

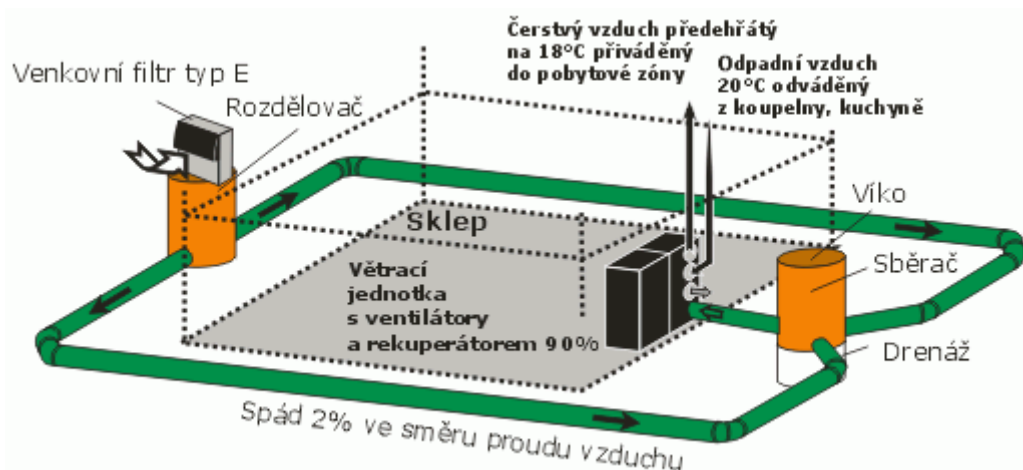
Využití zemních výměníků tepla ve spojení se zařízením pro bytové větrání a rekuperaci tepla

Datum: 10.10.2005

Autor: Dipl. - Ing. Eberhard Paul, překlad: Mgr. Květoslava Otcovská

Organizace: Paul Wärmerückgewinnung GmbH

Země jako sezónní zásobník sluneční energie se v poslední době stále častěji využívá u zemního výměníku tepla k předehřevu čerstvého vzduchu pro větrací zařízení. V létě se naproti tomu využívá chladu zeminy k ochlazování čerstvého vzduchu přiváděného do obytných místností. Zemní výměník tepla (ZVT) tvoří potrubí uložené do země, kterým se nasává vzduch prostřednictvím ventilátoru rekuperační jednotky. Schéma jednotlivých komponentů je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1 - Principiální schéma: zemní výměník tepla (ZVT) ve spojení s rekuperační větrací jednotkou (RVJ) pro kontrolované bytové větrání

U kontrolovaného bytového větrání se ve vysoce účinném protiproudém kanálovém tepelném výměníku (rekuperátoru) z odváděného vzduchu získává zpět tepelná energie a tím se venkovní vzduch ohřívá např. z 0 °C na 18 °C. Při ochlazování odváděného vzduchu může docházet k tvorbě kondenzátu. Za velmi nízkých venkovních teplot by mohla tato kondenzovaná voda na deskách rekuperátoru namrznat a tím omezovat, nebo i zcela blokovat funkci rekuperátoru. K tomu, aby při venkovní teplotě nižší než -4 °C mohl tedy rekuperátor fungovat, je zapotřebí vnější vzduch předehřívát. Použití zemního výměníku tepla je pro předehřev velmi vhodné. Kromě toho zemní výměník tepla nabízí cenově výhodnou variantu větrání a ochlazování místností v létě. Ta stále více získává na důležitosti u obytných budov, u nichž se příjemného, světlem zaplaveného vzhledu místností dosahuje velkými plochami oken, skleněnými přístavky a zimními zahradami. V důsledku velkých solárních zisků to však má za následek přehřívání místností. Velice se doporučuje dobré venkovní zastínění oken. K tomu se ještě načítají vnitřní zdroje tepla, kterými jsou pobývající osoby, technické domácí spotřebiče, osvětlení a počítače.



Obr. 2 - Sběrač s drenáží a vstup do domu



Obr. 3 - Dvě paralelní trubky zemního výměníku tepla umístěné 2 m vedle základové konstrukce

2. Předehřívání vzduchu v zimě

Teplota zeminy se v zimě pohybuje mezi 4 a 8 °C [1] [2] [5]. V zemním výměníku tepla se na výstupu dosahují následující hodnoty teploty vzduchu:

Venkovní teplota [°C]	- 15	- 9	- 7	- 4	- 10	- 15	- 10	- 20
Výstupní teplota vzduchu ze ZVT[°C]	+ 2	+ 3	+ 4	+ 5	+ 2	+ 1	+ 2	0
Literatura	[3]			[4]		[5]		
Ṃ[m ³ /h]	200			140		160		
Průměr Ø [mm]	200			125		100		
Délka l [m]	23			42		40		
Hloubka uložení [m]	1,7			1,5		1		

Tabulka 1 - Předehřev vzduchu v zimě

Jednoroční měření prováděné technickou odbornou školou ve Winterthuru na zemním výměníku tepla v bytovém domě Hausäcker prokázala následující výsledky: průměrné denní teploty vzduchu na konci potrubí výměníku se do konce října pohybovaly ještě kolem 15 °C a teprve počátkem prosince klesly teploty 5 °C, ale během celé zimy zůstaly nad bodem mrazu. Od března teploty opět vystoupily nad 15 °C [6].

3. Ochlazování vzduchu v létě

Venkovní teplota [°C]	24	28	26	33	26	33
Výstupní teplota vzduchu ze ZVT [°C]	14	16	15	19	17	22
Literatura	[4]		[5]		[5]	
Ṃ[m ³ /h]	140		155		155	
Průměr Ø [mm]	125		100		100	

Délka l [m]	42	40	20
Hloubka uložení [m]	1,5	1	1

Tabulka 2 - Chlazení vzduchu v létě

4. Faktory ovlivňující teplotní chování zemního výměníku tepla

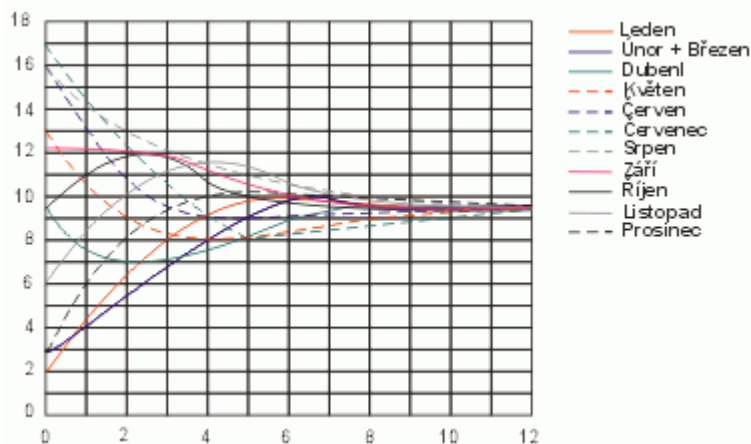
Výstupní teploty vzduchu ze zemního výměníku tepla ovlivňuje celá řada faktorů, které je nutno chápat komplexně. Vlivy lze shrnout do rozsáhlého simulačního programu pro návrh ZVT [2], [8], [9], [10]. Tím lze zhruba předem vypočítat výstupní teplotu vzduchu. Při sledování dále popsaných tendencí vlivů a při dodržování pokynů pro dimenzování, uvedených v [kapitole 5](#), lze zhruba docílit výstupní teploty vzduchu, uvedené v tabulkách 2 a 3.

a)	Ovlivňující faktor zemina/klima	Přenos tepla do zemního výměníku
1.	Vysoká hustota zeminy	↑
2.	Dobré zhutnění zeminy	↑
3.	Vysoký podíl jílu/hlíny	↑
4.	Vysoká vlhkost zeminy	↑
5.	Povrchová voda - průsak přes zemní výměník	↑
6.	Vysoká hladina spodní vody	↑
7.	Vysoký přenos slunečního tepla (na podzim) do zeminy	↑
8.	Krátká perioda období chladu (tepla)	↑
b)	Ovlivňující faktor dimenzování trubky	Přenos tepla do zemního výměníku
9.	Nízká rychlost proudění vzduchu	↑
10.	Velká délka trubky	↑
11.	Malý Ø trubky a více paralelních trubek	↑
12.	Větší mezera mezi trubkami	↑
13.	Velká hloubka uložení max. 6 m	↑

Tabulka 3 - Ovlivňující faktory

Vysoká měrná tepelná kapacita c_p zeminy znamená velkou schopnost akumulace solární energie (ve vztahu k 1 kg). Vysoká tepelná vodivost λ naproti tomu vypovídá o tom, že se teplo z okolních vrstev zeminy dobře transportuje k trubce zemního výměníku.

Teplota zeminy v průběhu roku



Obr. 4 - Teplotní pole neporušené zeminy [8]

Na obr. 4 je znázorněno, že výkyvy teploty v hloubce od 2 - 3 m už nejsou tak závažné. Proti nadměrnému ochlazení zeminy (v zimě), resp. jejímu nadměrnému zahřátí (v létě) lze vhodně reagovat částečným odpojováním zemního výměníku tepla, resp. jeho obtokem. Avšak není to nutné k tomu, aby se dosáhlo pouze nezamrzání nasávaného vzduchu. Pokud však na podzim při mírně teplých venkovních teplotách (10 - 15 °C) zemním výměníkem protéká venkovní vzduch, zvyšuje se teplota zeminy v blízkosti trubky. Takto regenerovaná zemina pak i v zimě může během delšího chladného období odevzdávat dostatek tepla do chladného venkovního vzduchu v zemním výměníku. Výstupní teplota vzduchu u zemního výměníku se v zimě pohybuje zpravidla 2 - 3 K pod teplotou zeminy a v létě cca. 2 K nad teplotou zeminy.

Množství kondenzátu v létě

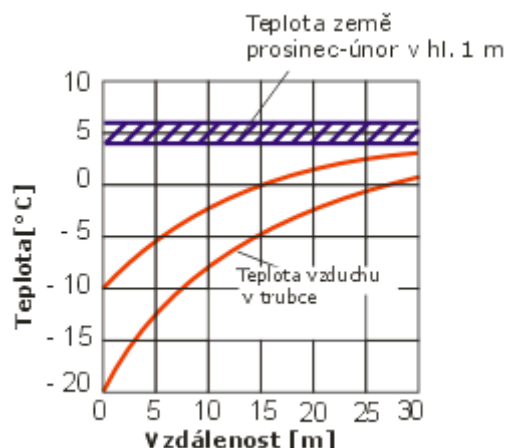
Při ochlazování vzduchu při venkovní teplotě 32 °C s 40 % relativní vlhkostí vzniká 0,17 l kondenzátu za hodinu.

5. Směrnice pro dimenzování zemního výměníku tepla

Délka trubek

Podle [5] je známo, že u 40 m dlouhé podzemní trubky již po 1/3 délky trubky dochází k ohřátí vzduchu o polovinu rozdílu teploty (mezi vstupem a výstupem). To ukazuje, že se nevyplácejí příliš dlouhé trubky (delší než 35 m) - teplota vzduchu se asymptoticky přibližuje teplotě zeminy. Smysluplná je délka trubky od 25 do 35 m o průměru Ø 150 do 200. Přitom se vzduch může vést rozdělený ve dvou paralelních větvích v délce každé větve 15 až 20 m. Rozhodující je doba setrvání t .

$$t = \frac{V}{\dot{V}} \quad \begin{array}{l} V = \text{objem trubky [m}^3\text{/h]} \\ \dot{V} = \text{objemový proud vzduchu [m}^3\text{/h]} \end{array}$$



Obr. 5: Závislost teploty vzduchu na délce trasy v zemním výměníku tepla při různých vstupních teplotách (-10 a -20°C) a průtočném množství 150 m³/h. Trubka má Ø 100 mm a celkovou délku 40 m. [5]

Maximálně dosažitelný a smysluplný ohřev vzduchu v zimě

U dimenzování zemního výměníku tepla se často klade otázka, týkající se závislosti teploty vzduchu na délce trubky a zvětšené hloubce položení. Je důležité, aby výstupní teplota vzduchu ze zemního výměníku tepla neklesla pod -3 °C, tak aby se v rekuperátoru tepla zabránilo namrzání kondenzátu, protože následně nutný postup rozmrazování - odpojení ventilátoru přiváděného vzduchu (často teplotně řízenou automatikou) - znamená ztrátu energie (budovu opouští relativně teplý odpadní vzduch) a porušenou rovnováhu přiváděného a odváděného vzduchu (v budově dochází k infiltraci studeného vzduchu). Z obr. 5 vyplývá, že tento bod (- 3 °C) se u trubky Ø 100 mm (hloubka položení: 1 m) dosahuje už po 25 m. Další zvyšování teploty výstupní teploty zemního výměníku tepla je nutno z energetického hlediska (zimní provoz) sledovat v souvislosti s provozem rekuperátoru.

Zvýšení účinnosti rekuperátoru (WRG) pomocí zemního výměníku tepla (EWT)

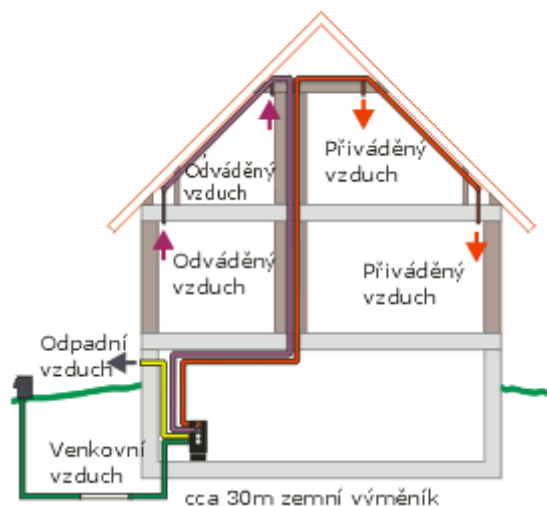
Φ_{WRG} = tepelná účinnost (nebo součinitel vratného tepla) rekuperátoru (WRG)

Φ_{EWT} = tepelná účinnost (nebo součinitel zpětného zisku tepla) rekuperátoru (WRG) se zemním výměníkem tepla, instalovaným před ním

Předpoklady:

a) Zemní výměník tepla ohřívá venkovní vzduch z -15 °C na $t_{Au2} = + 2$ °C (při délce 30 m) nebo

b) Zemní výměník tepla ohřívá venkovní vzduch z -15 °C na $t_{Au2} = + 3$ °C (při délce 40 m)



- Okrajové podmínky:
- Trubka zemního výměníku $\varnothing = 200 \text{ mm}$
- t_{Au1} = venkovní teplota: $-15 \text{ }^\circ\text{C}$
- t_{Au2} = výstupní teplota zemního výměníku
- t_{Ab} = teplota odváděného vzduchu: $+20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hloubka uložení: $1,5 \text{ m}$

Obr. 6 - Zemní výměník tepla v kombinaci s přístrojem na rekuperaci tepla (WRG)

	Tepelná účinnost Φ		Teplota přiváděného vzduchu t_{zu}	
	bez zemního výměníku	se zemním výměníkem	bez zemního výměníku	se zemním výměníkem
	Φ_{WRG}	Φ_{EWT}		
a) při délce zemního výměníku tepla 30 m				
rekuperátor s křížovým výměníkem tepla	65 %	82 %	7,7 °C	13,7 °C
rekuperátor s protiproudým výměníkem tepla	75 %	87 %	11,2 °C	15,5 °C
rekuperátor s výměníkem tepla s protiproudovými kanálky (patent PAUL)	90 %	95 %	16,5 °C	18,2 °C
b) při délce zemního výměníku tepla 40 m				
rekuperátor s křížovým výměníkem tepla	65 %	82,9 %	7,7 °C	14 °C
rekuperátor s protiproudým výměníkem tepla	75 %	87,7 %	11,2 °C	15,7 °C
rekuperátor s výměníkem tepla s protiproudovými kanálky (patent PAUL)	90 %	95,1 %	16,5 °C	18,3 °C

Prodloužení trubky zemního výměníku tepla z 30 m na 40 m ovlivňuje jen nepatrné zvýšení výstupní teploty zemního výměníku (cca. 1 K), což se za rekuperátorem projeví jen zvýšením teploty přiváděného vzduchu o 0,1 až 0,3 K. Podle údajů uvedených v obrázku 4 ovlivní zvýšení hloubky uložení trubky z 1 m na 2 m předpokládané zvýšení výstupní teploty (v zimě) o 2 K. Zvýší-li se hloubka uložení trubky z 2 na 3 m, je výstupní teplota vzduchu vyšší ještě cca. o 1,5 K.

Průměr trubky

Při porovnání výstupních teplot vzduchu lze konstatovat, že ohřev vzduchu je v menší trubce (při stejné délce) menší. To lze vysvětlit tím, že délka setrvání je relativně malá. Doporučují se trubky s \varnothing 150 - 200 mm. Průměry trubek překračující \varnothing 200 mm vytvářejí jádro proudu, které se jen málo podílí na tepelné výměně (na stěně trubky). Změna průměru trubky se stejným objemovým proudem a stejnou délkou má protichůdné efekty: Na jedné straně se zmenšením průměru zmenšuje teplo-výměnná plocha a doba setrvání vzduchu v zemním výměníku, na druhé straně se v důsledku vyšší rychlosti proudění zvyšuje součinitel přestupu tepla. Ve většině případů se posledně jmenovaný faktor projevuje jen zanedbatelně.

Zvlněná nebo hladká trubka?

Shora uvedené jádro proudu lze přeměnit uvnitř zvlněnou trubkou do turbulence, čímž se sice zlepší přestup tepla, ale současně se zvýší ztráta tlaku a tím i spotřeba elektrické energie (ve ventilátoru).

	Výhody	Nevýhody
Zvlněná trubka	- dobrý přestup tepla	- vysoká ztráta tlaku (vyšší spotřeba elektrické energie) - kondenzát nemůže (nebo může jen špatně) odtékat - zůstává ležet ve zvlnění trubky (tvorba zárodků) - usazování nečistoty v "dolíčkách" zvlnění trubky - hůře se čistí
Hladká trubka	- menší ztráta tlaku (spotřeba elektrické energie) - dobrý odtok kondenzátu - dobře se čistí	- trochu horší přestup tepla (závisící na drsnosti a průměru)

Kvůli odtoku kondenzátu (a případnému odtoku proplachovací vody při čištění) by trubka zemního výměníku tepla měla mít vnitřní hladké stěny a měla by se pokládat zhruba s 2 % sklonem směrem k domu.

Paralelní trubkové registry

Při pokládání dvou (nebo více) paralelních větví je v každé větvi nutno dbát na zhruba stejné ztráty tlaku, aby se zaručilo zhruba rovnoměrné proudění (doba setrvání) vzduchu v každé

větvi. Zemním výměníkem tepla by stále měl proudit vzduch - nehybný vzduch by mohl způsobit zápach.

Materiál trubek

Pro průchod tepla v hraniční vrstvě mezi trubkou a zeminou jsou rozhodující podmínky přestupu tepla vnitřní stěna trubky - vzduch. Materiál trubky jako takový má v důsledku jeho relativně vysoké tepelné vodivosti λ podřadný význam. Nejslabší článek v procesu přenosu tepla rozhodujícím způsobem určuje převod tepla - je jím součinitel přestupu tepla α (na straně vzduchu). Dosud nejmenovanou veličinou je drsnost povrchů. Kupříkladu rozdíl mezi plastovou trubkou a betonovou trubkou je velice podstatný. Rozdíly se však nevyskytují jen u lepšího součinitele přestupu tepla, ale i u zvýšené ztráty tlaku (spotřeby elektrické energie) a ve vyšších investičních nákladech.

Pro zemní výměník tepla se používají následující materiály [7]:

- plastové trubky z tvrdého PVC (trubky KG, DIN 19534)
- polypropylenové trubky
- kameninové trubky (DIN 1230, DIN EN 295)
- betonové trubky (DIN 4032 a 4035)
- vláknocementové trubky (DIN 19840, 19850) např. výrobky značky Eternit
- litinové trubky (DIN 19522)



Obr. 7 - Předřazený filtr typu "E" pro zemní výměník tepla (výrobek firmy PAUL)

Venkovní předřazený vstupní filtr vzduchu

Pro návrh zemního výměníku tepla je důležité zabudování předřazeného filtru pro čištění nasávaného vzduchu. Tím se zaručí, aby se na stěnách trubek nemohl usazovat prach a pyl. Zamezí se tím také tvorbě kultur bakterií a mikroorganismů. U nefiltrovaného vzduchu je usazování prachu v trubce velice pravděpodobné - tloušťka vrstvy prachu a složení prachu a mikroorganismů jsou uživateli zpravidla neznámé. Usazeniny prachu na předřazeném filtru lze naproti tomu velmi dobře pozorovat. Výměna filtru je tak také podstatně levnější a méně komplikovaná než čištění potrubí. Důležitá je pravidelná kontrola filtru a jeho výměna podle potřeby (zhruba po 4 - 8 měsících). Na ochranu vysoce hodnotného filtračního materiálu a vyvolaným nákladům na výměnu je před zobrazeným krytem předřazeného filtru umístěna hrubá filtrační síťka filtrační kazety ve tvaru Z. Celková filtrační plocha je navržena velkoryse, tak aby se ztráta tlaku a tím i spotřeba elektrické energie udržovala na co nejnižší úrovni. Pokusy prokázaly, že oba filtry společně způsobují pouze cca. 10 Pa ztráty tlaku. V nabídce jsou filtry ve třídách G 4 a F 7.

Místo nasávání vzduchu

Nasávání vzduchu by se mělo provádět v místě se suchým vzduchem, tedy ne v okolí rybníka nebo vlhkého biotopu. Kvůli filtru by se mělo zvolit snadno přístupné místo. Bod nasávání by neměl ležet v blízkosti kompostu a v hustě osázené zóně. Nasávání vzduchu by nemělo probíhat v bezprostřední blízkosti země, aby se zamezilo nasávání (větrem) zvířeného prachu a mikroorganismů. Při umístění filtračního boxu je nutno dát pozor i na to, aby k němu neměly přístup cizí osoby, které by mohly zařízení zlomyslně poškodit. Předfiltr se často montuje do kůlny na zásoby nebo na jízdní kola, na zadní stěnu přístřešku pro auta nebo garáže.

Obtok (by-pass)

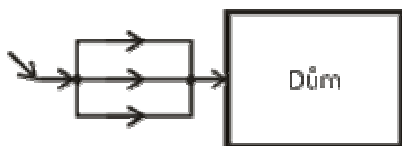
Vzduch ochlazovaný v zemním výměníku tepla (v létě) by se měl ve větrací jednotce vést vést obtokem kolem rekuperátoru (→ bez ohřevu přiváděného vzduchu odváděným vzduchem). Z důvodu již zmíněného možného zamrznutí kolem trubky zemního výměníku tepla je nutno zamezit křížení nebo vedení vodovodního potrubí pod trubkou výměníku (minimální vzdálenost 1 m).

6. Pokyny pro pokládání trubek a odvádění kondenzátu

Možnosti uložení zemního výměníku tepla

Půdorys

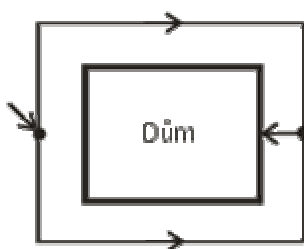
a) Žebřinové uložení



Z hlediska proudění technicky vhodnější položení žebřin

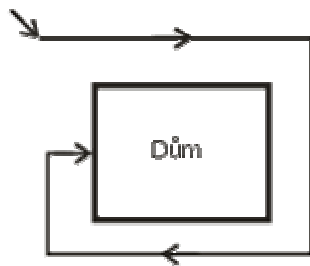


b) Dvě polosmyčky



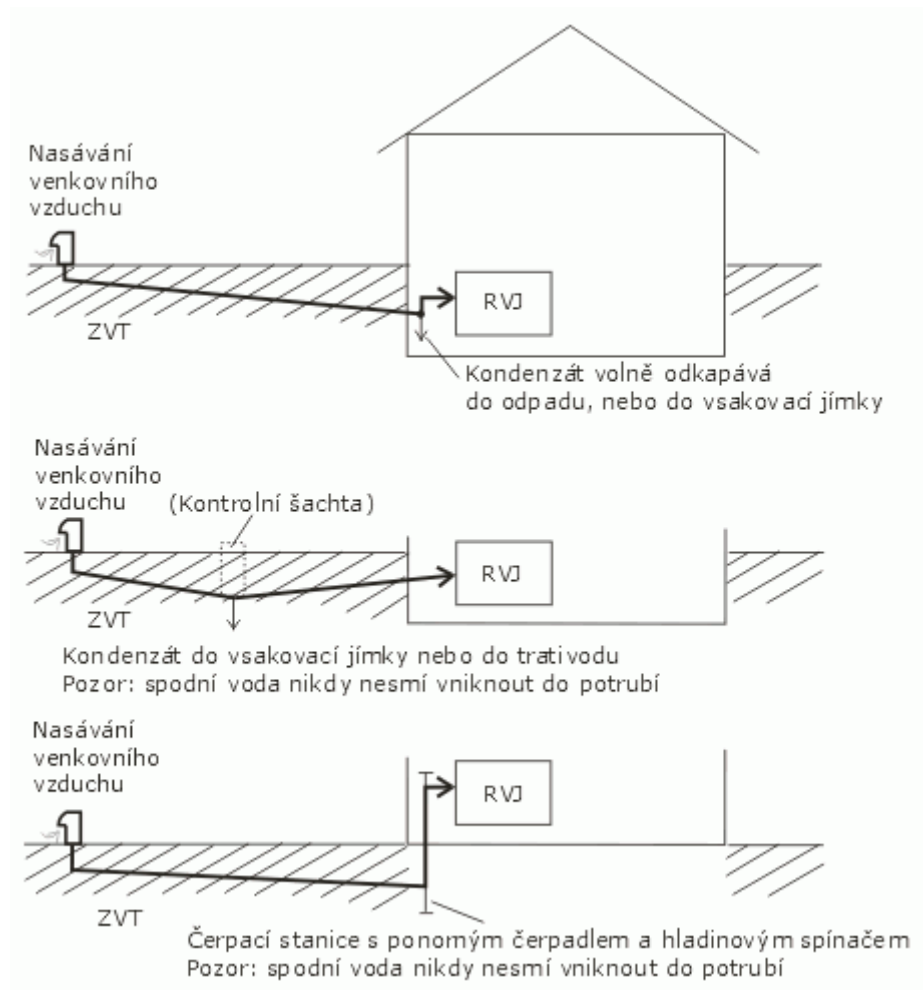
Vzdálenost trubek navzájem a vzdálenost mezi trubkou a domem by neměla být menší než 1 m

c) Jednotrubkové pokládání



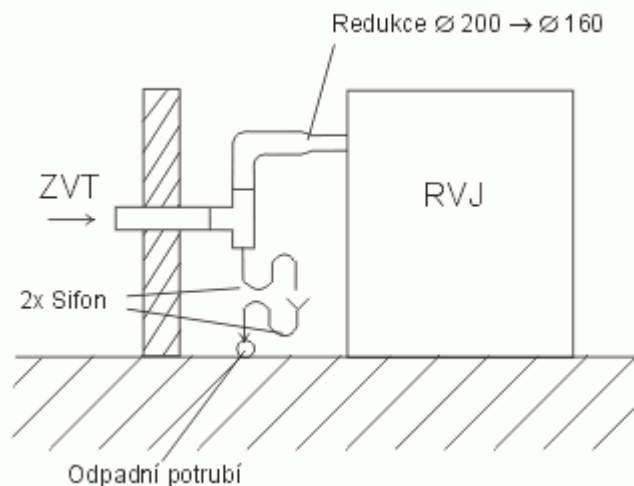
Obr. 8 - Možnosti pokládání zemního výměníku tepla

Možnosti odvádění kondenzátu



Obr. 9 - Odvádění kondenzátu

Konstrukce sifonu



Obr. 10 - Konstrukce sifonu

Pokud je kondenzát napojen pouze jedním sifonem přímo na odpadní trubku, může při vyschlém sifonu docházet k tomu, že se vzduch (a s ním i zápachy) budou z odpadní trubky nasávat do proudu venkovního vzduchu (pod podtlakem). Aby se tomu zabránilo, měl by se kondenzát nechat volně odkapávat prvním sifonem. Trychtýřem a 2. sifonem se pak kondenzát bude odvádět do odpadního potrubí. Aby se zpozdilo vysychání sifonu, mělo by se na obou stranách sifonu přidat trochu oleje.

7. Zemní výměníky tepla z hygienického hlediska [6]

Ve studii, prováděné v Ústavu hygieny a fyziologie práce (obor hygiena životního prostředí) Švýcarského vysokého učení technického v Curychu, se u 12 stávajících zařízení se ZVT ověřovalo, zda se vyskytují mikrobiologická znečištění a zda to způsobuje zatížení přiváděného vzduchu, resp. vzduchu v místnosti. Vzduch nasávaný zemním výměníkem tepla se sledoval vždy z hlediska rozdílů v koncentraci různých druhů mikroorganismů ve srovnání s venkovním vzduchem. Na třech zařízeních se pokusy opakovaly čtvrtletně, aby bylo možno zjistit změny v jednotlivých ročních obdobích. Na těchto zařízeních bylo také v doplňujícím turnusu provedeno stanovení obsahu alergenů dvou druhů plísní.

Provedení zkoušek v zemních výměnících tepla

Celkem se ověřovala následující zařízení se zemními výměníky tepla: čtyři rodinné domy, dva bytové domy s více bytovými jednotkami a šest větších budov pro různá využití. Čtyři zařízení jsou vybavena cementovými trubkami, osm plastovými trubkami. Ve většině zařízení byla koncentrace zárodků ve vzduchu na konci zemního výměníku nižší než ve venkovním vzduchu. Nejmarkantnější rozdíly byly zřejmé u větších staveb. V rodinných domech byly příležitostně naměřeny vyšší koncentrace ve vzduchu zemního výměníku tepla než ve venkovním vzduchu. Filtry, zabudované za zemními výměníky tepla (na vstupu do rekuperátoru), však výrazně snižují počet zárodků, takže přiváděný vzduch uvšech zařízení obsahoval výrazně méně bakterií a spor plísní než venkovní vzduch. Podle empirických hodnot se všechny koncentrace bakterií a plísní v okolním vzduchu, naměřené během těchto pokusů, pohybují v nízkém až středním pásmu.

Celoroční průběh

Výkyvy koncentrace škodlivin venkovního vzduchu, které kromě ročního období ovlivňují také geografické a meteorologické faktory, jsou vždy zřejmě ještě ve vzduchu zemního výměníku. Když vzduch projde filtrem, jsou rozdíly mezi ročními obdobími a zařízeními s filtry stejné jakosti velice malé. Zvlášť u větších zařízení s filtrem na jemný prach byla koncentrace škodlivin v přívodním vzduchu celoročně velmi nízká. Jako výhoda se ukazuje zabudování velkoplošného předfiltru (obr. 7) v místě nasávání vzduchu do zemního výměníku - už zde se zachycuje prach a mikroorganismy. Je nutno dbát na dobré utěsnění mezi filtrační kazetou a tělesem filtru. V případě zvýšených hygienických požadavků na kvalitu vzduchu lze dalšího značného snížení bakterií a spor dosáhnout zabudováním jemného filtru. Před zprovozněním by se mělo provést důkladné vyčištění potrubí zemního výměníku tepla. Potom by se zemní výměník a komponenty větrací soustavy měly pravidelně kontrolovat.

Literatura:

[1] *Protokollband Nr. 4, Seite III/16, Passivhaus-Institut Darmstadt*

[2] *Forschungsverbund Sonnenenergie "Themen 97/98", "Luft-/Erdwärmetauscher EWT: Modellierung, Auslegung und Betriebserfahrungen", von Gerber, Pfaffenrott, Dibrowski*

[3] *Messwerte Architekt Manfred Brausem (Köln) am eigenen Wohnhaus-Erd-WT*

[4] *Trümper, Hain, Albers, "Wohnungslüftung-Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung und vorgeschalteten Erdwärmetauscher" in TAB 4/92, S. 695 ff*

[5] *Sedlbauer, Lindauer, Werner, "Erdreich/Luft-Wärmetauscher zur Wohnungslüftung" in Bauphysik 16 (1994) Heft 2, S. 3 - 7*

[6] *Flückiger, Wanner, Lüthy, "Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern", Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Febr. 1997*

[7] *Henne, "Luftleitungs-Erdwärmeübertrager" in Technik am Bau 1999, Heft 10, S. 55-58*

[8] *Albers, "Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmeübertragern für die Konditionierung der Zuluft für Wohngebäude", Dissertation, Universität Dortmund 1991*

[9] *GAEA Softwarelabor für Niedrigenergie- und Solararchitektur, Fachgebiet Bauphysik und Solarenergie Ltg, Prof. Dr.-Ing. F.D. Heidt, Universität-GH Siegen, FB Physik*

[10] *WKMLTE, EMPA, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen, Mark Zimmermann, Dübendorf (Schweiz)*