



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

ANALÝZA A OPTIMALIZACE TEPELNÉHO CHOVÁNÍ BUDOV

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THERMAL BEHAVIOR OF BUILDINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Iva Nováková

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav technických zařízení budov

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Iva Nováková
Název	Analýza a optimalizace tepelného chování budov
Vedoucí práce	doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

AFRAM, Abdul a Farrokh JANABI-SHARIFI, 2014. Review of modeling methods for HVAC systems. Applied Thermal Engineering. 67(1-2), 507-519. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055>. ISSN 13594311.

Šíkula Ondřej a Hirš Jiří: Sborník 7. národní konference IBPSA-CZ SIMULACE BUDOV A TECHNIKY PROSTŘEDÍ, IBPSA-CZ, 2012

Clarke: Energy simulation in building design, Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston, 1985
Software DesignBuilder

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

A. Analýza tématu, cíle a metody řešení

Analýza zadaného tématu

Cíl práce, zvolené metody řešení

Aktuální technická řešení v praxi

Teoretické řešení (s využitím fyzikální podstaty dějů)

Řešení využívající výpočetní techniku a modelování

B. Aplikace tématu na zadaném případě

Variantský návrh zdrojů tepla a chladu

Hodnocení navržených variant řešení

C. Algoritmizace, modelování, aplikace výpočetní techniky

Teoretické řešení problému, aplikace software pro modelování fyzikálních dějů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výzkumem účinnosti obnovitelných a nízkopotenciálních zdrojů energie budov. Je založena na numerických simulacích sdílení tepla kancelářské budovy a jejích otopných a chladicích systémů v programu DesignBuilder. Jsou porovnány různé zdroje energie a způsoby ovládání vytápění a chlazení. Výsledky jsou hodnoceny z hlediska doby, po kterou nebylo dosaženo požadovaného komfortu v budově, a také z hlediska spotřeby energie a její ceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetický model budovy, počítačová simulace, optimalizace spotřeb energie EnergyPlus, DesignBuilder, energetická efektivnost budov.

ABSTRACT

The diploma thesis with research of efficiency of renewable and low-potential energy sources of buildings. It is available on numerical simulations for sharing office and heating and cooling system buildings in DesignBuilder. There are various energy sources and ways of controlling heating and cooling. The results are evaluated in terms of time, after the expected compromises in the building, in terms of energy consumption and its price.

KEYWORDS

Building energy modeling, computer simulation, energy optimization, EnergyPlus, DesignBuilder, energy performance of buildings.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Iva Nováková *Analýza a optimalizace tepelného chování budov*. Brno, 2019. 83 s., 8 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Analýza a optimalizace tepelného chování budov* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Iva Nováková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza a optimalizace tepelného chování budov* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Iva Nováková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Ondřeji Šikulovi, Ph.D., za jeho ochotu, odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích. Dále děkuji panu Ing. Ladislavu Čižeckému a slečně Bc. Kláře Šardické, za jejich rady a připomínky.

Velké poděkování patří mým rodičům a celé mé rodině, za jejich podporu, na mé, opravdu dlouhé, cestě studiem, které si nesmírně vážím.

OBSAH

1	ANALÝZA TÉMATU, CÍLE A METODY ŘEŠENÍ	11
1.1	Analyza tématu	11
1.2	Cíle diplomové práce a zvolené metody řešení	12
1.3	Aktuální technická řešení v praxi	13
1.3.1	Metody výpočtu energetické náročnosti budov	13
1.4	Šíření tepla	19
1.4.1	Vedení (kondukce) tepla	19
1.4.2	Sálání (radiace)	19
1.4.3	Proudění (konvekce)	20
1.5	Přestup tepla stavebními konstrukcemi	21
1.5.1	Tepelný odpor	21
1.5.2	Odpor konstrukce při prostupu tepla	21
1.5.3	Součinitel prostupu tepla	21
	EnergyPlus	22
1.5.4	Jednosměrný přenos tepla přes vícevrstvé konstrukce	22
1.5.5	Zachování hmotnostního toku vzduchu v zóně	22
2	POPIS ŘEŠENÉ BUDOVY	23
2.1	Dispozice budovy	23
2.2	Technické zařízení budovy	25
2.2.1	System vytápění	25
2.2.2	System chlazení	25
2.2.3	System vzduchotechniky	25
2.2.4	System přípravy TUV	25
2.3	Konstrukce	26
	Popis provozu budovy	28
2.3.1	Garáže	28
2.3.2	Kanceláře	28
2.3.3	Hygienické a komunikační prostory	28
2.3.4	Restaurace	28
2.3.5	Technické zázemí	28
2.4	Simulace v programu DesignBuilder	29
2.5	Model budovy v DesignBuilder	29
2.6	Energetické varinty zdrojů tepla a chladu	33
3	VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	35
3.1	Stávající stav	35
3.1.1	Popis systému vytápění a chlazení	35
3.1.2	Vybrané výkony	36
3.1.3	Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu	38

3.1.4	Spotřeby energií tepla a chladu	39
3.2	Varianta V1	40
3.2.1	Popis systému vytápění a chlazení	40
3.2.2	Příkony zdroje tepla a chladu	42
3.2.3	Spotřeby energií zdroje tepla a chladu	43
3.2.4	Výkony zdroje tepla a chladu	44
3.2.5	Tepelný komfort.....	44
3.3	Varianta V2	45
3.3.1	Popis systému vytápění a chlazení	45
3.3.2	Příkony zdroje tepla a chladu	47
3.3.3	Spotřeby energií zdroje tepla a chladu	48
3.3.4	Výkony zdroje tepla a chladu	49
3.3.5	Tepelný komfort.....	50
3.4	Varianta V3	51
3.4.1	Popis systému vytápění a chlazení	51
3.4.2	Příkony zdroje tepla a chladu	53
3.4.3	Spotřeby energií zdroje tepla a chladu	54
3.4.4	Výkony zdroje tepla a chladu	55
3.4.5	Tepelný komfort.....	56
3.5	Varianty V4 – V8	57
3.5.1	Popis systému vytápění a chlazení	57
3.5.2	Příkony zdroje tepla a chladu	59
3.5.3	Spotřeby energií tepla a chladu	60
3.5.4	Výkony zdroje tepla a chladu	62
3.5.5	Tepelný komfort.....	62
3.6	Varianta V9	65
3.6.1	Popis systému vytápění a chlazení	65
3.6.2	Příkony zdroje tepla a chladu	66
3.6.3	Porovnání spotřeb energií	67
3.6.4	Výkony zdroje tepla a chladu	69
3.6.5	Tepelný komfort.....	70
3.7	Srovnání jednotlivých variant	71
4	ZÁVĚR	75
5	POUŽITÁ LITERATURA.....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK	80
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	81
	SEZNAM PŘÍLOH	83

ÚVOD

Snížení spotřeby energie prostřednictvím optimalizace budovy energetické účinnosti je výzvou zejména po vydání Mezivládního panelu pro změny klimatu (IPCC) založený v roce 1988 k vyhodnocování rizik změny klimatu. [1]

Výzkum v oblasti energetické účinnosti neustále dosahuje pokroku prostřednictvím široké škály otázek. Jednou z nich jsou i energetická úsporná opatření aplikovaná na stávající stavby za účelem zlepšení cenově efektivnějšího provozu energií a ochrany životního prostředí.

Právě tímto snížením se diplomová práce zabývá. Cílem je určit u konkrétní administrativní budovy v Brně, o kolik je ekonomicky výhodnější optimalizace pomocí různých variant zdrojů tepla a chladu ve srovnání se současnými systémy budovy.

První část je věnována aktuálnímu technickému řešení využívající výpočetní techniku a modelování, zejména pak porovnání simulačních řešení pomocí programů energetického modelování budov. Část je věnována i využití fyzikální podstaty dějů. Jsou popsány vztahy součinitele prostupu tepla.

V dalších částech diplomové práce je vypracována analýza budovy, která nás seznamuje s hodnocenou budovou a energetickými variantami zdrojů na spotřebu energie. Všechny varianty spolu se stávajícím stavem budovy a jejich způsob ovládní jsou prováděny pomocí počítačové simulace v programu DesignBuilder 6. Tento program se využívá pro kompletní dynamickou simulaci chování budov. Jedná se o zahraniční software, proto jsou výstupy v této práci uvedeny v anglickém jazyce.

Pro jednotlivé varianty jsou zpracovány provozní náklady z hlediska spotřeb energie a maximální výkony systému vytápění a chlazení. Následně jsou jednotlivé varianty porovnány a je vyhodnocena jejich ekonomická rentabilita vůči stávajícímu systému vytápění a chlazení. Výsledky jsou také hodnoceny z hlediska doby, po kterou není dosaženo požadované komfortní teploty v budově.

1 ANALÝZA TÉMATU, CÍLE A METODY ŘEŠENÍ

1.1 ANALÝZA TÉMATU

Práce se zabývá vlivem vybraného systému vytápění, ventilace a klimatizace na vnitřní klima, energetickou účinností a ekonomickými nároky budovy. Důraz je kladen především na využití vertikálních základových prvků – pilot, dané administrativní budovy, jakož to výměníků tepla s různými teplotními rozdíly na vytápění a chlazení. Modelování se provádí v dynamickém simulačním software DesignBuilder 6, který používá výpočetní jádro EnergyPlus 8.9.

Výsledky simulace DesignBuilder jsou prezentovány v grafické podobě vhodné pro vyhodnocení vztahu mezi úsporami energie v budově a tepelným komfortem. [2]

1.2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE A ZVOLENÉ METODY ŘEŠENÍ

Hlavním cílem diplomové práce je snížení spotřeby energie stávajícího systému na vytápění a chlazení administrativní budovy Vienna Point II v Brně, pomocí optimalizace různých variant zdrojů tepla a chladu. Hodnoceny jsou varianty tepelného čerpadla voda-voda a několik variant tepelných čerpadel země-voda se zdrojem energie instalovaným pomocí „U“ smyčky výměníku tepla do geotermálních vertikálních vrtů nebo pilot, na nichž je budova založena.

Nejzásadnějším krokem je vytvoření počítačového simulačního modelu řešené budovy prostřednictvím programu DesignBuilder. Tento model je následovně validován dle normy a verifikován reálnou spotřebou tepla budovy z let 2017 a 2018. Díky tomu je možno v modelu měnit stávající systém dle navržených variant a zjistit tak celkovou spotřebu energií pro kalkulaci provozních nákladů. Na základě ekonomických aspektů, maximálních výkonů systému a počtu hodin, kdy nebylo dosaženo tepelného komfortu budovy, se řešené systémy mezi sebou porovnávají a je tak možno zhodnotit stávající systém ve vztahu k ostatním variantám.

1.3 AKTUÁLNÍ TECHNICKÁ ŘEŠENÍ V PRAXI

1.3.1 Metody výpočtu energetické náročnosti budov

K určení energetické náročnosti budov se používají různé metody výpočtů, které se odlišují přesností a podrobností výpočtů, použitými okrajovými klimatickými podmínkami a profily užívání. Výpočty mohou být prováděny ručně nebo pomocí výpočetních a simulačních softwarů.

Zjednodušené metody energetické bilance

Výpočet se provádí ručně nebo pomocí jednoduchých softwarů, jejichž algoritmy zohledňují právní předpisy, vyhlášky, normy a standardy. Slouží převážně k vytvoření průkazu energetické náročnosti budovy (energetického štítku), který je od roku 2013 nutnou součástí prodeje nebo kolaudace nemovitostí. K výpočtu se používají standardizované podmínky užívání a okrajové klimatické podmínky. Výsledky jsou vhodné ke srovnávání s referenční budovou, ale nemusí se plně shodovat s reálným provozem objektu a jeho energetickou náročností.

Tyto výpočetní nástroje slouží jako pomůcka pro užívání odbornou veřejností, především však energetickými auditory a osobami oprávněnými zpracovávat průkaz ENB. Na rozdíl od simulačních softwarů jsou méně náročné na čas, jsou uživatelsky přívětivější a nevyžadují hlubokou znalost fyzikálních problémů.

1.3.1.1.1 Ruční výpočty:

- bilanční hodnocení (vyplývá ze zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů a vyhlášky č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov),
- podrobný výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení dle (730336) ČSN EN ISO 52016-1.

1.3.1.1.2 Softvérová řešení:

- tabulkový kalkulátor NKN (Národní kalkulační nástroj) – katedra technických zařízení budov, Fakulta stavební, ČVUT v Praze,
- program PENB - Energetická náročnost budov – PROTECH

Simulační řešení

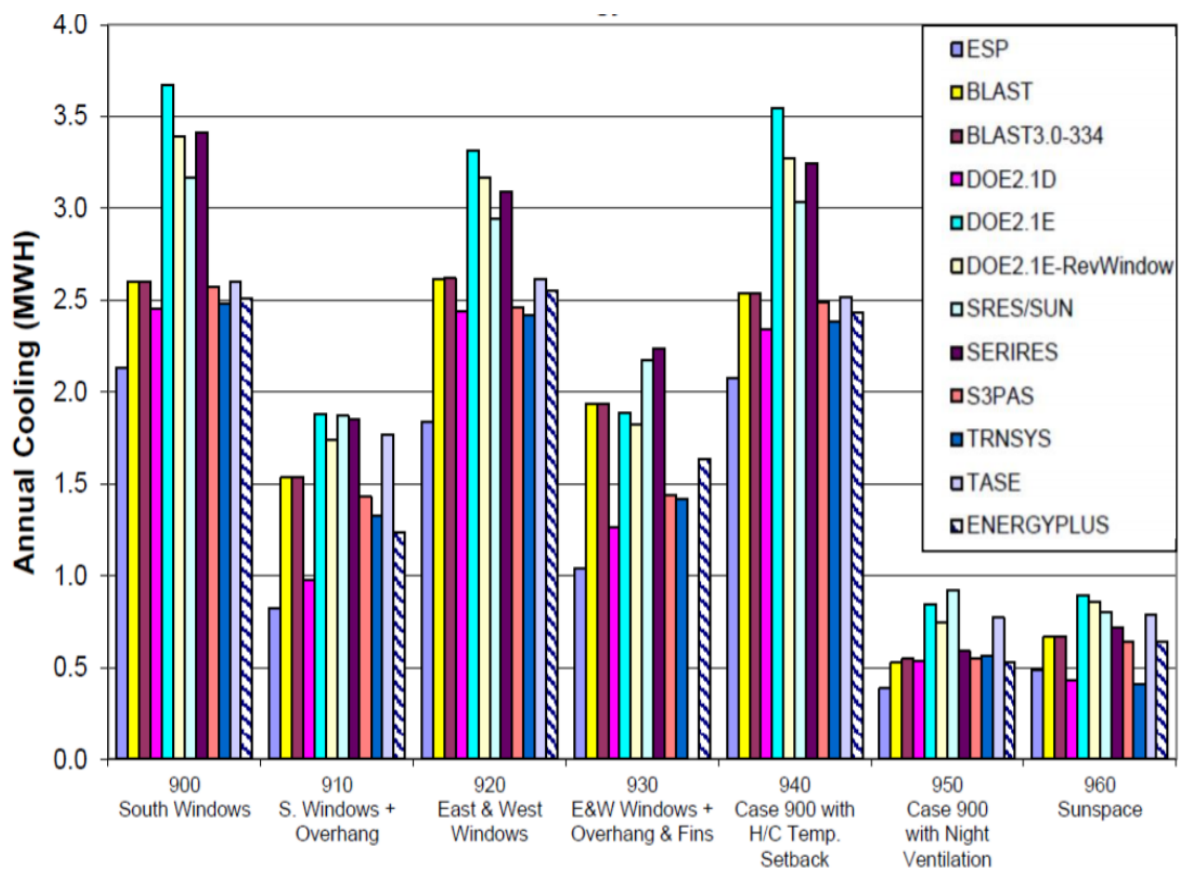
Programy energetického modelování budov jsou sofistikované programy k vytváření virtuálních modelů reálný a hypotetický budov. Tím je možno studovat jejich energetickou náročnost a následně predikovat chování, při různých okrajových podmínkách na základě modelu (geometrického, matematického, matematicko-fyzikálního, atd.) a formulace jeho vlastností a chování. Okrajové podmínky pro výpočty mohou být vytvořeny z reálných naměřených datových souborů o počasí po dobu jednoho roku, známých jako TRY (test reference year) zkušební referenční rok nebo TMY (typical meteorological year) typický meteorologický rok. TMY je datový soubor hodinových hodnot slunečního záření a meteorologických dat. Skládá se z měsíců vybraných z jednotlivých let seskupených do úplného roku. TMY obsahuje hodnoty slunečního záření, okolní teploty, relativní vlhkosti, rychlosti větru a směru

pro všechny hodiny v roce. Tato programová řešení jsou náročnější na čas a předpokládají od uživatele hlubší znalost fyzikální podstaty problému.

Podle Behrendt a kol. [3] a Zhu a kol. [4] mohou však existovat velké rozdíly ve výsledcích simulace mezi různými programy energetického modelování budov. Tyto rozdíly ve výsledcích mohou být způsobeny matematickými problémy, chybami ve výchozích hodnotách nebo rozdíly v metodách výpočtu a modelování.

V projektu BESTEST byla vyvinuta metoda pro systematické testování programů energie budov a diagnostika příčin možných rozdílů ve výsledcích. Metoda se skládá ze série testovacích případů budovy.

V histogramu (Obrázek 1.1) lze vidět rozdíl ve výstupu z několika programů pro energetické modelování budov, kterým byla roční chladicí zátěž. [5]

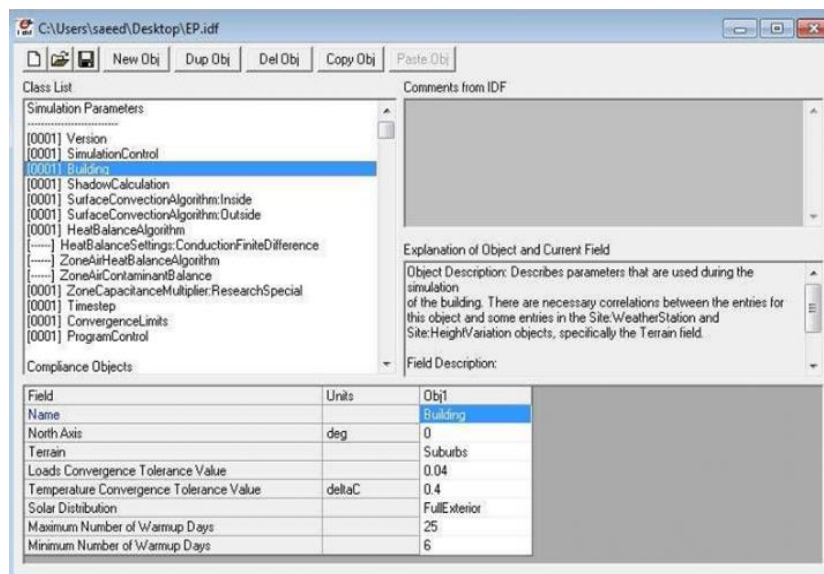


Obrázek 1.1 BESTEST: Srovnání roční chladicí zátěže budov

1.3.1.1.3 EnergyPlus

EnergyPlus pochází z programů BLAST a DOE-2, a je určen pro analýzu energie a simulaci tepelného zatížení. Program simuluje topnou a chladicí zátěž nezbytnou k udržení požadovaných teplotních regulačních hodnot, spotřeby energie zařízení a mnoho dalších simulačních detailů. Simulační program bývá mnohdy doplněn o rozhraní třetích stran.

EnergyPlus, mimo jiné, umožňuje hodinové, uživatelsky definované časové kroky (dle potřeby až 1 minuta), pro interakci mezi tepelnými zónami a prostředím. Také umožňuje proměnné časové kroky mezi tepelnými zónami a systémy vytápění a chlazení atd. [6]



Obrázek 1.2 Ukázka programu EnergyPlus

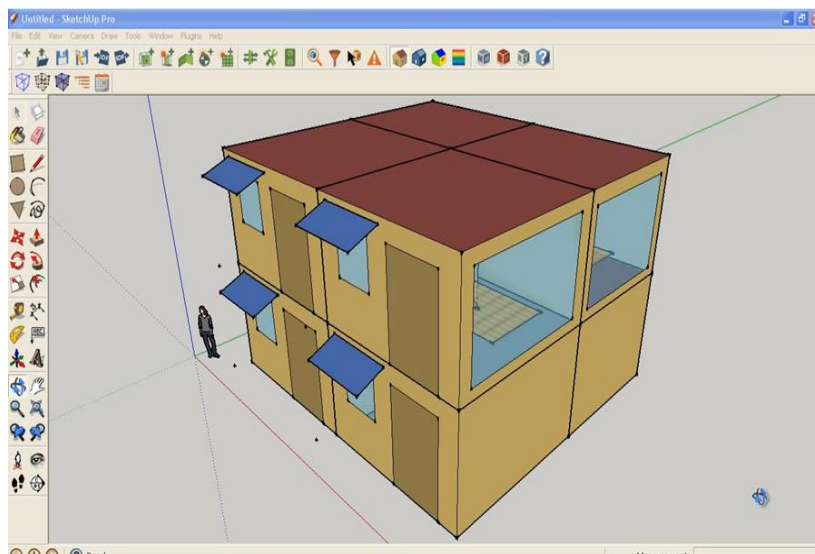
1.3.1.1.3.1 Grafická uživatelská rozhraní třetích stran pro EnergyPlus

Celá konfigurace modelu a systémů vytápění, ventilace a klimatizace (dále už jen HVAC) je dokončena ve vybraném grafickém rozhraní a poté pomocí EnergyPlus použita k výpočtům vedoucím k požadovaným výsledkům.

Výhodou grafických rozhraní třetích stran je výběr návrhu modelu a úpravy faktorů systémů HVAC, v uživatelsky přívětivém prostředí než v samotném EnergyPlus, který je mnohem obtížnější používat a porozumět mu.

1.3.1.1.3.2 OpenStudio

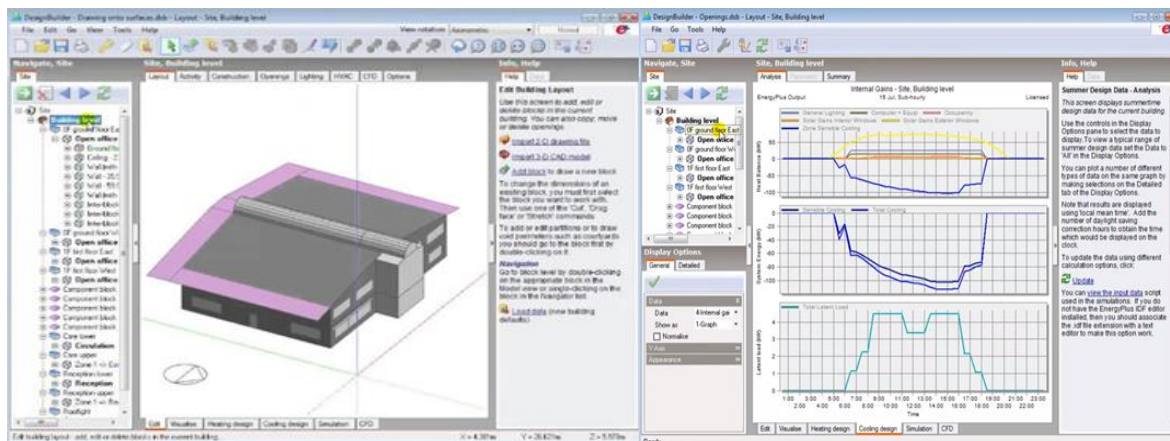
OpenStudio je soubor softwarových nástrojů napříč platformami, které podporují celek energetického modelování budov pomocí EnergyPlus. [7]



Obrázek 1.3 Ukázka programu OpenStudio

1.3.1.1.3.3 DesignBuilder

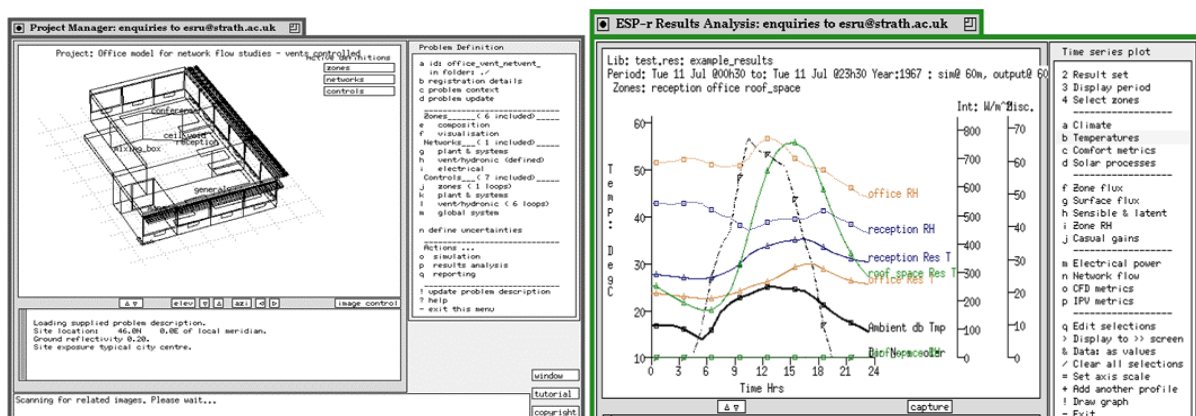
DesignBuilder je uživatelské rozhraní pro EnergyPlus, které umožňuje pracovat s modelem virtuální budovy. Jedná se o produkt britské společnosti DesignBuilder Software Ltd, který je ve Velké Británii hojně využíván jako simulační metoda pro tvorbu energetických průkazů budov. Program vyžaduje minimální znalosti problematiky, umožňuje však simulovat pouze běžně používané systémy. [8]



Obrázek 1.4 Ukázka programu DesignBuilder

1.3.1.1.4 ESP-r

Software ESP-r představuje dynamické simulační prostředí pro analýzu energetických a vlhkostních toků v budovách a v zařízeních HVAC. ESP-r provádí výpočet metodou zónové energetické simulace. Software byl vyvinut na University of Strathclyde, Glasgow jako zdrojový program, který je primárně určen pro operační systém Linux. ESP-r je komplexní a flexibilní simulační program, který umožňuje simulovat i nejnovější technologie – kombinovaná výroba tepla a elektrické energie, fotovoltaické fasády, atd. [9]

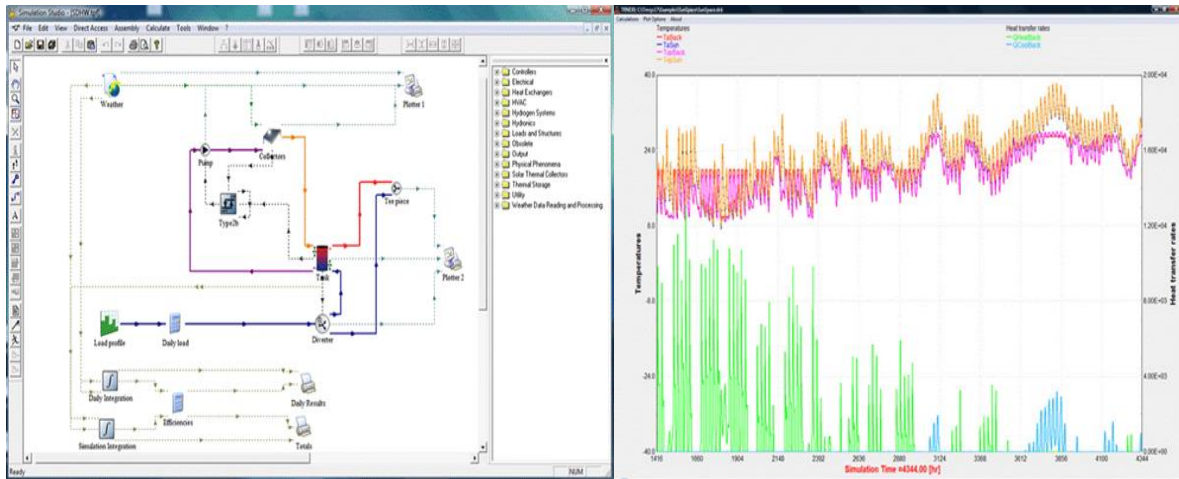


Obrázek 1.5 Ukázka Programu ESP-r

1.3.1.1.5 TRNSYS

TRNSYS (TRAnSient SYstem Simulation) je program určený především pro dynamickou analýzu energetických systémů budov. Zejména energetických bilancí budov, solárních fototermálních soustav teplovodních, teplovzdušných, fotovoltaických systémů a vzduchotechnických systémů pro větrání a teplovzdušné vytápění. Program TRNSYS obsahuje grafické rozhraní pro vytváření vstupních souborů, nástroj pro snadné vytváření vstupního souboru pro budovy (TRNBuild) a program pro vytváření aplikací založených na TRNSYS, (TRNEdit). Program obvykle používá 1 – hodinové nebo 15 – minutové časové kroky, ale může dosáhnout 0,1 – sekundových časových kroků.

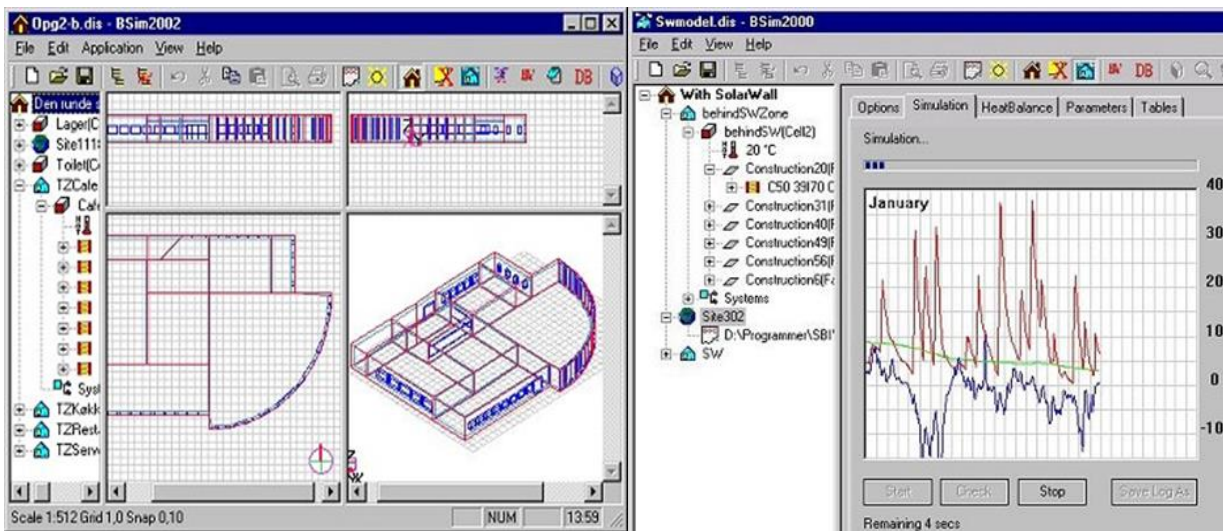
TRNSYS je komerční program vyvinutý na University of Wisconsin – Madison. Program je flexibilní pro modelování a optimalizaci i složitých energetických systémů a jejich komponent, pro ale není příliš vhodný simulaci energetické náročnosti celých budov. [10]



Obrázek 1.6 Ukázka programu TRNSYS

1.3.1.1.6 Bsim

Program umožňuje simulaci denního osvětlení a proslunění včetně stínů, zónovou simulaci stavu vnitřního prostředí – tepelná a vlhkostní bilance a simulaci energetické náročnosti technického zařízení objektu. [11]



Obrázek 1.7 Ukázka programu Bsim

1.4 ŠÍŘENÍ TEPLA

Teplo se jako energie šíří od místa s teplotou vyšší do místa s teplotou nižší – dochází tedy ke snaze o vyrovnání teplotního stavu tělesa nebo prostředí. Teplo se šíří v libovolném prostředí a v závislosti na tom, jakým způsobem k šíření tepla dochází, lze identifikovat tři základní způsoby tepla, jimiž je

- vedení
- sálání
- proudění. [12]

1.4.1 Vedení (kondukce) tepla

Tepelný tok je možno popsat jako stacionární nebo nestacionární děj. Pokud má po celou dobu vedení tepla v tělese konstantní teplotní spád, nazýváme takový přenos tepla stacionární. Nestacionární děj popisujeme, jako vedení tepla v tělese při nekonstantním teplotním spádu. Vypočítat se dá jako podíl přenášeného tepla a příslušného času, výsledná hodnota má jednotku W [J.s⁻¹].

Základní principy vedení tepla popisují Fourierovy zákony. První Fourierův zákon se týká stacionárního, jednodimenzionálního teplotního pole – ustáleného teplotního stavu, kdy se okrajové podmínky i průběh teplot v izotropní látce v čase nemění.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (1.1)$$

kde \dot{q} – hustota tepelného toku [W.m⁻²],
 λ – součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹],
 T – teplota [K],
 n – index označující směry normály. [12]

Druhý Fourierův zákon se týká vztahu mezi časovou a lokální změnou teploty pro neustálený teplotní stav.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1.2)$$

kde T – teplota [K],
 λ – součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹],
 ρ – objemová hmotnost [kg.m⁻³],
 τ – čas [s],
 c – měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹],
 x, y, z – indexy označující směry souřadného systému. [12]

1.4.2 Sálání (radiace)

Šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění (podobného světelnému vlnění), přičemž k přenosu energie z jednoho tělesa do jiného není potřeba žádné zprostředkující médium.

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon S T^4 \quad (1.3)$$

kde	\dot{Q}	–	výkon vyzařovacího předmětu [W],
	σ	–	Stefanova-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m ⁻² K ⁻⁴],
	ε	–	emisivita tělesa $0 \leq \varepsilon \leq 1$,
	S	–	obsah plochy povrchu vyzařovacího předmětu [m ²],
	T	–	teplota [K]. [12]

1.4.3 Proudění (konvekce)

Přestup tepla prouděním (konvekci) probíhá pohybem částic tekutiny nejčastěji mezi pracovní látkou a stěnou. Na velikost přestupu tepla prouděním má vliv intenzita proudění. Sdílení tepla prouděním vyjadřuje Newtonův ochlazovací zákon.

$$\dot{Q} = \alpha S \Delta t \quad (1.4)$$

kde	\dot{Q}	–	tepelný tok [W],
	α	–	součinitel přestupu tepla [W.m ⁻² .K ⁻¹],
	S	–	plocha stěny [m ²],
	Δt	–	rozdíl teplot [K]. [12]

Součinitel přestupu tepla vychází z teorie mezních vrstev.

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_L}{l} \quad (1.5)$$

kde	λ_L	–	součinitel tepelné vodivosti tekutin [W.m ⁻¹ .K ⁻¹],
	l	–	charakteristický rozměr [m].

Při sdílení tepla v konstrukcích se nucené konvekce uplatní především při přestupu tepla z teplotnosné látky na konstrukci. Vliv způsobu proudění je charakterizováno Reynoldsovým číslem Re , které specifikuje jednotlivé režimy proudění v trubkách jako laminární, přechodové a turbulentní. Vliv látkových vlastností na přestupu tepla udává Prandlovo číslo Pr . Význam vztahových sil při smíšené konvekci lze určit pomocí poměru Grashofova Gr a Reynoldsova čísla. V případě přirozené konvekce je pak možné režim proudění určit tzv. Rayleighova čísla Ra . [12]

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}, \text{Re}) \quad (1.6)$$

1.5 PŘESTUP TEPLA STAVEBNÍMI KONSTRUKCEMI

1.5.1 Tepelný odpor

Tepelný odpor vyjadřuje, jakou plochou konstrukce a při jakém rozdílu teplot na jejích površích dojde k přenosu 1 Wattu, čili k přenosu energie o velikosti 1 J za 1 sekundu.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1.7)$$

kde R – teplota [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 d – tloušťka konstrukce [m],
 λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. [12]

1.5.2 Odpor konstrukce při prostupu tepla

R_T úhrnný tepelný odpor bránící výměně tepla mezi prostředními oddělenými od sebe stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami.

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (1.8)$$

kde R_T – odpor konstrukce při prostupu tepla [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 R_{si} – odpor přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 R – odpor konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 R_{se} – odpor přestupu tepla na vnější straně konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]. [12]

1.5.3 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše 1 m^2 při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K.

$$U = \frac{1}{R} \quad (1.9)$$

kde U – součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 R – tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]. [12]

ENERGYPLUS

EnergyPlus používá k simulaci vedení tepla dynamické výpočtové metody. V následující kapitole jsou rozepsané vybrané aspekty.

1.5.4 Jednosměrný přenos tepla přes vícevrstvé konstrukce

Základní formu řešení funkce přenosu vodivosti ukazuje následující rovnice.

$$q_{i,t} = \sum_{m=1}^M X_m T_{i,t-m+1} - \sum_{m=1}^M Y_m T_{o,t-m+1} + \sum_{m=1}^M F_m q_{i,t-m} \quad (1.10)$$

kde q – hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],
 T – teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 i – vnitřní část stavebního prvku,
 o – vnější část stavebního prvku,
 K – pořadí funkcí přenosu vodivosti,
 M – konečné číslo definované pořadí funkcí přenosu vodivosti,
 X, Y, F – přenos vodivosti funkční koeficienty. [6]

1.5.5 Zachování hmotnostního toku vzduchu v zóně

Účelem zachování hmotnostního toku vzduchu v zóně je vyvolat výpočet bilance hmotnostního toku vzduchu v zóně. Výpočet hmotnostního průtoku vratného vzduchu je dán rovnicí.

$$\dot{m}_R = \text{MAX}(0, \dot{m}_S + \dot{m}_{XR} - \dot{m}_{EX} - \dot{m}_{XS}) \quad (1.11)$$

kde \dot{m}_R – hmotnostní průtok zpětného vzduchu zóny [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
 \dot{m}_{EX} – hmotnostní průtok zónového vzduchu z ventilátorů, [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
 \dot{m}_{XR} – hmotnostní průtokový tok zóny jako přijímací zóna [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
 \dot{m}_{XS} – hmotnostní průtok směšovací zóny jako zdrojová zóna, [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],
 \dot{m}_S – hmotnostní průtok přiváděného vzduchu v zóně, [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]. [6]

2 POPIS ŘEŠENÉ BUDOVY

Diplomová práce se zabývá analýzou administrativní budovy Vienna Point II.

2.1 DISPOZICE BUDOVY

Budova se nachází při ulici Vídeňská, v jižní části Brna.

Je založená na železobetonových pilotách. Nosnou konstrukci tvoří železobetonový skelet, který je doplněn o betonové stěny a stěny z keramických tvárníc. Celý obvodový plášť je zateplen systémem z minerální vaty a fasáda je tvořena sendvičovým hliníkovým plechem s plastovou vložkou. Výplně otvorů jsou izolační trojskla v hliníkovém rámu.



Obrázek 2.2 Vienna Point II [13]



Obrázek 2.1 Mapa s vyznačením polohy budovy [14]

Skládá se z šestnácti podlaží – dvou podzemních a čtrnácti nadzemní podlaží.

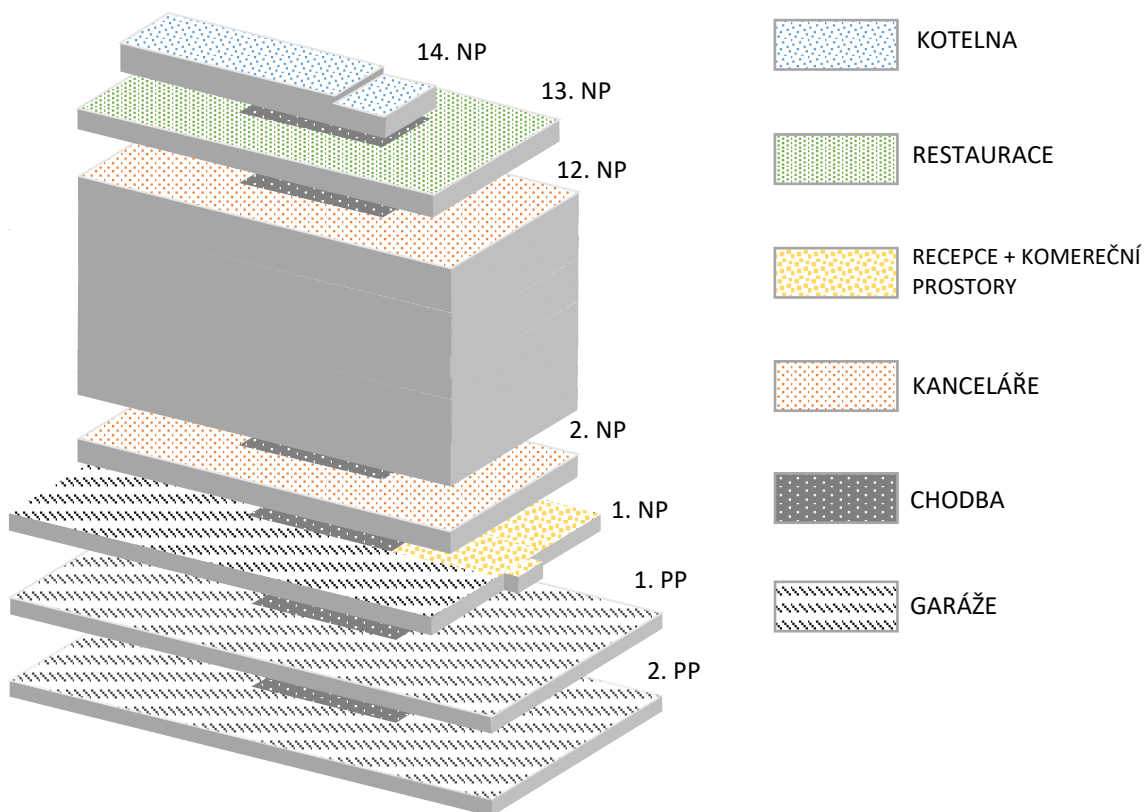
V podzemních a části prvního nadzemního podlaží jsou umístěny hromadné garáže.

V prvním nadzemním podlaží se nachází hlavní vstup do budovy orientovaný na západ, recepce a komerční prostory.

2.–12. NP zaujímá kancelářský prostor, který je řešen jako open-space, soustředěn kolem vnitřního železobetonového jádra, v němž je sociální a hygienické zázemí jednotlivých podlaží. Typické kancelářské patro zaujímá cca 1 000 m² podlažní plochy.

Ve třináctém podlaží je umístěna restaurace, sloužící ke stravování zaměstnanců kancelářských prostor.

Ve čtrnáctém patře je pak strojovna vzduchotechniky a kotelna.



Obrázek 2.3 Rozložení budovy – vnitřní prostory

2.2 TECHNICKÉ ZAŘÍZENÍ BUDOVY

2.2.1 Systém vytápění

Zdrojem tepla jsou tři plynové stacionární kondenzační kotle zapojené do kaskády. Jeden o nižším výkonu s označením Broetje SGB-160 a dva o vyšším výkonu s označením Broetje SGB-250. Minimální výkon kondenzačních kotlů při teplotním spádu 75/55 °C je 38,6 kW, maximální výkon kotlů je 627 kW. Teplo je do místností předáváno deskovými otopnými tělesy s termostatickými hlavicemi. Kondenzační kotle slouží také jako zdroj tepla pro teplovodní ohřivače, které jsou součástí vzduchotechnických jednotek.

2.2.2 Systém chlazení

Zdrojem chladu jsou dva chillery, každý s dvěma kompresorovými okruhy a odděleným vzduchem chlazeným kondenzátorem. Chladicí výkon jednoho zdroje chladu je 292 kW se čtyřstupňovou regulací výkonu (25/50/75/100). Maximální chladicí výkon chladičů kapaliny je celkem 584 kW a minimální 73kW. Kondenzátory jsou dvou okružové o výkonu 2 x 148 kW, výpočtová kondenzační teplota je 50,3 °C. Součástí chladicího zařízení je akumulární zásobník chladicí vody. Teplonosnou látkou je voda s teplotním spádem 6/12 °C. Chlad je do budovy distribuován pomocí jednotek fan-coil, které jsou ovládány manuálně. Chillery jsou zdrojem chladu pro vodní chladiče, které jsou součástí vzduchotechnických jednotek.

2.2.3 Systém vzduchotechniky

VZT zařízení č. 1 – jednotka obsluhuje kancelářské prostory a vstup do budovy. Součástí jednotky je regenerační rotační výměník s účinností 79 %, ohřivač a chladič vzduchu. Objemový průtok přívodního vzduchu je 38 500 m³/h. Distribuční elementy – vířivé vyústí.

VZT zařízení č. 2 – jednotka obsluhuje komunikační prostory a hygienická zázemí budovy. Součástí jednotky je rekuperační deskový výměník s účinností 60 %, ohřivač a chladič vzduchu. Objemový průtok přívodního vzduchu je 8 300 m³/h. Distribuční elementy – talířové ventily.

VZT zařízení č. 3 – jednotka obsluhuje restauraci. Součástí jednotky je rekuperační deskový výměník s účinností 62 %, ohřivač a chladič vzduchu. Objemový průtok přívodního vzduchu je 6 900 m³/h. Distribuční elementy – vířivé vyústí. [15] [16]

2.2.4 Systém přípravy TUV

Příprava teplé vody probíhá samostatně na jednotlivých podlažích pomocí elektrických ohřivačů a v restauraci je umístěn samostatný plynový ohřivač.

2.3 KONSTRUKCE

Stavební konstrukce budovy je složena z mnoha materiálů. Z důvodu zefektivnění simulace je konstrukce fasády pro výpočet idealizovaná, avšak tepelně technické vlastnosti zůstávají nezměněny.

Tabulka 2.1 Skladby stavebních konstrukcí

Ozn.	Skladby konstrukce	Popis skladby z exteriéru do interiéru / shora dolů	ρ [kg.m ⁻³]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻⁴ K ⁻¹]
Obvodová stěna SO-ZB-120-FAS		1. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
		2. Železobeton 2 500 - 120 mm	2 500	1 020	1,740
		3. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
SO-ZB-120-FAS		1. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
		2. POROTHERM P+D 300 - 300 mm	800	960	0,260
		3. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
SO-P+D 300 FAS TS		1. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. POROTHERM P+D 300 - 300 mm	800	960	0,260
SO-P+D 300 FAS IZOL TS		1. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
		2. POROTHERM P+D 300 - 300 mm	800	960	0,260
		3. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
SO-ZB 200 IZOL		1. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. Železobeton 2 500 - 120 mm	2 500	1 020	1,740
		3. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
		4. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
Stěna vnitřní SV-YTONG 150 IZOL		1. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. YTONG P3-550 - 150 mm	700	1 000	1,700
		3. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
SV-ZB 200 IZOL		1. Železobeton 2 500 - 120 mm	2 500	1 020	1,740
		2. Minerální vlna – FASROCK - 150 mm	160	840	0,040
SO-ZB 300 IZOL SDK		1. SDK deska - 25 mm	750	1 060	0,220
		2. Minerální vlna – FASROCK - 100 mm	160	840	0,040
		3. Železobeton 2 500 - 300 mm	2 500	1 020	1,740
SV-ZB 200 IZOL2+SDK		1. Minerální vlna – FASROCK - 100 mm	160	840	0,040
		2. Železobeton 2 500 - 200 mm	2 500	1 020	1,740
		3. Minerální vlna – FASROCK - 100 mm	160	840	0,040
		4. SDK deska - 25 mm	750	1 060	0,220
SV-ZB 300		1. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. Železobeton 2 500 - 300 mm	2 500	1 020	1,740
		3. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
SV-YTONG 150		1. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. YTONG P3-550 - 150 mm	700	1 000	1,700
Stěna vnitřní		3. Omítka - 15 mm	2 000	790	0,990
		2. YTONG P3-550 - 150 mm	700	1 000	1,700
		1. Železobeton 2 500 - 120 mm	2 500	1 020	1,740

Tabulka 2.2 Skladby stavebních konstrukcí

Ozn.	Skladby konstrukce	Popis skladby z exteriéru do interiéru / shora dolů	ρ [kg.m ⁻³]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻⁴ K ⁻¹]
Stropní konstrukce SK-ZB 220-IZOL-ZP		1. Dřevotřísková deska - 40 mm	800	1 500	0,110
		2. Dutina - vzduchu0 - 80 mm	1	1 010	0,500
		3. Železobeton 2 500 - 120 mm	2 500	1 020	1,740
		4. Minerální vlna – FASROCK - 100 mm	160	840	0,040
SK-ZB 220-IZOL-DL		1. POROTHERM P+D 300 - 300 mm	800	960	0,260
		2. Dlažba - 8 mm	2 000	1 500	0,110
		3. Betonová mazanina - 52 mm	2 100	1 020	1,230
		4. Izolace XPS - 60 mm	30	2 060	0,036
SK-ZB 220 -DL		3. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740
		5. Minerální vlna – FASROCK - 100 mm	160	840	0,040
		1. Dlažba - 8 mm	2 000	1 500	0,110
		2. Betonová mazanina - 52 mm	2 100	1 020	1,230
SK-ZB 220 -DL		3. Izolace XPS - 60 mm	30	2 060	0,036
		4. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740
		1. Koberec - 50 mm	160	1 880	0,650
		2. Dřevotřísková deska - 40 mm	800	1 500	0,110
KST-ZB-220-DPL		3. Dutina vzduchu- 80 mm	1	1 010	0,500
		4. Železobeton 2 500 - 300 mm	2 500	1 020	1,740
		1. Zámková dlažba - 80 mm	2 200	1 020	1,300
		2. Kladecí vrstva – písek - 30 mm	1 900	800	1,600
KST-ZB-220-OBP		3. Geotextílie 300g/m ³			
		4. Hydroizol. pás Sikaplan 15G -8 mm			
		5. Železobeton 2 500 - 300 mm	2 500	1 020	1,740
		1. Asfaltový pás ELASTEK - 8 mm	1 400	1 470	0,210
KST-ZB-220-IZOL1		2. Minerální vlna – DUCROCK - 140 mm	160	840	0,040
		3. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740
		1. Hydroizol. -8 mm			
		2. Minerální vlna – DUCROCK - 180 mm	160	840	0,040
KST-ZB-220-IZOL2		3. Hydroizol. -4 mm			
		4. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740
		1. Hydroizol. -8 mm			
		2. Minerální vlna – DUCROCK - 250 mm	160	840	0,040
SK-ZB-220		3. Hydroizol. -4 mm			
		4. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740
SK-ZB-220		1. Železobeton 2 500 - 220 mm	2 500	1 020	1,740

Pozn.: Výplně oken mají garantovaný součinitel prostupu tepla $U_w = 1 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

POPIS PROVOZU BUDOVY

Provozní doba budovy je od 7–18 hod, od pondělí do pátku. Celoročně jsou používány stínící prostředky – vnější žaluzie, které snižují tepelné zisky sluneční radiací. Plná obsazenost budovy je přibližně 880 osob.

2.3.1 Garáže

Garáže nejsou vytápěny ani ochlazovány, jsou pouze větrány. Garáže v 1. NP a 1. PP jsou větrány přirozeně, ve 2. PP jsou větrány podtlakovým systémem spouštěným na základě koncentrace CO.

2.3.2 Kanceláře

Při obsazenosti kancelářských prostor je předpokládaná teplota 20–26 °C, mimo ni 16–28 °C.

Kanceláře jsou vybaveny běžným kancelářským vybavením.

2.3.3 Hygienické a komunikační prostory

Hygienické a komunikační prostory jsou v zimním období vytápěny v době obsazenosti budovy na předpokládanou teplotu 20 °C a mimo ni temperovány na 16 °C. Dále je zde instalován systém nuceného větrání.

2.3.4 Restaurace

Restaurace je provozována stejně jako kanceláře, a to v době obsazenosti budovy, na předpokládanou teplotu 20–26 °C, mimo ni 16–28 °C.

2.3.5 Technické zázemí

Technické zázemí je v zimním období temperováno a při překročení teploty 35 °C se spustí nucená ventilace.

2.4 SIMULACE V PROGRAMU DESIGNBUILDER

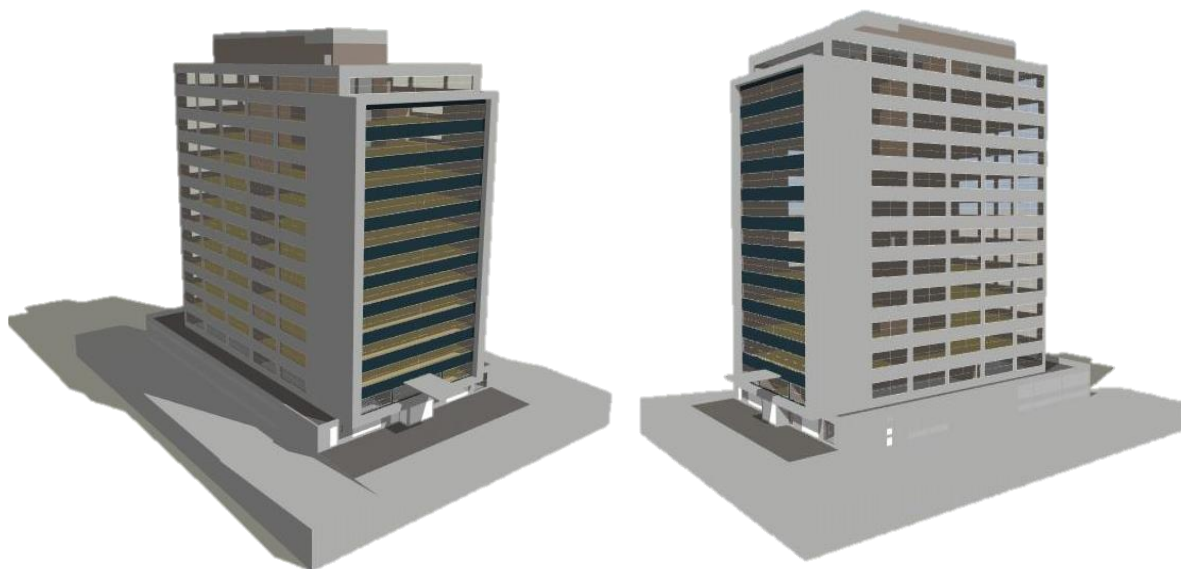
Za účelem návrhu obnovitelných a nízkopotenciálních zdrojů energie budov je energie potřebná pro vytápění a chlazení simulována v programu EnergyPlus, na základě stavební a technické dokumentace budovy. Grafické rozhraní programu DesignBuilder se používá pro vstup geometrie s ohledem na jeho materiálové charakteristiky a HVAC budovy. Výpočetní model energetického chování budovy je kalibrován na základě spotřeby tepla vypočtené dle normy (730336) ČSN EN ISO 52016-1 [17] a reálné spotřeby na vytápění. Nakonec je provedeno srovnání roční spotřeby energie pro vytápění a chlazení vlastního výpočtového modelu s návrhy jednotlivých variant. [18]

Stávající systém vytápění a chlazení je doplněn tepelnými čerpadly v celkem devíti variantách. V simulaci varianty V1 bylo zvoleno tepelné čerpadlo voda-voda se suchým chladičem. Ve variantách V2 až V9 jsou použita tepelná čerpadla země-voda, se zdrojem energií instalovaným pomocí „U“ smyčky výměníků tepla do geotermálních zemních vrtů (dále už jen GVV) nebo pilot budovy. Také jsou v těchto simulacích porovnávány různé teplotní spády systému vytápění a chlazení.

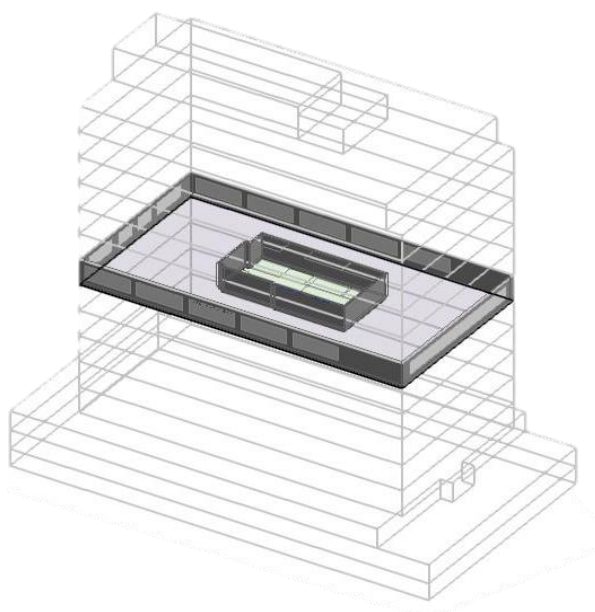
Simulační model řešené budovy a jeho kalibrace je provedena následujícím způsobem. Nejprve je vypracován energetický model s jeho tepelně-technickými vlastnostmi, jak je uvedeno v kapitole (2.3). Poté je nastaven systém vytápění a chlazení a charakterizovány jednotlivé teplotní provozy zón spolu s jejich vybaveností a profilem užívání. Následovně je posouzen řídicí systém a je určeno jeho nastavení dle obsazenosti budovy a vyhodnocena energetická simulace roční spotřeby energie budovy.

2.5 MODEL BUDOVY V DESIGNBUILDER

V programu DesignBuilder (Obrázek 2.4 a 2.5), je vytvořen 3D geometrický model řešené budovy.



Obrázek 2.4 Model budovy v programu DesignBuilder



Obrázek 2.5 Typické podlaží budovy

Model budovy je vytvořen na základě reálných dispozic a orientace ke světovým stranám.

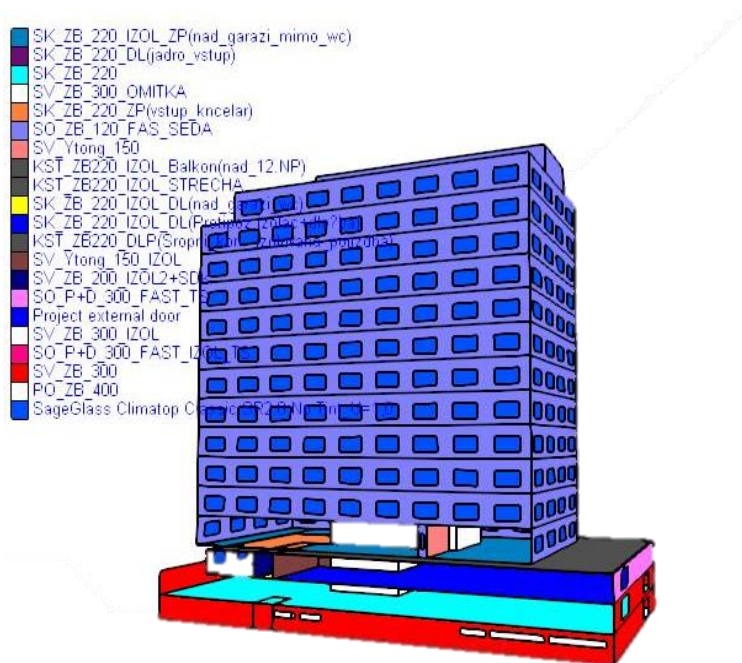
Vnitřní prostory budovy (Obrázek 2.1), jsou děleny do tří zón, ve kterých zůstává provoz nezměněn v průběhu simulací jednotlivých variant zdrojů energie.

Program DesignBuilder nenabízí meteorologická data pro oblast Brno, ve které se posuzovaná budova nachází. Proto jsou vybraná data typického meteorologického roku nejbližší meteorologické stanice nabízena programem, a to ve městě Bratislavě na Slovensku. Tabulka 2.3 uvádí průměrné denní venkovní teploty.

Tabulka 2.3 Průměrná denní venkovní teplota během roku 2002

Nejchladnější den	01. 02. 2002
Průměrná denní venkovní teplota v nejchladším dnu:	-14,17 °C
Nejteplejší den	07. 07. 2002
Průměrná denní venkovní teplota v nejchladším dnu:	25,96 °C

Teplně-technické vlastnosti obvodového pláště budovy a výplně stavebních otvorů jsou zadány dle hodnot určených v kapitole (2.3).



Obrázek 2.6 Skladba konstrukcí budovy

Vnitřní tepelné zisky jsou uvažovány dle normy (730336) ČSN EN ISO 52016-1 a jsou spolu se stíněním závislé na plánu obsazenosti budovy. U typického podlaží – kanceláře, jsou vnitřní tepelné zisky během doby obsazenosti následující:

Tabulka 2.4 Vnitřní zisky budovy

Vnitřní zisky	
Osoby	5,3 W.m ⁻²
Kancelářské vybavení	
Konvektivní podíl	15,00 W.m ⁻²
Radiační podíl	0,40 W.m ⁻²
Osvětlení	
Konvektivní podíl	7,50 W.m ⁻²
Radiační podíl	0,72 W.m ⁻²

Pro HVAC je v programu DesignBuilder nastavena možnost detailed HVAC umožňující podrobnější modelování systémů pomocí přednastavených schémat systému a jejich propojení se skupinami zón, které mají obsluhovat. Program také umožňuje sestavit HVAC z jednotlivých komponentů, čehož je využito v tomto případě.

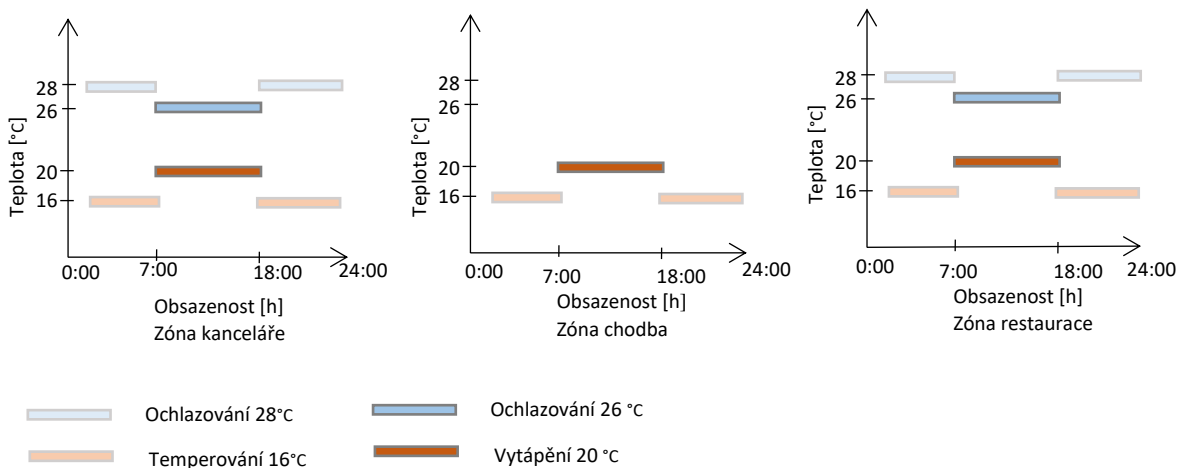
Pro potřeby modelu je budova rozdělena do 3 zón s odlišnými požadavky na HVAC.

Zóna 1 – kancelářské prostory, která zahrnuje také recepci a komerční prostory, je vytápěná, chlazená a nuceně větrána. K distribuci tepla slouží desková otopná tělesa napojena na zdroj tepla a také vzduchotechnická jednotka VZT zařízení č. 1 (kapitola 2.2.3), rovněž napojena na zdroj tepla. K distribuci chladu se v této zóně využívá fan-coil jednotek spolu se vzduchotechnickou jednotkou, které jsou napojeny na zdroj chladu.

Zóna 2 – zahrnuje komunikační a hygienické prostory, které jsou pouze vytápěny a větrány. K distribuci tepla se v této zóně využívají desková otopná tělesa, která jsou napojena na zdroj tepla. Tyto prostory jsou větrány samostatnou vzduchotechnickou jednotku VZT zařízení č. 2.

Zóna 3 – restaurace, je stejně jako zóna 1 vybavena pro potřeby vytápění otopnými deskovými tělesy a vzduchotechnickou jednotkou VZT zařízení č. 3. Vzduchotechnická jednotka také zajišťuje potřebu chladu spolu s jednotkou fan-coil.

Zdroj tepla a chladu se spouští se začátkem obsazenosti budovy. Tento časový harmonogram je znázorněn v následujícím obrázku.



Obrázek 2.7 Časová obsazenost budovy

2.6 ENERGETICKÉ VARIANTY ZDROJŮ TEPLA A CHLADU

Následující kapitola nás seznamuje s vybranými variantami (V1–V9) tepelných čerpadel voda-voda a země-voda priority jedna, doplňující stávající systém priority dva. Na Obrázku 2.8 jsou tyto varianty schematicky znázorněny.

V1 – Tepelné čerpadlo voda-voda na vytápění a chlazení, připojené k suchému chladiči, s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení.

V2 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a chlazení s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení.

V3 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení.

V4–V8 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a chlazení s různými teplotními spády:

Varianty	teplotní spád vytápění [°C]	teplotní spád chlazení [°C]
V4	75/55	6/12
V5	75/55	15/17
V6	45/35	12/16
V7	45/35	9/15
V8	55/45	15/17

V9 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 15/17 °C na chlazení.

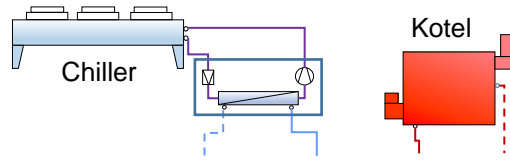
Tepelná čerpadla země-voda ve variantách V2 a V3 jsou provedena GVV. Ve variantách V4–V9 jsou zdroje energií instalovány pomocí „U“ smyčky výměníku tepla do pilot, na niž je budova založena, tzv. energetické piloty – energopiloty.

Pro zkrácení délky výpočtu jednotlivých variant je provoz budovy simulován na jednom typickém podlaží kancelářských prostor zóny 1 (viz kapitola 2.6). Výsledky jsou poté přenásobeny počtem podlaží s tímto provozem.

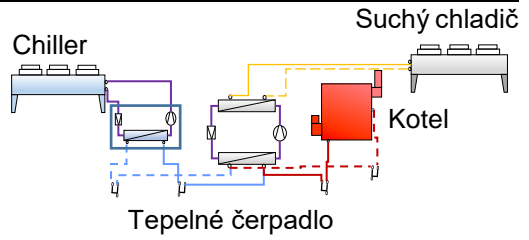
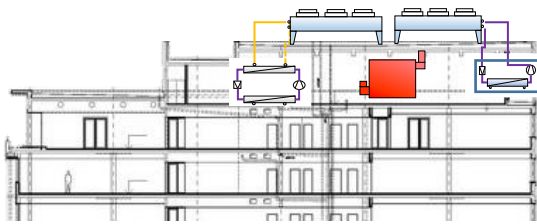
Výsledky jsou hodnoceny z hlediska spotřeby roční energie na vytápění a chlazení a její ceny. Také jsou hodnoceny z hlediska doby, po kterou není dosaženo požadovaného tepelného komfortu v budově.

Cena elektřina je uvažována na 3 Kč/kWh a plynu 1,5 Kč/kWh.

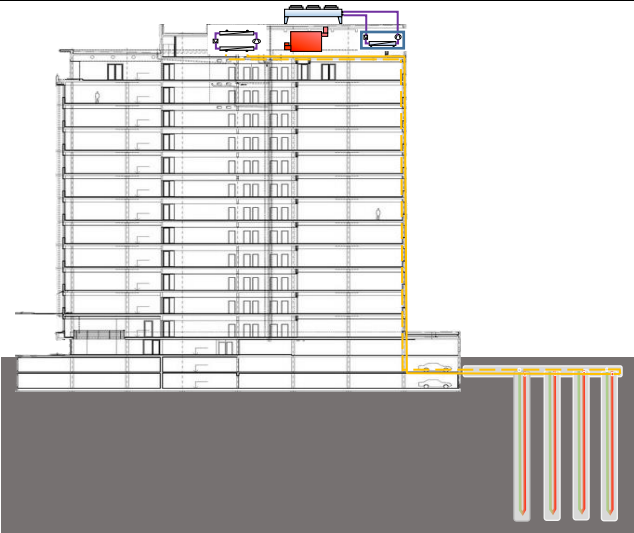
Stávající stav



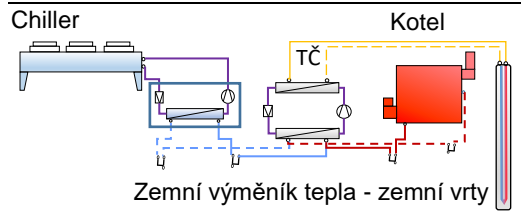
Varianta V1



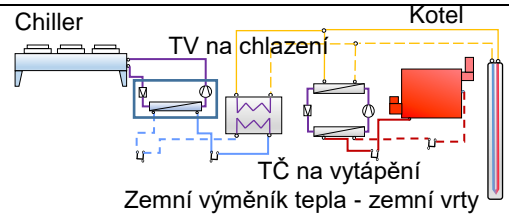
Varianty V2 a V3



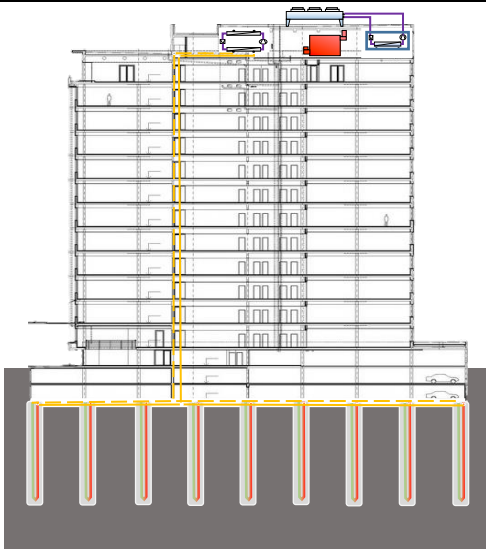
Varianta V2



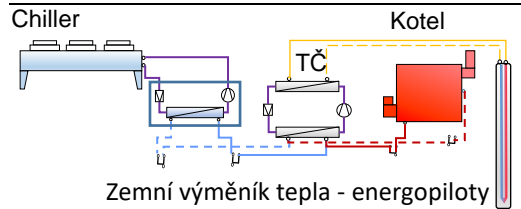
Varianta V3



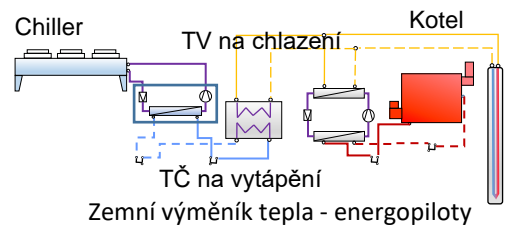
Varianty V4 – V9



Varianty V4 – V8



Varianta V9



Obrázek 2.8 Varianty zdroje vytápění a chlazení

3 VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT

3.1 STÁVAJÍCÍ STAV

Ve stávajícím stavu je zdrojem tepla kaskáda plynových kondenzačních kotlů a zdrojem chladu vodou chlazené chillery (Obrázek 3.1).

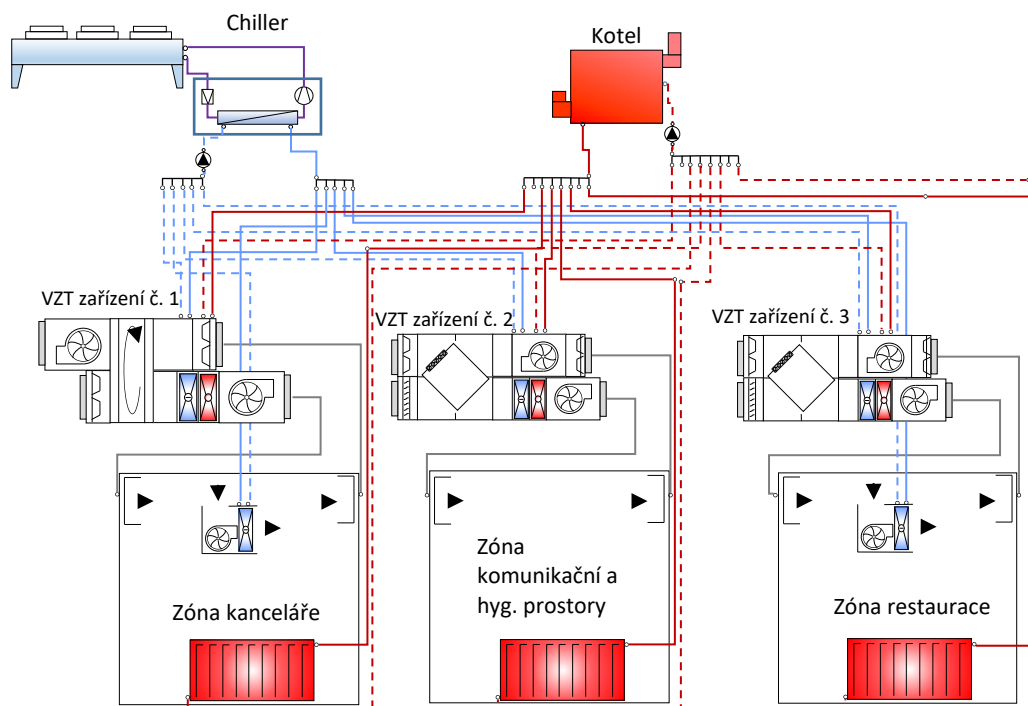
3.1.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí potřeby tepla zajišťují tři plynové stacionární kondenzační kotle zapojené do kaskády o teplotním spádu 75/55 °C. Maximální výkon kotlů stanovený simulací v softwaru je 660 kW.

Pro zajištění potřebného chladicího výkonu jsou navrženy dva chladiče kapaliny, každý se dvěma kompresorovými okruhy a odděleným vzduchem chlazeným kondenzátorem. Maximální chladicí výkon chillerů je celkem 584 kW s teplotním spádem 6/12 °C (viz kapitola 2.2).

Pro zkrácení doby simulace programu je modelován jeden souhrnný zdroj tepla a jeden souhrnný zdroj chladu o celkových maximálních a minimálních výkonech.

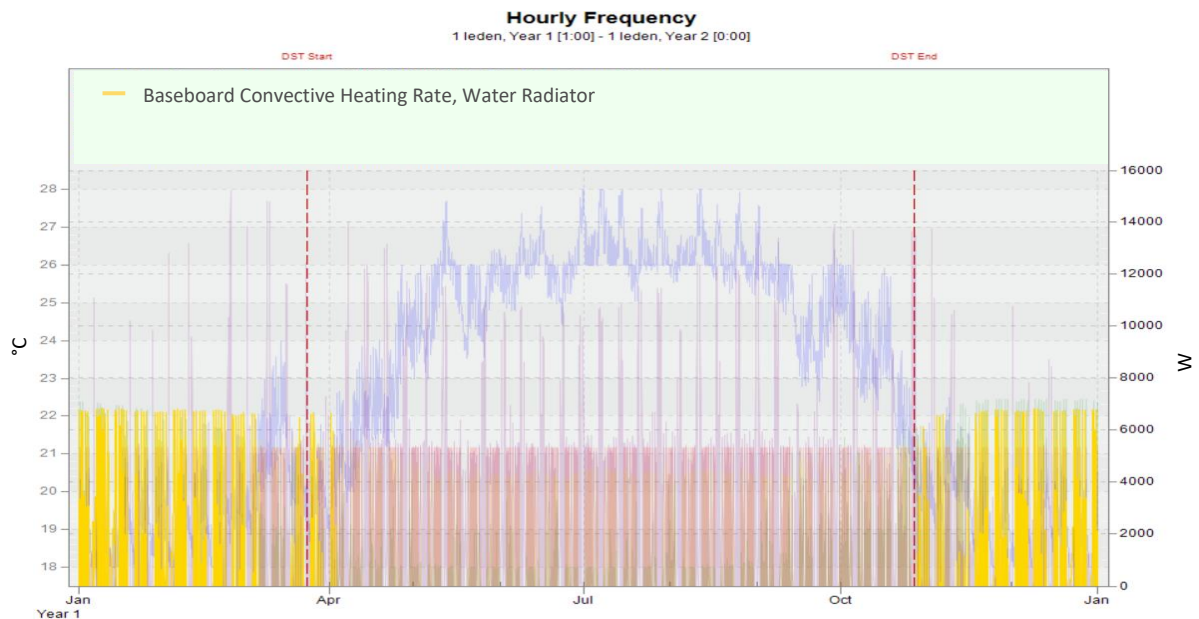
Stávající stav – teplotní spád vytápění 75/55 °C, chlazení 6/12 °C



Obrázek 3.1 Schéma zapojení stávajícího systému vytápění a chlazení

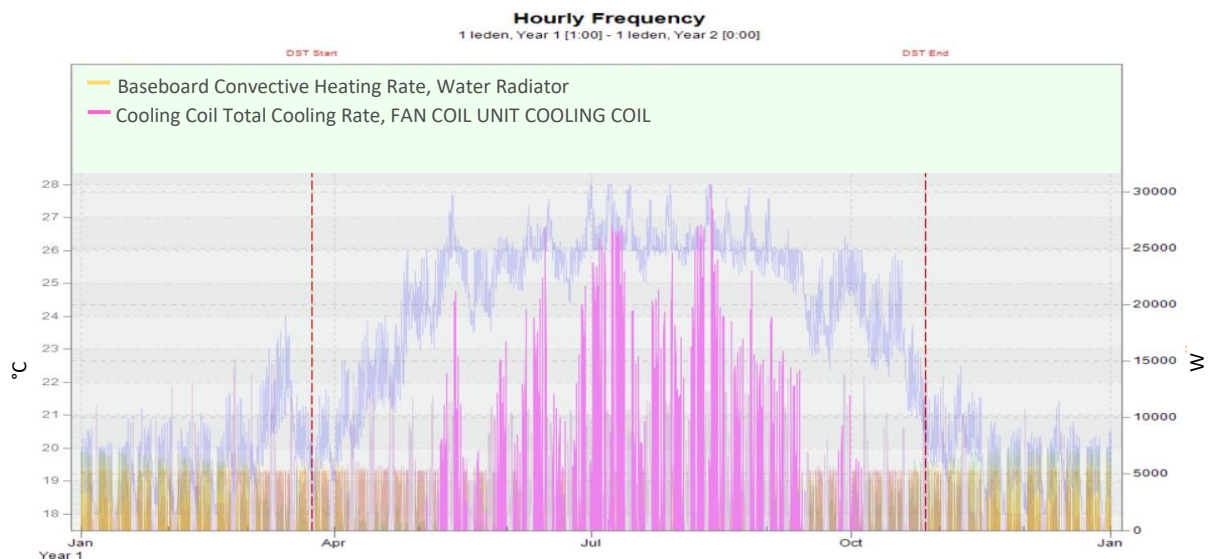
3.1.2 Vybrané výkony

Vybrané teploty a výkony (Obrázek 3.2–3.5), a tím i vyhodnocení tepelné pohody během zkušebního roku, pro typické podlaží zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).



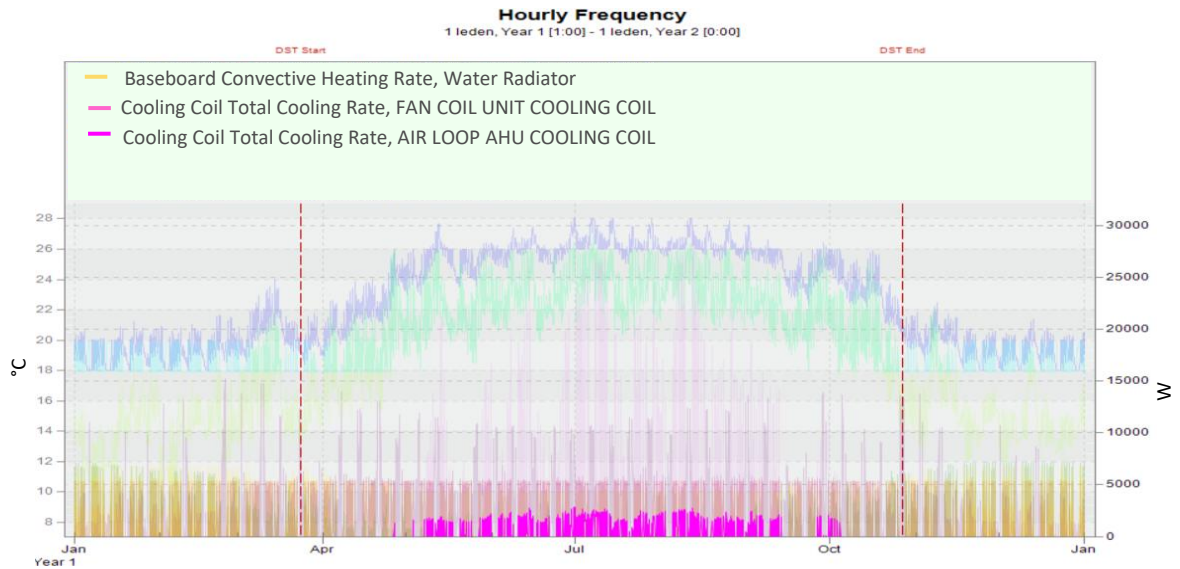
Obrázek 3.2 Část výkonu otopných těles konvekcí

Obrázek 3.2 ukazuje část výkonu otopných těles konvekcí v zóně kanceláře. Je z něj patrný maximální výkon 6 480 W značený oranžovou barvou. Patrné jsou také měsíce, kdy jsou otopná tělesa provozována a v nich doby, kdy je budova provozována pouze v teplotním útlumu.



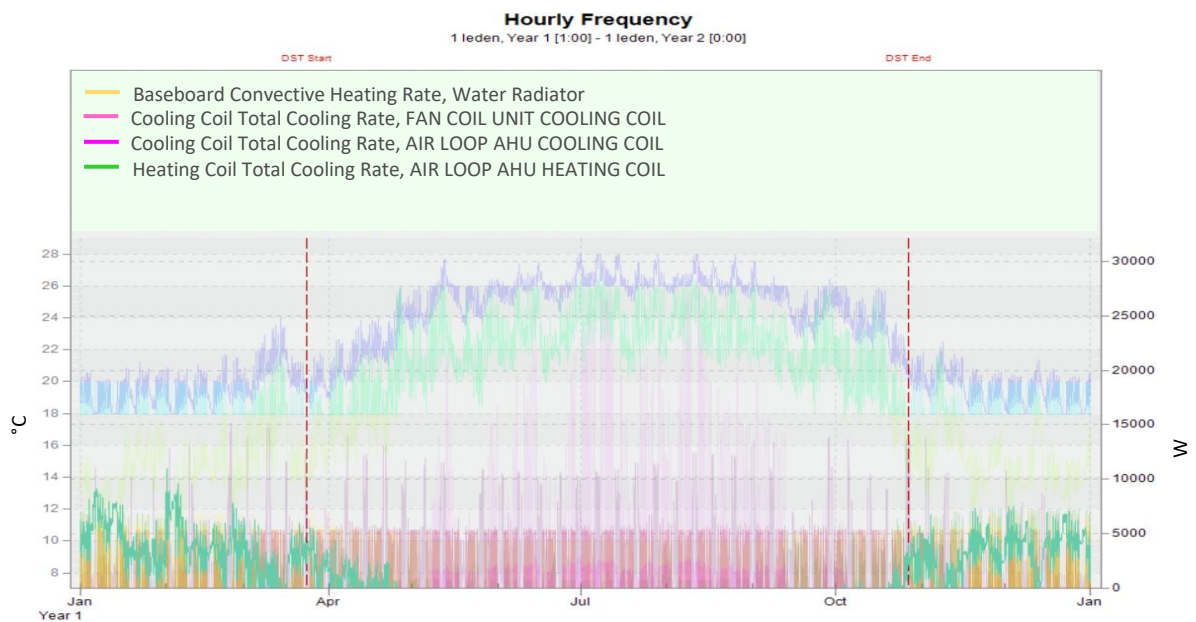
Obrázek 3.3 Fan-coil – celkový chladicí výkon

Fan-coily jsou v zóně kanceláře v provozu 3 měsíce v roce, v době obsazenosti budovy, jak znázorňuje Obrázek 3.3. Jejich výkon je závislý na venkovní teplotě, která je na obrázku vyznačena fialově.



Obrázek 3.4 VZT jednotka – celkový chladicí výkon

U chladiče vzduchotechnické jednotky je patrný provoz (Obrázek 3.4) i v době, kdy je budova v zóně kanceláře provozována v útlumovém režimu. Jeho maximální výkon je 1 691 W.

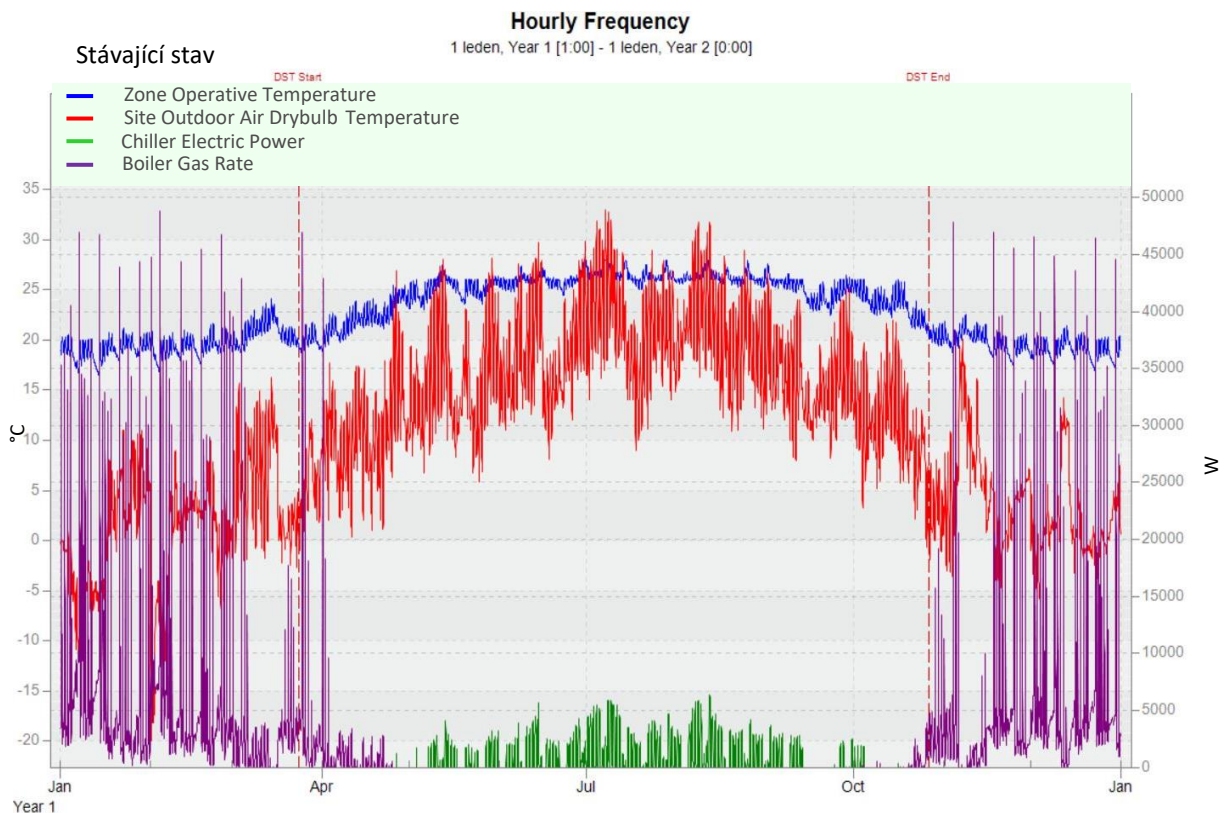


Obrázek 3.5 Tepelný výkon ohřivače VZT jednotky – tmavě zelená čára

Obrázek 3.5 ukazuje tepelný výkon vzduchotechnické jednotky v zimní období, vyobrazen tmavě zelenou barvou. Je na něm také patrné navýšení výkonu jednotky po útlumovém provozu budovy.

3.1.3 Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu

Výkon dosažený spalováním plynu v kotli a elektrický příkon chilleru v simulaci stávajícího stavu budovy pro typickou zónu kanceláře (viz kapitola 2.3.2).



Obrázek 3.6 Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu – stávající stav

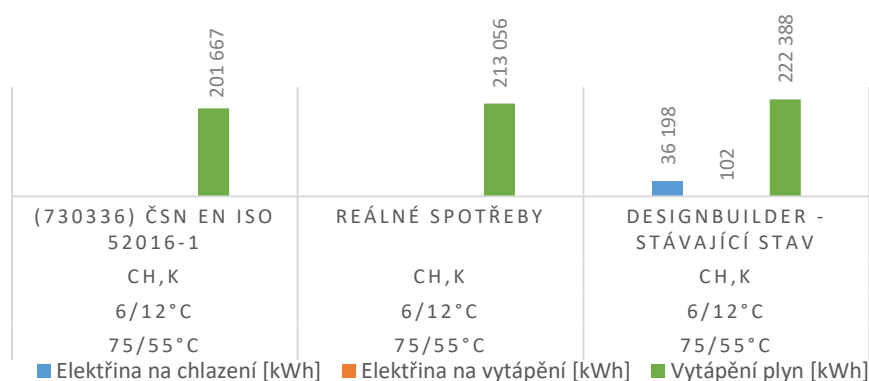
Simulací v programu DesignBuilder jsou získána data pro roční průběh hodinových potřeb energie typického podlaží zadané budovy na vytápění a chlazení (Obrázek 3.6). Maximální potřebný výkon kotle na vytápění činí 48 830 W a příkon elektrické energie na chlazení 4 200 W. Z grafu jsou také patrné měsíce, po dobu kterých je budova vytápěna či chlazená a výkon kotle a el. příkon potřebný pro provoz chilleru v závislosti na venkovní teplotě a víkendech, kdy je budova provozována pouze v teplotním útlumu.

3.1.4 Spotřeby energií tepla a chladu

Při validaci roční spotřeby tepla budovy podle normy (730336) ČSN EN ISO 52016-1 a verifikaci reálné spotřeby tepla budovy z let 2017 a 2018 výpočetního modelu v programu DesignBuilder, je dosaženo poměrně dobrého výsledku (viz Tabulka 3.1).

Tabulka 3.1 Spotřeby tepla a chladu – stávající stav

	(730336) ČSN EN ISO 52016-1	Reálná spotřeba	Stávající stav DesignBuilder
Spotřeba tepla [kWh]	201 667	213 056	222 388
Spotřeba chladu [kWh]	Není k dispozici	Není k dispozici	36 300



Obrázek 3.7 Spotřeba tepla a chladu – stávající stav

Vizuální srovnání spotřeb energií je znázorněno v grafu (Obrázek 3.7). Největší rozdíl ve spotřebě tepla nastal mezi simulací v programu DesignBuilder a spotřebou tepla vypočítanou podle normy (730336) ČSN EN ISO 52016-1, a to 9 %. Tento rozdíl je zapříčiněn zvolením okrajových podmínek při výpočtu modelu simulace (viz kapitola 2.5). Tímto srovnáním lze považovat model budovy za verifikovaný.

3.2 VARIANTA V1

Varianta V1 – Tepelné čerpadlo voda-voda na vytápění i chlazení připojené k suchému chladiči doplňující plynový kondenzační kotel pro zdroj tepla a vodou chlazený chiller pro zdroj chladu (Obrázek 3.8).

3.2.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí potřeby tepla zajišťují tepelné čerpadlo Carrier 50PSW036 s prioritou jedna a stacionární kondenzační kotel s prioritou dva o teplotním spádu 75/55 °C.

Jako zdroj chladu je navrženo tepelné čerpadlo Carrier 50PSW036 s prioritou jedna a chiller priority dva s teplotním spádem 6/12 °C.

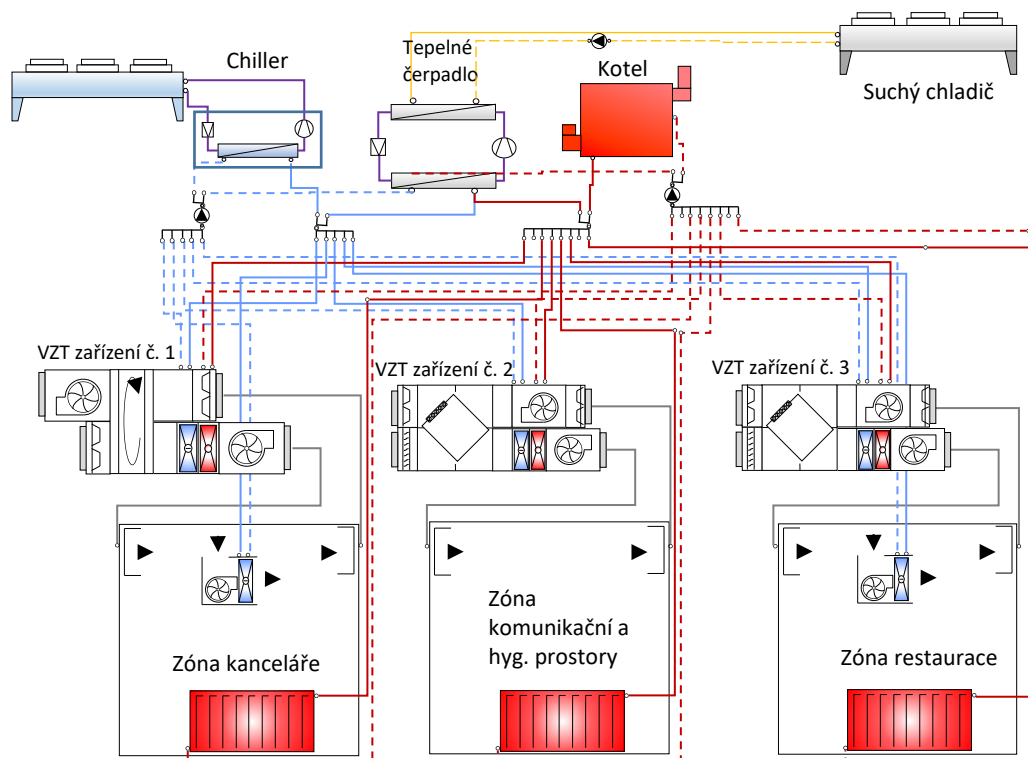
Více o stacionárním kondenzačním kotli a chilleru (viz kapitola 2.4.5).

Suchý chladič spolu s tepelnými čerpadly jsou vybrány z již přednastavených variant programu.

Tabulka 3.2 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V1

Kotel	
Jmenovitý výkon	660 kW
Chiller	
Jmenovitý výkon	584 kW
Suchý chladič	
Jmenovitý výkon	625 kW
Tepelné čerpadlo - vytápění	
Nemrznoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	157,5 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	35 kW
Tepelné čerpadlo - chlazení	
Nemrznoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	135 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	36,3 kW

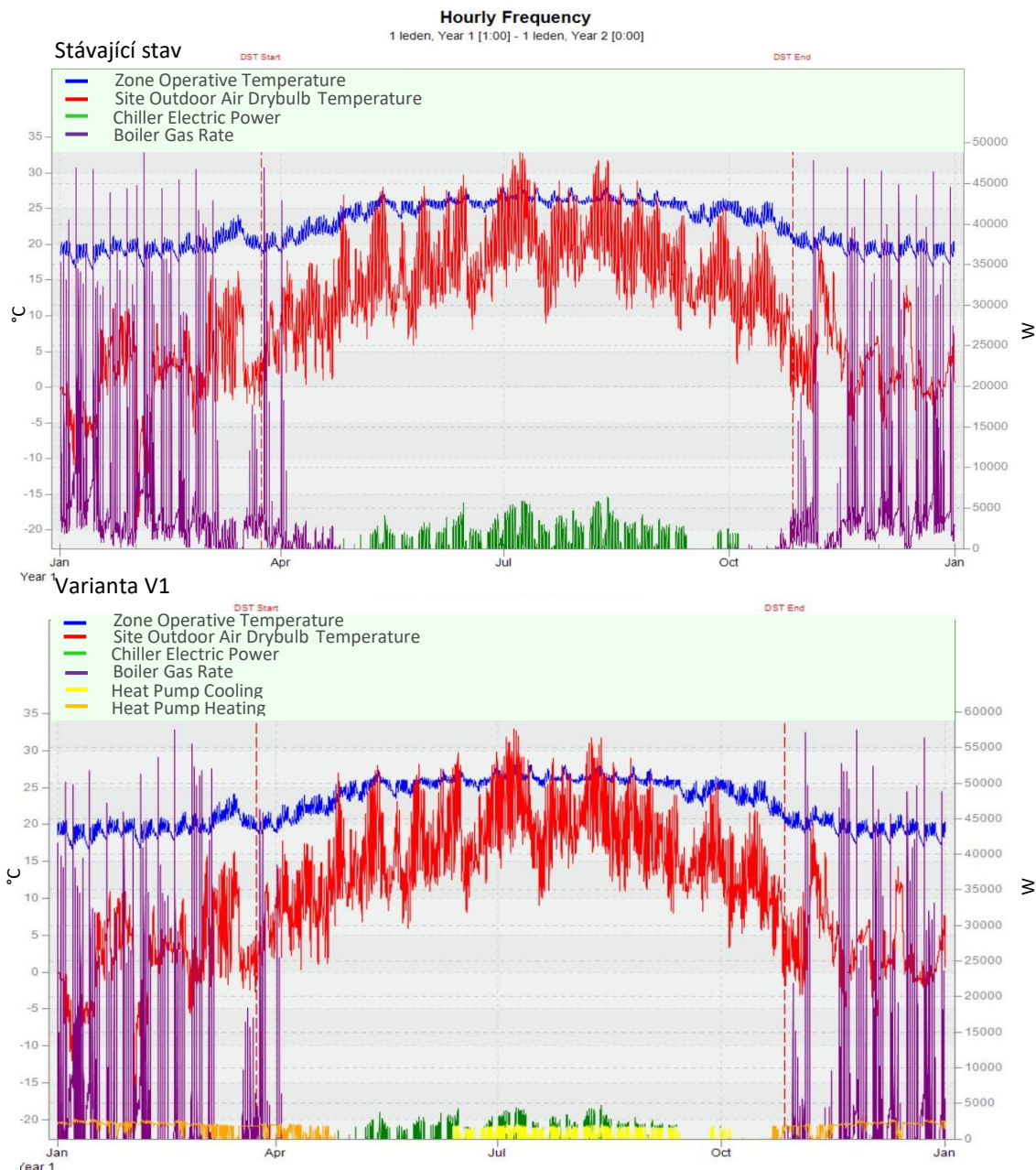
V1 – Tepelné čerpadlo voda–voda na vytápění a chlazení doplňující stavající stav s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení



Obrázek 3.8 Schéma zapojení HVAC ve variantě V1

3.2.2 Příkony zdroje tepla a chladu

Obrázek 3.9 ukazuje porovnání výkonu kotle a el. příkonu chilleru stávajícího stavu s variantou V1 typického podlaží, zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).



Obrázek 3.9 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu –stávající stav a varianta V1

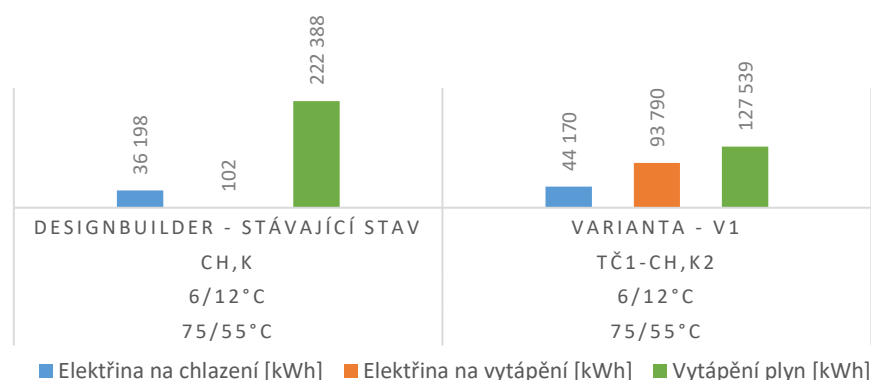
Ve variantě V1, na rozdíl od stávajícího stavu, je patrný rozdíl v provozu zdrojů tepla a chladu. Pokrytím spotřeby tepla tepelným čerpadlem spolu s kotlem se snížila doba provozu kotle, avšak se navýšil jeho výkon. Nárůst výkonu je zapříčiněn vysokým teplotním spádem na vytápění a provozem budovy v útlumovém režimu tepelným čerpadlem. Při spuštění kotle se začátkem doby obsazenosti budovy, k dosažení požadovaného tepelného komfortu, nastane navýšení výkonu kotle. Elektrický příkon potřebný pro provoz chilleru se sníží.

3.2.3 Spotřeby energií zdroje tepla a chladu

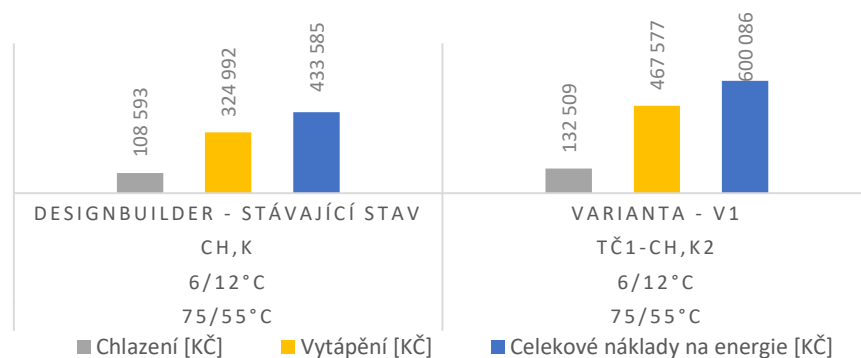
Následující tabulka uvádí celkovou roční spotřebu tepla a chladu budovy.

Tabulka 3.3 Spotřeby tepla a chladu – varianta V1

	Spotřeba zemního plynu [kWh]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Cena zemního plynu [Kč]	Cena elektrické energie [Kč]
Stávající stav	222 388	36 300	324 686	108 900
Varianta V1	127 539	137 960	186 206	413 880
Neúspora	6 811 [kWh]		166 500 [Kč]	



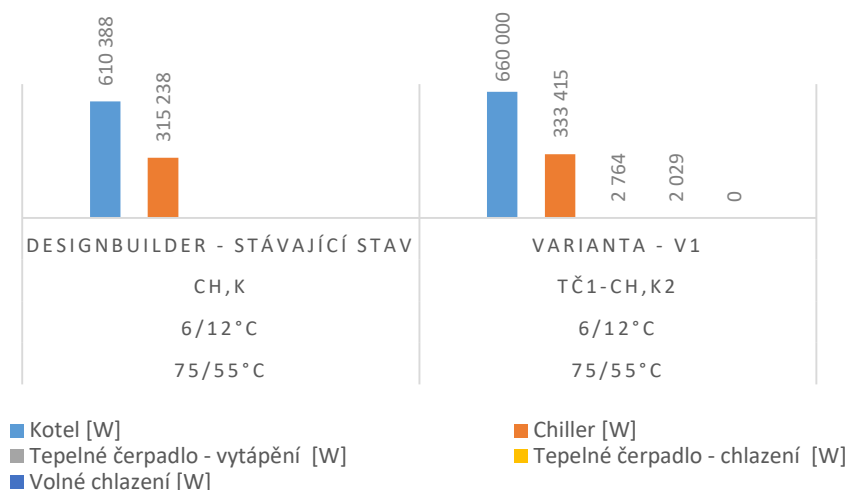
Obrázek 3.10 Spotřeby tepla a chladu – varianta V1



Obrázek 3.11 Cenové srovnání spotřeby tepla a chladu – varianta V1

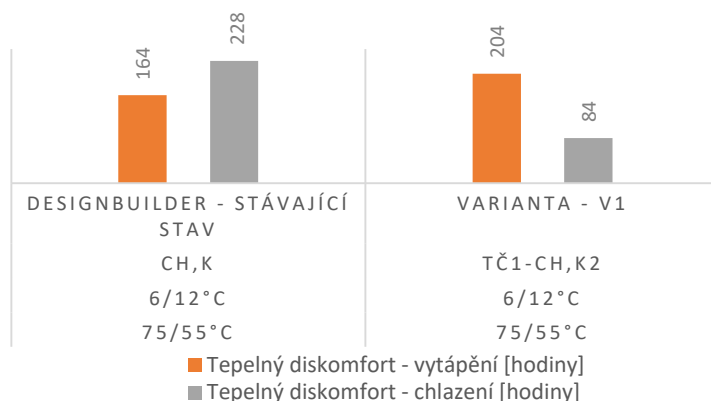
Ve variantě tepelné čerpadlo voda-voda na vytápění i chlazení, připojené k suchému chladiči doplňující stávající stav, vzrostla spotřeba elektřiny budovy u zdroje tepla o 93 688 kWh a spotřeba plynu budovy klesla o 94 84 kWh, což při uvažovaných cenách za plyn a elektřinu vede k navýšení celkových ročních nákladů za energie o více jak 38 %.

3.2.4 Výkony zdroje tepla a chladu



Obrázek 3.12 Maximální potřebný výkon zdroje tepla a chladu – varianta V1

3.2.5 Tepelný komfort



Obrázek 3.13 Tepelný diskomfort – varianta V1

Z této varianty vyplývá, že vytápění tepelným čerpadlem v prioritě jedna vede k navýšení výkonu kotle, a to na jeho maximální výkon – 660 kW, pro dosažení požadovaného tepelného komfortu v budově. To má za následek i navýšení počtu hodin tepelného diskomfortu o více jak 24 %. Došlo také k navýšení výkonu chilleru, a tím snížení počtu hodin tepelného komfortu na chlazení o 63 %. Navýšení hodin tepelného diskomfortu je zapříčiněno tím, že mimo pracovní dobu je budova provozována v útlumovém režimu pomocí tepelného čerpadla. Kotel nebo chiller se spouští se začátkem pracovní doby.

3.3 VARIANTA V2

Varianta V2 – Tepelné země-voda na vytápění a chlazení doplňující plynový kondenzační kotel pro zdroj tepla a vodou chlazený chiller pro zdroj chladu (Obrázek 3.14).

3.3.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí potřeby tepla zajišťují tepelné čerpadlo Carrier 50PSW036 s prioritou jedna a stacionární kondenzační kotel s prioritou dva o teplotním spádu 75/55 °C.

Jako zdroj chladu je navrženo tepelné čerpadlo Carrier 50PSW036 s prioritou jedna a chladičem kapaliny priority dva s teplotním spádem 6/12 °C.

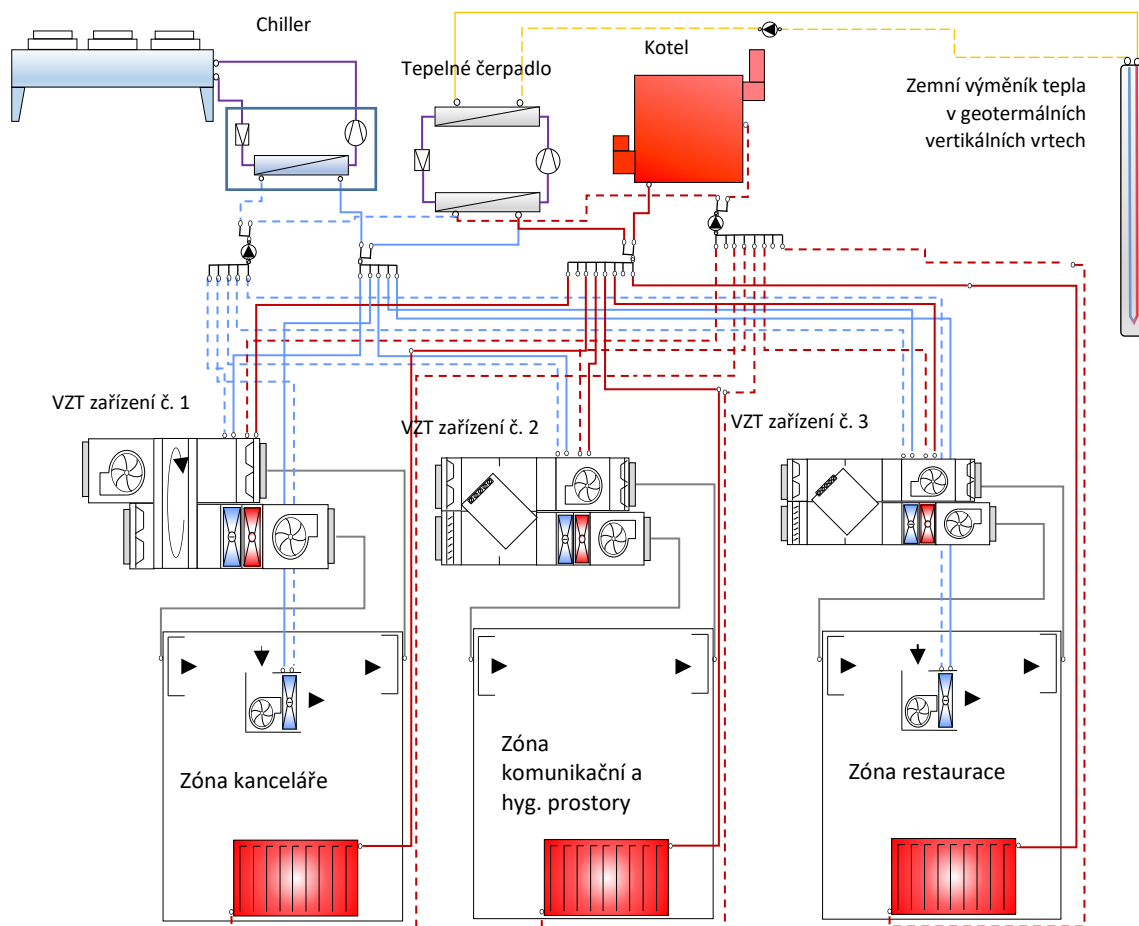
Více o stacionárním kondenzačním kotli a chilleru (viz kapitola 2.2).

Tepelné čerpadlo země-voda je provedeno pomocí zemních výměníků tepla GVV a jsou vybrány z již přednastavených variant programu.

Tabulka 3.4 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V2

Kotel	
Jmenovitý výkon	660 kW
Chiller	
Jmenovitý výkon	584 kW
Zemní výměníky tepla – GVV	
Počet vrtů	125 ks
Délka vrtu	50 m
Tepelné čerpadlo - vytápění	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	157,5 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	35 kW
Tepelné čerpadlo - chlazení	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	135 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	36,3 kW

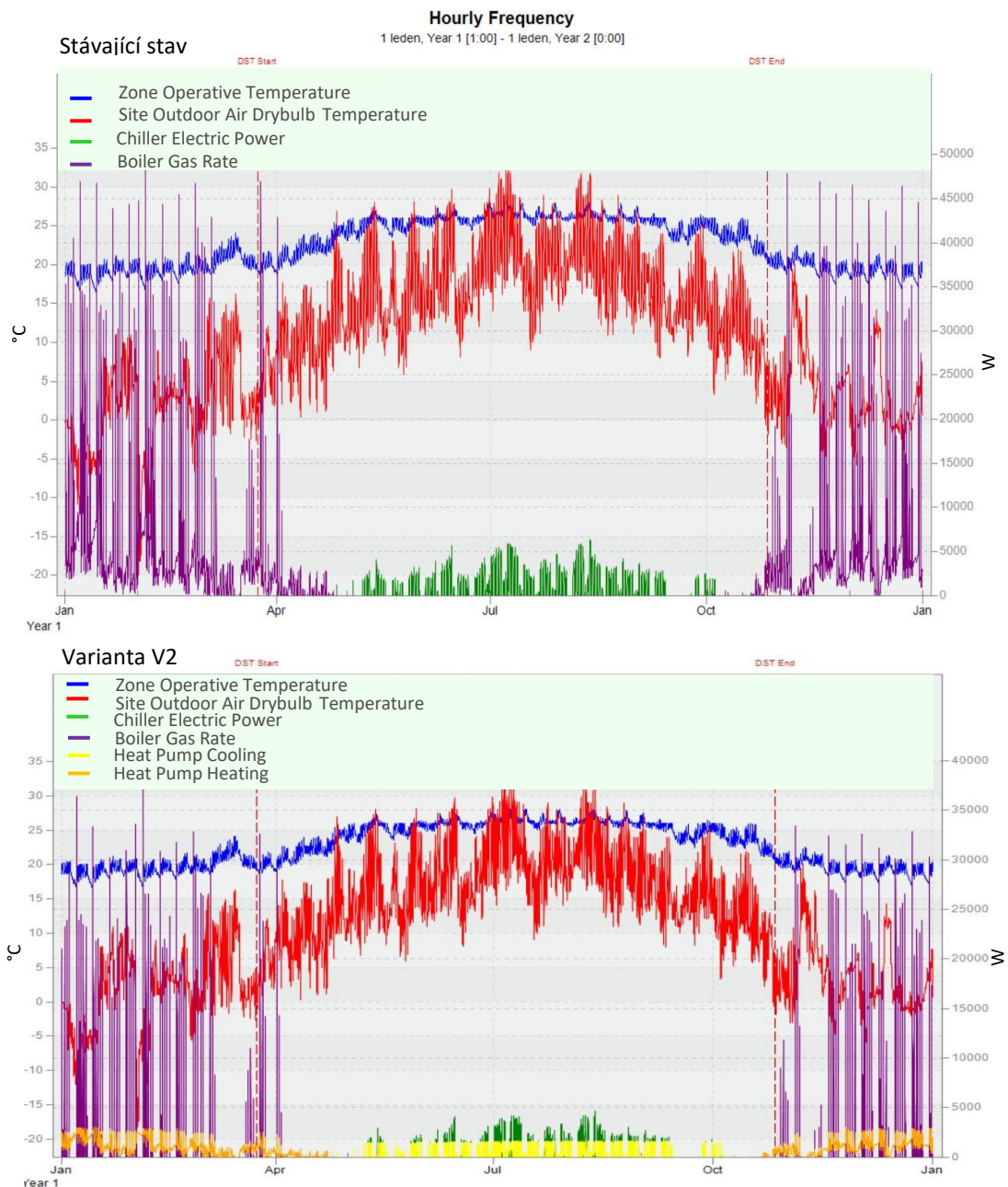
V2 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a chlazení doplňující stávající stav s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení



Obrázek 3.14 Schéma zapojení HVAC ve variantě V2

3.3.2 Příkony zdroje tepla a chladu

Obrázek 3.15 ukazuje porovnání výkonu kotle a el. příkonu chilleru stávajícího stavu a varianty V2, typické zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).



Obrázek 3.15 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu –stávající stav a varianta V2

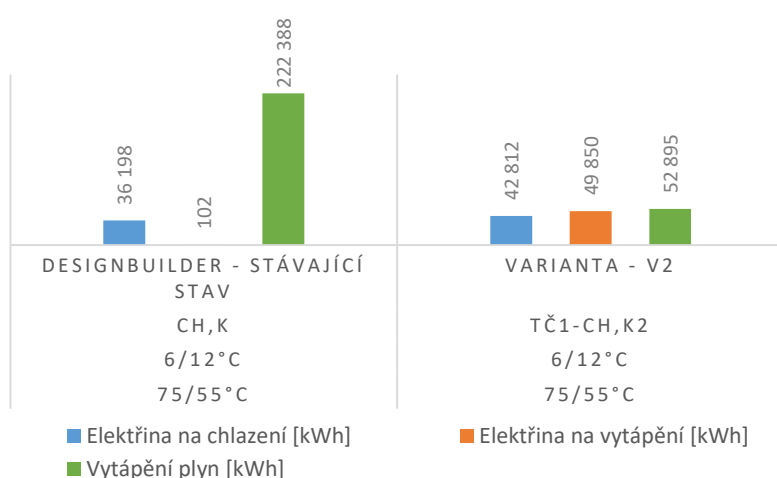
Ve variantě V2, na rozdíl od stávajícího stavu, je patrný rozdíl v provozu zdrojů tepla a chladu. Pokrytím spotřeby tepla tepelným čerpadlem spolu s kotlem se sníží doba provozu kotle. Tepelné čerpadlo také sníží el. příkon potřebný pro provoz chilleru.

3.3.3 Spotřeby energií zdroje tepla a chladu

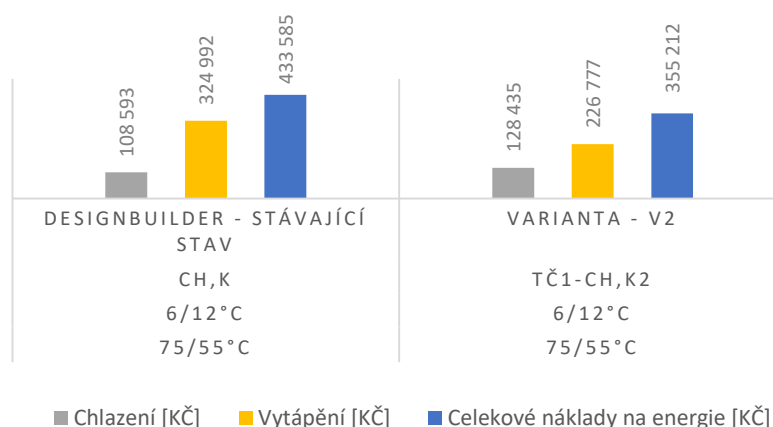
Následující tabulka uvádí celkovou roční spotřebu tepla a chladu budovy.

Tabulka 3.5 Spotřeby tepla a chladu – varianta V2

	Spotřeba zemního plynu [kWh]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Cena zemního plynu [Kč]	Cena elektrické energie [Kč]
Stávající stav	222 388	36 300	324 686	108 900
Varianta V2	52 895	92 662	77 182	277 986
Úspora	113 131 [kWh]		78 418 [Kč]	



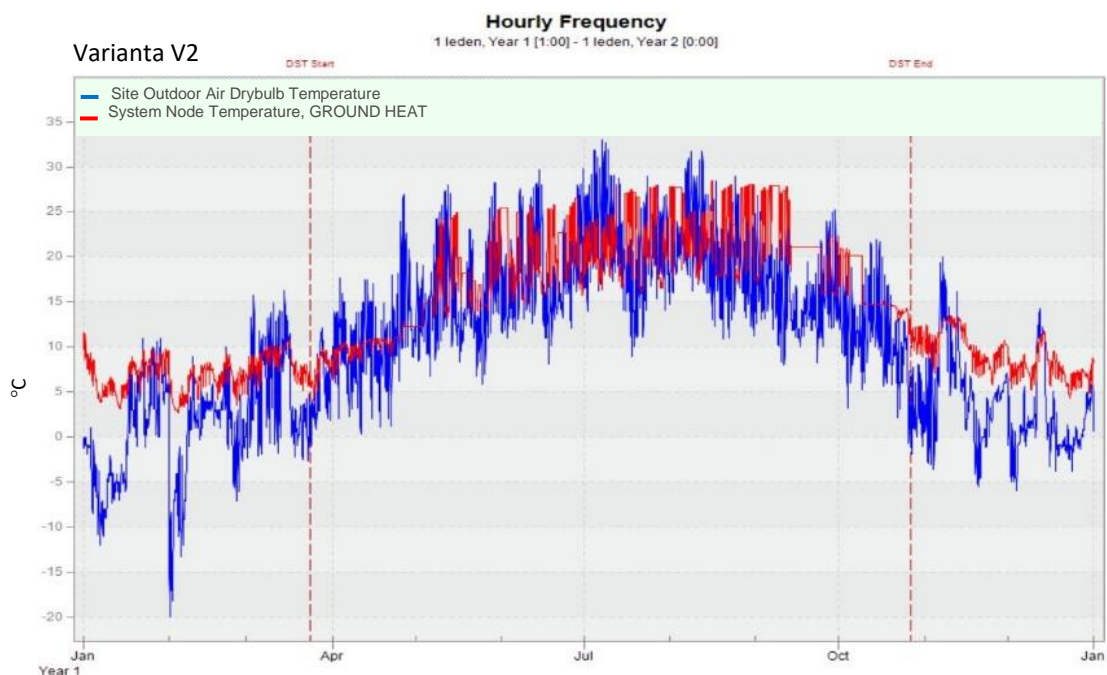
Obrázek 3.16 Spotřeby tepla a chladu – varianta V2



Obrázek 3.17 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V2

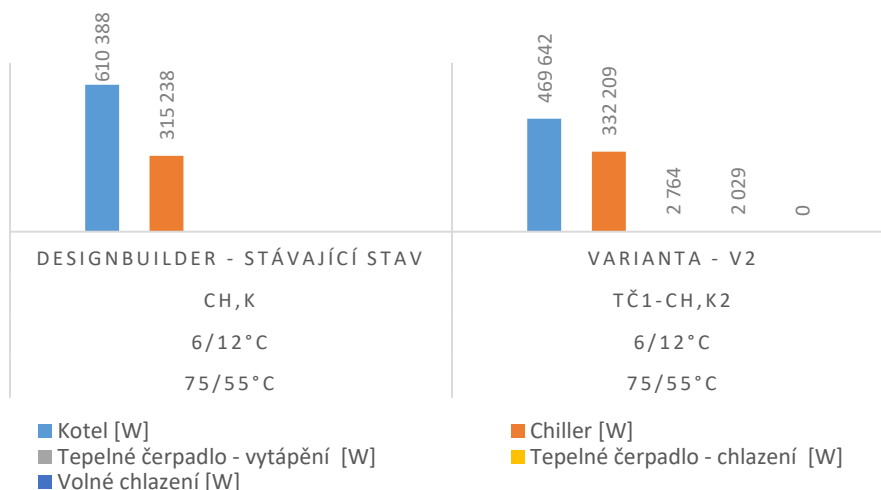
Celková roční spotřeba tepla a chladu u této varianty je téměř rovnoměrně rozložena mezi spotřebu elektřiny na chlazení (42 812 kWh), vytápění (49 850 kWh) a plynu na vytápění (52 895 kWh) (Obrázek 3.16), což má za následek celkové snížení nákladů na energie o 18 %, jak ukazuje Obrázek 3.17.

3.3.4 Výkony zdroje tepla a chladu



Obrázek 3.18 Teplota odtoku vody ze zemních výměníků– varianta V2

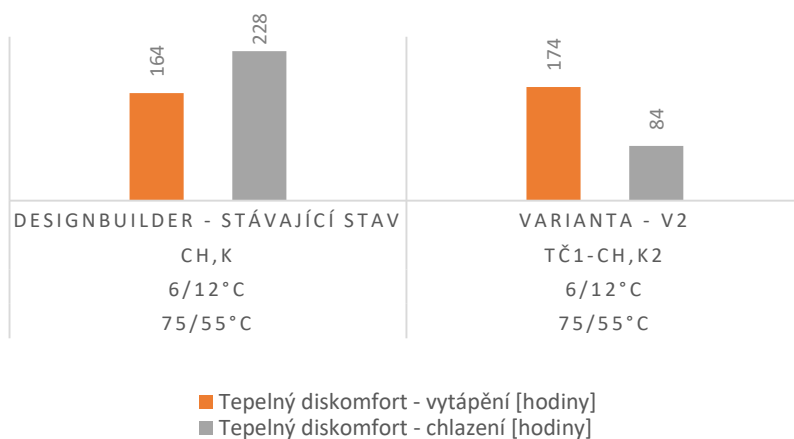
Výše uvedený obrázek ukazuje průběh teploty vody v zemním výměníku tepla spolu s venkovní teplotou. Výběrem výkonu tepelného čerpadla je zajištěna teplota vody v zemním výměníku tepla mezi 2,5–27 °C.



Obrázek 3.19 Maximální potřebný výkon zdrojů tepla a chladu – varianta V2

Graf (Obrázek 3.19) ukazuje, že u této varianty došlo ke změnám výkonu kotle a chilleru. Výkon tepelného čerpadla a počet zemních vrtů vede ke snížení maximálního výkonu kotle o více jak 19 %.

3.3.5 Tepelný komfort



Obrázek 3.20 Tepelný diskomfort – varianta V2

Počet hodin, kdy není dosaženo požadované komfortní teploty na vytápění, se navýšil pouze o 10 hodin ročně. Maximální výkon chilleru se zvýšil o 5,4 %, na rozdíl od stávajícího stavu (Obrázek 3.19). Počet hodin, kdy není dosaženo komfortní teploty na chlazení, poklesl o 144 hodin za rok, což je o více jak 63 %, než u stávajícího stavu (Obrázek 3.20).

3.4 VARIANTA V3

Varianta V3 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení doplňující plynový kondenzační kotel pro zdroj tepla a vodou chlazený chiller pro zdroj chladu (Obrázek 3.21).

V této variantě je ponechán teplotní spád vody a tepelné čerpadlo na vytápění z varianty V2 (viz kapitola 3.3.1). Změněn je pouze výměník tepla na chlazení.

3.4.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí potřeby tepla zajišťují tepelné čerpadlo Carrier 50PSW036 s prioritou jedna a stacionární kondenzační kotel s prioritou dva o teplotním spádu 75/55 °C.

Jako zdroj chladu je navržen výměník tepla s prioritou jedna a chiller priority dva o teplotním spádu 6/12 °C.

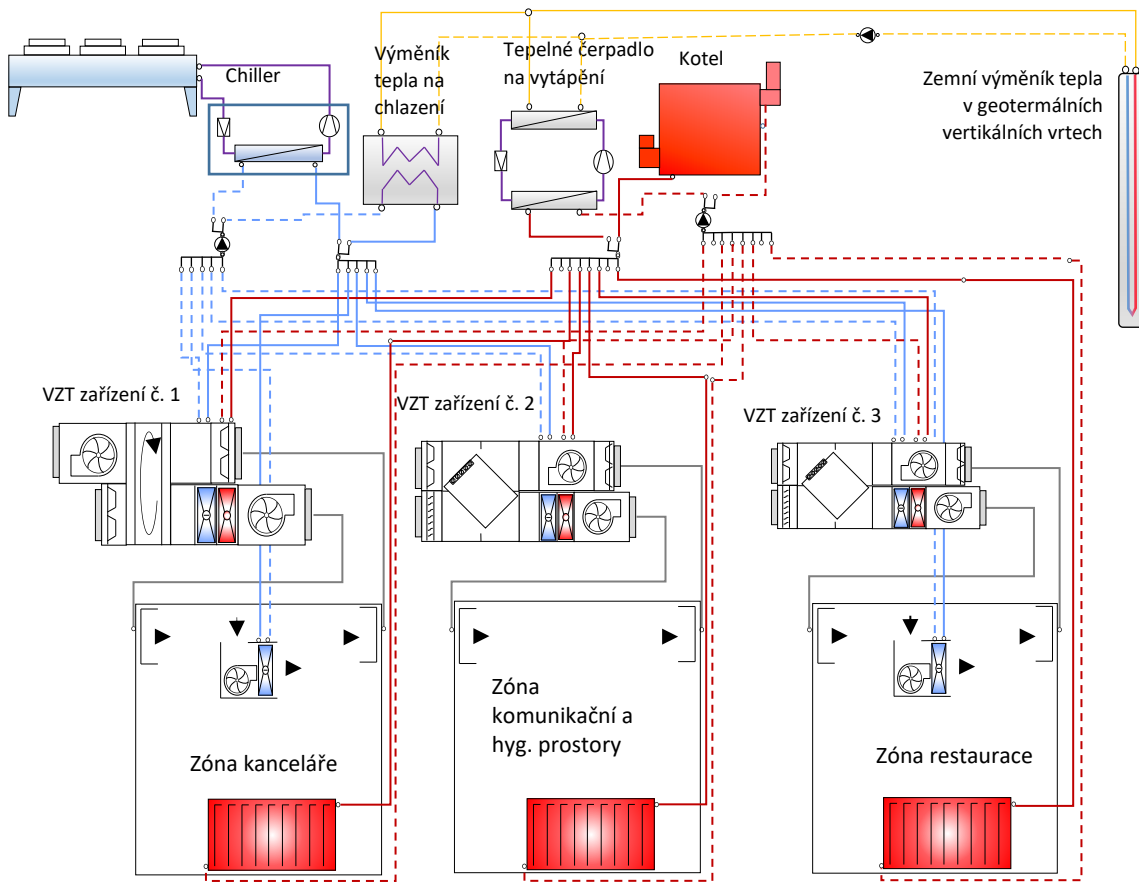
Více o stacionárním kondenzačním kotli a chilleru (viz kapitola 2.2).

Tepelné čerpadlo země-voda je provedeno pomocí zemních výměníků tepla GVV a spolu s výměníkem tepla jsou vybrány z již přednastavených variant programu.

Tabulka 3.6 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V3

Kotel	
Jmenovitý výkon	660 kW
Chiller	
Jmenovitý výkon	584 kW
Zemní výměníky tepla – GVV	
Počet vrtů	125 ks
Délka vrtu	50 m
Tepelné čerpadlo - vytápění	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	157,5 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	35 kW
Výměník tepla - chlazení	
Jmenovitý výkon	337,8 kW

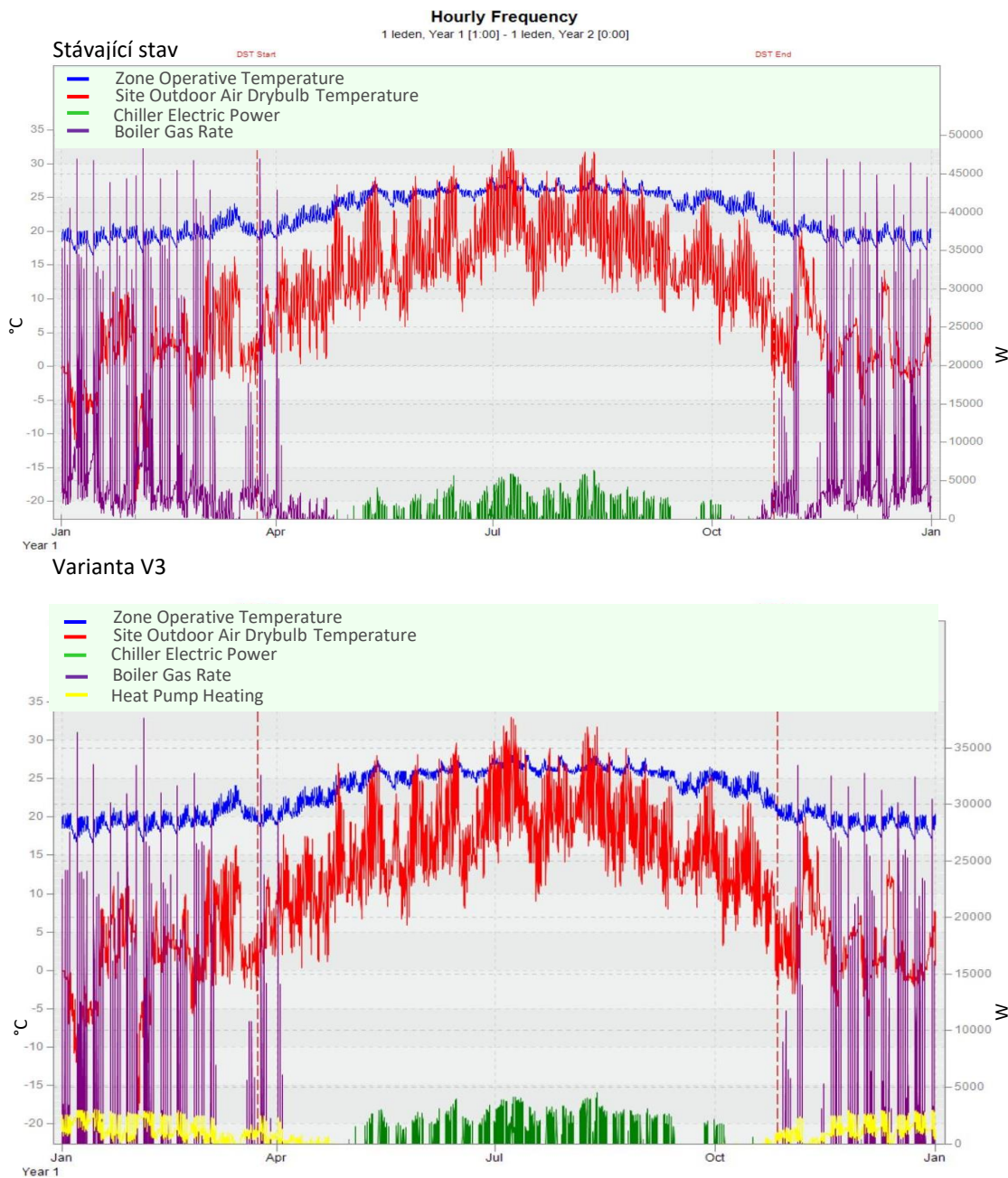
V3 - Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení doplňující stávající stav s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 6/12 °C na chlazení



Obrázek 3.21 Schéma zapojení HVAC ve variantě V3

3.4.2 Příkony zdroje tepla a chladu

Obrázek 3.22 ukazuje porovnání výkonu kotle a el. příkonu chilleru stávajícího stavu s variantou V3 typického podlaží, zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).



Obrázek 3.22 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu – stávající stav a varianty V3

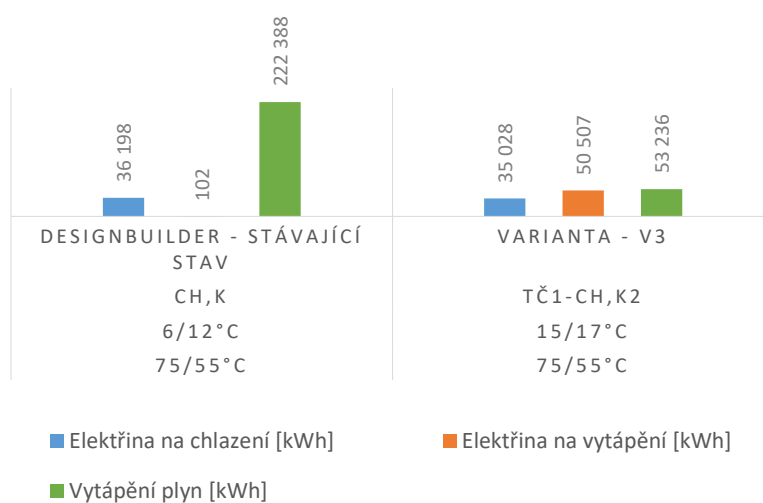
Ve variantě V3, na rozdíl od stávajícího stavu, je patrný rozdíl v provozu zdrojů tepla a chladu. Pokrytím spotřeby tepla tepelným čerpadlem spolu s kotlem se snížila doba provozu kotle. Výměník tepla na chlazení snížil el. příkon potřebný pro provoz chilleru.

3.4.3 Spotřeby energií zdroje tepla a chladu

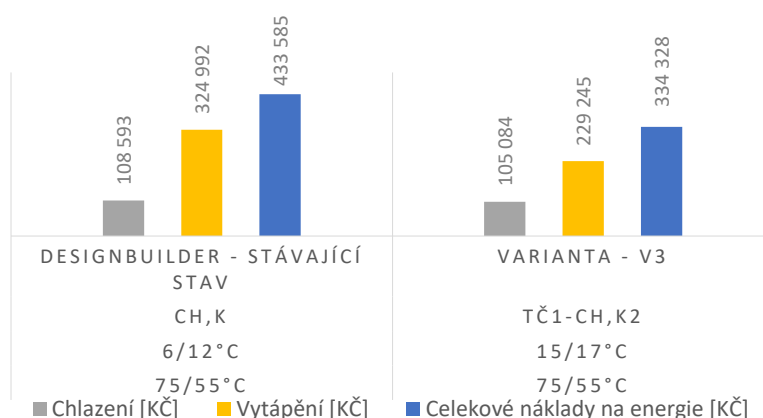
Následující tabulka uvádí celkovou roční spotřebu tepla a chladu budovy.

Tabulka 3.7 Spotřeby tepla a chladu – varianta V3

	Spotřeba zemního plynu [kWh]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Cena zemního plynu [Kč]	Cena elektrické energie [Kč]
Stávající stav	222 388	36 300	324 686	108 900
Varianta V3	53 236	85 535	77 725	256 605
Úspora	120 099 [kWh]		99 256 [Kč]	



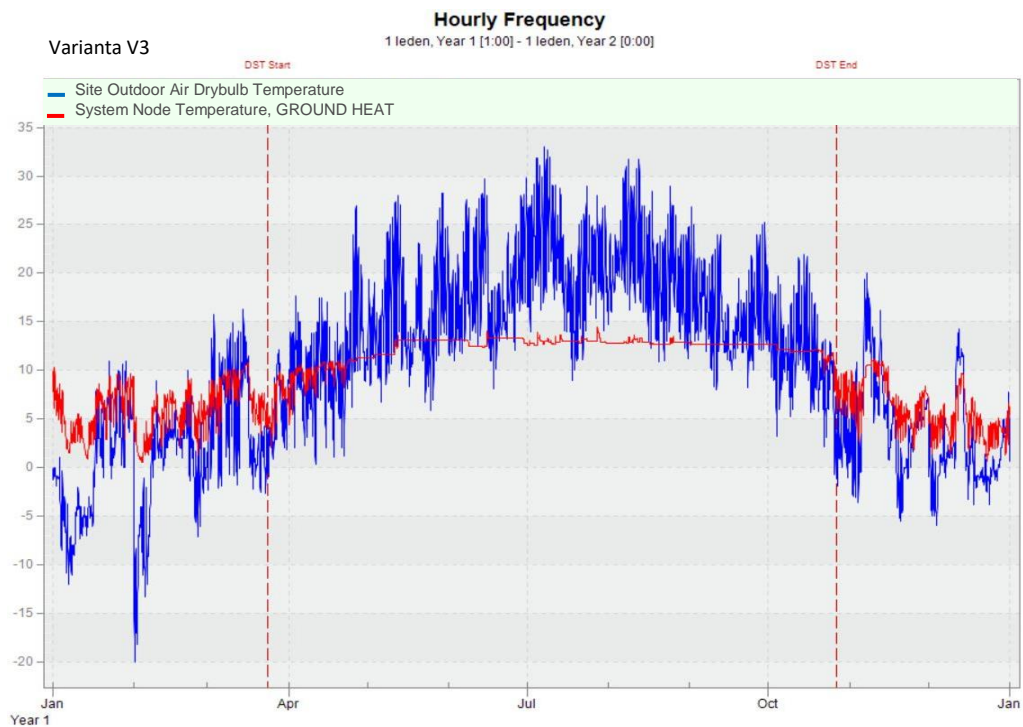
Obrázek 3.23 Spotřeby tepla a chladu – varianta V3



Obrázek 3.24 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V3

I v této variantě stejně, jako ve variantě V2, je dosaženo celkového snížení ročních nákladů na energie o 22,8 %, než u stávajícího stavu. Nutno však podotknout, že se navýšil počet hodin, kdy není dosaženo komfortní teploty jak na vytápění, tak na chlazení (Obrázek 2.27), což může mít právě za následek snížení celkových nákladů na energie.

3.4.4 Výkony zdroje tepla a chladu



Obrázek 3.25 Teplota odtoku vody ze zemních výměníků – varianta V3

Obrázek 3.25 ukazuje teplotu vody v zemním výměníku tepla. Je z něj patrný konstantní výkon výměníku tepla na zajištění chlazení pro dosažení tepelného komfortu.

3.5 VARIANTY V4 – V8

Varianta V4–V8 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a chlazení doplňující plynový kondenzační kotel pro zdroj tepla a vodou chlazený chiller jakožto zdroj chladu (Obrázek 3.28).

3.5.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí potřeby tepla zajišťují tepelné čerpadlo s prioritou jedna a stacionární kondenzační kotel s prioritou dva.

Jako zdroj chladu je navrženo tepelné čerpadlo s prioritou jedna a chladičem kapaliny priority dva.

Více o stacionárním kondenzačním kotli a chilleru (viz kapitola 2.2).

U tepelného čerpadla země-voda je zdroj energie instalován pomocí „U“ smyčky výměníku tepla do pilot budovy – energopilot. Výkony tepelných čerpadel jsou voleny s ohledem na maximální teplotu vody vystupující z energopilot.

Je zkoumáno celkem 5 variant vytápění a chlazení, ve kterých se mění pouze teplotní spády. Ty jsou voleny tak, aby jejich kombinací došlo k co největšímu snížení teplotního spádu u vytápění z původních 75/55 °C na 45/35 °C a navýšení teplotního spádu na chlazení z 6/12 °C na 15/17 °C.

Varianty	teplotní spád vytápění [°C]	teplotní spád chlazení [°C]
V4	75/55	6/12
V5	75/55	15/17
V6	45/35	12/16
V7	45/35	9/15
V8	55/45	15/17

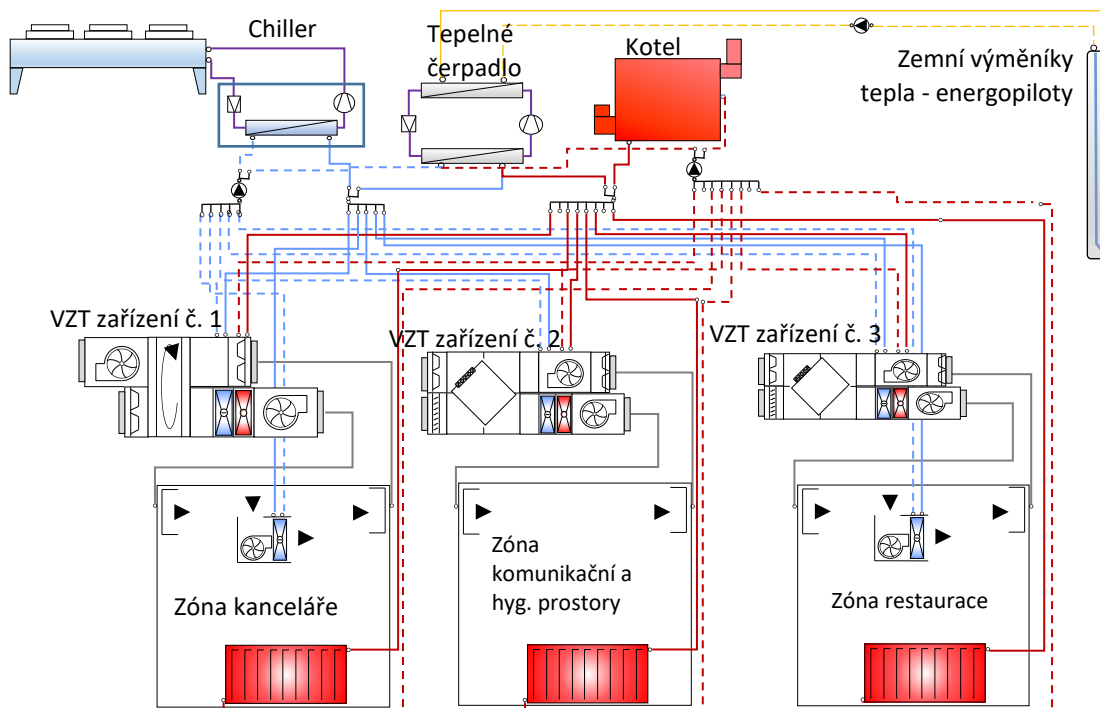
Tabulka 3.8 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianty V4 – V8

Kotel	
Jmenovitý výkon	660 kW
Chiller	
Jmenovitý výkon	584 kW
Zemní výměníky tepla - energopiloty	
Počet pilot	76 ks
Délka	20 m

Tabulka 3.9 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianty V4 – V8

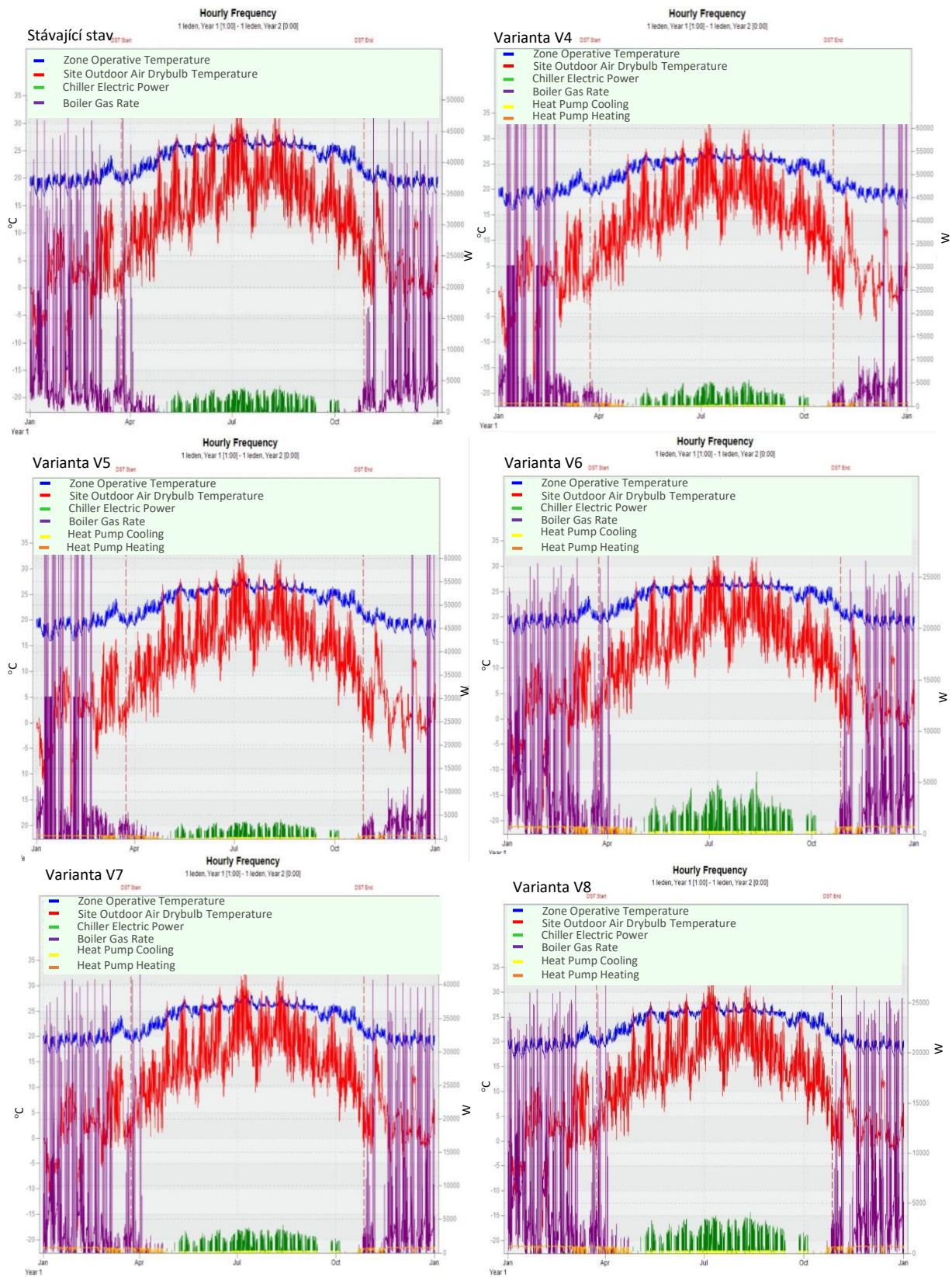
Tepelné čerpadlo - vytápění	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	25 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	12,5 kW
Tepelné čerpadlo - chlazení	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitý výkon	12,5 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	7,5 kW

V4 – V8 Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a chlazení doplňující stávající stav



Obrázek 3.28 Schéma zapojení HVAC ve variantách V4 – V8

3.5.2 Příkony zdroje tepla a chladu



Obrázek 3.29 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu – stávající stav a varianty V4 až V8

Obrázek 3.29 ukazuje porovnání výkonu kotle a el. příkonu chilleru stávajícího stavu a variant V4 až V8 typického podlaží zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).

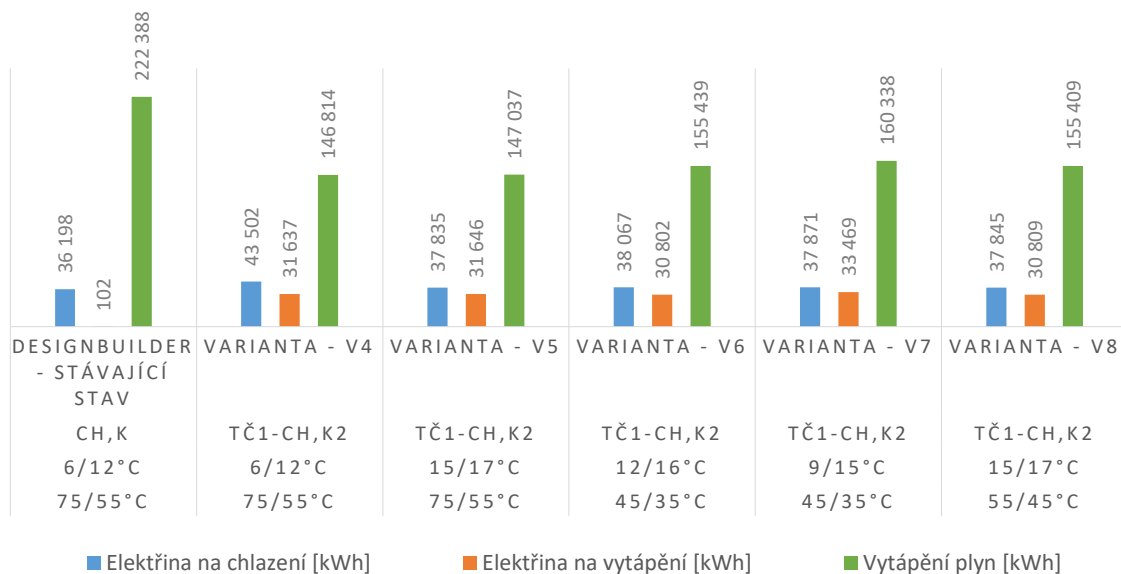
V těchto variantách, na rozdíl od stávajícího stavu, je patrný rozdíl v provozu zdrojů tepla a chladu vlivem změn teplotních spádů soustavy. Pokrytím spotřeby tepla tepelným čerpadlem spolu s kotlem se sníží doba provozu kotle. Ve variantách V6 a V8 se sníží jeho výkon vlivem nízkého teplotního spádu vytápění. Naopak ponechání teplotního spádu na vytápění stávajícího stavu (75/55 °C) vede k navýšení výkonu kotle (varianty V4 a V5). Obdobné změny lze pozorovat i u teplotního spádu na chlazení a el. příkonu chilleru.

3.5.3 Spotřeby energií tepla a chladu

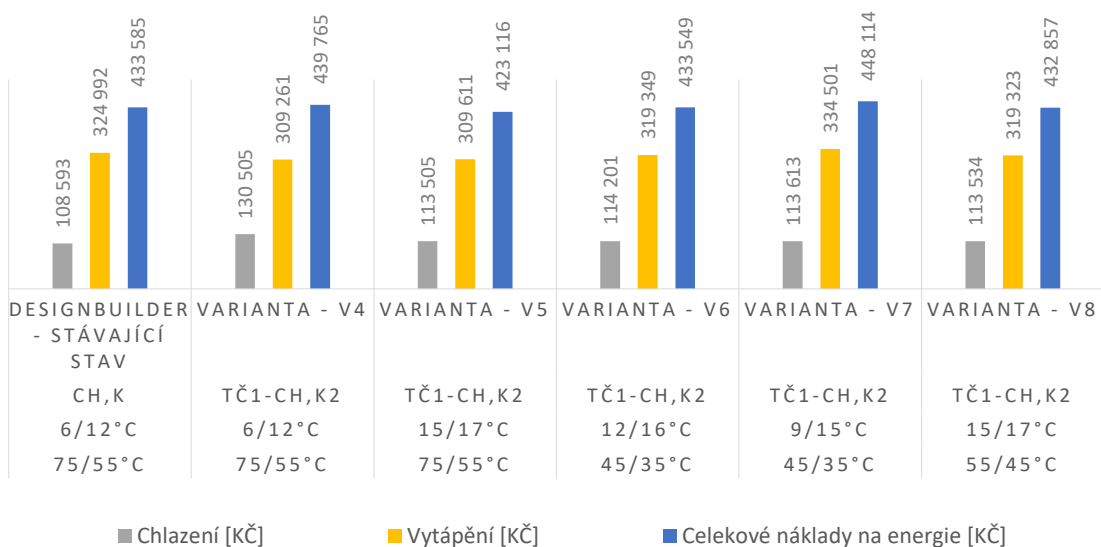
Následující tabulka uvádí celkovou roční spotřebu tepla a chladu budovy ve variantách V4–V8.

Tabulka 3.9 Spotřeby tepla a chladu – varianty V4 až V8

	Spotřeba zemního plynu [kWh]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Cena zemního plynu [Kč]	Cena elektrické energie [Kč]
Stávající stav	222 388	36 300	324 686	108 900
Varianta V4	146 814	75 139	214 348	225 417
Varianta V5	147 037	69 481	214 674	208 443
Varianta V6	155 439	68 869	226 941	206 607
Varianta V7	160 338	71 340	234 093	214 020
Varianta V8	155 409	68 654	226 897	205 962
Neúspora V4	36 735 [kWh]		6 179 [Kč]	
Úspora V5	39 735 [kWh]		10 469 [Kč]	
Úspora V6	42 170 [kWh]		6 179 [Kč]	
Neúspora V7	27 010 [kWh]		1 4527 [Kč]	
Úspora V8	34 625 [kWh]		727 [Kč]	



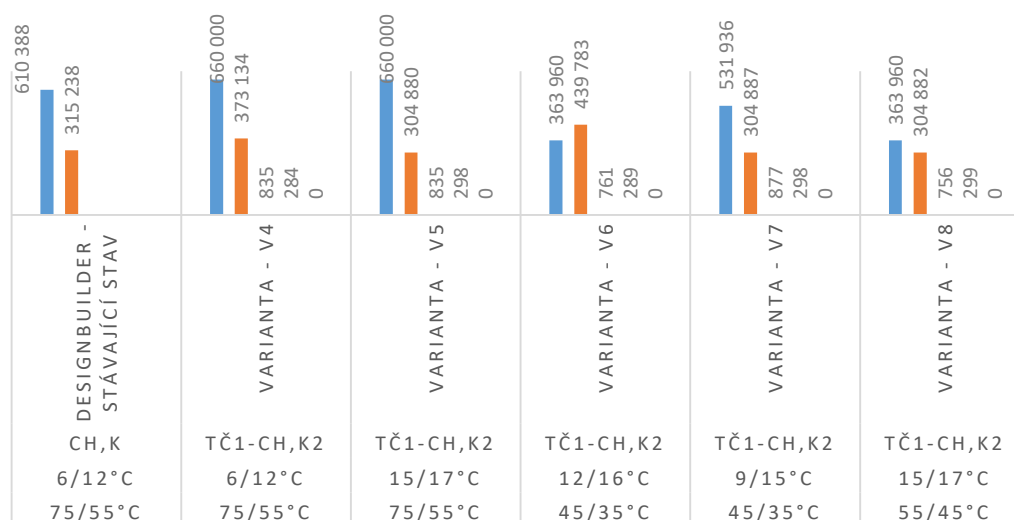
Obrázek 3.30 Spotřeby tepla a chladu – varianty V4 až V8



Obrázek 3.31 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianty V4 až V8

U těchto variant, kdy jsou tepelná čerpadla země-voda instalována pomocí „U“ smyčky výměníku tepla do pilot budovy, vyšla jako cenově nejvýhodnější Varianta V5, ve které je dosaženo snížení celkových ročních nákladů na energii o 2,4 % (Tabulka 3.9 a Obrázek 3.31), na rozdíl od stávajícího stavu.

3.5.4 Výkony zdroje tepla a chladu



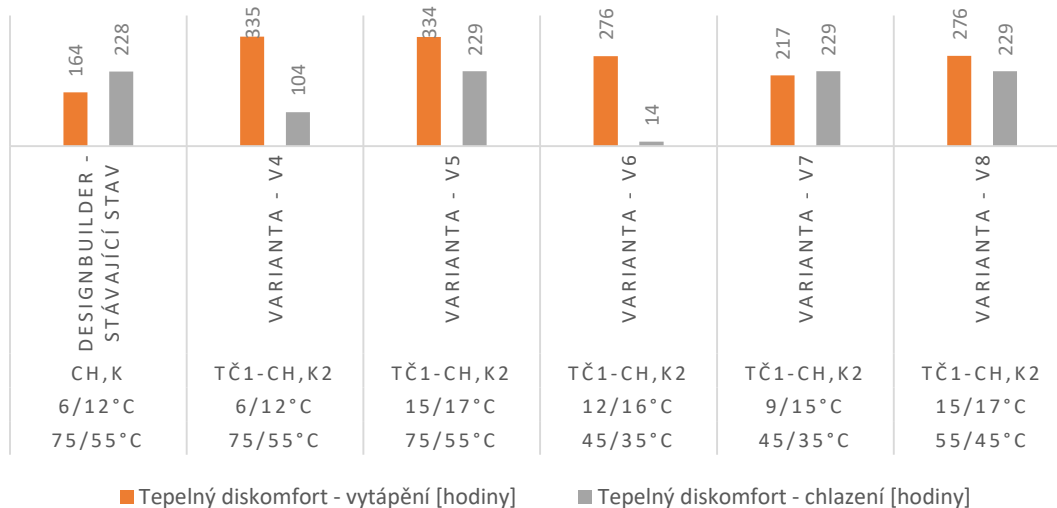
■ Kotel [W] ■ Chiller [W] ■ Tepelné čerpadlo - vytápění [W] ■ Tepelné čerpadlo - chlazení [W] ■ Volné chlazení [W]

Obrázek 3.32 Maximální potřebný výkon zdrojů tepla a chladu – varianty V4 až V8

Obrázek 3.32 ukazuje vliv změn teplotních spádů soustavy na změny výkonů systému vytápění a chlazení. S použitím tepelného čerpadla spolu se stávajícím systémem a ponecháním teplotního spádu vytápění 75/55 °C u variant V4 a V5, který je v těchto variantách zároveň i nejvyšší, vzrostl výkon kotle na jeho maximální možný výkon. Nárůst výkonu je zapříčiněn provozem budovy v útlumovém režimu pouze tepelnými čerpadly. Při spuštění kotle se začátkem doby obsazenosti budovy, pro dosažení tepelného komfortu, nastane navýšení výkonu kotle. Naopak se snižováním teplotního spádu vytápění klesal i výkon kotle na rozdíl do stávajícího stavu. Obdobné změny lze pozorovat i u teplotního spádu na chlazení.

3.5.5 Tepelný komfort

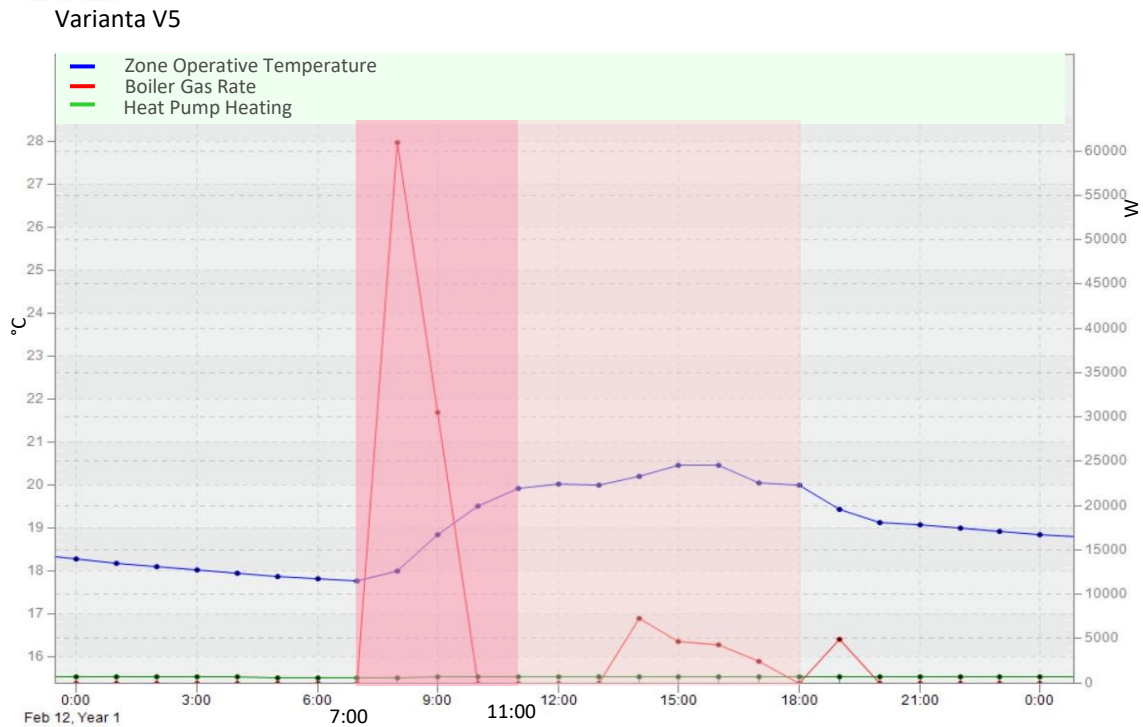
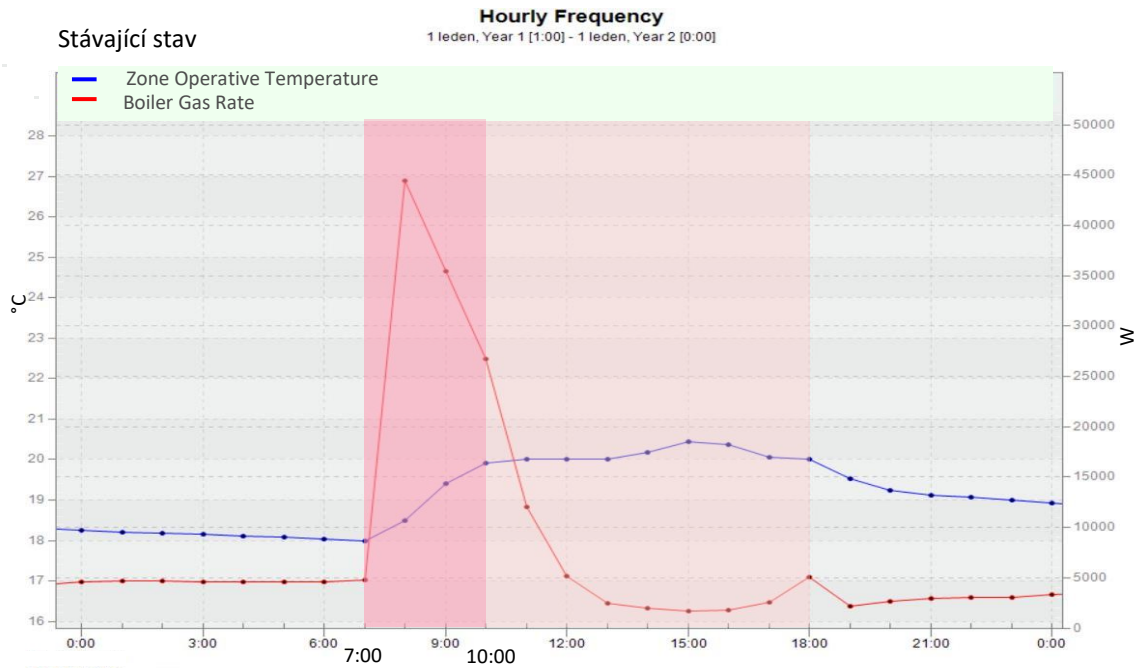
Navýšení počtu hodin tepelného diskomfortu je zapříčiněno tím, že v útlumovém režimu je budova provozována pomocí tepelného čerpadla. Kotel nebo chiller se spouští se začátkem pracovní doby. Ve variantě V6 zvýšením teplotního spádu chlazení vede k téměř nulovému počtu hodin tepelného diskomfortu.



Obrázek 3.33 Tepelný diskomfort – varianty V4 až V8

Začátek plného provozu vytápění a chlazení ve stávajícím stavu je spuštěn se začátkem provozní doby budovy, čímž je dosaženo 164 hodin tepelného diskomfortu u vytápění a 60 hodin tepelného diskomfortu u chlazení. U cenově nejvýhodnější varianty V5 je však téměř největší nárůst hodin tepelného diskomfortu, a to 170 hodin u vytápění a pouze jednu hodinu u chlazení.

Obrázek 3.34 porovnává komfortní teplotu budovy jednoho pracovního dne stávajícího stavu a varianty V5. V této variantě je budova temperována pomocí tepelného čerpadla a kotel se spouští se začátkem pracovní doby. Tím dojde k nárůstu tepelného diskomfortu o jednu hodinu.



Obrázek 3.34 Nesplnění komfortní teploty stávajícího stavu s variantou V5

3.6 VARIANTA V9

Varianta V9 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení doplňující plynový kondenzační kotel pro zdroj tepla a vodou chlazený chiller pro zdroj chladu (Obrázek 3.38).

V této variantě je ponechán teplotní spád vody a tepelné čerpadlo na vytápění z varianty V5 (viz kapitola 3.5.1), která vyšla jako cenově nejvýhodnější variantou tepelného čerpadla země-voda se zdrojem energie instalovaným do energopilot. Změněn je pouze výměník tepla na chlazení.

3.6.1 Popis systému vytápění a chlazení

Pokrytí spotřeby tepla zajišťují tepelné čerpadlo s prioritou jedna a stacionární kondenzační kotel s prioritou dva o teplotním spádu 75/55 °C.

Jako zdroj chladu je navržen výměník tepla s prioritou jedna a chillerem priority dva o teplotním spádu 15/17 °C.

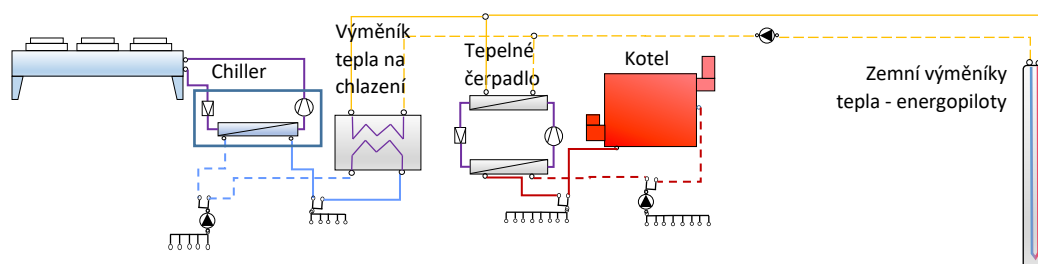
Více o stacionárních kondenzačních kotli a chilleru (viz kapitola 2.2).

Výměník tepla je vybrán z již přednastavených variant programu.

Tabulka 3.10 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V9

Kotel	
Jmenovitý výkon	660 kW
Chiller	
Jmenovitý výkon	584 kW
Zemní výměníky tepla - energopiloty	
Počet pilot	76 ks
Délka	20 m
Tepelné čerpadlo - vytápění	
Nemrzoucí směs – voda	
Jmenovitá výkon	25 kW
Jmenovitá spotřeba výkonu	12,5 kW
Výměník tepla - chlazení	
Jmenovitý výkon	391,8 kW

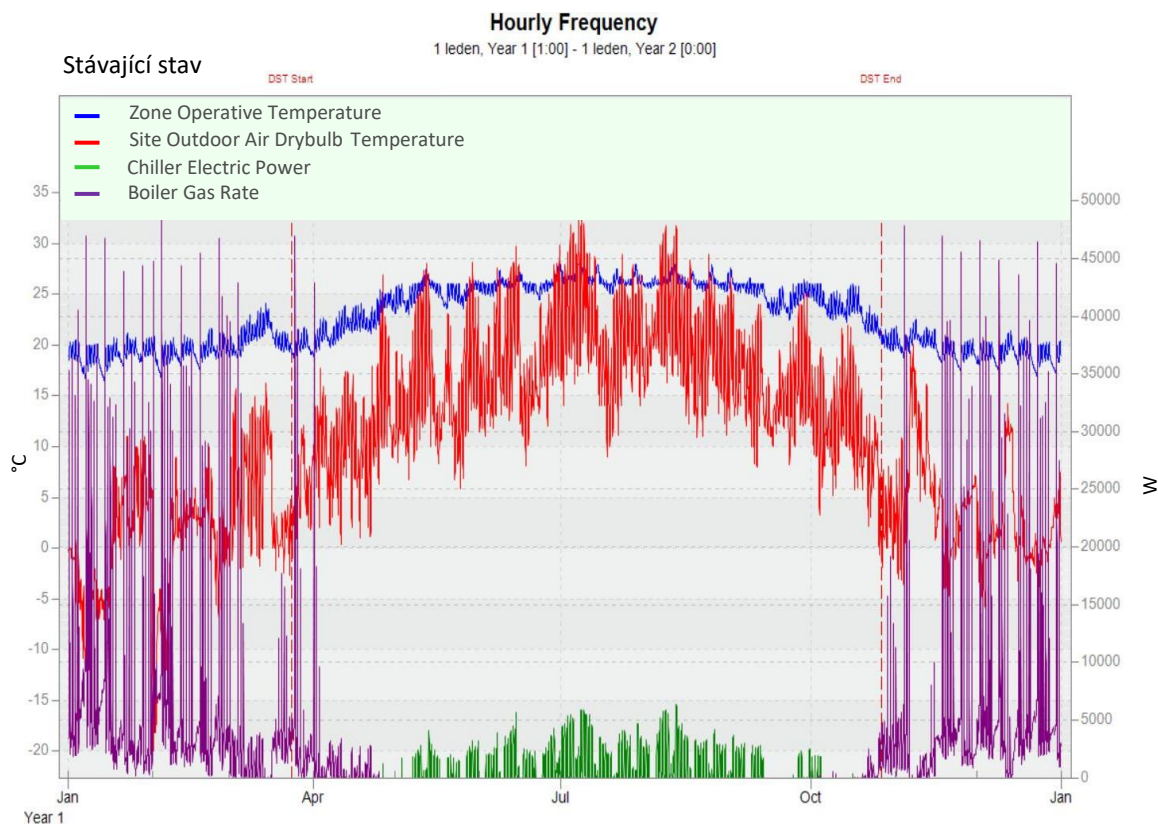
V9 – Tepelné čerpadlo na vytápění a výměník tepla na chlazení doplňující stávající stav s teplotními rozdíly 75/55 °C na vytápění a 15/17 °C na chlazení



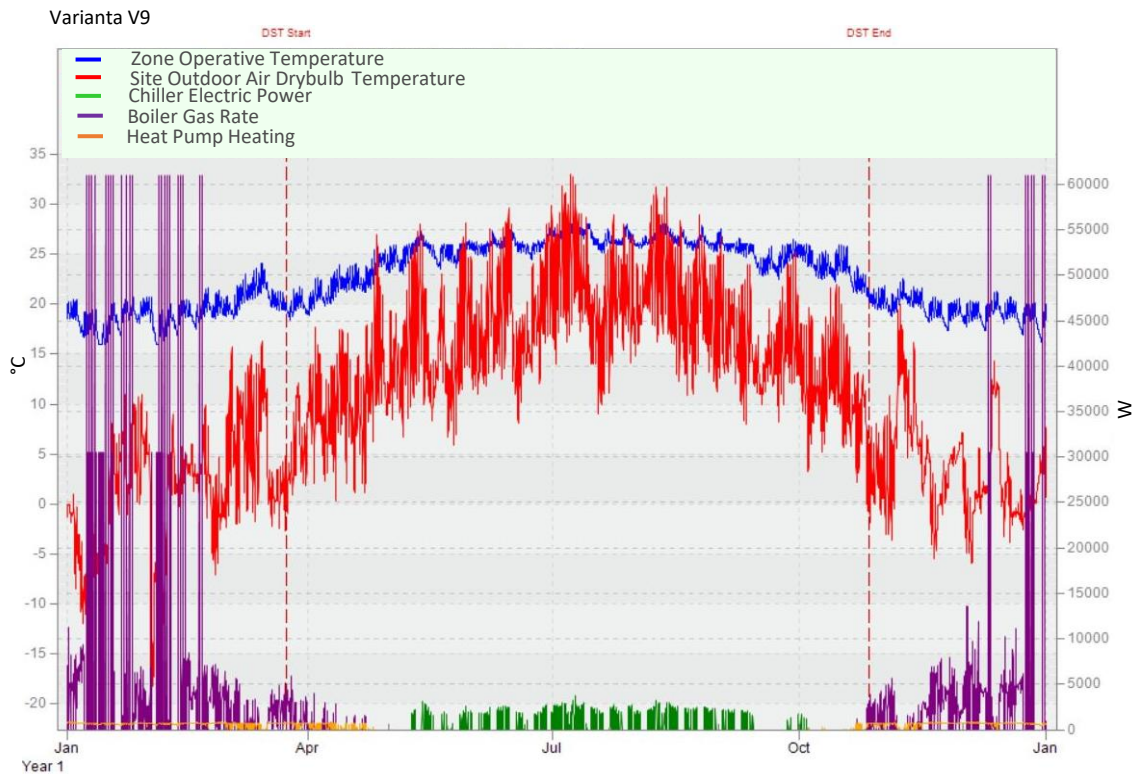
Obrázek 3.35 Schéma zapojení HVAC ve variantě V9

3.6.2 Příkony zdroje tepla a chladu

Obrázek 3.36 a 3.37 ukazuje porovnání výkonu kotle a el. příkonu chilleru stávajícího stavu s variantou V9 typického podlaží zóny kanceláře (viz kapitola 2.4.2).



Obrázek 3.36 Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu – stávající stav



Obrázek 3.37 Příkony zdroje tepla a chladu –varianta V9

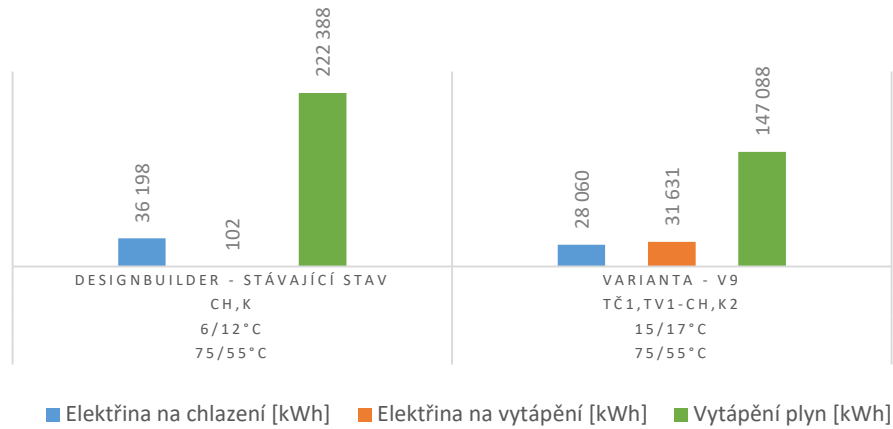
Ve variantě V9, na rozdíl od stávajícího stavu, je patrný rozdíl v provozu zdrojů tepla a chladu. Pokrytím spotřeby tepla tepelným čerpadlem spolu s kotlem se snížila doba provozu kotle, avšak se navýšil jeho výkon. Nárůst výkonu je zapříčiněn vysokým teplotním spádem na vytápění a provozem budovy v útlumovém režimu tepelným čerpadlem. Při spuštění kotle se začátkem doby obsazenosti budovy pro dosažení teplotního komfortu nastane navýšení výkonu kotle. Elektrický příkon potřebný pro provoz chilleru se sníží.

3.6.3 Porovnání spotřeb energií

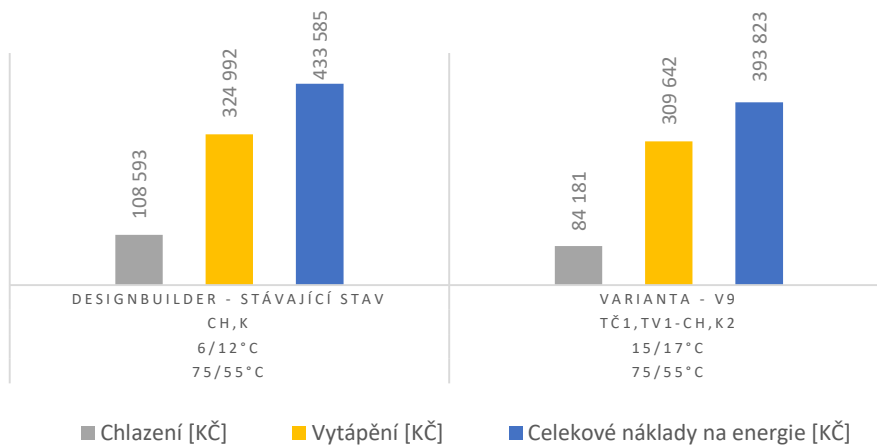
Následující tabulka uvádí celkovou roční spotřebu tepla a chladu budovy.

Tabulka 3.11 Spotřeby tepla a chladu – varianta 9

	Spotřeba zemního plynu [kWh]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Cena zemního plynu [Kč]	Cena elektrické energie [Kč]
Stávající stav	222 388	36 300	324 686	108 900
Varianta V9	147 088	59 691	214 748	179 073
Úspora	51 909 [kWh]		39 765 [Kč]	



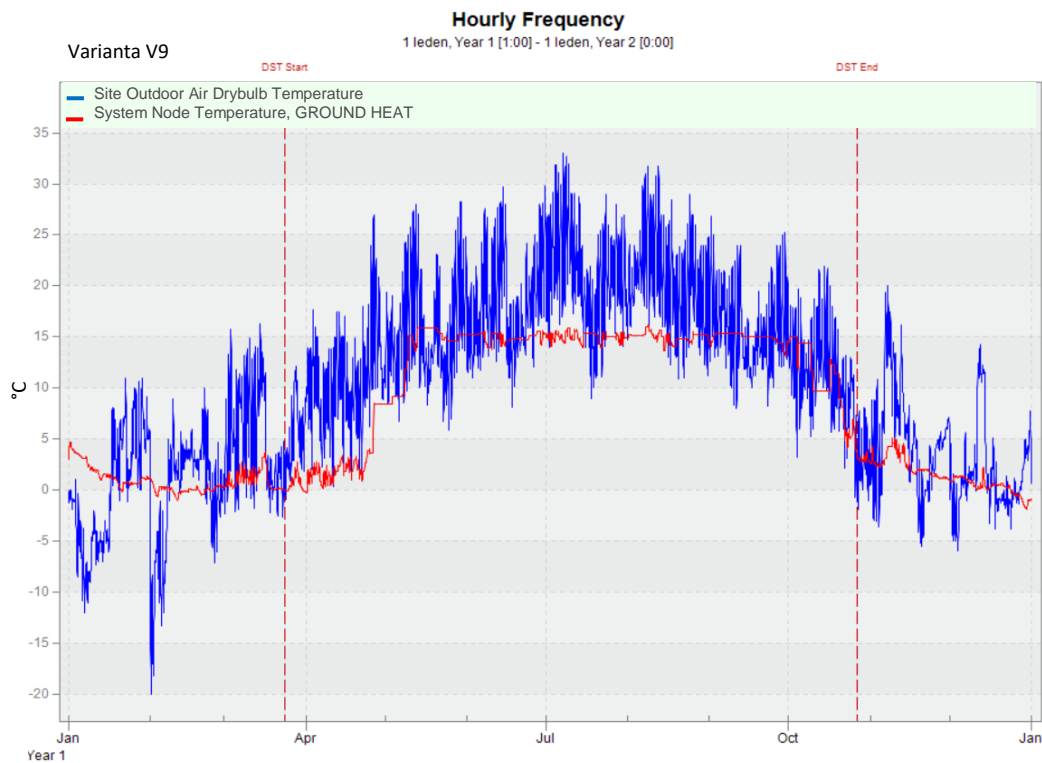
Obrázek 3.38 Spotřeby tepla a chladu – varianta 9



Obrázek 3.39 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V9

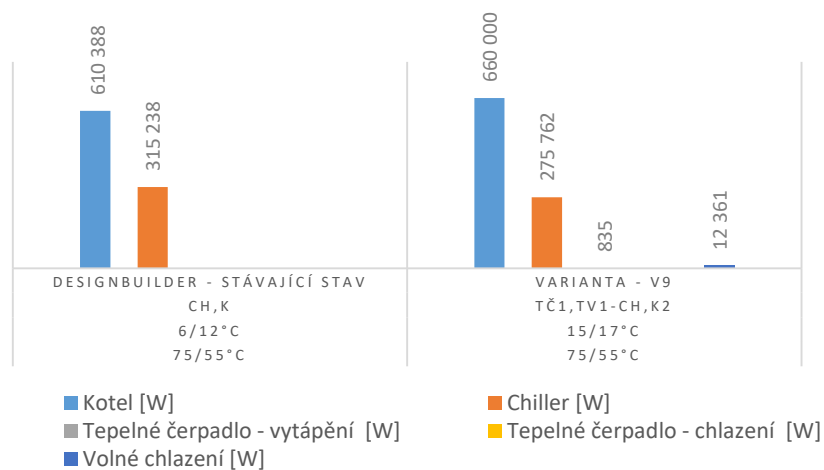
V této variantě, stejně jako ve variantě V5, je dosaženo snížení celkových nákladů na energie o 9,17 % na rozdíl od stávajícího stavu (Obrázek 3.39). Avšak počet hodin, kdy není dosaženo tepelného komfortu, se navýšil jak u vytápění, tak u chlazení (Obrázek 3.42), což může mít právě za následek snížení celkových nákladů na energie budovy.

3.6.4 Výkony zdroje tepla a chladu



Obrázek 3.40 Teplota odtoku vody ze zemních vrtů – varianta V9

Obrázek 3.40 ukazuje teplotu vody v zemním výměníku tepla. Je z něj patrný konstantní výkon výměníku tepla na zajištění chlazení pro dosažení požadovaného tepelného komfortu.

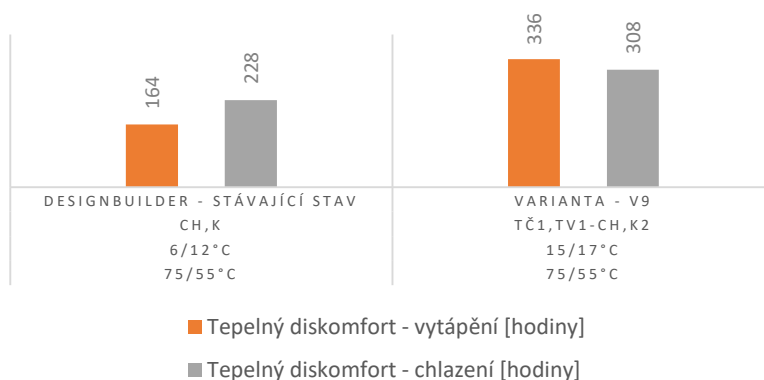


Obrázek 3.41 Maximální výkon zdroje tepla a chladu – varianta V9

Ve variantě V9 je ponechán teplotní spád vody (75/55 °C, 15/17 °C) a tepelné čerpadlo na vytápění z cenově nejvýhodnější Varianty V5. Výměnou tepelného čerpadla

na chlazení za tepelný výměník je dosaženo snížení výkonu chilleru o 12,5 % na rozdíl od stávajícího stavu (Obrázek 3.41).

3.6.5 Tepelný komfort



Obrázek 3.42 Tepelný diskomfort – varianta V9

Navýšení hodin tepelného diskomfortu je zapříčiněno tím, že v útlumovém režimu je budova provozována pomocí tepelného čerpadla a výměníku tepla. Kotel nebo chiller se spouští se začátkem pracovní doby.

3.7 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT

V předchozích kapitolách (3.1–3.6) je stávající stav modelu budovy srovnán s jednotlivými variantami tepelných čerpadel. Vybrané varianty s prioritou jedna doplňují stávající stav s prioritou dva. Jsou porovnány hodnoty v rámci ročních spotřeb tepla a chladu, jejich nákladů, maximálního potřebného výkonu a počtu hodin diskomfortu budovy. Přehled všech těchto variant spolu se stávajícím systémem HVAC (Obrázek 3.45–3.48).

Varianty simulací tepelných čerpadel doplňující stávající stav jsou voleny a porovnávány následujícím způsobem.

Ve variantě V1 je ponechán teplotní spád HVAC stávajícího stavu (75/55 °C u vytápění a 6/12 °C u chlazení), doplněný tepelným čerpadlem voda-voda připojeným k suchému chladiči.

Ve variantě V2 je také ponechán teplotní spád stávajícího stavu, doplněný tepelným čerpadlem země-voda se zdrojem energie instalovaným pomocí geotermálních vertikálních vrtů.

Varianta V3 porovnává detailní HVAC varianty V2, kdy je pouze zaměněn výměník tepla, pro dosažení co nejnižší spotřeby energie.

Ve variantě V4 je ponechán teplotní spád HVAC stávajícího stavu (75/55 °C u vytápění a 6/12 °C u chlazení), doplněný tepelným čerpadlem země-voda se zdrojem energie instalovaným do pilot budovy.

Ve variantách V5–V8 se pouze mění teplotní spády u vytápění a chlazení, ale zdroje energie systému HVAC zůstávají stejné jako u předchozí varianty.

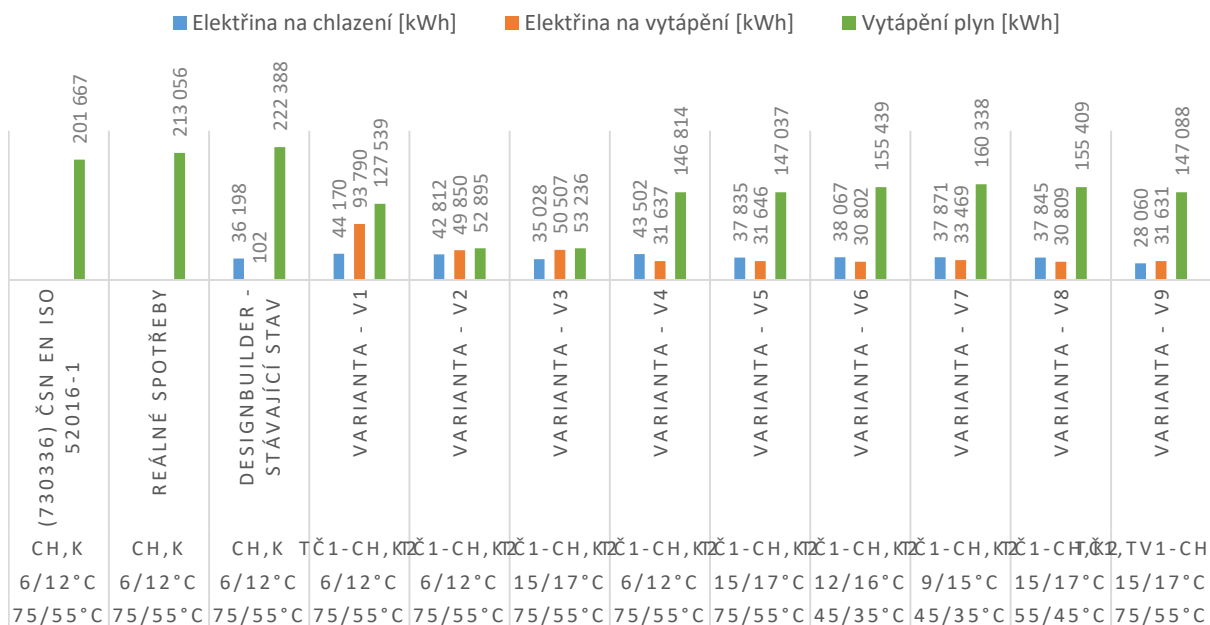
Ve variantě V9 je ponechán teplotní spád vody a tepelné čerpadlo na vytápění z varianty V5, která vyšla cenově nejvýhodnější variantou energopilot. Změněn je výměník tepla na chlazení.

Obrázek 3.45 ukazuje celkové roční snížení spotřeby plynu na vytápění u jednotlivých simulací variant tepelných čerpadel a navýšení spotřeby elektřiny na vytápění. Tento nárůst je nejvíce patrný u varianty V1, kdy je použito tepelné čerpadlo voda-voda připojené k suchému chladiči.

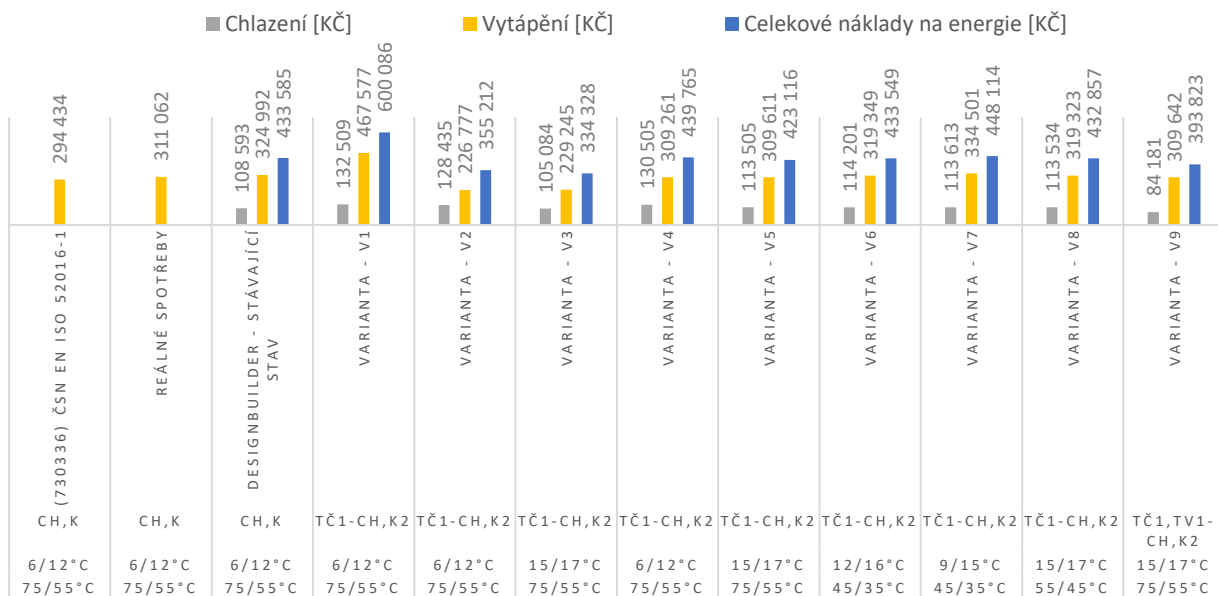
Na základě celkových spotřeb energií a zvolením jejich cen, které činí 3 Kč/kWh za elektřinu a 1,5 Kč/kWh za plyn, jsou stanoveny celkové roční náklady. Cenově nejvýhodnější variantou tepelného čerpadla je varianta V3 – Tepelné čerpadlo země-voda na vytápění a výměník tepla na chlazení. Celkové roční náklady na energii poklesly na rozdíl od stávajícího stavu o 22,9 %, (Obrázek 3.46).

Naproti tomu ve Variantě V1 – Tepelné čerpadlo voda-voda na vytápění i chlazení připojené k suchému chladiči, vzrostly celkové roční náklady na energii o 38,4 %.

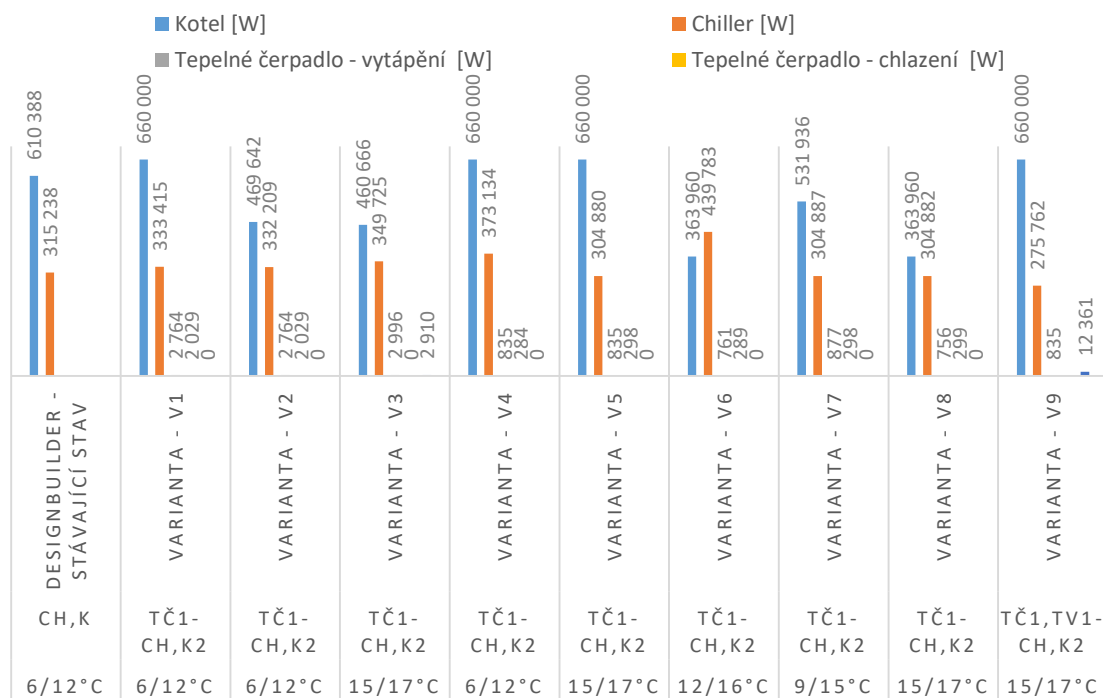
U tepelných čerpadel země-voda se zdrojem tepla provedeným pomocí energopilot, ve variantách V4–V8, je nejvýhodnější varianta V5, u které celkové roční náklady na energii klesly o více jak 2 %, a to zejména použitím režimu vysokoteplotního chlazení. V této variantě je změněno tepelné čerpadlo na chlazení za výměník tepla, ve variantu V9, pro dosažení co nejnižší spotřeby energie. Celkové roční náklady na energii tak poklesly vůči stávajícímu stavu o 9 %.



Obrázek 3.43 Spotřeby tepla a chladu



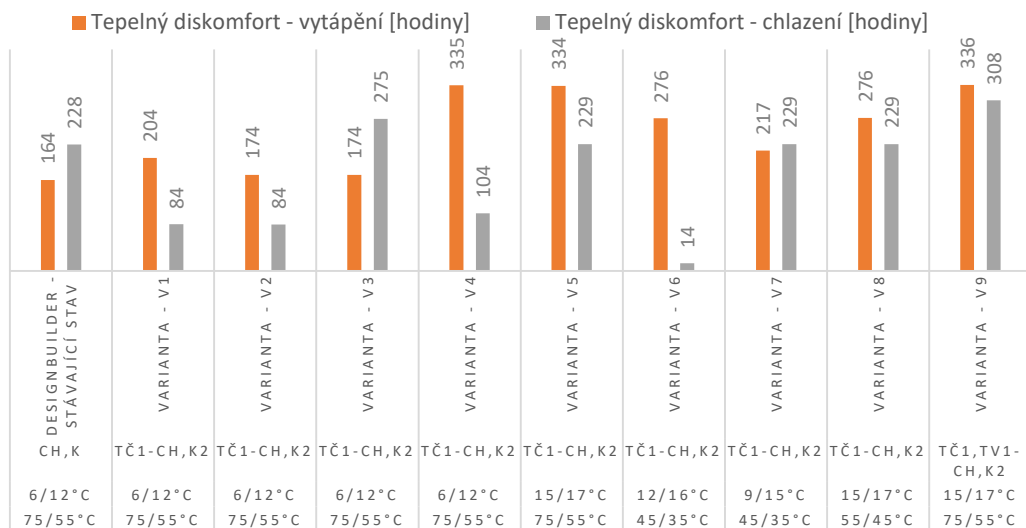
Obrázek 3.44 Cenové srovnání nákladů spotřeb tepla a chladu



Obrázek 3.45 Maximální potřebný výkon zdroje tepla a chladu

Obrázek 3.47 ukazuje maximální výkon zdrojů tepla a chladu v závislosti na teplotním spádu soustavy. S použitím tepelného čerpadla a ponecháním teplotního spádu vytápění 75/55 °C, který je v těchto variantách zároveň i nevyšší, vzrostl výkon kotle na jeho maximum. Nárůst výkonu je způsoben provozem budovy v útlumovém režimu pouze tepelnými čerpadly. Při spuštění kotle se začátkem doby obsazenosti budovy, pro dosažení tepelného komfortu v interiéru, nastane tento maximální výkon kotle. U variant V2 a V3, kdy je také ponechán teplotní spád ze stávajícího stavu, však není kotel provozován na jeho maximum, což je způsobeno dostatečným množstvím a délkou GVV tepelného čerpadla země-voda. Naopak se snižováním teplotního spádu vytápění klesal i výkon kotle na rozdíl od stávajícího stavu. Obdobné změny lze pozorovat i u teplotního spádu na chlazení.

Začátek plného provozu vytápění a chlazení stávajícího systému je spuštěn se začátkem provozní doby budovy, čímž není dosaženo tepelného komfortu 164 hodin na vytápění a 60 hodin na chlazení. U cenově nejvýhodnější varianty V3, je zvýšení nárůstu hodin tepelného diskomfortu na vytápění o 4,2 % a chlazení o 20,6 %, (Obrázek 3.48). Ve variantách V3 a V5, kdy je nahrazeno tepelné čerpadlo na vytápění za výměník tepla, pro dosažení výhodnějších ročních nákladů na spotřeby energií, se navýšil počet hodin tepelného diskomfortu na chlazení.



Obrázek 3.46 Nesplnění komfortní teploty

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je ukázat, prostřednictvím simulací v programu DesignBuilder, vliv vybraných variant energetických zdrojů na spotřebu energie a nákladů konkrétní kancelářské budovy a dobu, kdy v ní není dosaženo požadovaného komfortu.

Pro tyto varianty včetně stávajícího systému je vytvořen simulační model budovy, který reflektuje její chování. Ve zkalibrovaném modelu je možné nastavit provozní stav vytápění a chlazení a navrhnout alternativní varianty zdrojů energie doplněné stávajícím systémem budovy. Zvolený program má však své limity a pro zkrácení časového kroku simulací jednotlivých variant není provoz modelován na všech podlažích se stejným provozem, ale pouze na jednom typickém podlaží a poté jsou výsledky přenásobeny počtem podlaží s tímto provozem. Na základě celkových spotřeb a zvolením jejich cen jsou stanoveny roční náklady.

Simulace jednotlivých variant tepelných čerpadel jsou uvažovány s tepelným čerpadlem voda-voda, připojeným k suchému chladiči a tepelnými čerpadly země-voda se zdroji energie provedenými pomocí geotermálních vertikálních vrtů nebo instalovaných v energopilotách. V rámci porovnání navržených variant tepelných čerpadel v prioritě jedna spolu se stávajícím systémem priority dva, kdy hodnotícím kritériem jsou celkové roční náklady na energii, je pro budovu nejlepší varianta tepelného čerpadla země-voda se zdrojem energie provedeným pomocí geotermálních vertikálních vrtů na vytápění a výměníkem tepla na chlazení, se stávajícím teplotním spádem 75/55 °C u vytápění a 6/12 °C u chlazení. Celková úspora ročních nákladů na provoz energií činí 22,9 %. U variant tepelných čerpadel země-voda, s instalovaným zdrojem energie v energopilotách, je pokles celkových nákladů na roční provoz energií u nejvýhodnější varianty 9 % na rozdíl od stávajícího stavu. Rozdíl úspor tepelných čerpadel země-voda, se zdroji energií v provedení geotermálních vertikálních vrtů nebo instalací do energopilot, je způsoben celkovým počtem a délkou vertikálních vrtů. Tepelné čerpadlo voda-voda se ukázalo jako zcela nevhodné z důvodu nárůstu celkových ročních nákladů na energii o více jak 38 %.

Při návrhu dvou zdrojů tepla a chladu budovy, kterými jsou chiller a kotel u stávajícího stavu a tepelná čerpadla jednotlivých variant, jsem návratnost investic systému tepelných čerpadel nepočítala.

Ve všech variantách je plný provoz vytápění a chlazení spuštěn se začátkem provozní doby. Z tohoto důvodu je také hodnocen počet hodin nedosažení tepelného komfortu v budově. I když je zadán stejný provoz ve všech simulacích, nastaly významné rozdíly v počtu hodin nedosažení tepelného komfortu. Tyto rozdíly mohou částečně vysvětlit pokles ročních nákladů na celkový provoz energií budovy. Posun začátku plného provozu vytápění a chlazení na dřívější hodinu by značně snížil počet hodin, kdy není dosaženo požadovaného komfortu v budově. To by však mohlo mít za následek celkový pokles uspořené ročních nákladů na energii.

Hodnocení posunu začátku plného provozu vytápění a chlazení a následovné sledování počtu hodin, kdy nastal tepelný diskomfort budovy, by se mohlo stát předmětem dalšího zkoumání.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ministerstvo životního prostředí Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/mezivladni_panel_pro_zmenu_klimatu
- [2] Šikula, O.; Nováková, I.; Oravec, J. Evaluation of energy sources and their operation on the indoor climate and energy performance of a building. In *Indoor climate of buildings 2019*. Bratislava: Slovak Society of Environmental Engineering, 2019. p. 235-242. ISBN: 978-80-89878-55-0
- [3] American Society of Heating, R. and Engineers, A.-C. (2008). *2009 ASHRAE handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Behrendt, B., Raimondo, D.
- [4] Zhang, Y., Schwarz, S., Christensen, J., and Olesen, B. (2011). *A system for the comparison of tools for the simulation of water-based radiant heating and cooling systems*.
- [5] Judkoff, R. and Neymark, J. (1995). Building energy simulation test (bestest) and diagnostic method. Technical report, International Energy Agency. Koschenz, M. and Lehmann, B. (2000). *Thermoaktive*
- [6] EnergyPlus BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://energyplus.net/documentation>
- [7] OpenStudio BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/>
- [8] DesignBuilder. BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/designbuilder>
- [9] ESP-R. BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/esp-r-0>
- [10] TRNSYS. BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/trnsys>
- [11] BSim. BEST Directory: Building Energy Software Tools [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/bsim-0>
- [12] doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D., přednášky z Termomechaniky
- [13] Vienna Point II. In: JLL [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://jll-nemovitosti.cz/> , In: PS BRNO [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.ps-brno.cz/cs/reference/prosklene-fasadni-plaste/>
- [14] Vienna Point II. In: Google maps [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/preview>
- [15] Pichová L. *Thermal behavior and energy performance of low-energy office buildings* [in Czech]. Master thesis. 131s. VUT v Brně. Brno, 2013.

- [16] Horká L. Optimization of energy consumption in office building. [in Czech] Master thesis. 2015. 70s. VUT v Brně. Brno, 2013.
- [17] ČSN EN ISO 52016-1. *Energetická náročnost budov – Energie potřebná pro vytápění a chlazení vnitřních prostor a citelné a latentní tepelné zatížení - Část 1: Postupy výpočtu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [18] Tronchin L, Fabbri K. *Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation: Comparison between software simulations and operating rating simulation*. *Energy And Buildings* 2008;40:1176-1187. doi:10.1016/j.enbuild.2007.10.012.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 BESTEST: Srovnání roční chladící zátěže budov.....	14
Obrázek 1.2 Ukázka programu EnergyPlus.....	15
Obrázek 1.3 Ukázka programu OpenStudio	16
Obrázek 1.4 Ukázka programu DesignBuilder	16
Obrázek 1.5 Ukázka Programu ESP-r	17
Obrázek 1.6 Ukázka programu TRNSYS	18
Obrázek 1.7 Ukázka programu Bsim	18
Obrázek 2.1 Mapa s vyznačením polohy budovy [14].....	23
Obrázek 2.2 Vienna Point II [13]	23
Obrázek 2.3 Rozložení budovy – vnitřní prostory	24
Obrázek 2.4 Model budovy v programu DesignBuilder.....	29
Obrázek 2.5 Typické podlaží budovy	30
Obrázek 2.6 Skladba konstrukcí budovy	31
Obrázek 2.7 Časová obsazenost budovy	32
Obrázek 2.8 Varianty zdroje vytápění a chlazení.....	34
Obrázek 3.1 Schéma zapojení stávajícího systému vytápění a chlazení	35
Obrázek 3.2 Část výkonu otopných těles konvencí	36
Obrázek 3.3 Fan-coil – celkový chladící výkon	36
Obrázek 3.4 VZT jednotka – celkový chladící výkon	37
Obrázek 3.5 Tepelný výkon ohřívače VZT jednotky – tmavě zelená čára.....	37
Obrázek 3.6 Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu – stávající stav	38
Obrázek 3.7 Spotřeba tepla a chladu – stávající stav	39
Obrázek 3.8 Schéma zapojení HVAC ve variantě V1	41
Obrázek 3.9 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu –stávající stav a varianta V1 .	42
Obrázek 3.10 Spotřeba tepla a chladu – varianta V1	43
Obrázek 3.11 Cenové srovnání spotřeby tepla a chladu – varianta V1	43
Obrázek 3.12 Maximální potřebný výkon zdroje tepla a chladu – varianta V1.....	44
Obrázek 3.13 Tepelný diskomfort – varianta V1	44
Obrázek 3.14 Schéma zapojení HVAC ve variantě V2.....	46
Obrázek 3.15 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu –stávající stav a varianta V2	47
Obrázek 3.16 Spotřeba tepla a chladu – varianta V2	48
Obrázek 3.17 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V2	48
Obrázek 3.18 Teplota odtoku vody ze zemních výměníků– varianta V2	49

Obrázek 3.19 Maximální potřebný výkon zdrojů tepla a chladu – varianta V2.....	49
Obrázek 3.20 Tepelný diskomfort – varianta V2	50
Obrázek 3.21 Schéma zapojení HVAC ve variantě V3.....	52
Obrázek 3.22 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu – stávající stav a varianty V3	53
Obrázek 3.23 Spotřeby tepla a chladu – varianta V3.....	54
Obrázek 3.24 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V3	54
Obrázek 3.25 Teplota odtoku vody ze zemních výměníků – varianta V3	55
Obrázek 3.26 Maximální potřebný výkon zdrojů tepla a chladu – varianta V3.....	56
Obrázek 3.27 Tepelný diskomfort – varianta V3	56
Obrázek 3.28 Schéma zapojení HVAC ve variantách V4 – V8	58
Obrázek 3.29 Porovnání příkonů zdroje tepla a chladu – stávající stav a varianty V4 až V8.....	59
Obrázek 3.30 Spotřeby tepla a chladu – varianty V4 až V8.....	61
Obrázek 3.31 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianty V4 až V8	61
Obrázek 3.32 Maximální potřebný výkon zdrojů tepla a chladu – varianty V4 až V8	62
Obrázek 3.33 Tepelný diskomfort – varianty V4 až V8	63
Obrázek 3.34 Nesplnění komfortní teploty stávajícího stavu s variantou V5	64
Obrázek 3.35 Schéma zapojení HVAC ve variantě V9.....	66
Obrázek 3.36 Výkon zdroje tepla a příkon zdroje chladu – stávající stav.....	66
Obrázek 3.37 Příkony zdroje tepla a chladu –varianta V9.....	67
Obrázek 3.38 Spotřeby tepla a chladu – varianta 9.....	68
Obrázek 3.39 Cenové srovnání spotřeb tepla a chladu – varianta V9	68
Obrázek 3.40 Teplota odtoku vody ze zemních vrtů – varianta V9.....	69
Obrázek 3.41 Maximální výkon zdroje tepla a chladu – varianta V9	69
Obrázek 3.42 Tepelný diskomfort – varianta V9	70
Obrázek 3.43 Spotřeby tepla a chladu.....	72
Obrázek 3.44 Cenové srovnání nákladů spotřeb tepla a chladu.....	72
Obrázek 3.45 Maximální potřebný výkon zdroje tepla a chladu	73
Obrázek 3.46 Nesplnění komfortní teploty	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Skladby stavebních konstrukcí.....	26
Tabulka 2.2 Skladby stavebních konstrukcí.....	27
Tabulka 2.3 Průměrná denní venkovní teplota během roku 2002.....	30
Tabulka 2.4 Vnitřní zisky budovy	31
Tabulka 3.1 Spotřeby tepla a chladu – stávající stav	39
Tabulka 3.2 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V1.....	40
Tabulka 3.3 Spotřeby tepla a chladu – varianta V1	43
Tabulka 3.4 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V2.....	45
Tabulka 3.5 Spotřeby tepla a chladu – varianta V2	48
Tabulka 3.6 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V3.....	51
Tabulka 3.7 Spotřeby tepla a chladu – varianta V3	54
Tabulka 3.8 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianty V4 – V8.....	57
Tabulka 3.9 Spotřeby tepla a chladu – varianty V4 až V8	60
Tabulka 3.10 Zadané výkony systému vytápění a chlazení – varianta V9	65
Tabulka 3.11 Spotřeby tepla a chladu – varianta 9.....	67

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
TRY	Test Reference Year
TMY	Typical Meteorological Year
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
BLAST	The Basic Local Alignment Search Tool
DOE-2	The Design of Energy
HVAC	heating, ventilating, air-conditioning
TRNSYS	TRaNsient SYstem Simulation
\dot{q}	hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
T	teplota [K]
N	index označující směry normály
Λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
P	objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
τ	čas [s]
c	měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
x	indexy označující směry souřadného systému
y	indexy označující směry souřadného systému
z	indexy označující směry souřadného systému
\dot{Q}	výkon vyzařovacího předmětu [W]
σ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ε	Stefanova-Boltzmannova konstanta $5,67\cdot 10^{-8}$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]
τ	emisivita tělesa $0 \leq \varepsilon \leq 1$
S	obsah plochy povrchu vyzařovacího předmětu [m^2]
α	součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Δt	rozdíl teplot [K]
Re	Reynoldsovo číslo
Pr	Prandlovo číslo
Gr	Grashofovo číslo
Ra	Rayleighovo číslo
λ_L	součinitel tepelné vodivosti tekutin [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
l	charakteristický rozměr [m]
R	tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
d	tloušťka konstrukce [m]

R_T	odpor konstrukce při prostupu tepla [$m^2.K.W^{-1}$]
R_{si}	odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [$m^2.K.W^{-1}$]
R_{se}	odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [$m^2.K.W^{-1}$]
U	součinitel prostupu tepla [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
Q	hustota tepleného toku [$W.m^{-2}$]
i	vnitřní část stavebního prvku
o	vnější část stavebního prvku
X	faktory odezvy
Y	faktory odezvy
K	pořadí funkcí přenosu vodivosti
M	konečné číslo definované pořadí funkcí přenosu vodivosti
X	přenos vodivosti funkční koeficienty
Y	přenos vodivosti funkční koeficienty
F	přenos vodivosti funkční koeficienty
\dot{m}_R	hmotnostní průtok zpětného vzduchu zóny [$kg.s^{-1}$]
\dot{m}_{EX}	hmotnostní průtok zónového vzduchu z ventilátorů, [$kg.s^{-1}$]
\dot{m}_{XR}	hmotnostní průtokový tok zóny jako přijímací zóna [$kg.s^{-1}$]
\dot{m}_{XS}	hmotnostní průtok směšovací zóny jako zdrojová zóna, [$kg.s^{-1}$]
\dot{m}_s	hmotnostní průtok přiváděného vzduchu v zóně, [$kg.s^{-1}$]
G_{VV}	geotermální vertikální vrt
NP	nadzemní podlaží
PP	podzemní podlaží
K_s	kus

SEZNAM PŘÍLOH

1. Schéma zapojení zdroje tepla a chladu varianty V5 (-)
2. Orientační výkresová dokumentace
 1. Výkres A2 - Půdorys typického podlaží – 3-12 NP (1:100)
 2. Výkres A2 – Řez 1 – 1' (1:200)
 3. Výkres A2 - Řez 2 – 2' (-)
 4. Výkres A3 – Západní pohled (-)
 5. Výkres A3 – Východní pohled (-)
 6. Výkres A3 – Severní pohled (-)
 7. Výkres A3 – Jižní pohled (-)

Výkresová dokumentace je pouze ilustrační, výkresy byly převzaty z původní technické dokumentace k budově VP II.