



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁHRADA KLASICKÉHO ZEMNÍHO VÝMĚNÍKU TEPLA SOLANKOVÝM U RODINNÉHO DOMU S TEPLOVZDUŠNÝM VYTÁPĚCÍM SYSTÉMEM

SUBSTITUTION OF A CLASSIC GROUND HEAT EXCHANGER BY A BRINE ONE
IN A FAMILY HOUSE WITH WARM-AIR HEATING SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROBERT SOKOLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MICHAL JAROŠ, Dr.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Robert Sokola

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Náhrada klasického zemního výměníku tepla solankovým
u rodinného domu s teplovzdušným vytápěcím systémem**

v anglickém jazyce:

**Substitution of a classic ground heat exchanger by a brine one
in a family house with warm-air heating system**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mnohé moderní rodinné domy s nízkou spotřebou tepla jsou dnes vytápěny teplovzdušným vytápěcím systémem, který současně zajišťuje jejich nucené větrání. Využitím zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu pro ohřev vzduchu přiváděného se dosahuje nízké spotřeby energie. Jako volitelný doplněk je doporučován předřazený zemní výměník tepla (ZVT), v němž se nasávaný vzduch v zimě přehřívá, v létě ochlazuje. To přináší další úspory energie na vytápění i klimatizaci.

Klasický ZVT s průtokem nasávaného vzduchu potrubím uloženým v zemi však s sebou nese i jistá hygienická rizika, plynoucí z možného výskytu nečistot, bakterií apod. v potrubí, jeho čištění je problematické. Proto se v poslední době jako jeho alternativa preferuje tzv. solankový ZVT.

Cíle diplomové práce:

Na základě celoroční simulace provozu porovnejte energetický dopad nahrazení klasického zemního výměníku tepla solankovým u rodinného domu s teplovzdušným vytápěním a rekuperací odpadního tepla. Porovnejte investiční náklady obou provedení ZVT, podmínky a náročnost jejich realizace i provozní výhody a nevýhody. Formulujte závěry a doporučení ohledně vhodnosti obou řešení ZVT.

Seznam odborné literatury:

- Chyský, J., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace. 3. vydání. BOLIT-B press, Brno, 1993.
Bašta, J., Drkal, F., Kotrbatý, M.: Vytápění - Sálavé a teplovzdušné vytápění průmyslových a občanských staveb. STP, Praha, 1998.
Gebauer, G., Rubinová, O., Horká, H.: Vzduchotechnika. Vydavatelství ERA, Brno, 2005.
Schulz, H.: Teplo ze slunce a země. Nakl. HEL, 2002.
Srdečný, K.: Energeticky soběstačný dům. ERA group spol. s r.o., Brno 2006.
Časopisecké a internetové zdroje dle vlastního výběru studenta.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Obsahem diplomové práce je energetická simulace zemního výměníku tepla (ZVT) v klasickém a solankovém provedení, který slouží jako doplněk teplovzdušného vytápění s rekuperací tepla v nízkoenergetickém rodinném domě. Na základě výsledků simulace byla vyhodnocena výhodnost obou variant ZVT. Dále byl stanoven energetický a ekonomický přínos rekuperace s využitím zemních výměníků a úspory, které jejich využití přináší. Na základě porovnání s investičními náklady byla posouzena výhodnost investice a navržena doporučení pro provoz, realizaci a vhodnost obou variant.

Abstract

The thesis deals with an energy simulation of a ground heat exchanger (GHE) in classical and brine performance, which is used as an accessory of warm air heating system recovery in a low-energy family house. On basis of simulation results, the benefits of both heat exchangers were assessed. Furthermore, the energy and economics savings of heat recovery coupled with GHE were evaluated. Comparing the investment costs, the profitability of each investment were assessed and recommendations for the operation, implementation and appropriateness were outlined.

Klíčová slova

Zemní výměník tepla, solankový výměník, rekuperace tepla, teplovzdušné vytápění, energetická simulace, nízkoenergetický dům

Keywords

Ground heat exchanger, brine in exchanger, heat recovery, warm–air heating, energy simulation, low–energy house

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

SOKOLA, R. *Náhrada klasického zemního výměníku tepla solankovým u rodinného domu s teplovzdušným vytápěcím systémem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně bez cizí pomoci.

Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury, uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. května 2010

.....

Robert Sokola

Poděkování

Především bych rád poděkoval panu doc. Ing. Michalu Jarošovi, Dr. za vedení diplomové práce, odborné rady, připomínky, trpělivost a také za to, že mi věnoval svůj čas. Dále bych rád poděkoval všem, co mi nabídli svoje rady a pomoc, speciální dík patří panu Ing. Pavlu Charvátovi, PhD. za pomoc se simulačním programem TRNSYS a za jeho odborné rady k tématu diplomové práce. V neposlední řadě také mojí manželce a rodině za podporu při mém dosavadním studiu a při zpracování této práce.

OBSAH

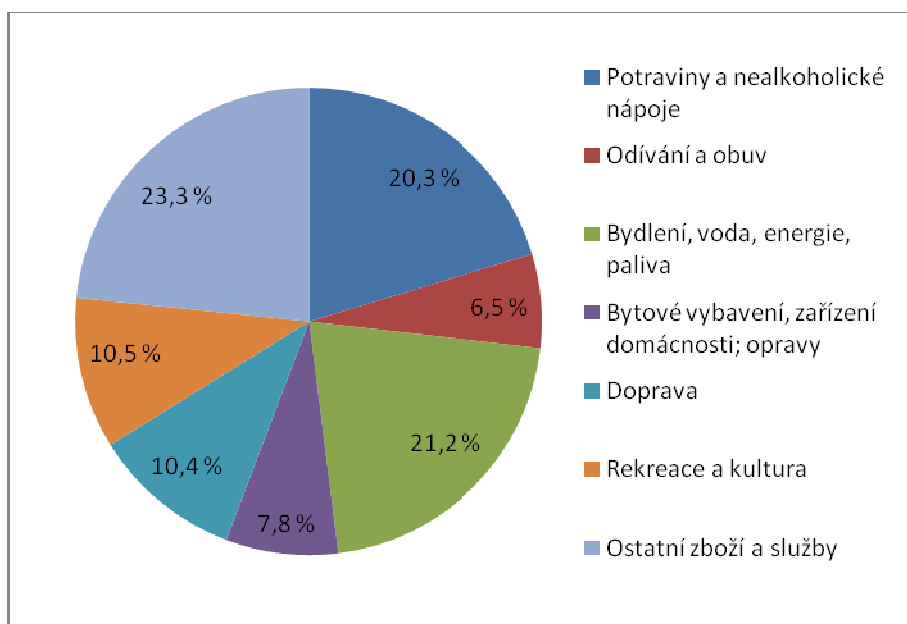
1 ÚVOD	13
2 NÍZKOENERGETICKÝ DŮM	15
2.1 Rozdělení nízkoenergetických domů	15
2.2 Hlavní znaky nízkoenergetických domů	16
2.3 Výhody nízkoenergetických domů	16
3 TEPLOVZDUŠNÉ VYTÁPĚNÍ A VĚTRÁNÍ S REKUPERACÍ TEPLA	18
3.1 Větrání	18
3.1.1 Přirozené větrání	18
3.1.2 Nucené větrání	18
3.2 Teplovzdušné vytápění	19
3.3 Zpětné získávání tepla – rekuperace	20
3.4 Výhody a nevýhody	23
3.4.1 Výhody	23
3.4.2 Nevýhody	23
4 ZEMNÍ VÝMĚNÍK TEPLA	24
4.1 Základní principy zemního výměníku tepla	24
4.2 Vzduchový zemní výměník tepla (ZVT)	25
4.2.1 Vzduchový ZVT – přímá varianta	28
4.2.2 Vzduchový ZVT – cirkulační varianta	29
4.3 Solankový ZVT	31
5 SIMULOVANÝ OBJEKT	35
5.1 Popis domu	35
5.2 Technická zařízení	36
5.2.1 Větrání	36
5.2.2 Vytápění	36
5.2.3 Zdroj tepla	38
6 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ TRNSYS	39
6.1 Nastavení modelu	39

6.1.1 Vlastnosti zeminy	40
6.1.2 Klimatická data	42
6.1.3 Režim větrání	43
6.1.4 Zemní výměník tepla	43
6.1.4.1 Vzduchový ZVT	43
6.1.4.2 Solankový ZVT	43
6.2 Algoritmus výpočtu	44
6.3 Ekonomika ZVT	51
7 VÝSLEDKY SIMULACE, ŘEŠENÍ	55
7.1 Varianta 1 - bez ZVT	55
7.2 Varianta 2 - vzduchový ZVT	56
7.3 Varianta 3 - solankový ZVT	56
7.4 Porovnání energetického a ekonomického přínosu	57
7.5 Návratnost investic	58
7.6 Doporučení pro realizaci a provoz	59
8 ZÁVĚR	60
9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
11 SEZNAM PŘÍLOH	69
12 PŘÍLOHY	70

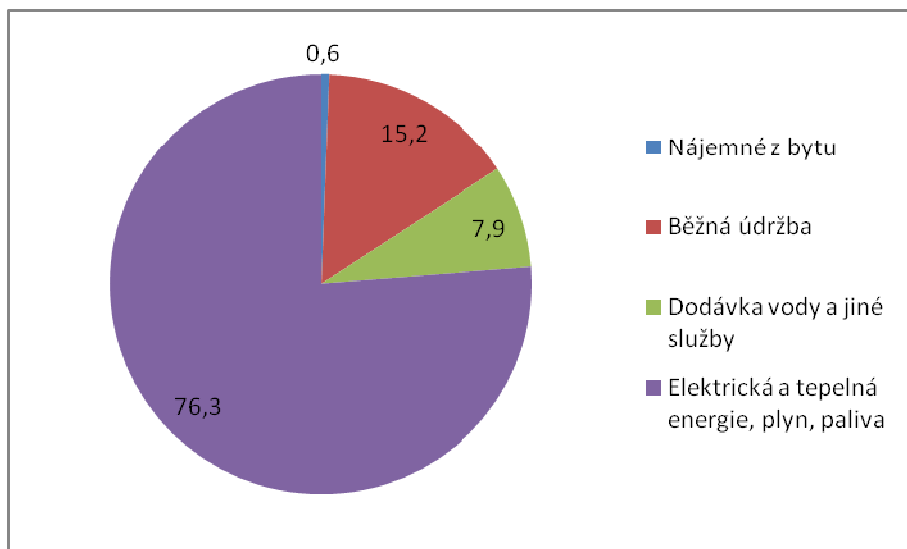
1 ÚVOD

V poslední době často slyšíme výrazy jako nízkoenergetický dům, pasivní dům či rekuperace v souvislosti se snižováním nákladů na bydlení.

V České republice tvoří podíl výdajů na bydlení až 26 % z celkových výdajů domácností (obr. 1.1) v závislosti na typu právního užívání bytu. Pro rodinný dům v osobním vlastnictví je to 17,6 % (průměr v ČR 20,2 % z celkových výdajů) [40]. Z toho výdaje na elektrickou energii, tepelnou energii, plyn a paliva obecně pro rodinný dům tvoří až 76,3 % (obr. 1.2) (průměr v ČR 58,1% z výdajů na bydlení) [40].



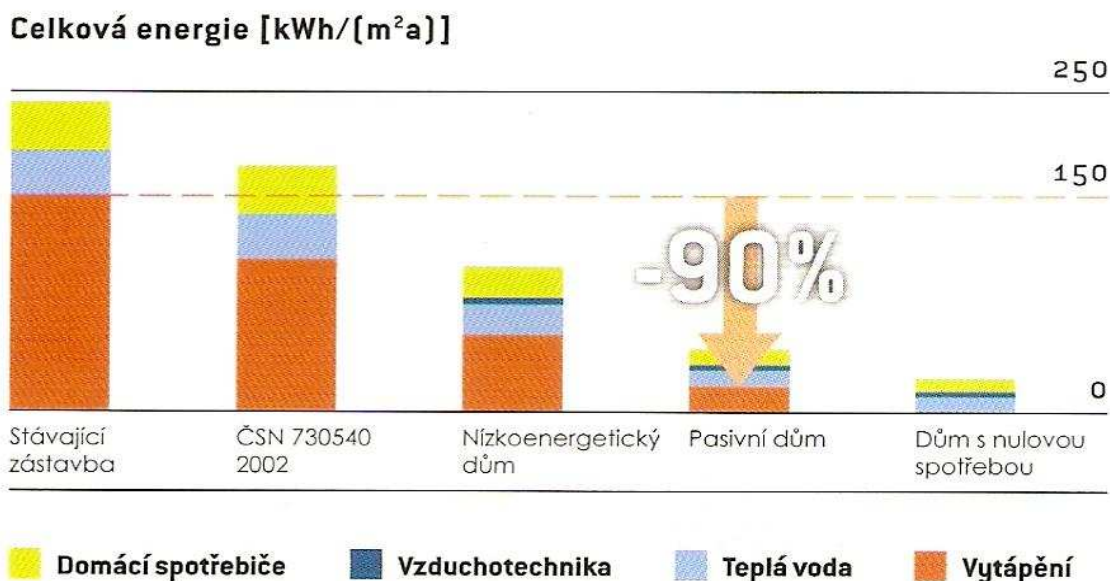
Obr. 1.1 Struktura výdajů českých domácností (podle [40]).



Obr. 1.2 Struktura výdajů na bydlení pro rodinný dům (podle [40]).

V případě, že zvolíme nízkoenergetický nebo pasivní dům, dokážeme ušetřit až třetinu nákladů na vytápění. Náklady na stavbu funkčního nízkoenergetického domu se uvádějí o cca 10 % vyšší oproti dnešní klasické výstavbě. Vyšší cena je zapříčiněna požadavky na technické vybavení nízkoenergetického rodinného domu. Mezi základní prvky využívané pro nízkoenergetickou výstavbu patří:

vzduchotechnická jednotka pro teplovzdušné vytápění, výměník pro zpětné získávání tepla, solární kolektory, zemní výměník tepla, fotovoltaické panely. Na druhou stranu odpadají náklady na teplovodní kotel a rozvody otopných těles.



Obr 1.3 Porovnání spotřeby energií podle typu domu (převzato z [2])

Tato práce se zabývá řešením jednoho prvku a jeho využití v nízkoenergetické výstavbě rodinných domů. Je jím zemní výměník tepla ve dvou variantách (vzduchový a solankový) a jeho dopad na roční energetickou bilanci rodinného domu simulovanou v programu TRNSYS 16.1. Pomocí energetické simulace můžeme sledovat dynamické chování celého systému během celého roku, ale můžeme se zaměřit i na chování systému v jednotlivých měsících, týdnech nebo dnech. Zemní výměníky tepla (ZVT) využívají tepelnou kapacitu zemního masivu a teplo v něm akumulované. Můžeme jej tak využívat v letním období k předchlazení větracího vzduchu a v zimě k předehřevu. Energetické dopady, ekonomická hlediska využití ZVT, výhodnost popř. návratnost a porovnání obou variant jsou výsledkem tohoto projektu.

2 NÍZKOENERGETICKÝ DŮM

2.1 Rozdělení nízkoenergetických domů

Stavební normy ČSN 73 0540 zabývající se pasivními domy je popisují následovně: *"Pasivní domy jsou budovy s roční měrnou potřebou tepla na vytápění nepřesahující 15 kWh/(m².a). Takto nízkou energetickou potřebu budovy lze krýt bez použití obvyklé otopné soustavy, pouze se systémem nuceného větrání obsahujícím účinně zpětné získávání tepla z odváděného vzduchu (rekuperací) a malé zařízení pro dohřev vzduchu v období velmi nízkých venkovních teplot. Navíc musí být dosaženo návrhových teplot vnitřního vzduchu po provozní přestávce v průměrné (a v projektové dokumentaci uvedené) době. Současně nemá u těchto budov celkové množství primární energie spojené s provozem budovy (vytápění, ohřev TUV a el. energie pro spotřebiče) překračovat hodnotu 120 kWh/(m².a)..."* [3]

Dále norma dělí budovy s nízkou energetickou náročností na pasivní a nízkoenergetické. Aby byl dům považován za nízkoenergetický musí dosáhnout hodnoty maximálně 50 kWh/(m².a) spotřeby tepla na vytápění.

Dalším důležitým faktorem je neprůvzdušnost. U budov, které splňují současné normy, činí měrná potřeba tepla na vytápění 140 kWh/(m².a) a požadavek na průvzdušnost n_{50} do 4,5. U nízkoenergetických domů jsou tyto požadavky na hodnotách 50 kWh/(m².a) spotřeby tepla, a $n_{50} = 1,5$ pro neprůvzdušnost a u budov s rekuperací tepla 1,0 [28]. Pasivní domy mají ještě náročnější podmínky pro teplo na vytápění do 15 kWh/(m².a) a požadovaná průvzdušnost do 0,6 [28].

Neprůvzdušnost se měří tzv. Blower door testem. Hodnota n_{50} je vyjádřením podílu množství vzduchu, které projde obálkou budovy po dobu jedné hodiny a celkovým objemem. Indexová hodnota "50" znamená rozdíl tlaku 50 Pa. Měření se provádí při přetlaku i podtlaku, obě hodnoty se zprůměrují. Pro dosažení požadovaných hodnot je nutno vzduchotěsnost řešit již v projektové fázi. (Pro zajímavost: nejnižší hodnota u pasivního domu naměřená v ČR je $n_{50} = 0,09 \text{ hod}^{-1}$ [28]).

Stavby nízkoenergetických domů vznikají jako reakce na stoupající ceny energií.

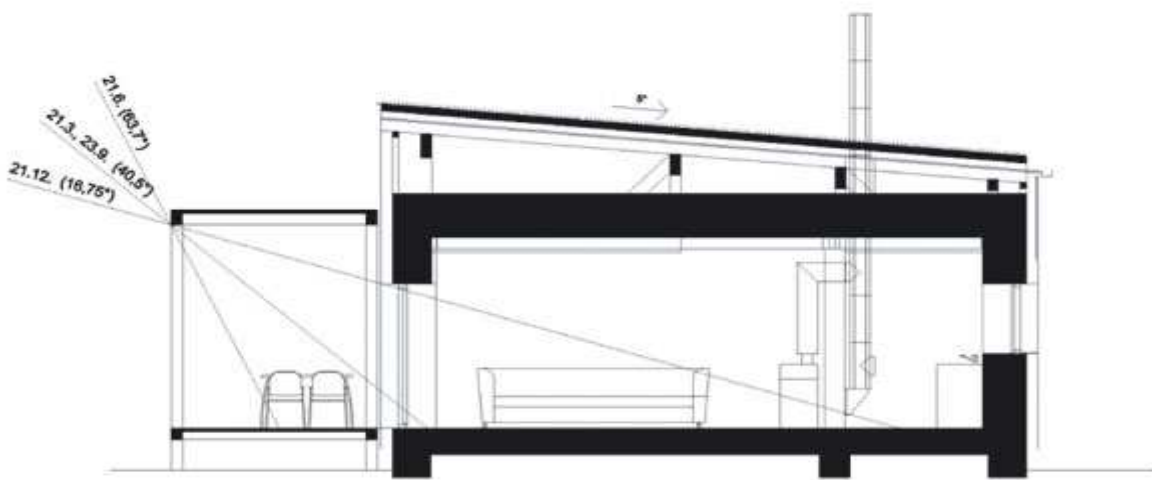
Tab. 2.1 Rozdělení budov dle spotřeby tepla na vytápění (převzato z [4])

Kategorie	Potřeba tepla na vytápění
starší budovy	často dvojnásobek hodnot pro obvyklé novostavby a více
obvyklá novostavba (podle aktuálních závazných požadavků)	80–140 kWh/(m ² .a) v závislosti na faktoru tvaru A/V
nízkoenergetický dům	≤ 50 kWh/(m ² .a)
pasivní dům	≤ 15 kWh/(m ² .a)
nulový dům	< 5 kWh/(m ² .a)

2.2 Hlavní znaky nízkoenergetických domů

Hlavní znaky staveb nízkoenergetických a pasivních domů jsou shrnuty v [1] a [2]:

- kompaktní tvar budovy (tradičně kvádr s delší stranou natočenou k jihu)
- prosklené plochy jsou orientovány na jih (solární tepelné zisky od slunce)
- nadstandardní tepelné izolace a zasklení
- důsledné řešení tepelných mostů
- vzduchotěsnost domu
- regulace vytápění využívající tepelné zisky
- strojní větrání s rekuperací tepla

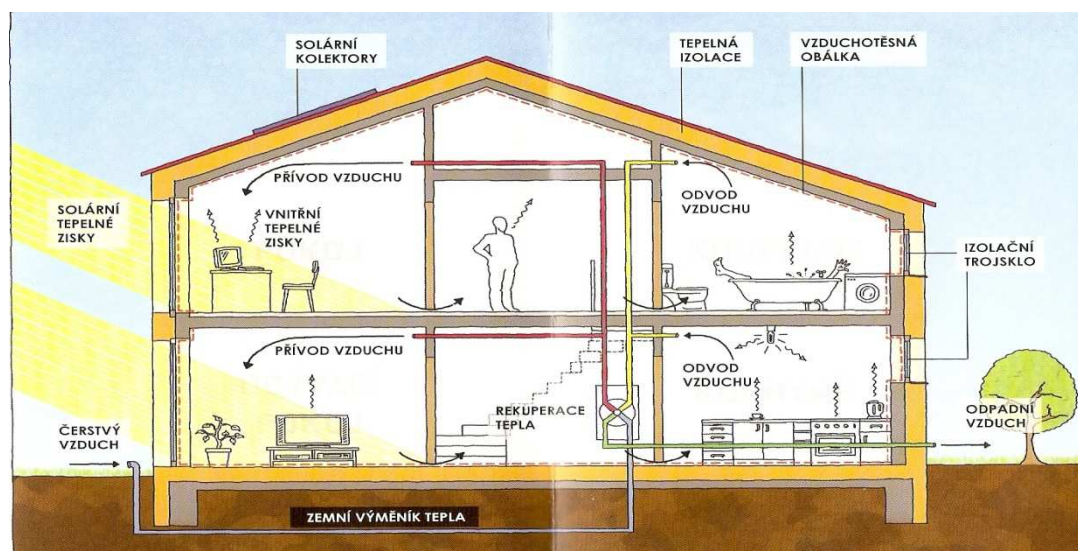


Obr. 2.1 Úhel dopadu slunečního svitu v závislosti na ročním období (převzato z [41])

2.3 Výhody nízkoenergetických domů

Spotřeba energie: Hlavní výhodou pro provoz nízkoenergetického domu je snížení spotřeby tepla. Nízkoenergetický dům může mít až třetinovou spotřebu tepla na vytápění. Roční spotřeba tepla na vytápění nepřesáhne 50 kWh/m² vytápěné podlahové plochy. Oproti tomu současné novostavby mají spotřebu tepla na vytápění 80 – 140 kWh/(m²a).

- Kvalita ovzduší vnitřního vzduchu
- Nízká spotřeba paliva a energie
- Malá závislost na růstu cen energií
- Vyšší komfort bydlení
- Kratší otopné období
- Stálý přívod čerstvého vzduchu
- Netvoří se průvan
- Vysoká tepelná pohoda v místnosti



Obr. 2.2 Hlavní znaky nízkoenergetických domů (převzato z [5]).

3 TEPLOVZDUŠNÉ VYTÁPĚNÍ A VĚTRÁNÍ S REKUPERACÍ TEPLA

Člověk tráví uvnitř budov až 90 % času. Pokud se chceme cítit příjemně a mít co největší pohodlí, musíme věnovat pozornost kvalitě vnitřního prostředí. Člověk při dýchání produkuje vodní páry, CO_2 apod. Další škodliviny v interiéru představují chemické látky, které se uvolňují z plastů, nábytku nebo stavebních materiálů. Vzduch může obsahovat oxidy síry a dusíku, oxid uhelnatý nebo radon [13]. Větrání má zabezpečit spolehlivý odvod škodlivin a zajistit potřebnou výměnu vzduchu, aby byly splněny hygienické požadavky a dostatečná kvalita vnitřního prostředí.

Faktory ovlivňující tepelně vlhkostní pohodu prostředí [9]:

- teplota vzduchu
- teplota okolních ploch event. střední radiační teplota
- rychlost proudění vzduchu v oblasti pobytu člověka
- vlhkost vzduchu
- tepelně izolační vlastnosti oděvu
- tělesná aktivita člověka

3.1 Větrání

3.1.1 Přirozené větrání

Větrání můžeme rozdělit na přirozené a nucené. Přirozené větrání vzniká samovolně, a je způsobeno rozdílem hustot mezi vnějším a vnitřním vzduchem, a také rozdílem tlaků při působení větru na budovu. Protože se v průběhu roku mění významně teplota a hustota je závislá na teplotě, mění se i průtok vzduchu. Nejvyšší účinnosti dosahuje v zimním období, když je teplotní rozdíl největší.

Nejběžnějším druhem přirozeného větrání je infiltrace okenními spárami. Při vnější teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, vnitřní teplotě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozměrech okna $2 \times 2\text{ m}$ proudí za bezvětrí vzduch infiltrací $6\text{ m}^3/\text{hod}$ [13]. Množství přiváděného vzduchu by přitom mělo být minimálně polovinou objemu místností. Například u pokoje o rozměrech $4 \times 4 \times 2,5\text{ m}$, by mělo být množství přiváděného vzduchu minimálně $20\text{ m}^3/\text{hod}$. Pro splnění hygienických norem se větrá otevřenými okny, ale vnitřní ohřátý vzduch tak odchází bez užitku pryč. Navíc často dochází k nepříjemnému průvanu.

3.1.2 Nucené větrání

U nuceného větrání dosahujeme rozdílu tlaků pomocí ventilátorů. Nucené větrání můžeme rozdělit na podtlakové, přetlakové a rovnotlaké. Při podtlakovém větrání více vzduchu odvádíme, než přivádíme, u přetlakového větrání je tomu naopak, a u rovnotlakého je odvod i přívod v rovnováze. Výhodou nuceného větrání je, že můžeme přiváděný vzduch dle potřeby upravovat – chladit, ohřívat, popř. filtrovat. Zásadní výhodou je možnost použití zařízení na zpětné získání tepla z odváděného odpadního vzduchu [13].

U nízkoenergetických domů se tak stává nezbytností nucené větrání s rekuperací tepla (s minimální účinností 75 %), kde je VZT jednotka schopna zajistit podtlakové, přetlakové, popř. rovnotlaké větrání [18]. Také je výhodné při dispozičním řešení budovy rozdělit budovu na tři zóny [23] – přívod vzduchu v obytných místnostech, transport vzduchu přes chodby a schodiště a odtah vzduchu přes koupelnu, kuchyň a sociální zařízení.

3.2 Teplovzdušné vytápění

V České republice zatím není teplovzdušné vytápění obytných budov příliš rozšířené. Využívá se spíše v průmyslových objektech (výrobní haly) a velkých rozlehlých místnostech (kina, zasedací místnosti). Je to dáno klimatickými podmínkami, historickým vývojem palivové základny a hlavně úzkou vazbou systému vytápění na konstrukci budovy. Základy tohoto stavu jsou v řešení těžkých obvodových konstrukcí z cihel nebo kamene, s přirozeným větráním obytných místností, kde je optimální tradiční teplovodní otopná sestava s radiátory [22]. S nárůstem počtu staveb s lehkou konstrukcí obvodových stěn, např. dřevostaveb, dochází ke zvyšování podílu teplovzdušného vytápění. Dřevostavby mají dostatečné tepelně-izolační vlastnosti s nízkou akumulací tepla, kde by klasická teplovodní soustava nebyla příliš pružná.

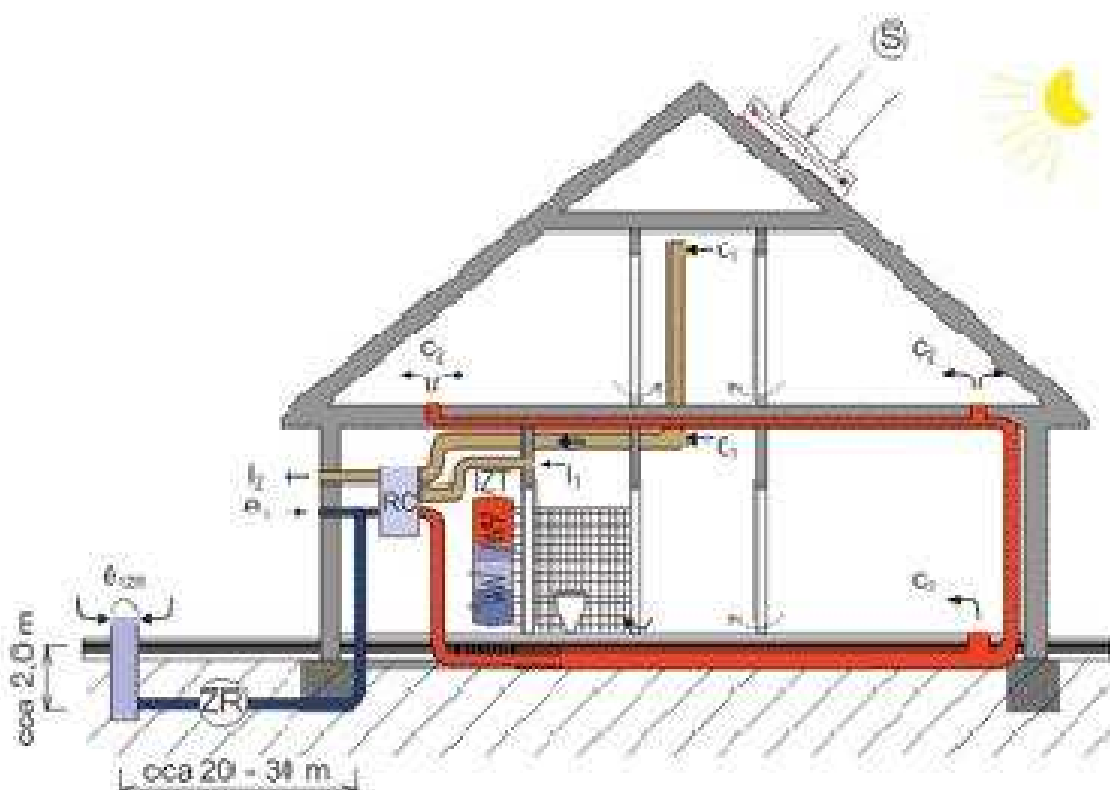
Principy a základy teplovzdušného vytápění jsou shrnuty v práci [22]: „Teplovzdušné vytápění je systém, kdy tepelná energie se do vytápěné místnosti dostává výhradně proudícím teplým vzduchem, v místnosti se vzduch vlivem tepelných ztrát ochlazuje na požadovanou vnitřní teplotu a odvádí se mimo místnost. Tepelnou látkou je zde vzduch.“ [22] V tab. 3.1 je patrné porovnání fyzikálních vlastností vody a vzduchu. Vzduch má oproti vodě výrazně nižší měrnou kapacitu a nižší teplotu a je tím pádem horším nosičem tepla. Vzhledem k omezení nejvyšší teploty přiváděného vzduchu na 50 °C jsme schopni dosáhnout na maximální topný výkon 10 W/m², při podlahové ploše 30 m² a teplotě interiéru 20 °C [23].

Tab. 3.1: Fyzikální vlastnosti vody a vzduchu (převzato z [22]).

Parametr	Voda	Vzduch
měrná tepelná kapacita c [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	4,186	1,010
hustota ρ [kg·m ⁻³]	980	1,28
teplotní spád používaný pro vytápění obytných budov ΔT [K]	10 až 25	20 až 30

Při využívání teplovzdušného vytápění a teplovzdušného větrání jsou patrné jasné rozdíly:

- „teplovzdušné vytápění - do místnosti či celého objektu se přivádí minimální množství čerstvého vzduchu dané doporučenou intenzitou výměny vzduchu I (m³/hod). Teplota přiváděného vzduchu t_p je o tolik vyšší, aby bylo zajištěno také krytí tepelných ztrát (čím menší bude hodnota potřebné energie kWh/m².rok, tím bude menší potřebný teplotní rozdíl).
- teplovzdušné větrání - do místnosti či celého objektu se přivádí minimální množství čerstvého vzduchu dané doporučenou intenzitou výměny vzduchu I (m³/hod) a o stejné teplotě jako je teplota vnitřní t_i . Tepelné ztráty Q_{ztr} hradí jiný systém, nejčastěji otopná soustava s otopnými tělesy nebo podlahová otopná soustava.“ [20]



Obr. 3.1 Schéma teplovzdušného vytápění a větrání (převzato z [14]).

Legenda k obr. 3.1

c₂	cirkulační a čerstvý vzduch do obytných místností
e_{1ZR}	venkovní vzduch přiváděný zemním registrem
i₁	odpadní vzduch z WC, koupelny, kuchyně
c₁	cirkulační vzduch z místností do VZT jednotky
i₂	výfuk odpadního vzduchu po rekuperaci
RC	vytápěcí a větrací jednotka DUPLEX RD
IZT	integrovaný zásobník tepla IZT
ZR	zemní registr
S	solární kolektory

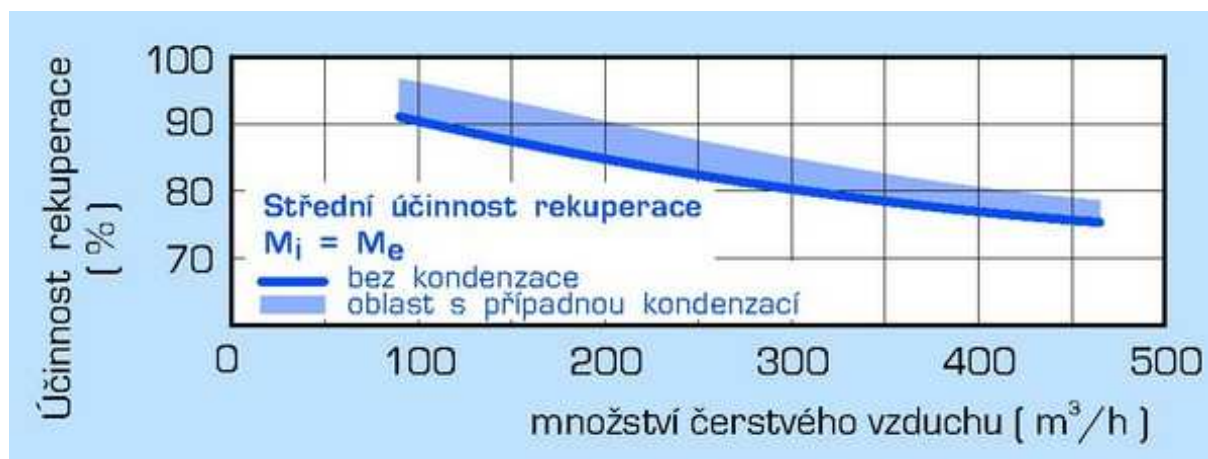
3.3 Zpětné získávání tepla – rekuperace

Rekuperace nebo také zpětné získávání tepla je děj, při kterém se předává energie (teplo) z odpadního vzduchu do přiváděného čerstvého vzduchu. Výhodou tedy je, že se teplý vnitřní vzduch neodvádí bez užitku okny ven [19].

Rozeznáváme dva druhy systémů pro přenos tepla mezi přiváděným a odváděným vzduchem [21]:

- rekuperační – dochází k přímé výměně tepla (např. deskové, trubkové výměníky) nebo výměna tepla přes pomocnou kapalinu (např. lamelové výměníky s teplotnosnou kapalinou, lamelové s chladivem bez pohonu, lamelové s nuceným oběhem – tepelná čerpadla),

- regenerační – přenos nejdříve do akumulační hmoty, pak do přiváděného vzduchu (např. s rotačními výměníky, přepínací).



Obr. 3.2 Závislost poklesu účinnosti na zvyšování objemu vzduchu (převzato z [8]).

Pro dosažení kritérií pasivního domu musí být účinnost rekuperace vyšší než 75 %. Základní účinnost výměníku můžeme určit podle rovnice (1). Vstupní hodnoty výpočtu tvoří teploty vzduchu vstupujícího a vystupujícího z výměníku (při zachování stejného objemu přiváděného a odváděného vzduchu).

$$\eta = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{i1} - t_{e1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

- kde: η [%] je účinnost (tepelná) zpětného získávání tepla

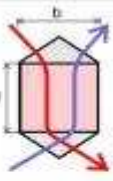
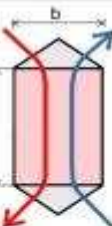
t_{e1} [°C] je teplota přiváděného vzduchu před výměníkem

t_{e2} [°C] je teplota přiváděného vzduchu za výměníkem

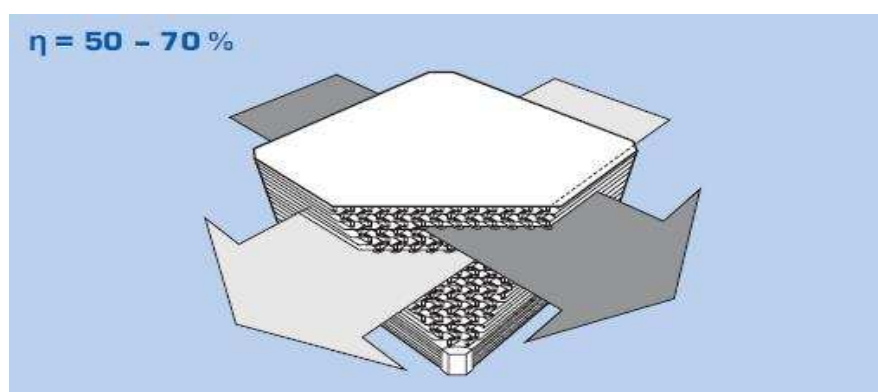
t_{i1} [°C] je teplota odváděného vzduchu před výměníkem

Na obr. 3.3 až 3.5 je vidět rozdíl ve velikosti teplosměnné plochy (a tím i účinnosti) u deskového křížového a deskového protiproudého výměníku.

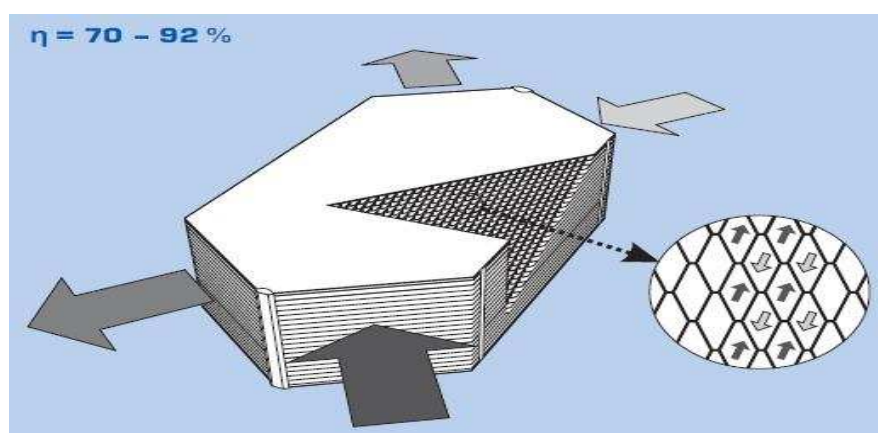
› REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY, TYPY, ÚČINNOSTI

Schéma				křížový protiproudý
Typ výměníku	křížový	křížový protiproudý	protiproudý	
Plocha výměníku [m ²]	4 – 10	6 – 14	17 – 60	
Profil proudění (řez)				
Účinnost rekuperace [%] efektivní účinnost dle PHPP	50 – 70	70 – 85 (60 – 75)	85 – 99 (75 – 92)	

Obr. 3.3 Porovnání účinností různých typů deskových výměníků (převzato z [8]).



Obr. 3.4 Schéma deskového křížového výměníku (převzato z [14]).



Obr. 3.5 Deskový protiproudý výměník (převzato z [14]).

Možným rizikem při používání výměníku je kondenzace vzdušné vlhkosti. Vstupní vzduch by neměl být chladnější než 0 °C, jinak by mohlo dojít k zamrzání kondenzátu, a tím ke zničení výměníku. Vzduch pod bodem mrazu se musí přehřát minimálně na 0 °C [31]. Přehřev probíhá buď topnou spirálou, nebo teplovodním výměníkem. Ideální variantou je využití zemního výměníku tepla, který můžeme využít i v létě k předchlazení teplého venkovního vzduchu.

3.4 Výhody a nevýhody

Hlavní výhody a nevýhody systému teplovzdušného vytápění a větrání jsou přehledně uvedeny v práci [14], dále v pracích [20] a [22], popř. [25].

3.4.1 Výhody

- vytápění a větrání zajištěno jedním systémem,
- úspora až 90 % výdajů za teplo,
- úspora nákladů za rozvody a tělesa teplovodního systému vytápění ,
- rychlý zátop s pružnou regulací teploty,
- zlepšená kvalita vzduchu, neustále čerstvý vzduch, snížení prašnosti, vyloučení vzniku plísní, snížení hluku (nemusíme otevírat okna na větrání),
- možnost využití zemního výměníku tepla pro přehřev vzduchu v zimě a předchlazení v létě, v případě cirkulační varianty letní chlazení interiéru,
- můžeme zapojit solární vzduchové systémy do VZT rozvodů.

3.4.2 Nevýhody

- velké investiční náklady (v případě jednoho spojeného systému nevznikají náklady na systém vytápění, náklady mohou být podobné, jako při realizaci dvou systémů),
- rozdílné vnímání tepelné pohody,
- v případě rekonstrukcí starších budov možné problémy s umístěním vzduchovodů,
- obtížná kombinace s centrálním zdrojem tepla na tuhá paliva – využití akumulární nádrže.

4 ZEMNÍ VÝMĚNÍK TEPLA

Co je zemní výměník tepla? Zjednodušeně řečeno, je to trubka zakopaná v zemi. Toto low-tech zařízení vypadá velmi jednoduše, ale realizace s sebou nese mnohá úskalí, hlavně náročnost na preciznost provedení stavby. Myšlenka je naprosto jednoduchá: v létě bývá pod zemí chladněji, v zimě naopak tepleji, tak proč toho nevyužít [7]. Vždyť už naši předci toho využívali (např. u vinných sklípků). Můžeme tento teplotní rozdíl využít, a navíc pokud budova využívá strojní větrání (a to nízkoenergetické domy skoro bez výjimky používají), potom se toto řešení nabízí samo [7].

4.1 Základní principy zemního výměníku tepla

Větrací vzduch se prožene zemním výměníkem tepla, čímž se v zimě předejde (tab. 4.1), a v létě předchladí (tab. 4.2). V současné době se používají dva způsoby realizace zemních výměníků tepla (ZVT), přímý nebo zprostředkovaný [14]. Vzduchový ZVT představuje přímý způsob, solankový ZVT nepřímý.

Tab 4.1 Přehřev vzduchu v zimě (převzato z [15]).

Venkovní teplota [°C]	-15	-10	-15	-10	-10
Výstupní teplota [°C]	+2	+3	+1	+2	+2
Objemový tok [m ³ /hod]	200		140		160
Průměr potrubí [mm]	200		125		100
Délka potrubí [m]	23		42		40
Hloubka uložení [m]	1,7		1,5		1,0

Tab 4.2 Předchlazení vzduchu v létě (převzato z [15]).

Venkovní teplota [°C]	+24	+28	+26	+33	+33
Výstupní teplota [°C]	+14	+16	+15	+19	+22
Objemový tok [m ³ /hod]	140		155		155
Průměr potrubí [mm]	125		100		100
Délka potrubí [m]	42		40		20
Hloubka uložení [m]	1,5		1,0		1,0

4.2 Vzduchový zemní výměník tepla (ZVT)

Zemním vzduchovým výměníkem prochází čerstvý venkovní vzduch, který v něm stráví určitou dobu v závislosti na délce potrubí a rychlosti proudění. V zemním výměníku tepla dojde k předání nebo odebrání tepla ze vzduchu do okolní zeminy a naopak. Vzduch je nasáván přes vstupní šachtu s nadzemním krytem a filtry, dále projde přes ZVT do ventilační jednotky (obr. 4.1). Ventilátor není potřeba, neboť vzduch si obvykle nasává sama ventilační jednotka.

Pro potrubí se dá využít těchto materiálů [15]:

- plastové trubky z tvrdého PVC,
- polypropylenové trubky,
- polyetylenové trubky,
- kameninové trubky,
- betonové trubky,
- vláknocementové trubky,
- litinové trubky.

Pro rodinné domy se nejčastěji používají trubky s hladkým povrchem z PVC, PP nebo PE. Běžné rozměry jsou: délka 20–35 m [17], průměr 150–250 mm [15], hloubka uložení 1,5–2,0 m [7].

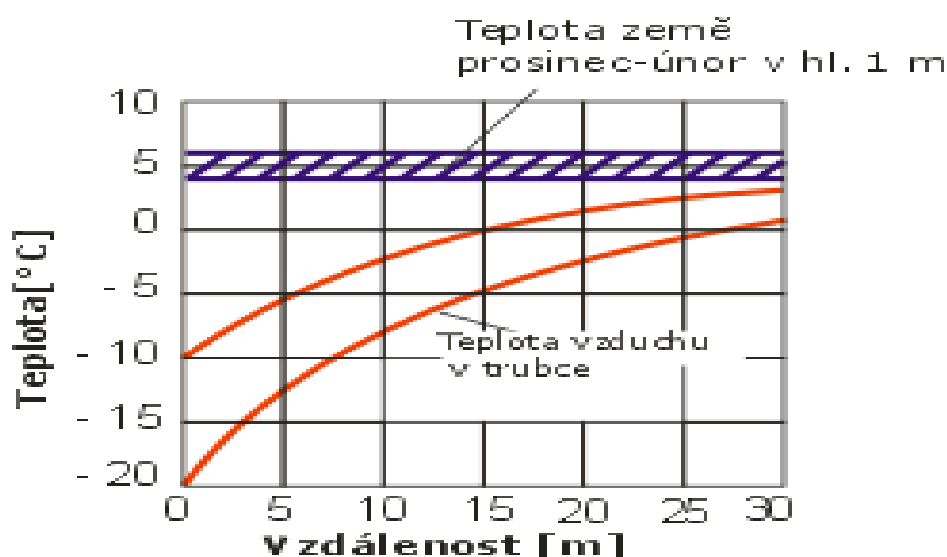


Obr. 4.1 Principiální schéma ZVT ve spojení s rekuperační větrací jednotkou (převzato z [15])

Základní faktory, které ovlivňují výstupní teplotu vzduchu a účinnost ZVT [11]:

- délka potrubí,
- průměr potrubí,
- hloubka uložení,
- okolní zemina,
- rychlost proudění vzduchu
- tepelná vodivost potrubí.

Délka potrubí: v souvislosti s dobou setrvání vzduchu ve výměníku je nutné zabezpečit dostatečnou délku vedení. Ta se pohybuje od 20 m do 35 m dle druhu zeminy [17]. Z praktických měření je známo, že u vedení dlouhého 35 m, již po 1/3 délky potrubí dochází k ohřátí vzduchu o polovinu rozdílu teploty (mezi vstupem a výstupem) [15]. To dokazuje, že pozbývá významu provádět příliš dlouhá vedení (delší než 35 m). Kvůli namrzání kondenzátu v rekuperační jednotce je důležité, aby teplota na výstupu ze zemního výměníku tepla neklesala pod $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14].



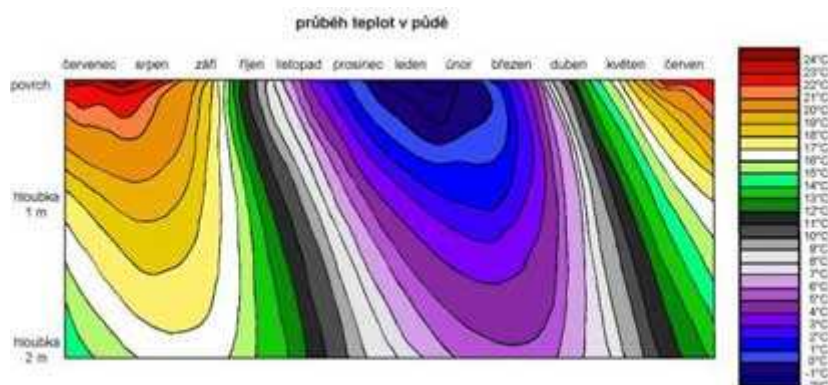
Obr. 4.2 Závislost výstupní teploty vzduchu na délce zemního výměníku při různých vstupních teplotách ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a pr útočném množství $150\text{ m}^3/\text{hod}$ (převzato z [15]).

Průměr potrubí: stejně jako jeho délka ovlivňuje velikost teplosměnné plochy. Doporučují se trubky o průměru 150 až 250 mm [15]. U menších průměrů potrubí se zvětšuje přestup tepla, ovšem narůstá tlaková ztráta, čímž vznikají vyšší nároky na ventilátor. Se zvětšováním průměru potrubí sice klesá tlaková ztráta, ale současně vzniká jádro proudu vzduchu (uprostřed potrubí), které se na tepelné výměně moc nepodílí (vzduch neproudí po stěnách trubky). Ideální proudění je turbulentní proudění po celém průřezu trubky.

Hloubka uložení: vedení se většinou ukládá do hloubky okolo 2 m, kde je již zajištěna dostatečně konstantní teplota. Podmínkou je také vyspádování (postačí 1 až 2 %) směrem k možnému odtoku kondenzátu [14].

Okolní zemina obsypaná kolem potrubí má vliv na přenos tepla do zemního výměníku. Faktory kladně ovlivňující přenos tepla jsou vysoká hustota zeminy, dobré

zhutnění, vysoký podíl jílu/ hlíny, vysoká vlhkost zeminy. Nevhodné jsou zeminy písčité a s velkým obsahem štěrku [15]. Teplota zeminy v hloubce 1,5 až 2 m se v zimě pohybuje mezi 4 a 8 °C (v závislosti na složení po dloží) [14]. Teplota v létě a v přechodném období je v rozmezí 10 a 14 °C [14].



Obr. 4.3 Průběh teplot zeminy v hloubce do 2 m (převzato z [10]).

Rychlost proudění vzduchu ovlivňuje jak dobu setrvání vzduchu v zemním výměníku, tak i přenos tepla mezi stěnou ZVT a vzduchem.

Tepelná vodivost je výhodnější volit materiál s co největší tepelnou vodivostí. Musíme ovšem zvolit kompromis mezi tepelnou vodivostí, tlakovou ztrátou, nákladností investice, možností čištění, pevností a těsností [15]. Rozhodující pro přestup tepla je přechod vzduch-vnitřní stěna potrubí. Rozdíl mezi plastovou a betonovou trubicou je zásadní, proto se nejčastěji volí materiály PVC, PP a PE. Při použití zvlněné trubky dochází ke zvýšení teplosměnné plochy a turbulentnímu proudění, je však vykoupeno vyšší tlakovou ztrátou (a tím zvýšenou spotřebou energie ventilátoru), špatným odvodem kondenzátu a ztíženým čištěním [15]. Ve žlábcích dochází k usazování nečistot a riziku množení bakterií a zápachu.

Při realizaci zemního výměníku tepla je potřeba dbát na některé důležité podmínky, které musí být splněny, aby ZVT správně fungoval. Jedním z hlavních požadavků je těsnost potrubí, hlavně z hygienických důvodů. Prouděním v potrubí vzniká mírný podtlak, a tak by se v případě netěsností dostávaly dovnitř zemní plyny a vlhkost [14].

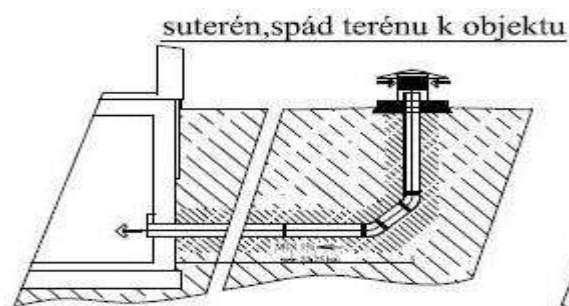
Dalším důležitým požadavkem je čistitelnost. Potrubí čistíme zpravidla 1x ročně, protahováním čistícího přípravku namočeného v dezinfekčním roztoku [14]. Druhou variantou je vysokotlaké proplachování, s tlakem vody až 34 MPa [16]. Zde je opět důležitá těsnost potrubí. Sestava VZT by také měla obsahovat revizní šachtu. Doporučuje se o průměru 800 mm z důvodů kontroly a přístupu k čištění.

Nasávání vzduchu umísťujeme na místě se suchým, nijak znečištěným vzduchem. Nevhodná místa jsou poblíž biotopu, kompostu nebo vyústění kanalizace. Kvůli filtru by se mělo zvolit snadno přístupné místo. Nasávání vzduchu by nemělo být ani v bezprostřední blízkosti země, aby se zamezilo zapadání sněhem, popř. nasávání větrem zviřeného prachu. Je nutné zabezpečit i to, aby k filtračnímu boxu neměly přístup jiné osoby, které by třeba mohly zařízení zlomyslně poškodit [15].

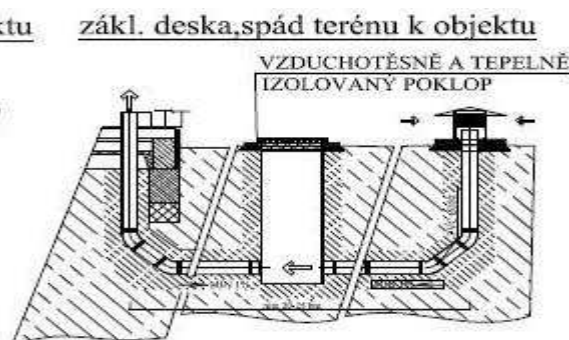
4.2.1 Vzduchový ZVT – přímá varianta

U tohoto provedení zemního výměníku se nasává vzduch přes nasávací otvor. Ten je standardně vybaven dvěma druhy filtrů [14], prvním hrubým filtrem z plastové sítky nebo tahokovu a druhým jemnějším pylovým filtrem třídy G4. Filtry tvoří také ochranu před vniknutím ptáků, hmyzu a drobných živočichů. Doporučená doba výměny filtrační tkaniny je 2x ročně, zpravidla na jaře a konci léta [14].

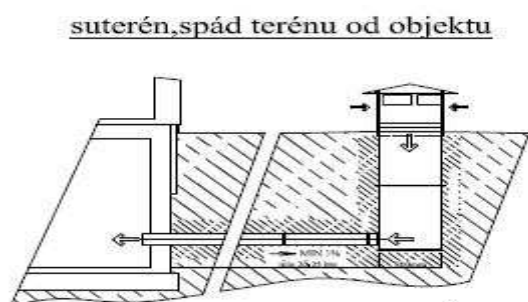
Různé druhy provedení v závislosti na typu budovy jsou uvedeny na obr. 4.4, 4.5 a 4.6.



Obr. 4.4 Podsklepený dům – nasávací otvor

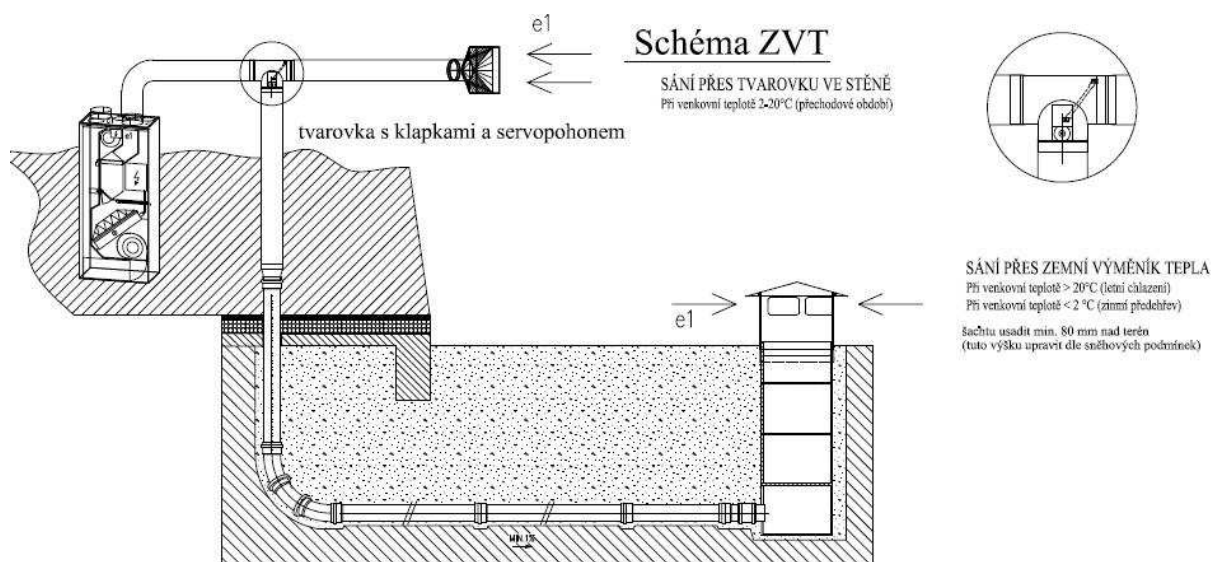


Obr. 4.5 Nepodsklepený dům –
revizní šachta



Obr. 4.6 Podsklepený dům – revizní šachta

Je důležité, aby v přechodném období (venkovní teploty 2–20 °C) bylo možno přivádět vzduch přímo přes venkovní žaluzii do vzduchotechnické jednotky (obr. 4.7). Zabrání se tak vyčerpání tepelné kapacity zeminy a optimalizuje se energetická náročnost větrání. Pokud to architektonické řešení budovy dovoluje, volíme žaluzii na jižní osluněné straně, kde se vzduch může při nasání ohřívat [7].

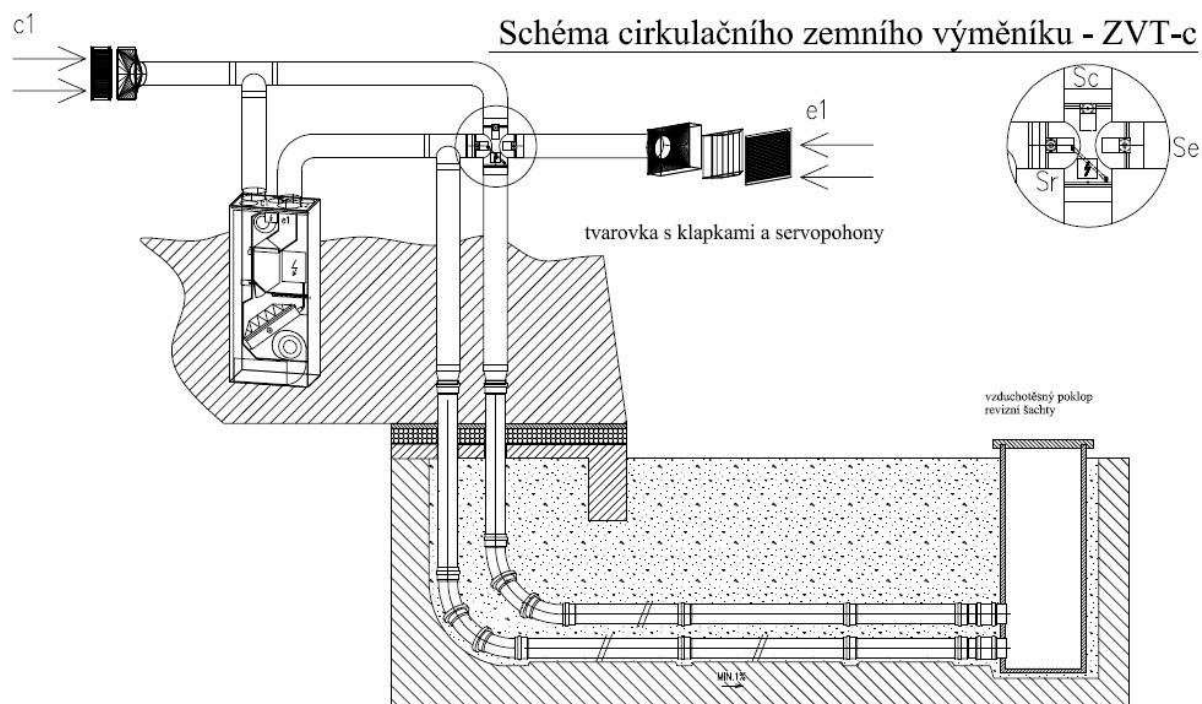


Obr. 4.7 Schéma ZVT se žaluzií pro přechodné období (převzato z [14]).

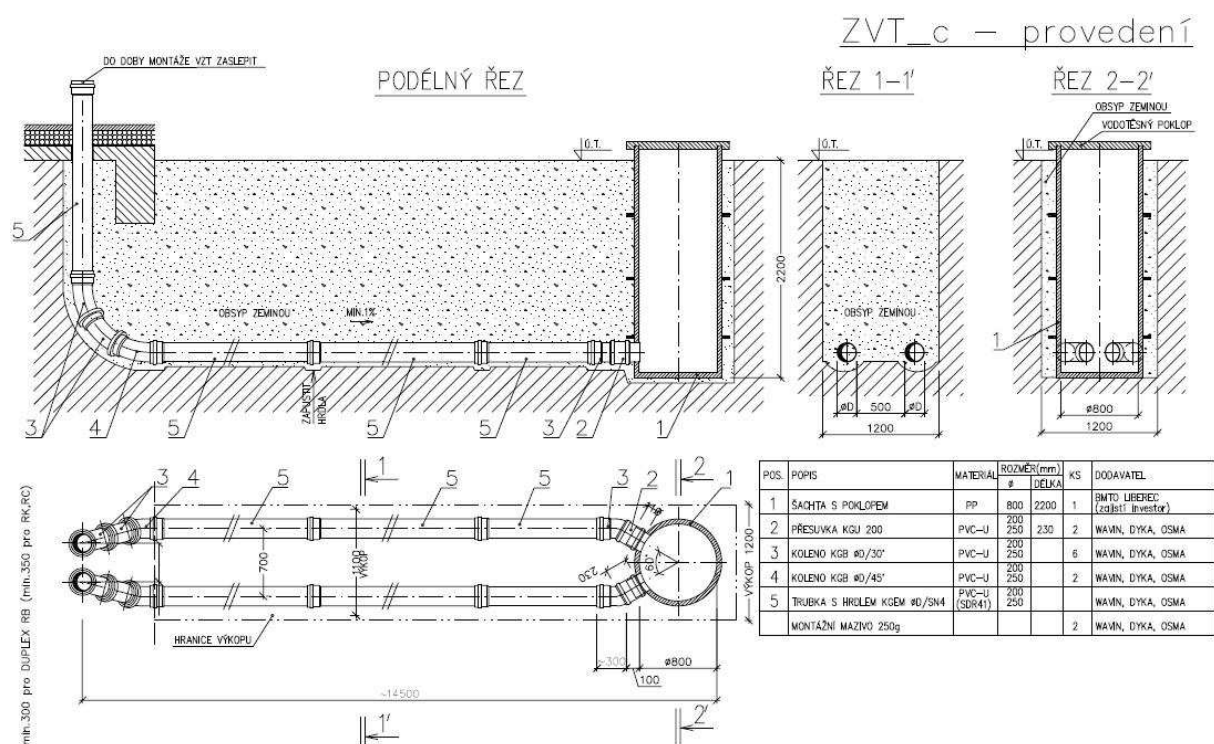
4.2.2 Vzduchový ZVT – cirkulační varianta

Oproti přímé variantě je zde venkovní vzduch nasáván vždy přes fasádní žaluzii. Na základě aktuální teploty venkovního vzduchu, pak pokračuje buď přímo do vzduchotechnické jednotky (při teplotách 2–20 °C), nebo míří do zemního výměníku tepla k předehřevu nebo předchlazení. Výhodou tohoto provedení je, že při stejné délce ZVT dosáhneme zmenšení výkopu až o polovinu délky oproti přímé variantě. Tím vznikne cirkulační smyčka. Obě ramena potrubí můžou ležet buď vedle sebe (obr. 4.9), nebo nad sebou (obr. 4.8). Musíme však zachovat osovou vzdálenost potrubí alespoň 700 mm [14].

Zvláště v létě využijeme tuto verzi zemního výměníku tepla, neboť umožňuje chlazení vnitřního vzduchu oběhem v cirkulační smyčce. Navíc dodáváme do zeminy zpátky tepelnou energii (regenerujeme zeminu) a dodané teplo využijeme v zimě při zimním provozu [14]. Čerstvý vzduch je pak už nasáván v minimálních objemech a v pravidelných intervalech, kvůli dodržování hygienických norem [14]. Sestava opět obsahuje revizní šachtu (obr. 4.8 a 4.9).



Obr 4.8 Cirkulační ZTV – potrubí uloženo nad sebou (převzato z [14]).

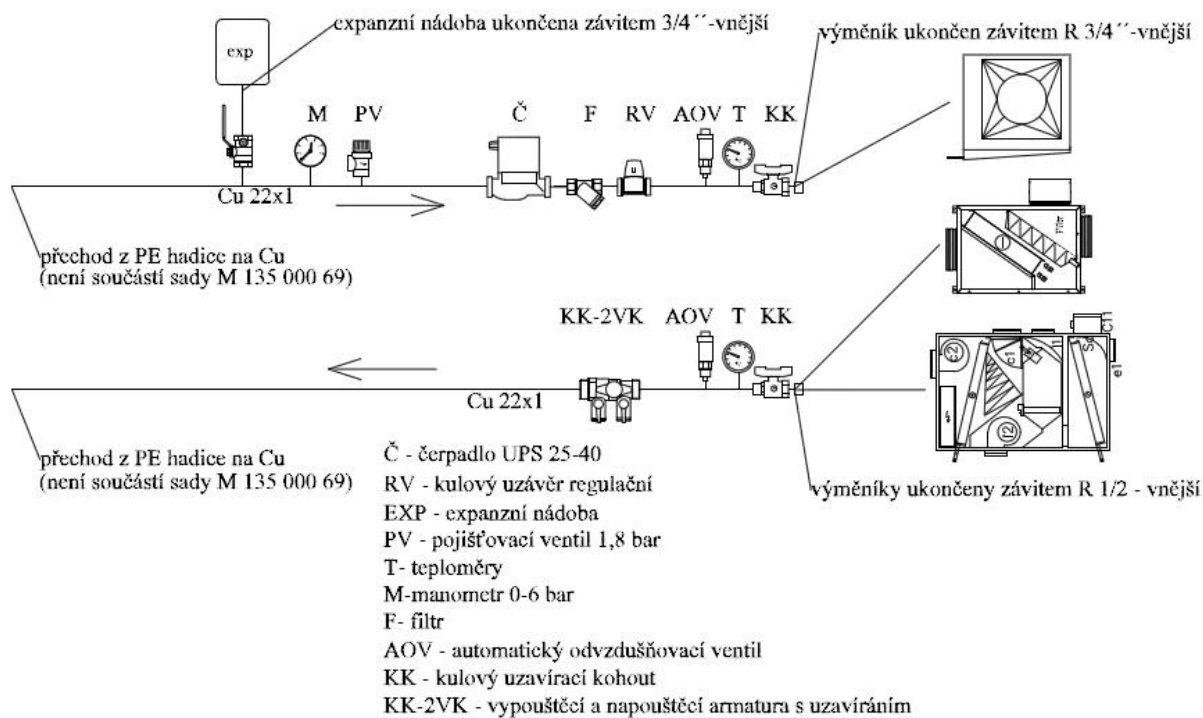


Obr 4.9 Cirkulační ZTV – potrubí uloženo vedle sebe (převzato z [14]).

4.3 Solankový ZVT

Zásadním rozdílem mezi solankovým ZVT a vzduchovým ZVT je nosné medium. U vzduchového je to vzduch, u solankového je to kapalina solanka. U této varianty je navíc další článek soustavy a to solankový výměník. V zimním období předehřátá kapalina ze zemního okruhu předává teplo nasávanému čerstvému vzduchu. V letním období předchladená solanka odebírá teplo teplému venkovnímu vzduchu. Tyto děje probíhají v solankovém výměníku (vzduch – solanka).

Solankový ZVT se skládá z uzavřeného potrubního okruhu o délce 130–170 m naplněného nemrznoucí kapalinou. Firma Atrea pro zemní výměníky tepla doporučuje kapalinu GeroFrost s teplotní odolností do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (cca 40 % propylenglykolu, viz tab. 4.1 – 4.5) [17]. Nemrznoucí směs se musí jedenkrát za 6-8 let vyměnit, protože dochází k degradaci jejich vlastností. Výměník kapalina-vzduch je umístěn uvnitř domu na straně sání čerstvého vzduchu do vzduchotechnické jednotky. Není nutno realizovat přímé vedení tras, a také revizní šachtu. Odvzdušnění je řešeno vyspádováním směrem od objektu. Systém má vyšší provozní náročnost (provoz oběhového čerpadla). Součástí zapojení tvoří běžné topenářské prvky [17]: čerpadlo, filtry, expanzní nádoba, pojišťovací, regulační a odvzdušňovací ventily, uzavírací a vypouštěcí ventily, měřidla teploty a tlaku. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 4.10.



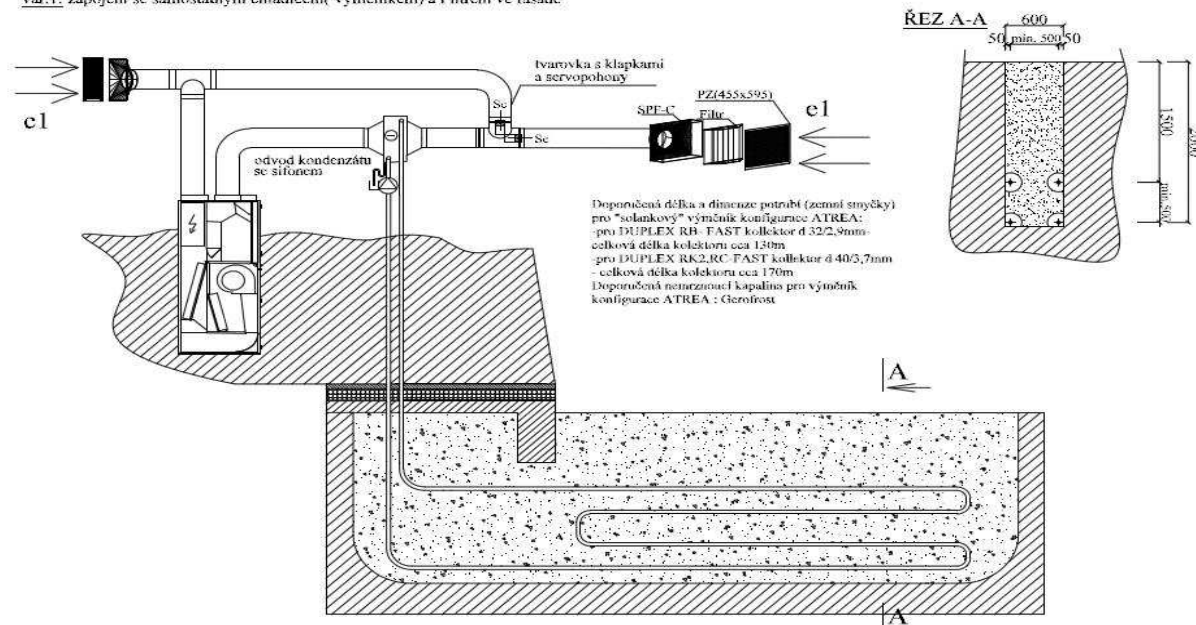
Obr. 4.10 Schéma zapojení „solankového“ okruhu (převzato z [14]).

Samotný okruh tvoří PE hadice o průměru 32 mm nebo 40 mm [14]. Délka hadic standardně 130 až 170 m [14]. Registr trubek může být položen i několikrát vedle sebe, je ovšem nutno zabezpečit minimální vzájemnou vzdálenost 500 mm. Vzhledem k zprostředkovanému přenosu tepla odpadá hygienické hledisko. V letním období však může docházet na výměníku ke kondenzaci vody, a proto je nutné zajistit její odvod. Podobně jako u vzduchové varianty se ZVT v přechodném období

nevyužívá trvale, a je proto nutná jeho optimalizace a regulace. Varianta zapojení z obr 4.11 umožňuje využívat okruh k předchlazení čerstvého nebo cirkulačního vzduchu [14].

Schéma "solankového" cirkulačního chlazení RK2 - ATREA

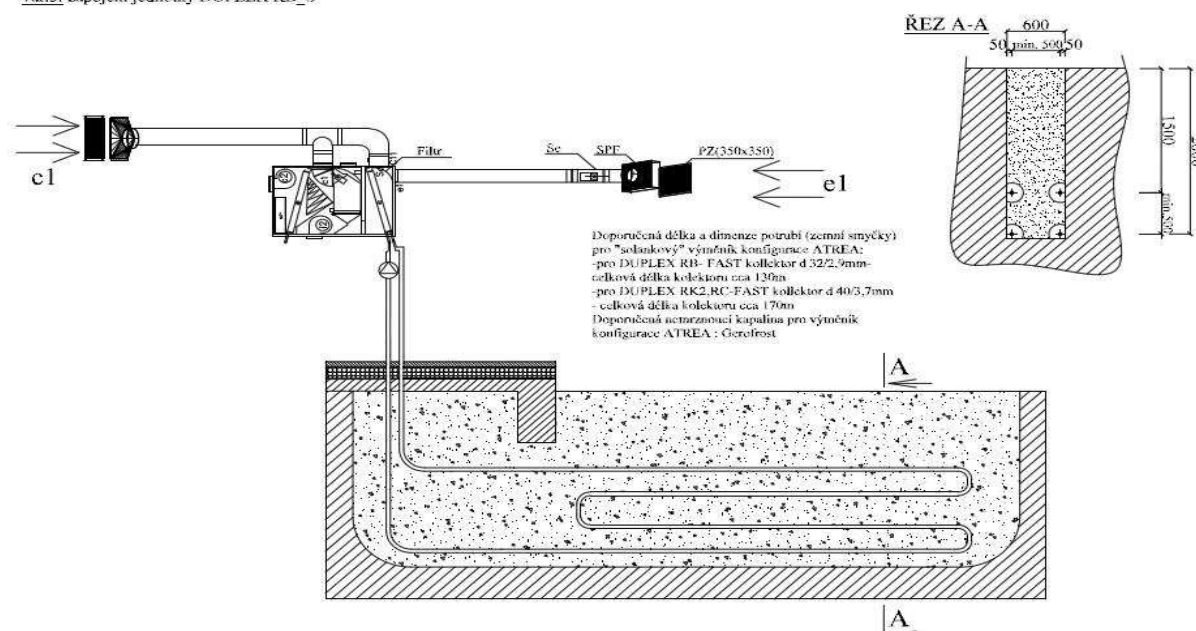
var.1: zapojení se samostatným chladičem(výměníkem) a Filtrem ve fasádě



Obr. 4.11 Schéma solankového okruhu pro jednotku RK2, se samostatným chladičem (převzato z [14]).

Schéma "solankového" cirkulačního chlazení RB_S - ATREA

var.3: zapojení jednotky DUPLEX RB_S



Obr. 4.12 Schéma solankového okruhu pro jednotku RB_S (převzato z [14]).

Tab. 4.1 Kapalina GeroFrost – Technické údaje (převzato z [17])

roztok	bod tuhnutí (°C)	obsah propylenglykolu (%)
A	-10	24
B	-20	37
C	-30	48

Tab. 4.2 Kapalina GeroFrost – Hustota [kg/m³] (převzato z [17])

teplota (°C)	A	B	C
-30		-	
-20			961
-10		971	956
0	977	966	950
10	973	958	942
20	969	953	934
30	965	948	926

Tab. 4.3 Kapalina GeroFrost – Kinematická viskozita [mm²/s] (převzato z [17])

teplota (°C)	A	B	C
-30	-	-	8.5
-20	-	4.3	5.5
-10	2.6	3.2	3.8
0	1.9	2.3	2.8
10	1.5	1.7	2.0
20	1.2	1.3	1.5
30	1.1	1.2	1.2

Tab. 4.4 Kapalina GeroFrost – Tepelná kapacita [kJ/kg.K] (převzato z [17])

teplota (°C)	A	B	C
-30	-	-	
-20	-	3.7	3.3
-10		3.8	3.4
0	3.9	3.8	3.5
10	4.0	3.9	3.6
20	4.0	3.9	3.7
30	4.0	3.9	3.7

Tab. 4.5 Kapalina GeroFrost – Tepelná vodivost [W/m.K] (převzato z [17])

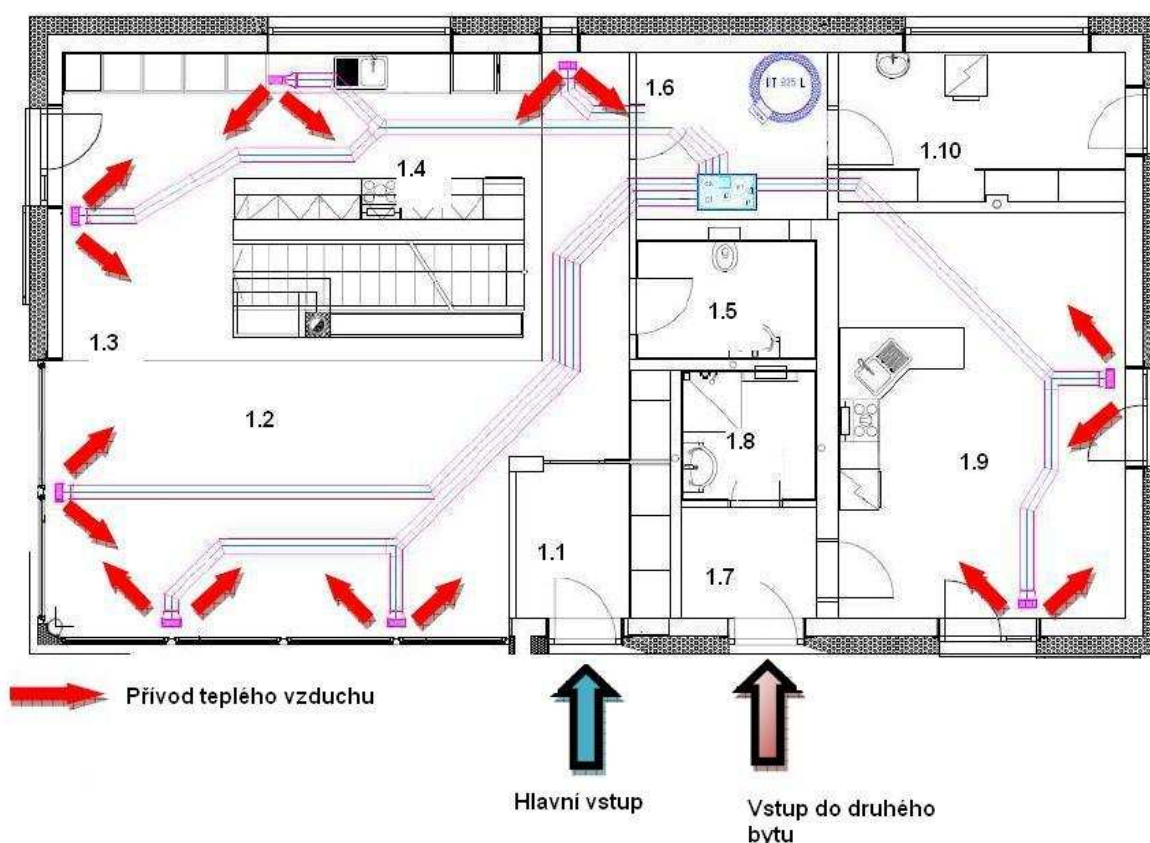
Teplota (°C)	A	B	C
-30	-	-	
-20	-		0.30
-10		0.32	0.30
0	0.35	0.32	0.31
10	0.36	0.33	0.31
20	0.37	0.33	0.32
30	0.38	0.34	0.32

5 SIMULOVANÝ OBJEKT

5.1 Popis domu

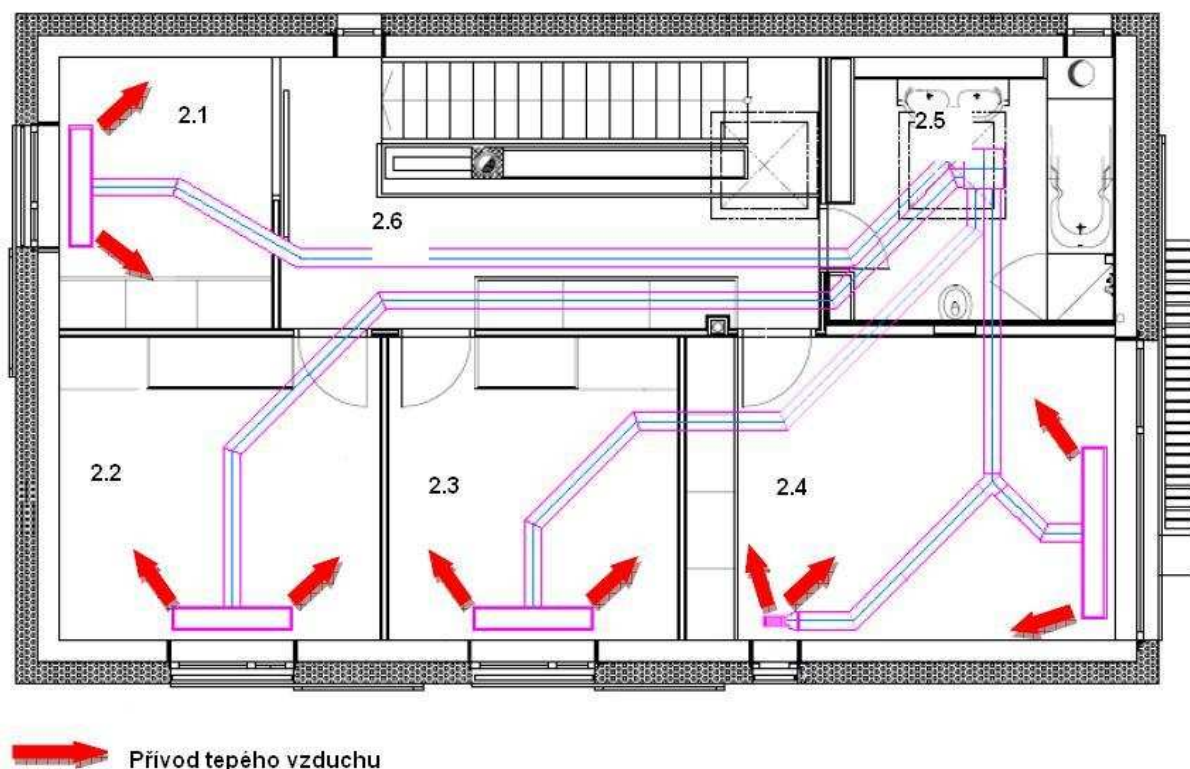
Dvoupodlažní nepodsklepený dům se dvěma byty o půdorysných rozměrech 16,37 m × 9,25 m × 16,50 m (zastavěná plocha 150,4 m²) se nalézá ve městě Studénka (245,75 m. n. m.), v okrese Nový Jičín [30]. Pro naši oblast jsou udávány tyto výpočtové hodnoty: venkovní teplota -15 °C, číslo budovy B 12 (Pa^{0,67}). Dispozice jednotlivých pater a rozložení pokojů je uvedena na obr. 5.1 a obr. 5.2.

Obvodové stěny jsou provedeny z betonových skořepinových tvárnic Sendwix tl. 250 mm. Rovněž příčky jsou provedeny ze stejného systému, a to v tl. 100 a 150 mm. Příčky v 2.NP jsou ze sádkartonové stěny tl. 100 mm a vloženy izolace Orsil tl. 75 mm. Tepelnou izolaci obvodových stěn zajišťuje kontaktní zateplovací systém z polystyrenu EPS tl. 240 mm. Zateplení ploché střechy tvoří desky s polystyrenem EPS tl. 320 mm, ukotvenými do střešní konstrukce [30]. Okna jsou plastová, zdvojená a sklopná, zasklená izolačním dvojsklem [30].



Obr. 5.1 Dispoziční řešení 1.NP a umístění vzduchovodů a výustek zkoumaného domu (převzato z [30])

Popis místností 1.NP: 1.1 zádveří, 1.2 obývací pokoj, 1.3 jídelna, 1.4 kuchyně, 1.5 koupelna, 1.6 technická místnost, 1.7 zádveří, 1.8 koupelna, 1.9 obývací pokoj s kk, 1.10 prádelna.



Obr. 5.2 Dispoziční řešení 2.NP a umístění vzduchovodů a výustek zkoumaného domu (převzato z [30])

Popis místností 2.NP: 2.1 pracovna, 2.2 dětský pokoj, 2.3 dětský pokoj, 2.4 ložnice, 2.5 koupelna, 2.6 chodba.

5.2 Technická zařízení

5.2.1 Větrání

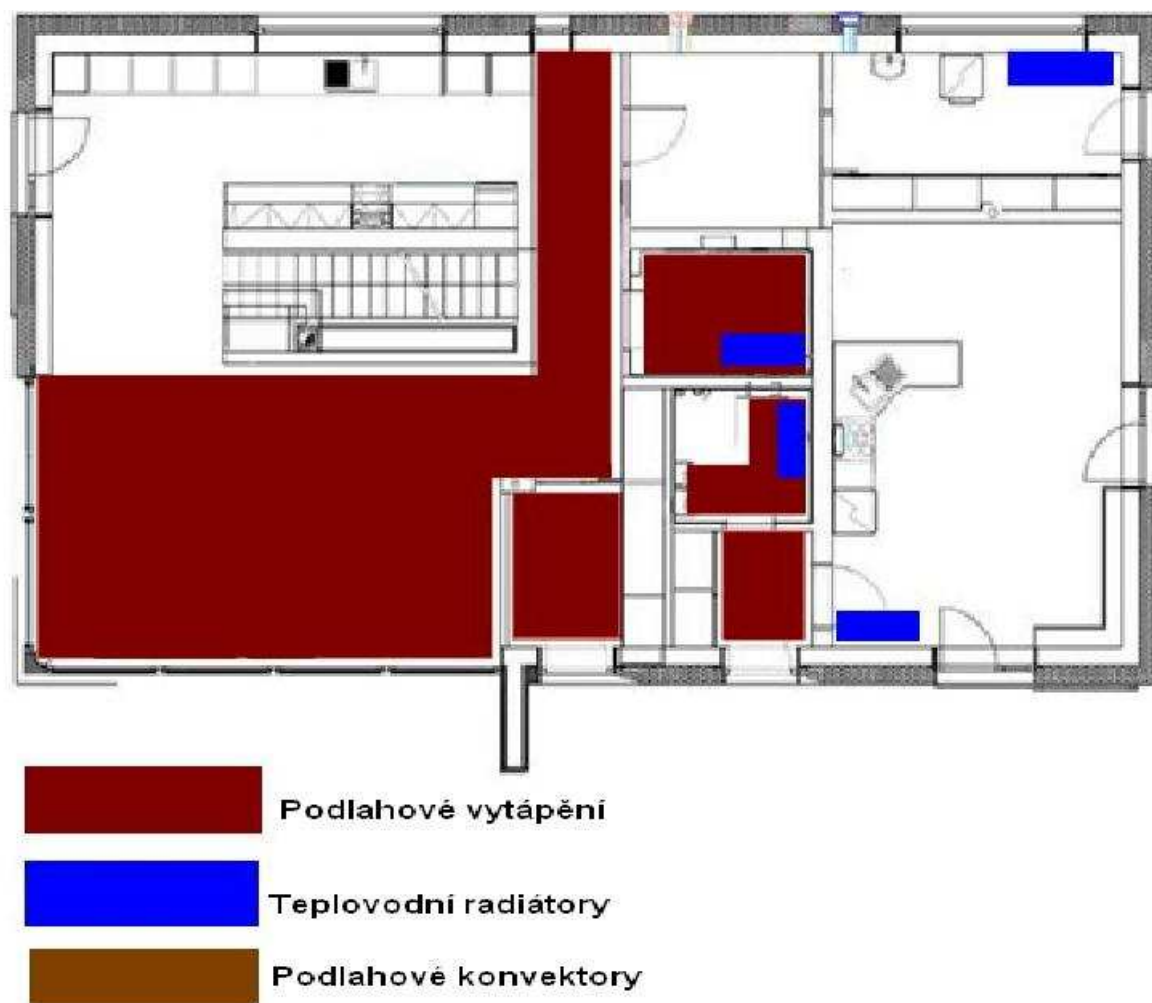
Větrání s nuceným oběhem vzduchu je zajištěno větrací a vytápěcí teplovzdušnou jednotkou Duplex RK 1800/420–11 [30]. Tato jednotka je vhodná pro dvouzónové cirkulační vytápění a pro komfortní řízené větrání s rekuperací tepla. Venkovní vzduch je nasáván přes ZVT nebo fasádní žaluzii, podle aktuální venkovní teploty. Upravený vzduch je do jednotlivých místností veden samostatnými plochými rozvody (rozměry 200x50 mm) (obr. 5.1 a 5.2). Vzduchovody z pozinkovaného plechu umístěné v podlaze jsou tepelně izolovány. Cirkulační vzduch se z místností odvádí mezerami pod dveřmi bez prahů, dále přes chodbu a schodiště, kde je odtah zpět do jednotky. Odpadní vzduch je odsáván přes kuchyni a sociální zařízení. V rekuperačním výměníku se čerstvý vzduch předejde, odpadní ochlazený vzduch se odvádí ven z budovy.

5.2.2 Vytápění

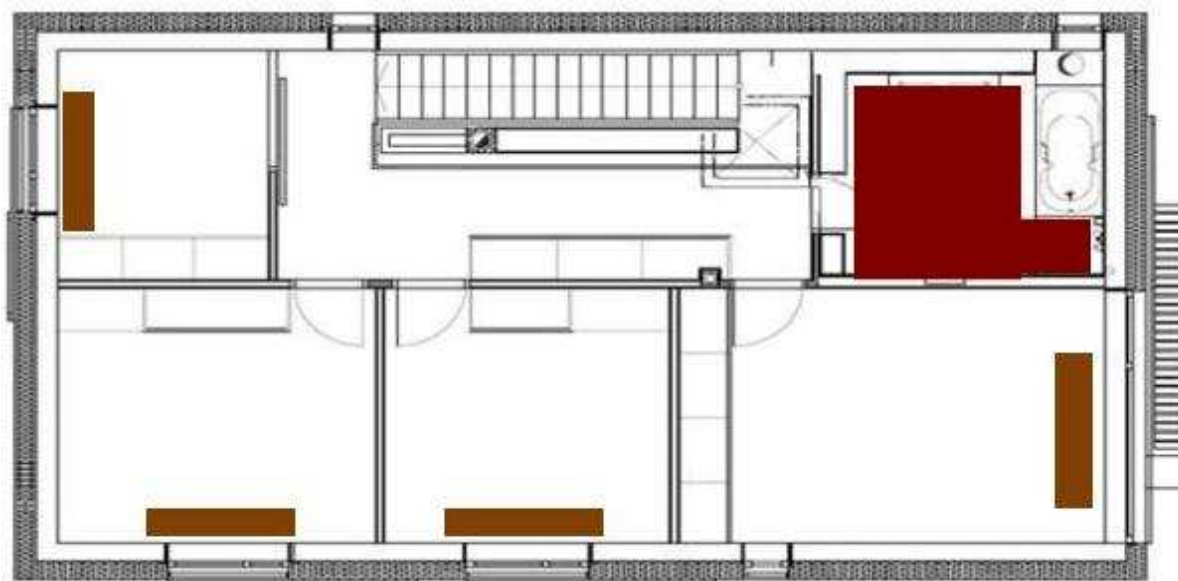
Teplovzdušná jednotka Duplex RK 1800/420–11 tvoří hlavní vytápěcí systém – teplovzdušné vytápění [30]. Doplněné je podlahovým vytápěcím systémem Uponor, podlahovými konvektory Licon, teplovodními otopnými žebříky Koralux linear a teplovodními deskovými radiátory Radik klasik. Umístění doplňkového systému v obou podlažích je patrné na obr. 5.3 a obr. 5.4. V budově je umístěn i krb s teplovzdušnou vložkou, jeho používání je však v porovnání s ostatními systémy minimální.

Parametry otopné soustavy [30]:

- tepelný spád topné vody: 55/45 °C,
- tepelný spád vzduchu: 45/17 °C,
- tlaková ztráta výměníku: 13,5 kPa,
- tepelný výkon jednotky DUPLEX RK 1800/420: 5 706 W,
- tepelný výkon ostatní teplovodní soustavy: 5 000 W.



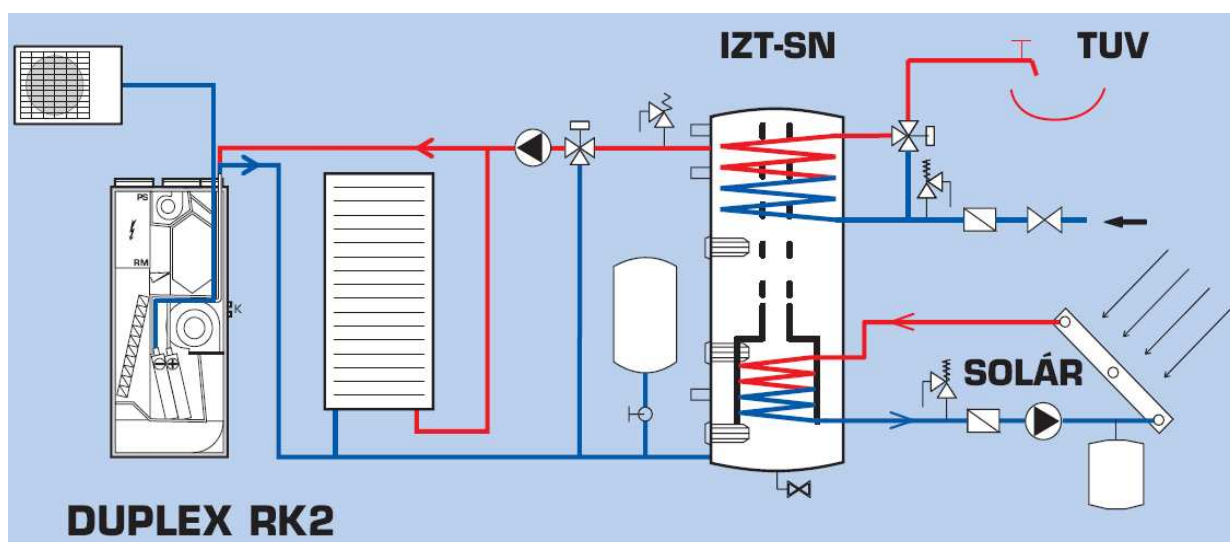
Obr. 5.3 Systémy doplňkového vytápění v 1.NP (převzato z [30]).



Obr. 5.4 Systémy doplňkového vytápění v 2.NP (převzato z [25]).

5.2.3 Zdroj tepla

Zdroj tepla pro teplovodní vytápění tvoří integrovaný zásobník tepla (IZT) o objemu 925 l, který je umístěný v technické místnosti. Integrovaný zásobník tepla IZT 925 zajišťuje i ohřev teplé vody [30]. Dodávku tepla zajišťují 3 topné patry – elektrospirály s celkovým výkonem 12 kW (4+4+4 kW) a 5 teplovodních solárních kolektorů Vermos TS 330 s celkovou absorpční plochou 1,78 m² [30]. Kolektory umístěné na střeše 2.NP jsou napojeny na spodní IZT, kvůli dosažení maximální účinnosti. Horní výměník, který má nejvyšší teplotu, slouží pro průtokový ohřev teplé vody, která se nastavuje pomocí trojcestného směšovacího ventilu (obr. 5.5) [14].



Obr. 5.5 Integrovaný zásobník tepla (převzato z [14]).

6 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ TRNSYS

Energetické simulace využití zemních výměníků tepla byly provedeny programem TRNSYS, verze 16.1 (TRaNsient SYstem Simulation). „*TRNSYS je modulární program určený především pro dynamickou analýzu energetických systémů staveb. Zejména energetických bilancí budov, solárních fototermálních soustav teplovodních, teplovzdušných, fotovoltaických systémů a vzduchotechnických systémů pro větrání a teplovzdušné vytápění.*“[32]

Tvorbě energetického systému předchází teoretická analýza řešeného problému a rozdělení do jednotlivých modulů. Modul představuje jeden konkrétní člen dané soustavy. Může to být čerpadlo, výměník, sluneční kolektor, baterie nebo třeba větrná turbína [32]. Pro vytvoření požadovaného energetického systému se následně moduly propojí pomocí vstupních a výstupních veličin. Program dovoluje nastavení jednotlivých parametrů modulů, je však nutné posoudit vliv jejich na konkrétní modul a na konkrétní příklad (např. vliv spotřeby elektrické energie u čerpadla v závislosti na průtoku). Každý modul je určen jednotlivými vstupními a výstupními veličinami. Ty jsou rozděleny do třech základních skupin [32]:

- *Parameters* – veličiny, které lze nastavit před začátkem simulace, a které se v průběhu simulace nemění
- *Inputs* – vstupy do modulů, které se mohou, ale nemusí v průběhu simulace měnit
- *Outputs* – výstupy z modulů, které mohou být požadovaným výsledkem, nebo je můžeme použít jako vstupy do dalších modulů.

Výsledky simulace můžeme sledovat online na monitoru nebo je můžeme zapsat do datového souboru a následně zpracovat v libovolném tabulkovém procesoru. Program umožňuje sledovat různá období roku v daných časových intervalech až po dobu jednoho roku. Takto lze získat množství informací o chování systému nebo jeho částí a ty potom využít k optimalizaci tepelně technických vlastností budovy nebo jednotlivých částí energetického systému [32].

Pro porovnání byly provedeny dvě různé simulace. První varianta počítá s využitím vzduchového zemního výměníku pro předehřev (předchlazení) větracího vzduchu s následnou rekuperací tepla. Druhou variantou je náhrada vzduchového ZVT tzv. solankovým ZVT.

6.1 Nastavení modelu

Při nastavení modelu energetické simulace bereme v úvahu určitá zjednodušení:

- *Fyzikální vlastnosti zeminy* – pro okolí ZVT uvažujeme s homogenní jílovitou zeminou s konstantními fyzikálními vlastnostmi,
- *Ovlivnění okolní zeminy* – neuvažujeme ovlivnění teploty okolní zeminy provozem ZVT,
- *Hloubka uložení ZVT* – počítáme jako s aritmetickým průměrem hloubky uložení na začátku a konci vyspádovaného potrubí (cca 2 %), a uvažujeme konstantní hloubku uložení, zanedbáme drobné terénní nerovnosti povrchu,
- *Fyzikální vlastnosti vzduchu* – počítáme s konstantními vlastnostmi, zanedbáme vliv tlaku a teploty,
- *Kondenzace vzdušné vlhkosti* – vliv kondenzace zanedbáme úplně.

6.1.1 Vlastnosti zeminy

Pro přibližné určení teplotního profilu zeminy slouží modul „*Physical Phenomena, Simple Ground Temperature Model*“ – type 77 [35], který vychází z rovnice (2).

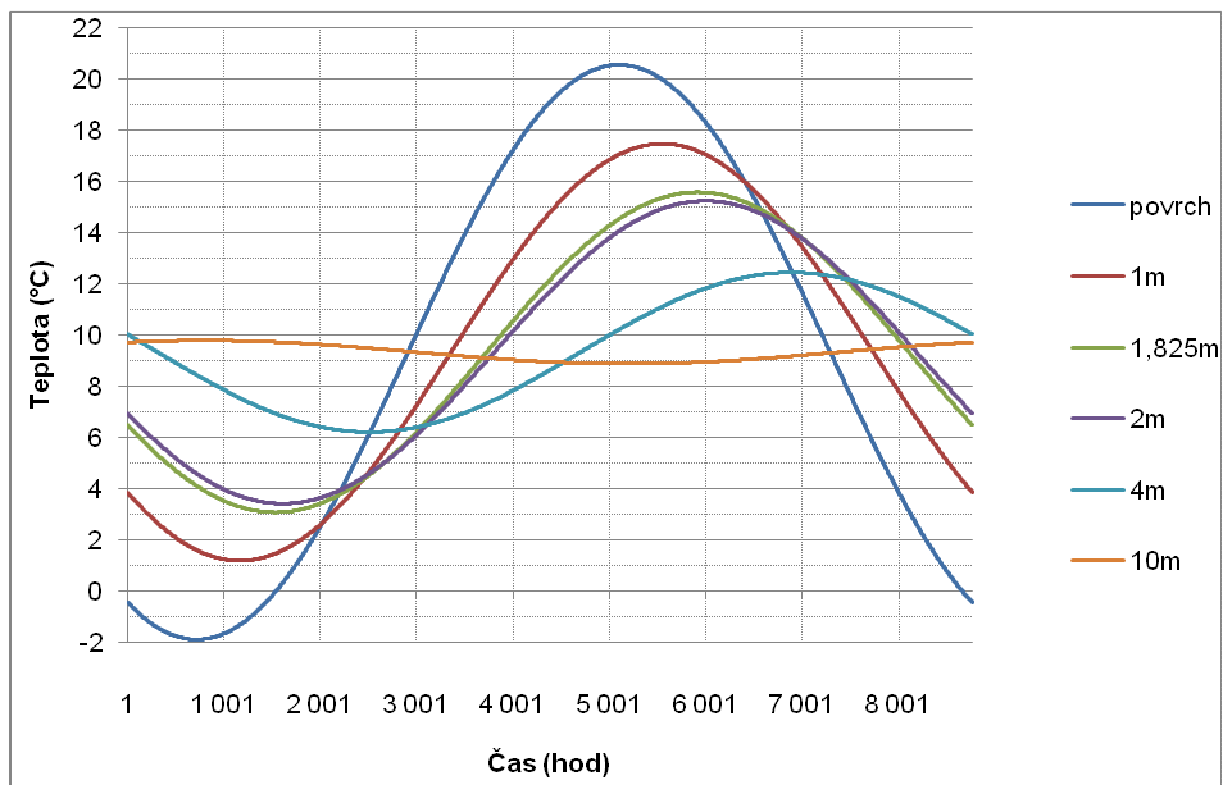
$$T_{now} = T_M - T_A \cdot \exp \left[-h \cdot \left(\frac{\pi}{365 \cdot a} \right)^{0,5} \right] \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \cdot \left[\tau_{now} - \tau_{shift} - \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{365}{\pi \cdot a} \right)^{0,5} \right] \right\} [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

- kde je: $T_{now} [^{\circ}\text{C}]$	aktuální počítaná teplota zeminy (v aktuálním čase)
$T_M [^{\circ}\text{C}]$	průměrná povrchová teplota zeminy (průměrná teplota vzduchu)
$T_A [^{\circ}\text{C}]$	amplituda povrchové teploty zeminy
$h [m]$	hloubka pod povrchem zeminy
$a [m^2 / \text{den}]$	teplotní vodivost zeminy
$\tau_{now} [\text{den}]$	aktuální den, pro který počítáme teplotu zeminy
$\tau_{shift} [\text{den}]$	časové posunutí minimální povrchové teploty zeminy vůči Novému roku

Hodnoty T_M , T_A a τ_{shift} jsou určovány dle oblasti. Pro náš případ platí následující hodnoty z tab. 6.2 [34]:

- průměrná teplota venkovního vzduchu **$T_M = 9,32^{\circ}\text{C}$** ,
- velikost amplitudy venkovní teploty vzduchu **$T_A = 11,21^{\circ}\text{C}$** ,
- zpoždění minimální teploty na povrchu vůči minimální teplotě vzduchu **$\tau_{shift} = 30$ dní.**

Z obr. 6.1 je patrné zmenšování amplitudy minimální a maximální teploty v závislosti na zvětšující se hloubce. Teplota zeminy je konstantní od hloubky cca 50 m, a je rovna průměrné teplotě venkovního vzduchu zhruba 10°C . Pro vyšší účinnost ZVT je lepší ukládat vedení do větších hloubek, ale zásadním negativem jsou vysoké investiční náklady na zemní práce.



Obr. 6.1 Průběh teplot zeminy v různých hloubkách

V tab. 6.1 jsou uvedeny fyzikální vlastnosti různých druhů zeminy. Nejdůležitějším měřítkem je vysoká teplotní vodivost v kombinaci s velkou objemovou kapacitou. Z tabulky jako nejvýhodnější vychází pískovcová zemina, její použití nepřipadá v úvahu kvůli mechanickým vlastnostem. Proto budeme používat pro výpočty zeminu jílovitou.

Objemová tepelná kapacita je součinem hustoty a měrné tepelné kapacity (3). Dle vzorce (4) dokážeme určit teplotní vodivost zeminy.

Tab. 6.1 Fyzikální vlastnosti různých druhů zeminy, převzato z [39]

Zemina	Písčítá	Hlinitá	Hlinitá - vlhká	Jílovitá	Pískovcov á	Vápenitá
Tep.vodivost λ_{gr} [W/mK]	0,93	2,3	1,49	1,28	1,87	0,71
Hustota ρ_{gr} [kg/m ³]	1780	1650	1800	1500	2250	1670
Měr. tep. kapacita $c_{p,gr}$ [J/kgK]	1390	2850	1340	880	710	2230
Obj. tep. kapacita C_{gr} [kJ/m ³ K]	2474	4788	2412	1320	1598	3724
Teplotní vodivost a [m ² /s]	3,76E-07	4,80E-07	6,18E-07	9,70E-07	11,71E-07	1,91E-07

$$C_{gr} = \rho_{gr} \cdot c_{p,gr} \left[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1} \right] \quad (3)$$

- kde: $C_{gr} [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ je objemová tepelná kapacita zeminy

$\rho_{gr} [kg \cdot m^{-3}]$ je hustota zeminy

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

$$a = \frac{\lambda_{gr}}{\rho_{gr} \cdot c_{p,gr}} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

- kde: $a [m^2 \cdot s^{-1}]$ je teplotní vodivost zeminy

$\lambda_{gr} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti zeminy

6.1.2 Klimatická data

Klimatická data vkládáme v modulu „*Wheather Data Reading And Processing*“ – type 109 - TMY2. Vzhledem k faktu, že ve Studénce (245,75 m. n. m.) [30] se nenachází žádná meteorologická stanice, použijeme data z programu METEONORM [36] pro stanici Ostrava – Poruba (242,0 m. n. m.) [36], která je vzdálená zhruba 15 km severovýchodně od simulovaného domu a má tedy blízké umístění, takže i podobné klimatické podmínky. Ještě blíže se nachází měřicí stanice Mošnov (cca 5 km na jihovýchod), avšak k dispozici jsou pouze průměrné měsíční teploty vzduchu, měsíční úhrn srážek a průměrná doba slunečního svitu [34]. Pro simulaci jsou tato data nepoužitelná, ale využijeme je k určení teplotního profilu zeminy v modulu „*Simple Ground Temperature Model*“ – type 77 [35].

Tab. 6.2 Průměrné roční, minimální, maximální a amplitudy venkovní teploty vzduchu naměřené meteorologickou stanicí Mošnov (podle [34])

Rok	Teplota vzduchu - stanice Mošnov			Amplituda
	Průměr	MIN	MAX	A
1999	9,33	-0,70	19,60	10,15
2000	10,08	-1,90	19,40	10,65
2001	8,64	-3,40	19,30	11,35
2002	9,43	-4,40	19,90	12,15
2003	9,12	-4,20	20,70	12,45
2004	9,01	-3,40	19,40	11,40
2005	8,42	-3,10	19,60	11,35
2006	9,13	-6,50	22,40	14,45
2007	9,91	-0,40	20,00	10,20
2008	9,88	1,70	18,60	8,45
2009	9,50	-2,90	20,30	10,75
Průměr	9,32	-2,58	19,93	11,21

6.1.3 Režim větrání

V programu TRNSYS se větrací režim nastavuje v modulu „*Forcing Function, General*“ – type 14. Větrání je rozděleno na letní režim (červen - září) a zimní režim (říjen - květen), navíc je každý nastaven na víkendový a týdenní profil. Maximální hodnoty objemů větracího vzduchu jsou převzaty z [30] a jsou stanoveny na 330 m³/hod v zimě respektive 420 m³/hod v létě. Vyšší objem v létě je dán vyšší tepelnou zátěží budovy v letním období. Jednotka přivádí vzduch v zimě cyklicky každou hodinu po dobu 12 min. V době 6–8 hod, 14–16 hod a 19–21 hod se větrá kontinuálně. V letním období se větrá kontinuálně po celou dobu, i přes týdenní a víkendové režimy. Větrání je řešeno jako podtlakové (5 %), kvůli exfiltraci vnitřního vzduchu a možné kondenzaci vlhkosti v obvodovém zdivu.

6.1.4 Zemní výměník tepla

Zemní výměníky jsou simulovány v modulu „*Utility, Calling External Programs, Excel*“ – type 62. V obou případech uvažujeme s konstantní hloubkou uložení, s homogenní jílovitou zeminou a ve výpočtech předpokládáme konstantní teplotu stěn trubek, která se rovná teplotě zeminy.

6.1.4.1 Vzduchový ZVT

Skutečný vzduchový zemní výměník tepla je sestaven ze systému kanalizačního potrubí *KG 2000 Polypropylen®*, který je navržen i pro náročné podmínky [33]. Uložen je v hloubce 1,825 m a obsypán jílovitou zeminou.

Tab. 6.3 Parametry potrubí vzduchového ZVT z materiálu *KG 2000 Polypropylen®* (převzato z [33])

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr potrubí: D_N	0,2 (DN 200)	m
Tloušťka stěny potrubí: δ_{pipe}	6,2	mm
Tepelná vodivost potrubí: λ_{pipe}	0,22	W/m.K
Délka potrubí: L_{pipe}	30	m
Hloubka uložení potrubí: h	1,825	m

6.1.4.2 Solankový ZVT

U potrubí solankového výměníku předpokládáme uložení také do hloubky 1,825 m s obsypem jílovitou zeminou. Rozvody jsou ze speciálního materiálu FAST PE-GT-RC (GEROthem Erdreichkollektor FAST PE-GT-RC (RC - Resistance to Crack)) [33], jehož hlavní výhodou je možnost uložení přímo do zeminy bez nutnosti vytvoření pískového lože, což se pro jiné materiály nedoporučuje z důvodu možného poškození. Uložení přímo do jílovité zeminy jsou využity fyzikální vlastnosti půdy (Kap. 6.1.2). V potrubí proudí nemrznoucí kapalina Gerofrost s fyzikálními vlastnostmi uvedenými v tab. 4.1 – 4.5.

Tab. 6.4 Parametry potrubí solankového ZVT z materiálu FAST PE-GT-RC (převzato z [34])

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr potrubí: $D_{N,s}$	0,032 (DN 32)	m
Tloušťka stěny potrubí: $\delta_{pipe,s}$	2,9	mm
Tepelná vodivost potrubí: $\lambda_{pipe,s}$	0,16	W/m.K
Délka potrubí: $L_{pipe,s}$	130	m
Hloubka uložení potrubí: h	1,825	m

6.2 Algoritmus výpočtu

1. Fyzikální vlastnosti přiváděného vzduchu a jeho množství

Fyzikální vlastnosti nasávaného vzduchu byly určeny z průměrné teploty venkovního vzduchu, tzn. $t_b = 10\text{ °C}$ – vlhký vzduch. Objemové a hmotnostní toky přiváděného vzduchu jsou spočteny dle rovnic (5) a (6) a podle zimního či letního provozu (kapitola 6.1.3). Množství odváděného vzduchu v mírně podtlakovém režimu (cca 5 %) určíme dle rovnic (7) a (8).

objemový tok přiváděného větracího vzduchu

$$\underline{V_{in}^* = V_{MAX}^* \left[m^3 / s \right]} \quad (5)$$

hmotnostní tok přiváděného větracího vzduchu:

$$\underline{m_{in}^* = V_{in}^* \cdot \rho_{air}(t_b) \left[kg / s \right]} \quad (6)$$

objemový tok odváděného odpadního vzduchu:

$$\underline{V_{out}^* = 1,05 \cdot V_{in}^* \left[m^3 / s \right]} \quad (7)$$

hmotnostní tok odváděného odpadního vzduchu:

$$\underline{m_{out}^* = V_{out}^* \cdot \rho_{air}(t_i) \left[kg / s \right]} \quad (8)$$

2. Parametry zemních výměníků tepla

Vlastnosti a parametry obou výměníků jsou uvedeny v tab. 6.3 pro vzduchový ZVT, a v tab. 6.4 pro solankový ZVT. Fyzikální vlastnosti zeminy určené na obsyp potrubí nalezneme v tab. 6.1.

3. Výstupní teplota vzduchu ze ZVT

Z rovnice (10) spočítáme výstupní teplotu vzduchu $t_{b,OUT}$. Uvažujeme výměník s konstantní teplotou stěny potrubí. Velikost teplosměnné plochy určíme ze vztahů (11), (12) a (13). Výsledný součinitel přestupu tepla (16) tak musíme korigovat pomocí fiktivního součinitele přestupu tepla (19) do zeminy přes stěnu potrubí.

$$\Theta = \frac{t_w - t_{b,OUT}}{t_w - t_{b,IN}} = \exp \left(- \frac{P_{pipe} \cdot L_{pipe}}{m_{pipe}^* \cdot c_{p,air}(t_b)} \cdot \bar{h} \right) [1] \Rightarrow t_{b,OUT} \quad (9)$$

$$t_{b,OUT} = t_w - (t_w - t_{b,IN}) \cdot \exp \left(- \frac{P_{pipe} \cdot L_{pipe}}{m_{pipe}^* \cdot c_{p,air}(t_b)} \cdot \bar{h} \right) [K] \quad (10)$$

- kde: Θ [1] je bezrozměrná teplota
- t_w [°C] je teplota stěny potrubí v hloubce uložení pod povrchem
- $t_{b,OUT}$ [°C] je výstupní teplota vzduchu ze zemního výměníku tepla
- $t_{b,IN}$ [°C] je teplota vzduchu na vstupu do ZVT;
 $t_{b,IN} = t_e$
- P_{pipe} [m²] je obvod trubky výměníku
- L_{pipe} [m] je délka potrubí ZVT
- m_{pipe}^* [kg / s] je hmotnostní tok procházející ZVT
- $c_{p,air}(t_b)$ [J / kg · K] je měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě t_b
- $\bar{h}$ [W / m · K] je průměrný (celkový) součinitel přestupu tepla ze zeminy do vzduchu

$$P_{pipe} = \pi \cdot D_{pipe} [m] \quad (11)$$

- kde: π [1] je Ludolfovo číslo
- D_{pipe} [m] je vnitřní průměr potrubí ZVT

$$D_{pipe} = D_n - 2 \cdot \delta_{pipe} [m] \quad (12)$$

- kde: D_n [m] je vnější (normovaný) průměr potrubí ZVT
- δ_{pipe} [m] je tloušťka stěny potrubí

$$S_{pipe} = P_{pipe} \cdot L_{pipe} [m^2] \quad (13)$$

$$\dot{m}_{pipe} = \dot{V}_{pipe} \cdot \rho_{air}(t_b) \quad [kg / s] \quad (14)$$

$$\dot{m}_{pipe} = \dot{m}_{in} \quad [kg / s] \quad (15)$$

- kde:

$$\dot{V}_{pipe} \quad [m^3 / s] \quad \text{je objemový tok procházející výměníkem}$$

$$\rho_{air}(t_b) \quad [kg / m] \quad \text{je hustota vzduchu při } t_b$$

$$\bar{h} = \frac{\bar{h}_a \cdot h_s}{\bar{h}_a + h_s} \quad [W / m \cdot K] \quad (16)$$

- kde: $\bar{h}_a \quad [W / m \cdot K]$ je střední hodnota (podél trubky) součinitele přestupu tepla z trubky do vzduchu

$h_s \quad [W / m \cdot K]$ je fiktivní součinitel přestupu tepla se zemí přes stěnu trubky

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_a \cdot D_{pipe}}{\lambda_{air}(t_b)} \quad [-] \Rightarrow \bar{h}_a \quad (17)$$

$$\bar{h}_a = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda_{air}(t_b)}{D_{pipe}} \quad [W / m \cdot K] \quad (18)$$

- kde: $\overline{Nu}_D \quad [1]$ je střední hodnota Nussletova čísla

$\lambda_{air}(t_b) \quad [W / m \cdot K]$ je tepelná vodivost vzduchu při teplotě t_b

$$h_s = \frac{\lambda_s}{R_{pipe} \cdot \ln\left(1 + \frac{\delta_{pipe}}{R_{pipe}}\right)} \quad [W / m \cdot K] \quad (19)$$

- kde: $\lambda_s \quad [W / m \cdot K]$ je součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí (PP)

$R_{pipe} \quad [m]$ je poloměr potrubí ZVT

$$\overline{Nu}_D = 0,023 \cdot \overline{Re}_D^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad [-] \quad (20)$$

- kde: $\overline{Re}_D \quad [-]$ je střední hodnota Reynoldsova čísla

$\text{Pr} \quad [-]$ je Prandtlovo číslo

- vztah platí pro $\overline{Re}_D \geq 10000$ ($330 \text{ m}^3/\text{h} \approx Re=45\ 800$, $420 \text{ m}^3/\text{h} \approx Re=58\ 300$); fyzikální vlastnosti určovány při t_b

$$\overline{Re}_D = \frac{\overline{w} \cdot D_{pipe}}{\nu_{air}(t_b)} \quad [-] \quad (21)$$

- kde: $\nu_{air}(t_b) \quad [m^2 / s]$ je dynamická viskozita vzduchu při teplotě t_b

$\overline{w} \quad [m / s]$ je střední rychlost proudícího vzduchu v potrubí

$$\overline{w} = \frac{V_{pipe}^*}{A_{pipe}} \quad [m / s] \quad (22)$$

- kde: $A_{pipe} \quad [m^2]$ je plocha průřezu trubky (průtočný průřez)

$$A_{pipe} = \frac{\pi \cdot D_{pipe}^2}{4} \quad [m^2] \quad (23)$$

4. Určení tepelného výkonu vzduchového ZVT

Tepelný výkon výměníku (24) určíme z výsledné teploty na výstupu z potrubí.

$$Q_{1,ZVT}^* = m_{pipe}^* \cdot c_{p,air}(t_b) \cdot (t_{b,OUT} - t_{b,IN}) \quad [W] \quad (24)$$

5. Výstupní teplota solanky ze ZVT

Výpočet vychází ze stejných rovnic jako výpočet vzduchového zemního výměníku, ale pro rozlišení mají symboly spodní index „s“. Z rovnice (25) spočítáme výstupní teplotu solanky $t_{b,OUT,s}$. Uvažujeme výměník s konstantní teplotou stěny potrubí. Velikost teplosměnné plochy určíme ze vztahů (27), (28) a (29). Výsledný součinitel přestupu tepla (32) opět musíme korigovat pomocí fiktivního součinitele přestupu tepla (35) do zeminy přes stěnu potrubí.

$$\Theta = \frac{t_{w,s} - t_{b,OUT,s}}{t_{w,s} - t_{b,IN,s}} = \exp \left(- \frac{P_{pipe,s} \cdot L_{pipe,s}}{m_{pipe,s}^* \cdot c_{p,s}(t_{b,s})} \cdot \bar{h} \right) [1] \Rightarrow t_{b,OUT,s} \quad (25)$$

$$t_{b,OUT,s} = t_{w,s} - (t_{w,s} - t_{b,IN,s}) \cdot \exp \left(- \frac{P_{pipe,s} \cdot L_{pipe,s}}{m_{pipe,s}^* \cdot c_{p,s}(t_{b,s})} \cdot \bar{h} \right) [K] \quad (26)$$

- kde: $\Theta \quad [1]$ je bezrozměrná teplota

$t_{W,s} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	je teplota stěny potrubí v hloubce uložení pod povrchem
$t_{b,OUT,s} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	je výstupní teplota solanky ze zemního výměníku tepla
$t_{b,IN,s} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	je teplota solanky na vstupu do ZVT
$P_{pipe,s} \text{ [m}^2\text{]}$	je obvod trubky výměníku
$L_{pipe,s} \text{ [m]}$	je délka potrubí ZVT
$\dot{m}_{pipe,s} \text{ [kg / s]}$	je hmotnostní tok procházející ZVT
$c_{p,s}(t_b) \text{ [J / kg} \cdot \text{K]}$	je měrná tepelná kapacita solanky při teplotě $t_{b,s}$
$\bar{h}_s \text{ [W / m} \cdot \text{K]}$	je průměrný (celkový) součinitel přestupu tepla ze zeminy do vzduchu

$$\underline{P_{pipe,s} = \pi \cdot D_{pipe,s} \text{ [m]}} \quad (27)$$

- kde: π [1] je Ludolfovo číslo

$D_{pipe,s} \text{ [m]}$ je vnitřní průměr potrubí ZVT

$$\underline{D_{pipe,s} = D_{n,s} - 2 \cdot \delta_{pipe,s} \text{ [m]}} \quad (28)$$

- kde: $D_{n,s} \text{ [m]}$ je vnější (normovaný) průměr potrubí ZVT

$\delta_{pipe,s} \text{ [m]}$ je tloušťka stěny potrubí

$$\underline{S_{pipe,s} = P_{pipe,s} \cdot L_{pipe,s} \text{ [m}^2\text{]}} \quad (29)$$

$$\underline{\dot{m}_{pipe,s} = \dot{V}_{pipe,s} \cdot \rho_s(t_b) \text{ [kg / s]}} \quad (30)$$

$$\underline{\dot{m}_{pipe,s} = \dot{m}_{in,s} \text{ [kg / s]}} \quad (31)$$

- kde:

$\dot{V}_{pipe,s} \text{ [m}^3 \text{ / s]}$ je objemový tok procházející výměníkem

$\rho_s(t_{b,s}) \text{ [kg / m}^3\text{]}$ je hustota solanky při teplotě $t_{b,s}$

$$\overline{\overline{h}}_s = \frac{\overline{h}_{a,s} \cdot h_{s,s}}{\overline{h}_{a,s} + h_{s,s}} [W / m \cdot K] \quad (32)$$

- kde: $\overline{h}_{a,s} [W / m \cdot K]$

je střední hodnota (podél trubky) součinitele přestupu tepla z trubky do vzduchu

$h_{s,s} [W / m \cdot K]$

je fiktivní součinitel přestupu tepla se zemínou přes stěnu trubky

$$\overline{Nu}_{D,s} = \frac{\overline{h}_{a,s} \cdot D_{pipe,s}}{\lambda_s(t_{b,s})} [-] \Rightarrow \overline{h}_{a,s} \quad (33)$$

$$\overline{h}_{a,s} = \frac{\overline{Nu}_{D,s} \cdot \lambda_s(t_{b,s})}{D_{pipe,s}} [W / m \cdot K] \quad (34)$$

- kde: $\overline{Nu}_{D,s} [1]$

je střední hodnota Nussletova čísla

$\lambda_s(t_{b,s}) [W / m \cdot K]$

je tepelná vodivost solanky při teplotě $t_{b,s}$

$$h_{s,s} = \frac{\lambda_{s,s}}{R_{pipe,s} \cdot \ln \left(1 + \frac{\delta_{pipe,s}}{R_{pipe,s}} \right)} [W / m \cdot K] \quad (35)$$

- kde: $\lambda_{s,s} [W / m \cdot K]$

je součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí (Fast kolektor)

$R_{pipe,s} [m]$

je poloměr potrubí ZVT

$$\overline{Nu}_D = 0,023 \cdot \overline{Re}_D^{0,8} \cdot \overline{Pr}^{0,33} [-] \quad (36)$$

- kde: $\overline{Re}_D [-]$

je střední hodnota Reynoldsova čísla

$\overline{Pr} [-]$

je Prandtlovo číslo

- vztah platí pro $\overline{Re}_D \geq 10000$ ($330 \text{ m}^3/\text{h} \approx \text{Re}=45\,800$, $420 \text{ m}^3/\text{h} \approx \text{Re}=58\,300$); fyzikální vlastnosti určovány při $t_{b,s}$

$$\overline{Re}_D = \frac{\overline{w}_s \cdot D_{pipe,s}}{\nu_s(t_{b,s})} [-] \quad (37)$$

- kde: $\nu_{air}(t_b) [m^2 / s]$

je dynamická viskozita solanky při teplotě $t_{b,s}$

$\overline{w}_s [m / s]$

je střední rychlost proudící solanky v potrubí

$$\overline{w} = \frac{V_{pipe}^*}{A_{pipe}} \quad [m/s] \quad (38)$$

- kde: $A_{pipe,s}$ $[m^2]$ je plocha průřezu trubky (průtočný průřez)

$$A_{pipe,s} = \frac{\pi \cdot D_{pipe,s}^2}{4} \quad [m^2] \quad (39)$$

6. Určení tepelného výkonu solankového ZVT

Tepelný výkon solankového zemního výměníku (40) určíme z výsledné teploty na výstupu z potrubí. (uvažujeme zemní výměník, přestup tepla zemina-solanka)

$$Q_{1,ZVT,s}^* = m_{pipe,s}^* \cdot c_{p,s} \cdot (t_{b,s} - t_{b,OUT,s}) \quad [W] \quad (40)$$

7. Solankový výměník

Výstupní teplota solanky ze zemního výměníku je vstupem do solankového výměníku tepla. Druhým vstupem je venkovní teplota vzduchu t_e . Výstupy jsou teplota solanky za výměníkem (a před vstupem zpět do potrubí) $t_{b,IN,s}$ a teplota předehřátého (předchlazeného) vzduchu $t_{e,s}$. Použijeme modul „*Heat Exchangers, Counter Flow*“ – type 5b. Nastavení v modulu provedeme dle parametrů udávaných výrobcem (obr. 12.9).

8. Předehřev

U varianty 1 je potřeba, aby se přiváděný vzduch chladnější než 0°C , předehřál na 0°C , z důvodu protimrazové ochrany vestavěného rekuperačního deskového výměníku. Potřebný výkon dohřevu určíme z rovnice (41).

$$Q_{předeh,0^\circ\text{C}}^* = m_{in}^* \cdot c_{p,air} \cdot (t_b - t_{0^\circ\text{C}}) \quad [W] \quad (41)$$

9. Rekuperace tepla

Jako prvek pro zpětné získávání tepla použijeme modul „*Heat Exchangers, Constant Effectiveness*“ – type 91. Účinnost nastavíme na hodnotu 78 % [14], výstupní teplota z rekuperačního výměníku je celoročně nastavena na 22°C a relativní vlhkost na 50 %. V případě, že teplota přívodního vzduchu stoupne nad 22°C , rekuperace se vypne, a vzduch proudí obtokem.

10. Dohřev

Pokud výstupní teplota z rekuperačního výměníku nedosáhne nastavené teploty (22°C), je nutné dohřát vzduch. Výkon dohřevu (42) určíme podobně jako u předehřevu.

$$Q_{doh,22^\circ\text{C}}^* = m_{in}^* \cdot c_{p,air} \cdot (t_b - t_{IN}^C - t_{ZZT,out}^C) \quad [W] \quad (42)$$

6.3 Ekonomika ZVT

Celkové náklady na pořízení a provoz ZVT můžeme rozdělit do třech základních kategorií:

- *Investiční náklady* N_{INV} [Kč] tvoří suma nákladů za výkopové práce, materiál rozvodů, topenářské zapojení, chladicí kapalinu, montáž topenařiny, vícenáklady na VZT materiál a napuštění a zprovoznění systému (viz tab. 6.5). Pro variantu vzduchového ZVT jsou náklady na pořízení uvedeny v tab. 6.4.
- *Provozní náklady* N_{PR} [Kč/rok] tvoří veškeré náklady spojené s provozem ZVT. Sem patří výměna filtrů v nasávací šachtě (2x do roka), elektrická energie spotřebovaná ventilátorem (popř. čerpadlem v případě ZVT-s) nebo náklady spojené s výměnou nemrznoucí kapaliny (jedenkrát za 6-8 let).
- *Dodatečné náklady* N_{DOD} [Kč/rok] zde uvažujeme náklady potřebné na ohřev vody pro výměník ve VZT jednotce, kterou si bere z IZT. Můžeme je určit z rovnic (43), (44) a (45) pro různé varianty předehřevu přiváděného větracího vzduchu.

Roční ekonomickou úsporu ΔN_T [Kč/rok] při použití zemních výměníků zjistíme tak, že odečteme roční náklady na dohřev vzduchu bez použití zemního výměníku tepla (nasávání větracího vzduchu jen přes fasádní žaluzii) a roční náklady na dohřev vzduchu při použití ZVT (viz rovnice (46) a (47)).

$$N_{T, var1} = Q_{dod, var1} \cdot K_{EL} \quad [Kč / rok] \quad (43)$$

$$N_{T, var2} = Q_{dod, var2} \cdot K_{EL} \quad [Kč / rok] \quad (44)$$

$$N_{T, var3} = Q_{dod, var3} \cdot K_{EL} \quad [Kč / rok] \quad (45)$$

- kde: $Q_{dod, var1}$ [MWh/rok]

je množství dodané energie pro variantu 1 – bez použití ZVT

$Q_{dod, var2}$ [MWh/rok]

je množství dodané energie pro variantu 2 – vzduchový ZVT

$Q_{dod, var3}$ [MWh/rok]

je množství dodané energie pro variantu 3 – solankový ZVT

K_{EL} [Kč/MWh]

je cena elektrické energie

$$\Delta N_{T1} = N_{T, var2} - N_{T, var1} \quad [Kč / rok] \quad (46)$$

$$\Delta N_{T2} = N_{T, var3} - N_{T, var1} \quad [Kč / rok] \quad (47)$$

Dobu návratnosti lze určit z rovnice (48), což je podíl investičních nákladů a roční ekonomické úspory. Nutno podotknout, že uvažujeme variantu s neměnnou cenou elektrické energie. Porovnáním doby návratnosti obou variant zjistíme časově výhodnější variantu.

$$\tau = \frac{N_{INV}}{\Delta N_T} \text{ [rok]} \quad (48)$$

Tab. 6.6 Cena elektrické energie, platná od 1.1.2009

(podle [42]).

Cena elektrické energie	
Distribuční sazba	D35d – nízký tarif
Produkt	D Akumulace 16 Comfort
Platby za:	Kč/MWh
dopravu	2145,86
silovou elektřinu	1879,37
daň z elektřiny	28,30
Cena celkem	bez DPH 4053,53
	s DPH (20 %) 4864,24

Tab. 6.4 Investiční náklady vzduchového ZVT (podle [17] a [38]).

	počet	Kč/ks	Kč
Materiál rozvodů			
KG - PP Ø200 mm:			
Potrubí 5m	6	2.199	13.194
Koleno 45°	2	406	812
Revizní šachta s příslušenstvím	1	14.080	14.080
Potrubí 2m	1	929	929
Revizní kus	1	1.080	1.080
Přesuvka	1	448	448
Výkopové práce:			
Výkop	6	500	3.000
Zahrnutí+zhutnění	4	500	2.000
Mezisoučet Bez DPH (20%)			3.5543
DPH			7.108,6
Cena s DPH			42.652
Montáž + vícenáklady:			
VZT materiál	1	1.293	1.293
Montáž	1	4000	4.000
Mezisoučet Bez DPH (10%)			5.293
DPH			529,3
Cena s DPH			5.822,3
Cena bez DPH			47.945
DPH			7.637,9
CELKOVÁ CENA			55.583

Tab. 6.5 Investiční náklady solankového VZT (podle [17] a [38]).

	počet	Kč/ks	Kč
Materiál rozvodů:			
Fast kolektor d32x2,9	130	43	5.590
Topenářské zapojení:			
Výměník solanka/vzduch	1	13.220	13.220
Topenářská sada	1	13.250	13.250
Přechodky plast/Cu 22x1	1	100	100
Průchodky	1	3.000	3.000
Potrubí Cu22x1	10	120	1.200
Izolace Climaflex CL 25mm	10	36	360
Řídící modul	1	1.080	1.080
Chladicí kapalina Gero Frost 1l	60	41,66	2.499,6
Výkopové práce:			
Výkop	6	500	3.000
Zahrnutí + zhutnění	4	500	2.000
Mezisoučet		Bez DPH (20%)	45.300
		DPH	9.059,9
		Cena s DPH	54.360
Montáž + vícenáklady:			
Montáž topenařiny	1	4.000	4.000
VZT materiál	1	6.732	6.732
Napuštění a zprovoznění systému	1	1.500	1.500
Mezisoučet		Bez DPH (10%)	12.232
		DPH	1.223,2
		Cena s DPH	13.455
		Cena bez DPH	57.532
		DPH	10.283
		CELKOVÁ CENA	67.815

7 VÝSLEDKY SIMULACE, ŘEŠENÍ

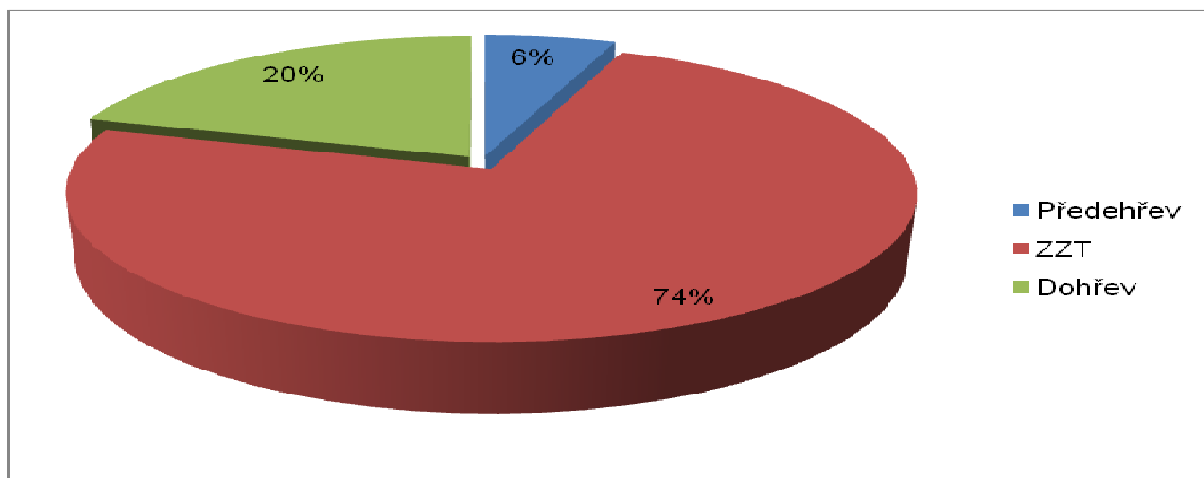
Pro určení výše ekonomického a energetického přínosu potřebujeme vědět, kolik energie ročně spotřebuje simulovaný dům bez využití zemního výměníku tepla, a výsledky potom porovnat s případy, kde ZVT využíváme. Byly proto nasimulovány 3 varianty provozu.

7.1 Varianta 1 - bez ZVT

Uvažujeme nasávání čerstvého venkovního vzduchu do rekuperačního výměníku s předehřevem na protimrazovou ochranu, což je 0 °C. Po výstupu z rekuperačního výměníku se vzduch ještě dohřívá na požadovanou teplotu (22 °C). Předehřátím na 0 °C sice klesá účinnost rekuperace, ale technické řešení nainstalované vzduchotechnické jednotky Duplex RK 1800/420–11 (vestavěný deskový výměník) jinou možnost neumožňuje. V případě jiného výměníku např. rotačního, by bylo možno nasávat rovnou venkovní vzduch bez předehřevu.

Tab. 7.1 Varianta 1 – ohřev větracího vzduchu, rozdělení po měsících.

Měsíc	Předehřev (na 0 °C) kWh	ZZT kWh	Dohřev (na 22 °C) kWh	Celkem Kwh	Dodaná energie kWh
1	174,3	680,98	174,81	1.030,1	349,11
2	110,62	592,37	160,31	863,3	270,93
3	11,42	589,08	150,69	751,19	162,11
4	0,75	428,37	125,17	554,29	125,92
5	0	282,69	77,09	359,78	77,09
6	0	187,51	52,31	239,82	52,31
7	0	150,01	42,44	192,45	42,44
8	0	166,9	46,3	213,2	46,3
9	0	266	72,52	338,52	72,52
10	0	418,67	114,79	533,46	114,79
11	9,44	555,95	166,15	731,54	175,59
12	91,61	657,67	198,88	948,16	290,49
Suma	398,14	4.976,2	1.381,46	6.755,8	1.779,6



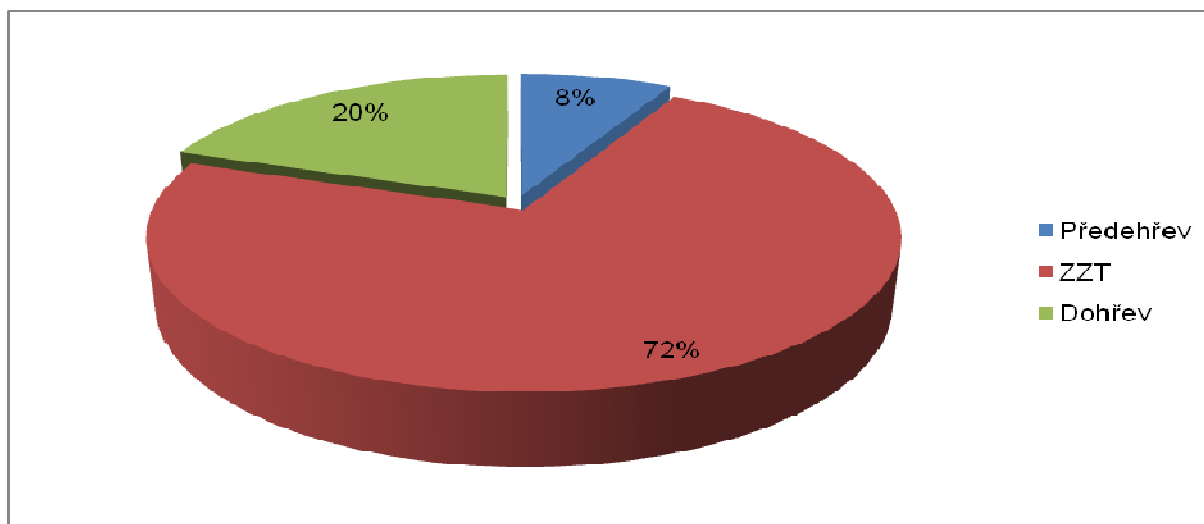
Obr. 7.1 Varianta 1 – procentní zastoupení ohřevu větracího vzduchu.

7.2 Varianta 2 - vzduchový ZVT

U této varianty nám předeřev a protimrazovou ochranu zajiřtuje vzduchový zemní výměník tepla. Pokud je venkovní teplota v rozmezí 0–22 °C, ZVT se nevyužívá, a vzduch je nasáván z fasádní řaluzie rovnou do rekuperačního výměníku. Po výstupu z rekuperačního výměníku je vzduch podle potřeby dohříván na požadovanou teplotu.

Tab. 7.2 Varianta 1 – ohřev větracího vzduchu, rozdělení po měsících.

Měsíc	Předeřev (na 0 °C) kWh	ZZT kWh	Dohřev (na 22 °C) kWh	Celkem kWh	Dodaná energie kWh	Chlazení kWh
1	208,29	647,13	174,67	1.030,09	174,67	0
2	118,7	584,04	160,56	863,3	160,56	0
3	20,71	589,08	141,4	751,19	141,4	0
4	3,5	432,21	118,58	554,29	118,58	0
5	0	282,72	77,06	359,78	77,06	4,37
6	0	187,93	51,89	239,82	51,89	32,05
7	0	150,01	42,44	192,45	42,44	48,56
8	0	166,9	46,3	213,2	46,3	26,01
9	0	266	72,52	338,52	72,52	1,32
10	0	419,95	113,51	533,46	113,51	0
11	41,95	541,89	147,7	731,54	147,7	0
12	137,26	627,34	183,56	948,16	183,56	0
Suma	530,41	4.895,2	1.330,19	6.755,8	1.330,19	112,31



Obr. 7.2 Varianta 2 – procentní zastoupení ohřevu větracího vzduchu.

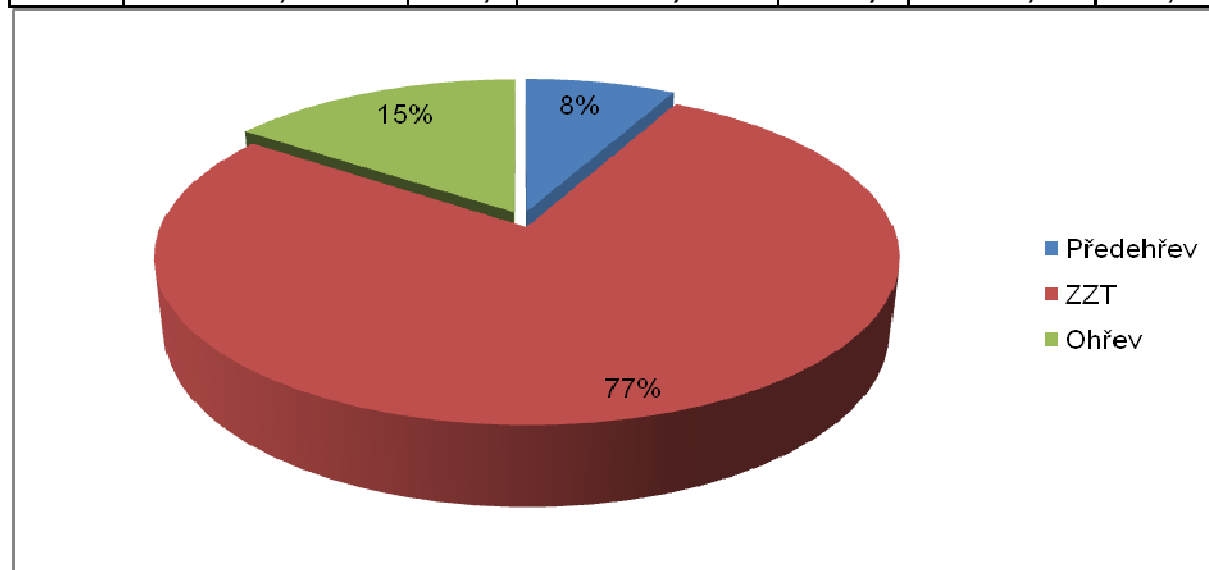
7.3 Varianta 3 - solankový ZVT

V tomto případě je nastavení velmi podobné jako u varianty 2. Akorát protimrazovou ochranu a předeřev venkovního vzduchu zajiřtuje solankový výměník. Také

nevyužíváme tento ZVT při venkovních teplotách 0–22 °C. Výhodou variant 2 a 3 je možnost chlazení větracího vzduchu při vyšších letních teplotách.

Tab. 7.3 Varianta 3 – ohřev větracího vzduchu, rozdělení po měsících.

Měsíc	Předehřev (na 0 °C) kWh	ZZT kWh	Dohřev (na 22 °C) kWh	Celkem kWh	Dodaná energie	Chlazení
1	212,05	665,5	152,54	1030,09	152,54	0
2	125,13	571,6	166,57	863,3	166,57	0
3	25,36	617,5	108,33	751,19	108,33	0
4	5,6	445,69	103	554,29	103	0
5	0	282,72	77,06	359,78	77,06	5,38
6	0	195,26	44,56	239,82	44,56	38,56
7	0	150,51	41,94	192,45	41,94	62,15
8	0	166,9	46,3	213,2	46,3	32,8
9	0	269,59	68,93	338,52	68,93	6,49
10	19,15	426,34	87,97	533,46	87,97	0
11	44,22	557,47	129,85	731,54	129,85	0
12	154,89	643,82	149,45	948,16	149,45	0
Suma	586,4	4992,9	1.176,5	6.755,8	1.176,5	145,38



Obr. 7.3 Varianta 3 – procentní zastoupení ohřevu větracího vzduchu.

7.4 Porovnání energetického a ekonomického přínosu

Na ohřev větracího vzduchu bez použití ZVT spotřebujeme za rok 1,7796 MWh energie a bude nás to stát 8.657 Kč/rok. Oproti tomu při využití vzduchového ZVT k předehřevu vzduchu spotřebujeme 1,31494 MWh (zaplatíme 6.396 Kč/rok) což znamená finanční úsporu 2.260 Kč/rok. Ještě větší úspory přináší použití solankového ZVT. Za rok provozu dodáme 1,1765 MWh, za které zaplatíme zhruba 5.723 Kč. Finanční rozdíl dělá 2.933,62 Kč/rok. Na chlazení je ZVT schopen ročně dodat 112,31 kWh, resp. 145,38 kWh (tab. 7.4)

Tab. 7.4 Porovnání energetické náročnosti jednotlivých složek ohřevu vzduchu.

	Předeřev kWh/rok	ZZT kWh/rok	Dohřev kWh/rok	Dodaná energie kWh/rok	Chlazení kWh/rok
varianta 1	398,14	4976,2	1381,46	1779,6	0
varianta 2	545,66	4895,2	1314,94	1314,94	112,31
varianta 3	586,4	4992,9	1176,5	1176,5	145,38

Tab. 7.5 Porovnání cen za energii a rok, a finanční úspora při využití ZVT.

ZVT	Dodaná energie MWh/rok	Cena za energii Kč/rok	Finanční úspora Kč/rok
Ne	1,7796	8656,40	0
Vzduchový	1,31494	6396,18	2260,22
Solankový	1,1765	5722,78	2933,62

7.5 Návratnost investic

Ekonomickou výhodnost neboli dobu návratnosti určíme z rovnice (48). Investiční náklady jsou uvedeny v tab. 6.4 a 6.5, a jedná se o celkové částky 55.583 Kč resp. 67.815 Kč. Ekonomické roční úspory s využitím ZVT vycházející z rovnic (46) a (47) jsou uvedeny v tab. 7.5. Ve variantě 2 jde o úsporu 2.260 Kč ročně, u varianty 3 2.933 Kč ročně. Z uvedených hodnot vyplývá doba návratnosti zhruba 25 let, resp. 24 let.

Je nutno podotknout, že se jedná o prostou dobu návratnosti, kde uvažujeme stálou a neměnnou cenu elektrické energie. Pokud budeme uvažovat o pravidelném každoročním zvyšování cen o 10 % ročně, dochází ke snížení doby návratnosti na cca 13 let u obou variant zemních výměníků tepla. Navíc nezapočítáváme úsporu vzniklou letním chlazením, tím pádem by byla doba návratnosti ještě kratší.

Doba návratnosti pro vzduchový ZVT:

$$\tau = \frac{55.583 \text{ [Kč]}}{2.260,22 \text{ [Kč / rok]}} = \mathbf{24,59 \text{ [let]}} \quad (49)$$

Doba návratnosti pro solankový ZVT:

$$\tau = \frac{67.815 \text{ [Kč]}}{2.933,62 \text{ [Kč / rok]}} = \mathbf{23,12 \text{ [let]}} \quad (50)$$

Tab. 7.6 Ekonomický přínos zemních výměníků při růstu cen energií o 10 % ročně.

Rok	Cena el. en. Kč/MWh	Úspora (zvt-v) Kč/rok	Suma úspor Kč	Úspora (zvt-s) Kč/rok	Suma úspor Kč
2010	4864,2	2260,2	2260,2	2933,6	2933,6
2011	5350,7	2486,2	4746,5	3227,0	6160,6
2012	5885,7	2734,9	7481,3	3549,7	9710,3
2013	6474,3	3008,4	10489,7	3904,6	13614,9
2014	7121,7	3309,2	13798,9	4295,1	17910,0
2015	7833,9	3640,1	17439,0	4724,6	22634,7
2016	8617,3	4004,1	21443,1	5197,1	27831,8
2017	9479,0	4404,5	25847,6	5716,8	33548,6
2018	10426,9	4845,0	30692,6	6288,5	39837,0
2019	11469,6	5329,5	36022,1	6917,3	46754,3
2020	12616,6	5862,4	41884,5	7609,1	54363,4
2021	13878,2	6448,7	48333,2	8370,0	62733,4
2022	15266,1	7093,5	55426,7	9207,0	71940,3
2023	16792,7	7802,9	63229,6	10127,7	82068,0
2024	18471,9	8583,2	71812,8	11140,4	93208,4

7.6 Doporučení pro realizaci a provoz

Při stavbě nízkoenergetického domu je důležité počítat s výkopy pro ZVT kvůli možným pozdějším vyšším nákladům (např. doprava strojů na místo) a také zvolit vhodnou variantu ZVT – *vzduchový přímý, vzduchový cirkulační nebo solankový*. V případě cirkulační varianty se výkop zmenší o polovinu. Šetřit se dá i na zvoleném materiálu potrubí - cena potrubí KG PVC 200 je zhruba 250 Kč/metr, oproti tomu materiál skutečně použitý KG PP 200 cca 584 Kč/metr. Ovšem nižší cena znamená horší tepelné vlastnosti potrubí (součinitel tepelné vodivosti 0,11 oproti 0,2 W/m·K). Potrubí pro solankový ZVT má hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,16 W/m·K a cenu za metr cca 43 Kč, ale potřebujeme 130 metrů.

Při realizaci vzduchového ZVT je potřeba dbát na kvalitu provedení. Jakákoli nedbalost může způsobit pronikání nečistot do zemního výměníku (zemina, radon, spodní voda) a tím způsobit zhoršení kvality nasávaného vzduchu.

Je otázkou, jak se budou chovat spoje trubek po 5, 10, popř. 15 letech provozu. Navíc při dlouhotrvajících deštích hrozí sesuvy půdy, a tím i porušení spojů.

Ze zdravotního hlediska se jako bezpečnější jeví solanková varianta ZVT. I když podle studie prováděné Švýcarským VUT v Curychu (4 rodinné domy, 2 bytové domy a 6 větších budov) se na žádná rizika u vzduchových variant ZVT nepřišlo [14]. Koncentrace mikrobiologických organismů byla nižší ve venkovním vzduchu než v přiváděném.

Pro účinnější využití ZVT by bylo vhodné vyzkoušet jiný interval teplot pro nasávání přes fasádní žaluzii (např. 0 °C až 25 °C nebo 2 °C až 20 °C). P ředehřev přiváděného vzduchu provádět na maximálně 0 °C.

8 ZÁVĚR

Cílem této práce je porovnání dvou variant zemního výměníku tepla u rodinného nízkoenergetického domu, jejich vliv na využití zpětného získávání tepla a výsledný ekonomický přínos obou výměníků. Práce porovnává investiční náklady, úspory energie a dobu návratnosti. Výsledky byly získány ze simulačního programu TRNSYS 16.1. Kvůli porovnání byly nasimulovány 3 varianty provozu: *varianta 1* – nucené větrání s předehřevem větracího vzduchu na 0 °C, *varianta 2* – nucené větrání s předehřevem větracího vzduchu ve vzduchovém ZVT, *varianta 3* – nucené větrání s předehřevem větracího vzduchu v solankovém ZVT. Následně byla uvedena jistá doporučení pro realizaci a provoz zemních výměníků.

Využití rekuperace sice klesá se zvyšující se teplotou přiváděného vzduchu, na druhou stranu používání zemních výměníků tepla přináší takové úspory energie (a tím pádem i finanční úsporu), že se realizace ZVT vyplatí i s dobou návratnosti v řádech roků. Pro lepší využití rekuperace je také potřeba předehřívat na nejnižší možnou teplotu (0 °C), která zajistí protimrazovou ochranu deskového rekuperačního výměníku v teplovzdušné jednotce. Navíc velkou výhodou zemních výměníků tepla je možnost letního chlazení venkovního vzduchu, kterou při výpočtu doby návratnosti neuvažujeme.

Je důležité si uvědomit, že model simulace obsahuje mnohá zjednodušení, která jsou zastoupena u všech variant stejně. Jedná se však o porovnání výsledků, proto zjednodušený model k vyhodnocení výsledků postačuje. Pro přesnější výsledky simulace by bylo vhodné model více zdokonalit, popř. podrobit experimentální validaci.

Zemní výměníky tepla využívají tepelné energie zemního masivu, tedy obnovitelný zdroj energie. Při pohledu do zahraničí (Rakousko, Německo, Skandinávie) je jasné, že tlak na zvyšování podílu čerpání energie z obnovitelných zdrojů čeká i nás. Proto stavba pasivních či nízkoenergetických domů s využitím ZVT může být příspěvkem každého z nás, k celosvětovému boji za snižování energetické spotřeby, a tím i čistějšímu životnímu prostředí.

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Jednotka	Název
a	$[1/m^2 \cdot \text{den}]$	teplotní vodivost zeminy
a	$[1/m^2 \cdot s]$	teplotní vodivost zeminy
A_{pipe}	$[m^2]$	plocha průřezu trubky (průtočný průřez), ZVT-v
$A_{\text{pipe},s}$	$[m^2]$	plocha průřezu trubky (průtočný průřez), ZVT-s
C_{gr}	$[J/m^3 \cdot K]$	objemová tepelná kapacita zeminy
$c_{p,\text{air}}(t_b)$	$[J/kg \cdot K]$	měrná tepelná kapacita vzduchu (při střední teplotě)
$c_{p,s}(t_b)$	$[J/kg \cdot K]$	měrná tepelná kapacita solanky (při střední teplotě)
$c_{p,\text{gr}}$	$[J/kg \cdot K]$	měrná tepelná kapacita zeminy
D_N	$[m]$	vnější (normovaný) průměr potrubí ZVT-v
$D_{N,s}$	$[m]$	vnější (normovaný) průměr potrubí ZVT-s
DN_T	$[K\check{C}/\text{rok}]$	roční ekonomická úspora na ohřevu vzduchu díky použití zemního výměníku tepla
δ_{pipe}	$[mm]$	tloušťka stěny potrubí ZVT-v
$\delta_{\text{pipe},s}$	$[mm]$	tloušťka stěny potrubí ZVT-s
D_{pipe}	$[m]$	vnitřní průměr potrubí ZVT-v
$D_{\text{pipe},s}$	$[m]$	vnitřní průměr potrubí ZVT-s
φ	$[1]$	relativní vlhkost vzduchu
μ	$[\%]$	účinnost (tepelná) zpětného získávání tepla
h	$[m]$	hloubka uložení obou ZVT
h	$[W/m^2 \cdot K]$	průměrný (celkový) součinitel přestupu tepla ze zeminy do vzduchu
$h_{s,s}$	$[W/m^2 \cdot K]$	průměrný (celkový) součinitel přestupu tepla ze zeminy do solanky
h_a	$[W/m^2 \cdot K]$	střední hodnota (podél trubky) součinitele přestupu tepla z trubky do vzduchu

$h_{a,s}$	$[W/m^2 \cdot K]$	střední hodnota (podél trubky) součinitele přestupu tepla z trubky do solanky
h_s	$[W/m^2 \cdot K]$	fiktivní součinitel přestupu tepla do zeminy přes stěnu trubky
K_{EL}	$[Kč/MWh]$	cena elektrické energie
l_{23}	$[J/kg]$	výparné teplo vody
$l_{air}(t_b)$	$[W/m \cdot K]$	tepelná vodivost vzduchu při střední teplotě
$l_s(t_b)$	$[W/m \cdot K]$	tepelná vodivost solanky při střední teplotě
l_{gr}	$[W/m \cdot K]$	součinitel tepelné vodivosti zeminy
L_{pipe}	$[m]$	délka potrubí vzduchového ZVT
$L_{pipe,s}$	$[m]$	délka potrubí solankového ZVT
λ_s	$[W/m \cdot K]$	součinitel tepelné vodivosti materiálu potrubí
m^*_{in}	$[kg/s]$	hmotnostní tok přiváděného větracího vzduchu
m^*_{out}	$[kg/s]$	hmotnostní tok odváděného odpadního vzduchu
m^*_{pipe}	$[kg/s]$	hmotnostní tok procházející jednou trubkou ZVT
$n_{air}(t_b)$	$[m^2/s]$	dynamická viskozita vzduchu při střední teplotě
$n_s(t_b)$	$[m^2/s]$	dynamická viskozita solanky při střední teplotě
N_{INV}	$[Kč]$	investiční náklady
N_{PR}	$[Kč]$	provozní náklady
N_{DOD}	$[Kč]$	dodatečné náklady
$N_{T,var-1}$	$[Kč/rok]$	cena za energii potřebnou k ohřátí teplé vody pro výměník v teplovzdušné jednotce pro variantu-1
$N_{T,var-2}$	$[Kč/rok]$	cena za energii potřebnou k ohřátí teplé vody pro výměník v teplovzdušné jednotce pro variantu-2
$N_{T,var-3}$	$[Kč/rok]$	cena za energii potřebnou k ohřátí teplé vody pro výměník v teplovzdušné jednotce pro variantu-3
Nu_D	$[1]$	střední hodnota Nussletova čísla
π	$[1]$	Ludolfovo číslo

p	[Pa]	barometrický tlak vzduchu
$p''_p(t_{b,OUT})$	[Pa]	parciální tlak vodní páry na mezi sytosti při teplotě vzduchu na výstupu ze ZVT
$p''_p(t_i)$	[Pa]	parciální tlak vodní páry na mezi sytosti při vnitřní teplotě vzduchu
P_{pipe}	[m ²]	obvod trubky ZVT-v
$P_{pipe,s}$	[m ²]	obvod trubky ZVT-s
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Q	[1]	bezrozměrná teplota
Q^*_{ZVT}	[W]	tepelný výkon potrubí ZVT
$Q^*_{doh,22^{\circ}C}$	[W]	aktuální tepelný výkon pro dohřev vzduchu na 22 °C
$Q^*_{predeh,0^{\circ}C}$	[W]	aktuální tepelný výkon pro předehřev vzduchu na 0 °C
Q^*_{ZZT}	[W]	aktuální tepelný výkon rekuperace
$Q_{dod,var1}$	[MWh/rok]	množství dodané energie pro variantu 1
$Q_{dod,var2}$	[MWh/rok]	množství dodané energie pro variantu 2
$Q_{dod,var3}$	[MWh/rok]	množství dodané energie pro variantu 3
Q_{MIN}	[1]	bezrozměrná teplota při minimální venkovní teplotě v zimě
$r_{air}(t_b)$	[kg/m ³]	hustota přiváděného větracího vzduchu (při střední teplotě)
$r_{air}(t_i)$	[kg/m ³]	hustota odváděného odpadního vzduchu (při teplotě v místnosti)
Re_D	[1]	střední hodnota Reynoldsova čísla
ρ_{gr}	[kg/m ³]	hustota zeminy
R_{pipe}	[m]	poloměr potrubí ZVT-v
$R_{pipe,s}$	[m]	poloměr potrubí ZVT-s
S_{pipe}	[m ²]	teplosměnná plocha ZVT-v
$S_{pipe,s}$	[m ²]	teplosměnná plocha ZVT-s
T_A	[°C]	amplituda povrchové teplota zeminy

$t_{b,IN}$	[°C]	teplota vzduchu na vstupu do ZVT-v
$t_{b,IN,s}$	[°C]	teplota vzduchu na vstupu do ZVT-s
$t_{b,IN,MIN}$	[°C]	minimální teplota na vstupu do ZVT
$t_{b,OUT}$	[°C]	výstupní teplota vzduchu ze ZVT-v
$t_{b,OUT,s}$	[°C]	výstupní teplota solanky ze ZVT-s
$t_{b,OUT,MIN}$	[°C]	minimální (požadovaná) teplota na výstupu ze ZVT
t_e	[°C]	teplota venkovního vzduchu
t_{e1}	[°C]	teplota p říváděného vzduchu před výměníkem
t_{e2}	[°C]	teplota p říváděného vzduchu za výměníkem
t_{i1}	[°C]	teplota odváděného vzduchu před výměníkem
T_M	[°C]	průměrná povrchová teplota zeminy (průměrná teplota vzduchu)
τ	[rok]	doba návratnosti ZVT
T_{now}	[°C]	aktuální po čítaná teplota zeminy (v aktuálním čase)
t_{now}	[den]	aktuální den (pro který počítáme teplotu zeminy)
t_{shift}	[den]	časové posunutí minimální povrchové teploty zeminy vůči Novému roku
t_w	[°C]	teplota st ěny potrubí v hloubce uložení pod povrchem
V^*_{in}	[m ³ /s]	objemový tok p říváděného větracího vzduchu
V^*_{MAX}	[m ³ /s]	maximální objemový tok p říváděného větracího vzduchu
V^*_{out}	[m ³ /s]	objemový tok odváděného odpadního vzduchu
W	[m/s]	střední rychlost proudícího vzduchu v potrubí
W_s	[m/s]	střední rychlost solanky v potrubí
$x(t_{b,out})$	[kg _p /kg _{s.v.}]	měrná vlhkost vzduchu při teplotě na výstupu ze ZVT
$x(t_{ZZT,out}^H)$	[kg _p /kg _{s.v.}]	měrná vlhkost vzduchu na "teplé" straně rekuperačního výměníku při teplotě na výstupu
$x(t_i)$	[kg _p /kg _{s.v.}]	měrná vlhkost vzduchu při vnitřní teplotě

ZVT	[1]	zemní výměník tepla
ZVT-s	[1]	zemní výměník tepla - solankový
ZVT-v	[1]	zemní výměník tepla - vzduchový

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Formace. [online] [cit. 2010-03-21]. Dostupné z: <http://www.formace.cz/nizkoenergeticke-domy/2/co-je-to-nizkoenergeticky-dum/>>
- [2] Centrum pasivního domu. [online] 2008 [cit. 2010-02-18]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/pasivni-dum/co-je-pasivni-dum.html>>
- [3] ČSN 73 0540-2:2002 *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha 1997.
- [4] TYWONIAK, J. *Nízkoenergetické domy: Principy a příklady*. Praha Grada Publishing, 2005.
- [5] *Pasivní domy – Radost z bydlení*. Centrum pasivního domu 2010.
- [6] KABELE, K. *Kombinované soustavy pro vytápění a větrání nízkoenergetických domů*. [online] 25.8.2008 [cit. 2010-03-26]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vykurovani/kombinovane-soustavy-pro-vytapeni-a-vetrani-nizkoenergetickych-domu-641.html>>
- [7] Centrum pro obnovitelné zdroje energie. *Zisk ze zemního výměníku tepla*. [online] 2008 [cit. 2010-02-18]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/uspory/zisk-ze-zemniho-vymeniku-tepla.shtml>>
- [8] *Pasivní domy – větrání, teplovzdušné vytápění*. Centrum pasivního domu Brno 2007.
- [9] DOLEŽÍLKOVÁ, H. *Kvalita vnějšího a vnitřního vzduchu*. [online] 17.5.2010 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=6486&h=7&pl=47>>
- [10] KOPECKÝ, P. *Návrh dimenzí zemních výměníků tepla*. [online] 2008 [cit. 2010-02-19]. Dostupné z: http://kopeckyp.wz.cz/files/pdf/PK_VV108.pdf>
- [11] RVD – vzduch. Sekce Zemní výměník tepla. [online] 2008 [cit. 2010-04-29]. Dostupné z: <http://www.rvd-vzduch.cz/sluzby-zemni-vymenik-tepla>>
- [12] JINDRÁK, M. *Systémy větrání budov a teplovzdušné vytápění*. [online] 6.8.2009 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/systemy-vetrani-budov-a-teplovzduzne-vytapeni-1384.html>>
- [13] *Vše o úsporách energií*. Jagamedia, Praha 2008.
- [14] Atrea, oddíl: *Větrání a teplovzdušné vytápění rodinných domů a bytů. Projektční podklady*. [online] 1.3.2009 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <http://www.atrea.cz/cz/ke-stazeni-vetrani-a-teplovzduzne-vytapeni-rodinnych-domu-a-bytu>>
- [15] EBERHARDT, P. *Využití zemních výměníků tepla se spojením se zařízením pro bytové větrání a rekuperaci tepla*. [online] 10.10.2005 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2772>

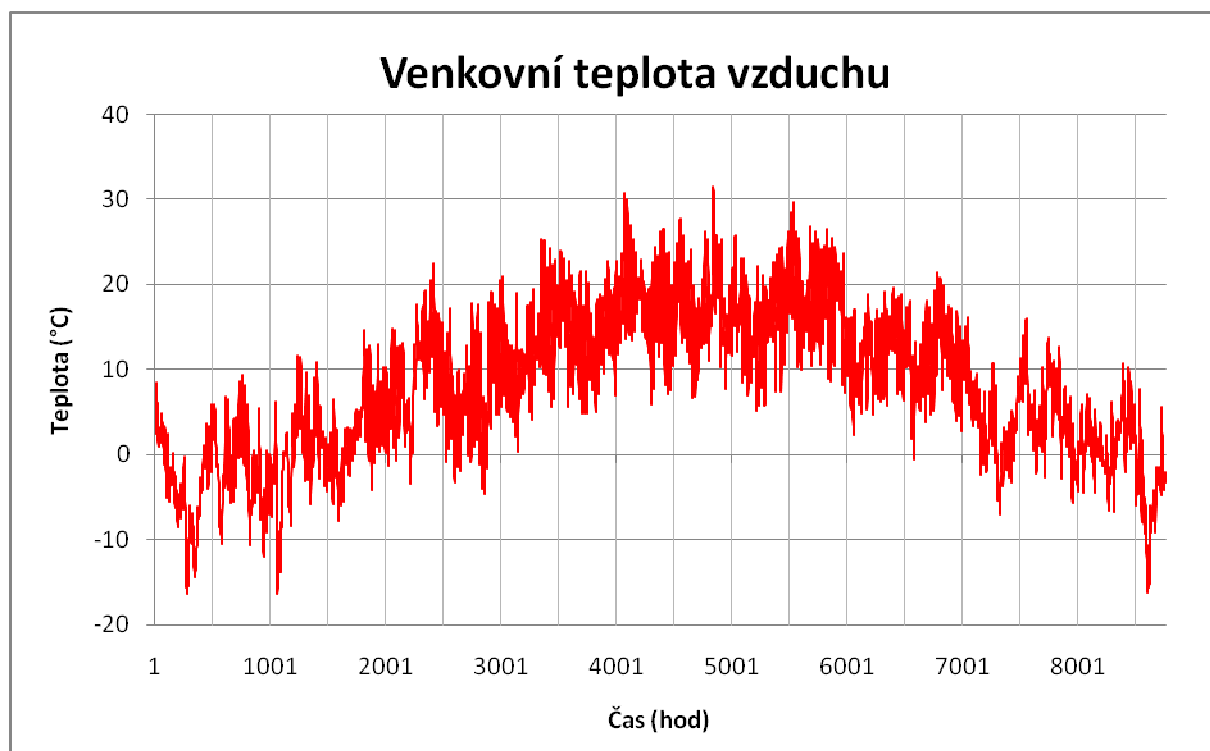
- [16] CHICHMANOV, I. *Systém výměny vzduchu s využitím teploty země pro kontrolovatelné větrání objektů*. [online] 23.11.2005 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <http://www.veronica.cz/dokumenty/prakticke_pasivni_domy_2005.pdf>
- [17] JABOR, J. *Solankový výměník*. [online] 10.5.2010 [cit. 2010-05-20]. Osobní komunikace.
- [18] Atrea. Oddíl: Větrání a teplovzdušné vytápění rodinných domů a bytů: *Projekční podklady*. [online] 2010 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <<http://www.atrea.cz/cz/system-teplovzdušneho-vytapeni-a-vetrani>>
- [19] Atrea. Oddíl: *Rekuperace*. [online] 2010 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <<http://www.rekuperace.cz/>>
- [20] MATUŠKA, T., SCHWARZER, J., ŠOUREK, B. *Teplovzdušné větrání a vytápění - teorie a schémata (I)* [online] 24.4.2006 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <<http://vytapani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3235&h=214&pl=39>>
- [21] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol. *Větrání a klimatizace*. Technický průvodce č. 31. Bolit–B press, Brno 1993.
- [22] KABELE, K. *Teplovzdušné vytápění obytných budov*. [online] 12.4.2010 [cit. 2010-03-26]. Dostupné z: <<http://vytapani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=620&h=214&pl=39>>
- [23] BÁRTA, J. *Základní principy konceptu pasivního domu*. Sborník z konference Pasivní domy 2005, Centrum pasivního domu, Brno 2005.
- [24] BEDRNÍČEK, M. *Typy a vlastnosti větracích systémů v rodinných domech*. [online] 26.3.2010 [cit. 2010-03-26]. Dostupné z: <<http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/typy-a-vlastnosti-vetracich-systemu-v-rodinnych-domech-1641.html>>
- [25] KOLBÁBEK, A. *Energetická simulace vlivu zemního výměníku tepla na provoz rekuperační jednotky teplovzdušného vytápění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Jaroš, Dr.
- [26] MICHAEL, K. *Zemní výměník tepla k předehřívání vzduchu v zimě a předchlazení vzduchu v létě*. Sborník z konference Pasivní domy 2007, Centrum pasivního domu, Brno 2007.
- [27] CHICHMANOV, I. *Zemní kolektor - nový prvek v systémech řízeného větrání budov*. [online] 29.6.2004 [cit. 2010-03-23]. Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2047>>
- [28] Radion. [online] [cit. 2010-05-16]. Dostupné z: <<http://www.radion.cz>>
- [29] *Pasivní domy – neprůvzdušnost, zkoušky kvality*. Centrum pasivního domu, Brno 2007.
- [30] Podklady a plány od majitelů domu

- [31] LAIN, M. *Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (I)*. [online] 6.11.2006 [cit. 2010-04-26]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3648>>
- [32] ŠOUREK, B., KOREČKO, J. *Simulační prostředí TRNSYS*. [online] 30.7.2004 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1956>>
- [33] Ceník firmy OSMA. [online] 1.1.2009 [cit. 2010-05-17]. Dostupné z: <http://www.kanalizacezplastu.cz/filesystem/OSMA_cenik.pdf>
- [34] Český hydrometeorologický ústav – Odbor klimatologie. Dostupné z: <<http://www.chmu.cz/meteo/ok/infklim.html>>
- [35] Manuál k simulačnímu programu TRNSYS.
- [36] Klimatická databáze METEONORM version 6.1.
- [37] Gerotop. [online] [cit. 2010-05-17]. Dostupné z: <<http://www.gerotop.cz/cz/home/>>
- [38] SVÁTEK, M. *Ceny výkopových prací*. [osobní sdělení] Brno 2010.
- [39] KOPECKÝ, P. *Hygro-thermal performance of earth-to-air heat exchangers: numerical model, analytical and experimental validation, measurements in-situ, design*. [online] 26.6.2009 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z: <http://www.kopeckyp.wz.cz/files/pdf/PK_DIZ08.pdf>
- [40] Český statistický úřad. [online] [cit. 2010-05-20]. Dostupné z: <http://vdb.czso.cz/vdbvo/maklist.jsp?kapitola_id=14&expand=1>
- [41] KOCYCH, P. *Ekologická dřevostavba evropského typu*. [online] 29.4.2010 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z: <http://www.kocych.cz/slamenydom/?D%D8EV%CCN%DD_RODINN%DD_D%D9M>
- [42] ČEZ. *Produkty a služby*. [online] 2010 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/cs/pro-zakazniky/elektrina-a-tarify/domacnosti/elektrina-2009/comfort/d-akumulace-16.html>>

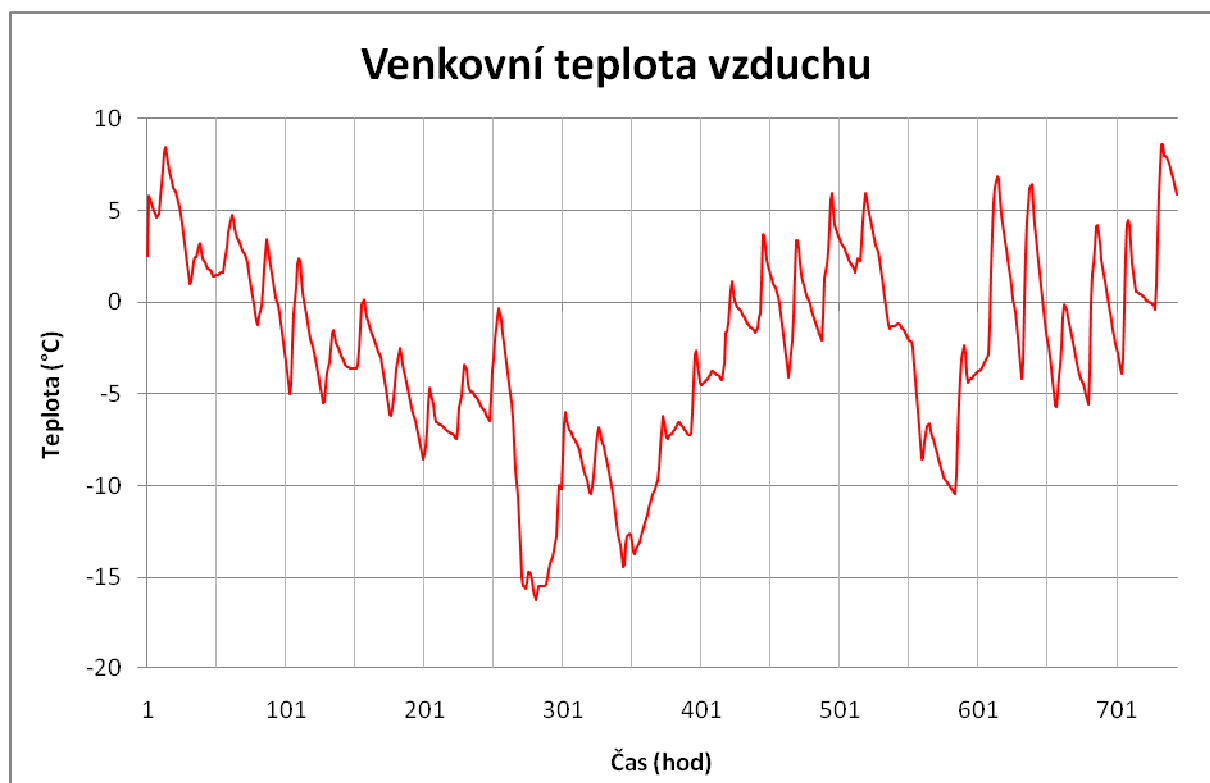
11 SEZNAM PŘÍLOH

- a. Obrázkové a tabulkové přílohy.
- b. CD-ROM s elektronickou verzí diplomové práce a se soubory energetické simulace v software TRNSYS.
- c. Popisný soubor závěrečné práce.

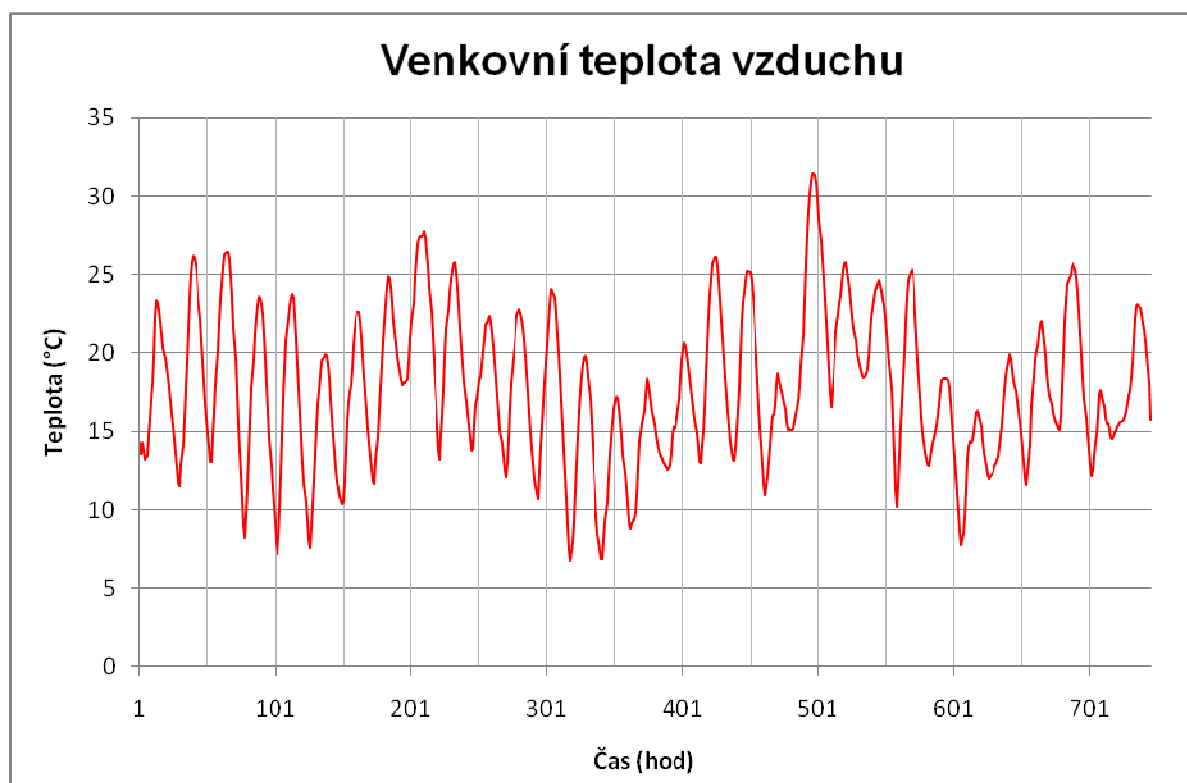
12 PŘÍLOHY



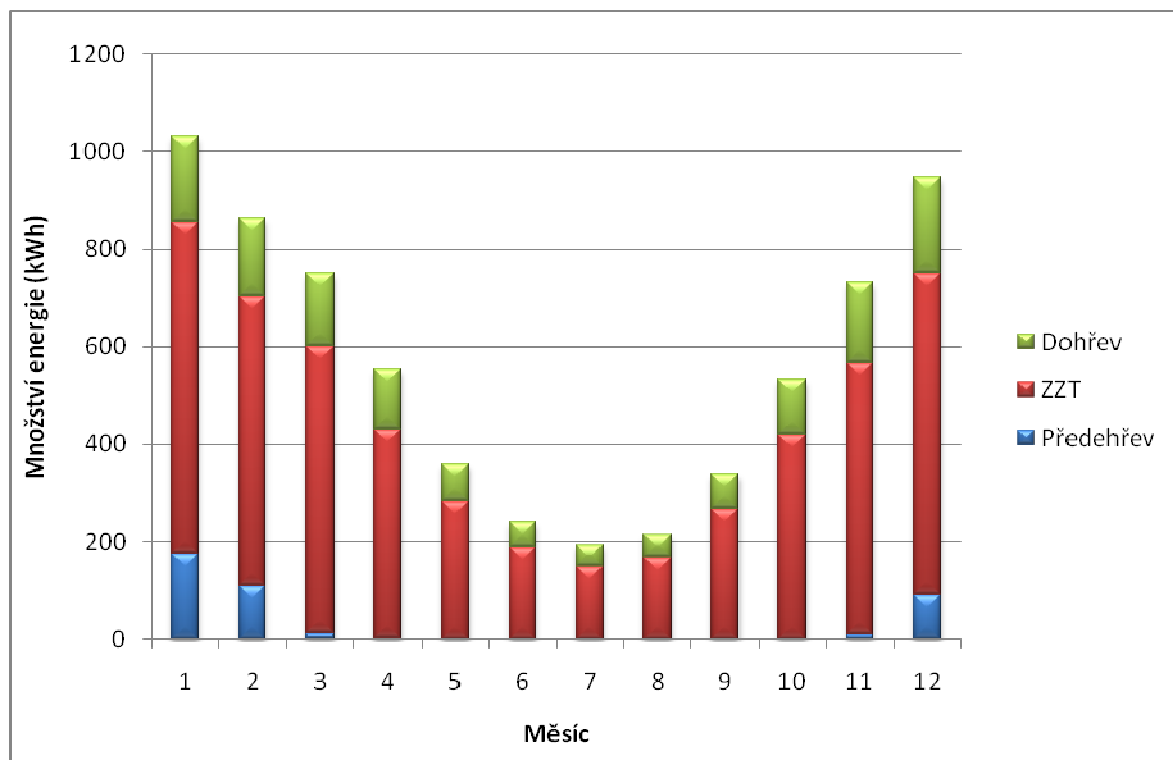
Obr. 12.1 Průběh venkovních teplot v průběhu celého roku, Ostrava-Poruba (převzato z [36]).



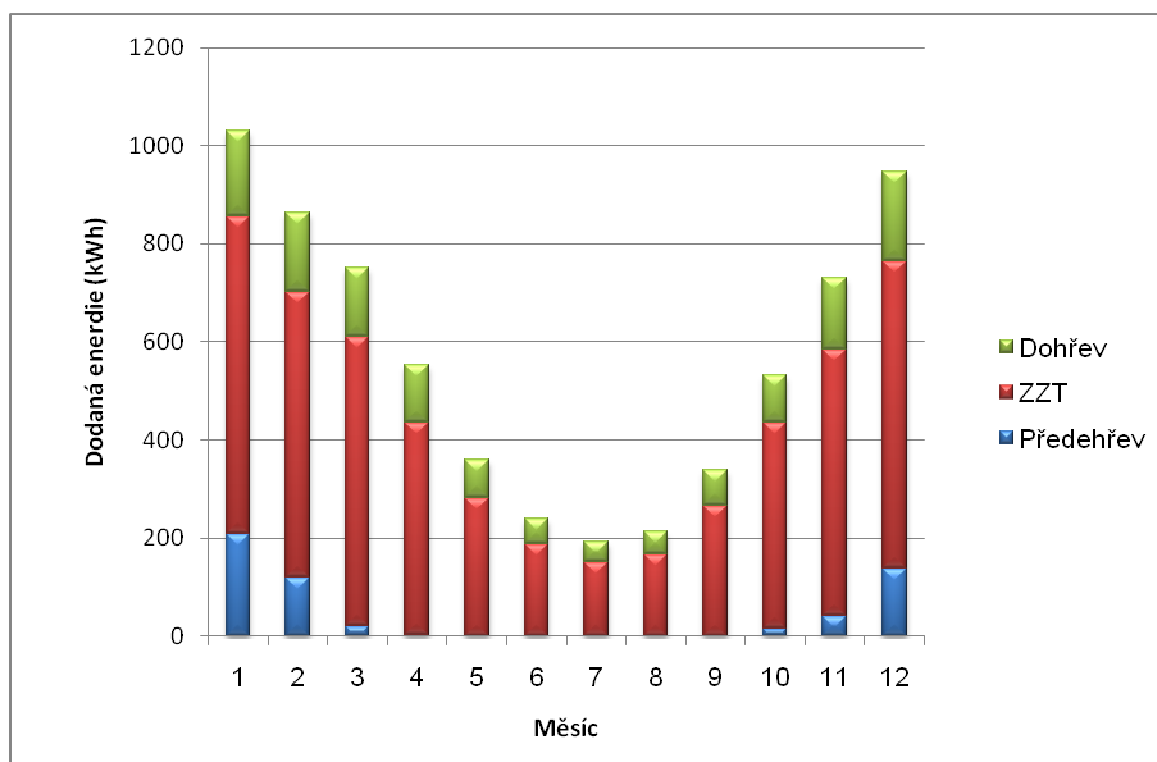
Obr. 12.2 Průběh venkovních teplot vzduchu v měsíci lednu, Ostrava-Poruba (převzato z [36]).



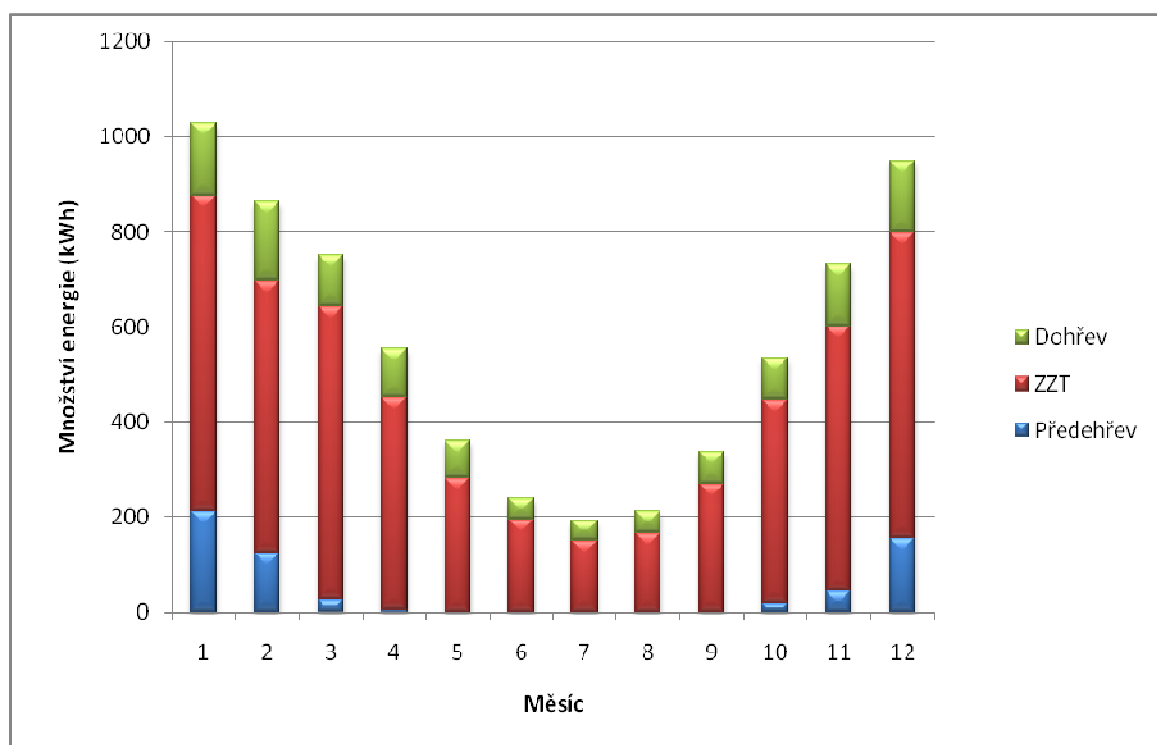
Obr. 12.3 Průběh venkovních teplot vzduchu v měsíci červnu, Ostrava-Poruba (převzato z [36]).



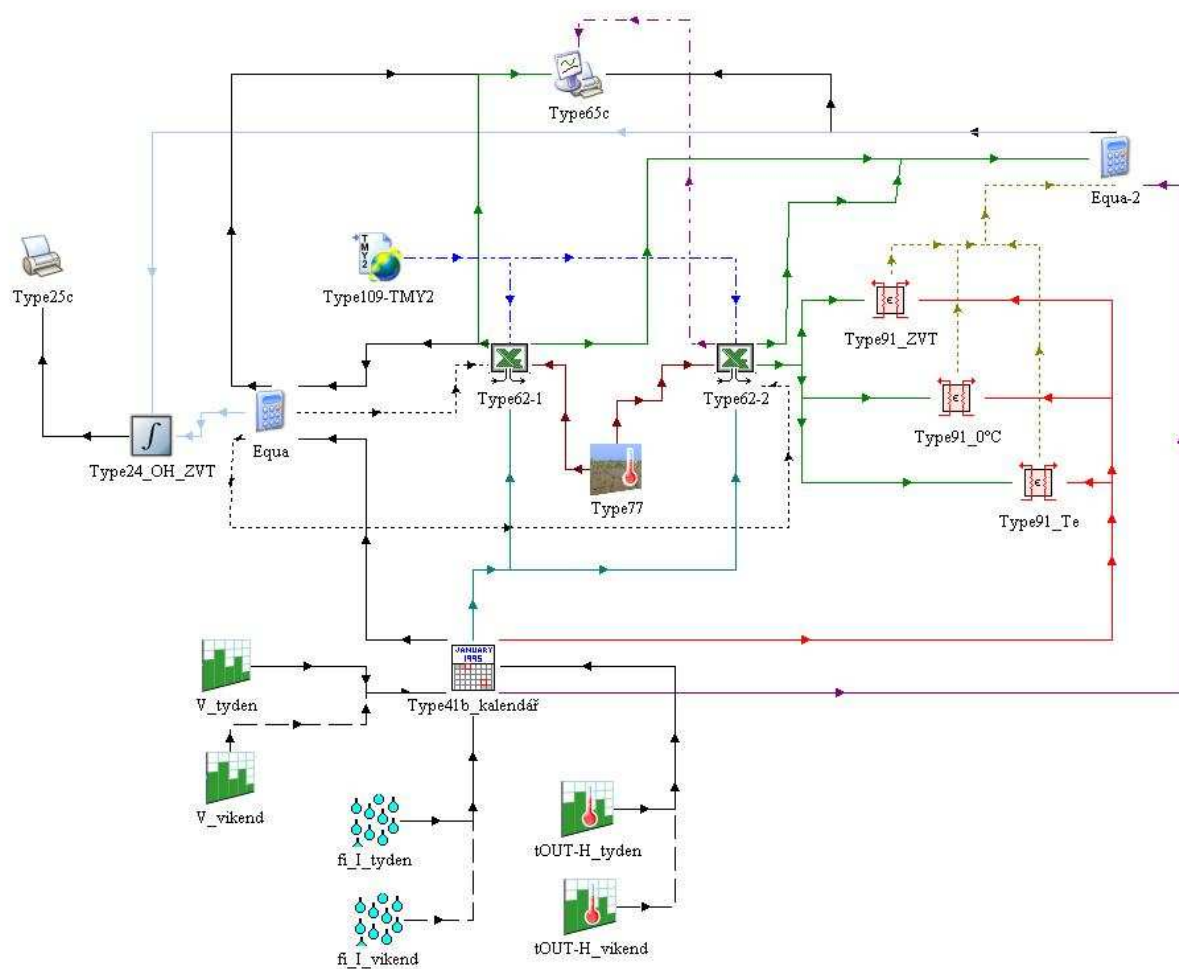
Obr. 12.4 Procentuální rozdělení ohřevu vzduchu pro variantu 1



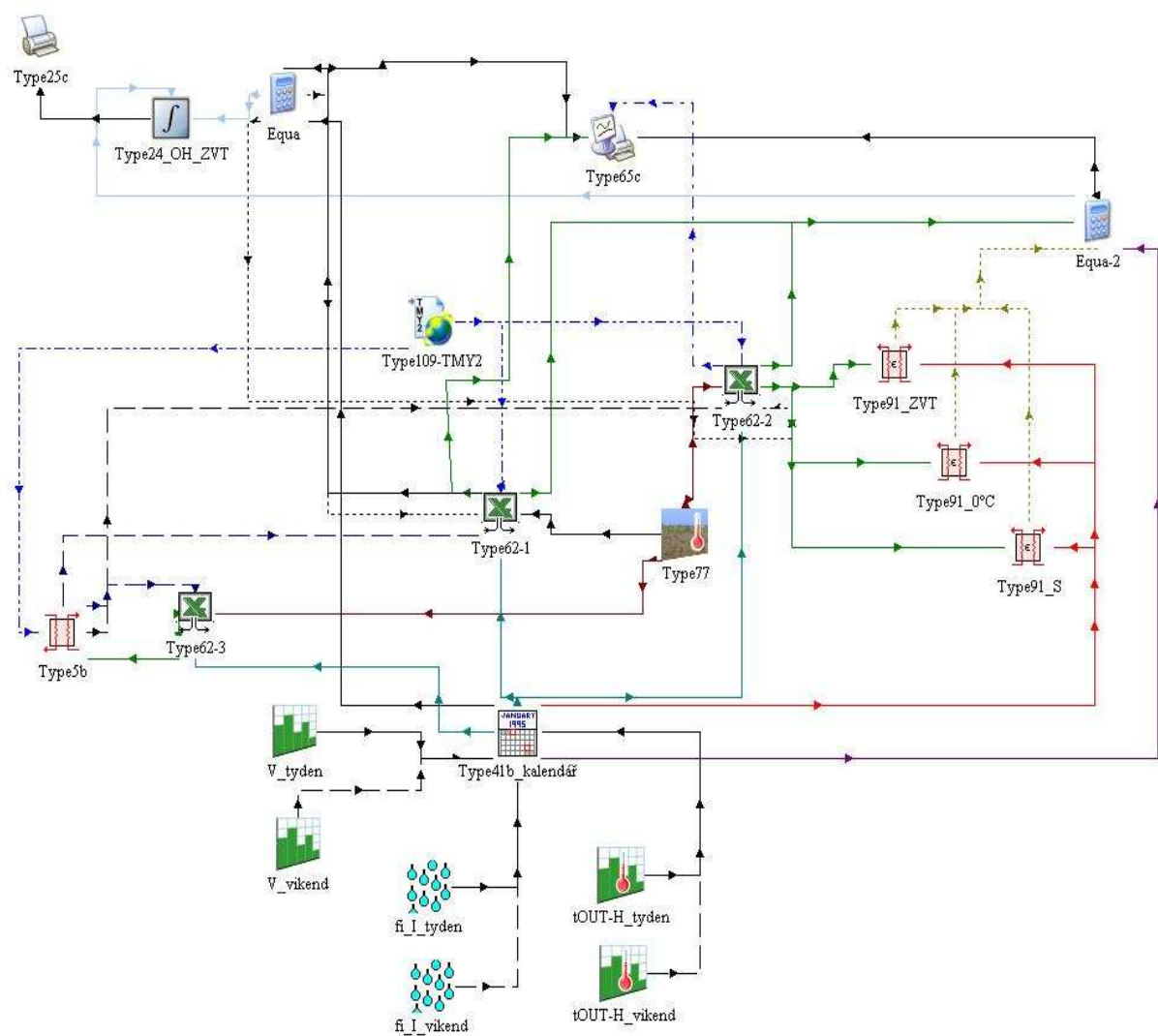
Obr. 12.5 Procentuální rozdělení ohřevu vzduchu pro variantu 2



Obr. 12.6 Procentuální rozdělení ohřevu vzduchu pro variantu 3



Obr. 12.7 Zobrazení modelu v programu TRNSYS pro variantu 1 a 2.



Obr. 12.8 Zobrazení modelu v programu TRNSYS pro variantu 3.

ROEN EST s.r.l.

34077 Ronchi dei Legionari (GO) - Italy

Tel +39 0481 474140 Fax +39 0481 779997 e-mail info@roenest.it



Operator JJ

Client

Attention of

Your Rif. No

Our Rif. No

Solankový výměník pro Duplex RK2, RC - box s filtrem

Date 16:9:2008 7:41

File 11

350 x 500 mm, 4 řady

Cooling Coil: Roen Est Code

6.30.CU.10.AL.14.04.0500.21.W.X.X.004.056.R 1/2" L

Tube Material: CU-.30

Fin Material: AL-.10

Ext. Surface: 13,3 m2

Int. Surface: 0,83 m2

Volume: 2,3 dm3

Weight: 9,6 kg

External Gas:

Air / 101,33 kPa

Flow Rate 0,22 m3/s = 800 m3/h 0,26 kg/s

Velocity 1,27 m/s

Inlet and Outlet Temp. 26 °C -> 19,8 °C

Inlet and Outlet Rel. Humidity 55 % -> 80,2 %

Inlet and Outlet Water Cont. 11,53 g/kg -> 11,53 g/kg

Condensed Water 0 g/s

Sensible Heat Factor 1

Pressure Drop 22 Pa

Internal Fluid:

Prop. Glyc. 40%

Flow Rate 0,18 l/s = 646 l/h 0,19 kg/s

Velocity 0,64 m/s

Inlet and Outlet Temp. 16 °C -> 18,4 °C

Pressure Drop 17 kPa

Capacity:

1,65 kW CounterFlow Calculation

Fluid Name:

Propylen Glycol 40%

Spec. Heat 3696 J/kg K Viscosity 5,16 mPa s

Spec. Weight 1036 kg/m3 Conductivity 0,4 W/m K

Obr. 12.9 Parametry solankového výměníku (převzato z [17]).