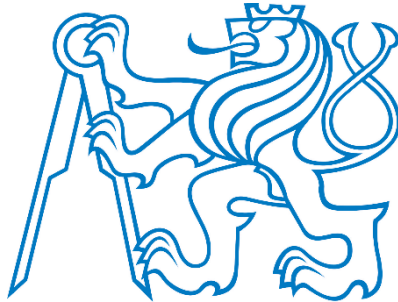


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



**Optimalizace návrhu horské chaty s využitím
počítačové simulace energetického chování**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jakub Červinka

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Červinka Jméno: Jakub Osobní číslo: 409648

Zadávací katedra: K 11125 Technických zařízení budov

Studijní program: Inteligentní budovy- N3946

Studijní obor: Inteligentní budovy

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Optimalizace návrhu horské chaty s využitím počítačové simulace energetického chování.

Název diplomové práce anglicky: Energy performance simulation aided chalet design

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte analýzu výchozího návrhu objektu a s podporou simulace energetického chování navrhnete optimalizované řešení splňující požadavky na budovu s téměř nulovou spotřebou energie. Výsledné řešení zdokumentujte generelem TZB a projektovou dokumentací vytápění na úrovni rozšířené dokumentace pro stavební povolení ve smyslu vyhlášky 499/2006 Sb.

Seznam doporučené literatury:

Kabele a kol.: Energetické a ekologické systémy budov 1 ČVUT (2010)

Valášek a kol.: Zdravotně-technické instalace Jaga 2001

Petráš a kol.: Vytápění rodinných a bytových domů, Jaga 2005

K. Kabele a kol.: Technická zařízení budov. Vytápění - podklady pro cvičení. Nakladatelství ČVUT 2013

Kolektiv: Topenářská příručka 3, ČSTZ, 2008. Anotaci najdete zde.

D. Petráš, D. Koudelková, K. Kabele: Teplovodní a elektrické podlahové vytápění. Jaga Media s.r.o 2004, ISBN:80-88905-97-4

J.Bašta, K.Kabele: Otopné systémy teplovodní - Sešit projektanta č.1 - Společnost pro techniku prostředí 2008

Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN technická literatura, Praha, 2012, ISBN 978-80-7300-440-8.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof.Ing.Karel Kabele, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.3.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

Praha 20. 5. 2018

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Karlovi Kabelemu za odborné vedení mé diplomové práce.

Obsah

ANOTACE	7
1 ÚVOD	8
1.1 Cíl práce	8
2 ANALÝZA VÝCHOZÍHO STAVU	9
2.1 Umístění stavby	9
2.2 Tvarové a dispoziční řešení	9
2.3 Konstrukční řešení	12
2.4 Řešení energetických a ekologických systémů	13
3 TVORBA MODELU	15
3.1 Okrajové podmínky	15
3.2 Provoz	16
4 VYHODNOCENÍ VÝCHOZÍHO STAVU	18
4.1 Tepelné ztráty	18
4.2 Ukazatele energetické náročnosti z roční simulace	19
4.3 Požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie	19
4.3.1 Definice budovy s téměř nulovou spotřebou energie	19
4.3.2 Průměrný součinitel prostupu tepla	20
4.3.3 Neobnovitelná primární energie	21
4.3.4 Posouzení výchozího stavu s požadavky NZEB	21
5 OPTIMALIZACE V SIMULAČNÍM SW	23
5.1 Nastavení optimalizace	23
5.1.1 Cíle návrhu	23
5.1.2 Omezení návrhu	23
5.1.3 Proměnné	23
5.2 Výstup optimalizace	24
6 OPTIMALIZACE VÝCHOZÍHO NÁVRHU HORSKÉ CHATY	25
6.1 Optimalizace konstrukčního řešení obálky	25
6.1.1 Proměnné	25
6.1.2 Cíle návrhu	26
6.1.3 Výsledky 1.fáze optimalizace	29

6.2	Optimalizace energetických systémů	34
6.2.1	Proměnné	34
6.2.2	Cíle návrhu	36
6.2.3	Výsledky 2. fáze optimalizace	37
7	VYHODNOCENÍ OPTIMALIZACE	41
7.1	Modelový zimní víkend	41
7.2	Posouzení výsledku s požadavky NZEB	43
7.3	Vstupní parametry pro projektovou část	44
8	ZÁVĚR	46
	Seznam použité literatury	47
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	49
	Seznam grafů	49
	Použitý software	50
	Seznam příloh	50

Anotace

Cílem této textové části diplomové práce je analýza a posouzení architektonického návrhu horské chaty. Dále je práce zaměřena na optimalizaci návrhu pomocí počítačové simulace energetického chování budov. Optimalizace klade důraz zejména na zajištění tepelné pohody v objektu při zachování nízké energetické náročnosti i ohleduplnosti k životnímu prostředí. Výsledné řešení bude zároveň plnit požadavky na budovu s téměř nulovou energií a poslouží jako podklad pro projektovou část.

Klíčová slova

horská chata, optimalizace, simulace energetického chování, budova s téměř nulovou spotřebou energie, tepelná pohoda, vytápění,

Abstract

The aim of this text part of the diploma's thesis is an analysis and energy evaluation of the architecture design of the mountain chalet. The next stage of this work is focused on the project optimization with a help of the energy building performance software. The optimization emphasizes especially on the thermal comfort in the building as well on the low energy consumption and environmental protection. The resulting solution will also meet the requirements for the nearly zero-energy building and will serve as a basis for the project part.

Keywords

mountain chalet, optimization, energy performance simulation, nearly zero-energy building, thermal comfort, heating system,

1 Úvod

Tato textová část diplomové práce se zaměřuje na posouzení a následnou optimalizaci architektonického návrhu horské chaty v Krkonoších. Jako hlavní nástroj k provedení optimalizace mi poslouží simulační program DesignBuilder, který se hojně využívá k hodnocení energetického chování budov a zároveň dokáže velmi efektivně porovnat různé varianty návrhu podle předem stanovených kritérií. Já se zaměřím především na posouzení tepelné pohody uvnitř objektu, protože toto kritérium považuji za stěžejní zvláště u tohoto typu budovy, který slouží k rekreaci a odpočinku. Každý z nás se zřejmě alespoň jednou setkal s nevlídným vnitřním prostředím vymrzlé chaty a dlouhým čekáním na příjemnou teplotu už při příjezdu nebo po probuzení. V dnešní moderní uspěchané době řada lidí vyhledává absolutní komfort po celou dobu rekreačního pobytu.

Horskou chatu jakožto typ budovy jsem si vybral nejenom kvůli vysoké oblíbenosti v naší zemi, ale také z důvodu mého kladného vztahu k horám, což bezpochyby souvisí i s faktem, že pocházím z podkrkonošského města Vrchlabí.

1.1 Cíl práce

Cílem této textové části je tedy provedení analýzy výchozího stavu architektonického návrhu horské chaty v Krkonoších. Prostřednictvím simulačního programu k posuzování energetického chování budov provedu vyhodnocení výchozího návrhu z několika úhlů pohledu, především však z hlediska tepelné pohody. V dalším kroku se zaměřím na optimalizaci zvolených proměnných parametrů návrhu, a to zejména na obálce budovy. Dále provedu nezbytné úpravy tak, aby návrh splňoval požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie dle vyhlášky 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov (se změnou 230/2015 Sb., dále jen vyhláška) [1].

Na závěr porovnáám výchozí stav s navrženým stavem po optimalizaci nejenom z hlediska tepelné pohody, ale také z environmentálního a ekonomického pohledu. Tímto postupem bych rád poukázal na možnost, jak lze efektivně ověřit, zda architektonický návrh neskrývá nějaký nešvar nebo nenabízí prostor ke zlepšení.

Výsledný návrh bude také sloužit k provedení projektové části diplomové práce.

2 Analýza výchozího stavu

Předmětem této práce je architektonický návrh moderní horské chaty v Krkonoších, jež bude postavena na místě jedné ze stávajících bud nedaleko obce Pec pod Sněžkou ve výšce 1150 m n.m. Dle přání budoucího uživatele chaty nebudu v této práci specifikovat konkrétní parcelní umístění objektu. Jako podklad mi posloužila rozpracovaná dokumentace pro stavební povolení.

2.1 Umístění stavby

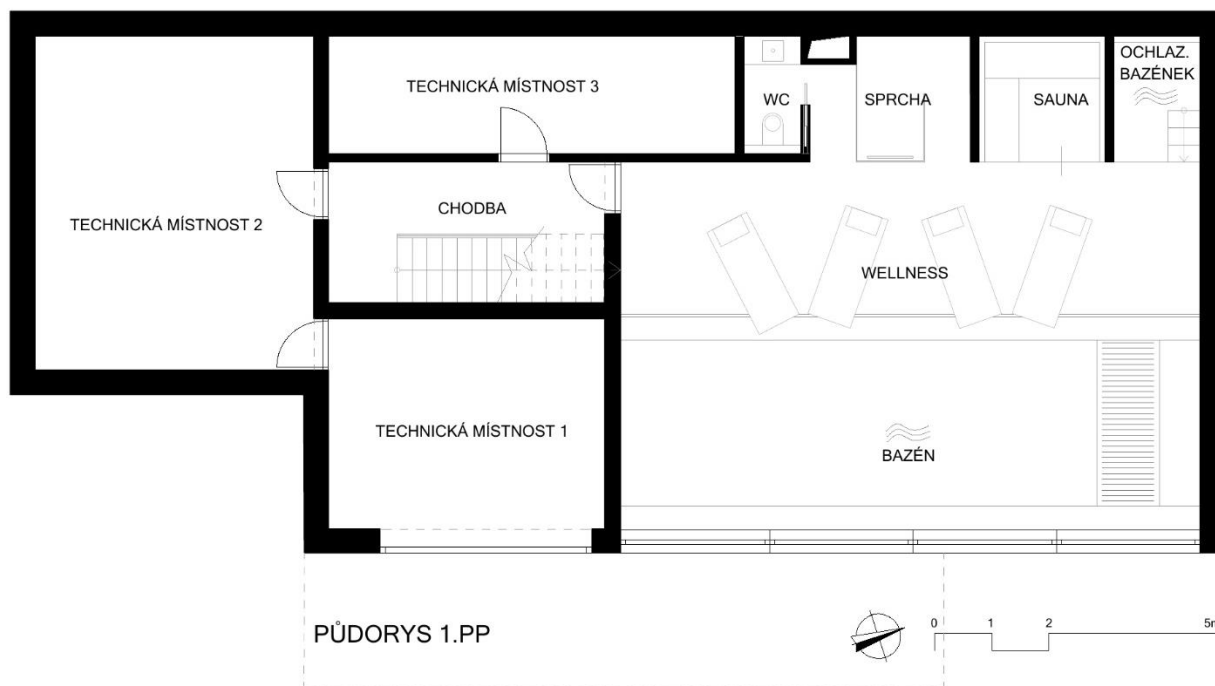
Jedná se o solitérní objekt, který je navržen do mírně sklonitého pozemku. V rámci studijních účelů uvažuji, že daný objekt mohu na pozemku libovolně pootáčet a orientovat dle nejvýhodnější polohy z hlediska optimálního využití slunečních zisků. Tato možnost se zde nabízí i z důvodu, že dům nebude doplňovat žádnou městskou zástavbu a nevztahují se na něj ani žádná regulační omezení. Budova bude ve výchozím stavu posouzena dle architektonického návrhu, který orientuje objekt podle štitových stran sever-jih.

2.2 Tvarové a dispoziční řešení

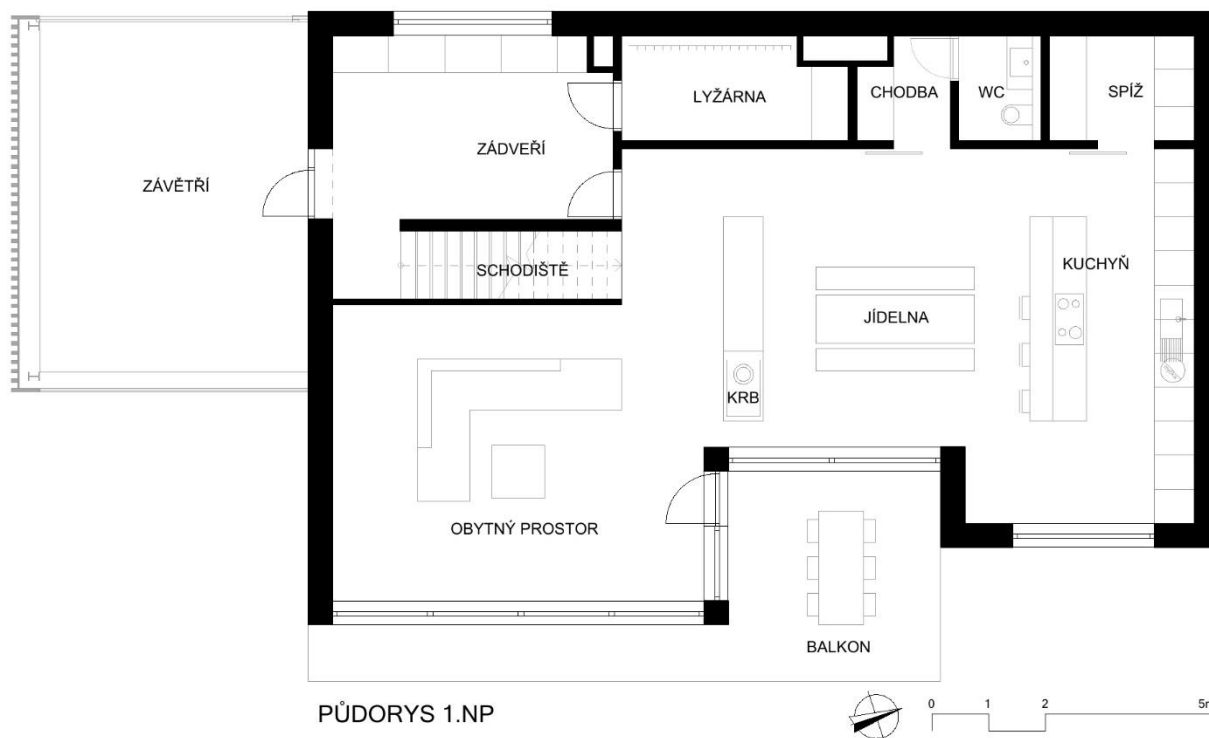
Hmotový návrh chaty vychází z tradičního tvaru horských chat se sedlovou střechou, avšak v tomto případě došlo k odebrání klasického střešního přesahu, což u dnešních novostaveb není žádnou novinkou. Část hmoty v místě obývacího pokoje mírně vystupuje a zároveň hned vedle ustupuje dovnitř. Dále v podkroví vystupuje část hmoty nad úroveň střešní roviny, čímž vytváří jednoduchý pultový vikýř. Posledním hmotovým prvkem, který vystupuje ze základního tvaru, je hmota u vstupní části, která plní účel jedné ze tří technických místností.

Chata se skládá z jednoho částečně podzemního podlaží (1.PP), dvou nadzemních podlaží (1.NP a 2.NP) a využívaného podkroví (3.NP). Objekt leží na jednoduchém půdorysu ve tvaru obdélníku o rozměrech 16 x 9,6 m. V podzemním podlaží nalezneme veškeré technické prostory a také relaxační část s vnitřním bazénem a saunou. Vstupní část přízemí obsahuje zádveří, na které navazuje lyžárna a rozsáhlá společenská místnost včetně kuchyňského zázemí. Další podlaží nabízí tři samostatné ubytovací apartmány pro dvě osoby s vlastním hygienickým zázemím. Ve zbývajícím podkroví se nachází poslední ubytovací prostory pro dvě osoby, hygienické zázemí a pracovna. Celková ubytovací kapacita chaty tedy činí 8 osob, ale s využitím přistýlek a rozkládacích pohovek by mohla být klidně dvojnásobná.

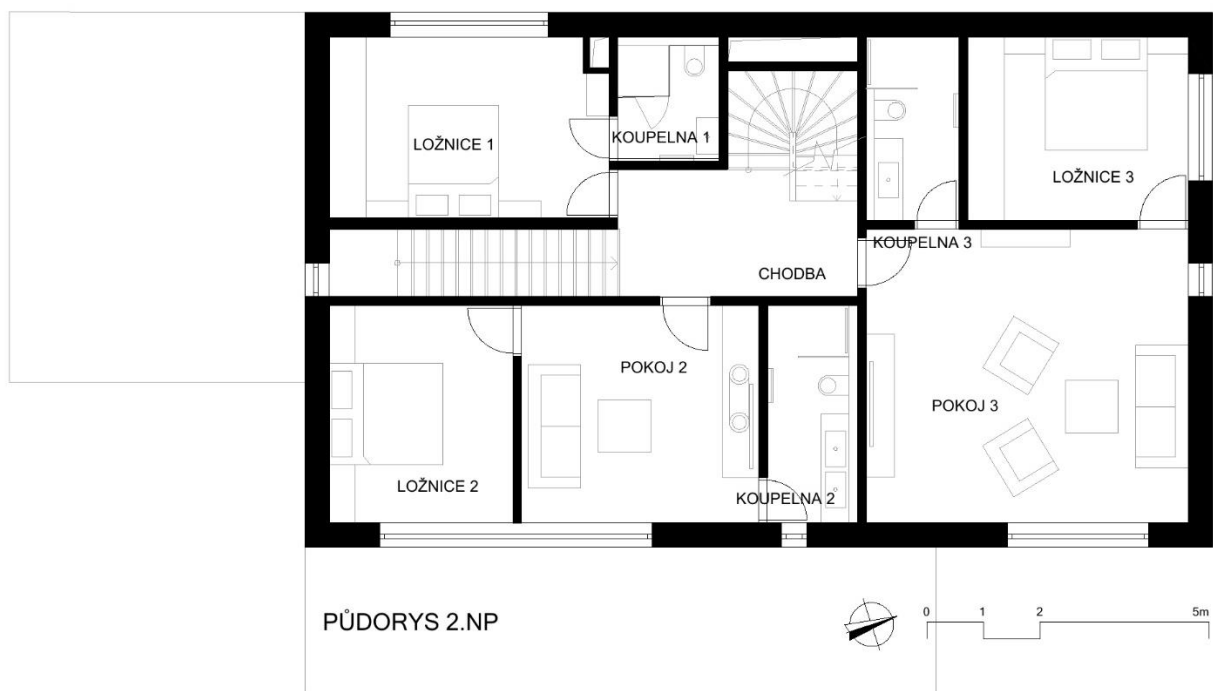
Následující schematické obrázky popisují dispoziční uspořádání chaty.



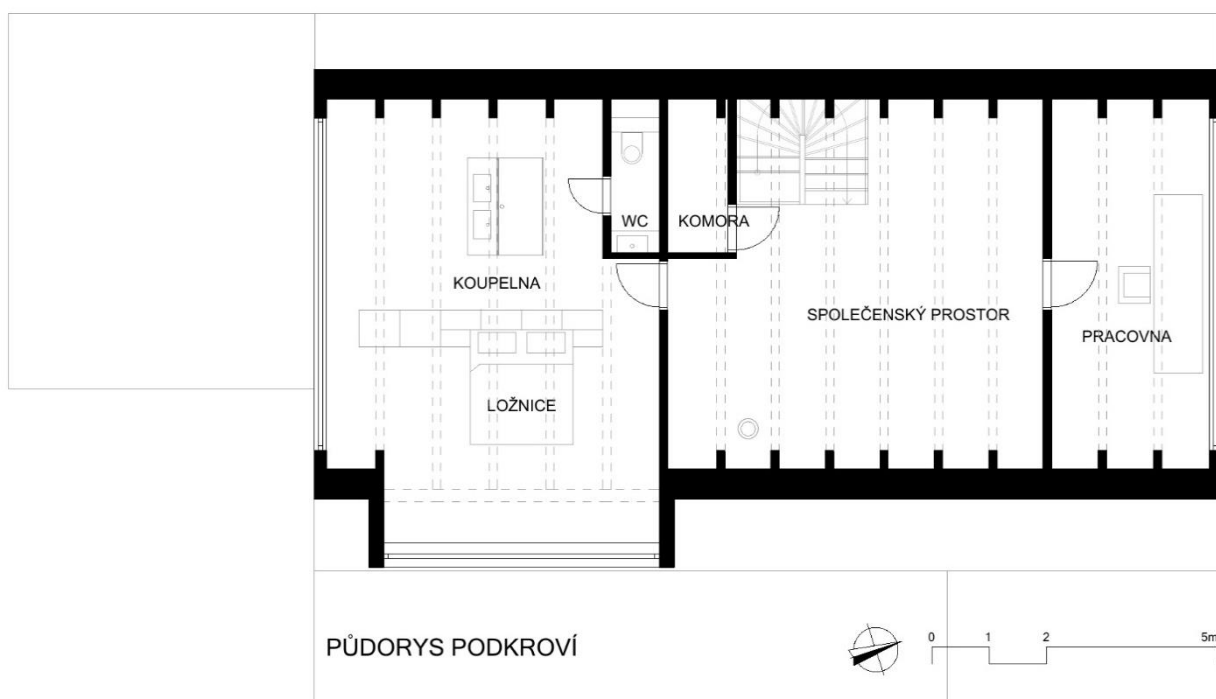
Obr. 1 - Schematický půdorys 1.PP



Obr. 2 - Schematický půdorys 1.NP



Obr. 3 - Schematický půdorys 2.NP



Obr. 4 - Schematický půdorys 3.NP

2.3 Konstrukční řešení

Z konstrukčního hlediska je objekt charakterizován železobetonovým monolitickým stěnovým systémem. Stropy jsou tedy taktéž železobetonové. Sedlovou střechu nese dřevěná krovová soustava, na které je položený dřevěný záklop, nadkroevní izolace v podobě PIR desek, a na dalším dřevěném záklopu spolu s laťováním je zachycena střešní krytina z břidlicových šablon. Obvodové stěny budou zatepleny kontaktně deskami z tepelné izolace PIR. Pro zateplení suterénních stěn je navržen nenasákavý extrudovaný polystyren. Fasáda je vytvořena z tenkovrstvé venkovní omítky. Podstatnou část objektu tvoří otvorové výplně, které v návrhu převládají zejména ve štítových stěnách v oblasti podkroví a čelní stěně, u které je situován obývací pokoj a také místnost wellness s bazénem. Okenní výplně jsou ve výchozím stavu sestaveny z plastového rámu s izolačním trojsklem o velmi dobrých tepelně-technických parametrech. Součinitele prostupu tepla konstrukcí byly vypočteny v programu DesignBuilder.

Skladby obvodových konstrukcí (shora od exteriéru):

Obvodová stěna S1

- vnější omítka Etics 0,01 m
- desky PIR ($\lambda = 0,022 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,14 m
- železobeton tl. 0,2 m
- vnitřní omítka tl. 0,01 m

Obvodová suterénní stěna S2

- vnější mozaiková omítka 0,02 m
- XPS ($\lambda = 0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,14 m
- hydroizolace proti spodní vodě
- železobeton tl. 0,2 m
- vnitřní omítka tl. 0,01 m

Šikmá střecha R1

- břidlicové šablony
- latě, kontralatě
- pojistná hydroizolace
- desky PIR ($\lambda = 0,022 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,1 m
- dřevěné bednění tl. 0,025 m
- minerální vata mezikroevní ($\lambda = 0,052 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,1 m
- parozábrana
- dřevěný rošt
- sádrokartonový podhled tl. 0,02 m

Plochá střecha R2

- oplechování
- pojistná hydroizolace
- XPS ($\lambda = 0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,18 m
- parozábrana
- železobeton tl. 0,2 m
- vnitřní omítka tl. 0,02 m

Podlaha na zemině P1

- XPS ($\lambda = 0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,1 m
- hydroizolace
- železobeton tl. 0,2 m
- EPS ($\lambda = 0,039 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tl. 0,07 m
- betonová mazanina tl. 0,1 m
- keramická dlažba

Tab. 1 - Součinitele prostupu tepla a plochy konstrukcí na obálce budovy

Konstrukce obálky budovy	Plocha konstrukce A	Výchozí stav U	Požadovaná hodnota $U_{N,20}$	Stav
	m ²	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	
S1 – obvodová stěna	357,3	0,149	0,3	vyhovuje
S2 – obvodová suterénní stěna	113,7	0,224	0,3	vyhovuje
R1 – šikmé střechy	227,4	0,146	0,24	vyhovuje
R2 – plochá střecha	49,8	0,172	0,24	vyhovuje
C1 – podlaha nad exteriérem	15	0,152	0,24	vyhovuje
P1b – podlaha na zemině	188,1	0,193	0,45	vyhovuje
O.. – okna s izolačním trojsklem	135,7	0,78	1,5	vyhovuje
D.. – vstupní dveře	9,9	0,84	1,7	vyhovuje

Řešený objekt ve výchozím stavu se dá obecně označit jako železobetonová stavba s velmi dobrým zateplením, kde součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí s rezervou splňují doporučené hodnoty dle normy ČSN 730540-2:2011 [4].

2.4 Řešení energetických a ekologických systémů

Veškeré technické zázemí se nachází v podzemním patře.

- **Vytápění a příprava TV**

Jako zdroj tepla je uvažován automatický kotel na tuhá paliva, který splňuje 4. emisní třídu podle ČSN EN 303-5 [5] pro hnědé uhlí. Účinnost kotle se předpokládá 85 %. Příprava teplé vody bude prováděna centrálně v nepřímě ohříváném zásobníku TV. Otopná soustava je navržena jako teplovodní s nuceným oběhem. Otopné plochy jsou tvořeny otopnými tělesy.

- **Větrání**

V prostoru bazénu je navrženo nucené větrání pro odvod vlhkostní zátěže. Předpokládám, že bazénová vzduchotechnická jednotka obsahuje výměník pro zpětné získávání tepla s účinností 80 %. V době nepřítomnosti je nastavena minimální rychlost otáček ventilátoru tak, aby docházelo neustále k větrání prostoru, protože i zakrytá vodní hladina produkuje

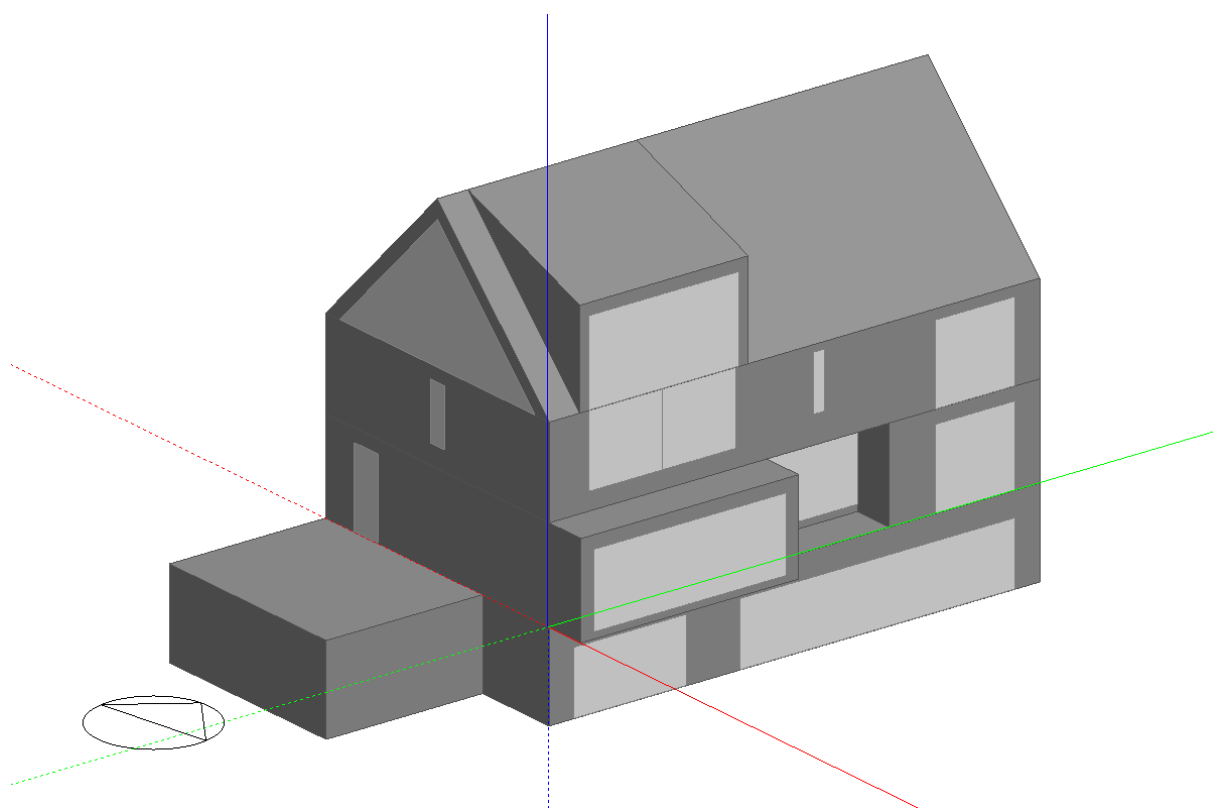
malé množství vlhkosti. Obytné prostory budou taktéž řízeně větrány pomocí vlastní vzduchotechnické jednotky.

- **Zdravotechnika**

Objekt bude zásobován vodou ze stávajícího vodovodu, který sloužil pro původní chatu. Veškeré splaškové vody z objektu budou odváděny do stávajícího septiku. Dešťové vody z novostavby střechy budou stékat ze střechy objektu volně na terén, kde budou likvidovány přirozenou infiltrací dešťové vody do terénu.

3 Tvorba modelu

Trojrozměrný model budovy jsem nejdříve vytvářel z důvodu uživatelsky příjemnějšího prostředí v programu SketchUp a následně importoval do simulačního programu DesignBuilder ve formátu XML. Model budovy se skládá z hlediska programové hierarchie ze čtyř hlavních zón, a to 1. podzemní podlaží, 1. nadzemní, 2. nadzemní podlaží a podkroví. V jednotlivých patrech byly vytvořeny přesné dispozice z vnitřních příček. Celková podlahová plocha je asi 580 m². Veškeré konstrukce bylo následovně nutné definovat prostřednictvím databáze materiálů, např. obvodová stěna S1 (vnější omítka, PIR desky tl. 140 mm, železobeton tl. 200 mm, vnitřní omítka).

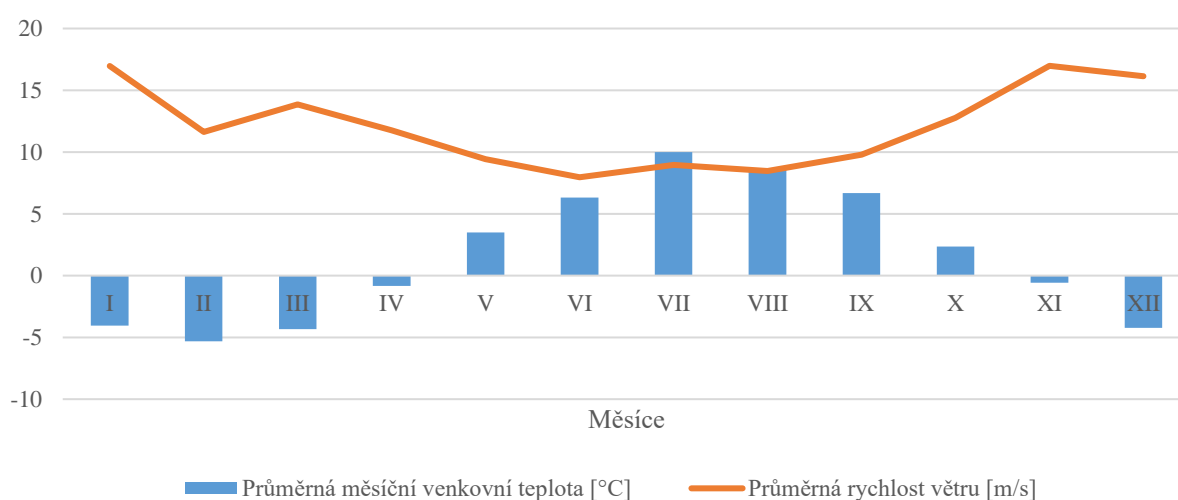


Obr. 5 - Vytvořený model v simulačním programu [DesignBuilder]

3.1 Okrajové podmínky

Za lokalitu objektu byla zvolena Pec pod Sněžkou. Z důvodu nedostupných hodinových dat z přesného umístění stavby byla použita data z meteostanice s nejpodobnějšími klimatickými podmínkami, která je umístěna na polské straně Sněžky. Ačkoliv zde existuje nepřesnost daná rozdílem nadmořské výšky cca 400 m, meteostanici s podobnějšími daty nebylo možné nalézt. Hodinová klimatická data byla vložena do simulačního programu ve formátu EPW. Objekt je ve výchozím stavu orientován podle štítových stran sever-jih (obr. 5).

Návrhová teplota vytápění ve výchozím stavu byla zvolena na 22 °C pro obytné místnosti, pro koupelny 24 °C, wellness 30 °C a pro technické místnosti v suterénu 10 °C. Větrání objektu je řešeno nuceně a bude hradit pouze tepelnou ztrátu větráním. Minimální intenzita větrání je nastavena na doporučenou hodnotu 0,5 h⁻¹. Tepelná ztráta prostupem tepla bude hrazena otopnou soustavou, kde bude teplo předáváno do prostoru převážně otopnými tělesy. Zdrojem tepla je tedy automatický kotel na tuhá paliva. Příprava teplé vody bude prováděna centrálně v nepřímo ohřívaném zásobníku TV, přičemž spotřeba teplé vody se uvažuje na 50 l/os/den. Uvažuje se plná obsazenost chaty, což znamená 8 osob. Předpokládá se, že osvětlení je navrženo úsporně, a to LED žárovkami. Požadovaná intenzita osvětlení je 150 lux. Nepočítá se s trvalými vnitřními zisky.



Graf 1 - Klimatické údaje v místě objektu [12]

3.2 Provoz

V rámci modelování jsem vytvořil tři nejpravděpodobnější scénáře provozu chaty vycházející ze stávajících trendů využívání rekreačních objektů. Jak je obecně známo, Češi jsou národem chalupářů, což potvrzuje minimálně fakt, že každý pátý Čech vlastní nějaký rekreační objekt. Obyvatelé měst, zejména Pražané, na víkend odjíždějí do přírody. Tento víkendový typ využívání objektu podle mého názoru představuje nejčastější způsob obývání soukromých horských chat v České republice, a proto jsem se v optimalizaci rozhodl věnovat se právě tomuto režimu.

Mým cílem tedy bude prozkoumat, jak se bude daná chata chovat ve víkendovém režimu, a ověřit, zda je výchozí návrh chaty z hlediska konstrukční a technické stránky tou správnou cestou v dosažení optimálních podmínek v objektu v době obsazenosti.

- **Víkendový režim**

Příjezd rezidentů se předpokládá na pátek 16:00 a odjezd v neděli v 18:00. U výchozího návrhu se dá snadno předpokládat poměrně vysoká akumulací kapacita, proto bude v zimě poměrně dlouho trvat, než se operativní teplota vlivem prochladlých těžkých konstrukcí dostane na požadovaných 22 °C, což by mohlo být zrovna u víkendového využití velmi nepříjemné. Na druhou stranu by teplota vzduchu v objektu díky vysoké akumulaci nemusela během pěti pracovních dnů extrémně klesnout.

- **Celoroční režim**

Tento provoz počítá s nepřerušovaným vytápěním a využíváním chaty po celý rok. Takový provoz by byl uplatněn při celoročním pronajímání nebo provozování chaty jako penzion. V tomto konkrétním případě bude sloužit pouze k porovnání tepelných bilancí.

- **Kombinovaný režim**

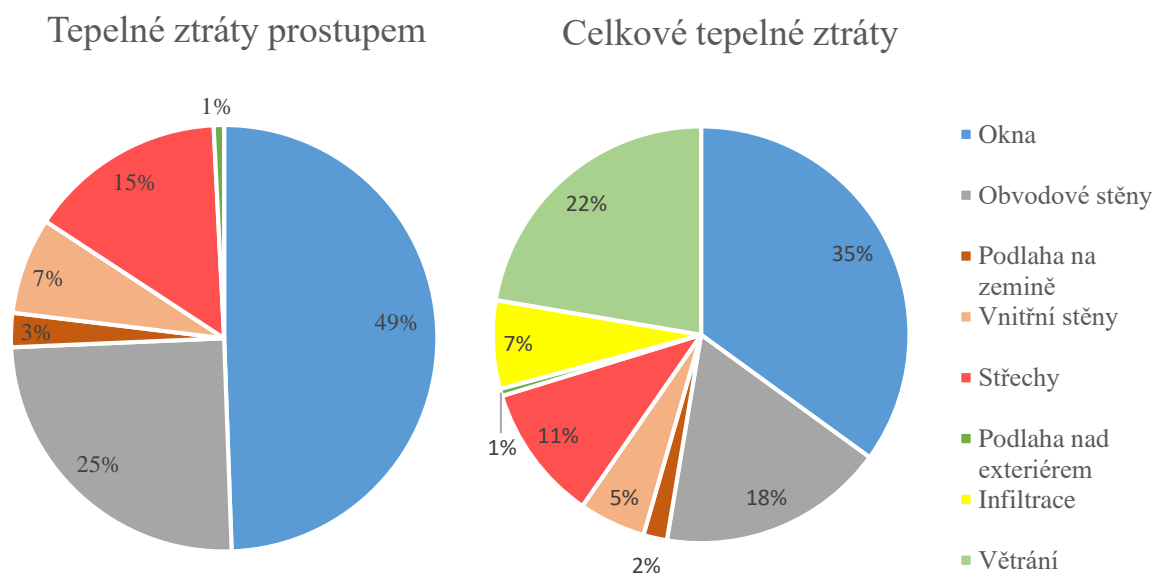
Kombinovaný provoz byl vytvořen spojením letní a zimní sezony spolu s víkendy v přechodných obdobích. Tento režim by se mohl nejvíce přiblížit skutečnému vyčíslení spotřeb energií.

V době nepřítomnosti bude nutné horskou chatu temperovat tak, aby nemohlo dojít k přílišnému prochladnutí, s čímž souvisí i následná doba vytopení objektu na požadovanou teplotu. To je důležité zejména u víkendového provozu. Temperování zároveň slouží i jako prevence proti zamrznutí technických systémů. Pro výchozí stav je uvažována teplota temperování na 15 °C.

4 Vyhodnocení výchozího stavu

4.1 Tepelné ztráty

Při posouzení energetické náročnosti výchozího stavu se nejprve zastavím u tepelných ztrát, které se skládají ze ztrát prostupem konstrukcí a ze ztrát větráním. Jelikož se jedná o horskou lokalitu s nadmořskou výškou vyšší než 800 m n.m., venkovní výpočtová teplota byla snížena na $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ dle ČSN 06 0210 [7]. Na grafu č.2 je zobrazeno rozložení tepelných toků skrz jednotlivé konstrukce, ze kterého vyplývá značná převaha tepelných ztrát okenními výplněmi (téměř polovina). Tato informace signalizuje, že prosklená plocha budovy je opravdu velká, a nabízí otázku, zda by nebylo vhodné plochu oken redukovat. K této otázce se vrátím v části optimalizace obálky.



Graf 2 - Tepelné ztráty pro jednotlivé konstrukce

Graf 3 – Celkové tepelné ztráty

Na grafu č.3 se nachází rozložení celkových tepelných ztrát, tedy včetně větrání a infiltrace. Dle výpočtů simulačního programu činí celková tepelná ztráta výchozího návrhu objektu asi 12,5 kW. Ve výchozím stavu je navrženo nucené větrání se zpětným získáváním tepla z odváděného vzduchu s účinností rekuperačního výměníku 80 %. Do výpočtu byla nastavena doporučená hodnota intenzity výměny vzduchu pro obytné prostory $0,5\text{ h}^{-1}$. Nicméně i pro tento úsporný způsob větrání vychází v takto chladné lokalitě poměrně vysoká tepelná ztráta větráním, která tvoří téměř jednu čtvrtinu z celkové ztráty tepla.

4.2 Ukazatele energetické náročnosti z roční simulace

Další tabulka uvádí souhrn a srovnání důležitých ukazatelů energetické náročnosti vypočtených na základě ročního simulování provozu objektu s využitím hodinových klimatických dat. Vedle energetických ukazatelů je připojen ještě údaj o tepelné pohodě.

Tab. 2 - Ukazatele energetické náročnosti z roční simulace

Výstupy z roční simulace pro výchozí stav	Typ provozu		
	Víkendový provoz	Celoroční provoz	Kombinovaný provoz
Potřeba tepla na vytápění [MWh/rok]	21,66	35,51	28,27
Spotřeba energie na vytápění [MWh/rok]	25,49	41,77	33,32
Spotřeba energie na přípravu TV [MWh/rok]	2,85	9,60	5,17
Spotřeba energie na osvětlení [MWh/rok]	0,27	2,13	1,38
Tepelná nepohoda (all clo) [hod]	502,84	103,74	295,58

4.3 Požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie

4.3.1 Definice budovy s téměř nulovou spotřebou energie

Termín budova s téměř nulovou spotřebou energie (Nearly zero-energy buildings NZEB) přinesla směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov (energy performance of building directive EPBD II) [11]. Ve zjednodušeném překladu se jedná o budovu s velmi nízkou energetickou náročností, u které musí být zároveň její spotřeba energie ve značném rozsahu pokryta z obnovitelných zdrojů. Řadu lidí tento termín může vystrašit, ale ve výsledku, jak bude blíže uvedeno níže, se nejedná o nijak drastické změny v navrhování budov v porovnání se stávajícími platnými předpisy. Každý členský stát EU musel nařízení zahrnout do své legislativy. Česká Republika směrnicí implementovala do zákona 406/2000 Sb. o hospodaření energií a do prováděcí vyhlášky 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov (se změnou 230/2015 Sb.) [1], kde jsou uvedeny specifické parametry.

Důležitým bodem směrnice je závazný termín 1.1.2020, od kterého bude muset každá projektová dokumentace vykazovat soulad s předepsanými požadavky pro tento standard budovy. Pro veřejné budovy začaly platit tyto požadavky postupně již od roku 2016. Pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie byly zavedeny dva zpřísněné požadavky. První se týká již zmíněné nízké energetické náročnosti a je definován pomocí tzv. redukčního činitele požadované hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla f_R . Druhý parametr, který je zapotřebí splnit, se věnuje snížení neobnovitelné primární energie. [17]

4.3.2 Průměrný součinitel prostupu tepla

Nevyhnutelným krokem při návrhu nové budovy je tedy stanovení tzv. průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} a jeho posouzení s referenční hodnotou dle vyhlášky 78/2013 Sb. [1]. Jedná se o jeden ze základních ukazatelů energetické náročnosti budovy. Požadovaná hodnota $U_{em,N,20}$ referenční budovy se stanoví jako vážený průměr normových hodnot součinitelů prostupu tepla všech teplosměnných ploch podle vztahu:

$$U_{em,N,20} = \int_R \cdot [\Sigma(U_{N,i} \cdot A_i \cdot b_j) / \Sigma A_i + \Delta U_{em,R}] \quad (1)$$

- \int_R redukční činitel požadované hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla [-]
- $U_{N,20j}$ normová požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla j-té teplosměnné konstrukce pro převažující návrhovou vnitřní teplotu 20 °C podle ČSN 730540-2:2011 [W/(m²·K)]
- A_j plocha j-té teplosměnné konstrukce, stanovená z vnějších rozměrů [m²]
- b_j teplotní redukční činitel j-té konstrukce podle ČSN 73 0540-2:2011 [-]
- $\Delta U_{em,R}$ přírážka na vliv tepelných vazeb [W/(m²·K)]

Pro vícezónový model je však potřeba ještě provést vážený průměr přes objemy zón podle následujícího vztahu.

$$U_{em,R} = \Sigma(U_{em,Rj} \cdot V_j) / \Sigma V_j \quad (2)$$

Tab. 3 - Požadované hodnoty redukčního činitele [1]

Parametr	Označení	Jednotky	Referenční budova		
			Dokončená budova a její změna	Nová budova	Budova s téměř nulovou spotřebou energie
Redukční činitel požadované základní hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla	\int_R	-	1,0	0,8	0,7
Přírážka na vliv tepelných vazeb	$\Delta U_{em,R}$	W/(m ² ·K)	0,02		

Požadovaný referenční průměrný součinitel prostupu tepla je nutné násobit s daným redukčním činitelem uvedeným v tab. č.3. Pro tento objekt nás zajímá požadavek pro budovy s téměř nulovou spotřebou energie, který přijde v platnost pro veškeré novostavby již od začátku roku 2020, tudíž i pro tento projekt je požadavek aktuální.

4.3.3 Neobnovitelná primární energie

Druhý požadavek vychází opět přímo z definice, kde se hovoří o tom, že spotřeba energie budovy musí být ve značném rozsahu pokryta z obnovitelných zdrojů. Evropská unie zde apeluje na implementaci obnovitelných zdrojů energie za cílem redukce skleníkových plynů a ve snaze zpomalení procesu globálního oteplování. Jelikož budovy v evropském měřítku spotřebují téměř 40 % energie, považují toto kritérium za smysluplné. [11]

Neobnovitelná primární energie neprošla žádným procesem přeměny a pochází převážně z fosilních paliv. K vyčíslení neobnovitelné primární energie využíváme tzv. faktor neobnovitelné primární energie F [–] neboli konverzní faktor. Konverzní faktor v sobě zahrnuje náročnost procesů od těžby dané suroviny, dopravy až po samotné využití energie na hranici budovy. Například nejvyšší hodnotu konverzního faktoru má v ČR elektřina (hodnota kolem 3,0), jelikož se u nás účinnost výroby elektrické energie pohybuje jen kolem 30 % a pochází většinou z neobnovitelných zdrojů.

Pro referenční hodnotu neobnovitelné primární energie se podle vyhlášky používají konverzní faktory pro dané druhy spotřeby energie (např. pro vytápění 1,1; přípravu TV 1,1; nucené větrání 3,0; osvětlení 3,0 atd.). Druh energonositele není explicitně určen, ale podle dané hodnoty lze celkem snadno poznat, o jaké paliva se jedná. Vytápění odpovídá použití plynu nebo uhlí a ostatní části technických systémů připadají elektřině.

Do vyhlášky o energetické náročnosti budov byla tato tematika vložena a specifikována pomocí procentuálního snížení neobnovitelné primární energie oproti referenční budově $\Delta e_{p,R}$.

$\Delta e_{p,R}$	Snížení neobnovitelné primární energie oproti referenční budově [%]	
	- pro rodinné domy min. 25%	
	- pro bytové domy min. 20%	
	- ostatní budovy min. 10%	[1]

4.3.4 Posouzení výchozího stavu s požadavky NZEB

- Průměrný součinitel prostupu tepla

Podle výše uvedených vztahů byly dopočítány hodnoty průměrných součinitelů prostupu tepla a následně porovnány s požadavky legislativy. Z výsledků je patrné, že výchozí návrh splňuje první požadavek pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie. Závěrem lze říci, že stavět s konstrukcemi na doporučených hodnotách již nebude stačit. Stavebníci budou muset

kromě většiny konstrukcí v doporučeném standardu postavit alespoň část s doporučenými hodnotami pro pasivní budovy.

Tab. 4 - Posouzení průměrného součinitele prostupu tepla pro výchozí stav

Konstrukce	Plocha	Součinitel prostupu tepla		
		Výchozí stav	Požadovaná hodnota $U_{N,20}$	Doporučená hodnota $U_{N,20}$
	m ²	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)
Obvodová stěna	357,3	0,149	0,30	0,25
Obvodová suterénní stěna	113,7	0,224	0,30	0,25
Plochá střecha	49,8	0,172	0,24	0,16
Šikmá střecha	227,4	0,146	0,24	0,16
Podlaha nad exteriérem	15	0,152	0,24	0,16
Podlaha na zemině	188,1	0,193	0,45	0,30
Okna	135,7	0,78	1,50	1,20
Dveře	9,9	0,84	1,70	1,20
Tepelné vazby	1096,9	0,02	0,02	0,02
Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla U_{em} [W/(m².K)]		0,26	0,45	0,34
Redukční činitel f_R [-]		0,58	1	0,76
Klasifikace dle vyhlášky		B	D	C
Splňuje požadavek pro novou budovu		ANO	NE	ANO
Splňuje požadavek pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie		ANO	NE	NE

- Neobnovitelná primární energie

Z hlediska neobnovitelné primární energie výchozí návrh nemůže splnit požadavek procentuálního snížení o 25 %. Pro stanovení referenční hodnoty není třeba provádět složité výpočty za použití všech referenčních parametrů. V tomto případě bohatě stačí porovnat konverzní faktory energonositelů. Ve výchozím stavu je pro vytápění a přípravu TV navrženo uhlí a pro osvětlení a nucené větrání elektrina z veřejné sítě. Hodnoty neobnovitelné primární energie výchozího návrhu a referenční budovy budou téměř identické, proto požadavek nemůže být splněn.

Výchozí návrh tedy **nesplňuje** požadavky pro budovy s téměř nulovou potřebou energie.

V následujících krocích proto návrh optimalizují podle stanovených kritérií a také tak, aby výsledný návrh splnil požadavky pro NZEB.

5 Optimalizace v simulačním SW

Pro tuto práci využívám optimalizační modul simulačního programu DesingBuilder verze 4.7. Jedná se o metodu efektivního hledání varianty návrhu, která nejlépe obstojí v námi zvolených cílech návrhu (např. nízká spotřeba energie, tepelná pohoda, náklady, emise CO₂ atd.). Tento modul nám umožňuje použít až 10 návrhových proměnných při porovnání dvou stanovených cílů. Program využívá pro hledání nejlepších kombinací tzv. genetický algoritmus, který je založen na principech evoluční biologie.

Genetický algoritmus spočívá v tvorbě generací různých řešení daného problému a následného zlepšování (šlechtění). Nejprve se vytváří nultá generace, kterou tvoří náhodně vytvořené kombinace proměnných. Následuje ohodnocení vytvořených kombinací, ze kterých se ty nejlepší přenášejí do budoucích generací, kde dochází ke křížení, mutaci a reprodukci, dokud nejsou nalezena optimální řešení. Záleží na nás, do jaké míry podrobnosti chceme daný problém řešit. Obvyklý počet populací se volí mezi 50-500 v závislosti na složitosti problému a vyžadované přesnosti výsledných parametrů. [13]

5.1 Nastavení optimalizace

5.1.1 Cíle návrhu

Základní nastavení optimalizace spočívá v definování hledaných cílů návrhu (objectives), kterých program nabízí poměrně dost. Dále je nutné stanovit, zda budeme chtít daný cíl minimalizovat, nebo naopak maximalizovat. Podle tohoto zadání bude poté měřena úspěšnost jednotlivých kombinací.

5.1.2 Omezení návrhu

Zvolené cíle můžeme ohraničit definováním minimálních či maximálních hodnot (constraints). Například počet hodin tepelné nepohody (discomfort hours) musí být menší než 200 hodin nebo investiční náklady nesmí být menší než 5 mil. Kč. Kombinace, která tyto omezující podmínky nesplní, budou vyznačeny žlutou barvou.

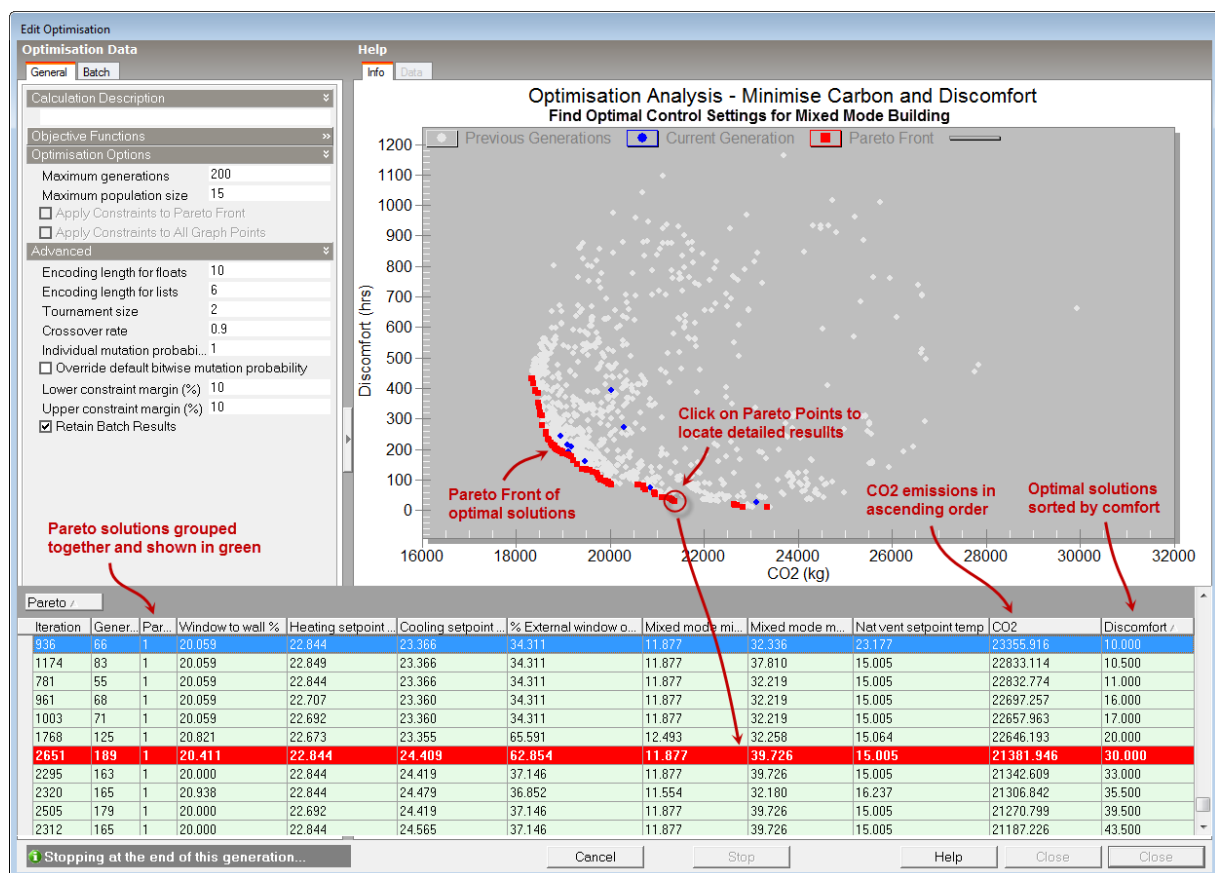
5.1.3 Proměnné

Tzv. proměnné (variables) nám umožňují definovat ty části návrhu budovy, které mohou nabývat různých hodnot z námi zvoleného intervalu nebo tabulky možností. Program nabízí až 120 různých proměnných (např. orientace na pozemku, poměr prosklení, šablony konstrukce,

návrhová teplota vytápění, druhy zasklení, šablony HVAC (Heating, ventilation, and air conditioning resp. vytápění, větrání a klimatizace) atd.). [13]

5.2 Výstup optimalizace

Po vytvoření poslední generace je optimalizace ukončena a její výsledky jsou prezentovány v grafu a tabulce. Osy grafu reprezentují hledané cíle návrhu (na obr. 6 např. Tepelná nepohoda x emise CO₂). Všechny vytvořené kombinace proměnných parametrů jsou zaznamenány bodově v grafu, přičemž optimální výsledky se hromadí v jakési přední linii (pareto front) v levém dolním rohu. Jedná se o kombinace, které nejlépe splňují zadané cíle (pareto points). Jednotlivá optimální řešení se mohou dále zkoumat v tabulce níže, ale lépe samozřejmě v tabulkovém programu, kde se snáz vybere vyhovující návrh. [13]



Obr. 6 - Výstup optimalizace v simulačním programu [13]

6 Optimalizace výchozího návrhu horské chaty

Nyní přecházím k praktické části práce, kdy se pokusím optimalizovat koncepční návrh horské chaty, který byl představen v přední části práce.

6.1 Optimalizace konstrukčního řešení obálky

V prvním kroku se zaměřím na obálku budovy, kde bude mým hlavním cílem nalezení takového řešení, které obstojí ve snížení energetické náročnosti, zlepšení tepelné pohody a zároveň dosáhne dobrých výsledků v otázce investičních nákladů a ekologické zátěži.

6.1.1 Proměnné

- Orientace budovy na pozemku

Jelikož se jedná o solitérní stavbu, na kterou se nevážou žádné regulační požadavky v souvislosti s okolní zástavbou, tak se zde nabízí velký prostor pro zvolení optimálního natočení objektu vůči světovým stranám. To je velmi výhodné především pro využití tepelných zisků ze slunečního záření za cílem snížení potřeby tepla na vytápění v zimních měsících. Zároveň se ovšem musí posoudit vliv této tepelné zátěže v letním období, kdy hrozí riziko přehřívání zejména právě u nízkoenergetických staveb s lehkou konstrukcí.

- Typ konstrukce

Zde se uplatňuje proměnná ve formě šablony, která v sobě zahrnuje všechny skladby dílčích konstrukcí objektu kromě výplní otvorů. Šablony konstrukcí jsem rozdělil nejprve dle součinitele prostupu tepla do tří kategorií dle současné platné normy ČSN 73 0540-2:2011[4], tedy pro požadované hodnoty ($U_{\text{pož}}$), doporučené (U_{dop}) a doporučené pro pasivní budovy (U_{pas}). Dále jsem každou kategorii rozvětvil ještě podle objemové hmotnosti konstrukce do dalších tří kategorií (lehká, střední, těžká). Lehká konstrukce symbolizuje dřevostavbu, střední pak klasický zděný dům s kontaktním zateplovacím systémem a těžká železobetonovou stavbu s kontaktním zateplovacím systémem. Celkem tato proměnná obsahuje tedy 9 šablon. Veškeré materiály konstrukcí jsem volil tak, aby odpovídaly běžným skladbám v české praxi, a také jsem jim přiřadil adekvátní průměrné ceny pohybuující se na českém trhu.

- Typ zasklení

Tento proměnný parametr jsem rozdělil dle počtu zasklení na trojskla a dvojskla a dále pak podle solárního faktoru, jenž udává celkový prostup sluneční energie přes zasklení. Dále jsem zasklení rozčlenil opět podle tří normových součinitelů prostupů tepla. Celkem algoritmus

programu tedy vybíral z 8 možných druhů zasklení. Program DesingBuilder nabízí opravdu nesčetně možností skel, avšak málo těch s nejlepšími izolačními parametry.

- Vnější stínící prvky

V této kategorii jsem vytvořil různé typy vnějších stínících prvků, mezi které patří vodorovné lamely, svislé lamely a nadokenní markýzy.

- Vnitřní návrhová teplota vytápění

Zde jsem stanovil interval teplot od 19–24 °C.

- Poměr prosklení štítových stěn

Tento parametr jsem zvolil z obavy, že v koncepčním návrhu byla předdimenzovaná velikost prosklení v podkroví, což by mohlo nepříznivě ovlivnit tepelnou pohodu v letních měsících. Zde jsem tedy zvolil interval mezi 30-80 % zasklené plochy vůči dané obvodové stěně.

Pro přehlednost uvádím v tabulce níže soupis všech proměnných parametrů se specifikací rozsahu hodnot proměnných, velikosti kroku a oblasti, ke které se vztahují.

Tab. 5 - Seznam a rozsah hodnot měněných proměnných

Název proměnné	Rozsah hodnot	Krok	Cíl
Návrhová teplota [°C]	19-24 °C	0,3 °C	Celý objekt
Orientace budovy na pozemku [°]	0-360 °	5 °	Celý objekt
Typ konstrukce	9 možností	-	Celý objekt
Typ zasklení	9 možností	-	Celý objekt
Vnější stínící prvek	5 možností	-	Celý objekt
Poměr prosklení stěn podkroví [%]	30-80 %	2	Podkroví

6.1.2 Cíle návrhu

- Tepelná pohoda

Pro tepelnou pohodu (označována také jako tepelný komfort) existuje několik definic. *Tepelná pohoda znamená, že je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není ani chladno, ani příliš teplo – člověk se cítí příjemně* [19]. *Tepelná pohoda je stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení* [9]. Pro dosažení tepelné pohody musí být splněna podmínka tepelné rovnováhy mezi organismem člověka a okolím.

Tepelnou pohodu ovlivňují tyto faktory:

- vnitřní teplota vzduchu t_i [°C]
- střední radiační teplota t_r [°C]
- rychlost proudění vzduchu v_a [m/s]
- tlak vodních par ve vzduchu p_a [Pa]
- metabolický tepelný tok q_m [W/m², resp. met]
- stupeň oblečení daný tepelným odporem oblečení R_{ob} [m²·K/W, resp. clo] [18]

Pro zjednodušení hodnocení tepelné pohody se používá tzv. operativní teplota, která zohledňuje teplotu vzduchu, střední radiační teplotu i rychlost proudění vzduchu. Operativní teplota se stanoví dle vzorce:

$$t_o = A \cdot t_a + (1-A) \cdot t_r \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

- A hodnota závislá na relativní rychlosti proudění vzduchu (v_a) podle tab. 6 [-]
 t_a teplota vzduchu [°C]
 t_r střední radiační teplota [°C]

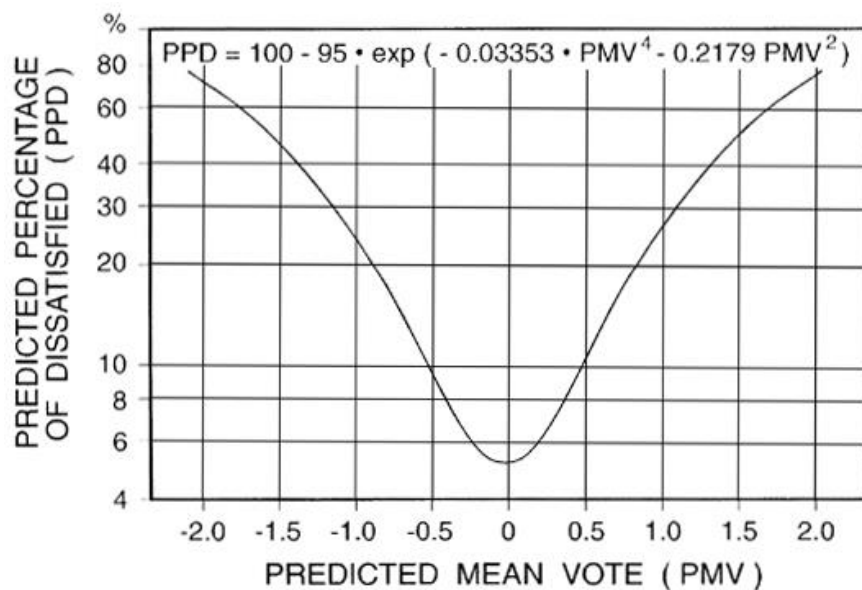
Tab. 6 - Závislost koeficientu A na rychlosti proudění vzduchu [6]

v_a (m/s)	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
A (-)	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

Níže na grafu č. 5 příkládám vytyčení tzv. zóny tepelné pohody definované rozsahem hodnot operativních teplot (vodorovná osa), které poskytují přijatelné tepelné podmínky vnitřního prostředí dané vlhkostí, rychlostí proudění vzduchu, aktivitou a použitým stupněm oblečení.

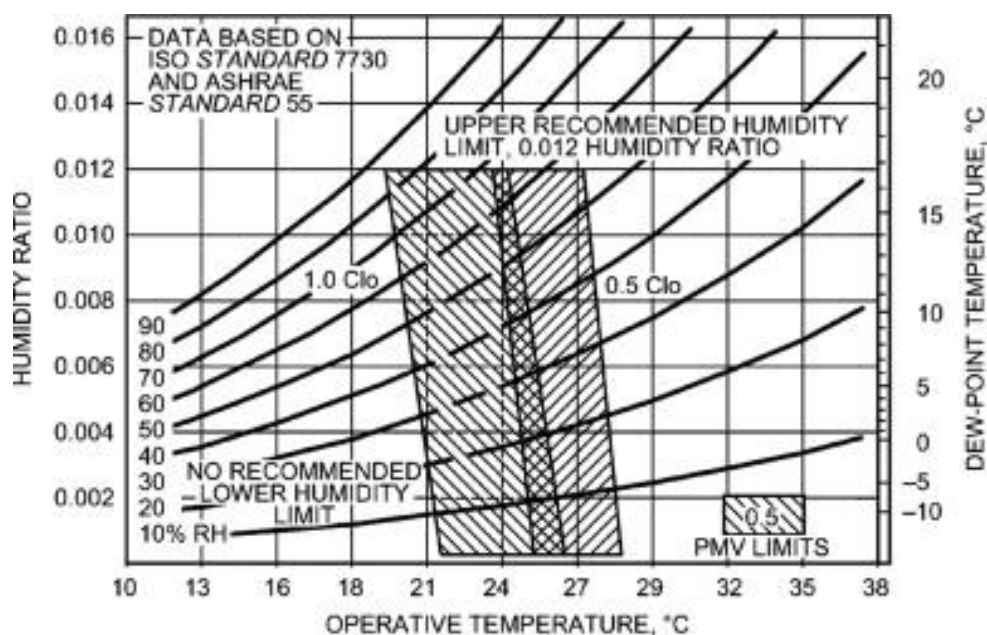
Rozsah operativních teplot v zóně tepelné pohody vychází z uvažování, že pro nejméně 80 % přítomných osob v hodnocené místnosti je daný stav přijatelný a cítí se spokojeně. Ze zbylých 20 % nespokojených osob je 10 % určeno na základě předpokladu podle PMV (Predicted Mean Vote resp. průměrný tepelný pocit člověka) a PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied resp. předpokládané procento nespokojených) indexů a posledních 10 % tvoří nespokojené osoby vlivem tzv. lokální tepelné nepohody. PMV index tedy vyjadřuje průměrnou hodnotu tepelných pocitů uživatelů v místnosti. Tepelný pocit je volen ze stupnice o 7 hodnotách (3 horko, 2 teplo, 1 mírně teplo, 0 neutrálně, -1 mírně chladno, -2 chladno, -3

zima). PPD index vyjadřuje předpokládané procento nespokojených osob. Vztah a průběh hodnot předpokládaného procenta nespokojených je vyjádřen v následujícím grafu č. 4. [23]



Graf 4 – PPD-PMV dle ASHRAE 55 [9]

Vytyčené oblasti zóny tepelné pohody jsou platné pro tepelný odpor oblečení mezi 0,5 clo a 1,0 clo (1 clo = 0,155 m².K/W). Pro zimu se obvykle uvažuje 1,0 clo. Tomu odpovídá např. kompletní pánský oblek. Pro léto se uvažuje oblečení s tepelným odporem 0,5 clo, což odpovídá krátkému tričku a trenkám. Pro člověka nahého by se použilo 0 clo. Dále graf vychází z předpokladu, že tělesná aktivita člověka a tedy hodnota metabolického tepla jsou v rozmezí 1,0 – 1,3 met (1 met = 60 W/m²). Těchto hodnot dosahuje člověk při sezení či stání v klidu.



Graf 5 – Zóna tepelné pohody v závislosti na operativní teplotě a vlhkosti vzduchu dle ASHRAE 55 [9]

- Snížení potřeby tepla na vytápění

Roční potřeba tepla na vytápění závisí především na kvalitě obálky budovy, velikosti solárních zisků a návrhové teplotě interiéru. Nejlepších výsledků v této oblasti by dosáhla kombinace nejlépe zateplené obálky, vhodně orientované za účelem nejvyšších solárních zisků a nejmenší návrhové teploty. Toto řešení by ovšem negativně ovlivnilo další důležitá hlediska návrhu, jako jsou tepelná pohoda, cena a ekologická stránka návrhu. Proto je lepší stanovit si dva cíle zároveň a hledat optimální kombinace, které splní nejlépe oba požadavky.

- Investiční náklady

Každého investora zajímá hlavně otázka velikosti investice, a proto bude také zajímavé posouzení ceny v závislosti na ostatních stanovených kritériích. K jednotlivým materiálům konstrukcí jsem se pokusil přiřadit adekvátní cenu vycházející z českých podmínek. Celkové investiční náklady jsou tedy sestaveny z části mých ručně zadaných cen materiálů a z části výchozích cen pro všechny stavební úkony, které přiřazuje program DesignBuilder automaticky. Výsledné ceny jsou pouhým hrubým odhadem a slouží jako doplňující informace v rozhodování.

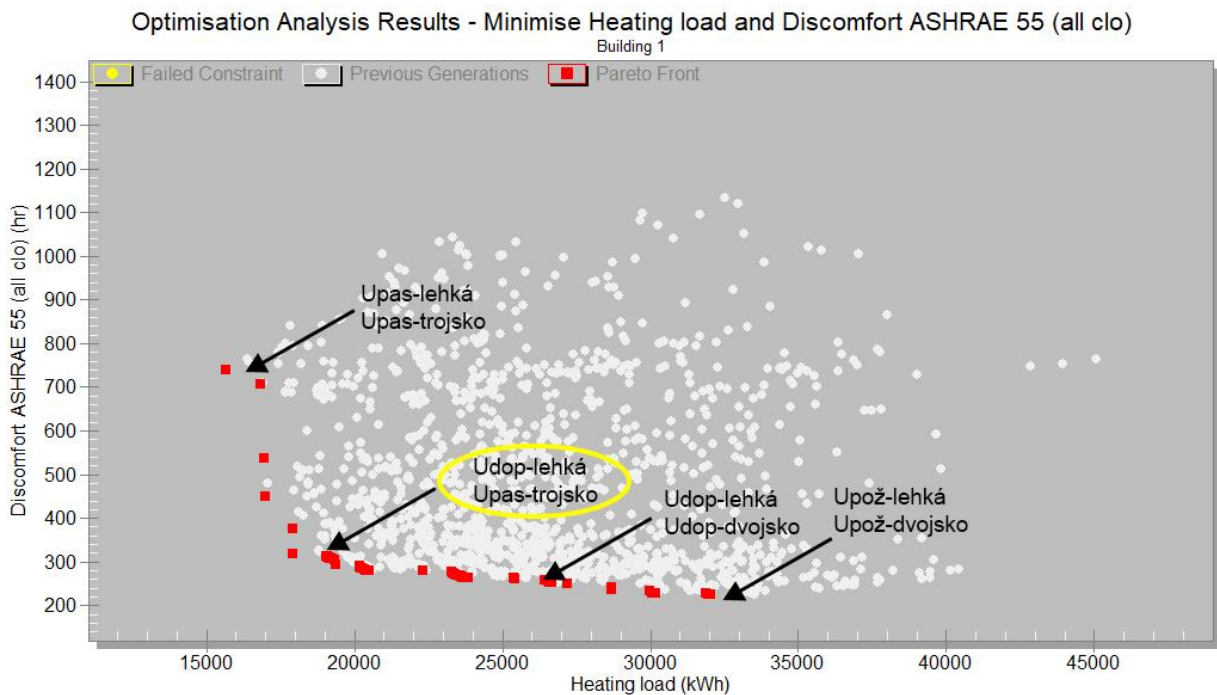
- Svázané emise CO₂

Každý materiál si s sebou nese tzv. svázané emise CO₂, tedy takové množství emisí, které bylo vyprodukováno do té doby, než byl materiál přivezen na samotnou stavbu. Hodnota zahrnuje proces těžby suroviny, dopravy a výroby konkrétního materiálu. Program DesignBuilder obsahuje bohatou databázi hodnot vázaných emisí CO₂. Některé hlavní materiály jsem porovnával s českým zdrojem Envimat [14], abych se ujistil, že zadané hodnoty jsou srovnatelné.

6.1.3 Výsledky 1.fáze optimalizace

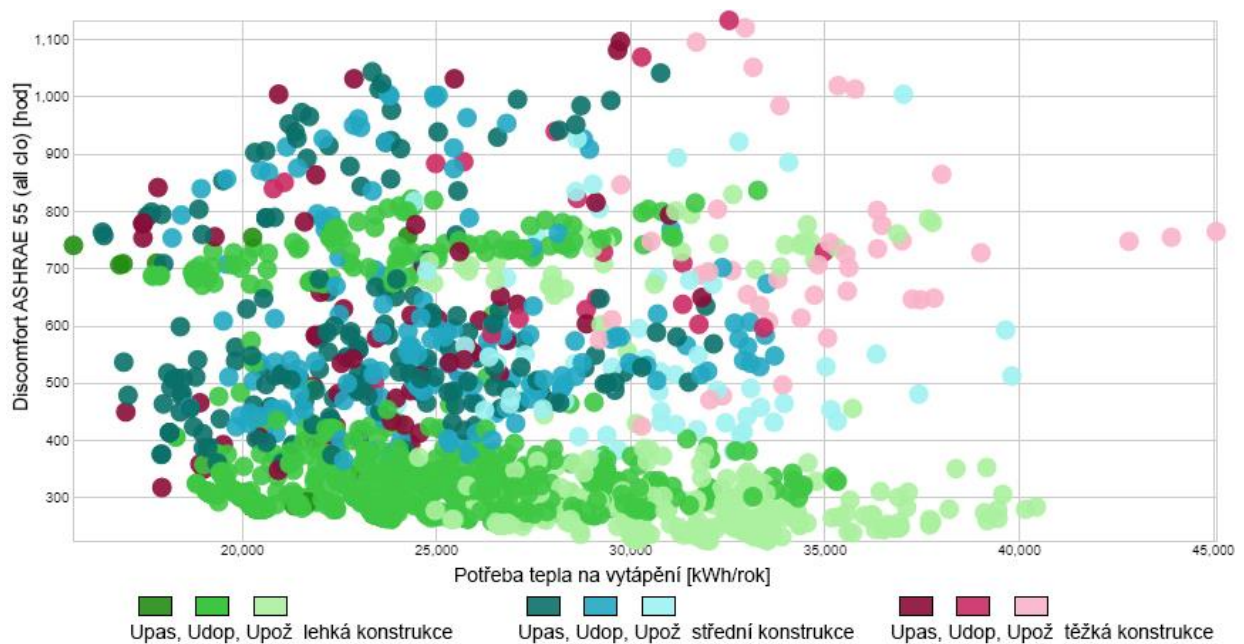
Nejprve jsem hledal takové řešení, které nejlépe obstojí v redukci roční potřeby tepla na vytápění a zároveň v oblasti tepelné pohody. Tepelnou pohodu simulační program hodnotí na základě parametrů pro zajištění takových vnitřních podmínek, které by byly přijatelné alespoň pro 80 % přítomných osob, a to pro oba stupně oblečení 0,5 a 1 clo po celý rok. Kritéria tepelné pohody budou tedy nastavena tak, jako jsem je popsal v předchozích odstavcích. Celkový počet hodin, kdy vnitřní podmínky nesplní tato kritéria, bude dále zkoumán pod označením tepelná nepohoda – mým cílem bude tuto hodnotu v rámci optimalizace co nejvíce snížit. Na grafu č. 6 jsou zobrazeny všechny vygenerované kombinace. Velikost prvotní populace zde byla

nastavena na hodnotu 10 a počet generací na 100. Rozčlenil jsem přední linii optimálních výsledků na shluky se stejným typem konstrukce a zasklení.



Graf 6 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a roční potřeby tepla na vytápění [DesignBuilder]

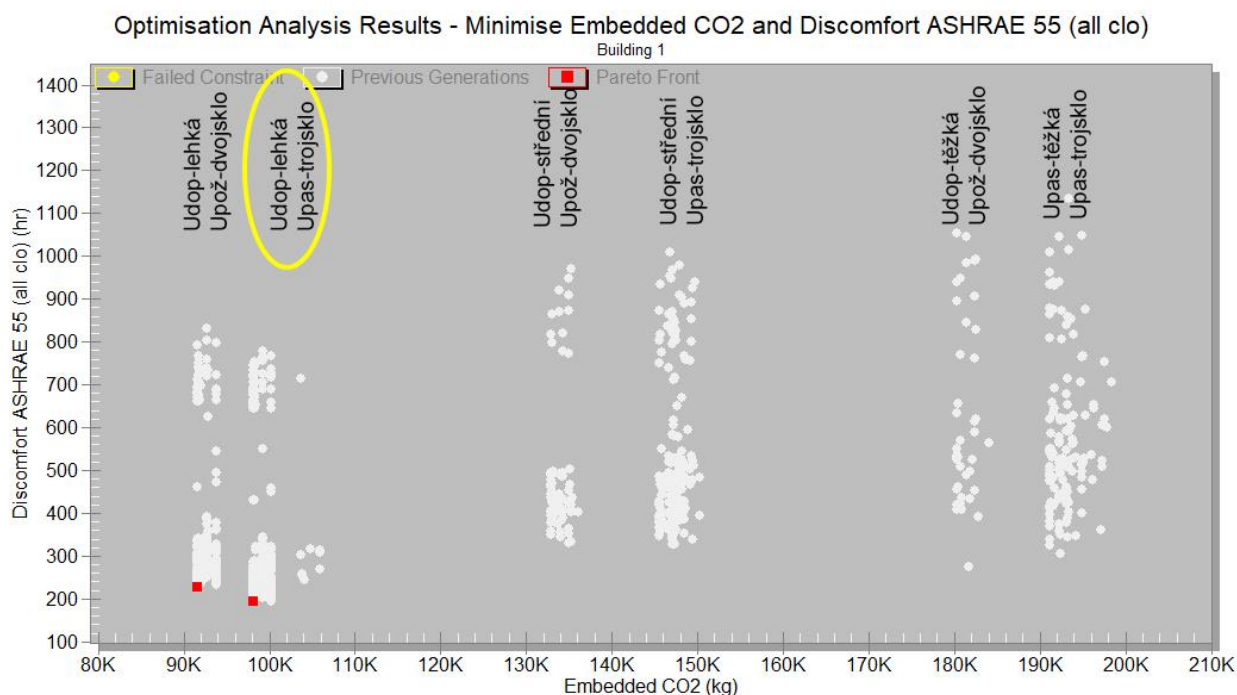
Výsledky ukazují, že cílové zadání nejlépe plní kombinace s lehkými konstrukcemi s doporučenými hodnotami součinitele prostupu tepla a trojitým zasklením s doporučenou hodnotou součinitele pro pasivní budovy. V následujícím grafu č. 7 jsem stejná data vnesl do nástroje pro vizualizaci dat, kde jsem jednotlivým typům konstrukce přiřadil vlastní barvu.



Graf 7 - Vizualizace výsledných dat z předchozího grafu rozdělených podle druhu konstrukce [22]

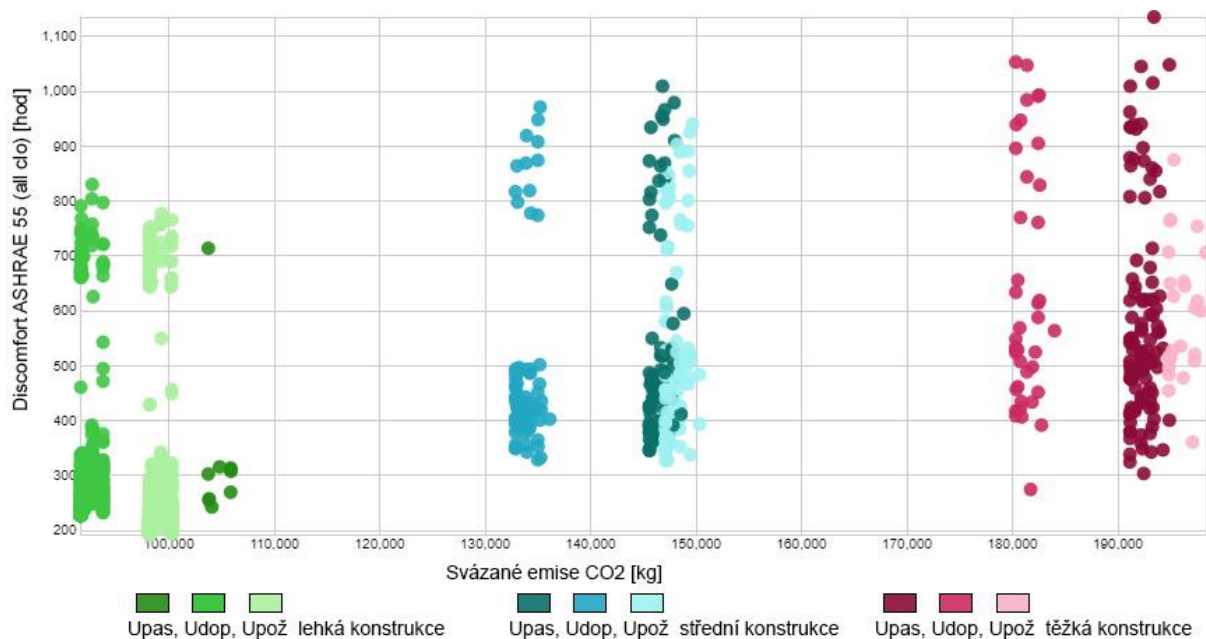
V oblasti nejlepších výsledků tedy převažuje středně sytá zelená barva, která symbolizuje právě lehkou konstrukci s doporučenými hodnotami součinitele prostupu tepla. Výchozí těžká železobetonová konstrukce je označena tmavě růžovou barvou a jejich kombinace létají někde v levé horní části a dosahují obecně velmi špatných výsledků z hlediska tepelné pohody.

Dalším kritériem pro zvolení optimálních parametrů obálky budovy je ekologická stránka návrhu, kterou shrnuje graf č. 8 porovnávající tepelnou pohodu a celkové svázané emise CO₂ všech materiálů použitých v dané variantě návrhu. Pro lepší orientaci jsem opět do grafu přiřadil popisky ke svislým řetězcům bodů, a to ve tvaru typ konstrukce a typ zasklení.



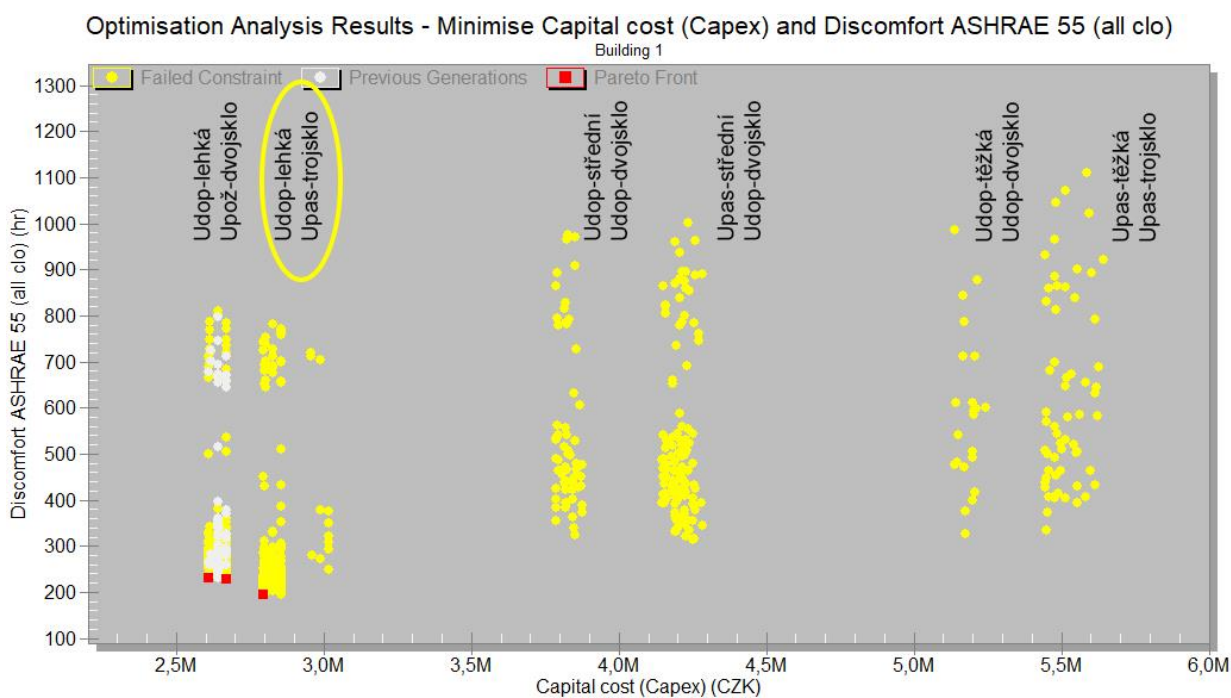
Graf 8 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a svázaných emisí CO₂

Z hlediska svázaných emisí CO₂ se na předních pozicích umísťuje opět lehká konstrukce s doporučeným součinitelem. Naopak těžké konstrukce s náročnou výrobou materiálů a vysokou ekologickou zátěží jasně zaostávají na pomyslném konci řady. Celý proces výroby železobetonu spotřebuje oproti konstrukci dřevostavby minimálně dvakrát tolik kg CO₂.



Graf 9 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a svázaných emisí CO₂ – vizualizace výsledků

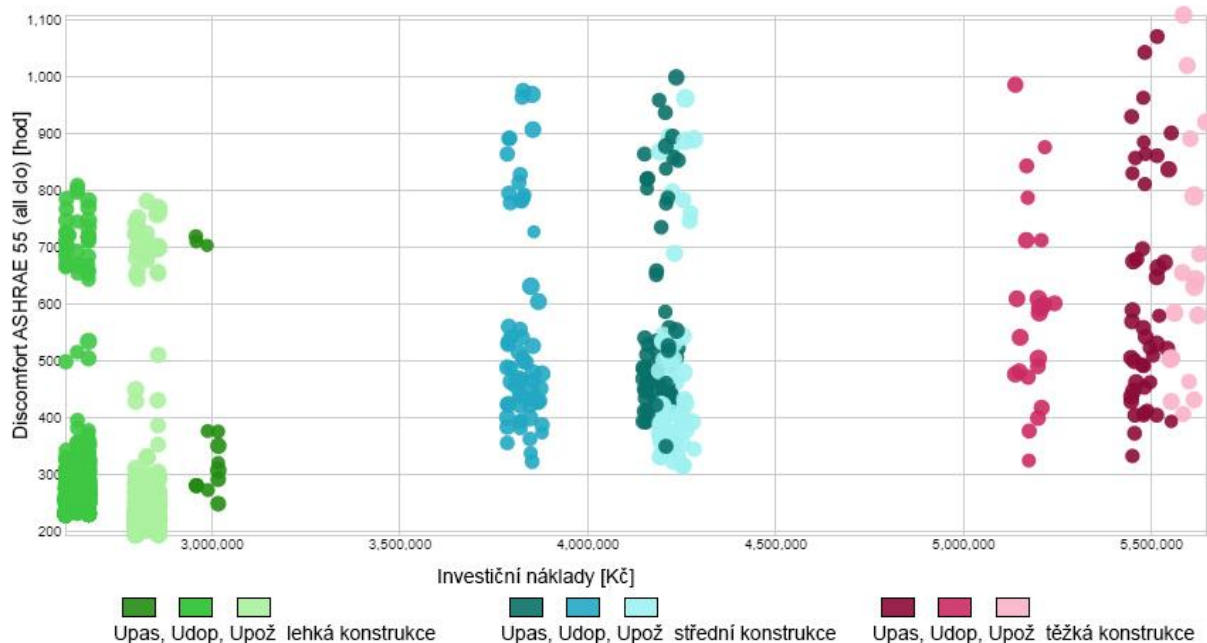
Poslední krok vedoucí k dokončení optimalizace obálky budovy je přibližné rozřazení konstrukčních variant podle ceny.



Graf 10 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a investičních nákladů

Pro porovnání ekonomického hlediska byl použit parametr Capex (Capital cost) neboli celkové investiční náklady na pořízení materiálů stavby. Při hledání ideálních kombinací jsem zde využil dvě omezující funkce (constraint) související s předchozími mezivýsledky tak,

že kombinace musí mít roční potřebu tepla na vytápění menší než 25 MWh a svázané emise menší než 100 tun CO₂. Kombinace nesplňující tato omezení jsou vyznačeny žlutě. Z výsledků je čitelné, že i v otázce finanční výchozí návrh dosahuje jasně nejhorsích hodnot.



Graf 11 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a investičních nákladů – vizualizace výsledků

Z výsledků první fáze optimalizace při zohlednění všech stanovených cílů nejlépe vychází řešení obsahující následující kombinaci proměnných parametrů:

Tab. 7 – Vyhodnocení optimalizace obálky a porovnání s výchozím stavem

Sledované proměnné	Výchozí stav	Po optimalizaci
Návrhová teplota [°C]	22	23
Orientace budovy na pozemku [°]	15	80
Typ konstrukce	těžká, U_{pas}	lehká, U_{dop}
Typ zasklení	trojsklo, U_{pas} , $g = 0,5$	trojsklo, U_{pas}, $g = 0,5$
Vnější stínící prvek	žádný	nadokenní přesah 0,5 m
Poměr prosklení stěn podkroví [%]	80 %	60 %
Sledované cíle	Výchozí stav	Po optimalizaci
Potřeba tepla na vytápění [MWh/rok]	21,7	20,0
Svázané emise CO ₂ [t]	193,2	92,0
Investiční náklady [tis. Kč]	5 500	2 500
Tepelná nepohoda [hod/rok]	503	275

Optimalizované řešení je lepší než výchozí návrh ve všech stanovených kritériích. Za povšimnutí stojí výsledek roční potřeby tepla na vytápění, kdy ideálním natočením objektu a maximálním využitím slunečních zisků lze dosáhnout menší hodnoty i s horšími tepelně technickými vlastnostmi obálky budovy. Z ostatních hledisek dosahuje výsledné řešení zhruba dvakrát lepších výsledků než výchozí stav.

Všechny výsledky jednotlivých optimalizačních kroků se dají jednoduše vyexportovat a dále porovnávat v tabulkovém programu, kde se pomocí filtrování a řazení požadovaných proměnných parametrů velmi snadno nalezne průnik optimálních hledaných hodnot.

6.2 Optimalizace energetických systémů

Jakmile byla dokončena optimalizace obálky budovy, přichází čas na optimalizaci energetických systémů, kde bude hlavním úkolem nalézt takové řešení, které dokáže dodat potřebné energie co nejefektivněji.

6.2.1 Proměnné

- Šablona energetických systémů (Simple HVAC)

Tato šablona v sobě skrývá nastavení vytápění, chlazení, větrání a úpravu vlhkosti vzduchu. Nejdůležitějšími parametry jsou především účinnosti jednotlivých systémů. Jelikož přednastavené šablony vycházejí z britského prostředí, které se s naším téměř vůbec neshoduje, bylo nutné všechny šablony vytvořit od začátku. Vytvořil jsem celkem 10 potenciálních sestav energetických systémů, které by podle mého úsudku mohly být instalovány do tohoto konkrétního objektu. V sestavách chybí využití fotovoltaických a fototermálních panelů, a to z důvodu, že střechy chat v horském prostředí bývají v zimních měsících často zasypány sněhem, což by k zachování funkčnosti vyžadovalo nutnou pozornost a neustálé očišťování povrchu panelů. Vložení panelů do optimalizace by určitě přineslo zajímavé výsledné kombinace, nicméně pro zkoumaný víkendový provoz založený na uživatelském komfortu jsem je vyřadil. Dále bylo vyřazeno tepelné čerpadlo typu vzduch-voda, a to hlavně z důvodu poklesu účinnosti v mrazivých dnech, kterých bude v této chladné lokalitě ve srovnání s typickými českými klimatickými podmínkami opravdu nadprůměrně. Venkovní jednotka by také musela být opatřena spolehlivým odvodem kondenzátu a opatřením proti zamrznání. Proto bylo zvoleno tepelné čerpadlo typu země-voda, které nabízí spolehlivý provoz i v extrémních venkovních teplotách, a to při zachování nadprůměrného topného faktoru.

Jednotlivé sestavy jsou popsány v následujícím seznamu:

- 1) Elektrické přímotopy, konvektory, přirozené větrání
- 2) Elektrické přímotopy, konvektory, nucené větrání + zpětné získávání tepla (dále ZZT)
- 3) Kotel na biomasu, teplovodní systém, otopná desková tělesa, přirozené větrání
- 4) Kotel na biomasu, teplovodní systém, otopná desková tělesa, nucené větrání + ZZT
- 5) Kondenzační plynový kotel, teplovodní systém, otopná desková tělesa, přirozené větrání
- 6) Kondenzační plynový kotel, teplovodní systém, otopná desková tělesa, nucené větrání + ZZT
- 7) Kotel na uhlí, teplovodní systém, otopná desková tělesa, přirozené větrání
- 8) Kotel na uhlí, teplovodní systém, otopná desková tělesa, nucené větrání + ZZT
- 9) Tepelné čerpadlo země-voda, teplovodní systém, podlahové vytápění, přirozené větrání
- 10) Tepelné čerpadlo země-voda, teplovodní systém, podlahové vytápění, nucené větrání + ZZT

- Návrhová teplota vytápění

Hodnoty se pohybují v rozmezí od 18–25 °C.

- Návrhová teplota temperování

Hodnoty se pohybují v rozmezí od 4–16 °C. Teplota temperování v době nepřítomnosti ovlivní především dobu potřebnou k vytopení objektu na návrhovou teplotu, předchází vymrznutí objektu, ale také rozhoduje o nákladech na vytápění.

- Doba zapnutí vytápění před příjezdem

Majitel chaty v zimě před plánovaným příjezdem pošle prostřednictvím dálkového přístupu pokyn, aby se daný zdroj tepla spustil na plný výkon. Uvažují se 4 možnosti. Pokyn přijde buď 6 h před příjezdem, 4 h, 2 h, nebo vůbec.

- Intenzita větrání (ac/h)

Intenzita větrání je důležitý parametr, který ovlivňuje kvalitu vnitřního prostředí. Informuje nás o tom, kolikrát za hodinu se vymění znečištěný vzduch v místnosti za čerstvý. Při nedostatečném větrání vzniká nejenom riziko kondenzace vodních par a tvorba plísní v interiéru, ale také může způsobovat únavu a ospalost lidského organismu. Kvalita vnitřního prostředí se může také hodnotit na základě koncentrace CO₂ obsažené ve vzduchu. Venkovní vzduch obsahuje zhruba 400 ppm CO₂ a pro obytné prostory se doporučuje větráním dodržovat

hranici maximálně do 1000 ppm. Pro pocit čerstvého vzduchu volíme obsah CO₂ do 700 ppm. Optimální intenzita větrání také může příznivě ovlivnit tepelnou pohodu v letním období, kdy pomůže odvést přebytečné tepelné zisky. [10]

Pro obytné prostory se doporučuje volit intenzitu větrání minimálně 0,3 h⁻¹. Pro optimalizaci bude rozsah hodnot od 0,3 do 1 h⁻¹. [8]

Tab. 8 - Seznam a rozsah hodnot měněných proměnných

Název proměnné	Rozsah hodnot	Krok	Cíl
Návrhová teplota [°C]	19-24 °C	0,3 °C	Celý objekt
Návrhová teplota temperování [°C]	5-16 °C	0,5 °C	Celý objekt
Šablona HVAC	10 možností	-	Celý objekt
Zapnutí vytápění před příjezdem	4 možností	-	Celý objekt
Intenzita výměny vzduchu [h ⁻¹]	0,3-1 h ⁻¹	0,05	Celý objekt

6.2.2 Cíle návrhu

- Snížení spotřeby dodané energie
- Tepelná pohoda
- Cena

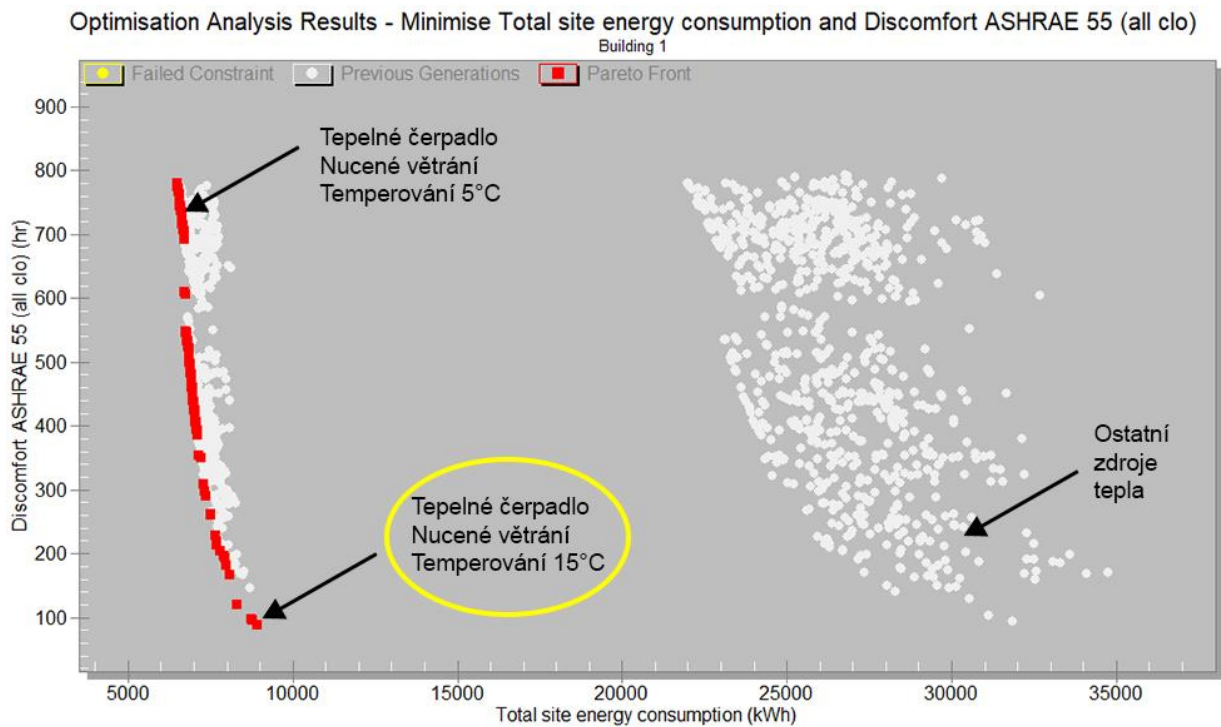
V této fázi lze bohužel porovnávat pouze investiční náklady (CAPEX). S provozními náklady (OPEX) lze počítat v simulačním programu až v rámci detailního návrhu energetických systémů v režimu HVAC Detailed. V detailním návrhu jsou poté uvažovány stanovené ceny za jednotlivá paliva. Z výše zmíněného důvodu nelze vypracovat ani posouzení LCC (Life Cycle Cost), kde se uvažují celkové náklady na celý životní cyklus objektu, což je dnes velice využívaná metoda posuzování výhodnosti variant.

- Emise CO₂

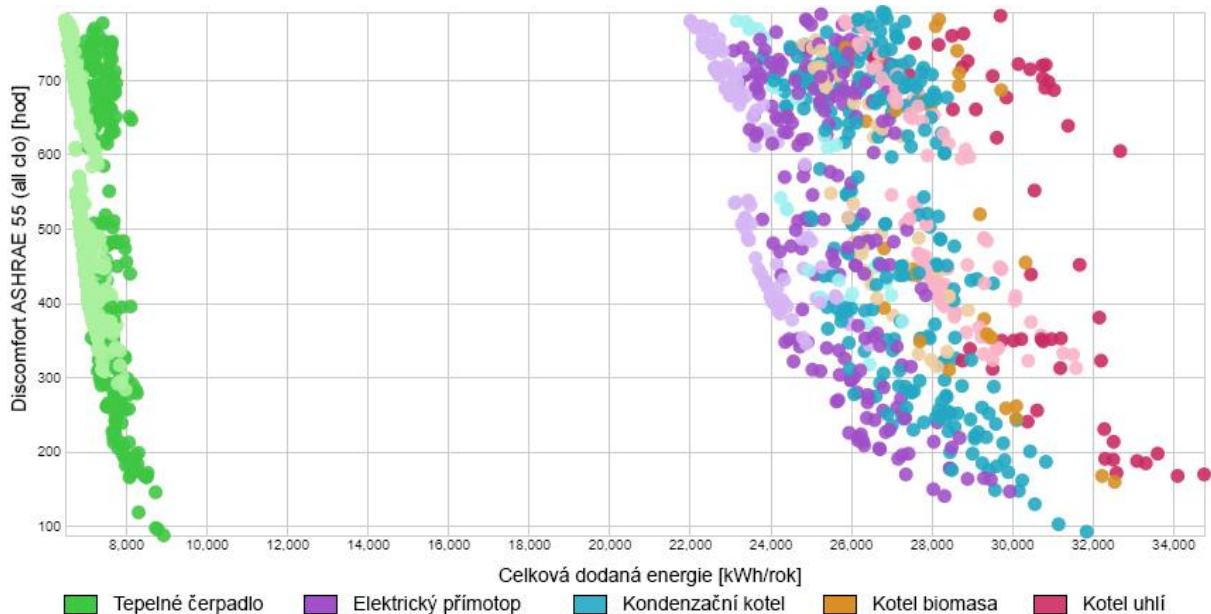
V rámci hodnocení ekologické stránky návrhu jsem použil tentokrát hodnocení životního cyklu – LCA (Life Cycle Assesement), což je základní metodika pro hodnocení environmentální kvality budovy. Zahrnuje produkci CO₂ spotřebovanou těžbou surovin, výrobou materiálu, dopravou, zabudováním materiálu do stavby, údržbou materiálu, včetně likvidace a recyklace materiálů budovy.

6.2.3 Výsledky 2. fáze optimalizace

Z hlediska spotřeby dodané energie jednoznačně vyhrávají šablony s tepelným čerpadlem, podlahovým vytápěním a nuceným větráním s rekuperací. Šablona HVAC ve zjednodušeném režimu zohledňuje především účinnosti jednotlivých systémů. V grafu je dobře viditelný rozdíl například mezi spotřebou energie tepelného čerpadla a elektrického přímotopu, který odpovídá zadanému topnému faktoru čerpadla 3,5.

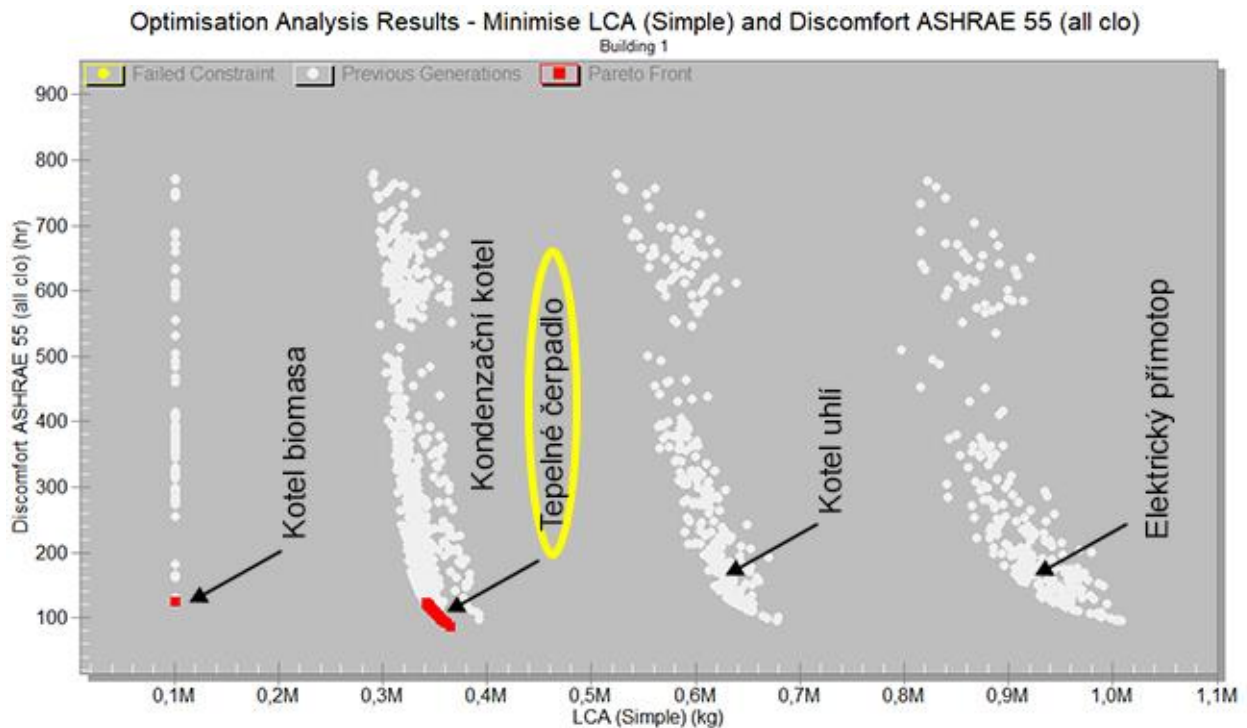


Graf 12 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a celkové dodané energie



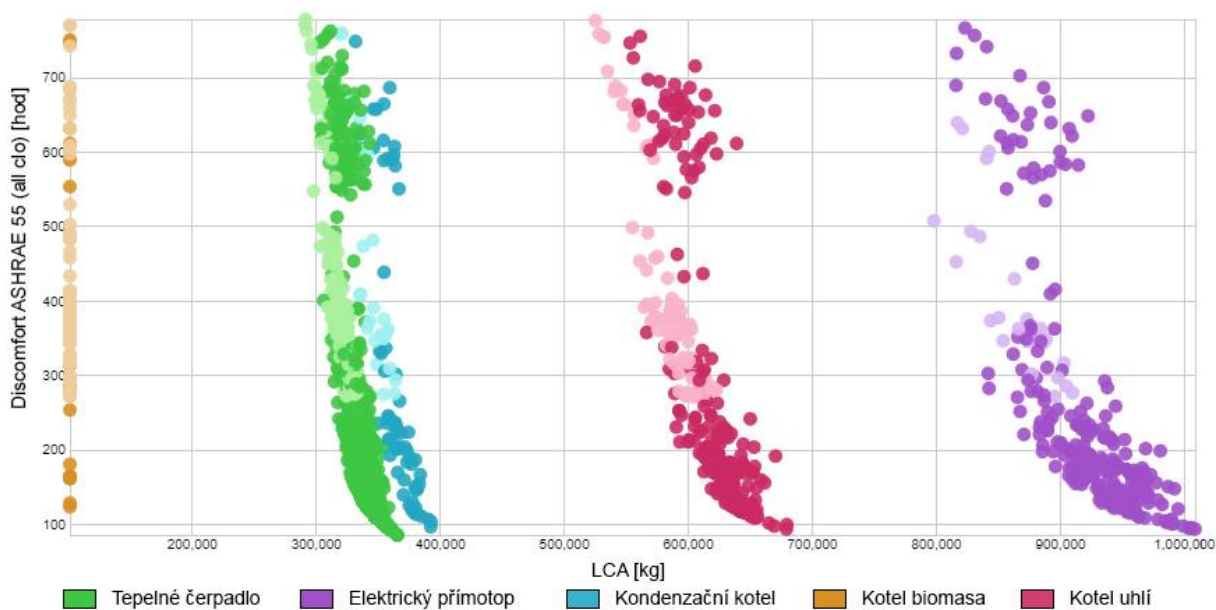
Graf 13 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a spotřeby energie – vizualizace výsledků

Z enviromentálního hlediska nejlépe dopadají samozřejmě kombinace s kotlem na biomasu, které dosahují nulových hodnot emisí CO₂. Emisní faktor biomasy je totiž nulový vzhledem k odečtení spotřebovaného množství CO₂ při procesu fotosyntézy. [2]



Graf 14 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a LCA

Výsledný návrh energetického systému musí plnit požadavky aktuální legislativy pro budovy s téměř nulovou spotřebou energie tím, že dojde ke snížení neobnovitelné primární energie oproti referenční budově minimálně o 25 %. Tento předpoklad plní jen kotel na biomasu nebo tepelné čerpadlo. Ostatní varianty energetických systémů mohly být tedy sice vyřazeny hned na začátku, ale myslím, že slouží dobře k ilustraci rozdílů mezi danými variantami.



Graf 15 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a LCA – vizualizace výsledků

Relevantní optimalizaci energetických systémů z ekonomického hlediska bohužel v programu DesignBuilder v této fázi modelových dat (HVAC simple) provést nešla. Jak jsem zmiňoval výše, moduly pracující s provozními náklady či posouzením celkových nákladů životního cyklu budovy nebyly k dispozici.

Pro názornost avšak přikládám vlastní orientační ekonomické srovnání zdrojů tepla v následující tabulce č.9, ve které uvádím zevrubné investiční i provozní náklady daných systémů. Analýza byla sestavena na základě cen uvedených na webových stránkách *www.tzb-info.cz* [15]. Tabulka tedy obsahuje pět potenciálních zdrojů tepla a kumulované náklady na jejich pořízení a provoz v dlouhodobých časových horizontech 20 a 30 let. Pro tento jednoduchý příklad jsem zanedbal časovou hodnotu peněz, růst cen, růst energií či možnost čerpání dotace. Podrobnější rozebrání jednotlivých položek je možné nalézt v přílohové části.

Tab. 9 – Ekonomické porovnání zdrojů tepla

Zdroj tepla	Investiční náklady [Kč]	Roční provozní náklady [Kč]	Kumulované náklady za 20 let [Kč]	Kumulované náklady za 30 let [Kč]
Elektrické přímotopy	120 000	50 000	1 120 000	1 620 000
Kotel na biomasu	270 000	37 454	1 019 087	1 393 631
Kondenzační kotel	285 000	31 909	923 178	1 242 267
Kotel na uhlí	230 000	28 864	807 270	1 095 905
Tepelné čerpadlo země-voda	425 000	18 781	800 629	1 018 444

Nikoho asi dnes nepřekvapí, že investiční náklady tepelného čerpadla vycházejí ze všech možností jako nejvyšší. Tento prostý důvod řadu lidí odrazuje a motivuje je ke koupi tradičních zdrojů i za cenu vyšších provozních nákladů. Na základě této jednoduché kalkulace demonstrují, že i tepelné čerpadlo země-voda se v dlouhodobém časovém horizontu investorovi vyplácí.

Výhodnost volby tepelného čerpadla země-voda by markantně vzrostla, pokud bychom zohlednili a do tabulky vložili navíc i jiná hlediska, jako např. bezobslužnost zdroje, nízký dopad na životní prostředí, čistota technické místnosti, spolehlivost a třeba i snížení investičních nákladů pomocí čerpání dotace. Dalším bonusem pro majitele tepelných čerpadel je také možnost využívání výhodné sazby elektřiny D57 pro ostatní spotřebiče, což by v tomto případě znamenalo významnou položku úspory. Chata totiž disponuje poměrně velkým instalovaným výkonem elektrických spotřebičů.

Z výsledků provedených ve druhé fázi optimalizace nejlépe vychází řešení obsahující následující kombinace proměnných parametrů:

Tab. 10 – Celkové srovnání výchozího stavu a návrhu po optimalizaci

Sledované proměnné	Výchozí stav	Po optimalizaci
Návrhová teplota [°C]	22	23
Návrhová teplota temperování [°C]	15	14
Šablona HVAC	Kotel uhlí, nucené	TČ země-voda, nucené větrání
Zapnutí vytápění před příjezdem [hod]	-	6
Intenzita větrání [h ⁻¹]	0,5	0,75
Sledované cíle	Výchozí stav	Po optimalizaci
Spotřeba energie na vytápění [MWh/rok]	25,5	7,3
LCC [t]	620	330
Tepelná nepohoda [hod/rok]	503	120

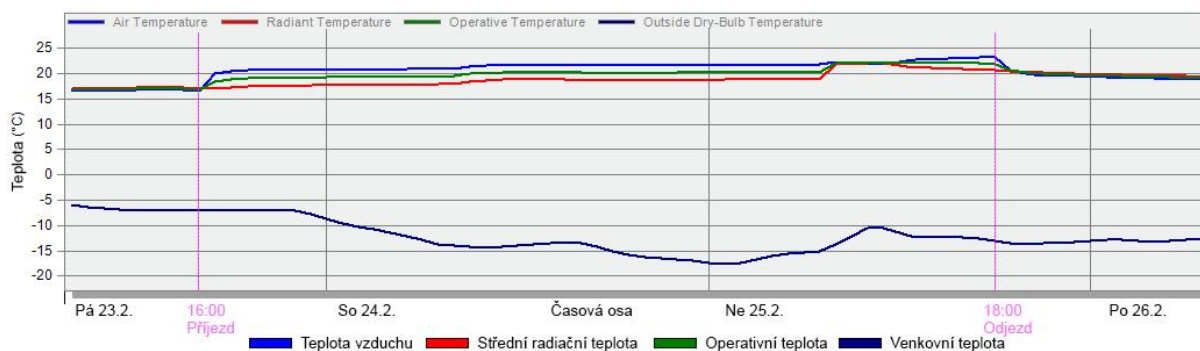
7 Vyhodnocení optimalizace

Z výsledků optimalizace lze usoudit, že původní architektonický návrh lze z hlediska tepelné pohody vylepšit opravdu znatelně. Výchozí stav vykazoval roční hodnocení tepelné nepohody kolem 500 hodin, zatímco pouhým optimalizováním obálky se hodnota dostala téměř na polovinu ke 250 hodinám, což je pozitivní posun pro uživatelské pohodlí. Takovému výsledku pomohla hlavně změna konstrukčního řešení, tedy přechod z železobetonové koncepce stavby na lehkou dřevostavbu, vhodná orientace vůči světovým stranám a maximální využití solárních zisků. Vstupní strana objektu bude nově směřovaná k západu místo původního jihu. Dále se potvrdil předpoklad, že objekt byl v podkroví až příliš prosklený, takže by v letních měsících docházelo ke zbytečnému přehřívání. Došlo tedy i k úpravě procentuálního zastoupení prosklení vůči stěnám o 20 %.

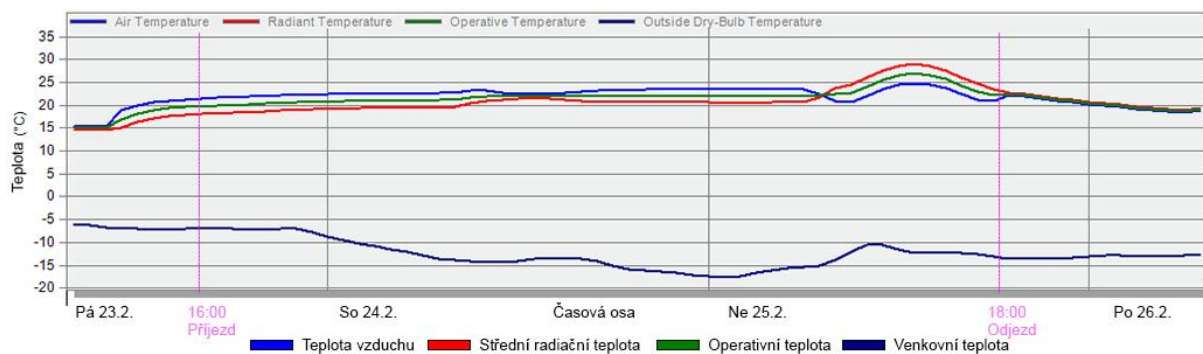
Druhá fáze optimalizace potvrdila, že volba tepelného čerpadla spolu s nuceným větráním a zpětným získáváním tepla je vhodné řešení, navzdory vyšší počáteční investici. Tepelné čerpadlo je také levným zdrojem pro temperování objektu. Zvolený optimalizovaný návrh navíc plní požadavky pro budovy s téměř nulovou spotřebou energie, což byl také jeden z primárních cílů.

7.1 Modelový zimní víkend

Ještě bych rád předvedl odlišné chování vnitřního klimatu obou stavů na modelovém příkladu zimního víkendu. Pro ukázkou jsem vybral chladný víkend 24. – 25. února, kdy venkovní klima v simulaci dosahuje teplot pod $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. V následujících grafech č. 16 a 17 je porovnání náběhu teplot v centrálním obývacím prostoru (1.NP) před a po provedení optimalizace.



Graf 16 – Průběh teplot o zimním víkendu před optimalizací [DesignBuilder]



Graf 17 – Průběh teplot o zimním víkendu po optimalizaci

Na grafech je znázorněn rozdíl rychlosti náběhu požadované návrhové teploty v místnosti. V prvním případě dosáhne operativní teplota (zelená barva) příjemných 20 °C až v sobotu v 9:00, tedy po 17 hodinách od zapnutí topení. Druhý optimalizovaný případ dosáhne stejné teploty již po 6 hodinách od zapnutí v 16 h, přesně v čase příjezdu rezidentů. Hlavním důvodem je rozdílná akumulční schopnost těžké a lehké stavby. Zatímco střední radiační teplota (červená barva) těžké stavby stoupá velmi pomalu, u lehké dřevostavby je křivka náběhu strmější.

V letním období oba případy nevykazují známky snížení tepelné pohody vlivem přehřívání. V takto chladné lokalitě není problém zvýšené letní tepelné zisky odvést přirozeným provětráním nebo se dá chladit letním obtokem v rámci vzduchotechnické jednotky.

7.2 Posouzení výsledku s požadavky NZEB

Výsledný návrh plní požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie dle vyhlášky 78/2013 Sb. V tabulce lze vidět, že ke splnění požadavku o kvalitě obálky budovy bohatě stačí konstrukce s doporučenými hodnotami součinitele prostupu tepla a použití oken s izolačními trojskly.

Tab. 11 - Posouzení průměrného součinitele prostupu s požadavkem pro NZEB

Konstrukce	Plocha	Součinitel prostupu tepla	
		Před optimalizací	Po optimalizaci
	m ²	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)
Obvodová stěna	357,3	0,149	0,197
Obvodová suterénní stěna	113,7	0,224	0,224
Plochá střecha	49,8	0,172	0,163
Šikmá střecha	227,4	0,146	0,163
Podlaha nad exteriérem	15	0,152	0,163
Podlaha na zemině	188,1	0,193	0,274
Okna	135,7	0,78	0,78
Dveře	9,9	0,84	0,90
Tepelné vazby	1096,9	0,02	0,02
Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla U_{em} [W/(m².K)]		0,26	0,28
Redukční činitel f_R [-]		0,58	0,62
Klasifikace dle vyhlášky		B	C
Splňuje požadavek pro novou budovu		ANO	ANO
Splňuje požadavek pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie		ANO	ANO

Druhý požadavek vyhlášky týkající se snížení neobnovitelné primární energie alespoň o 25 % je podle mě náročnější. V našem případě v podstatě eliminoval všechny varianty energetických systémů kromě těch s kotlem na biomasu nebo tepelným čerpadlem. Použití tepelného čerpadla se tedy ukázalo jako nejvýhodnější zdroj tepla nejenom kvůli snížení provozních nákladů na vytápění, snížení emisí CO₂ a dalším výhodám, ale hlavně kvůli dodržení tohoto legislativního požadavku.

Tab. 12 - Posouzení návrhu s požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie

Posouzení s požadavky NZEB	Před optimalizací	Po optimalizaci
Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla U_{em} [W/(m².K)]	0,26	0,28
Redukční činitel f_R [-]	0,58	0,64
Klasifikace dle vyhlášky	B	C
Splňuje požadavek U_{em} pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie	ANO	ANO
Splňuje požadavek na snížení neobnovitelné primární energie pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie	NE	ANO

Optimalizovaný návrh tedy **splňuje** požadavky pro budovy s téměř nulovou potřebou energie.

7.3 Vstupní parametry pro projektovou část

Jak už zde bylo zmíněno, tato textová část slouží také k přípravě podkladu pro projektovou část diplomové práce, která se zabývá návrhem vytápění. Parametry optimalizované obálky budou využity k výpočtu tepelných ztrát jednotlivých místností a dále bude navržena teplovodní otopná soustava dle popisu nastoleného ve vítězné šabloně energetického systému. V projektu vytápění se bude nadále dbát na zajištění tepelné pohody.

Tepelné čerpadlo bude využito k levnému provozu temperování chaty v době nepřítomnosti. Před příjezdem se zapne na plný výkon např. pomocí chytrého telefonu. Počítá se tedy s tím, že rezidenti přijedou do objektu vyhřátého na požadovanou teplotu. K tepelnému čerpadlu budou použita ještě krbová kamna s teplovodním výměníkem. Krbová kamna budou vytvářet nejenom příjemnou atmosféru, ale také budou přispívat teplem do akumulární nádrže a tím pomáhat tepelnému čerpadlu. Také budou sloužit jako záložní zdroj tepla v případě delších výpadků elektrického proudu.

Tepelnou pohodu v objektu podpoří i volba podlahového vytápění namísto otopných těles, o kterých se uvažovalo ve výchozím stavu. Podlahové vytápění bude realizováno vzhledem k nepředvídatelnému nárazovému provozu a charakteru konstrukce stavby tzv. suchým způsobem. Tento méně obvyklý způsob pokládky je charakteristický rychlejší reakcí na regulační zásah, což umožní pružnější využívání chaty.

Cílem návrhu bude mimo jiné i zabránění vzniku lokální tepelné nepohody, která může být zapříčiněná nerovnoměrným rozložením průběhu teplot v prostoru, teplou nebo chladnou podlahou či průvanem. Optimální vytápění by mělo mít rovnoměrný vertikální průběh teplot vzduchu, kde by měla být teplota vzduchu v oblasti hlavy nižší min. o 2 °C než v oblasti kotníků. Takovému průběhu se nejvíce blíží profil podlahového vytápění. Horizontální rozložení teplot vzduchu v místnosti je při použití podlahového vytápění téměř rovnoměrné až na oblasti u ochlazovaných konstrukcí. Tento nedostatek je v projektu řešen pomocí tzv. intenzivních okrajových zón, kdy se pro zajištění tepelné pohody klade podlahové potrubí hustěji než ve zbylé části místnosti. V některých prostorech bude tento nedostatek řešen také pomocí podlahových konvektorů s optimalizovanou konvekcí. [18]

8 Závěr

Pevně věřím, že jsem v této textové části diplomové práce splnil stanovené cíle. První fáze obsahovala seznámení s výchozím návrhem chaty a jeho analýzu. Dále práce pokračuje seznámením se simulačním programem DesignBuilder a procesem vytváření modelu budovy. Poté následuje energetické vyhodnocení a posouzení s ohledem na aktuální českou legislativu v oblasti energetické náročnosti. Druhá část práce se věnuje optimalizaci výchozího návrhu, kde nejprve dojde k nalezení vhodného řešení obálky budovy a poté i energetického systému. V závěru práce dochází k porovnání obou variant návrhu z hlediska tepelné pohody, energetické náročnosti, finanční i ekologické. Prokázalo se, že výsledné řešení, které je založeno zejména na upřednostnění dřevostavby před masivní železobetonovou stavbou uprostřed horské přírody Krkonošského národního parku, je ve všech stanovených cílech vhodnější volbou.

Simulační program DesignBuilder nabízí velký potenciál v detailnějším návrhu energetických systémů a v následném provedení podrobnější optimalizace. Na druhou stranu myslím, že postup, který jsem použil, se dá využít při předprojektové fázi velmi dobře a efektivně. Optimalizační modul programu dokáže rozpoznat chybné úvahy v navrhování. Věřím, že je schopný posunout architekta či projektanta ke stále lepším návrhům, neboť kvalitní projekt domu není jen o estetické kráse, ale především o kvalitním vnitřním prostředí, nízké energetické náročnosti a v neposlední řadě o respektování trvale udržitelného rozvoje.

Seznam použité literatury

- [1] *Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov znění 1. 12. 2015.* Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2013.
- [2] *Vyhláška č. 696/2004 Sb., kterou se stanoví postup zjišťování, vykazování a ověřování množství emisí skleníkových plynů.* Ministerstvo životního prostředí, 2004.
- [3] *Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů.* Parlament České republiky. 2000.
- [4] *ČSN 73 0540-2: Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky.* Praha: ÚNMZ, 2011.
- [5] *ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.* Praha: ÚNMZ, 2013.
- [6] *ČSN EN ISO 7730: Mírné tepelné prostředí. Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody.* Praha: ÚNMZ, 1997.
- [7] *ČSN 06 0210: Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění.* Praha: ÚNMZ, 1994.
- [8] *ČSN EN 15665/Z1: Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy obytných budov.* Praha: ÚNMZ, 2009.
- [9] *ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.* Atlanta, U.S, 2004.
- [10] *ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.* 2001. Atlanta, U.S., 2001.
- [11] European Commission, *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*, Official Journal of the European Communities, 2010.
- [12] *EnergyPlus: Weather Data* [online]. World Meteorological Organization region and Country [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://energyplus.net/weather>
- [13] *Program Help: Help v4.7* [online]. Gloucestershire, United Kingdom: DesignBuilder Software [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.designbuilder.co.uk/helpv4.7/>

- [14] *Envimat: stavební výrobky a životní prostředí* [online]. Praha: ČVUT, 2010 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://energyplus.net/weather>
- [15] *Porovnání nákladů na vytápění TZB-info: Výpočet a grafické porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii v budovách* [online]. [cit. 2018-05-11]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapani-tzb-info>
- [16] *Faktory primární energie a jejich stanovení* [online]. Praha: Středisko pro efektivní využívání energie, 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/ef13_3122_seven_fatory-primarni-energie.pdf
- [17] ANTONÍN, Jan a Magdalena PURKRTOVÁ. *Budovy s téměř nulovou spotřebou energie – Definice* [online]. 9.1.2017 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15180>
- [18] BAŠTA, Jiří. *Velkoplošné sálavé vytápění: podlahové, stěnové a stropní vytápění a chlazení*. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-3524-5.
- [19] CIHELKA, J. a kol.: *Vytápění a větrání*, SNTL Praha 1975.
- [20] COCKING, Dave a Omer KARAKUZEL. *Using DesignBuilder Optimisation to Design a Net Zero Building* [online]. ASHRAE Energy Modeling Conference, 2015 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.designbuilder.co.uk/about-us/lowdown-showdown-october-2015>. Případová studie. Carnegie Mellon University, 2015.
- [21] KABELE, Karel. *Energetické a ekologické systémy I: zdravotní technika, vytápění*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04722.
- [22] MAURI, M., ELLI, T., CAVIGLIA, G., UBOLDI, G., & AZZI, M. *RAWGraphs: A Visualisation Platform to Create Open Outputs*. In Proceedings of the 12th Biannual Conference on Italian SIGCHI Chapter (p. 28:1–28:5). New York, NY, USA, 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3125571.3125585>
- [23] PETRÁŠ, Dušan a kolektiv. *Vykurovanie rodinných a bytových domov*. Jaga group, 2005. ISBN 8080760128.
- [24] ZMRHAL, Vladimír, František DRKAL a Václav ŠIMÁNEK. *Koncept větrání* [online]. [cit. 2018-04-11]. Praha: ČVUT, 2017. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni_vyrobky/2017/10/Koncept-vetrani_KV-final-HKCR.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schematický půdorys 1.PP	10
Obr. 2 - Schematický půdorys 1.NP	10
Obr. 3 - Schematický půdorys 2.NP	11
Obr. 4 - Schematický půdorys 3.NP	11
Obr. 5 - Vytvořený model v simulačním programu [DesignBuilder]	15
Obr. 6 - Výstup optimalizace v simulačním programu [13]	24

Seznam tabulek

Tab. 1 - Součinitele prostupu tepla a plochy konstrukcí na obálce budovy	13
Tab. 2 - Ukazatele energetické náročnosti z roční simulace	19
Tab. 3 - Požadované hodnoty redukčního činitele [1]	20
Tab. 4 - Posouzení průměrného součinitele prostupu tepla pro výchozí stav	22
Tab. 5 - Seznam a rozsah hodnot měněných proměnných	26
Tab. 6 - Závislost koeficientu A na rychlosti proudění vzduchu [6].....	27
Tab. 7 – Vyhodnocení optimalizace obálky a porovnání s výchozím stavem	33
Tab. 8 - Seznam a rozsah hodnot měněných proměnných	36
Tab. 9 – Ekonomické porovnání zdrojů tepla	39
Tab. 10 – Celkové srovnání výchozího stavu a návrhu po optimalizaci	40
Tab. 11 - Posouzení průměrného součinitele prostupu s požadavkem pro NZEB.....	43
Tab. 12 - Posouzení návrhu s požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie	44

Seznam grafů

Graf 1 - Klimatické údaje v místě objektu [12]	16
Graf 2 - Tepelné ztráty pro jednotlivé konstrukce Graf 3 – Celkové tepelné ztráty	18
Graf 4 – PPD-PMV dle ASHRAE 55 [9].....	28
Graf 5 – Zóna tepelné pohody v závislosti na operativní teplotě a vlhkosti vzduchu dle ASHRAE 55 [9]	28
Graf 6 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a roční potřeby tepla na vytápění [DesignBuilder].....	30
Graf 7 - Vizualizace výsledných dat z předchozího grafu rozdělených podle druhu konstrukce [22]	30

Graf 8 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a svázaných emisí CO ₂	31
Graf 9 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a svázaných emisí CO ₂ – vizualizace výsledků	32
Graf 10 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a investičních nákladů	32
Graf 11 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a investičních nákladů – vizualizace výsledků	33
Graf 12 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a celkové dodané energie.....	37
Graf 13 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a spotřeby energie – vizualizace výsledků	37
Graf 14 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a LCA	38
Graf 15 - Minimalizování hodin tepelné nepohody a LCA – vizualizace výsledků	39
Graf 16 – Průběh teplot o zimním víkendu před optimalizací [DesignBuilder]	41
Graf 17 – Průběh teplot o zimním víkendu po optimalizaci	42

Použitý software

Designbuilder 4.7

Energie 2016

Teplo 2010

Google SketchUp

RAWGraphs

Seznam příloh

Přílohy jsou dostupné v samostatné přílohové části nebo v elektronické podobě na přiloženém CD.