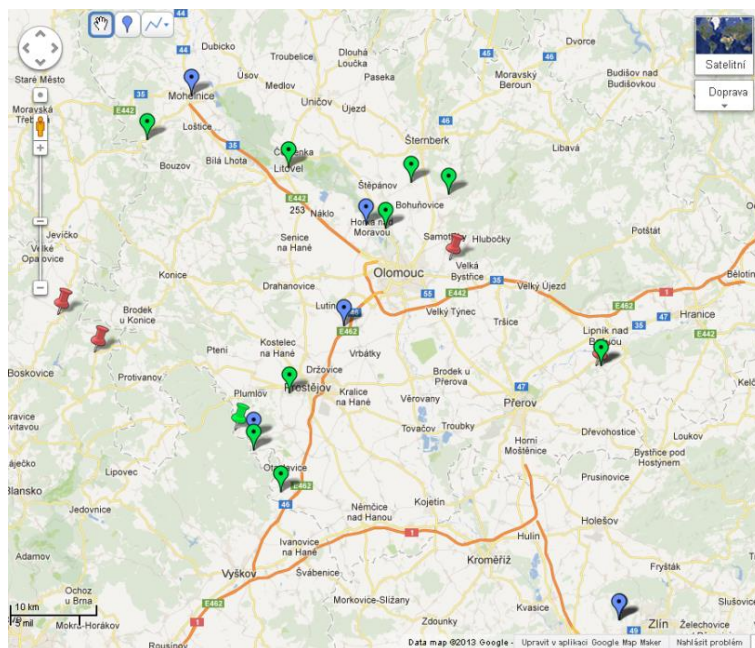
7.2 Gravimetrická metoda

Kvůli velké citlivosti na volbu místa odběru – což je největší nevýhoda metody stěru – a také problematickému dodržení stejně velké plochy stěru ze stěny potrubí 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

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

vzduchotechnickým řetězcem (potrubí, filtry atd.). Metoda stěrů rovněž nereflektuje míru znečištění vzduchu nasávaného do zemního výměníku, jež bývá ve většině případů vyšší než uvnitř budovy.

Pro další kolo odběrů se podařilo oslovit celkem 46 majitelů ZVT (oproti předchozím 14), z toho 35 se jich do výzkumu aktivně zapojilo (viz **tab. 7.1**) – hlavně díky **Ing. Stanislavu Karáskovi**, který poskytl cenné kontakty na majitele zemních výměníků tepla u staveb NED a EPD realizovaných společností *KARON s.r.o.* Většina nově zahrnutých zařízení navíc používá plnostěnné polypropylenové potrubí **KG PP 2000 (obr. 3.8)**, které u předešlé studie nebylo zastoupeno. Bylo tak možné posoudit další typ potrubí, u něhož lze z důvodu vhodnějšího řešení těsnění hrdla (tj. zamezení průsaku vody a radonu) předpokládat nižší míru znečištění oproti „obyčejnému“ kanalizačnímu PVC potrubí. Potrubí PP Hegler již v druhém kole monitoringu bohužel nebylo zastoupeno – oba majitelé o další mikrobiologické rozборы již neměli zájem, a třetí dohledaný výměník ze stejného potrubního systému (č. 41) byl zprovozněn až začátkem r. 2016 (navíc se nachází až cca 200 km od Brna). U potrubí Hekatherm se tak nepodařilo realizovat očekávané porovnání s výsledky metody stěrů.



Obr. 7.9: Ukázka části plánu (Olomouc a okolí) druhého kola sběru mikrobiologických vzorků ze ZVT (zdroj: <https://www.google.cz/maps/>)

Přesto však bylo zastoupeno relativně široké spektrum vzduchových zemních výměníků z moravského regionu a Českomoravské vysočiny (kraje Jihomoravský, Olomoucký, Zlínský, Vysočina a Pardubický); pouze 6 oslovených majitelů nemělo o spolupráci zájem. Vesměs se jedná o realizace v rodinných domech; zastoupeny zůstaly také dva bytové domy z předchozí studie a nově přibýly dvě relativně velké instalace (ekologické vzdělávací centrum Sluňákov v Horce nad Moravou a Moravská zemská knihovna v Brně). Ve dvou případech se podařilo odebrat vzorky před a po čištění ZVT (k tomu se ještě jednalo o „postříbřené“ potrubí PP Rehau), bude tak možno zběžně posoudit vliv čištění na kvalitu přiváděného vzduchu. Provedeny byly i odběry ze třech domů na Zlínsku s nuceným větráním bez instalovaného ZVT. Objekty však leží ve stejné lokalitě jako hodnocené rodinné domy se zemními výměníky,

bude tak možno alespoň rámcově posoudit vliv tohoto zařízení na kvalitu vzduchu v interiéru budovy. Z důvodu většího počtu monitorovaných ZVT (tzn. i nutně složitější koordinace volných termínů se všemi majiteli) a delších dojezdových vzdáleností musel být předem stanoven přesný plán odběrů (viz např. **obr. 7.9**). Dostí významnou roli v plánování sehrálo také počasí – cca 1 den před, a samozřejmě v čas samotných odběrů, nesmělo pršet (krátkodobé mrholení předem bylo akceptovatelné). Déšť ze vzdušného aerosolu totiž „smyje“ většinu spor, jež jsou za normální situace vždy v ovzduší přítomny, a výsledné detekované znečištění by tak vycházelo zkresleně.

Jelikož v roce 2013 laboratoř IFCOR-99 nedisponovala žádným přenosným zařízením pro mikrobiologické odběry aktivním nasáváním vzduchu – tzv. „aeroskopem“, jenž je dle Vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. [141] třeba k hodnocení mikrobiální kvality vnitřního prostředí (stanoví se jím koncentrace bakterií a plísní na 1 m³ nasátého vzduchu), musela se zvolit metoda, která se svou podstatou nejvíce blíží metodě „aktivního nasávání vzduchu“. Byla proto navržena „prostá“ gravimetrická (tj. sedimentační) metoda, kdy se spory ze vzdušného aerosolu zachytávají na misky se živnou agarovou půdou samovolným spadem, tzn. vlivem přirozeného proudění. V případě odběrů uvnitř VZT jednotky samozřejmě docházelo i k záhytu vlivem nuceného proudění vzduchu potrubím. Oproti nucenému záhytu s přesně definovaným objemovým průtokem vzduchu při odběru pomocí aeroskopu je tato metoda samozřejmě méně přesná, a především není definován přepočít na 1 m³ vzduchu. Ne vždy se navíc podařilo umístit misky kolmo ke směru proudění vzduchu, což rovněž mohlo ovlivnit dosažené výsledky. Na základě těchto metod proto nelze vyslovit jednoznačné závěry ohledně kvality vnitřního prostředí (tj. zatřídění do kategorie znečištění) dle zmíněné *Vyhlášky* č. 6.

Při použité gravimetrické metodě se odběr mikrobiologického materiálu prováděl přímo na předem připravené plastové Petriho misky s živnou agarovou půdou. Nebylo tak nutné vzorky před kultivací nikterak dále zpracovávat – misky se vložily rovnou do termostatu, kde byly (opět za konstantní teploty) dva týdny kultivovány. Použity byly ověřené agary z předešlé metody (tj. **CZD** – „*Czapek Dox*“, **SAB** – „*Sabouraud*“) [86]. Misky s CZD agarem byly kultivovány při 27 °C, přičemž 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 (znečištění bakteriemi bylo stanoveno jen v několika málo případech).

Předem bylo provedeno několik pokusů s dobou expozice otevřených misek v laboratoři (**obr. 7.10**) a mimo ni (tj. venku na parapetu), na základě čehož byla jako optimální doba odběru v exteriéru a interiéru určena 1 hodina; to odpovídá i doporučené hodnotě z metodiky [142]. Nakonec se tato doba dodržovala i v případě odběrů ze vzduchotechnické jednotky – výsledné hodnoty byly totiž normalizovány dle naměřeného průtoku větracího vzduchu (pouze v pěti případech se nepodařilo průtok stanovit, viz dále). Referenční hodnota CFU je uvažována ze vzorku odebraného ve venkovním prostředí, poblíž vstupu do ZVT. Vyhodnoceno a porovnáno bylo rovněž mikrobiální znečištění v nejvíce exponované místnosti domu dle určení majitele (zpravidla obývací nebo dětský pokoj). Celkově tak na jeden zemní výměník připadaly min. 4 odběry; v některých případech byly odběry provedeny i z více míst. Z důvodu přehlednosti a rychlosti manipulace se misky chystaly vždy den předem (**obr. C.8**), přičemž se pečlivě označily nesmazatelným fixem

a potřebný počet kusů se zabalil do stahovací potravinářské folie. Dodané misky z laboratoře byly skladovány v lednici při teplotě cca 5 °C.



Obr. 7.10: Zkouška různých dob expozice pro záchyt bioaerosolu z vnitřního prostředí budovy – CZD agar

Odběry vzorků probíhaly vícekolově v období červen až prosinec 2013 – koncem června byly odebrány první zkušební vzorky z pěti brněnských zemních výměníků, kdy se zkoušela reprezentativnost nové metody sběru biologického materiálu. Po ověření metody se pokračovalo „ostrými“ odběry na všech domluvených lokalitách. Zároveň se zde měřila i teplota, relativní vlhkost a barometrický tlak vzduchu ve venkovním a vnitřním prostředí. Průměrné hodnoty okolních podmínek při všech realizovaných odběrech uvádí **tab. 7.4**. Další faktory související s provozem a užíváním domu (četnost úklidu, přítomnost domácích mazlíčků a další možné zdroje znečištění uvnitř i mimo interiéru atp.) byly, pokud možno, ve většině případů zaznamenávány při dotazníkové studii – viz **kap. 8.1**.

Tab. 7.4: Podmínky při odběrech gravimetrickou metodou v r. 2013 – průměrné hodnoty

č.	Lokalita	Datum odběru	Exteriér			Interiér		
			Teplota [°C]	RH [%]	Tlak [hPa]	Teplota [°C]	RH [%]	Tlak [hPa]
1z	Brno – FSI VUT	20.6.	31,0	55,0	978,3	27,7	62,2	978,2
1	Brno – FSI VUT	12.8.	25,0	41,7	980,4	24,1	42,8	980,3
1-1	Brno – FSI VUT	7.10.	15,2	59,9	991,7	20,6	42,3	991,5
1-2	Brno – FSI VUT	11.11.	5,3	67,7	994,8	19,7	35,1	994,7
1-3	Brno – FSI VUT	11.12.	2,5	71,3	999,4	20,4	28,1	999,2
2	Zlín-Louky	23.8.	22,1	49,5	985,7	23,1	54,6	986,1
5z	Brno-Bystrc	20.6.	31,2	51,0	985,5	28,6	60,3	985,9
5	Brno-Bystrc	12.8.	26,4	37,8	990,8	26,5	45,9	990,8
6	Brno-Obřany	1.8.	28,7	43,8	994,5	28,4	47,5	994,3

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

6-1	Brno-Obřany	23.8.	21,3	52,7	994,2	23,7	49,0	994,2
7	Křtiny	31.7.	24,4	49,5	965,9	25,5	59,5	966,8
9	Židlochovice	1.8.	30,8	34,4	997,7	29,4	44,0	997,6
9*	Židlochovice	3.10.	10,9	42,4	1008,5	23,7	37,3	1008,2
10	Židlochovice	1.8.	29,2	42,6	996,9	30,4	43,6	997,2
11	Židlochovice	1.8.	28,6	43,1	997,3	28,6	46,1	997,4
12	Židlochovice	1.8.	29,2	46,3	997,2	29,4	44,0	997,3
12*	Židlochovice	3.10.	10,2	42,9	1008,8	24,2	38,5	1008,8
13	Židlochovice	1.8.	30,1	38,3	996,9	28,9	47,4	997,1
15z	Veverské Knínice	20.6.	30,3	60,0	976,8	26,0	65,5	977,1
15	Veverské Knínice	12.8.	24,3	39,5	980,1	23,6	48,9	980,2
16	Květná u Poličky	17.7.	25,2	45,9	954,9	25,7	45,0	955,2
17	Květná u Poličky	17.7.	25,2	45,9	954,9	24,9	52,0	955,2
18	Rapotice	21.10.	18,0	62,0	961,8	25,4	53,2	962,1
19z	Brno-Žebětín	20.6.	28,9	60,5	980,6	29,0	60,0	980,8
19	Brno-Žebětín	12.8.	25,8	37,6	981,3	26,7	42,4	981,0
20z	Brno-Kníníčky	20.6.	30,9	54,0	988,5	27,1	70,5	987,8
20	Brno-Kníníčky	31.7.	28,3	44,5	991,1	26,7	50,7	990,8
21	Brněnské Ivanovice	16.7.	22,0	47,0	990,7	23,7	42,0	991,1
22	Lednice	18.10.	14,9	59,3	999,6	20,2	56,0	999,7
23	Ondratice	15.7.	22,4	45,0	987,9	24,8	53,0	987,8
24	Myslejovice	15.7.	21,9	55,0	975,9	23,9	47,0	976,2
25	Prostějovičky	15.7.	30,6	52,0	974,3	25,7	56,4	974,5
26	Prostějovičky	15.7.	31,2	51,5	974,0	26,2	54,0	974,1
27	Prostějov-Čechovice	15.7.	23,1	43,5	991,5	23,0	48,0	991,6
28	Chomoutov	18.7.	31,9	37,0	996,3	29,0	47,0	996,3
30	Bělkovice-Lašťany	18.7.	31,5	36,5	990,4	26,7	48,5	990,0
31	Litovel	18.7.	26,8	45,5	993,9	27,4	49,7	993,9
32	Hlinsko	18.7.	25,5	52,0	988,3	24,4	56,7	988,4
33	Pavlov u Veselí	17.7.	26,5	35,5	973,5	26,6	45,5	973,6
34	Křenůvky	15.7.	19,8	49,9	980,7	24,4	46,0	981,1
35	Mohelnice	17.7.	29,5	36,0	990,7	27,1	44,0	990,7
36	Židlochovice	3.10.	10,9	45,6	1008,7	24,3	41,7	1008,5
37	Jinačovice	31.7.	25,1	48,3	981,5	24,7	48,5	981,6
38	Soběšice	1.8.	27,7	40,1	977,4	29,1	44,4	997,3

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

39 A	Horka nad Moravou	6.8.	32,5	46,3	990,0	27,6	55,4	989,9
39 U	Horka nad Moravou	6.8.	32,2	46,5	990,2	27,9	55,0	990,0
40 A	Brno-MZK	10.10.	14,2	75,0	980,0	23,7	43,6	979,6
40 P	Brno-MZK	10.10.	14,2	75,0	980,0	23,3	45,4	979,8
40 S	Brno-MZK	10.10.	14,2	75,0	980,0	22,2	42,6	980,1
Z1	Zlín-Louky	23.8.	23,1	45,3	986,8	23,7	53,6	987,0
Z2	Zlín-Louky	23.8.	23,1	45,3	986,8	23,9	54,0	987,3
Z3	Zlín-Louky	23.8.	22,1	47,4	985,8	24,4	49,5	986,3

Pozn.: **Xz** – zkušební odběry (ověření nové metody).

X* – odběry provedené cca 2 měsíce po vyčištění ZVT a výměně filtrů ve vzduchotechnice.

Vzorky č. 1-1, 1-2 a 1-3 byly odebrány v cca měsíčním rozestupu, přičemž byl zkoumán vývoj v čase.

Při odběrech u vzorku č. 6 byl objeven problém s přepínací T-klapkou z fasády do ZVT, proto byl odebrán ještě další vzorek č. 6-1 (zde již byl nasáván všechny větrací vzduch přes zemní výměník).

39 A – administrativní místnost, 39 U – vybraná učebna.

40 A – administrativní místnost, 40 P – místnost půjčovny knih, 40 S – vybraný sklad knih.

Z1 až Z3 – domy s nuceným větráním, ale bez zemních výměníků tepla.

Kompletní výsledky všech mikrobiologických rozborů s doplňujícími informacemi jsou uvedeny v **tab. 7.5** a **7.6**. Při zkušebních odběrech se testovala pouze miska s agarem CZD; druhý agar (SAB) se využíval až v dalších kolech monitoringu. Jako hraniční hodnota rozpoznatelnosti je uváděno 400 CFU [86] – nad touto hodnotou je již obtížné přesně stanovit celkový počet kolonií. Z počtu narostlých kolonií, změřeného objemového průtoku vzduchu a doby odběru se následně vypočetla hodnota měrného záchytu plísní na 1000 m³ nasátého vzduchu – takto lze mezi sebou jednotlivé odběry alespoň částečně porovnat.

Tab. 7.5: Výsledné počty vykultivovaných jednotek CFU vztažené na 1000 m³ větracího vzduchu

č.	Lokalita	Datum odběru	Potrubní systém	Množství vzduchu [m ³]	Filtrace na vstupu	Čištění ZVT	CZD agar ^{a)} CFU/1000 m ³	SAB agar ^{b)}
1z	Brno-FSI VUT	20.6.	KG PVC	368,9	ANO	jaro 2012	1063	<i>nehodnoceno</i>
1	Brno-FSI VUT	12.8.	KG PVC	417,7	ANO	jaro 2012	412	3 (<i>Penicillium</i>)
1-1	Brno-FSI VUT	7.10.	KG PVC	318,8	ANO	jaro 2012	528	0
1-2	Brno-FSI VUT	11.11.	KG PVC	279,4	ANO	jaro 2012	15	0
1-3	Brno-FSI VUT	11.12.	KG PVC	167,9	ANO	jaro 2012	78	0
2	Zlín-Louky	23.8.	KG PVC	125,3	NE	NE	1788	24 (<i>Penicillium</i>)
5z	Brno-Bystrc	20.6.	KG PVC	101,8	ANO	NE	600 (40)	<i>nehodnoceno</i>
5	Brno-Bystrc	12.8.	KG PVC	115,0	ANO	NE	548	0 (<i>Bakterie</i>)
6	Brno-Obřany	1.8.	KG PVC	- - - ^{d)}	sítka	NE	<i>nehodnoceno</i>	<i>nehodnoceno</i>

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

6-1	Brno-Obřany	23.8.	KG PVC	137,1	sítka	NE	1693	22 (<i>Mucor, A. flavus</i>)
7	Křtiny	31.7.	KG PVC	83,3	NE	NE	4802	0
9	Židlochovice	1.8.	PP Rehau	73,2	ANO	NE	2516	0
9*	Židlochovice	3.10.	PP Rehau	150,3	ANO	09/2013	1198	0
10	Židlochovice	1.8.	PP Rehau	122,2	ANO	NE	1997	0
11	Židlochovice	1.8.	PP Rehau	63,0	ANO	NE	2667	0
12	Židlochovice	1.8.	PP Rehau	109,2	ANO	NE	1686	0
12*	Židlochovice	3.10.	PP Rehau	107,1	ANO	09/2013	1075	0
13	Židlochovice	1.8.	PP Rehau	23,7	ANO	NE	2662	0
15z	Veverské Knínice	20.6.	KG PP	195,2	sítka	podzim 2012	523	<i>nehodnoceno</i>
15	Veverské Knínice	12.8.	KG PP	233,5	sítka	podzim 2012	866	13 (<i>Penicillium</i>)
16	Květná u Poličky	17.7.	KG PVC	272,3	NE	NE	720	4 (<i>Penicillium</i>)
17	Květná u Poličky	17.7.	KG PVC	104,2	NE	NE	2036	0
18	Rapotice	21.10.	PP Rehau	69,4	ANO	NE	3287	15 (<i>A. niger</i>)
19z	Brno-Žebětín	20.6.	KG PVC	---^{c)}	ANO	NE	<i>nehodnoceno</i>	<i>nehodnoceno</i>
19	Brno-Žebětín	12.8.	KG PVC	--- ^{c)}	ANO	NE	<i>nehodnoceno</i>	<i>nehodnoceno</i>
20z	Brno-Kníníčky	20.6.	KG PVC	123,0	sítka	NE	1725 (17)	<i>nehodnoceno</i>
20	Brno-Kníníčky	31.7.	KG PVC	121,0	sítka	NE	910	0
21	Brněnské Ivanovice	16.7.	KG PVC	--- ^{c)}	sítka	NE	<i>nehodnoceno</i>	<i>nehodnoceno</i>
22	Lednice	18.10.	KG PP	46,2	ANO	podzim 2012	1839	22 (<i>Aspergillus flavus</i>)
23	Ondratice	15.7.	PP Rehau	362,7	ANO	NE	127	6 (<i>A. niger, A. versicolor</i>)
24	Myslejovice	15.7.	KG PVC	124,0	ANO	podzim 2011	412	0
25	Prostějovičky	15.7.	KG PP	111,9	ANO	2012	2216	0
26	Prostějovičky	15.7.	KG PP	--- ^{c)}	ANO	2012	<i>nehodnoceno</i>	<i>nehodnoceno</i>
27	Prostějov-Čechovice	15.7.	KG PP	116,0	ANO	2009	552	0
28	Chomoutov	18.7.	KG PVC	129,5	ANO	2010	804	16 (<i>A. versicolor</i>)
30	Bělkovice-Lašťany	18.7.	KG PP	357,8	ANO	2012	196	6 (<i>A. niger</i>)
31	Litovel	18.7.	KG PP	53,0	ANO	09/2012	1208	38 (<i>Penicillium</i>)
32	Hlinsko	18.7.	KG PP	234,7	ANO	2009	273	0

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

33	Pavlov u Veselí	17.7.	KG PP	311,7	ANO	NE	206	0
34	Křenůvky	15.7.	KG PVC	--- ^{a)}	ANO	NE	nehodnoceno	nehodnoceno (<i>A. fumigatus</i> , <i>Penicillium</i>)
35	Mohelnice	17.7.	KG PP	77,4	ANO	jaro 2012	724	0
36	Židlochovice	3.10.	PP Rehau	124,5	ANO	NE	949	0
37	Jinačovice	31.7.	KG PVC	146,7	NE	NE	1225	0
38	Soběšice	1.8.	KG PVC	--- ^{a)}	sítka	2006	nehodnoceno	nehodnoceno
39 A	Horka nad Moravou	6.8.	KG PVC	576,3	sítka	NE	202	0
39 U	Horka nad Moravou	6.8.	KG PVC	1423,1	sítka	NE	143	0
40 A	Brno-MZK	10.10.	Beton	5617,7	NE	NE	9	---
40 P	Brno-MZK	10.10.	Beton	4639,2	NE	NE	9	---
40 S	Brno-MZK	10.10.	Beton	3528,0	NE	NE	13	---
Z1	Zlín-Louky	23.8.	---	216,0	sítka	---	1371	24 (<i>Penicillium</i>)
Z2	Zlín-Louky	23.8.	---	218,9	sítka	---	1024	10 (<i>Mucor</i> , <i>Penicillium</i>)
Z3	Zlín-Louky	23.8.	---	128,7	NE	---	2736	24 (<i>Mucor</i> , <i>Penicillium</i>)

Pozn.: Xz – zkušební odběry (ověření nové metody).

X* – odběry provedené cca 2 měsíce po vyčištění ZVT a výměně filtrů ve vzduchotechnice.

^{a)} Případná hodnota v závorce uvádí směsné populace bakterií [CFU/1000 m³].

^{b)} Směsné populace patogenních plísní – v závorce je uveden rod, příp. druh.

^{c)} Při odběrech se nepodařilo stanovit průtok větracího vzduchu.

Uvedené hodnoty představují míru znečištění větracího vzduchu ve vzduchotechnické jednotce se ZVT. Majitele zemních výměníků však více zajímá, jak si na tom stojí prostředí uvnitř budovy. Z tohoto důvodu je v **tab. 7.6** stanovena i relativní míra mikrobiálního znečištění uvnitř budovy – jedná se o poměr vykultivovaných kolonií v interiéru a v exteriéru. Podle metodiky pro odběr vzorků pomocí aeroskopu [142] 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. Proto bude dále rozebrán, tak jako u předešlé metody, pouze vliv stáří zařízení, použitého potrubního systému a nově vliv použité filtrace na vstupu do ZVT. 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.

Tab. 7.6: Výsledné počty vykultivovaných jednotek CFU (normovaných na čas odběru 1 hod.) a relativní míra mikrobiologického znečištění – určeno z agaru CZD

č.	Lokalita	Datum odběru	Okolní podmínky	Čas odběru [min]		CFU/hod.		Relativní míra znečištění
				Exteriér	Interiér	Exteriér	Interiér	
1z	Brno–FSI VUT	20.6.	OM	64	68	375	14	0,037
1	Brno–FSI VUT	12.8.	OM	72	71	147	15	0,102
1-1	Brno–FSI VUT	7.10.	OM	67	68	181	13	0,072
1-2	Brno–FSI VUT	11.11.	OM	71	76	7	8	1,184
1-3	Brno–FSI VUT	11.12.	OM	91	91	25	7	0,293
2	Zlín-Louky	23.8.	OM	94	95	256	61	0,238
5z	Brno-Bystrc	20.6.	OM	62	61	163	9	0,055
5	Brno-Bystrc	12.8.	OM	85	67	167	8	0,048
6	Brno-Obřany	1.8.	OM	71	66	56	4	0,071
6-1	Brno-Obřany	23.8.	OM	76	71	139	31	0,223
7	Křtiny	31.7.	V	75	66	125	88	0,704
9	Židlochovice	1.8.	OM	66	66	200	26	0,130
9*	Židlochovice	3.10.	OM	89	93	178	11	0,062
10	Židlochovice	1.8.	OM	86	85	148	15	0,101
11	Židlochovice	1.8.	OM	64	64	154	147	0,955
12	Židlochovice	1.8.	OM	77	77	159	9	0,057
12*	Židlochovice	3.10.	OM	113	113	164	5	0,030
13	Židlochovice	1.8.	OM	44	44	197	25	0,127
15z	Veverské Knínice	20.6.	V	72	63	164	7	0,043
15	Veverské Knínice	12.8.	V	77	65	198	42	0,212
16	Květná u Poličky	17.7.	V	68	82	293	94	0,321
17	Květná u Poličky	17.7.	V	68	101	209	20	0,096
18	Rapotice	21.10.	V	82	86	39	5	0,128
19z	Brno-Žebětín	20.6.	OM	60	60	76	6	0,072
19	Brno-Žebětín	12.8.	OM	69	70	234	58	0,249
20z	Brno-Knínice	20.6.	OM	62	63	56	21	0,375

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

20	Brno-Kníničky	31.7.	OM	77	68	197	124	0,629
21	Brněnské Ivanovice	16.7.	OM	60	66	12	3	0,250
22	Lednice	18.10.	OM	90	86	51	35	0,686
23	Ondratice	15.7.	VK	67	64	40	3	0,075
24	Myslejovice	15.7.	V	68	76	99	13	0,131
25	Prostějovičky	15.7.	V	91	91	264	18	0,068
26	Prostějovičky	15.7.	V	91	97	190	26	0,137
27	Prostějov-Čechovice	15.7.	UM	83	83	87	9	0,103
28	Chomoutov	18.7.	OM	65	71	61	50	0,820
30 ^{a)}	Bělkovice-Lašťany	18.7.	OM	206	196	28	4	0,143
31	Litovel	18.7.	OM	59	58	84	33	0,393
32	Hlinsko	18.7.	V	60	60	166	6	0,036
33	Pavlov u Veselí	17.7.	V	78	84	74	6	0,081
34	Křenůvky	15.7.	V	85	68	122	18	0,148
35	Mohelnice	17.7.	OM	63	70	103	23	0,223
36	Židlochovice	3.10.	OM	95	101	168	6	0,036
37	Jinačovice	31.7.	OM	79	77	219	125	0,571
38	Soběšice	1.8.	OM	63	61	30	8	0,267
39 A	Horka nad Moravou	6.8.	OM	87	90	127	4	0,031
39 U	Horka nad Moravou	6.8.	OM	63	76	206	8	0,039
40 A	Brno-MZK	10.10.	UM	66	74	220	16	0,073
40 P	Brno-MZK	10.10.	UM	66	74	230	5	0,022
40 S	Brno-MZK	10.10.	UM	66	73	226	3	0,013
K0	Brno-MZK	9.10.	UM	/	1800	/	83, (3) ^{b)}	/
K1	Brno-MZK	10.10.	UM	/	65	/	19, (18) ^{b)}	/
K2	Brno-MZK	10.10.	UM	/	66	/	186, (170) ^{b)}	/
K3	Brno-MZK	10.10.	UM	/	62	/	69, (67) ^{b)}	/
K4	Brno-MZK	10.10.	UM	/	63	/	9, (9) ^{b)}	/
K5	Brno-MZK	10.10.	UM	/	64	/	4, (4) ^{b)}	/

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

K6	Brno-MZK	10.10.	UM	/	64	/	68, (64) ^{b)}	/
K7	Brno-MZK	10.10.	UM	/	64	/	57, (54) ^{b)}	/
Z1 ^{a)}	Zlín-Louky	23.8.	OM	134	166	180	20	0,111
Z2 ^{a)}	Zlín-Louky	23.8.	OM	134	163	180	25	0,139
Z3 ^{a)}	Zlín-Louky	23.8.	OM	100	111	240	10	0,042

Pozn.: **Xz** zkušební odběry (ověření nové metody).

X* odběry provedené cca 2 měsíce po vyčištění ZVT a výměně filtrů ve vzduchotechnice.

„OM“ – okraj města, „UM“ – uvnitř města, „V“ – vesnice, „VK“ – vesnice v blízkosti komunikace.

a) Delší doby odběrů jsou zde způsobeny přejezdem na monitoring jiného ZVT.

b) Celkový počet vykultivovaných kolonií (CFU) směsných populací plísní a měrná hodnota CFU/hod. v závorce – vzorky K0 až K7 odebrány v různých místech akumulací komory zemního výměníku č. 40.

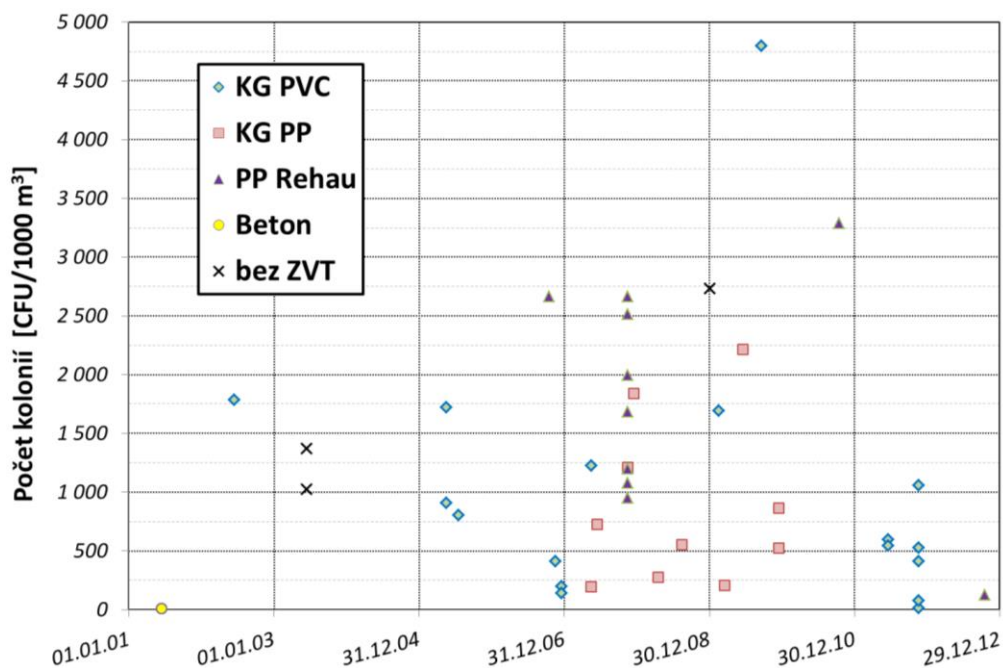
Podle výsledků z několika odběrů u experimentálního zemního výměníku FSI VUT (č. 1) je vidět, jak mikrobiální znečištění kolísá v čase, a potvrzuje se snižující se tendence v podzimních a zimních měsících. Zajímavé je také srovnání dvou odběrů realizovaných před a po vyčištění – cca 2 měsíce poté – ZVT č. 9 a 12; při této příležitosti byly také servisním technikem vyměněny všechny filtry, vyčištěna větrací jednotka a rekuperační výměník. Samotné čištění ZVT probíhalo pouze prostým zalitím potrubní trasy vodou s desinfekčním prostředkem a jejím následným odčerpáním – účinnější mechanické čištění nebylo z důvodu komplikované trasy možné provést. Rámcově lze říci, že po vyčištění zemního výměníku č. 9 kleslo znečištění ve VZT jednotce cca na 1/2; v případě výměníku č. 12 byl pokles nižší – cca na 2/3 původní hodnoty. Relativní znečištění vnitřního prostředí kleslo přibližně ve stejném duchu (č. 9: -57,7 %, č. 12: -44,4 %). Může se tak zdát, že vyčištěním došlo k markantnímu zlepšení mikrobiální kvality daného zařízení. Porovnáme-li však výsledky s experimentálním výměníkem FSI VUT, který nebyl v danou dobu čištěn (naposledy na jaře 2012) a u kterého se vzorky odebíraly přibližně ve stejném termínu, je situace poněkud odlišná. V tomto případě totiž vychází výsledky obdobné jako u dvou vydesinfikovaných ZVT – pokles znečištění na výstupu dosáhl 1/2 a relativní znečištění kleslo o cca 30 %. Dosažené výsledky tak lze překvapivě připsat spíše přirozenému poklesu 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.

➤ Znečištění v závislosti na stáří realizace

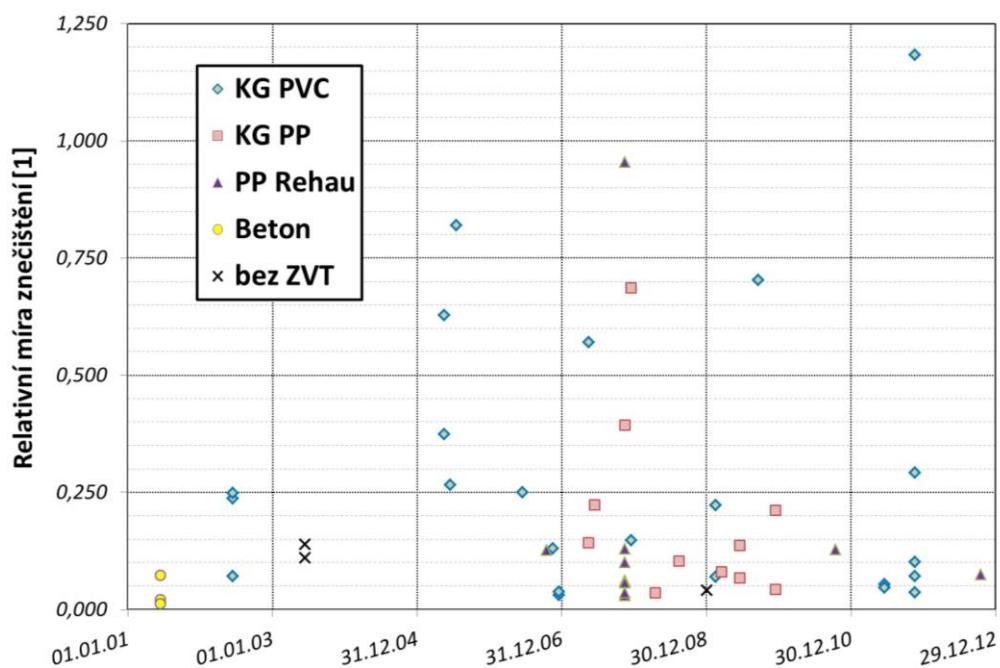
Měrné hodnoty počtu vykultivovaných kolonií (CFU/1000 m³), seřazené podle stáří realizace jednotlivých monitorovaných zařízení, jsou uvedeny na **obr. 7.11**. Dosažené koncentrace mikrobiálního znečištění ve VZT jednotce, naměřené na rozšířeném statistickém vzorku zemních výměníků, také nepotvrzují zvětšující se znečištění vlivem delšího provozu. Přitom pouze asi 1/3 z celkového počtu 35 výměníků byla od svého uvedení do provozu nějakým způsobem čištěna. Jedině u dvou zařízení se hodnoty znečištění trochu odlišují – jedná se o výměník č. 7 (s nejvyšší naměřenou hodnotou 4802 CFU/1000 m³) a č. 18 (s hodnotou 3287 CFU/1000 m³). V prvním případě je s největší pravděpodobností na vině absence jakékoliv filtrace na vstupu do ZVT, spolu s nevhodným nasáváním vzduchu v těsné blízkosti

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla

země (viz **obr. 8.2** vpravo). V dalším případě to do jisté míry zapříčinila „opožděná“ výměna filtru ve větrací jednotce – kvůli vysoké zátěži sazného prachu od sousedního domu byl již filtr několik měsíců za hranicí své jímací schopnosti (**obr. 7.13**). Na nánosu organického materiálu pak mohly začít zachycené spory růst a případně se množit dále (mikrobiologický rozbor filtru však nebyl proveden).

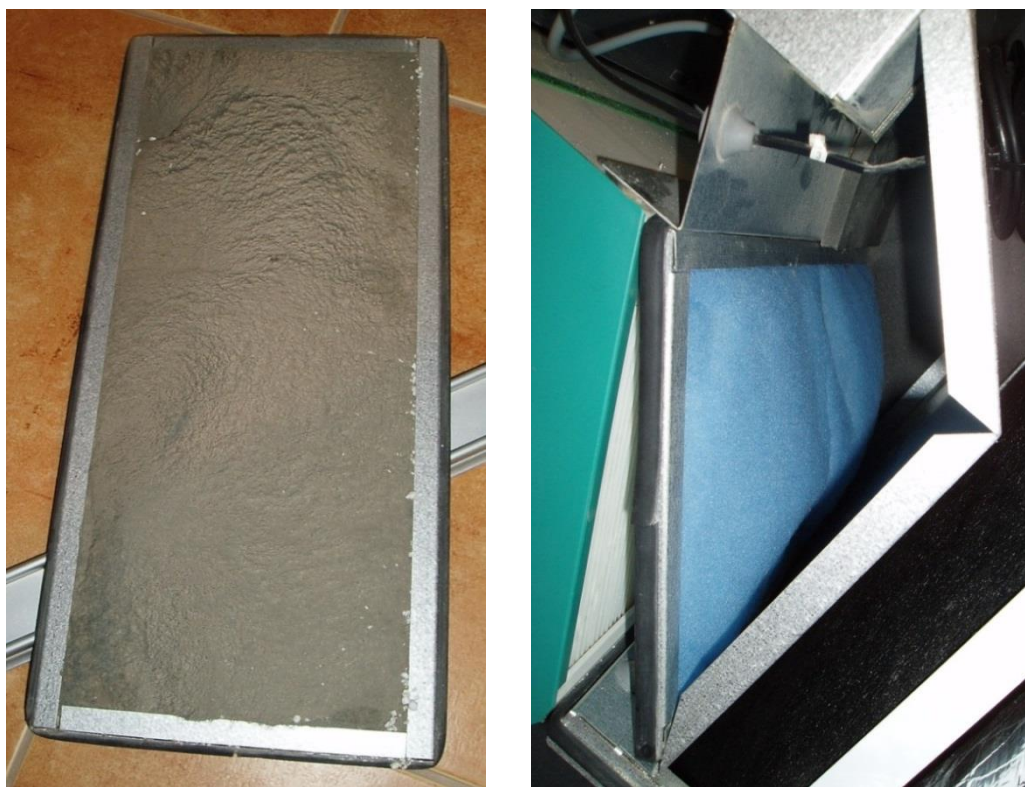


Obr. 7.11: Měrný počet kolonií plísní vykultivovaných z větracího vzduchu ve VZT jednotce (na agaru CZD) v závislosti na typu a době realizace zařízení



Obr. 7.12: Relativní míra mikrobiologického znečištění interiérového vzduchu v závislosti na době realizace (výsledky kultivace na agaru CZD)

Celkově nejlépe dopadl zemní výměník, resp. vzduchotechnický systém v Moravské zemské knihovně Brno. Jelikož se jedná o aplikaci větších rozměrů, jsou VZT jednotky kontrolovány a servisovány (výměna filtrů atp.) v častějších intervalech, než je tomu běžně u rodinných domů. Mohlo napomoci i to, že akumulární komora (tj. meziprostor pod budovou) byla několik let po uvedení do provozu vydesinfikována vápenným nátěrem. Z jiného úhlu pohledu by to mohlo být zapříčiněno vyššími průtoky vzduchu vzduchotechnickou jednotkou, kdy se vlivem vysoké rychlosti obtékání (nad Petriho miskou) nestihly usadit přicházející spory – rychlosti proudění uvnitř VZT jednotek totiž při monitoringu nebyly měřeny. Vidíme také, že dva ze tří domů bez instalovaného ZVT se výrazně neodlišují od těch, které výměník mají. Jelikož byly pro srovnání provedeny pouze 3 odběry, bylo by do budoucna vhodné provést další kolo monitoringu na rozšířeném vzorku domů bez zemních výměníků tepla.



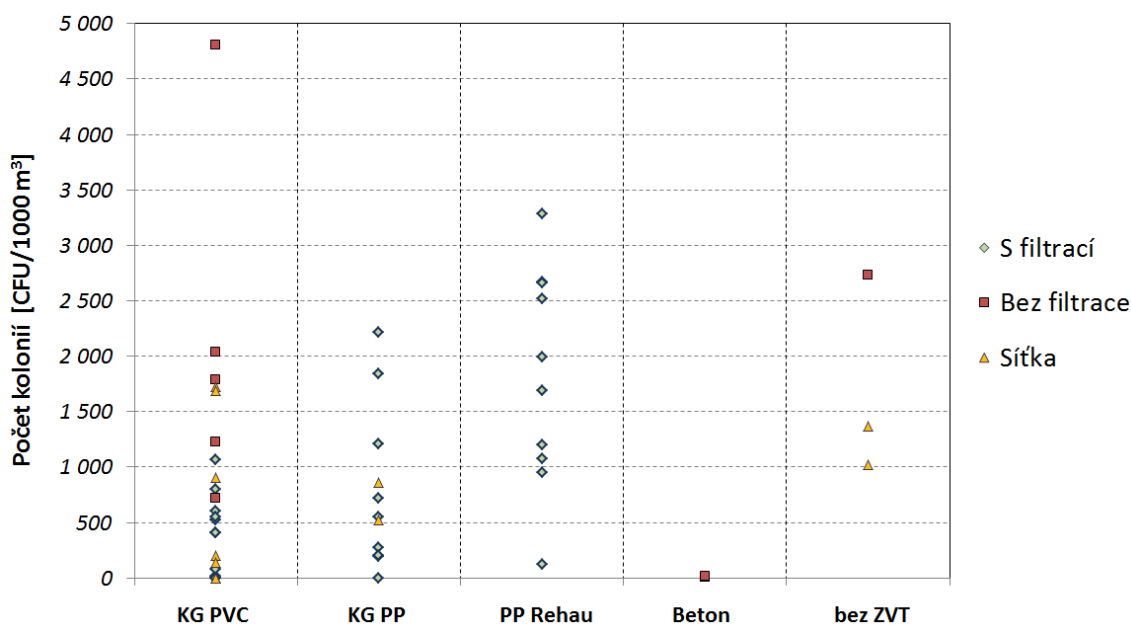
Obr. 7.13: Starý a nový filtr na vstupu do rekuperační jednotky u zemního výměníku č. 18

Většinu majitelů objektů z předchozí studie (metodou stěrů) však zajímala informace, zda jejich zemní výměník nějak ovlivňuje mikrobiální mikroklima v interiéru budovy. Na **obr. 7.12** je grafické znázornění relativní míry mikrobiálního znečištění (tj. interiér vs. exteriér) v závislosti na době realizace ZVT. Množství vykultivovaných CFU v interiéru bylo zpravidla nižší než ve venkovním prostředí; jen u jediného výměníku (odběr „1-2“ z listopadu 2013) 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. U zemního výměníku č. 11 bylo stanoveno relativní znečištění 0,955, což značí téměř identické hodnoty CFU v exteriéru i interiéru. Zřejmě vlivem častějšího otevírání balkonových dveří kvůli chození na předzahrádku domu v letním období – tzn. spíše přirozenému než nucenému větrání – se dovnitř dostávaly spory z venkovního prostředí. Převážná část všech 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).

➤ Znečištění v závislosti na materiálu potrubí

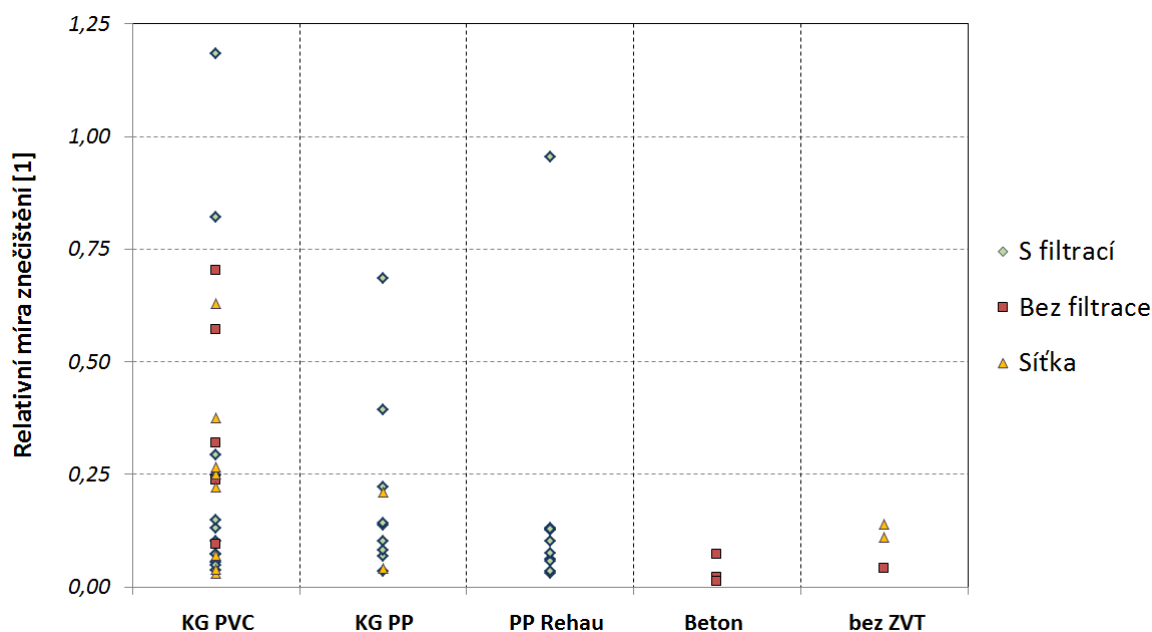
Roztřídění výsledků jednotlivých monitorovaných zařízení podle použitého potrubního systému je uvedeno na **obr. 7.14** a **7.15**. Mimo jiné je zde také rozlišeno, jak je řešena filtrace na vstupu do ZVT – její vliv však bude rozebrán až v další kapitole.



Obr. 7.14: Měrný počet kolonií plísní vykultivovaných z větracího vzduchu ve VZT jednotce (na agaru CZD) v závislosti na materiálu potrubí

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. 7.7**, minimální a maximální hodnoty pak uvádí **tab. 7.8**. Z grafického znázornění je patrné, že rozložení měrného počtu kolonií u potrubí KG PVC a KG PP je velmi obdobné (nebereme-li v potaz jednu mimolehlou hodnotu – výměník č. 7); 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 ¼ vyšší. Podobně jsou na tom i vzorky z domů bez ZVT; pro objektivnější srovnání by ovšem bylo třeba provést vyšší množství odběrů (zde pouze 3 vzorky). Výsledky pro „betonový“ zemní výměník MZK Brno byly diskutovány dříve.

7 Mikrobiologický průzkum vzduchových zemních výměníků tepla



Obr. 7.15: Relativní míra mikrobiálního znečištění podle materiálu potrubí – výsledky kultivace na agaru CZD

Srovnáme-li relativní míru znečištění (obr. 7.15) – tj. mikrobiální kvalitu v interiéru – pak nejlépe vycházejí (až na jeden výše uvedený 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. 7.7). Převážná většina interiérů však má cca poloviční mikrobiální znečištění, než jaké bylo stanoveno ve venkovním prostředí, což můžeme připisat hojnému využívání nuceného větrání s filtrací přiváděného/větracího, příp. i cirkulačního vzduchu.

Tab. 7.7: 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
Měrná	[CFU/1000 m ³]	1037	860 (-17,0 %)	1816 (+75,2 %)	10 (-99,0 %)	1710 (+64,9 %)
Relativní	[CFU _{IN} /CFU _{OUT}]	0,281	0,193 (-31,3 %)	0,170 (-39,5 %)	0,036 (-87,2 %)	0,097 (-65,4 %)

Tab. 7.8: Minimální a maximální hodnoty mikrobiálního znečištění dle použitého materiálu potrubí

Míra znečištění	Jednotka	KG PVC	KG PP	PP Rehau	Beton	Bez ZVT
Měrná – MIN	[CFU/1000 m ³]	15	196	127	9	1024
Měrná – MAX	[CFU/1000 m ³]	4802	2216	3287	13	2736
Relativní – MIN	[CFU _{IN} /CFU _{OUT}]	0,031	0,036	0,030	0,013	0,042
Relativní – MAX	[CFU _{IN} /CFU _{OUT}]	1,184	0,686	0,955	0,073	0,139

➤ Znečištění v závislosti na druhu filtrace na vstupu do ZVT

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. 7.9** jsou uvedeny souhrnné výsledky podle jednotlivých kategorií.

Tab. 7.9: Průměrné hodnoty mikrobiálního znečištění dle řešení filtrace u ZVT

Míra znečištění	Jednotka	S filtrem	Bez filtru	Jen síťka	Bez filtru + síťka
<i>Měrná</i>	$[CFU/1000\ m^3]$	1105	1482 (+34,1 %)	940 (-15,0 %)	1211 (+9,6 %)
<i>Relativní</i>	$[CFU_{IN}/CFU_{OUT}]$	0,219	0,231 (+5,6 %)	0,206 (-5,9 %)	0,213 (-2,7 %)

Z **obrázku 7.14** 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 výměníky s a bez filtru klesne na pouhých cca 10 % (poslední sloupec **tab. 7.9**). U míry relativního znečištění nedochází k tak dramatickým rozdílům a rozdíly se pohybují v řádu jednotek procent (**tab. 7.9**). Pro potrubí KG PVC v tomto případě nelze říci jednoznačný závěr, většina hodnot se pohybuje pod hranicí 0,40 (viz **obr. 7.15**), což je pro majitele budov zcela dostačující.

7.3 Diskuse

Z výsledků získaných oběma mikrobiologickými metodami je patrné, že u žádného z monitorovaných vzduchových zemních výměníků nehrozí zásadní problém s hygienickou kvalitou přiváděného vzduchu – a to navzdory nízké frekvenci údržby zařízení, příp. absenci filtrace na vstupu do ZVT. Je ale pravdou, že u zemních výměníků bez filtrace na vstupu do potrubní trasy byly ve větrací jednotce (tj. na výstupu ze ZVT) naměřeny v průměru o cca 10 % vyšší koncentrace CFU. Naměřené koncentrace CFU ve vnitřním prostředí budov však byly, hlavně díky integrované filtraci ve vzduchotechnické jednotce, zpravidla nižší než ty v exteriéru.

Nepotvrdilo se také, že starší realizace oproti nově vybudovaným zařízením vykazují vyšší míru znečištění; záleží vždy na okolních podmínkách a chování uživatele objektu. Pro potenciální investory je též důležité srovnání naměřeného mikrobiálního znečištění podle použitého potrubního materiálu – z měrných hodnot CFU/1000 m³ je totiž patrné, že použití certifikovaného potrubního systému s antimikrobiální úpravou povrchu nemusí vždy vést

k nižšímu mikrobiálnímu znečištění na výstupu ze ZVT, naopak může být i vyšší. Uživatele domu by ale mělo nejvíce zajímat, jaké je relativní znečištění v interiéru budovy – v tomto případě bylo skutečně nejlepších výsledků dosaženo u potrubního systému s antimikrobiální úpravou vnitřního povrchu **Awadukt Thermo**; následuje potrubí **KG PP 2000** a až poté nejpoužívanější potrubí **KG PVC**.

Celkově lze říci, že provedený výzkum jasně prokázal, že mikrobiální kvalita větracího vzduchu dodávaného vzduchotechnickým systémem se zemním výměníkem tepla je prakticky vždy lepší, než vzduchu venkovního. To je zcela v souladu se závěry studie [33-35] i s obecně přijímaným předpokladem, že nucené větrání s filtrací přiváděného vzduchu ovlivňuje příznivě kvalitu vnitřního prostředí.

KAPITOLA 8

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

Jak již bylo uvedeno výše, k většímu uplatnění vzduchových ZVT došlo v České republice teprve v posledních 10–15 letech. Jediné publikované zkušenosti s jejich provozem proto vychází z pilotních aplikací v pasivních domech v Rychnově u Jablonce nad Nisou (např. [21, 96, 99]) a v Koberovech [195]. V této kapitole proto uvádíme některé zkušenosti a poznatky, které se podařilo v průběhu řešení této práce získat.

8.1 Dotazníková studie

Za účelem shromáždění praktických informací o realizaci a provozu ZVT byl v rámci úvodního 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.

I přes zaslání v dostatečném předstihu se dotazníky většinou vyplňovaly s obyvateli objektů až na místě, souběžně s prováděním mikrobiologických odběrů. Z celkového počtu 46 oslovených majitelů (viz **tab. 7.1**) se nakonec odběry prováděly ve 35 případech. Jeden majitel poté přestal s řešiteli komunikovat, takže informace o jeho zemním výměníku (č. 43) nejsou kompletní. Také u výměníku č. 44 informace chybí, jedná se však o zařízení, které kvůli trvalému zatopení vodou (vlivem nedbalé realizace a vysoké hladiny spodní vody) není již několik let v provozu. V převážné většině případů nastávaly situace, kdy při odběrech

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

prováděných v dopoledních hodinách bývaly přítomny pouze manželky majitelů, proto bylo obtížné zjistit některé technické informace. Mnohdy také na samotný dotazník zbývalo málo času, jelikož se mimo mikrobiologických odběrů provádělo i měření okolních podmínek a rychlosti proudění vzduchu na výstupu ze ZVT. 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 roce 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. Kapalinové typy ZVT (v okolí Brna např. RD Habrovany [29]) 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 instalovány T-tvarovky se servopohonem 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 ji prováděl servisní technik při zprovoznění VZT systému. Teplota sání pro zimní předehev 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 štěrkové 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,–

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

až 35 000,- Kč (7×) a 50 000,- až 80 000,- Kč (6×). U ZVT č. 1 (FSI VUT) se investiční náklady vyšplhaly až na cca 119 000,- Kč [A12], 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. 4.2** a **obr. 8.7**. 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 (č. 9 a 12) 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 (**obr. 8.4**, **8.25** a **8.26**), majitelé ji však přesně nedokáží rozeznat od přirozené tvorby kondenzátu. V 9 případech majitelé uvedli zaplavení ZVT povrchovou či spodní vodou, nejčastěji po přivalových deštích nebo po jarním tání. Některé monitorované výměníky leží v oblastech s přirozeně vysokou hladinou spodní vody (např. v blízkosti vodních toků), přesto však u nich nebyly zaznamenány problémy se zatékáním; naopak v jiných případech mají problém s opakovaným zatékáním výměníky ležící nad hladinou spodní vody – což by mohlo značit nějaký problém při instalaci potrubí (deformované hrdlo, špatné těsnění, porušená stěna potrubí apod.). V jednom případě musel být ZVT dokonce odpojen, protože se zateklou vodou nepodařilo zcela odčerpat. Dva majitelé také uvedli zamrznutí rekuperačního výměníku během provozu VZT jednotky, a to hlavně kvůli tomu, 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 (ZVT č. 13) – to je

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

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 provozní problém uvedl majitel ZVT č. 15, kde při pravidelném čištění potrubní trasy došlo k nechtěnému proříznutí plastového 90° kolena zabudovaným lankem, jenž táhlo přiipevněný čistící přípravek (viz **obr. 8.27**).

- **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 znovu). 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 [A7, 196]) 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.

8.2 Příklady realizací ZVT a poznatky z jejich provozu➤ **Nasávání vzduchu:**

Jelikož většina zřízení byla realizována v době, kdy systémová řešení pro ZVT byla v ČR nedostupná nebo investičně náročná, bylo v některých případech nasávání vzduchu do výměníku řešeno originálním způsobem. Vlevo na **obr. 8.1** je např. nasávací šachta vyrobená z běžného kanalizačního potrubí KG-PVC, kde je filtrace zajištěna obyčejnou sítinou proti hmyzu. Na **obrázku 8.1** vpravo je zase místo nasávací hlavice použit jednoduchý přístřešek a filtrace je řešena prostým přehozením filtrační tkaniny přes vstup nasávací šachty.



Obr. 8.1: Příklady použitých řešení nasávání vzduchu do ZVT – vlevo: ZVT č. 6, vpravo: ZVT č. 20 (foto: autor)

Lze se však setkat i s nasávací šachtou realizovanou z betonových skruží (**obr. 8.2** vlevo), jež jsou primárně určeny pro stavbu studen, šachet a kanalizačních systémů. Toto řešení nicméně nelze doporučit, jelikož takováto šachta není vodotěsná a do potrubní trasy tak

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

zatéká srážková a podzemní voda. Vodotěsnost spojů betonových skruží je dnes sice možné zabezpečit osazením elastomerového těsnění, příp. zatěsněním dosedacích ploch vhodným tmelem; vhodnější je však přímo použití plastového (tj. těsnějšího) systému [194], jenž se pro realizaci šachet také vyrábí. Potenciální riziko pro zatékání vody do zemního výměníku mohou představovat i řešení uvedená na **obr. 8.2** vpravo a **obr. 8.3** vlevo – tyto „nasávací hlavice“ jsou umístěny příliš nízko u země a kromě srážek může být do potrubí nasáván i prach, bioaerosol a další nežádoucí nečistoty.



Obr. 8.2: Příklady použitých řešení nasávání vzduchu do ZVT – vlevo: ZVT č. 3, vpravo: ZVT č. 7 (foto: autor)



Obr. 8.3: Příklady použitých řešení nasávání vzduchu do ZVT – vlevo: ZVT č. 2, vpravo: ZVT č. 16 a 17 (foto: autor)

Na **obr. 8.3** vpravo je nasávací šachta vyrobená skružením a svařením plastového plechu tloušťky cca 1 cm. Toto velmi jednoduché a levné řešení se po zasypání výkopu ukázalo jako nevhodné, jelikož se vlivem tlaku zeminy šachta zbortila dovnitř (**obr. 8.4**) a přestala tak být vodotěsná – poznamenejme však, že se jedná o realizaci z r. 2000 (tj. nejstarší monitorovaný

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

ZVT), kdy se se zemními výměníky v ČR začínalo. Nyní dodávané plastové šachty pro ZVT (viz např. **obr. 8.6**, výrobce *BMTO GROUP a.s.*) mají tloušťku stěny přes 2 cm a jsou odolné do několika metrů pod povrchem. Pro sání vzduchu lze též použít běžné VZT komponenty (např. filtrační box s výměnným kapsovým filtrem, **obr. 8.5**); vhodnější by ale bylo jeho umístění v interiéru, aby se na filtru omezila kondenzace vlhkosti – tak jak je tomu například v případě experimentálního zemního výměníku FSI VUT (**obr. 6.16**).



Obr. 8.4: Defekt plastové nasávací šachty – ZVT č. 16 a 17 (foto: autor)



Obr. 8.5: Nasávání vzduchu do ZVT přes filtrační box s výměnným filtrem – ZVT č. 8 (foto: autor)

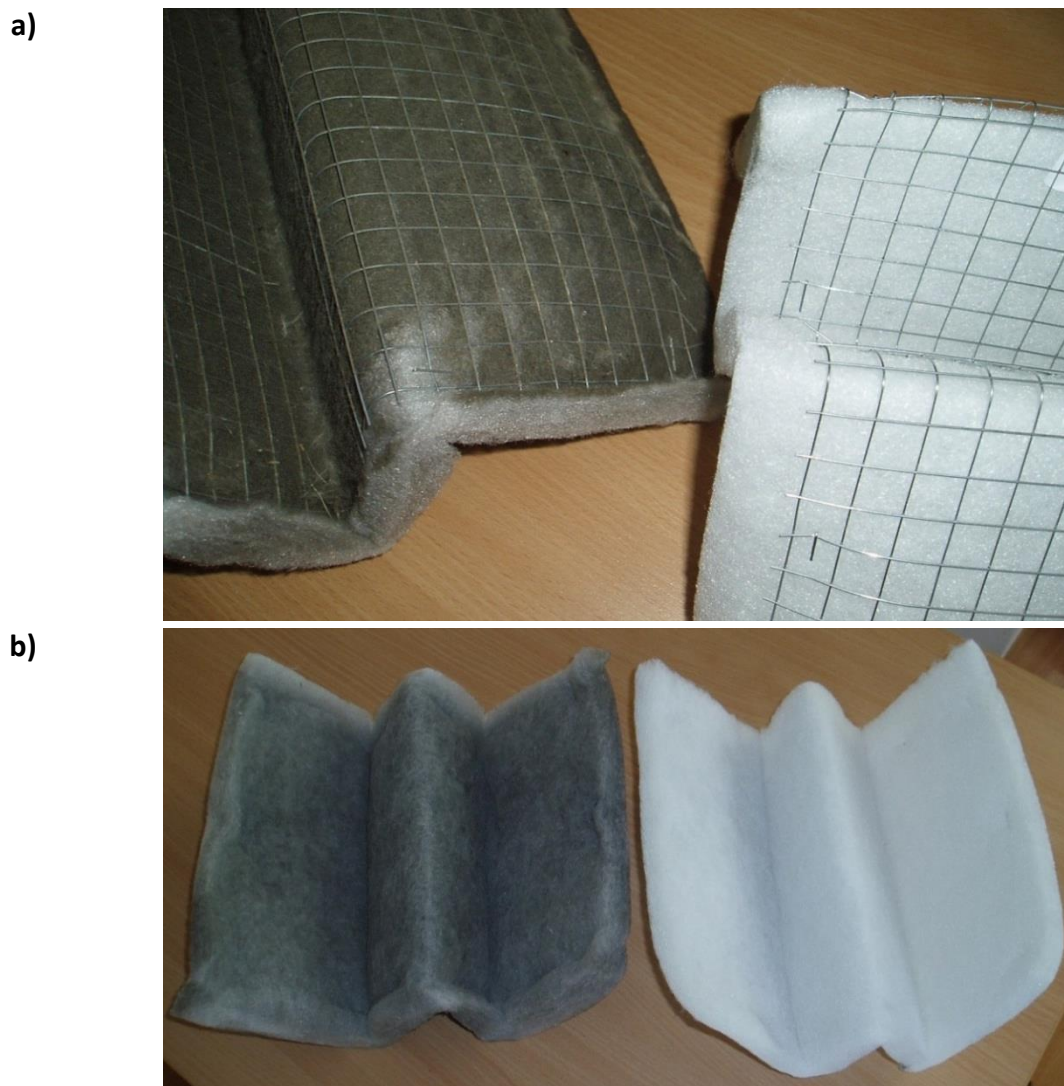


Obr. 8.6: Nasávací hlavice experimentálního zemního výměníku FSI VUT s dvojitou filtrací vzduchu (foto: autor)

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



Obr. 8.7: Výměnný kapsový filtr na sání ZVT č. 19 po několikaletém provozu – foto: autor



Obr. 8.8: Porovnání zaneseného a nového filtru na sání experimentálního výměníku FSI VUT (ZVT č. 1) a) přední strana, b) zadní strana – foto: autor (2013-05-29)

➤ **Filtrace nasávaného vzduchu:**

Spolu s nasáváním je nutné řešit i filtraci vzduchu – převážná většina zkoumaných ZVT má zajištěnu alespoň hrubou filtraci vzduchu na sání, filtraci nemá pouze 1/5 zařízení. Pokud je však na vstupu instalována filtrační tkanina, musí se pamatovat na její pravidelnou roční výměnu, případně její občasné očištění od hrubých nečistot. Na **obr. 8.6** je např. patrná degradace filtrační tkaniny vlivem povětrnostních podmínek. Tento havarijní stav nastal po cca 5 letech provozu – nasávací hlavice nebyla ale od spuštění ZVT pro sání využívána, jelikož výměník má řešeno sání také přes fasádní žaluzii. Další havarijní stav nastal u zemního výměníku č. 19; zde vlivem opožděné výměny filtru (po několikaletém provozu, viz **obr. 8.7**) došlo téměř k „ucpání“ nasávací cesty, což vedlo k podstatnému snížení průtoku větracího vzduchu (*Pozn. Tento výměník nemá řízené přepínání fasáda/ZVT*).

Vlivem intenzivní stavební činnosti v okolí experimentálního zemního výměníku FSI VUT (ZVT č. 1) docházelo k rychlejšímu zanášení filtru na sání do výměníku. Před spuštěním zařízení do trvalého provozu, v půlce ledna 2013, bylo pozorováno jen lehké zanesení filtrační tkaniny, avšak již po cca 5měsíčním provozu byl filtr za hranici své jímací schopnosti. Na **obr. 8.8a** a **8.8b** je názorné srovnání zaneseného filtru s filtrem zcela novým, **obr. 8.9** pak udává detail zachycených nečistot – výsledek snad ani nemusí být komentován.



Obr. 8.9: Detail zaneseného filtru na sání experimentálního výměníku FSI VUT – přední strana
(foto: autor, 2013-05-29)

Filtr byl následně dodán do mikrobiologické laboratoře k analýze; výsledný počet vykultivovaných kolonií směsných populací plísní činil **180 CFU/cm²**, resp. **7860 CFU/cm²** směsných populací bakterií. Jednalo se o „běžné“ půdní saprofyty (tj. houby, které získávají

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

organické látky díky rozkladu živočišného či rostlinného materiálu); patogenní mikroorganismy nebyly detekovány. Naštěstí na filtru nebyl pozorován viditelný růst plísní, jeho znečištění bylo způsobeno hlavně jemnými prachovými částicemi. Většina majitelů nicméně v dotazníku uvedla, že filtr na vstupu do ZVT mění 1× až 2× za rok [86]; i to však může být v určitých případech nedostatečné.



Obr. 8.10: Detail zaneseného filtru na sání experimentálního zemního výměníku FSI VUT po dalším roce provozu – přední strana (foto: autor, 2015-01-14)



Obr. 8.11: Zanesený filtr na sání (vlevo) a výstupu (vpravo) po ročním provozu experimentálního zemního výměníku FSI VUT – foto: autor, 2015-01-14

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

Následně zde byl filtr ponechán v provozu po celý rok, aby bylo možno posoudit stav, kdy uživatel mění filtry pouze jednou ročně (což v praxi nastává poměrně často). Jelikož v blízkém okolí stále probíhaly stavební a terénní práce, byl filtr na sání po cca ročním provozu zcela zanesen silnou vrstvou jemného prachu (**obr. 8.10**); na výstupu ZVT byl filtr zanesen o poznání méně, ale pro další provoz již rovněž nebyl způsobilý – viz **obr. 8.11**. Opět nebyly na obou filtrech pozorovány viditelné známky nárůstu plísní.



Obr. 8.12: Zašpiněná fasádní žaluzie na konci jara (patrné nánosy pylových částic) – foto: autor



Obr. 8.13: Znečištěné VZT potrubí v těsné blízkosti za fasádní protidešťovou žaluzií – foto: autor



Obr. 8.14: Zanesené „Spiro“ potrubí na vstupu do exp. zemního výměníku tepla (č. 1) – foto: autor

Filtrace na vstupu do zemního výměníku je důležitá také kvůli zamezení vniku nečistot do větrací jednotky (tzn. zanesení ohřívače a rekuperátoru – **obr. 4.3** nebo **obr. 8.18** vlevo) a dále do vzduchotechnických rozvodů. Hlavně na jaře, v době květu stromů a rostlin, se může do VZT systému dostávat velké množství pylu. Na podzim zase hrozí nasátí padajícího listí. Fasádní protidešťová žaluzie zachytí jen zlomek přicházejícího znečištění (viz **obr. 8.12**),

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

zbytek putuje dále do vzduchotechnického řetězce (**obr. 8.13** a **C.1**). I když byl u experimentálního výměníku FSI VUT (č. 1) hned za obvodovou stěnou instalován filtrační box s výměnnou filtrační vložkou třídy G4, docházelo přesto k průniku pylových částic dále za filtr – **obr. 8.14** uvádí znečištění VZT potrubí před přepínací T-klapkou, tj. cca 10 cm za filtračním boxem. Pro případ absence filtrace v místě nasávání vzduchu je dnes u většiny VZT jednotek na vstupu instalován hrubý odnímatelný filtr (např. síťka z „tahokovu“, **obr. C.6**). Tento filtr je třeba také po určitém čase zkontrolovat, aby nedocházelo ke hromadění hrubých nečistot (**obr. C.5** vlevo) a jejich následnému uvolňování vlivem biologické degradace apod.



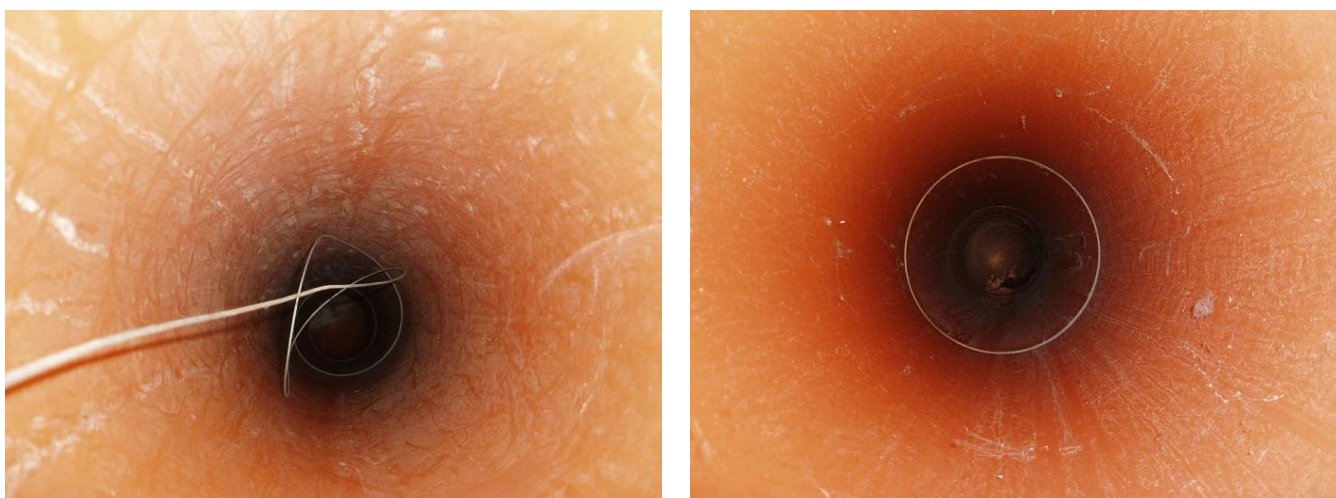
Obr. 8.15: Biologické znečištění ohřívače ve VZT jednotce – foto: autor



Obr. 8.16: Biologické znečištění ve filtračním boxu na sání do ZVT č. 1 (vlevo) a stavební prach ve fasádní tvarovce pro nasávání vzduchu do ZVT č. 6 (vpravo) – foto: autor

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

Z důvodu vysoké náročnosti, v některých případech až nemožnosti čištění vnitřního povrchu vzduchotechnických rozvodů – např. při použití oblíbeného hliníkového Flexo potrubí (**obr. 8.19** vpravo, **obr. 8.20** a **obr. 8.21**) – je pro uživatele vždy jednodušší pravidelná výměna filtrů; ideálně alespoň 2× ročně (na konci jara a začátkem zimy). Doporučit lze i pravidelnou údržbu a čištění VZT jednotky, protože kromě pylových a prachových částic může být do jednotky nasáván také drobný hmyz (např. **obr. 8.15** nebo **8.16** vlevo), jenž může být potenciálním zdrojem mikrobiální kontaminace přiváděného vzduchu. Stavební prach detekovaný ve fasádní tvarovce pro sání do zemního výměníku č. 6 (viz **8.16** vpravo) byl zmíněn již v předchozí kapitole.



Obr. 8.17: Zanesený povrch potrubí na vstupu do zemního výměníku – vlevo: VZT č. 6, vpravo: VZT č. 4 (foto: autor)



Obr. 8.18: Znečištěné lamely deskového rekuperačního výměníku pro ZTT (vlevo) a zanesený filtr cirkulačního vzduchu v teplotně vzdušné VZT jednotce (vpravo) – foto: autor

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

Pokud větrací systém umožňuje také cirkulační režim ohřevu interiérového vzduchu, případně jeho chlazení, je třeba mimo pravidelné výměny filtrů na sání do ZVT věnovat pozornost také filtrům cirkulačního vzduchu. U budov s realizovaným nuceným větráním bývá obvykle – díky instalaci účinné filtrace větracího vzduchu – ve vnitřním prostředí nižší prašnost, proto lze filtrační tkaninu v cirkulační větvi měnit v delších intervalech, dle konkrétní situace. Přesto autor narazil při monitoringu ZVT i na několik případů, kdy majitelé filtr několik let neměnili ani nijak nečistili (viz např. **obr. 4.2** a **8.18** vpravo).



Obr. 8.19: Zachycený prach v místě změny směru proudění vzduchu (vlevo) a znečištění zachycené na povrchu hliníkového „Flexo“ potrubí (vpravo) – foto: autor



Obr. 8.20: Nečistoty zachycené na povrchu hliníkového „Flexo“ potrubí a v místě jeho napojení na plastové potrubí – (foto: autor)

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

Zanedbanou údržbou se postupně zanáší vnitřní povrch potrubí (viz **obr. 8.17**), což může např. u certifikovaného potrubního systému **REHAU Awadukt Thermo** vést ke snížení či úplnému zamezení funkce antimikrobiální ochrany, jež zajišťují ionty stříbra zabudované v polymerové matrici na povrchu vnitřní stěny. Procházející vzduch musí totiž být zcela v kontaktu s tímto povrchem, jinak ionty stříbra nemohou působit na případné procházející mikroorganismy. Prach, pyl a další nečistoty se nejdříve usazují v místech různých omezení a změn proudění vzduchu (např. 90° koleno, **obr. 8.19** vlevo) či jiných překážek v proudu vzduchu (např. flexibilní hliníkové potrubí – **obr. 8.19** vpravo nebo napojení dvou typů potrubí – **obr. 8.20** a **C.3** vlevo).



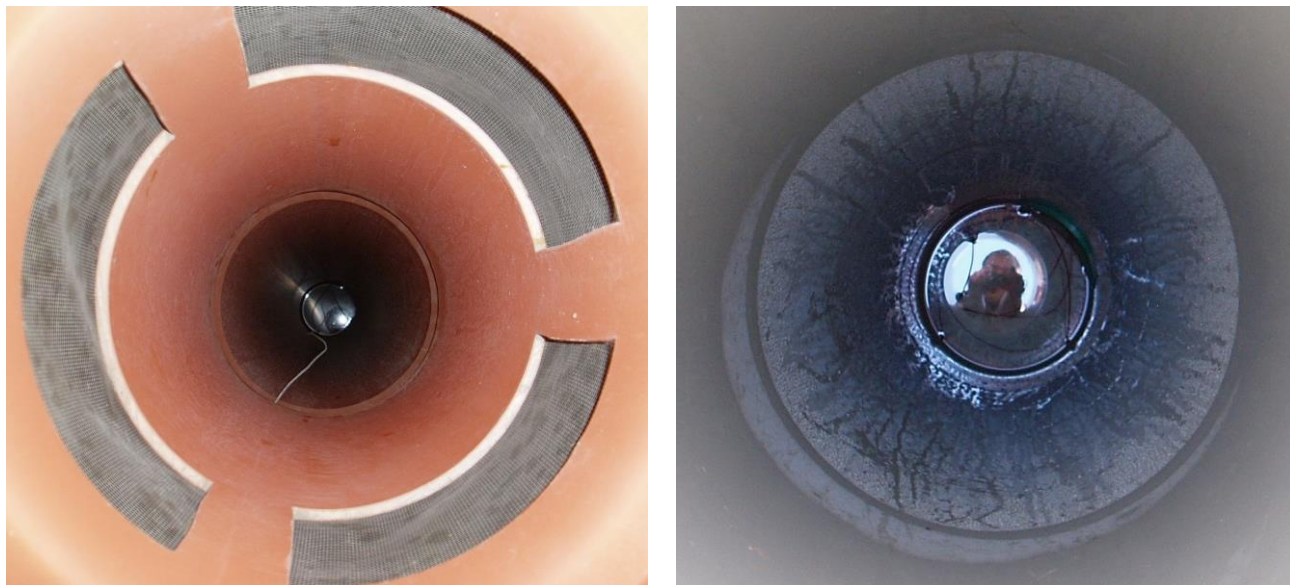
Obr. 8.21: Vnitřní VZT rozvod z hliníkového „Flexo“ potrubí pro napojení sání vzduchu z fasády (vlevo) a zemního výměníku tepla (vpravo) do větrací jednotky, ZVT č. 6 – foto: autor

Vhodné je čistící a inspekční otvory, stejně jako filtrační boxy, škrtecí klapky atp. instalovat na dostupném místě, aby při údržbě nebylo třeba složité manipulace či demontáže. Na **obr. C.3** vpravo je uveden příklad nevhodného umístění filtračního boxu; pokud totiž chce uživatel vyměnit filtr na odtahu odpadního vzduchu z koupelny, musí nejprve odmontovat dřevotřískový záklop sníženého podhledu místnosti. Podobná situace nastává i u monitorovaného výměníku č. 30 – zde dokonce majitelé musí při výměně filtrů ve vzduchotechnické jednotce (nebo čištění rekuperačního výměníku) složitě odmontovat celou zástěnu sprchového koutu, která koliduje s víkem podstropní VZT jednotky a brání jeho plnému otevření, nutnému pro úspěšnou údržbu. Z tohoto důvodu zde také trvaly mikrobiologické odběry podstatně déle než na ostatních zařízeních (viz **tab. 7.6**).

Častým jevem při inspekcích zemních výměníků byl omezený prostor v technických místnostech rodinných domů, jenž byl nejčastěji vynucen omezeným využitelným půdorysem domu. V tomto malém prostoru, většinou plné nejrůznějších technologií (rekuperační jednotka, akumulací zásobník, pračka, ...), je někdy nutné řešit propojení několika tras VZT potrubí (např. **obr. 8.3**), proto se lze ve většině případů setkat s využitím různých flexibilních potrubí/hadic, které je možné vytvarovat podle konkrétní situace. Toto jednoduché řešení

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

však s sebou nese hned několik nevýhod – mezi hlavní patří vysoké tlakové ztráty v ohybech a zúženích a náchylnost k zanášení, spolu s nemožností čištění vnitřního povrchu. Vlivem omezeného prostoru nastávají i problémy při servisu nebo údržbě rekuperační jednotky.



Obr. 8.22: Přítomnost vody v nasávacích (zde i kontrolních) šachtách ZVT č. 6 (vlevo) a ZVT č. 15 (vpravo) – foto: autor



Obr. 8.23: Inspekční otvor v potrubí ZVT č. 7 (vlevo) a fotografie vnitřku potrubí (vpravo) – foto: autor

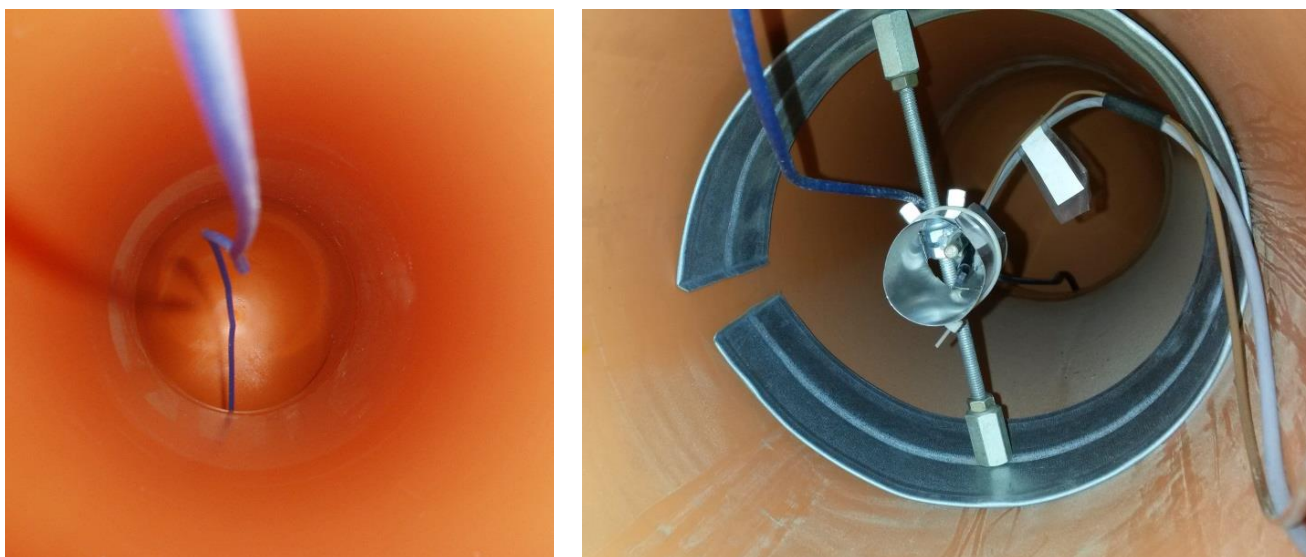
➤ **Odvod kondenzátu:**

Kromě nasávání vzduchu a jeho filtrace je nutné řešit rovněž sběr a odvod kondenzátu vznikajícího v ZVT – nejčastěji formou sběrné šachty. Přítomnost vody v potrubí při provozu ZVT majitelé potvrzují a při monitoringu zemních výměníků byla také detekována (**obr. 8.22**).

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

V levé části obrázku je uvedena nasávací šachta výměníku č. 6 (fotografie z podzimu 2012), přičemž zde byl odebrán i vzorek stojící vody pro mikrobiologický rozbor (č. „6b“, **tab. 7.2**). V pravé části **obr. 8.22** je patrný kondenzát v šachtě výměníku č. 15 (léto 2013), který zde zřejmě zůstal po jarním provozu zemního výměníku – majitel totiž uvedl, že v letním období vzduchotechnickou jednotku (tj. i ZVT) vypíná a větrá okny.

V některých případech však sběr a odvod kondenzátu u zemního výměníku není systémově řešen, jak je uvedeno např. na **obr. 8.23** vlevo. V uvedeném případě je sice na výstupu ZVT zhotoven inspekční otvor, ale tím lze maximálně odčerpat vzniklý kondenzát. Případné čištění potrubní trasy by bylo značně komplikované, protože inspekční otvor je umístěn v malé vybetonované šachtě s omezenou možností pohybu. V pravé části **obr. 8.23** je patrné znečištění potrubí těsnicím tmelem z doby montáže. Poznamenejme ale, že větrací jednotka v tomto rodinném domě pracuje v kontinuálním provozu sání přes zemní výměník tepla, tudíž lze předpokládat zpětnou evaporaci zkondenzované vody do větracího vzduchu. Investořům ZVT lze však instalaci kontrolní šachty (pro odvod kondenzátu) doporučit, spolu s provedením potrubní trasy umožňujícím mechanické čištění potrubí (což je nutné řešit již v počátečním návrhu). Rozdíl mezi vyčištěným potrubím na sání ZVT a tímtož potrubím po několikaměsíčním provozu je názorně vidět na **obr. 8.24**.



Obr. 8.24: Vyčištěné potrubí na sání do ZVT č. 1 (vlevo), totéž potrubí po dlouhodobém provozu (vpravo) – foto: autor

➤ **Zatékání vody a další provozní problémy:**

Při monitoringu zemních výměníků v létě r. 2013 byl ve dvou případech objeven zásadní provozní problém s přepínací T-klapkou, jenž řídí sání vzduchu do zemního výměníku. U zařízení č. 6 se podařilo příčinu problému ihned objevit – z důvodu uvolněného těsnění se klapka plně nedovírala, takže vzduch byl vlivem nižších tlakových ztrát do větrací jednotky nasáván pouze z fasády. Po opravě klapky servisním technikem byl proveden další mikrobiologický odběr (označení „6-1“, **tab. 7.5** a **7.6**), tentokrát již s nasáváním vzduchu přes zemní výměník. Podobný problém nastal v případě ZVT č. 34, kvůli složitějšímu vzduchotechnickému rozvodu se na místě nepodařilo zjistit příčinu problému a ten tak musel

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

vyřešit až přivolaný servisní technik. Z důvodu velké dojezdové vzdálenosti zde však nebyl další odběr realizován.



Obr. 8.25: Srážková voda zatečená v ZVT č. 3 – náhled do potrubí (foto: autor)



Obr. 8.26: Srážková voda zatečená v ZVT č. 3 – zatopené dno kontrolní šachty (foto: autor)

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

Výše uvedené havarijní stavy zemních výměníků se podařilo relativně snadno vyřešit, mohou však nastat i případy, kdy je k opětovnému zprovoznění ZVT nutné investovat nemalé finanční prostředky – to se týká např. problémů se zatékáním vody do potrubí zemního výměníku ze systému KG-PVC vlivem vysoké hladiny spodní vody. Ve většině případů je jediným účinným řešením vykopání starého potrubí a položení nové potrubní trasy z potrubního systému o vyšší kruhové únosnosti a s lepším těsněním hrdlových spojů (např. systém KG-PP 2000 nebo Awadukt Thermo). Problém s masivním zatékáním vody byl však detekován pouze u ZVT č. 3 (např. **obr. 8.25** a **8.26**); tento stav je zřejmě dán hlavně použitím betonových skruží pro konstrukci nasávací šachty (viz **obr. 8.2** vlevo). Zemní výměník mimoto nebyl dlouhou dobu používán, takže zateklá voda neměla možnost se odpařit. V literatuře jsou však popsány i další případy zatečení vody do ZVT [86, 195].



Obr. 8.27: Defekt potrubí ZVT č. 15 vlivem jeho čištění – foto: Petr Halásek



Obr. 8.28: Zašpiněná vyústka pro odtah vzduchu v nákupním centru v Brně (vlevo) a zanesený odtah ze sociálního zařízení panelového domu ve Vyškově – foto: autor

Zatékání vody do potrubí ZVT může být způsobeno i jinými faktory. **Obr. 8.27** dokumentuje případ proříznutí stěny plastového potrubí (ZVT č. 15) lankem, instalovaným pro čištění ZVT.

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

K porušení došlo vlivem tažení lanka s napojeným čisticím přípravkem přes 90° koleno. Zemní výměník musel být na několik měsíců odstaven z provozu; teprve po opravení vzniklého defektu byl opět spuštěn.

Otázka mikrobiologického znečištění se týká nejen vzduchových zemních výměníků, ale celého vzduchotechnického řetězce. **Obrázek C.2** například dokumentuje zanesený filtr z odtahu větrací jednotky (pro ZVT č. 8) cca 5měsíců od poslední výměny – přičemž majitel v dotazníkové studii uvedl, že filtry obvykle mění 2× ročně. Kvůli zvýšené prašnosti, vlivem situování RD uvnitř města (k tomu v blízkosti relativně rušné komunikace) lze uživatelům objektu jen doporučit častější výměnu filtrační tkaniny a také pravidelnou údržbu VZT jednotky. Pro zajímavost je dále na **obrázku 8.28** vlevo zobrazena znečištěná vyústka pro nasávání odpadního vzduchu ze sociálních zařízení v jednom nákupním centru v Brně; vpravo pak zanesený odtah ze sociálního zařízení v umakartovém jádře panelového domu ve Vyškově. Co se skrývá za samotným umakartem, by bylo pravděpodobně na další vědeckou práci.

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

KAPITOLA 9

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 větracího 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 – **kapitoly 2 až 4** – 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.

Kapitola 5 popisuje zjednodušený simulační model ZVT a 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 rozdílů 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, který je popsán v **7. kapitole**. 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 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, vesnice), 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 ZVT jednotky se počet narostlých kolonií přepočel na 1000 m³ nasátého vzduchu pro alespoň zběžné 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 rodů *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 ZVT 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 neprokázalo; 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 nejpodstat-

nější – 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.

V předposlední **kapitole 8** jsou pak uvedeny praktické zkušenosti s návrhem, provozem a využitím vzduchových zemních výměníků tepla, získané jednak pomocí dotazníkové studie mezi majiteli zemních výměníků tepla, provedené v rámci mikrobiologického monitoringu, jednak vlastní autorovy poznatky, načerpané v rámci zpracování této práce.

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 prostorách a návrhové nástroje (tzv. Human Centered Design)*“.

Seznam použitých symbolů a zkratk

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Veličina</i>
a_a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Součinitel teplotní vodivosti vzduchu
A_{at}	$[^\circ C]$	Roční amplituda průměrných denních teplot vzduchu
a_{gr}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Teplotní vodivost (<i>difusivita</i>) zeminy
$\overline{c_{p,a}}$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Střední hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu při konstantního tlaku
$c_{p,gr}$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita zeminy při konstantním tlaku
COP_{ZVT}	[1]	Topný faktor zemního výměníku tepla
CE	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota tepelného toku přirozenou konvekcí mezi okolním vzduchem a zemským povrchem
D_{pipe}	[mm]	Vnitřní průměr potrubí (<i>tj. světlost</i>)
D_N	[mm]	Jmenovitý průměr potrubí
EER_{ZVT}	[1]	Chladicí faktor zemního výměníku tepla
H	[m n.m.]	Výška nad hladinou moře
h_a	$[kJ \cdot kg_{sv}^{-1}]$	Měrná entalpie vlhkého vzduchu
$h_{a,IN}$	$[J \cdot kg_{sv}^{-1}]$	Měrná entalpie vlhkého vzduchu na vstupu do ZVT
$h_{a,OUT}$	$[J \cdot kg_{sv}^{-1}]$	Měrná entalpie vlhkého vzduchu na výstupu ze ZVT
k_v	[1]	Koeficient vegetace (<i>zohledňuje okrajovou podmínku u přestupu tepla vzduch/zemina</i>)
L_{pipe}	[m]	Celková délka potrubí ZVT
LE	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota tepelného toku důsledkem odpařování vody z povrchu země
LR	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota tepelného toku emitovaná z povrchu země dlouhovlnným zářením
$\dot{m}_{a,pipe}$	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok vzduchu (<i>jednou větví</i>) ZVT
$\dot{m}_{a,sv}$	$[kg_{s.v.} \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok suchého vzduchu zemním výměníkem
$\dot{m}_{a,ZVT}$	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok vzduchu procházejícího potrubím zemního výměníku
$\dot{m}_{W,ZVT}$	$[kg_W \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok vlhkosti zkondenzované v ZVT
n	[1]	Bezrozměrný exponent režimu provozu ($n = 0,4$ pro ohřev vzduchu, $n = 0,3$ pro jeho chlazení)
NTU	[1]	Number of Transfer Units
\overline{Nu}_D	[1]	Střední Nusseltovo číslo
O_{pipe}	[m]	Vnitřní obvod potrubí
p_b	[Pa]	Barometrický tlak vlhkého vzduchu
P_{el}	[W]	Průměrný elektrický příkon k pohonu celého zemního výměníku
$p_p''(T_a)$	[Pa]	Parciální tlak sytých par ve vzduchu při dané teplotě

Pr_a	[1]	Prandtlovo číslo vzduchu
Q_{ZVT}	[J]	Množství získaného tepla/chladu
\dot{Q}_{ZVT}	[W]	Topný výkon ZVT
$Q_{ZVT(+)}$	[W]	Průměrný topný výkon zemního výměníku tepla
$Q_{ZVT(-)}$	[W]	Průměrný chladičí výkon zemního výměníku tepla
r_a	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta vzduchu
\overline{Re}_D	[1]	Střední Reynoldsovo číslo
RH_{sensor}	[%]	Relativní vlhkost vypočtená z naměřeného výstupního napětí senzoru
RH_{true}	[%]	Výsledná relativní vlhkost (včetně všech korekcí)
S_{pipe}	[m ²]	Vnitřní/teplosměnný povrch zemního výměníku tepla (v případě vícenásobného potrubí rovno povrchu jedné větve ZVT)
Sc_v	[1]	Schmidtovo číslo (index „v“ je zde používán ve významu „vapor“ = pára)
\overline{Sh}_D	[1]	Střední Sherwoodovo číslo
$slope$	[mV/%RH]	Kalibrační konstanta čidla, udávající lineární nárůst napětí při stoupající relativní vlhkosti
SR	[W·m ⁻²]	Hustota tepelného toku krátkovlnného (slunečního) záření, pohlceného zemským povrchem
T	[°C]	Teplota ($T = f(x, y, z, \tau)$)
t_a	[°C]	Teplota vlhkého vzduchu
T_a	[°C]	Teplota vlhkého vzduchu v místě měření RH
$T_{a,E}$	[°C]	Teplota venkovního vzduchu
$T_{a,IN}$	[K]	Absolutní teplota vzduchu na vstupu ZVT
$T_{a,OUT}$	[°C]	Výstupní teplota vzduchu ze zemního výměníku tepla
T_{DP}	[°C]	Teplota rosného bodu
T_{gr}	[°C]	Teplota zeminy v dané hloubce pod povrchem
T_{ma}	[°C]	Průměrná celoroční teplota venkovního vzduchu
T_{sur}	[°C]	Teplota na povrchu země
T_w	[°C]	Teplota stěny potrubí v dané hloubce uložení pod povrchem
V_{5V}	[V]	Napájecí napětí 5 V (DC), ke kterému jsou vztaženy kalibrační křivky čidla
$\dot{V}_{a,pipe}$	[m ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok vzduchu ZVT
V_{OUT}	[V]	Měřené výstupní napětí senzoru RH
V_{supply}	[V]	Napájecí napětí, jež dodává stabilizovaný zdroj
\dot{V}_{ZVT}	[m ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok vzduchu procházejícího potrubím ZVT
\bar{w}_a	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění v potrubí
x, y, z	[m]	Kartézské souřadnice
x	[m]	Vzdálenost od počátku potrubí (tj. od vstupu do ZVT)
x_a	[kg _w ·kg _{s.v.} ⁻¹]	Měrná vlhkost vzduchu
$x_a(T_a)$	[kg·kg _{s.v.} ⁻¹]	Měrná vlhkost vzduchu při dané teplotě
$x_{a,IN}$	[kg·kg _{s.v.} ⁻¹]	Měrná vlhkost vzduchu na vstupu do ZVT
$x_{a,OUT}$	[kg·kg _{s.v.} ⁻¹]	Měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze ZVT
x_{DP}	[kg·kg _{s.v.} ⁻¹]	Měrná vlhkost vzduchu při teplotě rosného bodu
z	[m]	Průměrná hloubka uložení potrubí ZVT
z_p	[m]	„Hloubka penetrace“ (vyjádření útlumu teplotních změn)
$zero\ offset$	[V]	Kalibrační konstanta, udávající napětí při relativní vlhkosti 0 %

$\bar{\alpha}_a$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Konvektivní součinitel přestupu tepla
$\bar{\alpha}_{mod}$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	„Modifikovaný“ (<i>neboli celkový</i>) součinitel přestupu tepla zemina–vzduch
α_p	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Ekvivalentní konvektivní součinitel přestupu tepla zohledňující odpor stěny potrubí
$\bar{\beta}_v$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Střední součinitel přestupu páry na povrchu s kondenzací
δ_{pipe}	[mm]	Tloušťka stěny potrubí
δ_{v-a}	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	Binární součinitel difúze vodní páry ve vzduchu
η_{ZVT}	[%]	Termická účinnost ZVT
λ_a	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu
λ_{gr}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti zeminy
λ_{pipe}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí
ν_a	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita vzduchu
ρ_a	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota vzduchu
ρ_{gr}	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota zeminy
$\rho_{v,IN}$	$[\text{kg}_w\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota vodních par na vstupu do ZVT
$\bar{\rho}_{v,OUT}(\tau)$	$[\text{kg}_w\cdot\text{m}^{-3}]$	Průměrná hustota vodních par na výstupu ze ZVT
τ	[dní], [s]	Aktuální čas (<i>od počátku roku</i>)
τ_{in-out}	[s]	Čas setrvání vzduchu v zemním výměníku tepla
τ_{min}	[dní]	Čas, kdy dochází k minimu průměrné denní teploty venkovního vzduchu
τ_{ZVT}	[s]	Doba chodu ZVT
φ_a	[%]	Relativní vlhkost vzduchu
Δh_a	$[\text{J}\cdot\text{kg}_{sv}^{-1}]$	Rozdíl entalpií vzduchu mezi vstupem a výstupem ZVT
ΔT_a	[°C]	Teplotní rozdíl vzduchu mezi vstupem a výstupem ZVT
ΔT_{ma}	[°C]	Diferenciál teploty zeminy, tj. rozdíl mezi průměrnou teplotou zeminy v „hluboké zóně“ (cca 10 m) a průměrnou teplotou vzduchu za několikaleté období
$\Delta\rho_v(x, \tau)$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Rozdíl střední parciální hustoty vodní páry (<i>v objemu procházejícího vzduchu ve vzdálenosti x [m] od počátku potrubí</i>) a parciální hustoty páry na stěně potrubí
$\Delta\rho_{v,IN}$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Rozdíl těchto hustot pro $x = 0$ m (<i>tj. na vstupu do potrubí</i>)

Zkratka	Význam
CFD	Computational Fluid Dynamics (česky: počítačové modelování proudění tekutin)
CFU	Colony Forming Unit (česky: kolonie tvořící jednotku – viz KTJ)
COP	Coefficient of Performance (česky: topný faktor, bezrozměrná veličina)
CZD	Czapek Dox agar (tj. živná půda)
ČR	Česká republika
EER	Energy Efficiency Ratio (česky: chladicí faktor, bezrozměrná veličina)
EPBD II	Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2010/31/EU o energetické náročnosti budov
EPD	Energeticky pasivní dům
EU	Evropská unie
IAQ	Indoor Air Quality (česky: kvalita vnitřního ovzduší)
IEQ	Indoor Environmental Quality (česky: kvalita vnitřního prostředí)
IZT	Integrovaný zásobník tepla (tj. akumulční nádrž)
KTJ	Kolonie tvořící jednotku
MaR	Měření a regulace
MZK	Moravská zemská knihovna v Brně
MVOC's	Microbial Volatile Organic Compounds (česky: těkavé organické látky uvolňované činností mikroorganismů)
NED	Nízkoenergetický dům
NTU	Number of Transfer Units (tj. bezrozměrný parametr pro výpočty tepelných výměníků)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PT	Přenos tepla
PVC	Polyvinylchlorid
RD	Rodinný dům
RH	Relative Humidity (česky: relativní vlhkost vzduchu)
SAB	Sabouraud Chloramphenicol agar (tj. živná půda)
SBS	Sick Building Syndrome (česky: syndrom nemocné budovy)
SN	Kruhová tuhost potrubí (jednotka: kN/m^2)
SÚRO	Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. v Praze
TČ	Tepelné čerpadlo
TOE	Tuna olejového ekvivalentu = 41,868 GJ
TRHx	Označení teplotně-vlhkostního čidla pro měření parametrů vzduchu
TZB	Technické zařízení budov
VOC's	Volatile Organic Compounds (česky: těkavé organické látky)
VZT	Vzduchotechnika/vzduchotechnický
ZVT	Zemní výměník tepla
ZVT-c	Cirkulační zemní výměník tepla
ZVT-k	Kapalinový zemní výměník tepla
ZZT	Zpětné získávání tepla (tj. rekuperace tepla z odpadního vzduchu)

Seznam použitých zdrojů

- [1] European Environment Agency: Final energy consumption by sector and fuel (CSI 027/ENER 016) - Assessment published 21 Oct 2015 [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment>.
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřevzatá) [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>.
- [3] CIB. Agenda 21 on sustainable construction. Rotterdam: CIB, 1999. ISBN 90-636-3015-8.
- [4] HUMM, O. Nízkoenergetické domy. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 353 s. ISBN 80-716-9657-9.
- [5] 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.
- [6] NAGY, E. Nízkoenergetický ekologický dům. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2002, 289 s. ISBN 80-889-0574-5.
- [7] NAGY, E. Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům. Bratislava: Jaga group, 2009, 207 s. ISBN 978-80-8076-077-9.
- [8] FEIST, W. Nízkoenergetický dům: Úspory energie v bytové výstavbě budoucnosti. Ostrava: HEL, 1994, 184 s.
- [9] TYWONIAK, J. Nízkoenergetické domy: principy a příklady. 1. vyd. Praha: Grada, 2005, 193 s. ISBN 80-247-1101-X.
- [10] TYWONIAK, J. Nízkoenergetické domy 2: principy a příklady. Praha: Grada, 2008, 193 s. ISBN 978-80-247-2061-6.
- [11] TYWONIAK, Jan. Nízkoenergetické domy 3: nulové, pasivní a další. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 195 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3832-1.
- [12] BÁRTA, Jan. Základní principy konceptu pasivního domu. Pasivní domy 2005: 18.-19.10.2005 Brno. Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2005.
- [13] 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.
- [14] KABELÉ, Karel. Teplovzdušné vytápění obytných budov [online]. [cit. 2012-08-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/620-teplovzduzne-vytapeni-obytnych-budov>.
- [15] MATUŠKA, Tomáš a kol. Teplovzdušné větrání a vytápění – teorie a schémata (I) [online]. [cit. 2012-08-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3235-teplovzduzne-vetrani-a-vytapeni-teorie-a-schemata-i>.
- [16] ATREA s.r.o., Teplovzdušné vytápění, větrání a chlazení [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/teplovzduzne-vytapeni-vetrani-a-chlazeni>.
- [17] 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>.
- [18] 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>.
- [19] 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>.
- [20] PREGIZER, Dieter. Zásady pro stavbu pasivního domu. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 126 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-2431-7.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] KLÁNOVÁ, Kateřina. Plísň v domě a bytě. Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4790-3.
- [25] WASSERBAUER, Richard. Biologické znehodnocení staveb. 1. vyd. Praha: ARCH, 2000, 257 s. ISBN 80-861-6530-2.

- [26] 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.
- [27] Hrazdilová, Marie. Zdravé bydlení. Pasivní domy 2005, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2005.
- [28] Rubinová O., Rubina A., Bernard J., Frič L. - Mikrobiální mikroklima budov (II) - Sběr a kultivace vzorků z rodinných domů [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/12972-mikrobialni-mikroklima-budov-ii>.
- [29] Centrum pasivního domu: Databáze pasivních domů v České republice. [online]. [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/katalog-pasivnich-domu>.
- [30] Zdeněk Lukáš - osobní emailová komunikace ze dne 2014-07-01.
- [31] Libor Pustka - emailová komunikace ze dne 2014-09-16.
- [32] MUDr. Petr Lochman - emailová komunikace ze dne 2015-06-18.
- [33] 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.
- [34] Flückiger, Barbara at al. Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1997.
- [35] Flückiger Barbara at al. Hygienic Aspects of Ground-coupled Air Systems. Indoor Air 1998; 8: 197–202, ISSN 0905-6947.
- [36] 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>.
- [37] 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.
- [38] Tiwari, G. N., at al. Annual thermal performance of greenhouse with an earth–air heat exchanger: An experimental validation. Renewable Energy, Volume 31, Issue 15, December 2006, Pages 2432–2446.
- [39] Kumar, Rakesh, at al. Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building. Building and Environment, Volume 38, Issue 6, June 2003, Pages 807–813.
- [40] Deglin, D., at al. Subsoil Heat Exchangers for the Air Conditioning of Livestock Buildings. Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 73, Issue 2, June 1999, Pages 179–188.
- [41] Breesch, H., at al. Passive cooling in a low-energy office building. Solar Energy, Volume 79, Issue 6, December 2005, Pages 682–696.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Pfafferott, Jens. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. Energy and Buildings, Volume 35, Issue 10, November 2003, Pages 971–983.
- [45] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Podklady pro Kurz Navrhování pasivních domů, 2. část - Vytápění a větrání. Brno: CPD, 10. Října 2012.
- [46] DANIELS, Klaus. Technika budov: příručka pro architekty a projektanty. 1. čes. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 519 s. ISBN 80-889-0563-X.
- [47] SZÉKYOVÁ, Marta. Větrání a klimatizace. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2006, 359 s. ISBN 80-807-6037-3.
- [48] GEBAUER, Günter, Olga RUBINOVÁ a Helena HORKÁ. Vzduchotechnika. 2. vyd. Brno: ERA, 2007, xx, 262 s. ISBN 978-80-7366-091-8.
- [49] VRÁNA, Jakub. Technická zařízení budov v praxi: [příručka pro stavaře]. 1. vyd. Praha: Grada, 2007, 331 s. ISBN 978-80-247-1588-9.
- [50] JINDRÁK, Martin. Problematika vlhkosti při cirkulačním teplovzdušném vytápění (I) [online]. [cit. 2012-08-09]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2999-problematika-vlhkosti-pri-cirkulacnim-teplovzdusem-vytapeni-i>.
- [51] JINDRÁK, Martin. Problematika vlhkosti při cirkulačním teplovzdušném vytápění (II) [online]. [cit. 2012-08-09]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3012-problematika-vlhkosti-pri-cirkulacnim-teplovzdusem-vytapeni-ii>.
- [52] Pfluger Rainer: Latest Progress in Ventilation Systems Worldwide, SBORNÍK Z 10. ROČNÍKU MEZINÁRODNÍ KONFERENCE Pasivní domy 2014: 31. Října - 1. Listopadu, Brno. Vyd. 1. Brno: Centrum pasivního domu, 2014. ISBN 978-80-904739-4-2.
- [53] PETRÁŠ, Dušan. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2008, 207 s. ISBN 978-80-8076-069-4.
- [54] Jindrák, Martin. Zkušenosti z realizací a provozem domů v ČR. Pasivní domy 2006, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2006.

- [55] VESELÝ, Daniel. Rekuperace – větrání s novou myšlenkou [online]. [cit. 2012-08-07]. Dostupné z: http://www.paul-rekuperace.cz/pdf/Brozura_rekuperace.pdf.
- [56] Pfluger Rainer, Feist Wolfgang, Hasper Wolfgang, Rojas-Kopeinig Gabriel: Energy and Cost Efficient Ventilation Systems with Heat Recovery – State of the Art and Enhancement. ASHRAE Transactions; May 2013, Vol. 119 Issue 2, p231.
- [57] 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>.
- [58] NILAN s.r.o. – Produkty – Pasivní rekuperace vzduchu[online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/produkty/pasivni-rekuperace>.
- [59] NILAN s.r.o. – Produkty – Aktivní rekuperace vzduchu[online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/produkty/aktivni-rekuperace>.
- [60] 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>.
- [61] 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.
- [62] KOLBÁBEK, Antonín. 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.
- [63] NILAN s.r.o. – Produkty – Tepelené trubice a příslušenství [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.nilan.cz/produkty/tepelne-trubice>.
- [64] Qpro - Vzduchotechnika a Klimatizace - ZPĚTNÉ ZÍSKÁVÁNÍ TEPLA VE VZDUCHOTECHNICE [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/ZZT-rekuperace-regenerace>.
- [65] 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.
- [66] Schulz, Heinz. Teplo ze slunce a země: energeticky úsporné topné systémy s podzemními zásobníky tepla, slunečními absorbéry a tepelnými čerpadly. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 1999, 132 s. ISBN 80-861-6709-7.
- [67] HUML, Jakub, BROŽ, Karel. Využití zemského polomasivu pro ukládání odpadního tepla a sluneční energie. Vytápění, větrání, instalace 3 (2003), s 115-117.
- [68] GEOTERMÁLNÍ ENERGIE, Ekologická energie z hlubin Země – současně možnosti využívání. PLANETA: Ročník XV, číslo 4/2007.
- [69] Salah, El-Din M. M. On the heat flow into the ground. Renewable Energy, Volume 18, Issue 4, December 1999, Pages 473–490.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] Al-Ajmi, F., at al. The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. Building and Environment, Volume 41, Issue 3, March 2006, Pages 235–244.
- [74] Sawhney, R. L., at al. An experimental study of summer performance of a recirculation type underground airpipe air conditioning system. Building and Environment, Volume 34, Issue 2, 1 March 1998, Pages 189–196.
- [75] Santamouris, M. at al. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. Solar Energy, Vol. 55, Issue 2, August 1995, Pages 111–124.
- [76] Gauthier, Carol, at al. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. Solar Energy, Volume 60, Issue 6, June 1997, Pages 333–346.
- [77] Stahl, Fredrik. Preheating of supply air through an earth tube system - Energy demand and moisture consequences. 6th Nordic Symposium, Building Physics 2002.
- [78] Misra, Rohit, at al. Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger. Energy and Buildings, Volume 49, June 2012, Pages 531–535.
- [79] Vargas, J. V. C., at al. Optimal Ground Tube Length for Cooling of Electronics Shelters. Heat Transfer Engineering, Vol. 26, Iss. 10, 2005.
- [80] Občanské sdružení Zelené bydlení - Domy chráněné zemí [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.zelenebydleni.eu/jak-funguji-zelene-domy.html>.
- [81] Frkal, Luděk. Domy chráněné zemí. Vyd. 2. Brno: Computer Press, 2009, vii, 94 s. ISBN 978-80-251-2745-2.
- [82] 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-spojeni-se-zarizenim-pro-bytove-vetrani-a-rekuperaci-tepla](http://www.tzb-info.cz/2772-vyuziti-zemnich-vymeniku-tepla-ve-spojzeni-se-zarizenim-pro-bytove-vetrani-a-rekuperaci-tepla).

- [83] 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.
- [84] Morávek, P. Nový princip teplovzdušného vytápění a řízeného větrání nízkoenergetických obytných domů [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/download.php?id=72008&di=7>.
- [85] ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r. o., Zemní vzduchový výměník ED geoflex [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/zemni-vzduchovy-vymenik-ed-geoflex>.
- [86] Kolbáček A., Podklady k juniorskému projektu VUT v Brně: FSI-J-12-24 „Zemní výměník tepla jako zdroj možného mikrobiologického znečištění vnitřního prostředí budovy“.
- [87] Wagner, Rainer at al. Measurement, Modeling and Simulation of an Earth-to-Air Heat Exchanger in Marburg (Germany), 4. ISES Europe Solar Congress, Kopenhagen, Dänemark, 2000.
- [88] Gebr. Ostendorf - OSMA zpracování plastů, s. r. o. – PRODUKTOVÉ ŘADY [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.kanalizacezplatu.cz/produktove-rady>.
- [89] Badescu, Viorel, Isvoranu, Dragos. Pneumatic and thermal design procedure and analysis of earth-to-air heat exchangers of registry type. Applied Energy, Volume 88, Issue 4, April 2011, Pages 1266–1280.
- [90] JOKL, Miloslav. Zdravé obytné a pracovní prostředí. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002, 261 s., xvi s. barev. obr. příl. ISBN 80-200-0928-0.
- [91] Jokl, Miloslav. Teorie vnitřního prostředí budov. [online]. [cit. 2012-08-17]. Dostupné z: http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/TVPB/Teorie_vnitriho_prostredi.pdf.
- [92] Kolbáček A., Podklady k projektu FRVŠ G1/3206/2011 „Zemní výměník jako nový prvek v technice prostředí“.
- [93] Kolektiv autorů: KATALOG TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ NÍZKOENERGETICKÝCH DOMŮ, EkoWATT, Středisko pro obnovitelné zdroje a úspory energie, září 2006 [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/24.pdf>.
- [94] Thevenard, Didier. Bibliographic Search on the Potential of Earth Tubes. Numerical Logics Inc. Canada: 2007.
- [95] KOPECKÝ, Pavel. Návrh dimenzí zemních výměníků tepla. Vytápění, větrání, instalace 3 (2008), s 124-128.
- [96] Kopecký, Pavel. K energetickému přínosu zemního výměníku tepla. Pasivní domy 2006, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2006.
- [97] 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.
- [98] Kopecký, Pavel. Pasivní dům v Rychnově – vyhodnocení některých dat za rok 2006. 14. mezinárodní konference Tepelná ochrana budov, 10. - 11. května 2007, Slovensko: Vysoké Tatry.
- [99] 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.
- [100] 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>.
- [101] TRNSYS 16.1, Manuál k simulačnímu programu.
- [102] 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.
- [103] Zukowski, Miroslaw. 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.
- [104] Bronfenbrener, Leonid, Korin, Eli. Thawing and refreezing around a buried pipe. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Volume 38, Issue 3, May 1999, Pages 239–247.
- [105] 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.
- [106] Popiel, C. O. at al. Measurements of temperature distribution in ground. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25, Issue 5, November 2001, Pages 301–309.
- [107] 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.
- [108] Mihalakakou, G. at al. Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. Applied Energy, Volume 48, Issue 1, 1994, Pages 19–32.
- [109] Beltrami, Hugo, Kellman, Lisa. An examination of short- and long-term air–ground temperature coupling. Global and Planetary Change, Volume 38, Issues 3–4, September 2003, Pages 291–303.
- [110] Trzaski, Adrian, Zawada, Bernard. The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency. Building and Environment, Volume 46, Issue 7, July 2011, Pages 1436–1444.
- [111] 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.

- [112] Rees, S. W., Zhou, Z., Thomas H. R. Ground heat transfer: A numerical simulation of a full-scale experiment. *Building and Environment*, Volume 42, Issue 3, March 2007, Pages 1478–1488.
- [113] Lakshmi, Venkat at al. Soil moisture–temperature relationships: results from two field experiments. *Hydrological Processes*, Volume 17, Issue 15, pages 3041–3057, 30 October 2003.
- [114] Bronfenbrener, Leonid, Bronfenbrener, Regina. A temperature behavior of frozen soils: Field experiments and numerical solution. *Cold Regions Science and Technology*, Volumes 79–80, August 2012, Pages 84–91.
- [115] Pokladníková Hana, Rožnovský Jaroslav, Dufková Jana: Promrzání půdy na stanicích Pohořelice, Vízovice a Bystřice nad Pernštejnem. In: *Meteorologické zprávy*, 59, 2006.
- [116] Pokladníková Hana, Rožnovský Jaroslav, Dufková Jana: PROMRZÁNÍ PŮDY NA STANICI BYSTŘICE NAD PERNŠTEJNEM, In: „Bioklimatologie současnosti a budoucnosti“, Křtiny 12. – 14.9.2005, ISBN 80-86 690–31-08 [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.cbks.cz/sbornik05b/Pokladnikova.pdf>.
- [117] Janssen, Hans, Carmeliet, Jan, Hens, Hugo. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Building and Environment*, Volume 39, Issue 7, July 2004, Pages 825–836.
- [118] 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.
- [119] Morávek, Petr. Mikroklima pasivních domů. *Pasivní domy 2006*, Vyd.1. Brno: Centrum pasivního domu, 2006.
- [120] 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.
- [121] WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. Copenhagen: WHO, c2010, xxv, 454 p. ISBN 92-890-0213-1.
- [122] 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.
- [123] William, J. Fisk, P. E. How IEQ Affects Health, Productivity. *ASHRAE Journal*, vol. 44, no. 5, May 2002.
- [124] RULÍK, Martin. *Mikrobiální biofilmy*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011, 447 s. ISBN 978-80-244-2747-8.
- [125] BLAHNÍK, Roman. *Mikrobiální koroze: Koroze v chemickém průmyslu a boj proti ní*. Praha: SNTL, 1963, 257 s.
- [126] LEDEREROVÁ, Jaroslava. *Biokorozní vlivy na stavební díla*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2009, 273 s. ISBN 978-80-86821-50-4.
- [127] BROTÁNKOVÁ, 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.
- [128] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Základní principy: informační list o pasivních domech [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/data/files/3571.pdf>.
- [129] Kabele, Karel, Drbálková, Pavlína. Výsledky pilotního měření kvality vzduchu ve školním a domácím prostředí v ČR [online]. [cit. 2012-08-20]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/8787-vysledky-pilotniho-mereni-kvality-vzduchu-ve-skolnim-a-domacim-prostredi-v-cr>.
- [130] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU - Nucené větrání s možností rekuperace odpadního tepla v objektech pro vzdělávání [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/data/files/3640.pdf>.
- [131] Patočka, Josef. Prevence proti plísním v panelových domech. *VIPA informuje*, květen 2006.
- [132] Arundel, A. V., at al. Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. *Environ Health Perspect.* 1986 March; 65: 351–361.
- [133] Chao, Hsing Jasmine at al. Dustborne fungi in large office buildings. *Mycopathologia* 154: 93–106, 2001.
- [134] Yu, B. F., at al. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. *International Journal of Refrigeration*, Volume 32, Issue 1, January 2009, Pages 3–20.
- [135] 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.
- [136] Jokl, Miloslav. Ohrožení mikroby v interiéru budov. *Stavební obzor 7/2008*, s. 211–216.
- [137] Kohoutová, Jarmila. Klimatizace – Zdravotní rizika a prevence. *Interní medicína pro praxi 2008*; 10(5), s. 231–232.
- [138] Schellhorn, M. Hygiena provozu klimatizačního zařízení [online]. [cit. 2012-08-24]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vetrani-klimatizace/7784-hygiena-provozu-klimatizacniho-zarizeni>.
- [139] Knižová Katarína, Vranayová Zuzana. Hygiena VZT zařízení a jejich vliv na mikrobiologické znečištění vzduchu v interiéru [online]. [cit. 2012-08-24]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/5645-hygiena-vzt-zarizeni-a-jejich-vliv-na-mikrobiologike-znecistenivzduchu-v-interieru>.
- [140] Chang, J. C. S, Foarde, K. K., VanOsdell, D. W. Assessment of fungal (penicillium chrysogenum) growth on three HVAC duct materials. *Environment International*, Vol 22, No 4, 1996, pp 425–431.
- [141] 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 obytných místností některých staveb.

- [142] 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.
- [143] Klánová, Kateřina. Historie a standardizace hodnocení koncentrací bakterií a plísní v ovzduší. *Tepelná ochrana budov* 1/2008, s. 23-25.
- [144] MALÍŘ, František a Vladimír OSTRÝ. Vlákňité mikromycety (plísně), mykotoxiny a zdraví člověka. 1. vyd. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2003, 349 s. ISBN 80-701-3395-3.
- [145] ŠILHÁNKOVÁ, Ludmila. Mikrobiologie pro potravináře a biotechnology. 3. oprav. a dopl. vyd. Praha: ACADEMIA, 2002, 363 s. ISBN 80-200-1024-6.
- [146] Husman, Tuula. Health effects of indoor-air microorganisms. *Scand J Work Environ Health* 1996;22(1):5-13.
- [147] Mudarri, D., Fisk, W. J. Public health and economic impact of dampness and mold. *Indoor Air* 2007; 17: 226–235.
- [148] SLÁDKOVÁ, Pavla a Jana HLAVÁČOVÁ. Speciální mikrobiologie. 1. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, 88 s. ISBN 978-80-7375-558-4.
- [149] Holcátová, Ivana. Zdravotní aspekty nedostatečného větrání [online]. [cit. 2012-08-24]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/8320-zdravotni-aspekty-nedostatecneho-vetrani>.
- [150] 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.
- [151] 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.
- [152] Armando, Pinto, at al. Air quality by VAV HVAC system before and after cleaning. Case study. *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*, Helsinki (Finland) 2007.
- [153] Jokl, Miloslav. Optimalizace mikrobiálního mikroklimatu. *Stavební obzor* 8/2008, s. 225-229.
- [154] Menetrez, M. Y., at al. The effectiveness of UV irradiation on vegetative bacteria and fungi surface contamination. *Chemical Engineering Journal*, Volume 157, Issues 2–3, 1 March 2010, Pages 443–450.
- [155] 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.
- [156] Korpi, Anne at al. Microbial growth and metabolism in house dust. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 40, No. 1 (1997) 19-27.
- [157] Noris, Federico, at al. Evaluation of HVAC filters as a sampling mechanism for indoor microbial communities. *Atmospheric Environment*, Volume 45, Issue 2, January 2011, Pages 338–346.
- [158] Hasselaar, Evert. Zdravotní rizika spojená s pasivními domy. *TZB HAUSTECHNIK* 04/2010, s. 36-40.
- [159] ing. Pavel Kopecký, PhD. - ČVUT Praha - osobní emailová komunikace ze dne 2011-11-07.
- [160] 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.
- [161] 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/studentska_soutez/2007/Bernd-Woters/CZ-Mz.pdf.
- [162] 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.
- [163] Calibre Engineering Pte Ltd - Airbone Bateria Sampler [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.calibreengr.com/DreamweaverMXDynamicApplication/Airbone%20Bateria%20Sampler.htm>.
- [164] MBV AG - Professional Microbial Air Sampler Systems - MAS-100 Eco® [online]. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://www.mbv.ch/mas-100-eco_47-de.html.
- [165] RNDr. Ladislav Moučka - Státní ústav radiační ochrany, v.v.i.: osobní konzultace na poradenském stánku ČKAIT v rámci Mezinárodního stavebního veletrhu Brno, 25.4.2013.
- [166] Hollmuller, Pierre. Analytical characterization of amplitude dampening and phase-shifting in air/soil heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 46, Issue 22, October 2003, Pages 4303–4317.
- [167] Krarti, Moncef, Kreider, Jan F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel. *Energy Conversion and Management*, Volume 37, Issue 10, October 1996, Pages 1561–1574.
- [168] Chung, Mo, at al. Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 42, Issue 20, October 1999, Pages 3771–3786.
- [169] Cucumo, M., at al. A one-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 51, Issues 3–4, February 2008, Pages 506–516.
- [170] Jacovides, C. P., Mihalakakou, G. An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes. *Renewable Energy*, Volume 6, Issue 8, November 1995, Pages 893–900.

- [171] Badescu, Viorel. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable Energy*, Volume 32, Issue 5, April 2007, Pages 845–855.
- [172] Kurpaska S., Slipek Z. Mathematical Model of Heat and Mass Exchange in a Garden Subsoil during Warm-air Heating. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 65, Issue 4, December 1996, Pages 305–311.
- [173] Piechowski, M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: validation and sensitivity analysis. *International Journal of Energy Research*, Volume 22, Issue 11, pages 965–979, September 1998.
- [174] Mihalakakou, G., at al. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar Energy*, Volume 53, Issue 3, September 1994, Pages 301–305.
- [175] Hollmuller, Pierre, Lachal, Bernard. Cooling with air-to-earth heat exchangers versus direct night cooling: a parametric study for different climates. *The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Brazil, 2001.
- [176] Hollmuller, Pierre, Lachal, Bernard. Cooling and preheating with buriedpipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. *Energy and Buildings*, Volume 33, Issue 5, May 2001, Pages 509–518.
- [177] Trombe, A., Serres L. Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation. *Energy and Buildings*, Volume 21, Issue 2, 1994, Pages 155–162.
- [178] Thiers, Stéphane, Peuportier, Bruno. Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France. *Solar Energy*, Volume 82, Issue 9, September 2008, Pages 820–831.
- [179] 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.
- [180] Kabele K., a kol. Energetická náročnost budov a vzduchotechnika. *Vytápění, větrání, instalace*, 19 (3): 131–136, 2010.
- [181] INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: Wiley, 1996, xxiii, 886 s. ISBN 04-713-0460-3.
- [182] 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.
- [183] 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>.
- [184] Meteonorm, Meteonorm Software [online] [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.meteonorm.com/en>.
- [185] 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.
- [186] SEDLÁK J., OSTRÝ M. Klimatická hodinová data pro posuzování energetické potřeby pro vytápění a chlazení. *Vytápění, větrání, instalace*, 19 (3): 148–152, 2010.
- [187] Ing. Martin Hendrich - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o. - osobní emailová komunikace ze dne 2016-02-16.
- [188] Rekuperace Martínek - E-shop - Zemní tepelné výměníky - Pro rodinné domy [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://eshop.martinek-rekuperace.cz/Pro-rodinne-domy/502-Awadukt-Thermo-trubka-6m>.
- [189] Jícha M., Charvát, P.: Experimentální dům pro výzkum větrání [online]. [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2215-experimentalni-dum-pro-vyzkum-vetrani>.
- [190] doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D. - Ústav geotechniky, Fakulta stavební VUT v Brně - emailová komunikace ze dne 2012-03-10.
- [191] 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.
- [192] Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny - METEOROLOGICKÁ STANICE FAST VUT V BRNĚ [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/vhk/meteo.html>.
- [193] Klinické laboratoře IFCOR-99, s.r.o. [online]. [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: <http://www.ifcor.cz>.
- [194] Pipelife Czech s.r.o. – REVIZNÍ A VSTUPNÍ ŠACHTY DN 200 - DN 1000, verze: 10/2015 [online]. [cit. 2016-08-20]. Dostupné z: http://www.pipelife.cz/media/cz/pdf_products/REVIZNI_VSTUPNI_SACHTY_DN200-DN1000_2015.pdf
- [195] ZIKÁN, Z. Pasivní domy Koberovy s teplovzdušným vytápěním a větráním. *Vytápění, větrání, instalace*, 22 (4): 159–163, 2013. ISSN: 1210- 1389.
- [196] JINDRÁK, M. Vnitřní prostředí EPD – zkušenosti z čtyřletého provozu. In: *Pasivní domy 2008*. Brno: Centrum pasivního domu, 2008, s. 379–384.
- [197] Wikipedie – otevřená encyklopedie: Brno [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Brno>

Seznam vlastních publikací

- [A1] 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.
- [A2] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Energetická simulace vlivu zemního výměníku tepla na provoz rekuperační jednotky teplovzdušného vytápění. In SETKÁNÍ KATEDER MECHANIKY TEKUTIN A TERMOMECHANIKY. Rožnov pod Radhoštěm: VŠB, 2010. s. 133-136. ISBN: 978-80-248-2244- 0.
- [A3] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Exploitation of an air-ground heat exchanger in a low- energy family house. In Central Europe towards Sustainable Building. Extended proceedings CESB10 Prague conference. Praha: 2010. p. 279-282. ISBN: 978-80-247-3634- 1.
- [A4] KOLBÁBEK, A. Využití zemního výměníku tepla v nízkoenergetickém domě ve městě Studénka. In Alternativní zdroje energie 2010. Kroměříž: 2010. s. 97-112. ISBN: 978-80-02-02241- 1.
- [A5] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M.; SOKOLA, R. Energetická simulace zemních výměníků tepla. In Simulace budov a techniky prostředí, 6. národní konference s mezinárodní účastí. Praha: IBPSA- CZ, 2010. s. 61-66. ISBN: 978-80-254-8661- 0.
- [A6] 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.
- [A7] 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.
- [A8] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Zemní výměník tepla jako nový prvek v technice prostředí: projekt FRVŠ. In 30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky 2011. Špindlerův Mlýn: TUL, 2011. s. 105-108. ISBN: 978-80-7372-747- 5.
- [A9] 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.
- [A10] 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.
- [A11] 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.
- [A12] 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-vyminenik-tepla-fsi-vut>. TZB-info, 2013, roč. 2013, č. 3, ISSN: 1801- 4399.
- [A13] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M. Experimental Air Ground Heat Exchanger and Its Construction, Engineering MECHANICS, Vol. 20, 2013, No. 3/4, p. 255-261. ISSN: 1802-1484.
- [A14] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M., MUSIL, Z. Mikrobiologické riziko zemních vzduchových výměníků tepla-pilotní studie. In Zdravé domy 2013. Brno: VUT v Brně, 2013. s. 87-96. ISBN: 978-80-214-4737-0.
- [A15] JAROŠ, M.; KOLBÁBEK, A., MUSIL, Z. Experimental air ground heat exchanger – operating experience and its use in a teaching of an Environmental Engineering. Extended proceedings CESB13 Prague conference. Praha: 2013. p. 279-282. ISBN: 978-80-247-5015- 6.
- [A16] KOLBÁBEK, A.; JAROŠ, M., MUSIL, Z. Vliv zemních výměníků tepla na kvalitu přiváděného vzduchu a zkušenosti uživatelů s jejich provozem. In 21. konference klimatizace a větrání 2014. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014.s. 77-82. ISBN: 978-80-02-02520- 7.

