

# K energetickému přínosu zemního výměníku tepla

Ing. Pavel Kopecký, ČVUT, Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Tel: +420 224 354 473, e-mail: [pavel.kopecky@fsv.cvut.cz](mailto:pavel.kopecky@fsv.cvut.cz)

**Abstrakt:** V našem podnebném pásu je přirozené, že budovy potřebují během roku vytápět či chladit. Pro předehřev a chlazení čerstvého vzduchu přiváděného do budovy je možné využít zemní výměník tepla (ZVT). Příspěvek obsahuje zhodnocení energetického přínosu zemního výměníku tepla na příkladu skutečného pasivního domu větraného systémem nuceného větrání s rekuperací (zpětným získáváním tepla) a předřazeným ZVT. Pro hodnocení byla využita data získaná z dlouhodobého provozního sledování uvedeného domu. Výsledky ukazují na podstatný rozdíl mezi předehřevem a chlazením vzduchu. Předehřev vzduchu v zemním výměníku tepla je možné chápat jako jistou konkurenci velmi účinné rekuperace, a proto systém sdružující ZVT a rekuperaci představuje pouze malý přínos v porovnání se samotnou rekuperací. Přínos chlazení k udržení kvalitního vnitřního prostředí je naproti tomu velmi závislý na stavebně-energetickém řešení domu.

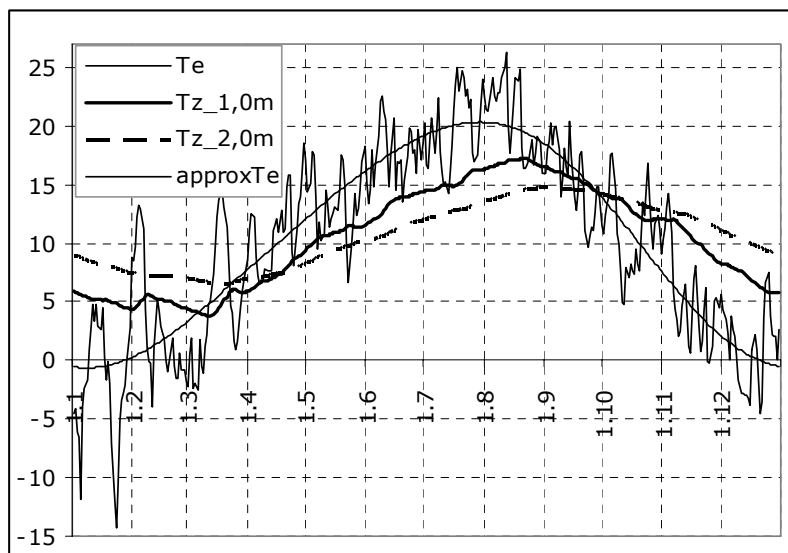
**Abstract:** It is rather natural that buildings have to be heated up or cooled down in a mild climate. The earth-to-air heat exchanger (EAHX) is a device which can be used for pre-heating and pre-cooling of fresh air. The paper deals with energy evaluation of particular EAHX connected with mechanical ventilation system equipped by heat recovery for a passive house. Measured data collected from extensive monitoring were used for evaluation of the EAHX. The air pre-heating in the EAHX keeps down building energy demand but with competitive relationship of the EAHX with heat recovery. Hence, the total effect of the EAHX in series with heat recovery is not significantly higher than the effect of heat recovery itself, especially for very high efficiencies of heat recovery. The benefit of air cooling in the EAHX is strongly dependent on the overall building-energy concept.

## 1. Úvod

Pro předehřev a chlazení čerstvého vzduchu přiváděného do budovy je v domech větraných pomocí systému nuceného větrání často využíván zemní výměník tepla (ZVT). Principem ZVT je využití relativně stálé teploty zeminy v určité hloubce pod povrchem země. V období, kdy je teplota vstupujícího vzduchu vyšší než teplota okolní zeminy, je procházející vzduch ochlazován. V období, kdy je teplota vstupujícího vzduchu nižší než teplota okolní zeminy, je procházející vzduch ohříván. Na obr. 1 je znázorněn příklad možného průběhu průměrné teploty vnějšího vzduchu  $T_e$  a průběhu teploty v zemině  $T_z$  v hloubce 1 a 2 m pro lokalitu ležící v mírném podnebném pásu. Povšimněme si, že teplota v zemině v obvykle používaných hloubkách uložení ZVT není konstantní, ale v průběhu zimních měsíců mírně klesá (minimum přibližně v březnu) a naopak v průběhu léta mírně stoupá (maximum přibližně v září). V souvislosti s větráním budov je zajímavé, že zatímco předehřívát větrací vzduch

potřebujeme prakticky celé otopné období, potřeba chlazení je často omezena pouze na několik velmi teplých vln letního období.

Simulace [1,2] nebo provozní měření reálných ZVT jsou možnostmi jak sledovat tepelně vlhkostní chování ZVT. To je závislé (bez pořadí důležitosti) na průtoku vzduchu přes ZVT, konvektivním přestupu tepla mezi proudícím vzduchem a stěnou potrubí, teplosměnné ploše (ta je závislá na délce, průměru a počtu potrubí), na teplotě v zemině (ta je závislá na vlastnostech zeminy, hloubce, ročním průběhu teploty zemského povrchu a předchozím provozu ZVT), teplotě a relativní vlhkosti vzduchu vstupujícího do ZVT.

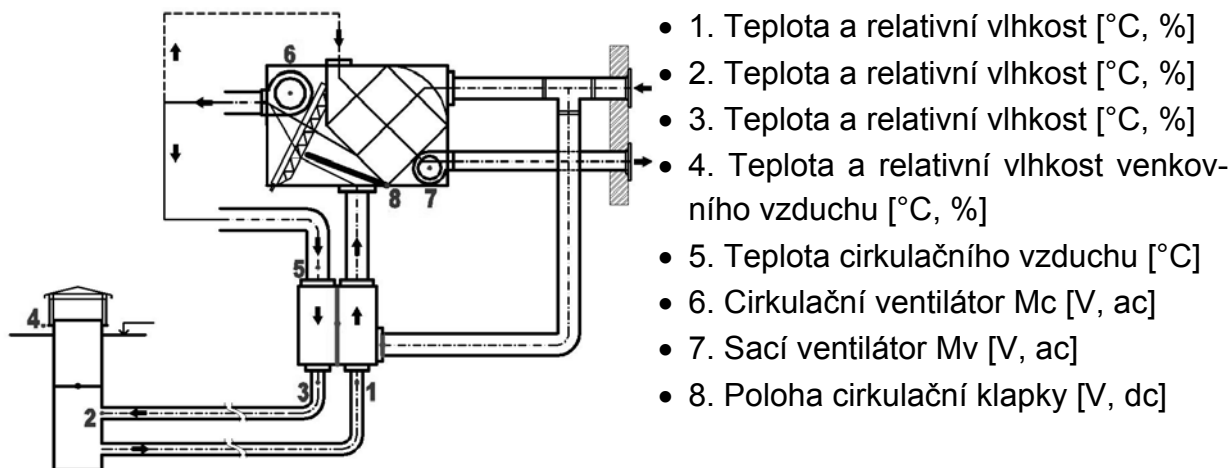


Obr. 1 Možný průběh denní průměrné teploty vnějšího vzduchu  $T_e$  a teploty v zemině  $T_z$  pro hloubky 1 a 2 m

## 2. Sledování provozu ZVT a systému nuceného větrání na pasivním domě v Rychnově

ZVT a nucené větrání s rekuperací pasivního domu v Rychnově u Jablonce nad Nisou [3] jsou monitorovány od začátku září 2005. Schéma monitorovaného systému je na obr. 2, základní informace k ZVT jsou v tabulce 1. Zajímavostí systému je, že pro chlazení budovy je možné využít cirkulačního provozu ZVT.

Data jsou sbírána do měřicí ústředny (vzorkovací frekvence 1 min) a do dvou dataloggerů (vzorkovací frekvence 5 min). Jeden z dataloggerů je umístěn v nasávací šachtě (bod 2), druhý je umístěn uvnitř domu a sbírá informace o teplotě, relativní vlhkosti a koncentraci  $\text{CO}_2$  vnitřního vzduchu.



Obr. 2 Schéma monitorovaného systému s umístěním čidel

počet potrubí	délka potrubí [m]	průměr [mm]	hloubka [m]
2	23	200	1.0 and 2.0
průtok [m <sup>3</sup> /h]	Zemina	Regulace	Lokalita
115 – 410, vyšší hodnoty pro letní chlazení	Jílovitá	podle $T_e$ a aktuálního režimu VZT jednotky, možnost manuálního nastavení cirkulačního provozu (ZVTc)	Rychnov u Jablonce nad Nisou

Tab. 1 Základní parametry sledovaného ZVT

### 3. Energetický přínos ZVT při předehřevu vzduchu

Pro prezentaci přínosu ZVT při předehřevu vzduchu byla využita data z provozního měření, měsíce leden a březen 2006.

#### 3.1. Teorie

Okamžitý tepelný tok  $Q_{zvt}$  (W) přijímaný ze zeminy nebo do zeminy odevzdávaný (okamžitý tepelný výkon ZVT) lze vyjádřit jako:

$$Q_{zvt} = m_a c_a (T_e - T_{out}) \quad (1)$$

kde  $m_a$  je průtok vzduchu (kg/s),  $c_a$  je měrná tepelná kapacita vzduchu (J/kg.K),  $T_e$  je teplota venkovního vzduchu (°C) a  $T_{out}$  je teplota vzduchu na výstupu ze ZVT (°C). Okamžitý tepelný výkon rekuperace  $Q_{rekup}$  (W) lze vyjádřit jako:

$$Q_{rekup} = m_a c_a (T_{e1} - T_{e2}) \quad (2)$$

kde  $T_{e2}$  je teplota vzduchu po rekuperaci a  $T_{e1}$  je teplota vzduchu vstupujícího do rekuperátoru. Teplotu  $T_{e2}$  lze vypočítat s pomocí účinnosti rekuperace  $\eta$  (-):

$$T_{e2} = T_{e1} + \eta (T_i - T_{e1}) \quad (3)$$

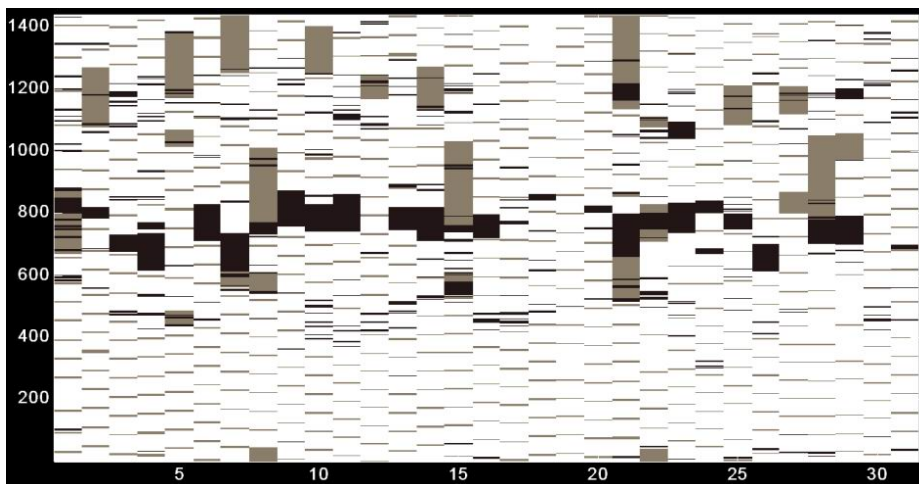
kde  $T_i$  je teplota vnitřního vzduchu (°C). V případě, že ZVT je předřazený rekuperaci, je  $T_{e1}$  rovna  $T_{out}$ . V případě, že rekuperátoru není předřazený ZVT je  $T_{e1}$  rovna  $T_e$ . Okamžitý výkon nutný pro dohřev vzduchu na teplotu vnitřního vzduchu  $Q_{dohřev}$  je daný jako:

$$Q_{dohřev} = m_a c_a (T_{e2} - T_i) \quad (4)$$

#### 3.2. Provoz ZVT

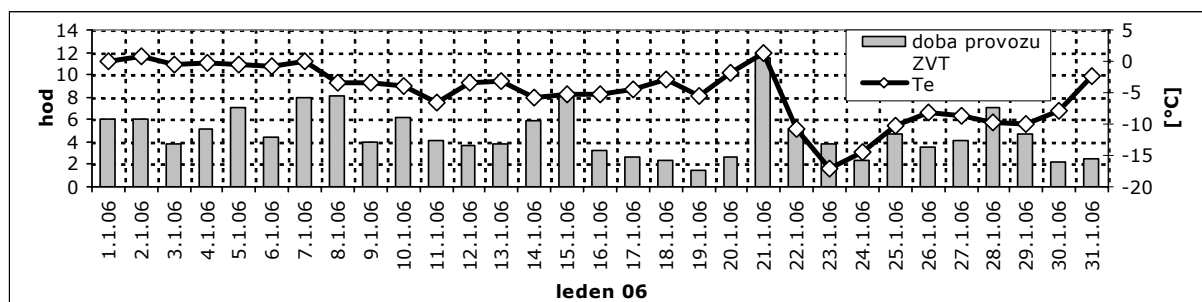
Krátký krok zápisu dat umožňuje podrobné sledování provozních režimů VZT jednotky v průběhu její činnosti, což umožňuje přesně určit časové úseky kdy byl ZVT v provozu a velikost aktuálního průtoku vzduchu. Provoz ZVT v lednu 2006 je zobrazený na obr. 3 a obr. 4. Protože během ledna 2006 prakticky nevystoupila teplota vnějšího vzduchu nad 4°C (přibližně na tuto teplotu bylo nastaveno vypnutí sání přes ZVT), zobrazuje obr. 3 i četnost větrání budovy.

Větrání během sledovaného období bylo velmi přerušované. Dosahovaná průměrná řízená výměna vzduchu se může zdát velmi nízká ( $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , což činí přibližně  $0,1 \text{ h}^{-1}$ ), společně s infiltrací přes plášť budovy ( $n_{50} = 0,88 \text{ h}^{-1}$ ) se jedná o přibližně  $45 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $\sim 0,15 \text{ h}^{-1}$ ). Při průměrném celodenním obsazení (4 osoby, každá 12 h) potom vychází přívod čerstvého vzduchu  $23 \text{ m}^3/\text{h}$  na osobu.



Obr. 3 Provoz ZVT tepla (leden 06) zobrazený graficky, na svislé ose je čas během dne v minutách, sloupce na vodorovné ose představují jednotlivé dny; šedé jsou vyznačeny průtoky  $115 \text{ m}^3/\text{h}$ , černě  $198 \text{ m}^3/\text{h}$

Vodorovný pás viditelný přibližně uprostřed obr. 3, představuje větrání vynucené vařením v kuchyni. Krátké proužky viditelné zejména v noci (od 0 do 400 min) jsou funkce automatického cyklického větrání. Z dat je patrná tendence větrat co nejméně (s ohledem na redukci tepelné ztráty větráním a udržení přijatelné vlhkosti vnitřního vzduchu), ale zároveň ještě dostatečně s ohledem na nutný přísun čerstvého vzduchu a odvod škodlivin (indikátorem kvality vzduchu může být koncentrace  $\text{CO}_2$ ). Patrně bude ještě věcí další diskuze a vyhodnocení měřených koncentrací  $\text{CO}_2$ , jaká průměrná intenzita výměny vzduchu je pro obyvatele ještě optimální. Rozhodující je zde nepochybně subjektivní stanovisko uživatelů.

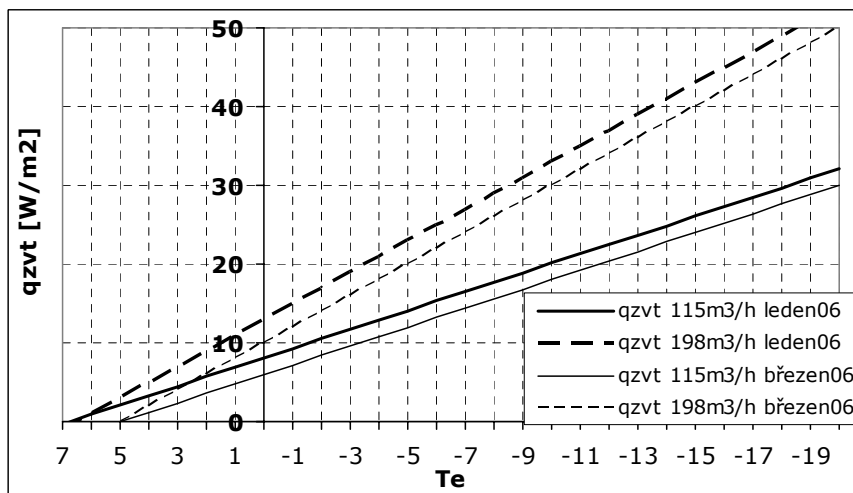


Obr. 4 Doba provozu ZVT a průměrné denní teploty vnějšího vzduchu v lednu 2006

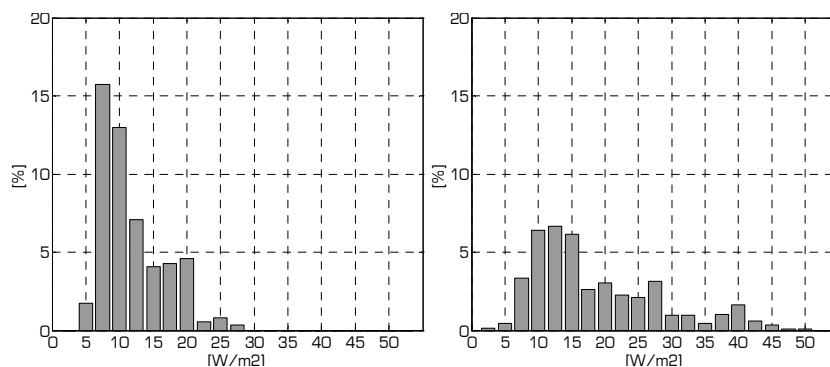
### 3.3. Okamžitý výkon ZVT

Okamžitý měrný tepelný výkon ZVT  $q_{zvt}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) je tepelný výkon ZVT  $Q_{zvt}$  vztažený na jeho teplosměnnou plochu (v Rychnově přibližně  $29 \text{ m}^2$ ). Obr. 5 ukazuje závislost měrného výkonu na průtoku a teplotě vnějšího vzduchu. Výsledky nejsou zcela zobecnitelné, protože jsou závislé na materiálu zeminy, hloubce uložení potrubí, vzájemné vzdálenosti potrubí a lokalitě. Přesto dávají dobrý obrázek o možných výkonech ZVT provozovaného s podobnými průtoky a podobnou četností provozu (ZVT pro rodinný dům ve středoevropské lokalitě).

Povšimněme si, že průsečík s osou  $x$  se během zimy posouvá doprava v závislosti na aktuální teplotě v zemině. Snížení výkonu ZVT během otopného období je jednak důsledkem předchozího provozu ZVT (ochlazování zeminy), ale také důsledkem přirozeně klesající teploty v zemině během otopného období (viz. obr. 1). Vzhledem k tomu, že množství předávané energie mezi zeminou a ZVT není velké, je druhý z vlivů patrně důležitější. Další graf (obr. 6) ukazuje relativní četnost dosahovaných měrných tepelných výkonů ZVT.

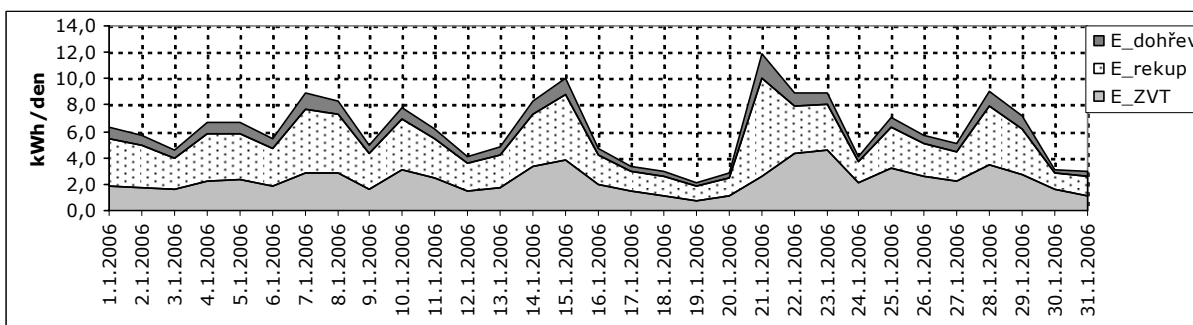


Obr. 5 Aktuální měrný výkon ZVT  $q_{zvt}$  ( $W/m^2$ ) rozříděný podle teploty vnějšího vzduchu a průtoku, přímky v grafu byly získány lineární regresí naměřených dat

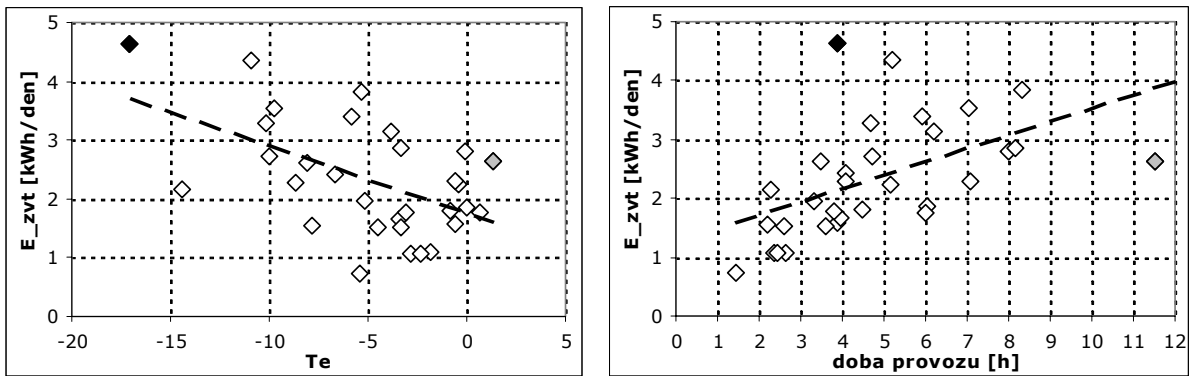


Obr. 6 leden 06 – relativní četnost dosahovaných výkonů (%)  
vlevo: pro průtok  $115 \text{ m}^3/\text{h}$ , vpravo: pro průtok  $198 \text{ m}^3/\text{h}$

### 3.4. Energetický zisk ZVT



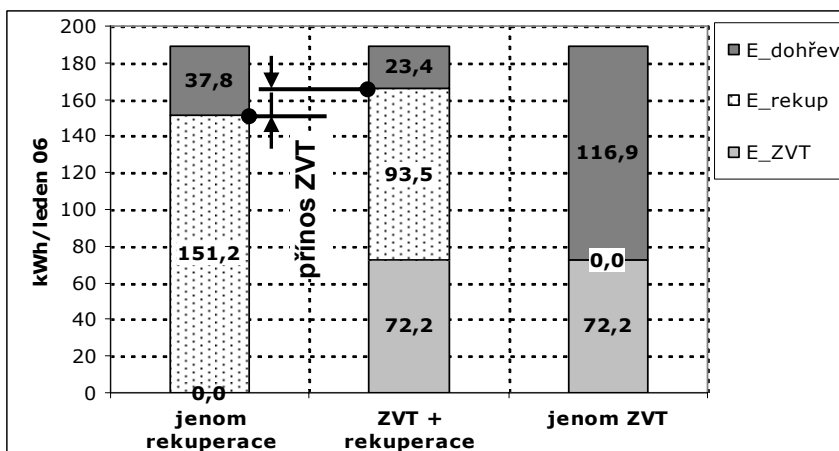
Obr. 7 Potřeba tepla na krytí tepelné ztráty větráním v lednu 2006 (účinnost rekuperace uvažována 85%)



Obr. 8 Energetický zisk ZVT  $E_{zvt}$  (kWh/den) rozříděný podle průměrné denní venkovní teploty (vlevo) a podle doby provozu (vpravo), černě vyznačený bod je hodnota s nejnižší teplotou vnějšího vzduchu, šedě vyznačený bod je hodnota s nejdělsí dobou provozu (leden 2006)

### 3.5. Přínos použití ZVT v systému nuceného větrání s rekuperací

Při hodnocení přínosu ZVT si nevystačíme pouze s hodnocením samotného energetického zisku. Spíše než energetický zisk ZVT nás zajímá porovnání varianty samotné rekuperace (bez ZVT) a rekuperace s předřazeným ZVT. Rozdíl těchto variant dává skutečný přínos použití ZVT. Problémem předřazení ZVT před rekuperaci je, že ZVT „si přisvojí“ část energie, která by jinak mohla být zrekuperována. Situace je vyznačena na obr. 9. Přínos ZVT je závislý na účinnosti rekuperace. Čím vyšší je účinnost rekuperace, tím nižší je přínos ZVT.



Obr. 9 Energie získaná ZVT, rekuperací a velikost nutného dohřevu pro jednotlivé varianty – leden06, pro účinnost rekuperace 85%

## 4. Energetický přínos ZVT při chlazení vzduchu

Pro prezentaci přínosu ZVT při chlazení vzduchu byla využita data z provozního měření, měsíc červen 06. V tomto období se využívalo pouze obvyklé sání přes ZVT (do ZVT vstupuje venkovní vzduch), cirkulační provoz byl umožněn až od 11.7.2006 a není v tomto příspěvku hodnocen.

### 4.1. Teorie

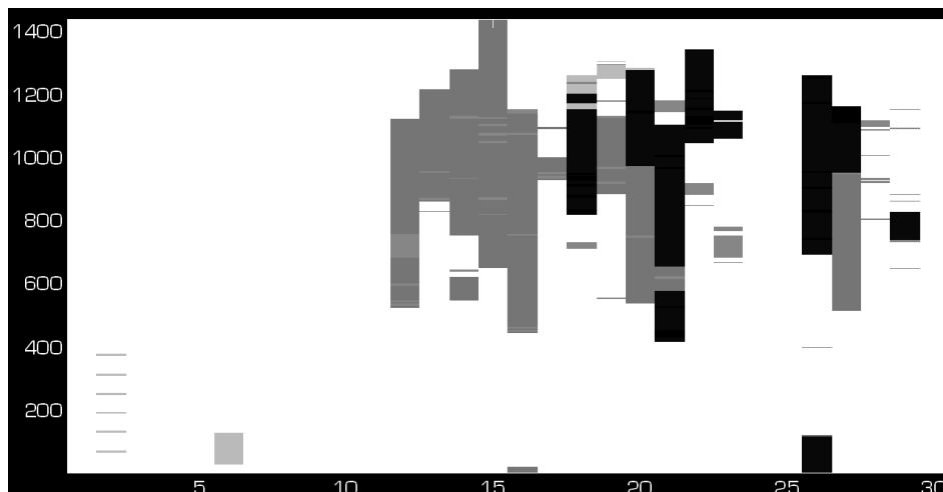
Tepelný tok  $Q_{zvt}$  (W) přijímaný z nebo odevzdávaný do zeminy neznámá totéž co výkon chlazení  $Q_{cooling}$  (W). Může se stát, že vzduch průchodem přes ZVT sice o-

chladíme, ale teplota vzduchu v budově je nižší než teplota vzduchu na výstupu ze ZVT, a nemůže tedy docházet k chlazení budovy.

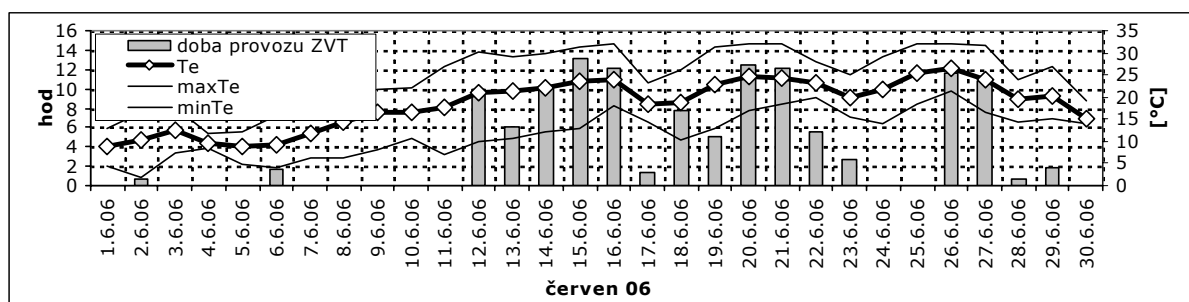
$$Q_{cooling} = m_a c_a (T_i - T_{out}) \quad (5)$$

## 4.2. Provoz ZVT

Provoz ZVT během sledovaného období je zobrazený na obr. 10 a obr. 11.



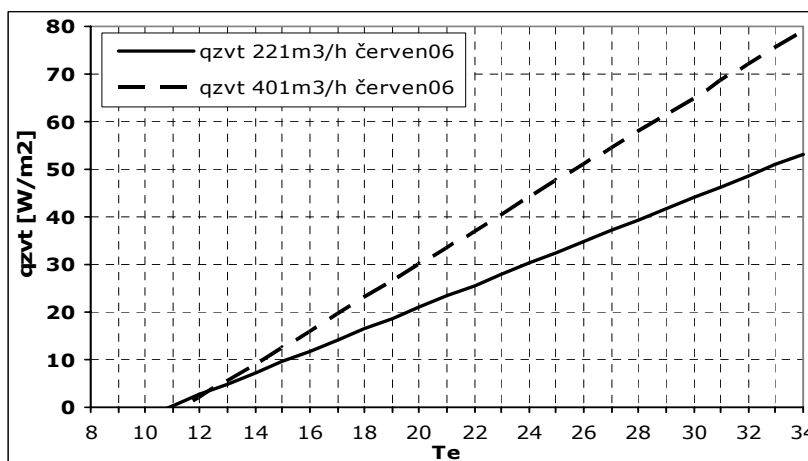
Obr. 10 Provoz ZVT tepla (červen 06) zobrazený graficky, na svislé ose je čas během dne v minutách, sloupce na vodorovné ose představují jednotlivé dny; odstíny šedé jsou vyznačeny průtoky 115, 198 a 221 m<sup>3</sup>/h, černě vyznačeny průtoky 401 m<sup>3</sup>/h



Obr. 11 červen06 - doba provozu ZVT a průměrné, maximální a minimální denní teploty vnějšího vzduchu.

## 4.3. Okamžitý výkon ZVT

Obr. 12 ukazuje závislost měrného výkonu ZVT na průtoku a na teplotě vnějšího vzduchu během června 2006. Sledováním vzájemného poměru průtoků a vzájemného poměru okamžitých výkonů ZVT (viz. např. obr. 12, 401/221 = 1,81, ale poměr výkonů je přibližně 1,5) lze vyslovit závěr, že se zvyšujícím se průtokem neroste výkon ZVT lineárně. Nelinearita je více patrná až u vyšších

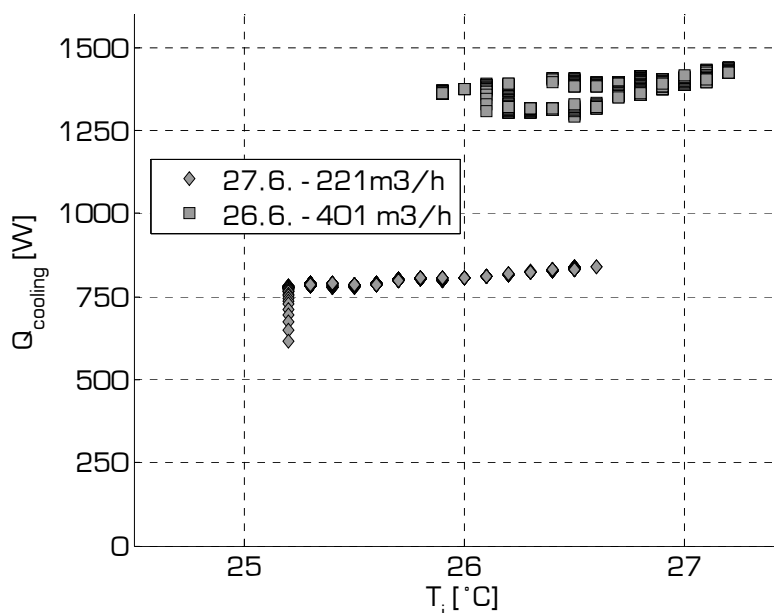


Obr. 12 Aktuální měrný výkon ZVT  $q_{zvt}$  (W/m<sup>2</sup>) rozříděný podle teploty vnějšího vzduchu a průtoku, přímky v grafu byly získány lineární regresí naměřených dat

(letních) průtoků. Tento efekt byl předběžně potvrzen i numerickým modelem.

#### 4.4. Výkon chlazení

Obr. 13 ukazuje okamžitý výkon chlazení v závislosti na teplotě vnitřního vzduchu a průtoku vzduchu (použity pouze data ze dne 26.6. a 27.6.2006). Vzhledem k vypočtené hodnotě tepelné zátěže (pro 21.7, 14:00 činí 2900 W, z toho 960 W jsou vnitřní zisky) lze tvrdit, že s pomocí ZVT v Rychnově lze odvést značnou část z okamžité tepelné zátěže vnitřního prostoru.



Obr. 13 okamžitý výkon chlazení ve dnech 26.6. a 27.6.2006

## 5. Závěr

Ve spolupráci ČVUT, FSv a firmy ATREA s.r.o. se podařilo realizovat podrobné měření provozu systému nuceného větrání s rekuperací a ZVT. Z prezentovaných výsledků měření plynou tyto závěry:

- Předehřev vzduchu v ZVT je konkurencí rekuperace, a proto sdružený systém ZVT a rekuperace představuje pouze malé navýšení získané energie v porovnání se samotnou rekuperací.
- Přínos chlazení vzduchu v ZVT je velmi závislý na stavebně-energetickém řešení domu. Trochu paradoxně, u domů, které se rychle ohřívají (teplota vnitřního vzduchu je vyšší), je okamžitý chladicí výkon ZVT vyšší. Jeho skutečný přínos ale být vyšší nemusí, záleží na poměru mezi okamžitým chladicím výkonem ZVT a okamžitými tepelnými zisky větrané zóny. Proto jsou dobrá letní stabilita domu a návrh dimenzí ZVT klíčové pro udržení přijatelných teplot vnitřního vzduchu a efektivní chlazení.

Poděkování: Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS. Autor také velmi děkuje manželům Jindrakovým za laskavé umožnění provozního sledování ZVT a společnosti Atrea s.r.o za spolupráci při vyhodnocování dat.

## 6. Literatura

- (1) KOPECKÝ, P. *Zemní výměník tepla: model a validace*. VVI 4/2006.
- (2) KOPECKÝ, P. *Pokročilá simulace zemních výměníků tepla – srovnání simulace a experimentálních dat z měření*. TOB2006, Praha 2006.
- (3) JINDRÁK, M.: *Pasivní dům v Rychnově*. Tepelná ochrana budov, 1/2005.