

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí



**Optimalizace konstrukčního systému s ohledem na
funkční a statická hlediska**

Diplomová práce

Evgenij Bogdanovič

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Petřík, Ph.D.

Praha, leden 2022

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Petřík, Ph.D.

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Fakulta stavební

České vysoké učení technické

Thákurova 7

160 00 Praha 6

Česká Republika

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bogdanovič</u>	Jméno: <u>Evgenij</u>	Osobní číslo: <u>458942</u>
Zadávací katedra: <u>133 Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Optimalizace konstrukčního systému s ohledem na architektonická a statická kritéria</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Optimization of the load bearing structural system with regard to functional and static criteria</u>	
Pokyny pro vypracování: - Zpracování parametrického modelu analyzovaného objektu v programu Grasshopper - Stanovení kritérií optimalizace - Vyhodnocení a srovnání variantních řešení - Ověření kritického místa metodou CSFM - Compatible stress field method - Iterace optimalizace s úpravou parametrů na základě poznatků z ověření kritického místa	
Seznam doporučené literatury: Kaufmann, W., Mata-Falcón, J., Weber, M., Galkovski, T., Duc Thong, T., & Kabelac, J. (2020). Compatible stress field design of structural concrete. ETH Zurich.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Martin Petřík, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>1.10.2021</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>2.1.2022</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
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“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Optimalizace konstrukčního systému ohledem na funkční a statická hlediska" zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů. Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praha, leden 2022

.....
Evgenij Bogdanovič

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vícekriteriální optimalizací s cílem získání návrhu objektu, jenž splňuje stanovená funkční i statická kritéria. Práce čtenáře seznamuje s postupem, jenž vede k vytvoření parametrického modelu a hodnotících kritérií. V práci je demonstrován postup výběru konkrétního řešení, jehož proveditelnost je ověřena metodou Compatible Stress Field Method (CSFM) dle mezních stavů únosností a použitelnosti. Tento proces je aplikován na konkrétním objektu tak, aby byl znázorněn jeho přínos.

Klíčová slova: Optimalizace, genetický algoritmus, NSGA-II, parametrické modelování, Rhihnoceros, Grasshopper3D, Karamba3D, WallaceiX, IDEA StatiCa, Compatible Stress Field Method, Metoda tlakových polí.

Abstract

This diploma thesis deals with multi-criteria optimization in order to achieve the design of an object that meets the specified functional and static criteria. The work acquaints the reader with the procedure that leads to the creation of a parametric model and evaluation criteria. The work demonstrates the procedure of selecting a specific solution, the feasibility of which is verified by the Compatible Stress Field Method (CSFM) according to the ultimate limit state and serviceability limit state. This process is applied to a specific object to illustrate its benefits.

Keywords: Optimization, genetic algorithm, NSGA-II, parametric modeling, Rhihnoceros, Grasshopper3D, Karamba3D, WallaceiX, IDEA StatiCa, Compatible Stress Field Method, Stress field method.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Petříkovi, PhD. za pomoc v podobě odborných konzultací, nápadů a cenných informací během vedení této práce. Dále bych rád poděkoval rodině a všem blízkým za motivaci a podporu během studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem autorům odborných článků a publikací, z nichž tato práce čerpá.

Seznam zkratek

AFR Average Fitness Rank. 21, 44

CAD Computer Aided Design. 4

CSFM Compatible Stress Field Method. v, viii, 2, 27, 30, 43, 44

FV Fitness Value. 11

GA Genetický algoritmus. 16–18

MKP Metoda konečných prvků. viii, 5, 9

MSP Mezní stav použitelnosti. 28

MSÚ Mezní stav únosnosti. xi, 28, 37, 38

NSGA-II Non dominated sorting genetic algorithm II. 5, 16

PCP Parallel Coordinate Plot. 18, 19

RDBR Relative Difference Between Ranks. 21, 44

SFM Stress Field Method. 29

STM Strut and Tie Model. 29

Obsah

Abstrakt	v
Poděkování	vi
Seznam zkratk	vii
Seznam tabulek	x
Seznam obrázků	xi
1 Úvod	1
2 Parametrický model	4
2.1 Popis použitého softwaru	4
2.2 Výpočetní model	6
2.2.1 Základní geometrie	6
2.2.2 MKP model	9
2.2.3 Zatížení	9
2.2.4 Průřezové a materiálové vlastnosti	10
2.2.5 Kritéria	11
3 Vyhodnocení výsledků optimalizace	16
3.1 Stručný popis optimalizace s pomocí genetických algoritmů	16
3.2 Výběr a vyhodnocení řešení	18
3.2.1 Metody výběru v PCP grafu	18
3.2.2 Shluková analýza	20
3.2.3 Výběr řešení ke srovnání	20
3.2.4 Závěry a poznatky ze získaných řešení	27
4 Ověření dimenzovatelnosti řešení	28
4.1 IDEA StatiCa	28
4.1.1 Předpoklady výpočtu CSFM	30
4.1.2 MKP model	32
4.2 Výpočetní model	32
4.2.1 Zatížení	33
4.2.2 Kombinace	34
4.2.3 Nástroje pro návrh vyztužení	35
4.2.4 Návrh vyztužení	36
4.3 Posudek	37
4.3.1 Mezní stav únosnosti	37
4.3.2 Mezní stav použitelnosti	39

<i>OBSAH</i>	ix
4.3.3 Shrnutí	42
5 Závěr	43
A 25 srovnávaných řešení	46
Bibliografie	56

Seznam tabulek

2.1	Srovnání délky výpočtu vzhledem k jemnosti sítě	9
3.1	Parametry genetického algoritmu	17
3.2	Srovnání výsledků	22
4.1	Posouzení napětí v betonu	37
4.2	Posouzení napětí ve výztuži	38
4.3	Posouzení napětí	41
4.4	Posouzení šířky trhlin	41
4.5	Posouzení maximální přetvoření	42

Seznam obrázků

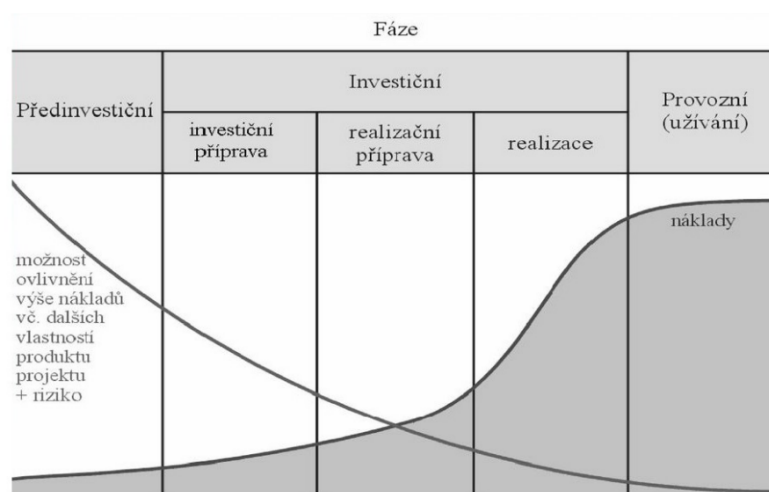
1.1	Náklady na jednotlivé fáze projektu [1]	1
1.2	Golf House	3
2.1	Definice výpočetního modelu v Grasshopperu	5
2.2	Dolní kvádr s výběžky	6
2.3	Horní kvádry	7
2.4	Podepření tubusu rámem	7
2.5	Tvorba otvorů v geometrii	8
2.6	Varianta se šesti okny	8
2.7	Varianta se třemi okny	8
2.8	Průběh FV1	12
2.9	Průběh FV2	12
2.10	Poloha kuchyně	13
2.11	Analýza celkové viditelnosti	13
2.12	Analýza viditelnosti bazénu	14
2.13	Analýza oslunění objektu	15
3.1	Diagram genetického algoritmu	17
3.2	PCP graf	18
3.3	Average fitness rank	19
3.4	Relative difference between fitness rank	19
3.5	K-means shlukování	20
3.6	Nejlepší řešení č. 10	23
3.7	Řešení 10	24
3.8	Řešení 10	25
3.9	Řešení 10	26
4.1	Oblasti diskontinuit [6]	29
4.2	a) Pole napětí b) Metoda náhradní příhradoviny [9]	30
4.3	Tahové zpevnění výztuže [9]	31
4.4	Tlakové změkčení betonu / Stanovení koeficientu k_{c2} [9]	31
4.5	MKP model železobetonového prvku	32
4.6	Geometrie posuzované stěny	33
4.7	Topologická optimalizace	36
4.8	Hlavní napětí z lineárního výpočtu	36
4.9	Hlavní a lemovací výztuž	37
4.10	Napětí v betonu - MSÚ	38
4.11	Napětí ve výztuži - MSÚ	38
4.12	Posudek kotvení výztuže - MSÚ	39

4.13	Průběhy napětí	40
4.14	Průběh trhliny	42
4.15	Svislá deformace	42
A.1	Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií	47
A.2	Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií	48
A.3	Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií	49
A.4	Nejlepší řešení podle kritéria FV10 a řešení AFR 0 a 50	50
A.5	Řešení AFR 100, 150 a RDBR 0	51
A.6	Řešení RDBR 50, 100 a 150	52
A.7	Řešení ze shlukovacího algoritmu 1, 2 a 3	53
A.8	Řešení ze shlukovacího algoritmu 4, 5 a 6	54
A.9	Řešení ze shlukovacího algoritmu 7	55

Kapitola 1

Úvod

Diplomová práce zkoumá vhodnost aplikace metody vícekritériální optimalizace za využití genetických algoritmů ke generaci návrhu objektu v počáteční fázi projektu. Tato metoda je aplikovatelná v případě volnosti architektonického řešení budovy. Výsledkem je sada tvarových variant objektu, jež vznikne úpravou vlastností parametrického modelu budovy. Variantní řešení budovy jsou generována tak, že splňují jak funkční tak i statická kritéria. Tato kritéria musejí být předem stanovena projektanty ve spolupráci s investory. Hodnoty kritérií jsou odlišné pro každé ze vygenerovaných řešení. Výběr konkrétního řešení, jenž se bude dále detailně projektovat, závisí na rozhodnutí investora, který stanoví, jaká kritéria jsou pro něj klíčová. Vícekritériální optimalizace zvládne sestavit a ohodnotit tisíce variant s různou kombinací parametrů v řádech hodin. Díky tomu je možné v předprojektční fázi výstavby prozkoumat tisíce variant a jejich jejich promítnutí do nákladů projektu. Tím se urychlí i předprojektční a projektční fáze výstavby. V době, kdy se zvyšují ceny výstavby a stavebních materiálů, může využití této metody pomoci ke snížení stavebních nákladů a ke zvýšení celkové ekonomičnosti projektu.



Obrázek 1.1: Náklady na jednotlivé fáze projektu [1]

Cílem této práce je demonstrovat použití vícekriteriální optimalizace na konkrétním objektu takovým způsobem, aby hodnotící kritéria postihovala předem stanovená funkční i statická hlediska návrhu budovy. Jelikož je vícekriteriální optimalizace provedena s pomocí genetického algoritmu (lze klasifikovat jako umělou inteligenci), je nutno hodnotící kritéria nastavit tak, aby algoritmus došel ke smysluplným výsledkům. Analýza je provedena na objektu, který je volně inspirován budovou "Golf House" od Seinfeld Arquitectos [2]. Tato konkrétní budova je zvolena, protože:

- Má zajímavý konstrukční systém tj. vykonzolovaný tubus a vnitřní stěnové nosníky,
- geometrie objektu vybízí k parametrizaci jednotlivých částí.

Kapitola 2 se soustředí na problematiku parametrického modelování. V kapitole je rozepsán myšlenkový pochod, který vede autora k sestavení použitého modelu.

V kapitole 3 je nejprve stručně přiblíženo téma genetických algoritmů a s pomocí těchto algoritmů je provedena vícekriteriální optimalizace na parametrickém modelu z kapitoly 2. V závěru kapitoly je proveden výběr optimálních řešení.

Kapitola 4 zkoumá, zda-li je konkrétní tvarové řešení objektu získané v kapitole 3 navrhnutelné z hlediska mezních stavů únosnosti a použitelnosti. Tato analýza je provedena na nejvíce zatíženém stěnovém výseku a je provedena s pomocí inovativní metody Compatible Stress Field Method (CSFM).



(a) Golf House.



(b) Golf House

Obrázek 1.2: Golf House

Kapitola 2

Parametrický model

V běžné praxi se analýza konstrukcí provádí v komerčních softwarech např. SCIA Engineer nebo RFEM. Tento druh softwaru je výborný pro podrobné posouzení konstrukcí, avšak jejich nedostatek je v tom, že jakákoliv změna geometrie ze strany architekta je náročně převeditelná do výpočtu. Častokrát je jednodušší některé části modelu odstranit a vytvořit znovu na nových pozicích, nicméně i to je velmi časově náročné. Proto ve fázi, kdy často nastávají projekční změny, je výhodnější použití parametrického modelování. Parametrický model je model, jehož geometrie je vytvořena algoritmem (série po sobě jdoucích operací). Výsledek algoritmu je ovlivněn vstupními hodnotami - parametry, které mohou představovat délku objektu, šířku místnosti nebo např. výšku patra. Změna jednoho či více parametrů se okamžitě promítne do výsledné podoby objektu. Tato kapitola se zabývá sestavením parametrického modelu, který je následně použit ve vícekriteriální optimalizaci. V podkapitole 2.1 jsou stručně popsány veškeré nástroje použité v této práci. V kapitole 2.2 je popsána tvorba výpočetního modelu a vstupy, které jsou pro výpočet použity.

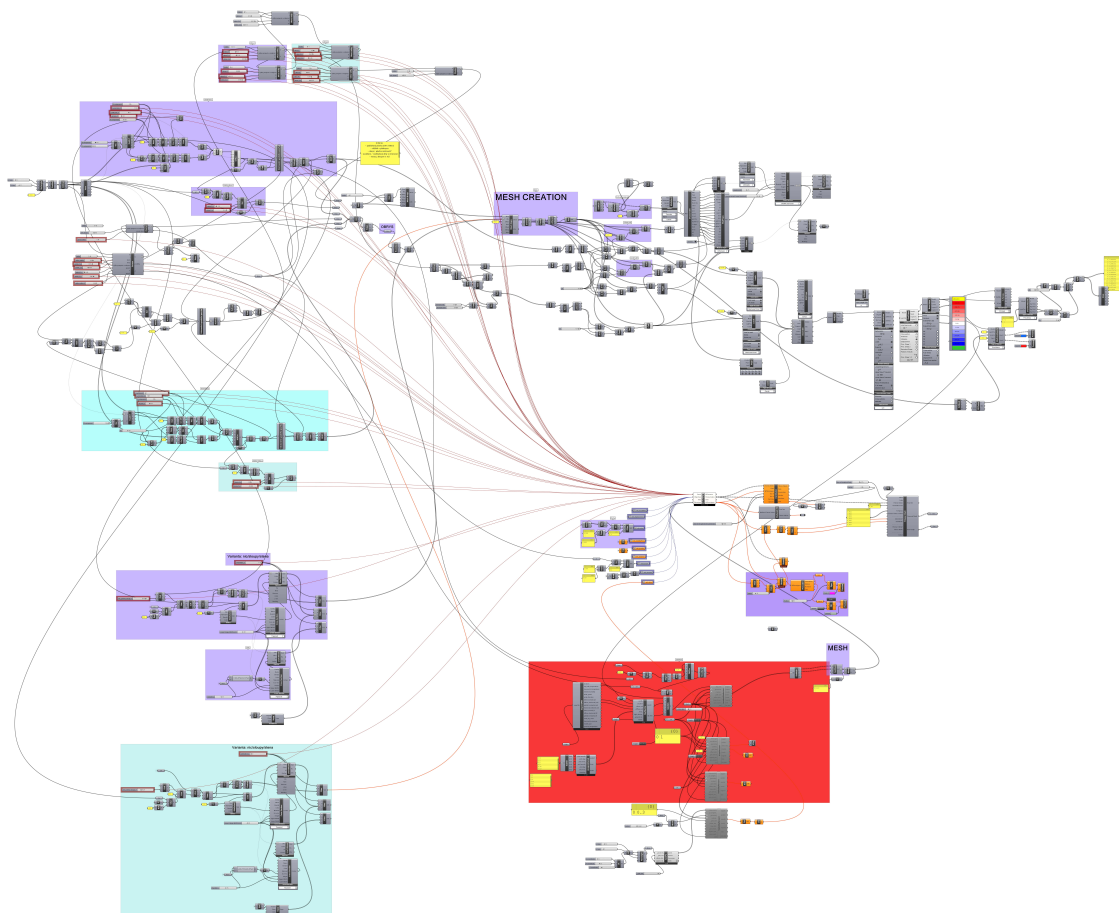
2.1 Popis použitého softwaru

Veškeré analýzy a simulace týkající se parametrického modelu se odehrávají v prostředí programu Rhinoceros 3D (zkr. Rhino). Rhino je 3D CAD (Computer Aided Design) program, který mimo 3D modelování a vytváření 2D výkresů umožňuje v prostředí Grasshopper vytvářet algoritmy s pomocí "grafického programování". Grafické programování spočívá v umisťování komponentů algoritmu na pracovní plochu a propojování výstupů se vstupy na sebe navazujících komponentů. Každý komponent provádí určitou matematickou, logickou či grafickou operaci. Takto za sebou poskládané komponenty tvoří algoritmus. V případě této práce je výsledkem algoritmu výpočetní a analytický model budovy.

Nativní komponenty Grasshopperu jsou dostačující k vytvoření parametrické geometrie, nicméně pro provedení komplexních analýz je třeba využít specializované moduly od jiných vývojářů. Moduly použité v této práci jsou následující:

- Karamba 3D - modul, který umožňuje na vytvořené geometrii provést statickou analýzu metodou konečných prvků (MKP).
- Ladybug - sada nástrojů pro komplexní environmentální analýzu budov. Mezi nástroje patří například analýza oslunění, studie viditelnosti, analýza stínění a analýza tepelné pohody.
- Wallacei X - obsahuje výpočetní jádro, které zajišťuje vícekriteriální optimalizaci s pomocí genetického algoritmu NSGA-II. Zároveň tento modul obsahuje analytické nástroje pro vyhodnocení výsledků.

Komponenty přídatných modulů se do struktury algoritmu vkládají stejným způsobem jako nativní komponenty.



Obrázek 2.1: Definice výpočetního modelu v Grasshopperu

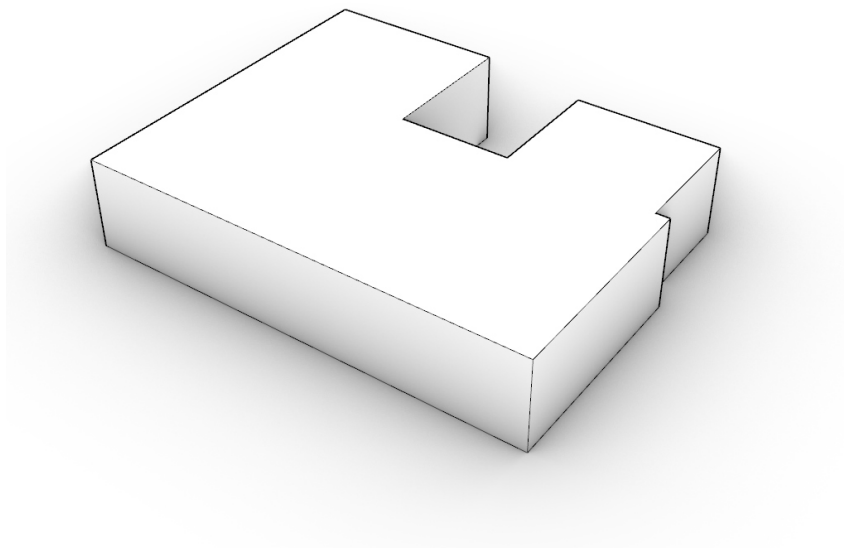
2.2 Výpočetní model

Tato kapitola se věnuje sestavení výpočetního modelu, který je později použit ve vícekritériální optimalizaci. Je popsáno, jakým způsobem je vytvořena geometrie objektu, jaká zatížení působí na objekt a nakonec jsou rozepsaná jednotlivá kritéria, podle nichž je hodnotí variantní řešení.

2.2.1 Základní geometrie

Geometrie výpočetního modelu volně vychází z tvaru výše zmíněného domu "Golf House". Základním prvkem algoritmu pro vytvoření hrubé geometrie objektu je použití primitivních tvarů - kvádrů.

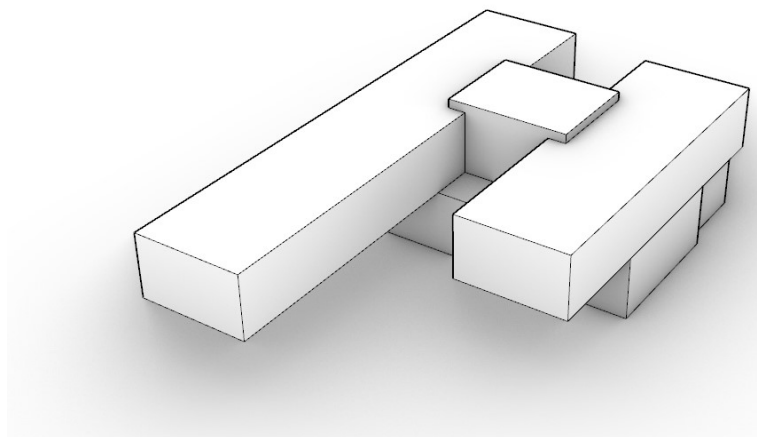
Hlavní kvádr - dolní, má pevně zadané rozměry: Délka 17m, šířka 8m a výška 3,5m. Ze zadní strany vystupují z kvádrů dva výběžky, ve kterých se, dle architektonických půdorysů, nachází kuchyně a společenská místnost. Rozměry výběžků (šířka, délka a relativní poloha na stěně kvádrů) jsou oproti hlavnímu kvádrů zadány parametricky.



Obrázek 2.2: Dolní kvádr s výběžky

Druhé nadzemní podlaží je tvořeno dvojicí vykonzolovaných tubusů, které jsou opět vytvořeny kvádry. Mezera mezi tubusy nad 1. NP je zastřešená a vytváří tak propojovací krček mezi tubusy. Samotné tubusy přesahují za obrys konstrukcí 1.NP z obou stran objektu. Rozměry jednotlivých tubusů jsou plně parametrizovány. Jediné okrajové podmínky parametrů tubusů jsou:

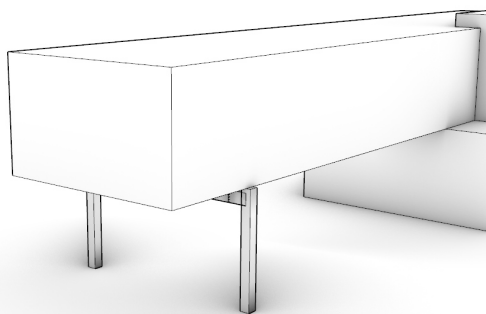
- Šířka tubusu je v rozmezí 4,5m až 7m,
- délka přední části tubusu je v rozmezí 2m až 15m,
- délka zadní části tubusu je v rozmezí 2m až 10m.



Obrázek 2.3: Horní kvádry

Pro přední část tubusu jsou definovány dvě varianty statického působení:

- Vykonzolovaný tubus,
- tubus podepřený železobetonovým rámem (obr. 2.4), jehož umístění je určeno parametrem.

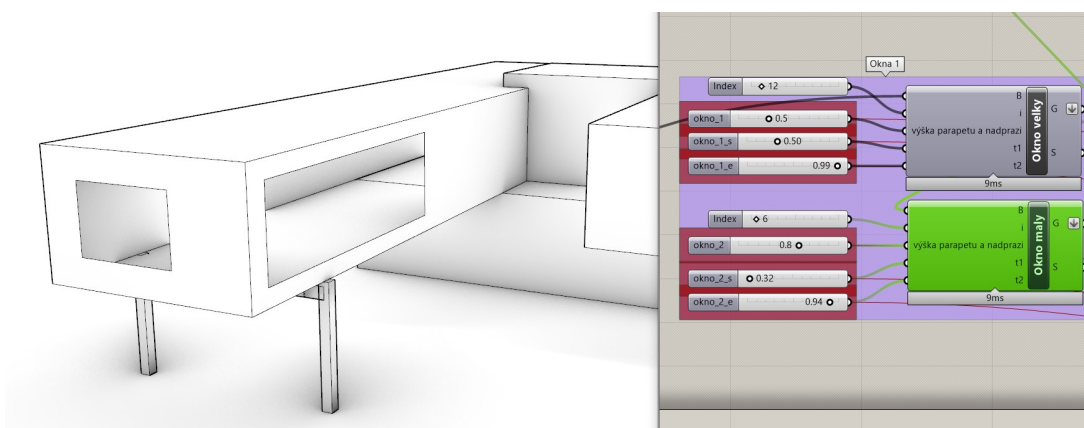


Obrázek 2.4: Podepření tubusu rámem

Do geometrie, vytvořené z primitivních kvádrů, je nutné doplnit prostupy svislými konstrukcemi, které reprezentují okna a dveře. Rozmístění otvorů je převzato z architektonického návrhu. Tvorba otvorů je zajištěna vlastnoručně vytvořeným komponentem (obr. 2.5). Do komponentu vstupují následující proměnné:

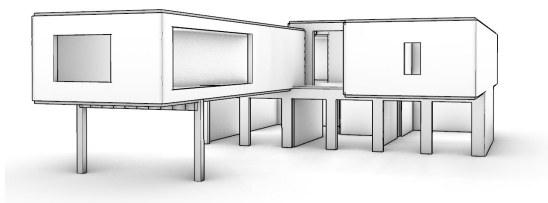
- Geometrie, v níž má být vytvořen otvor
- Identifikační číslo povrchu, na němž se otvor nachází,
- Výška nadpraží a parapetu,
- Relativní poloha začátku otvoru,
- Relativní poloha konce otvoru.

Výstupem z komponentu je vstupní geometrie s vytvořeným otvorem. Komponent pro tvorbu otvorů je sériově zapojitelný, tudíž lze kopie komponentů propojit do řady za sebou a vytvořit tak otvory na všech potřebných površích konstrukce.

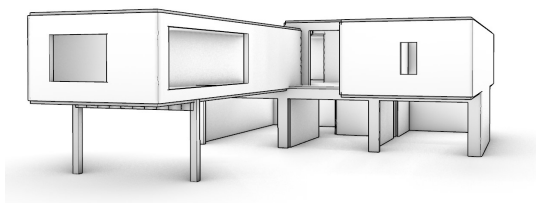


Obrázek 2.5: Tvorba otvorů v geometrii

Specifickým případem otvoru je přední stěna dolního kvádrů, která je dle architektonického návrhu celá prosklená, jelikož zajišťuje přístup na terasu a výhled do zahrady. Pro tuto stěnu je komponent modifikován a místo jednoho otvoru vytvoří sérii stejně širokých průchodů. Množství průchodů a výšku nadpraží lze ovlivnit parametry vstupními parametry (obr. 2.6 a 2.7).



Obrázek 2.6: Varianta se šesti okny



Obrázek 2.7: Varianta se třemi okny

2.2.2 MKP model

V předchozí kapitole je nastíněno, jakým způsobem pracuje algoritmus pro tvorbu geometrie objektu. Algoritmem vytvořený model ovšem není vhodné využít jako vstup do MKP analýzy - vstupní model je nutné převést na síť konečných prvků. Převod je zajištěn komponentem modulu Karamaba3D. V komponentu je nutné nastavit jemnost dělení sítě. Množství prvků sítě výrazně ovlivňuje výpočetní dobu algoritmu. Vzhledem k tomu, že optimalizační algoritmus počítá řádově nižší deseti tisíce řešení, je nutné zvolit jemnost dělení s ohledem na dostupný výpočetní čas. Jemnější síť poskytuje vyšší kvalitu výsledků oproti hrubší síti, ovšem u jemnější sítě exponenciálně narůstá výpočetní čas potřebný k získání výsledků. V následující tabulce 2.1 je znázorněna závislost délky výpočtu jednoho řešení na velikosti prvku sítě.

Velikost prvku [m]	Délka řešení [s]
0,25	15,5
0,5	8,6
0,75	7,5
1,0	6,9

Tabulka 2.1: Srovnání délky výpočtu vzhledem k jemnosti sítě

Cílem optimalizačního algoritmu není získat naprosto přesné výsledky z MKP výpočtu, nýbrž pochopit, jak se mění chování konstrukce v závislosti na jednotlivých parametrech. Proto je možné přistoupit na horší kvalitu numerických výsledků za účelem úspory výpočetního času. Kvalitu výsledků lze zlepšit u blíže zkoumaného řešení zjemněním sítě po ukončení optimalizace.

2.2.3 Zatížení

Byly stanoveny tři zatěžovací stavy, které vyvozují nejnepříznivější účinek na konstrukci.

LC1 Stále zatížení - vlastní tíha

Vlastní tíha je dopočítaná v Karamaba3D automaticky. Pro veškeré železobetonové konstrukce se uvažuje objemová tíha $\gamma_C = 25kN/m^3$

LC1 Stále zatížení - skladby

Jedná o koncepční analýzu konstrukce a nejsou známy konkrétní skladby vodorovných konstrukcí. Jsou tudíž použity odhadnuté přiměřené hodnoty pro stálé zatížení.

- Skladby podlah 1.NP a 2.NP

$$g_{1,k} = 2kN/m^2 \quad (2.1)$$

- Skladba střechy

$$g_{2,k} = 1kN/m^2 \quad (2.2)$$

LC3 Proměnné zatížení - užitné

Užitná zatížení jsou stanoveny dle národní přílohy k normě ČSN EN 1991-1-1 [3]

- Užitné zatížení podlah 1.NP a 2.NP (dle tabulky 6.2 v NA)

$$\text{Kategorie A - stropní konstrukce: } q_{1,k} = 1,5kN/m^2 \quad (2.3)$$

- Užitné zatížení střech (dle tabulky 6.10 v NA)

$$\text{Kategorie H - nepřístupné střechy: } q_{2,k} = 0,75kN/m^2 \quad (2.4)$$

Zatížení sněhem

Předpokládá se že objekt je ve sněhové oblasti I. Pro I. sněhovou oblast vychází zatížení na ploché střechy $s_k = 0,56kN/m^2$. Článek 3.3.2(1) v normě ČSN EN 1991-1-1 říká, že se na střechách nemá uvažovat současné působení užitných zatížení a sněhu nebo větru. V tomto případě je užitné zatížení větší než zatížení od sněhu, tudíž ve výpočtu je pro jednoduchost ponecháno pouze zatížení užitné. Zatížení od sněhu je zanedbáno.

2.2.4 Průřezové a materiálové vlastnosti

Materiálové řešení konstrukce je uvažováno následující:

- Třída betonu - C30/37
- Krytí betonu - 30 mm
- Výztuž - B500B

Průřezové vlastnosti konstrukce jsou uvažovány následující:

- Tloušťka svislých konstrukcí - 250 mm
- Tloušťka vodorovných konstrukcí - 250 mm
- Průřez sloupů pod tubusy - 300*300 mm

2.2.5 Kritéria

Po úspěšném vytvoření parametrického výpočetního modelu je potřeba určit kritéria angl. Fitness Value (zkr. FV), podle nichž bude optimalizační algoritmus schopen ohodnocovat jednotlivá řešení, která získá v průběhu optimalizace. Kritéria je třeba nastavit a odladit tak, aby vytvořila dostatečně ohraničenou množinu řešení, ve které algoritmus vyhledává optimum.

Kritéria vztahující se k tomuto objektu lze rozdělit do dvou skupin:

- Funkční kritéria - označení FV1 - FV8
- Statická kritéria - označení FV9 - FV10

Funkční kritéria lze definovat jako skupinu hodnot, která ohodnocují veškeré funkční požadavky (tj. prostorové, tvarové nebo stavebně-fyzikální požadavky), které jsou vztaženy na daný objekt. Statická kritéria představují skupinu hodnot, která hodnotí chování konstrukce ze statického hlediska. Spojením těchto kritérií vznikne komplexní hodnotící systém, který zajistí smysluplné výsledky optimalizace. V následujících podkapitolách jsou popsána jednotlivá kritéria.

FV1 - Kritérium užité plochy

Kritérium užité plochy redukuje oblast přípustných řešení na oblast mezi hodnotami 400 a 450m². Řešením v tomto intervalu je přiřazena hodnota "1". Ostatním řešením je přiřazena hodnota "1" + vzdálenost od nejbližší krajní hodnoty intervalu. Tzn. hodnota kritéria pro užitnou plochu 600m² je:

$$FV1(600) = 1 + (600 - 450) = 151 \quad (2.5)$$

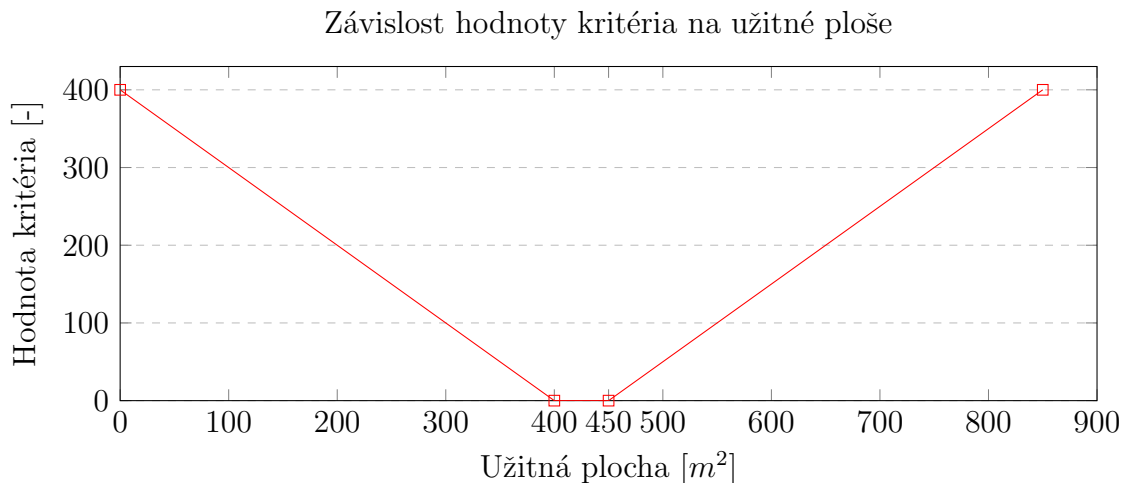
Následující graf znázorňuje průběh hodnoty kritéria FV1:

FV2 - Kritérium plochy kuchyně

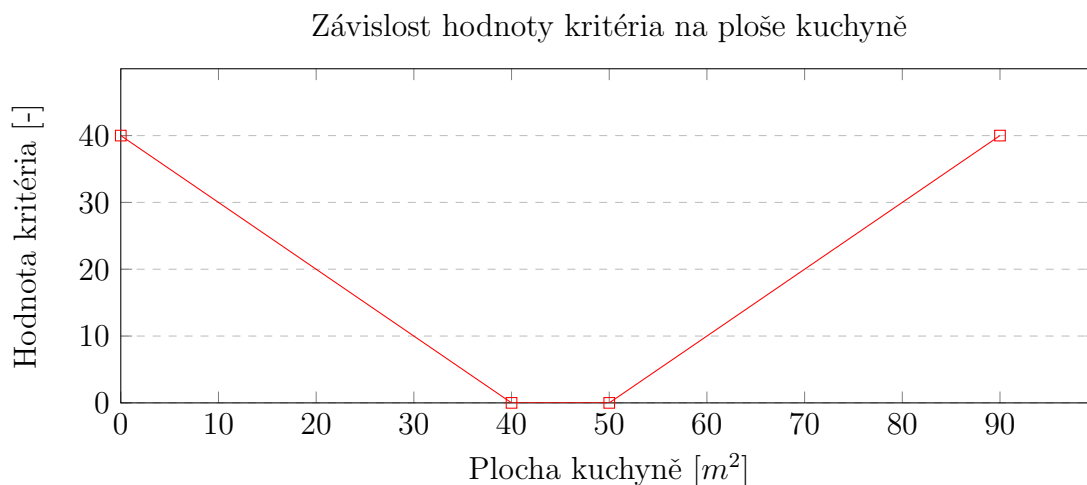
Kritérium FV2 je definováno obdobným způsobem jako FV1. Opět redukuje oblast přípustných řešení na interval od 40 do 50 m². Řešením mimo interval lineárně narůstá hodnota kritéria. Prostor kuchyně se nachází v 1.NP v jednom ze zadních výběžků spodního kvádrů (obr. 2.10) Na grafu 2.9 je znázorněn průběh hodnoty kritéria FV2.

FV3 - Kritérium celkové plochy oken

Kritérium FV3 je definováno celkovou plochou oken. Cílem je maximalizovat plochu oken, aby byla v objektu zajištěna světelná pohoda. Jelikož se hodnota kritéria maximalizuje,



Obrázek 2.8: Průběh FV1

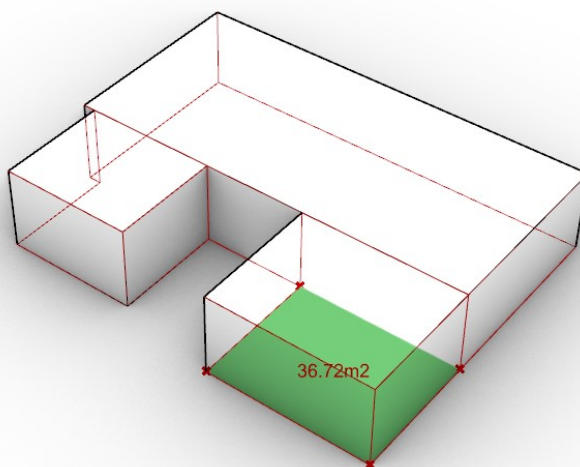


Obrázek 2.9: Průběh FV2

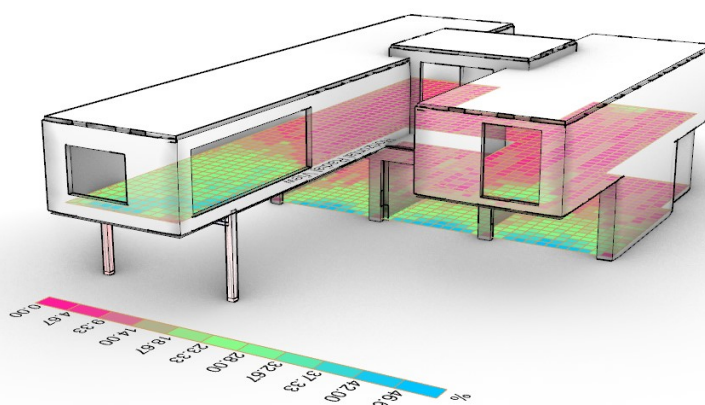
je nutné jí do výpočtu dávat jako převrácenou hodnotu. Tato operace je nutná, jelikož optimalizační modul WallaceiX se snaží veškerá kritéria minimalizovat. Zadáním kritéria v převrácené hodnotě se docílí maximalizace.

FV4 - Kritérium celkové viditelnosti z objektu

Kritérium FV4 je výsledkem analýzy viditelnosti z modulu Ladybug. Cílem tohoto kritéria je maximalizovat výhled z objektu. Do analýzy viditelnosti vstupují zkoumané body (podlaha) a geometrie, která blokuje viditelnost tj. celá geometrie objektu. V každém bodu se vytvoří kružnice ve výšce 1,7m (výška dospělého člověka) nad podlahou a určí se kolik procent obvodu z kružnice má nebráněný výhled do exteriéru. Celková hodnota kritéria je průměrem dílčích výsledků a do výpočtu vstupuje v převrácené hodnotě, jelikož cílem je maximalizovat viditelnost. Výsledky analýzy viditelnosti lze zkoumat i vizuálním zobrazením viz obr. 2.11.



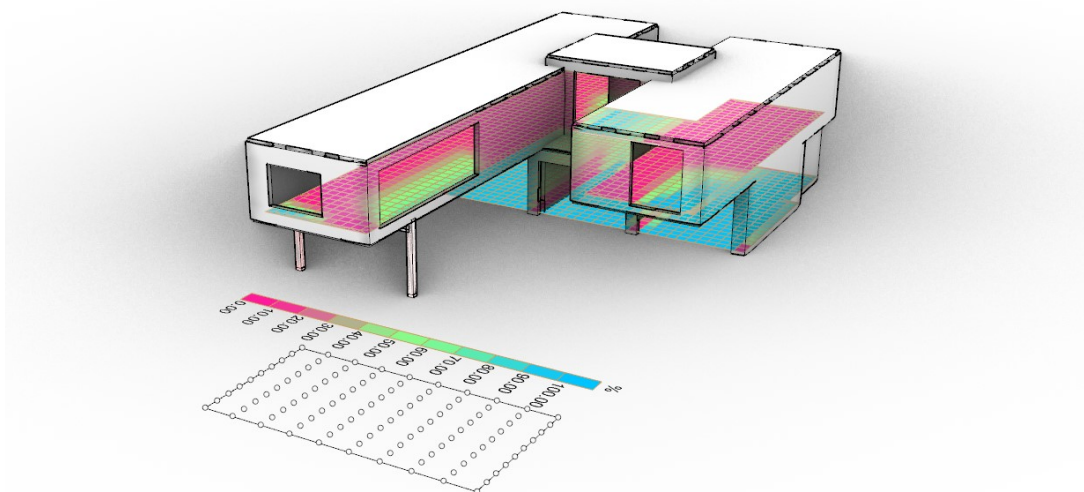
Obrázek 2.10: Poloha kuchyně



Obrázek 2.11: Analýza celkové viditelnosti

FV5 - Kritérium viditelnosti bazénu

Kritérium FV5 reprezentuje procentuální viditelnost bazénu, který je umístěný v přední části budovy. Cílem je maximalizovat viditelnost bazénu, protože je to dominanta zahrady a také z bezpečnostních důvodů (pád dítěte do vody). Bazén je definován obdélníkem, jež je rozdělený na pravidelnou mřížku bodů. Z podlahové plochy objektu se zkoumá, jaké procentuální množství bodů bazénu je viditelné z každého bodu podlahové plochy (ve výšce 1,7m nad podlahou). Tato analýza je opět provedena v s pomocí modulu Ladybug. Výsledná hodnota kritéria je převrácená hodnota aritmetického průměr dílčích výsledků.



Obrázek 2.12: Analýza viditelnosti bazénu

FV6 - Kritérium výhledu z bočního okna

Kritérium FV6 číselně vyhodnocuje kvalitu výhledu z bočního okna v tubusu č.1. Správné nastavení kritéria zajistí, že při výhledu z jednoho tubusu nebude ve výhledu bránit druhý tubus. Analýza viditelnosti je provedena obdobně jako u FV5 - je vymodelována svislá plocha za tubusem č.2, která je nadělena na pravidelnou mřížku bodů, a zkoumá viditelnost těchto bodů z povrchu bočního okna tubusu č. 1. Cílem je maximalizovat výhled, proto hodnota kritéria dána jako převrácená hodnota průměru jednotlivých výsledků.

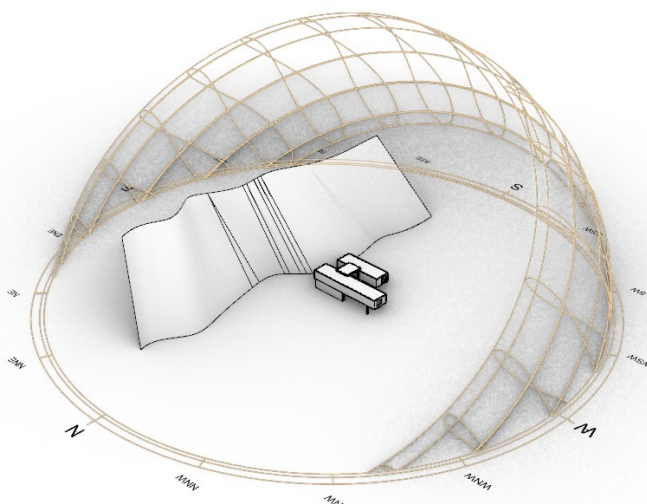
FV7 a FV8 - Kritéria solárních zisků

Kolem konstrukce je vytvořen kontext zástavby a konstrukce je umístěna na přesné geografické souřadnice, aby bylo možné přesně simulovat pohyb slunce kolem objektu v průběhu roku (obr. 2.13). Výsledkem této analýzy jsou kumulativní solární zisky za letní období (1. dubna - 30. září) a za zimní období (1. října - 30. března).

- FV7 - Minimalizuje solární zisky v letním období
- FV8 - Maximalizuje solární zisky v zimním období

FV9 - Kritérium maximálních tahových napětí

Hodnota kritéria je získána z průběhu hlavních napětí v konstrukci. Tato hodnota je použita ve výpočtu, protože vykonzolované části objektu s velkými tahovými silami by byly obtížně dimenzovatelné. Výchet hodnot hlavních napětí σ_1 a σ_2 je seřazen sestupně s maximálními kladnými hodnotami (tahová napětí) na začátku. Následně je z 10%



Obrázek 2.13: Analýza oslunění objektu

nejvyšších kladných určen medián, který vstupuje do optimalizačního algoritmu jako kritérium FV8. Medián se určuje kvůli vyřazení extrémních hodnot, které mohou vzniknout z důvodu singularity ve výpočtu.

FV10 - Kritérium deformací

Kritérium FV9 má za cíl směřovat optimalizační algoritmus k variantám řešení s co nejmenšími deformacemi. To má za následek, že z množiny možných řešení se vyloučí varianty s příliš dlouhými konzolami apod. Výsledná hodnota kritéria představuje maximální globální deformaci konstrukce. Vypočtené hodnoty deformací jsou získány pouze z lineárního výpočtu, a tudíž nereflektují přesné chování železobetonové konstrukce - nezahrnují totiž vliv dotvarování a smršťování betonu.

Kapitola 3

Vyhodnocení výsledků optimalizace

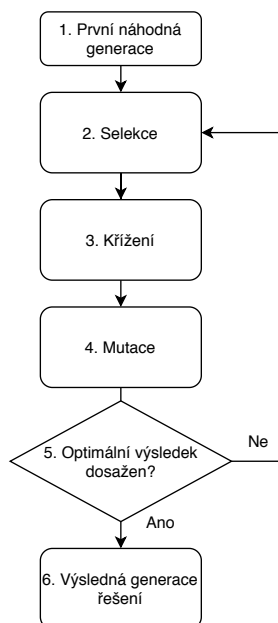
Tato kapitola se zabývá vyhodnocením výsledků optimalizace výše popsaného výpočetního modelu s pomocí genetického algoritmu NSGA-II. V podkapitole 3.1 je nejprve teoreticky popsán princip fungování genetických algoritmů a jejich využití při optimalizačních problémech. V podkapitole 3.2 jsou blíže popsány metody výběru, s pomocí kterých lze redukovat velkou množinu řešení na pár konkrétních. Následně jsou tyto metody aplikovány a je vybráno 25 konkrétních řešení ke srovnání.

3.1 Stručný popis optimalizace s pomocí genetických algoritmů

Jak již bylo zmíněno v popisu výpočetních modulů programu Grasshopper, optimalizaci zajišťuje modul WallaceiX. WallaceiX vznikl jako studentský projekt na London School of Architecture, ale postupně, se zapojením externích vývojářů, se ze studentského projektu stal bezplatný komplexní optimalizační modul, který mimo samotnou optimalizaci poskytuje i sadu analytických nástrojů pro vyhodnocení výsledků. [4]

Optimalizační algoritmus běžící na pozadí tohoto modulu je založen na bázi genetického algoritmu NSGA-II, který momentálně patří mezi nejefektivnější a nejrychlejší. Genetické algoritmy (dále "GA") patří mezi evoluční algoritmy, které jsou založeny na ideje Darwinovy evoluční teorie, především pak na tématu přirozeného výběru.[5]

Cílem GA je z jakkoliv velké množiny řešení najít co nejrychleji řešení optimální. Vyhledávání je iterativní proces. V každé iteraci vznikne nová množina řešení - generace, která se skládá z určitého množství řešení - jedinců. Proces vyhledávání optima lze znázornit diagramem na obr. 3.1 . GA má k dispozici tři operace, kterými určuje směr jakým se algoritmus udává. Jednotlivé druhy GA se liší ve způsobech provedení těchto operací. Operace jsou následující:



Obrázek 3.1: Diagram genetického algoritmu

- Selektce - výběr nejlepších jedinců, již se budou podílet na tvorbě další generace.
- Křížení - křížení vybraných jedinců za účelem vytvoření lepšího jedince.
- Mutace - náhodná změna určité vlastnosti jedince, za účelem vnesení imperfekce do dalších generací. Díky tomu algoritmus neskončí v lokálním maximu, ale dokáže pokračovat i mimo něj.

Iterace pokračují do té doby, dokud není splněna předem stanovená podmínka pro ukončení (např. dosažená konkrétní hodnota kritéria) nebo dokud není vyčerpán dostupný výpočetní čas.

V případě implementace GA v rámci modulu WallaceiX se nastavuje množství řešených generací a velikost populace každé generace. V tomto případě je výpočet nastaven dle tabulky 3.1

Velikost populace	70
Max. počet generací	160
Pravděpodobnost křížení	0.8
Pravděpodobnost mutace	0.1
Počet parametrů	32
Počet kritérií	10
Přibližná délka výpočtu ¹	11,8h

Tabulka 3.1: Parametry genetického algoritmu

¹Platí pro 6ti jádrový procesor AMD Ryzen 5 2600 3,4 GHz

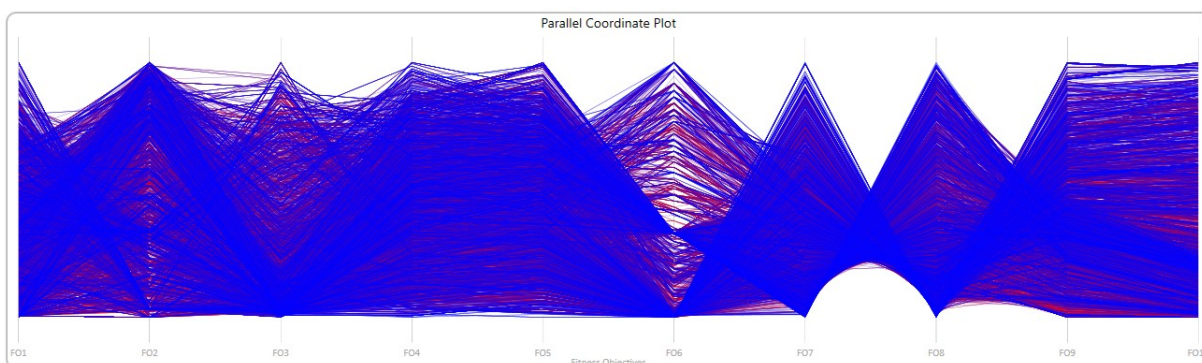
3.2 Výběr a vyhodnocení řešení

V této kapitole jsou genetické algoritmy využity k optimalizaci objektu popisovaném v úvodní části této práce. Při hledání optimálního konstrukčního systému je s využitím GA a se zohledněním optimalizačních kritérií po dokončení optimalizačního běhu vygenerováno v programu WallaceiX 11 200 řešení. K přetřídění a analýze výsledků slouží integrované analytické nástroje v modulu WallaceiX. Analýzu výsledku lze ve WallaceiX provést dvěma přístupy - s pomocí grafu s rovnoběžnými souřadnicemi angl. Parallel Coordinate Plot (zkr. PCP) a pomocí shlukové analýzy k-means algoritmem. [4]

3.2.1 Metody výběru v PCP grafu

PCP graf slouží k vyobrazení více dimenzionálních dat. V optimalizační úloze každé kritérium přidává úloze jednu dimenzi. V tomto případě se řešení posuzuje podle deseti kritérií (blíže viz 2.2.5), tudíž PCP graf má 10 svislých os. Data se vyobrazují na svislých osách, jejichž rozsah je od minimální po maximální hodnotu daného kritéria (hodnoty na osách jsou normalizované). Tudíž hodnoty, které jsou na jednotlivých osách nejnižší, jsou z hlediska daného kritéria nejoptimálnější. Hodnoty na jednotlivých osách jsou pro dané řešení spojeny lomenou čarou. Na grafu 3.2 jsou zobrazena všechna vygenerovaná řešení.

Způsob, jakým jsou v PCP grafu uspořádané lomené čáry, poukazuje na existenci vzájemné závislosti jednotlivých kritérií. Pokud je lomená čára mezi dvěma osami vodorovná, znamená to, že sousední kritéria mají mezi sebou přímou závislost. Pokud by soubor lomených čar vytvářel mezi dvěma osami tvar písmene "X", znamená to, že mezi sousedními kritérii je nepřímá závislost.



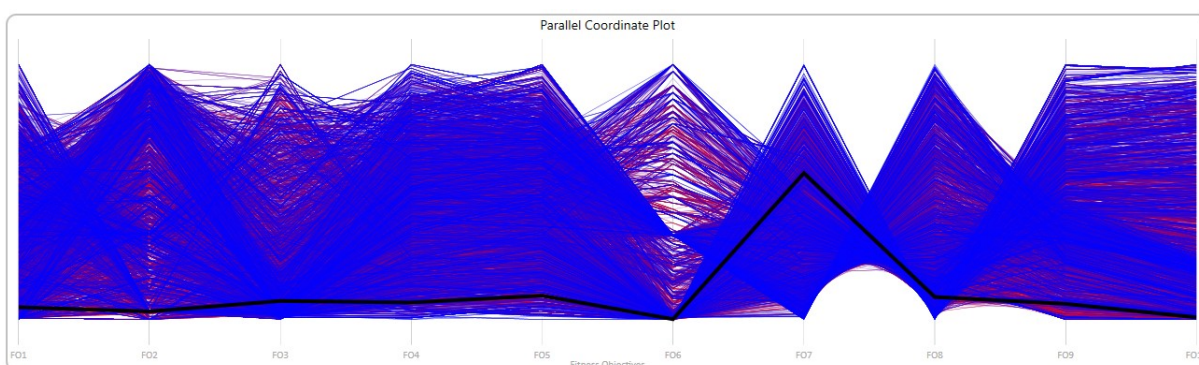
Obrázek 3.2: PCP graf

WallaceiX poskytuje několik metod pro výběr řešení na základě výsledků z PCP grafu. Pro vyhodnocení výsledků v této úloze lze využít následující metody:

- Average fitness rank
- Relative difference between fitness rank

Average fitness rank

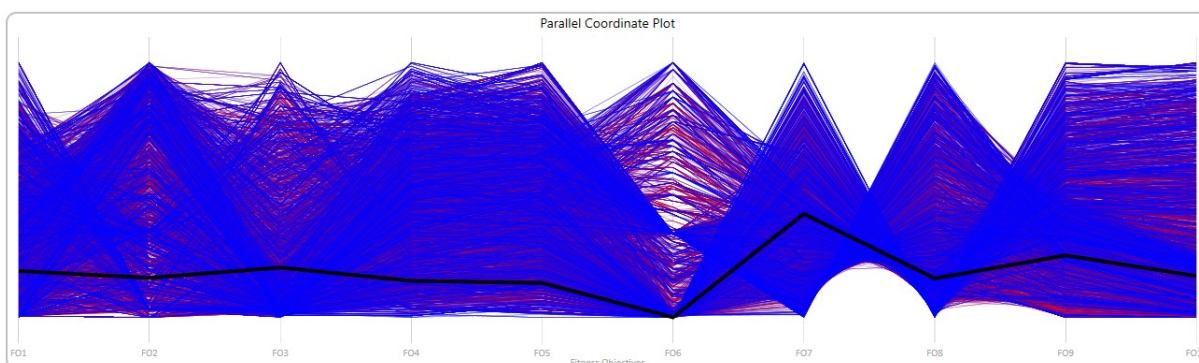
Tato metoda řadí řešení podle jejich průměrného umístění jednotlivých kritérií. Na PCP grafu jsou to ta řešení, jejichž lomená čára je umístěna co možná nejnižě (obr. 3.4).



Obrázek 3.3: Average fitness rank

Relative difference between fitness rank

Tato metoda řadí řešení podle nejmenšího rozdílu umístění jednotlivých kritérií. Pokud by existovalo řešení, u kterého jsou všechna kritéria umístěna na pozici např. 200, v PCP grafu by bylo znázorněno horizontální čarou.

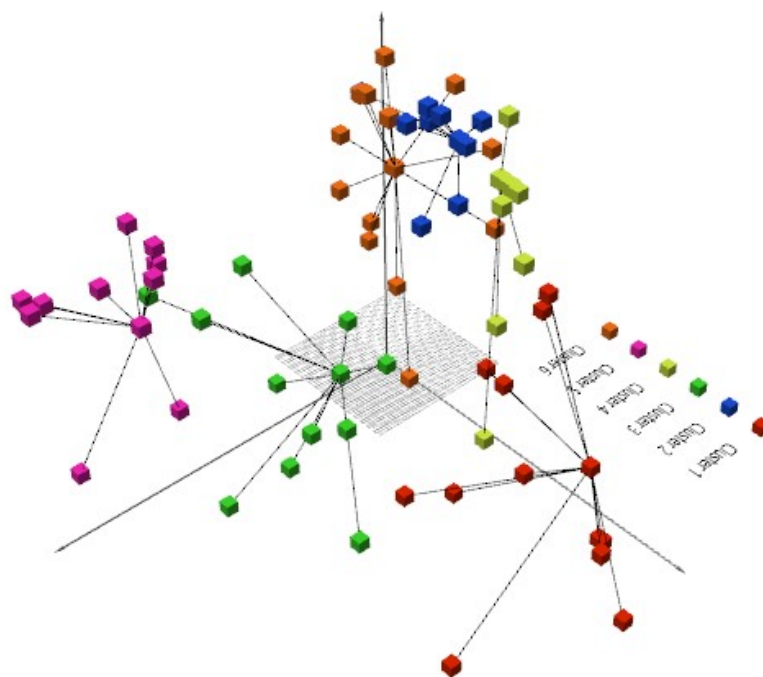


Obrázek 3.4: Relative difference between fitness rank

3.2.2 Shluková analýza

Shluková analýza je statistická metoda používaná pro třídění souboru dat do skupin. Shlukovou analýzu lze provést vícero způsoby, ale v modulu WallaceiX je implementován pouze k-means algoritmus. Tento algoritmus umožňuje rozdělit skupinu vícerozměrných dat do "k" skupin (také "shluky" nebo "clustery"). Každá skupina je reprezentována centroidem neboli jedním řešením za celý shluk. Tento reprezentant se nachází v těžišti daného shluku (obr. 3.5).

Shlukovou analýzu lze použít ve WallaceiX na konkrétní generaci řešení, na veškerá řešení, na pareto-optimální řešení pro danou generaci anebo veškerá pareto-optimální řešení. Skupina pareto-optimálních řešení je skupina řešení, pro která v dané generaci nelze nalézt řešení lepší dle jednoho nebo více kritérií. Jsou to optimální řešení, ale v rámci své skupiny jsou si všechna řešení rovnocenná.



Obrázek 3.5: K-means shlukování

3.2.3 Výběr řešení ke srovnání

Výše uvedené metody jsou použity k nalezení a výběru optimálního řešení konstrukčního systému objektu. Celkem je exportováno 25 řešení, z nichž 10 řešení představuje takové varianty, které zobrazují nejlepší výsledek pro každé jednotlivé kritérium. Zbylých patnáct řešení je vybráno pomocí analytických nástrojů WallaceiX, které byly popsány v podkapitolách 3.2.1 a 3.2.2:

- Average fitness rank (dále AFR) - čtyři řešení umístěných na pozicích 0, 50, 100 a 150 z celkového počtu 11 200 řešení.
- Relative difference between ranks (dále RDBR) - tři řešení na pozicích 0, 50, 100 a 150 z celkového počtu 11 200 řešení.
- K-means clustering - sedm shluků z Pareto frontu (obr. 3.5)

V tabulce 3.2 je uvedeno srovnání jednotlivých variant. Ve sloupcích jsou uvedeny hodnoty jednotlivých kritérií. Ke každému kritériu náleží dva sloupce. V prvním sloupci je vždy uvedena nominální hodnota kritéria, kde je v případě maximalizace kritéria použita původní nepřevrácená hodnota. Pokud není cílem kritérium maximalizovat, je uvedena původní, nepřevrácená, hodnota. Ve druhém sloupci je zobrazena změna (Δ) oproti nejlepší získané hodnotě. Nejlepší získaná hodnota je u každého kritéria zobrazena na prvním (žlutém) řádku tabulky. Sloupce jsou doplněny o barevné škály, které graficky znázorňují změnu oproti nejlepší hodnotě.

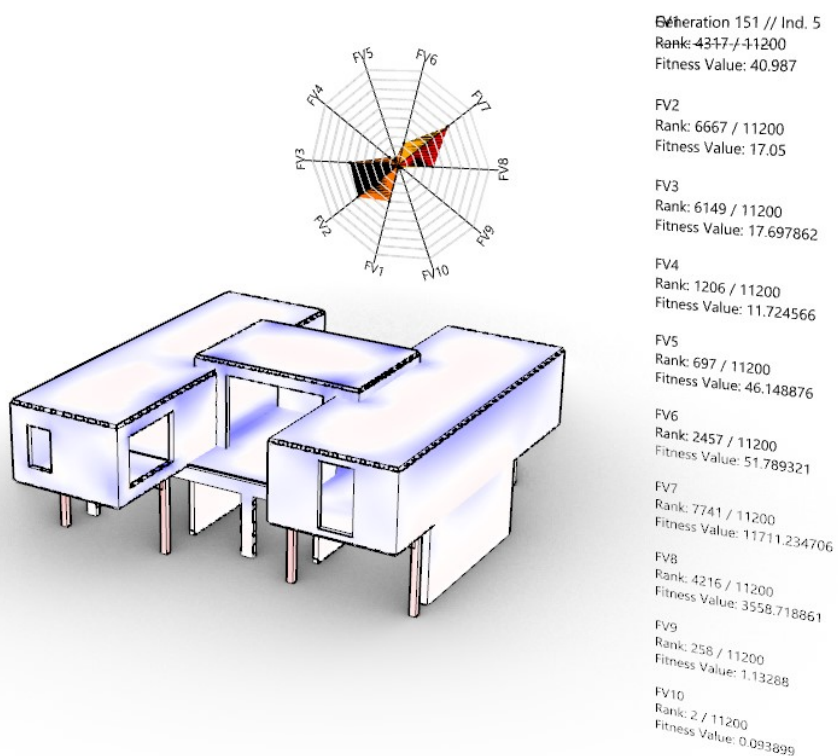
Poslední sloupec slouží jako pomůcka při výběru varianty pro další zkoumání. Ve sloupci je zobrazena průměrná změna všech kritérií. Řešení s nejmenší průměrnou změnou je nejbližší k optimálním hodnotám.

V příloze A jsou vyobrazena jednotlivá řešení. Každé řešení je vyobrazeno dvěma axonometrickými pohledy tak, aby byl co nejlépe znázorněn jejich tvar. Objekty jsou zobrazeny v deformovaném tvaru tak, aby bylo vidět jejich statické chování. Dále jsou plochy opatřeny barevnou škálou, kde červená barva znázorňuje tlaková napětí a modrá barva představuje tahová napětí. Ke každému řešení je přidán radarový graf, který znázorňuje více-dimenzionální data principiálně jako PCP graf, ale je uspořádán do růžice. Na osách grafu jsou uvedeny hodnoty kritérií, přičemž platí - čím menší je vyšrafovaná plocha, tím blíže optimu je dané řešení.

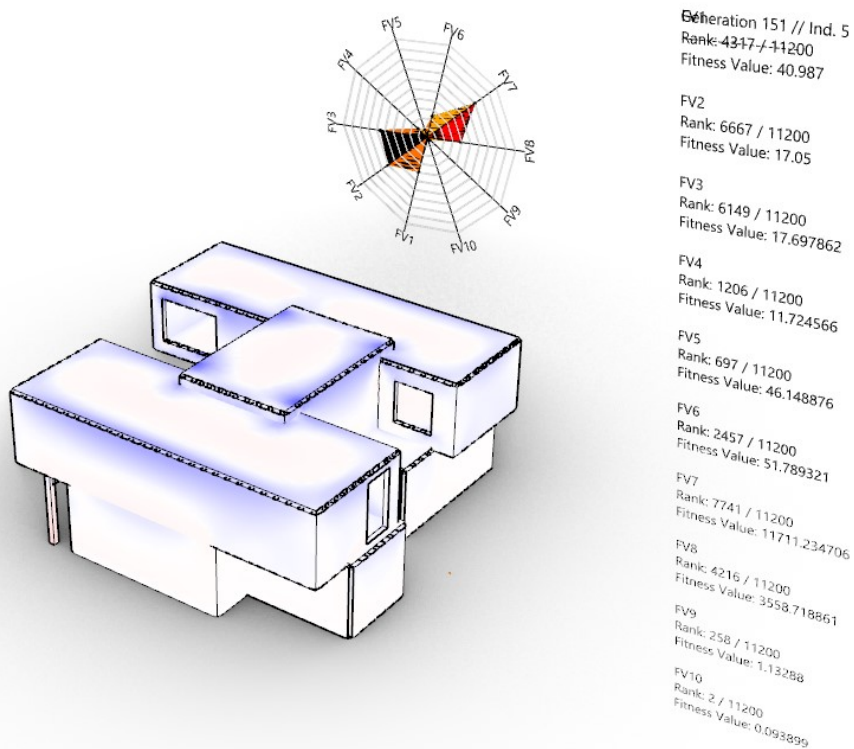
Na obrázcích 3.7, 3.8 a 3.9 je vyobrazeno řešení 10 z tabulky, které má dle metriky "průměrná změna oproti nejlepšímu řešení" nejnižší hodnotu, tudíž se srovnání vyšlo jako nejlepší.

Kritérium	FV1 Užitná plocha Δ	FV2 Plocha kuchyně Δ	FV3 Plocha oken Δ	FV4 Celková viditelnost %	FV5 Viditelnost bazény %	FV6 Viditel. z bočního ok. %	FV7 Sol. zisky létě Wh Δ	FV8 Sol. zisky zímě Wh Δ	FV9 Max tahové napětí kPa Δ	FV10 Max deformace cm Δ	Průměrná Δ
0	0	0,016	67,04	15,84	59,69	97,80	2307	9615	1,078	0,094	
1	Nelepší řešení z hlediska kritéria 1	+13,904	9,38	56,47%	25,86	1,49	5906	1724	2,218	0,479	+106,523
2	Nelepší řešení z hlediska kritéria 2	+50,125	0,016	-46,36%	30,90	-48,24%	0,01	-99,99%	9234	300,36%	1334,03%
3	Nelepší řešení z hlediska kritéria 3	+57,522	18,308	39,04%	32,22	-46,02%	2,79	-97,15%	18887	718,84%	219,680
4	Nelepší řešení z hlediska kritéria 4	+1,000	5,150	0,00%	54,10	-9,36%	9239	8939	4,294	298,17%	9807,46%
5	Nelepší řešení z hlediska kritéria 5	+95,787	25,006	-3,38%	59,69	0,00%	60,44	4444	4,438	310,57%	8627,90%
6	Nelepší řešení z hlediska kritéria 6	+1,000	30,276	-32,18%	35,77	-40,07%	97,80	0,00%	5525	218,34%	1816,94%
7	Nelepší řešení z hlediska kritéria 7	+67,794	10,420	-66,77%	18,91	-68,32%	0,01	-99,99%	2307	0,00%	562,60%
8	Nelepší řešení z hlediska kritéria 8	+29,421	0,059	-15,57%	44,82	-24,91%	93,24	-4,66%	22830	894,13%	419,494
9	Nelepší řešení z hlediska kritéria 9	+49,042	15,350	-34,85%	35,69	-40,21%	54,66	-44,11%	12115	425,25%	5726,63%
10	Nelepší řešení z hlediska kritéria 10	+40,987	17,050	-26,00%	46,15	-22,69%	51,79	-47,05%	3559	0,094	+75,983
11	Řešení 1 - Gen002/nd09 (AFR_0)	+8,994	1,000	-15,26%	47	-20,72%	14890	545,54%	1,447	34,14%	+88,911
12	Řešení 2 - Gen000/nd23 (AFR_50)	+9,111	1,631	-29,77%	39	-34,72%	40	-59,55%	10502	355,31%	71,33%
13	Řešení 3 - Gen126/nd60 (AFR_100)	+30,012	6,442	-22,17%	45	-24,48%	70	-28,16%	14333	521,69%	+84,363
14	Řešení 4 - Gen012/nd55 (AFR_150)	+6,885	3,386	-43,76%	34	-43,62%	26	-73,79%	12298	433,19%	+109,620
15	Řešení 5 - Gen066/nd40 (RDBR_0)	+34,252	4,512	-27,94%	43	-27,52%	9	-90,85%	11216	386,27%	977,92%
16	Řešení 6 - Gen005/nd29 (RDBR_50)	+28,443	7,241	-41,09%	30	-49,99%	0	-99,99%	9761	323,19%	183,365
17	Řešení 7 - Gen009/nd59 (RDBR_100)	+36,113	6,799	-49,51%	31	-47,64%	0	-99,99%	5784	129,09%	+134,029
18	Řešení 8 - Gen002/nd09 (RDBR_150)	+8,994	1,000	-15,26%	47	-20,72%	14890	545,54%	1,447	34,14%	+88,911
19	Cluster 1 - Gen151/nd64	+76,424	18,324	64,15%	19	-68,74%	0	-99,99%	6596	185,97%	1182,48%
20	Cluster 2 - Gen067/nd56	+85,443	13,922	56,87%	23	-61,23%	0	-99,99%	8325	304,28%	3562,48%
21	Cluster 3 - Gen048/nd55	+16,031	17,815	-33,65%	33	-45,09%	93	-5,09%	17828	672,94%	4138,38%
22	Cluster 4 - Gen034/nd38	+60,014	19,974	64,67%	20	-66,24%	0	-99,99%	2998	29,99%	968,50%
23	Cluster 5 - Gen033/nd43	+16,582	1,444	-38,14%	35	-41,81%	79	-18,96%	9923	330,23%	506,52%
24	Cluster 6 - Gen083/nd68	+1,000	22,864	-46,75%	32	-45,80%	1	-99,16%	10344	348,47%	941,17%
25	Cluster 7 - Gen049/nd62	+120,237	5,728	55,39%	25	-58,26%	0	-99,99%	12002	420,37%	2415,20%

Tabulka 3.2: Srovnání výsledků

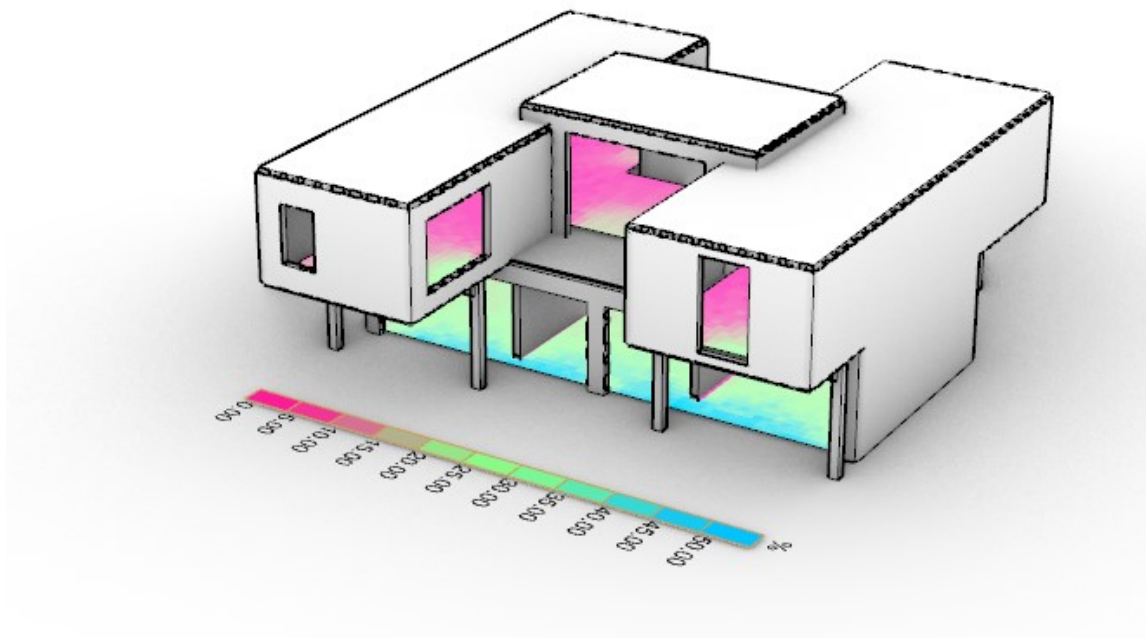


(a) Řešení 10 - přehled

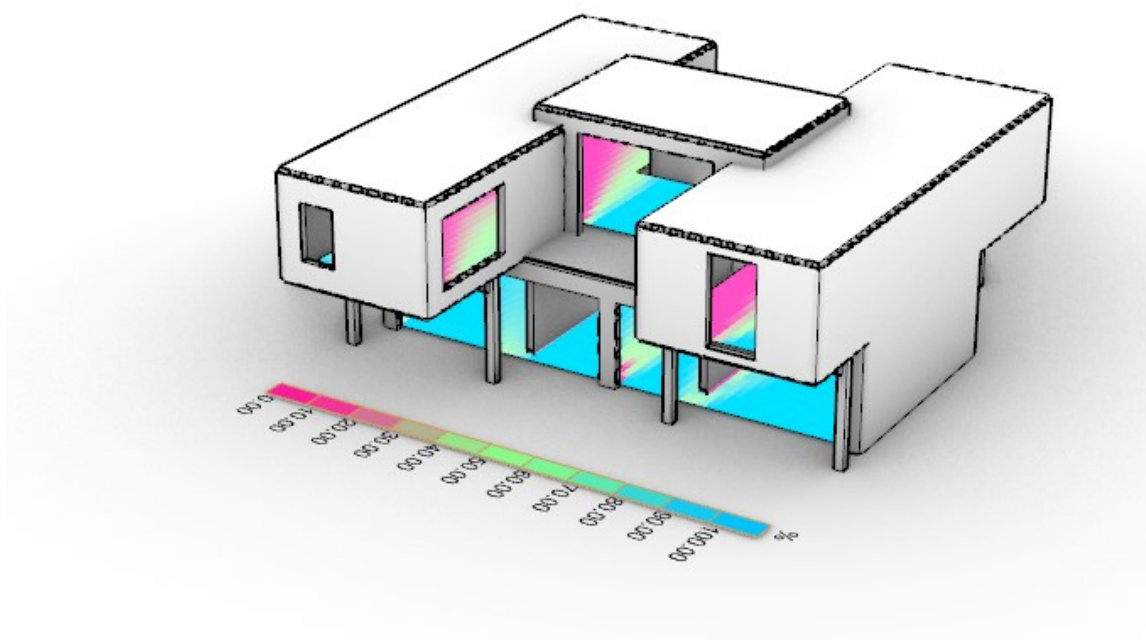


(b) Řešení 10 - přehled

Obrázek 3.6: Nejlepší řešení č. 10

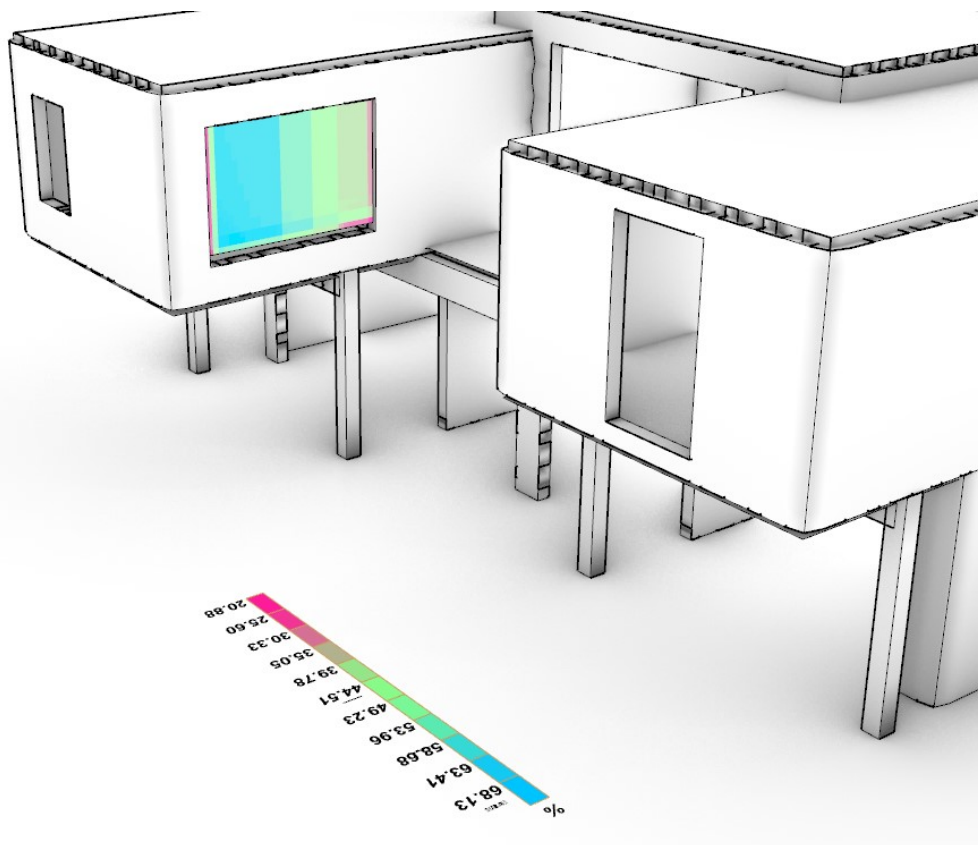


(a) Řešení 10 - kritérium FV4

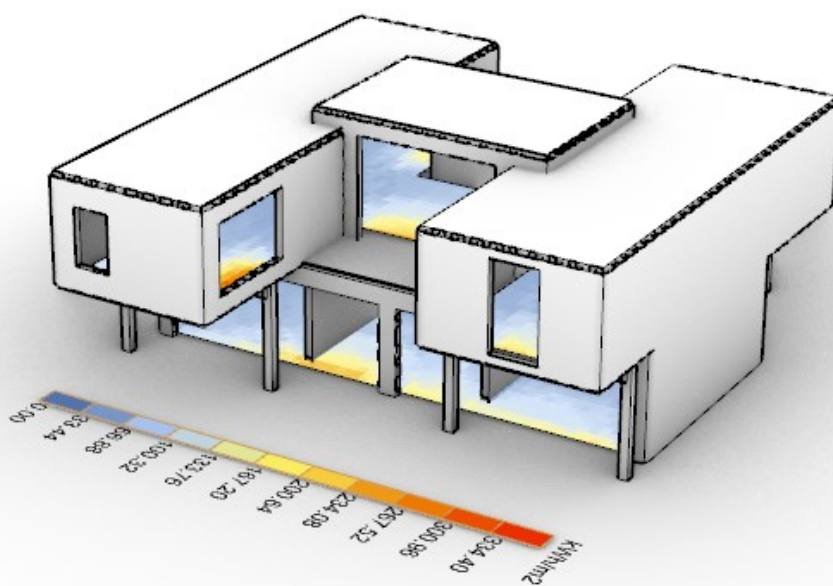


(b) Řešení 10 - kritérium FV5

Obrázek 3.7: Řešení 10

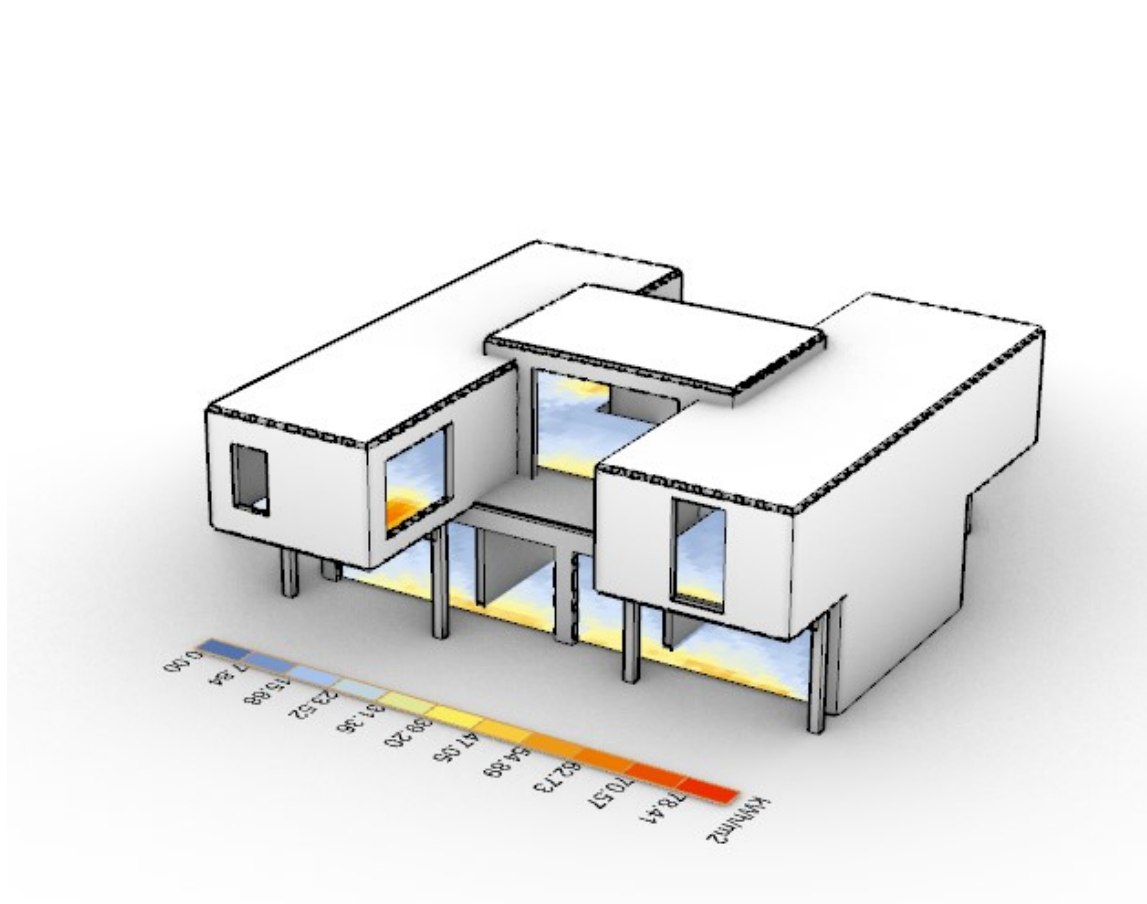


(a) Řešení 10 - kritérium FV6



(b) Řešení 10 - kritérium FV7

Obrázek 3.8: Řešení 10



(a) Řešení 10 - kritérium FV6

Obrázek 3.9: Řešení 10

3.2.4 Závěry a poznatky ze získaných řešení

Z výsledků představených na předchozích ilustracích lze vyvodit následující:

1. Ze nejlepších řešení představených v předchozí podkapitole lze usoudit, že nastavení kritérií je správné a vede k očekávaným tvarům objektu, konkrétně:
 - Maximalizace ploch oken vede k velkým plochám otvorů,
 - kritérium viditelnosti bazénu vede k delší první konzole a většímu otvoru v ní,
 - minimalizace solárních zisků vede k zmenšení plochy otvorů,
 - maximalizace solárních zisků vede k zvětšení plochy otvorů,
 - minimalizace tahových napětí a deformací vede ke kompaktnějšímu tvaru bez dlouhých konzol a bez velkých otvorů.
2. Řešení získaná s pomocí AFR a RDBR metody jsou vhodnější než řešení ze shlukovacího algoritmu. Je to dané tím, že shlukovací algoritmus vybírá řešení z množiny pareto-optimálních řešení. Jak bylo řečeno v kapitole 3.2.2 pareto-optimální řešení nemusí být vždy nejlepší dle všech kritérií.
3. Lze pozorovat, že v případě úzkého a dlouhého tubusu výpočet považuje průhyb tubusu za přijatelný (díky tuhosti tubusu) a nepřidává pod tubus podporu.
4. Ze zbarvení výsledků je zřejmé, že dominantní namáhání je tahové (modrá barva) a tudíž volba kritéria, které minimalizuje tahová namáhání je správná.

Pro podrobnější ověření mezních stavů únosnosti a použitelnosti je vybrán stěnový nosník s velkým otvorem u řešení číslo 10, který měl nejmenší průměrnou změnu kritérií (v tabulce 3.2). Návrh stěny bude proveden metodou CSFM, viz níže.

Kapitola 4

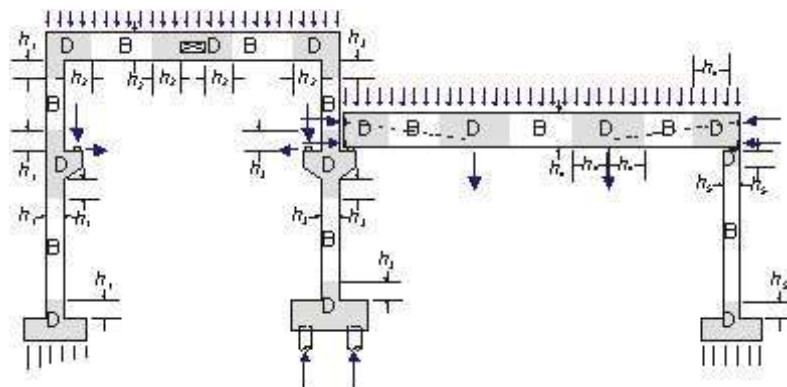
Ověření dimenzovatelnosti řešení

Hodnoty výsledných deformací a napětí získané v kapitole 3 jsou z lineárního výpočtu, který nezohledňuje skutečné chování materiálu tj. dotvarování, smršťování a trhliny. Tyto vlastnosti železobetonu se podílejí značnou částí na skutečném výsledném napětí a přetvoření. Zároveň je nutné ověřit správnost získaných výsledků a také dimenzovatelnost konstrukce. Pokud by se ukázalo, že konstrukce získaná z optimalizace není v kritických místech dimenzovatelná, je nutné upravit statická kritéria např. omezením maximálních napětí. Pro ověření výsledků a dimenzování konstrukcí byl zvolen program IDEA StatiCa Detail, který je blíže popsán v podkapitole 4.1. V podkapitole 4.2 je sestaven výpočetní model pro posudek a v podkapitole 4.3 je provedeno samotné posouzení konstrukce na MSÚ a MSP.

4.1 IDEA StatiCa

IDEA StatiCa Detail je další z řady statických výpočetních nástrojů brněnské společnosti IDEA StatiCa. Mezi další programy patří Connection (návrh ocelových spojů metodou komponent), Concrete (návrh železobetonových nosníků) a Prestressing (návrh předpínaných konstrukcí). IDEA StatiCa Detail (dále IS Detail) byl vyvinut ve spolupráci s univerzitou ETH v Zurichu a poprvé byl veřejnosti k dispozici v roce 2017.

IS Detail je především nástroj vhodný pro řešení oblastí diskontinuit (D-oblastí) v konstrukci. Oblasti v konstrukcích lze obecně rozdělit na D-oblasti a B-oblasti. B-oblasti jsou charakterizovány, tím že v nich platí Bernoulli-Navierova hypotéza o zachování rovinnosti průřezů a kolmosti průřezů ke střednici při ohybu. D-oblasti jsou naopak oblasti, kde je narušené rovnoměrné rozložení napětí. Tyto oblasti vznikají převážně u míst uložení konstrukcí (krátké konzoly, hlavice pilot), v místě lokálních zatížení, v místech, kde se vyskytují otvory v konstrukci a v místech kde dochází k náhlé změně průřezů (obr. 4.1). V těchto místech již neplatí Bernoulli-Navierova hypotéza a nelze použít standardní přístup



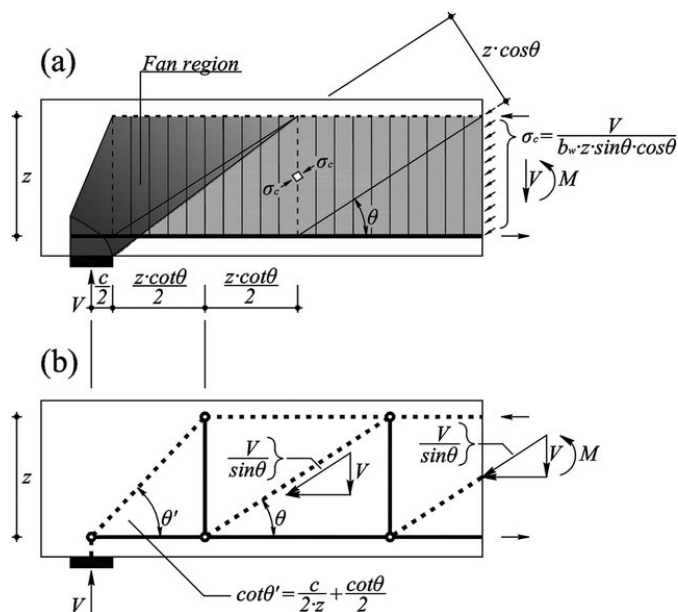
Obrázek 4.1: Oblasti diskontinuit [6]

pro posuzování prvků. [7]

Pro návrh těchto oblastí je tedy nutné použít metodu příhradové analogie angl. Strut and Tie Model (zkr. STM) a metodu tlakových polí angl. Stress Field Method (zkr. SFM) (obr. 4.2). Obě metody byly vyvinuty v 80. letech a vychází z teorie plasticity. STM i SFM jsou obdobné metody, avšak pouze STM je zohledněna v normě ČSN EN 1992. SFM je doporučenou metodou v zahraničních návrhových normách např. ve švýcarské Schweizer norm. SIA 262:2003 concrete structures ???. Metody se liší v typu výpočtového modelu - STM nahrazuje řešenou konstrukci či poruchovou oblast příhradovou konstrukcí s tlačnými prvky (betonové vzpěry) a taženými prvky (výztuž), kdežto SFM používá tlakové betonové zóny s táhly (výztuž). Dále se liší zadávání materiálových vlastností. V STM se musí manuálně stanovit redukční koeficient pevnosti tlačných prvků v závislosti na způsobu zatížení (prostý tlak, tlak s kolmým tahem, tlak s šikmým tahem). SFM oproti tomu ve výpočtu zohledňuje kinematickou mezní analýzu a díky tomu umožňuje stanovit přetvoření po celé konstrukci. Díky tomu lze automaticky určit redukční koeficient pevnosti pro každý bod tlakového pole.[8]

Obě metody mají nesporné výhody pro návrh poruchových oblastí. Nicméně se v Česku normou doporučená STM příliš neaplikuje, primárně kvůli svým několika zásadním problémům, konkrétně:

- Složitosti sestavení výpočetního modelu,
- nutnosti předělávat model náhradní příhradové konstrukce při jakékoliv změně geometrie,
- nutnost měnit parametry výpočtu při změně zatížení,
- uživatelsky nepřívětivé dostupnosti programů,
- nemožnosti posoudit mezní stav použitelnosti.



Obrázek 4.2: a) Pole napětí b) Metoda náhradní příhradoviny [9]

Právě s ohledem na tyto nedostatky byl vyvinut program IS Detail. Výpočty v tomto programu jsou založeny na "Metodě kompatibilních tlakových polí" angl. "Compatible stress field method" (zkr. CSFM). Princip této metody pramení z modifikované metody tlakových polí. CSFM je ale navíc rozšířeno o určitá vylepšení, které umožňují provést i posudek MSP a dále se určité postupy výpočtu adaptují na postupy ze STM tak, aby tato metoda byla v souladu s normou ČSN EN 1992-1-1.

4.1.1 Předpoklady výpočtu CSFM

Na následujících řádcích jsou uvedeny předpoklady, které se zohledňují ve výpočtu metodou CSFM. Výpočet založený na těchto předpokladech prokazatelně poskytuje kvalitní výsledky pro železobetonové prvky, které jsou namáhány ve své rovině. [10]

Model betonu

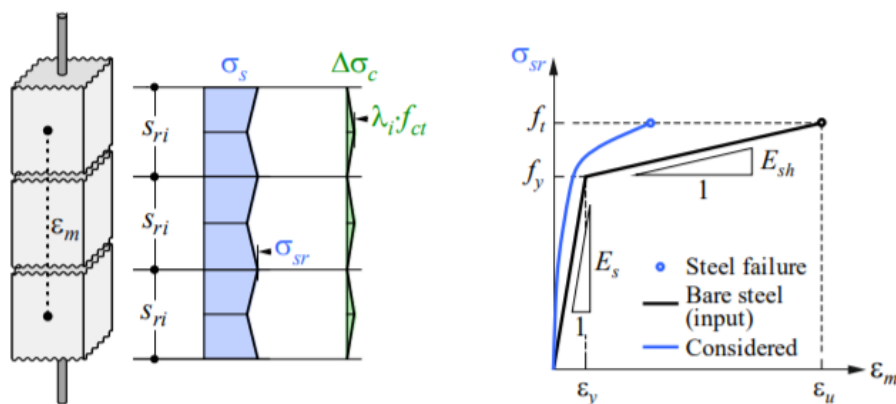
Uvažuje se pouze pevnost betonu v tlaku, tahová pevnost se zanedbává. Tahová namáhání se přenášejí pouze výztuží. Pevnost betonu v tahu vstupuje do výpočtu pouze v zohlednění tahového zpevnění výztuže.

Ve výpočtu se uvažují trhliny ve směru hlavních napětí. Napětí v místě trhliny je v betonu nulové a ve výztuži maximální.

Tahové zpevnění výztuže

Uvažuje tahové zpevnění výztuže betonem mezi trhlinami. Tahové zpevnění se ve výpočtu dále rozlišuje pro stabilizovaný a nestabilizovaný rozvoj trhlin v betonu. Stabilizace trh-

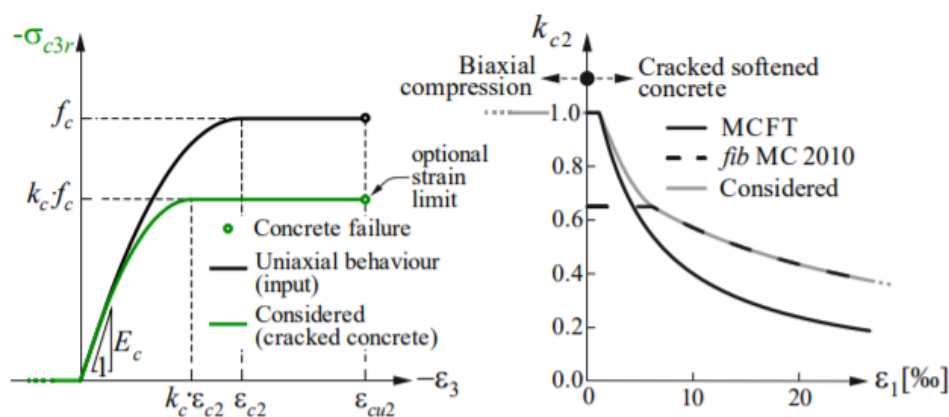
lin se ověřuje na úrovni jednotlivých vložek u nichž se ověřuje, zda beton mezi dvěma trhlinami má napětí nižší než je napětí na mezi vzniku trhliny.



Obrázek 4.3: Tahové zpevnění výztuže [9]

Tlakové změkčení betonu

V každém bodě konstrukce se zjišťuje způsob namáhání, podle nějž se určuje redukční koeficient pevnosti betonu v tlaku k_{c2} . Stanovení koeficientu k_{c2} vychází z hlavního tahového přetvoření betonu ϵ_1



Obrázek 4.4: Tlakové změkčení betonu / Stanovení koeficientu k_{c2} [9]

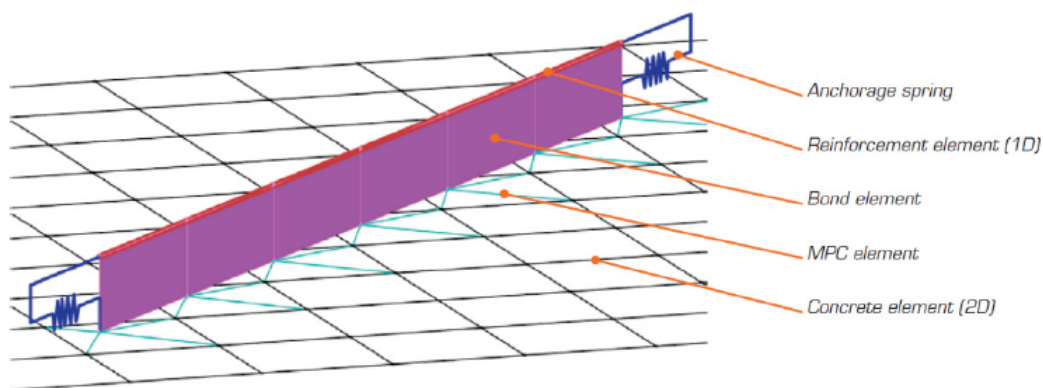
Ověření kotevní délky výztuže

Ve výpočtu se ověřuje soudržnost mezi výztuží a betonem a provádí se normou doporučený posudek kotevní délky. Ve výpočtu lze zohlednit koncovou úpravu vložek např. háky, ohyby apod.

4.1.2 MKP model

Konstrukce vstupující do výpočtu v IS Detail, oproti běžným MKP programům, v sobě zohledňuje skutečné rozmístění výztuže. To znamená, že ve fázi zadání parametrů a geometrie konstrukce, je třeba umístit výztuž do předpokládaných zón. Zohlednění skutečného chování výztuže v betonu je provedeno implementací nových výpočetních prvků do MKP sítě. Síť konečných prvků je tedy sestavena z následujících prvků (obr. 4.6):

- Beton - 2D prvky (trojúhelníkové nebo čtvercové),
- Výztuž - 1D prvek, který má pouze osovou tuhost,
- prvek soudržnosti - 2D prvek, který je připojen dvěma body k výztuži a dvěma body k betonu. Prvek má definovanou tuhost ve smyku a simuluje soudržnost mezi výztuží a betonem,
- kotvení vložky - pružina na konci každé vložky, jejíž tuhost závisí na koncové upravě vložky.



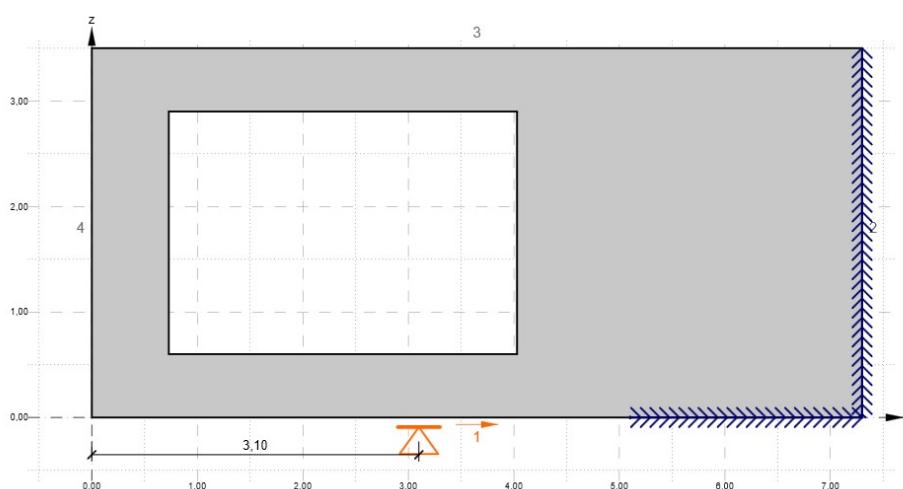
Obrázek 4.5: MKP model železobetonového prvku

4.2 Výpočetní model

Pro ověření byl zvolen prvek s největším množstvím diskontinuit. Jedná se o boční stěnu tubusu s velkým otvorem. Parametry stěny jsou následující:

- Délka $l_1 = 7,3\text{m}$
- Výška $h_1 = 3,5\text{m}$
- Výška parapetu a nadpraží $h_2 = 0,6\text{m}$

- Odsazení otvoru od kraje = 0,73m
- Délka otvoru $l_2 = 3,3\text{m}$
- Šířka tubusu $b_1 = 5,4\text{m} \rightarrow$ Zatěžovací šířka $b_2 = 2,7\text{m}$
- Vzdálenost podpory od kraje $x = 3,1\text{m}$
- Tloušťka stěny $t = 0,25$
- Beton C30/37



Obrázek 4.6: Geometrie posuzované stěny

Stěna je v místě napojení na vyloučenou část objektu je podepřena tuhými podpory. V místě podepření železobetonovým rámem je umístěná bodová podpora z roznášecí plochou o šířce rámu tj. 0,3 m.

4.2.1 Zatížení

Zatížení stěnového výseku je nutné přepočítat z plošného zatížení. Plošné hodnoty zatížení jsou použity z kapitoly 2.2.3.

Jsou vytvořeny tři zatěžovací stavy:

1. LC0 - vlastní tíha. IS Detail neuvažuje vlastní tíhu automaticky - je nutné jí zadat manuálně. Zatížení je vypočtené jako objemová hmotnost železobetonu krát tloušťka stěny

$$g_{0,k,lin} = \gamma_{beton} * t = 25kN/m^3 * 0,25m = 6,25kN/m^2 \quad (4.1)$$

2. LC1 - tíha přiléhajících konstrukcí. Jedná se o liniové zatížení na hranách stěny, které znázorňují polovinu tíhy stropní desky, podlahy a čelní stěny tubusu. Zatížení

je vypočtené jako objemová hmotnost železobetonu krát tloušťka konstrukcí krát zatěžovací šířka.

$$g_{1,k,lin} = \gamma_{beton} * t * 0,5 * b_2 = 25kN/m^3 * 0,25m * 2,7m = 16,88kN/m \quad (4.2)$$

3. LC2 - skladby vodorovných konstrukcí.

- Skladby podlah 1.NP a 2.NP

$$g_{1,k,lin} = g_{1,k} * b_2 = 2kN/m^2 * 2,7m = 5,4kN/m \quad (4.3)$$

- Skladba střechy

$$g_{2,k,lin} = g_{2,k} * b_2 = 1kN/m^2 * 2,7m = 2,7kN/m \quad (4.4)$$

4. LC3 - užité zatížení.

- Užité zatížení podlah 1.NP a 2.NP

$$q_{1,k,lin} = q_{1,k} * b_2 = 1,5kN/m^2 * 2,7m = 4,06kN/m \quad (4.5)$$

- Užité zatížení střech

$$q_{2,k,lin} = q_{2,k} * b_2 = 0,75kN/m^2 * 2,7m = 2,03kN/m \quad (4.6)$$

4.2.2 Kombinace

Posouzení konstrukce se provádí na účinky kombinací zatěžovacích stavů. Pro posouzení mezního stavu únosnosti v trvalých návrhových situacích se užívá kombinace dle normy ČSN EN 1990[11], výraz 6.10a:

$$1,35 * G_{k,j,sup} + \{1,5 * \psi_{0,1} * Q_{k,1}\} + \{1,5 * \psi_{0,i} * Q_{k,i}\} \quad (4.7)$$

Pro posouzení mezních stavů použitelnosti se aplikuje dle normy ČSN EN 1990 kombinace charakteristická (výraz 6.14b):

$$\{G_{k,j,sup}; G_{k,j,inf}\} + Q_{k,1} + \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad (4.8)$$

a kombinace kvazistálá (výraz 6.16b):

$$\{G_{k,j,sup}; G_{k,j,inf}\} + Q_{2,1} + \psi_{2,i} * Q_{k,i} \quad (4.9)$$

kde:

- $G_{k,j,sup}$ – horní charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení (95% kvantil)
- $G_{k,j,inf}$ – dolní charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení (5% kvantil)
- $Q_{k,1}$ – charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
- $Q_{k,i}$ – charakteristická hodnota i-tého proměnného zatížení
- ψ_0 – součinitel pro kombinační hodnotu proměnného zatížení
- ψ_2 – součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení

Tudíž pro výše uvedené zatěžovací stav jsou sestaveny kombinace:

$$\text{MSÚ: } C_1 = 1,35 * LC_1 + 1,35 * LC_2 + 1,5 * LC_3 \quad (4.10)$$

$$\text{Charakteristická: } C_2 = 1 * LC_1 + 1 * LC_2 + 1 * LC_3 \quad (4.11)$$

$$\text{Kvazistála: } C_3 = 1 * LC_1 + 1 * LC_2 + 0,3 * LC_3 \quad (4.12)$$

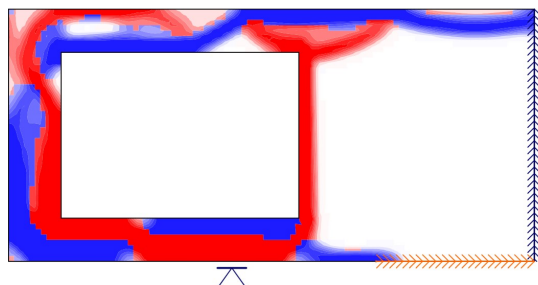
4.2.3 Nástroje pro návrh vyztužení

Před samotným nelineárním výpočtem je třeba provést předběžný návrh vyztužení. Tento návrh není komplexní, je nutný z důvodu doplnění potřebných informací do výpočetního modelu. V programu IS Detail jsou implementovány dva nástroje, které mohou pomoci s rozmístěním výztuže v konstrukci. Jedná se o klasický lineární výpočet a topologickou optimalizaci.

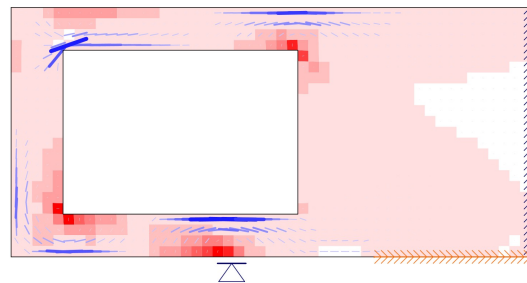
Klasický lineární výpočet neuvažuje výztuž a zanedbává rozdíly v pevnostech betonu pro tah a tlak. Tento nástroj je vhodný pro rychlé zobrazení tlačných a tažených zón (trajektorie hlavních napětí)(obr. 4.8).

Topologická optimalizace je optimalizační metoda jejíž cílem je upravit tvar prvku tak, aby byl materiál co nejvíce využit na základě zadaných okrajových podmínek. Jedná se o iterační metodu, která v každém kroku odstraňuje nejméně využitý materiál a znova přepočítává napětí v konstrukci. Iteruje se do té doby dokud není dosaženo určité procento původního objemu materiálu (20%, 40%, 60% a 80%). Konstrukce, která vznikne s pomocí topologické optimalizace, je složená z tlačných a tažených prvků jako tomu je v STM. Výsledné tažené zóny (modré) jsou vodítkem pro umístění výztuže v konstrukcích, kde není intuicí jasné rozmístění. Na základě topologické optimalizace není možné navrhnout

konkrétní plochy výztuže - slouží k identifikaci optimálního umístění výztužných vložek (obr. 4.7). Tloušťka a sytost barvy tažených zón může posloužit k identifikaci míst, kde je třeba více výztuže a kde méně.



Obrázek 4.7: Topologická optimalizace



Obrázek 4.8: Hlavní napětí z lineárního výpočtu

4.2.4 Návrh vyztužení

Na základě výsledků topologické optimalizace lze pozorovat, že hlavní tažené oblasti jsou na vnějším obvodu otvoru. Do těchto míst je tedy nutné umístit hlavní výztuž.

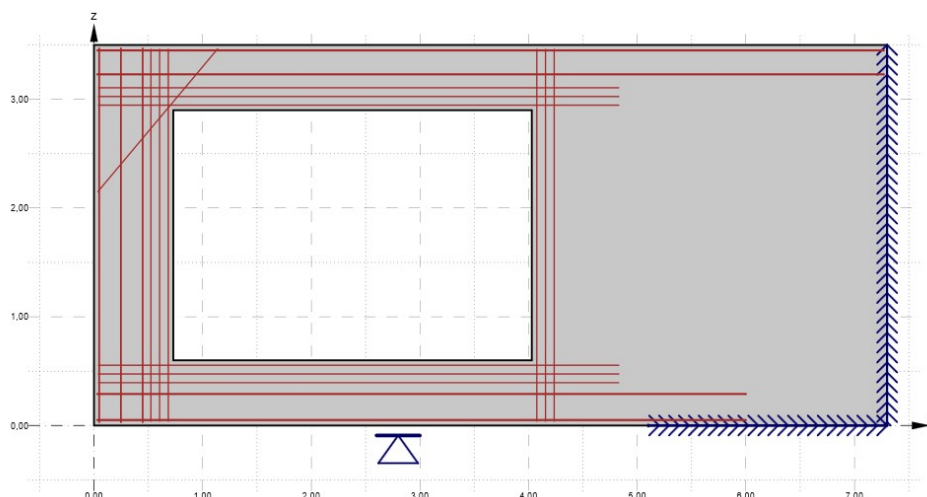
U dolní hrany stěny tažená zóna končí u začátku podpory, tudíž vložky není třeba dotahovat až ke konci stěny - je pouze nutné dodržet kotevní délku za koncem tažené zóny. U horní strany je nutné vložky dotáhnout až ke svislé podpoře a zakotvit je do pokračující konstrukce.

Na levé hraně stěny je tažená zóna u vnějšího okraje, která postupně přechází k rohu otvoru a dále k hornímu okraji. Je tedy nutné umístit nosnou výztuž k vnějšímu okraji a zajistit rozevíraný roh diagonální výztuží.

Nakonec je celá stěna doplněna základním rastrem vyztužení tak, aby byla splněna podmínka minimálního vyztužení prvku.

Výztuž je navržena následovně:

- Základní rastr vyztužení celé stěny: 10 á 200 v obou směrech u obou povrchů
- Dolní hrana: 2xØ20 á 220 mm u obou povrchů
- Horní hrana: 2xØ20 á 220 mm u obou povrchů
- Levá hrana: 3xØ16 á 200 mm u obou povrchů
- Lemovací výztuž kolem otvoru: 3xØ12 a 80 mm kolem všech hran



Obrázek 4.9: Hlavní a lemovací výztuž

4.3 Posudek

4.3.1 Mezní stav únosnosti

Napětí v betonu

Posudek napětí v betonu je proveden srovnáním maximálního tlakového napětí, které je získané z kombinace pro mezní stav únosnosti, s limitním napětím v betonu. Limitní napětí v betonu je:

$$\sigma_{c,lim} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (4.13)$$

$$\sigma_{c,lim} = \frac{30MPa}{1,5} = 20MPa \quad (4.14)$$

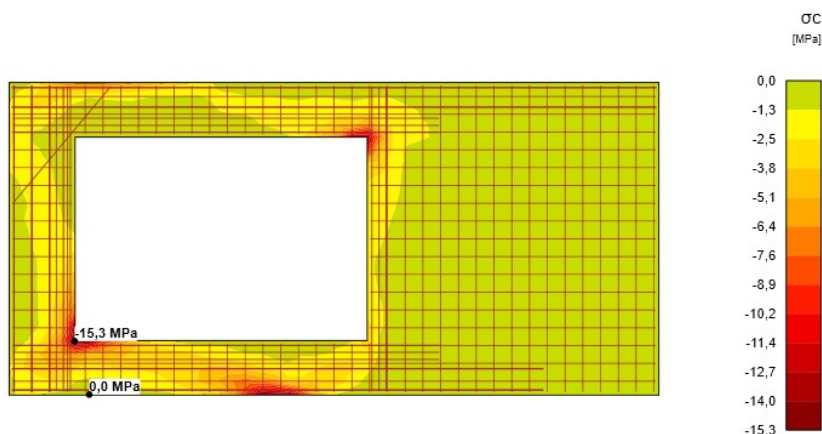
Na obrázku 4.10 je znázorněn průběh napětí v betonu pro kombinaci MSÚ s vyznačenou maximální hodnotou. V tabulce 4.1 je proveden posudek.

Kombinace	Napětí	Limitní napětí	Vyhovuje?
MSÚ	15,3 MPa mm	20 MPa	ANO

Tabulka 4.1: Posouzení napětí v betonu

Napětí ve výztuži

Posudek únosnosti výztuže se provádí v místech největších napětí ve výztuži tj. v místě trhlin, kde beton nespolutupůsobí s výztuží. Srovnává se maximální napětí ve výztuži s



Obrázek 4.10: Napětí v betonu - MSÚ

limitní hodnotou. Limitní hodnota napětí ve výztuži je:

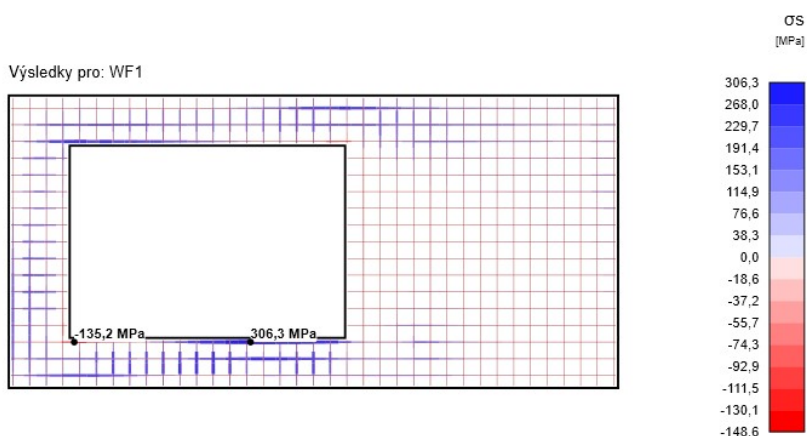
$$\sigma_{sr,lim} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S} \tag{4.15}$$

$$\sigma_{sr,lim} = \frac{500 MPa}{1,15} = 435 MPa \tag{4.16}$$

Na obrázku 4.11 je znázorněn průběh napětí ve výztuži pro kombinaci MSÚ s vyznačenou maximální hodnotou. V tabulce 4.2 je proveden posudek.

Kombinace	Napětí	Limitní napětí	Vyhovuje?
MSÚ	306,3 MPa mm	435 MPa	ANO

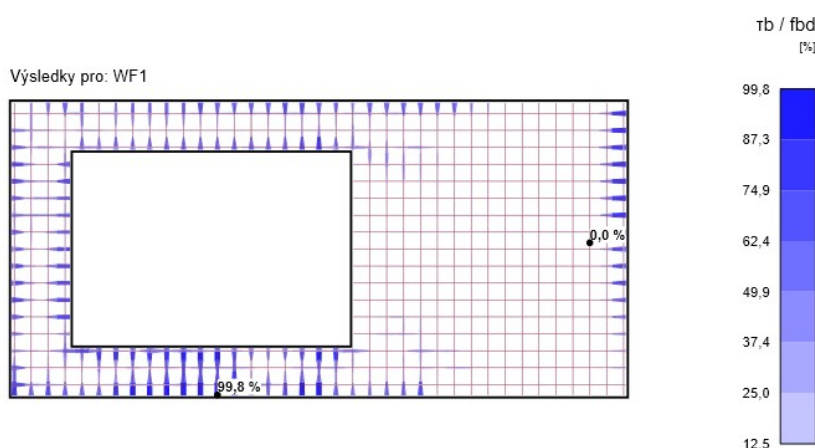
Tabulka 4.2: Posouzení napětí ve výztuži



Obrázek 4.11: Napětí ve výztuži - MSÚ

Kotvení výztuže

Poslední posudek pro mezní stav únosnosti, který IS Detail provádí je posouzení kotvení výztuže. V posudku se porovnává napětí v soudržnosti mezi betonem τ_b a výztuží s limitním napětím v soudržnosti f_{bd} . Na obrázku 4.12 je znázorněn průběh poměru $\frac{\tau_b}{f_{bd}}$. Kolem otvoru vznikají zavádějící hodnoty, jelikož model výztuže není shodný s předpokládaným skutečným provedením. Výpočet uvažuje ukončené svislé pruty, ve skutečnosti by v těchto místech byly použity dvoustřížné třmínky, tudíž je posudek kotvení v tomto místě irelevantní. To samé platí pro levou i horní hranu otvoru. V ostatních bodech konstrukce je výztuž řádně zakotvena.



Obrázek 4.12: Posudek kotvení výztuže - MSÚ

4.3.2 Mezní stav použitelnosti

U železobetonových konstrukcí se z hlediska mezního stavu použitelnosti posuzuje omezení napětí v betonu a ve výztuži, šířka trhlin a deformace.

Omezení napětí

Dle normy ČSN EN 1992-1-1 [12] kapitola 7.2 má být u betonového prvku omezeno maximální tlakové napětí. Napětí se omezuje, aby se zabránilo možnému vzniku podélných trhlin nebo velkému dotvarování. Napětí, které se srovnává s limitní hodnotou, je získané z charakteristické kombinace. Limitní hodnota:

$$\sigma_{lim,1} = f_{ck} * k_1 \quad (4.17)$$

$$\sigma_{lim,1} < 30MPa * 0,6 = 18MPa \quad (4.18)$$

Pokud se napětí v kvazistálé kombinace dále omezí limitní hodnotou $\sigma_{lim,2}$, lze uvažovat lineární průběh dotvarování:

$$\sigma_{lim,2} = f_{ck} * k_2 \quad (4.19)$$

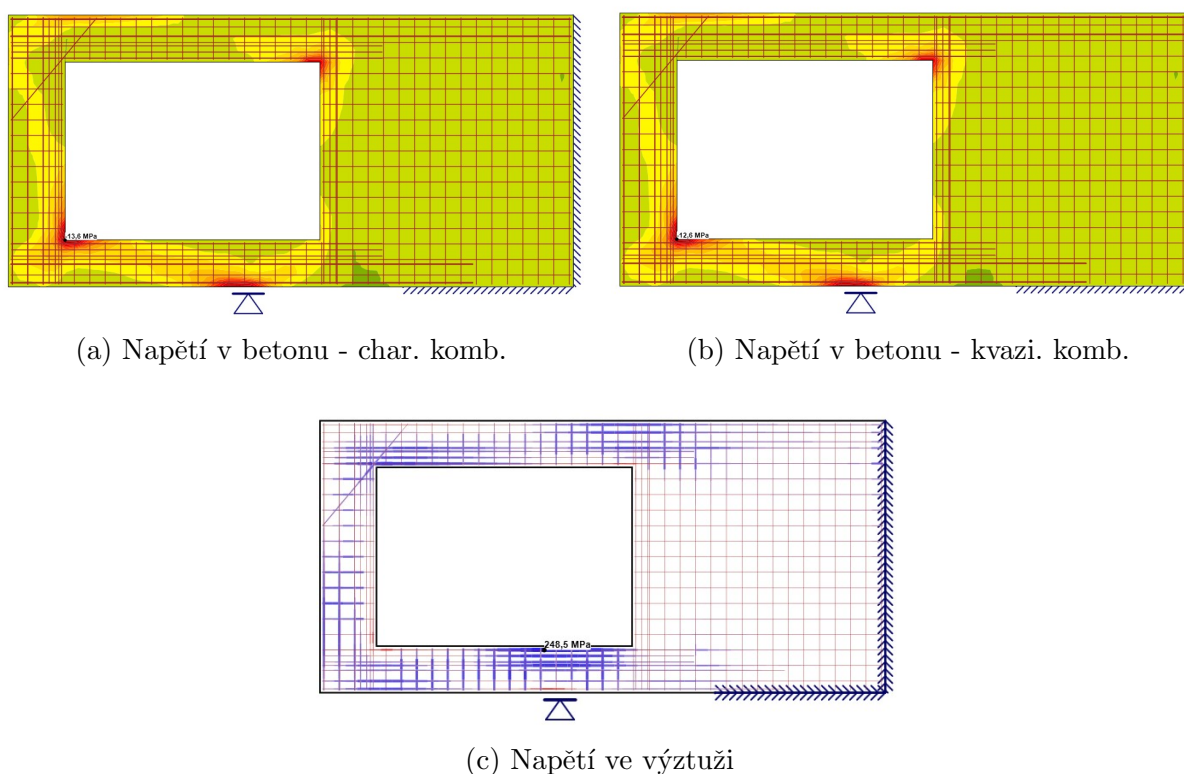
$$\sigma_{lim,2} < 30MPa * 0,45 = 13,5MPa \quad (4.20)$$

Omezení napětí se vztahuje i na výztuž, kde norma říká, že maximální napětí musí být omezené limitní hodnotou $\sigma_{lim,3}$. Pokud je limitní hodnota překročena, hrozí rozvoj trvalých širokých trhlin a nadměrné plastické přetvoření výztuže.

$$\sigma_{lim,3} = f_{yk} * k_3 \quad (4.21)$$

$$\sigma_{lim,3} < 500MPa * 0,8 = 400MPa \quad (4.22)$$

Použité hodnoty koeficientů k_1 , k_2 a k_3 jsou doporučené hodnoty z národní přílohy k normě.



Obrázek 4.13: Průběhy napětí

Extrém napětí se nachází v levém spodním rohu. Na obrázcích 4.13a a 4.13b jsou zobrazeny průběhy napětí v betonu a je vyznačená extrémní hodnota napětí. Na obrázku

4.13c je zobrazeno napětí ve výztuži. Extrémní napětí je v prutech na podporou. V tabulce 4.3 je provedeno posouzení.

Kombinace	Napětí	Limitní napětí	Vyhovuje?
Beton - Charakteristická	13,6 MPa	18 MPa	ANO
Beton - Kvazistálá	12,6 MPa	13,5 MPa	ANO
Výztuž - Charakteristická	248,5 MPa	400 MPa	ANO

Tabulka 4.3: Posouzení napětí

Omezení šířky trhlin

Omezení šířky trhlin je ošetřeno kapitolou 7.3 v normě ČSN EN 1992-1-1. Maximální šířka se omezuje, aby byla zajištěna trvanlivost konstrukce a byl zachován bezpečný vzhled konstrukce. V případě existence příliš širokých trhlin mohou k výztuži skrz trhliny vniknout agresivní látky. Maximální šířka trhliny je stanovena zjednodušenou metodou podle stupně vlivu prostředí. Řešená stěna je obvodová tudíž třída okolního prostředí je stanovena jako XC4 - povrchy betonu, které jsou ve styku s vodou. Šířka maximální trhliny je tedy:

$$\text{Třída prostředí XC4} \rightarrow w_{max} = 0,3mm \quad (4.23)$$

Z výpočtu v IS Detail byla stanovena největší šířka trhliny pro charakteristickou kombinaci $w = 0,160mm$. Na obrázku 4.14 lze vidět průběh trhlin po konstrukci. V tabulce 4.4 je posouzení šířky trhlin.

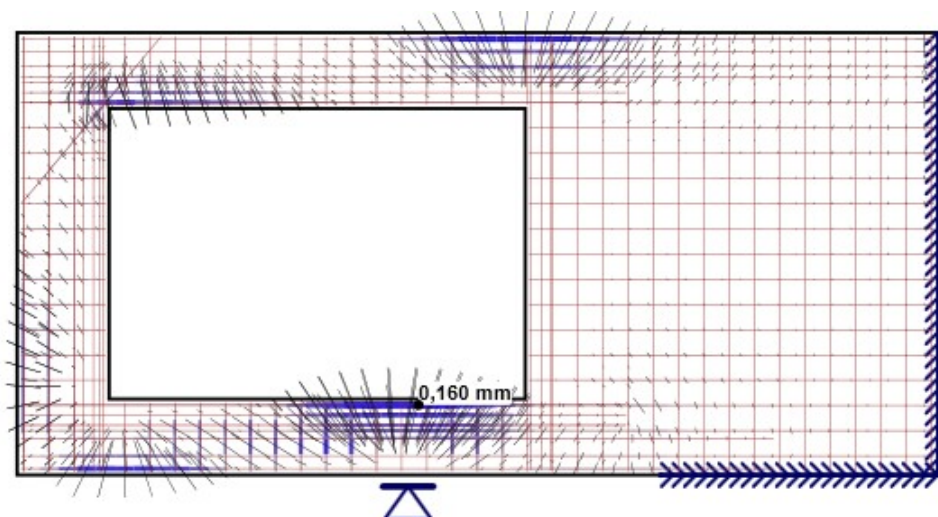
Kombinace	Šířka trhliny	Limitní trhlina	Vyhovuje?
Charakteristická	0,160 mm	0,3 mm	ANO

Tabulka 4.4: Posouzení šířky trhlin

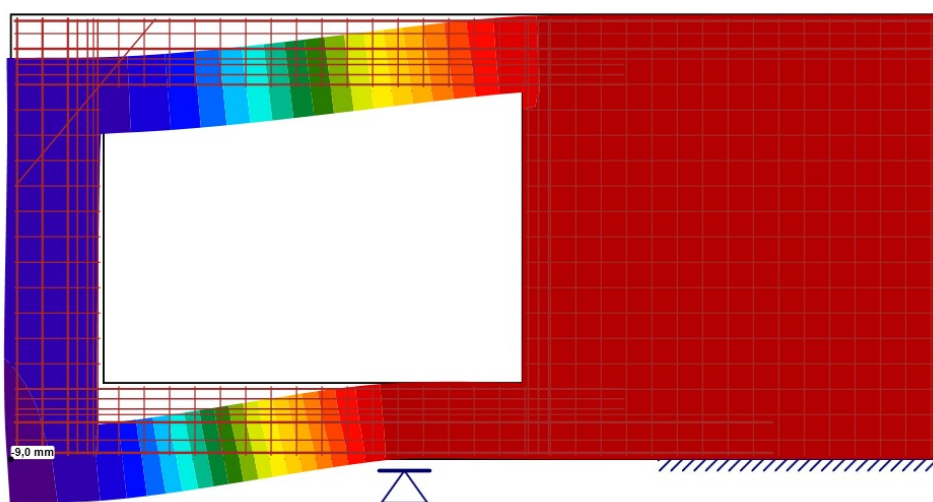
Maximální přetvoření

Hodnota maximální svislé deformace (přetvoření) ze omezuje, aby u uživatelů nevznikal pocit nebezpečí, zachovala se trvanlivost konstrukce a nebyla ovlivněna její funkčnost. Maximální hodnota průhybu je dle normy ČSN EN 1992-1-1 stanovena jako $w_{lim} = \frac{1}{250} * l$ od kvazistálé kombinace, kde l je vzdálenost inflekčních bodů průhybové čáry. Jelikož je posuzován průhyb na konci podpory je nutné uvažovat dvojnásobnou hodnotu l .

$$w_{lim} = \frac{1}{250} * l w_{lim} = \frac{1}{250} * 2 * 3100mm = 24,8mm \quad (4.24)$$



Obrázek 4.14: Průběh trhliny



Obrázek 4.15: Svislá deformace

Na obrázku 4.15 je znázorněna deformovaná konstrukce s vyznačenou maximální hodnotou deformace. V tabulce 4.5 je proveden posudek.

Kombinace	Přetvoření	Limitní přetvoření	Vyhovuje?
Kvazistálá	24,8 mm	9,0 mm	ANO

Tabulka 4.5: Posouzení maximální přetvoření

4.3.3 Shrnutí

Z výše uvedených posudků lze konstatovat, že řešení získané z optimalizace je dimenzovatelné a tudíž statická kritéria jsou nastavená správně. Toto variantní řešení lze tedy použít jako výchozí bod pro další projekční činnosti.

Kapitola 5

Závěr

Tato práce se věnuje využití vícekritériální optimalizace na konkrétním objektu, jenž je volně inspirován budovou Golf House of Seinfeld Arquitectos, a sestavení skupiny kritérií, která ohodnocují funkční i statická hlediska budovy.

Po úvodním představení práce je v druhé kapitole představena problematika parametrických modelů, a následně je tento model vytvořen pro výše zmíněnou budovu. V kapitole je popsáno, jaké softwary jsou použity pro sestavení parametrického modelu a jsou vyjmenovány kroky, které vedly k vytvoření závěrečné geometrie. Z dat získaných z vytvořeného modelu je sestaveno 10 hodnotících kritérií - osm funkčních a dvě statická. Tato kritéria slouží jako vstupní informace do vícekritériální optimalizace v další kapitole.

V úvodní části třetí kapitoly je popsán teoretický základ genetických algoritmů, jenž jsou používány při vícekritériální optimalizaci. Tyto algoritmy jsou použity v optimalizačním softwaru WallaceiX k vygenerování 11 200 variantních řešení, které jsou ohodnoceny kritérii definovanými v druhé kapitole. S pomocí analytických nástrojů, jenž jsou implementovány ve WallaceiX, je vybráno 25 řešení k bližšímu manuálnímu srovnání. Srovnání je provedeno v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Na základě metriky "průměrná změna oproti nejlepšímu řešení" je vybráno jedno konkrétní řešení, jenž je ověřeno z hlediska mezních stavů únosnosti a použitelnosti v následující kapitole.

Kapitola čtvrtá se zabývá ověřením řešení z kapitoly třetí. Ověření z hlediska mezních stavů je provedeno v programu IDEA StatiCa využitím inovativní metody Compatible Stress Field Method (CSFM). Předpoklady výpočtu a teoretické základy CSFM jsou taktéž představeny v této kapitole. Na závěr je ověřen nejnamáhanější stěnový výsek z vybraného řešení. Výsek je ověřen z hlediska mezního stavu únosnosti a z hlediska mezního stavu použitelnosti.

Z výše představených kapitol vyplývá, že je možné sestavit množinu hodnotících kritérií tak, aby generování řešení s pomocí vícekritériální optimalizace poskytovalo výsledky, jež bude, s ohledem na veškeré dnes platné normy, možné využít pro další fáze projekční

činnosti. Hlavním přínosem metody vícekriteriální optimalizace je množství variant, jež lze s pomocí této metody automaticky prozkoumat a ohodnotit. V této práci je použito deset hodnotících kritérií, avšak v jiných případech může být nutné pro postižení všech vlastností budovy i několikanásobně větší množství kritérií. I deset kritérií však dokáže omezit množství řešení a zajistit tak smysluplný výstup. Výsledky práce prokazují, že kvalita vybraného řešení velmi záleží na použitém analytickém nástroji. Konzistentně nejlepší výsledky poskytuje metoda Average Fitness Rank (AFR), která preferuje řešení s nejnižším průměrným umístěním kritéria (viz kapitola 3.2.3), na což ostatně poukazuje již bakalářská práce autora [13]. Toto zjištění platí i v této práci, konkrétně řešení získaná metodou AFR jsou dle metriky "průměrná změna oproti nejlepšímu řešení" průměrně o 35% lepší než řešení vybraná metodou Relative Difference Between Ranks (RDBR) a o 198% lepší než řešení vybraná shlukovacím algoritmem.

Při ověření mezních stavů metodou Compatible Stress Field Method (CSFM) je demonstrována jednoduchost návrhu výztuže v oblasti diskontinuity s pomocí topologické optimalizace. S využitím nelineárního výpočtu, který zohledňuje i skutečné rozmístění výztužných vložek, se provedlo ověření mezního stavu únosnosti a použitelnosti. Nejkritičtější posudkem se jeví omezení napětí v betonu v mezním stavu použitelnosti, který vyhovuje na 93,3%.

Mezi problémy objevené při zpracování teoretických částí práce patří nedostatek literatury na tato témata. Jelikož se jedná o poměrně novou problematiku, je tento problém pochopitelný a v následujících letech bude méně a méně častý.

Vícekriteriální optimalizace je v kombinaci s parametrickým modelováním silný nástroj, bariéru pro jeho širší použití však může představovat velmi strmá křivka učení. Před samotným použitím nástroje se totiž uživatel musí:

- Naučit grafické programování v Grasshopperu,
- vytvořit algoritmus parametrického modelu,
- osvojit si analytické moduly (Karamba3D, Ladybug a WallaceiX),
- osvojit teoretické základy problematiky optimalizace,
- mít know-how pro výběr výsledků.

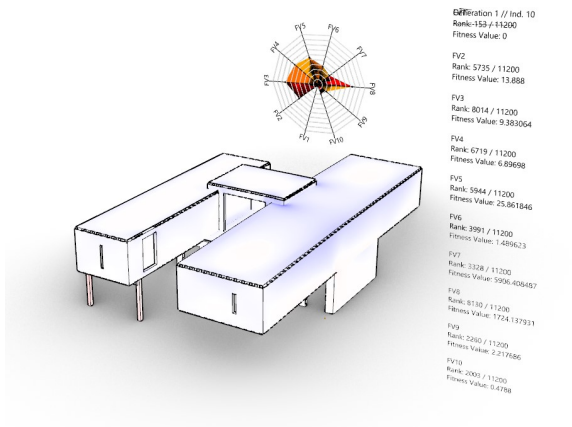
Dokud tyto nástroje nebudou v jednom uživatelsky přívětivém programu, nedočká se tato silná a zajímavá metoda velké popularity.

Samotné téma vícekriteriální optimalizace však v budoucnu může výrazně změnit přístup k projektování budov a pokud se povede jej zpopularizovat, dokáže nejen snížit celkové ekonomické náklady na výstavbu a provoz objektu v průběhu jeho životnosti, ale

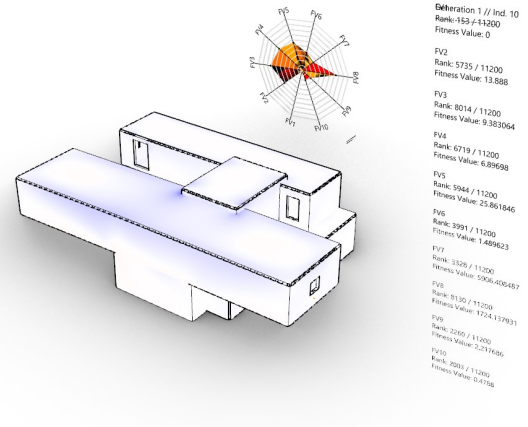
především může pomoci projekčním kancelářím přijít na nekonvenční a přitom ekonomicky výhodná řešení návrhů staveb.

Příloha A

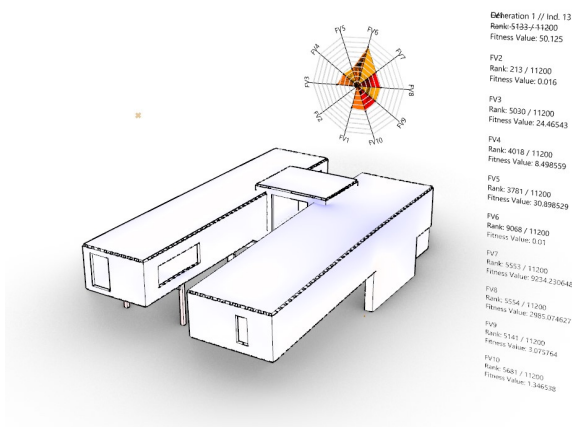
25 srovnávaných řešení



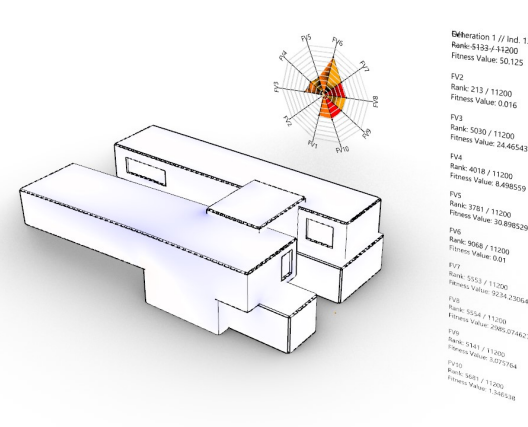
(a) Řešení 1



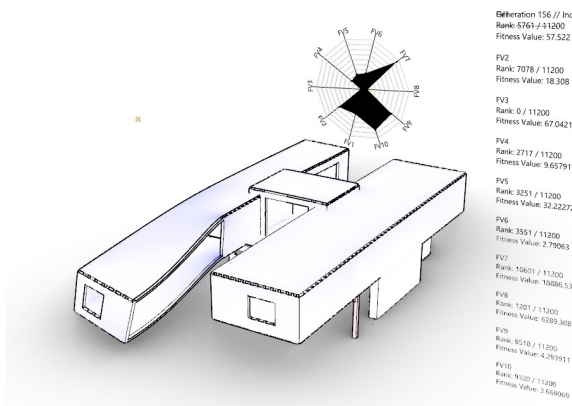
(b) Řešení 1



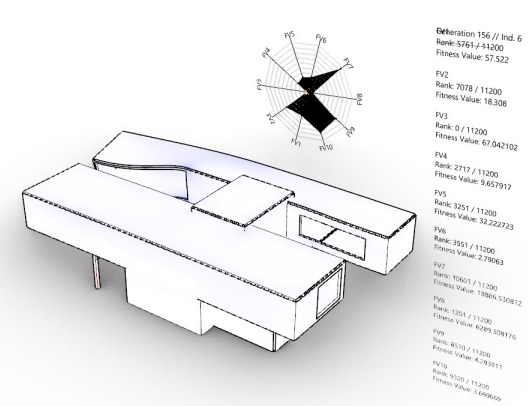
(c) Řešení 2



(d) Řešení 2

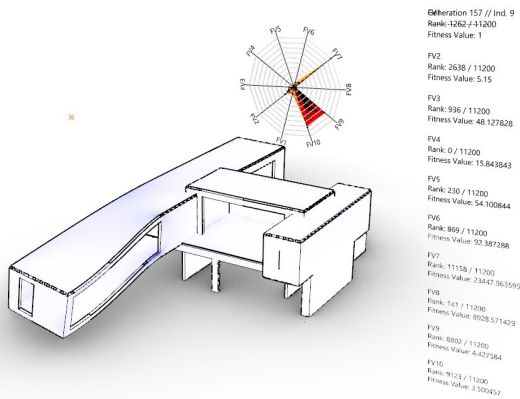


(e) Řešení 3

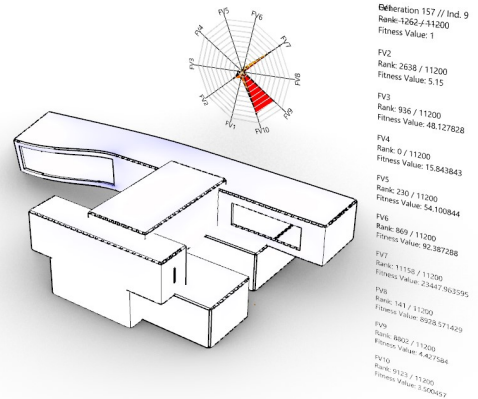


(f) Řešení 3

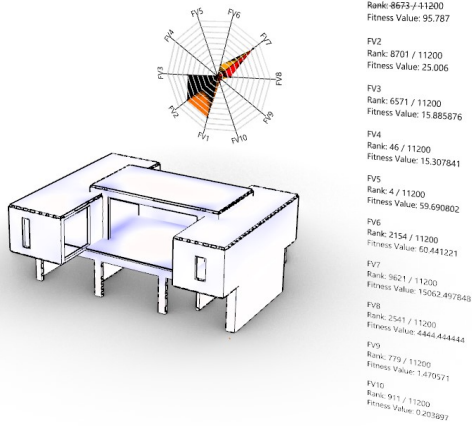
Obrázek A.1: Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií FV1 - 3



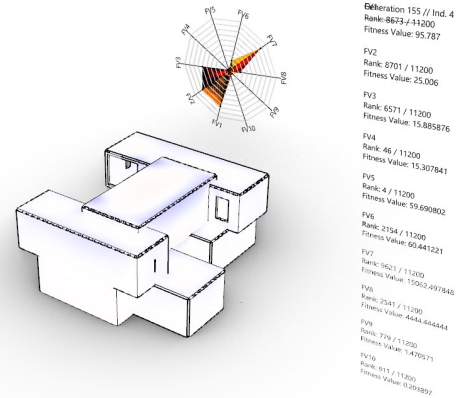
(a) Řešení 4



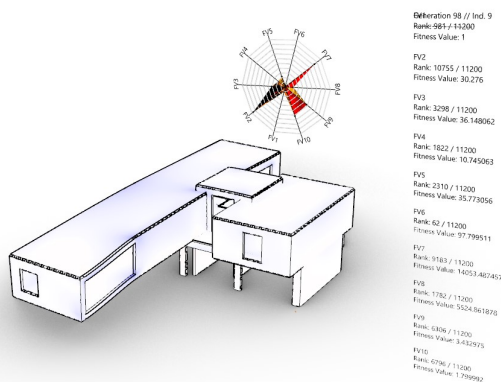
(b) Řešení 4



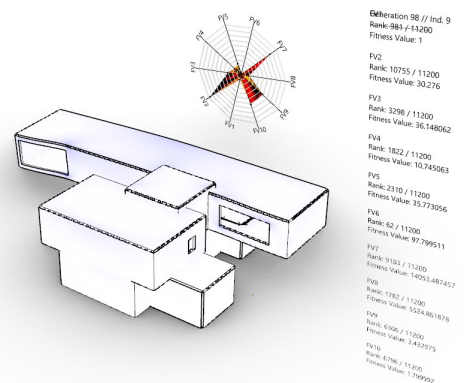
(c) Řešení 5



(d) Řešení 5

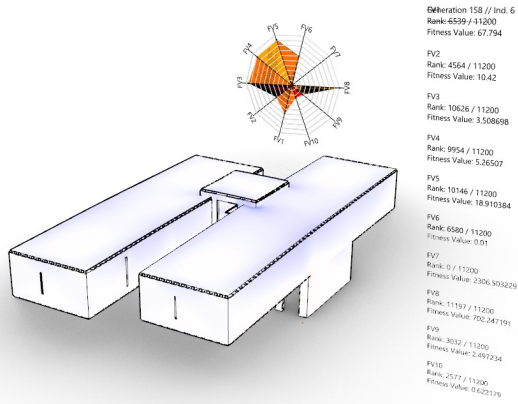


(e) Řešení 6

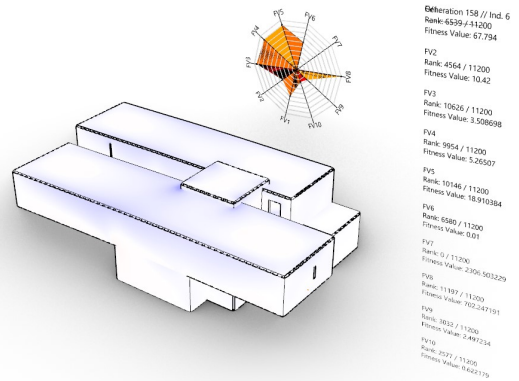


(f) Řešení 6

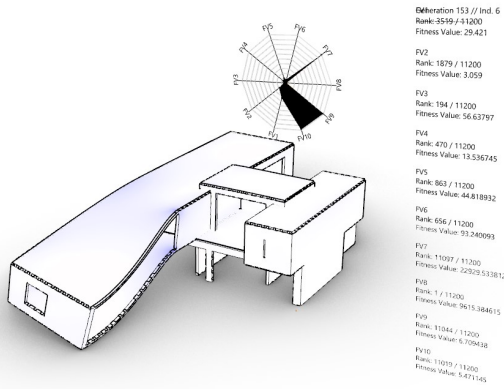
Obrázek A.2: Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií FV4 - 6



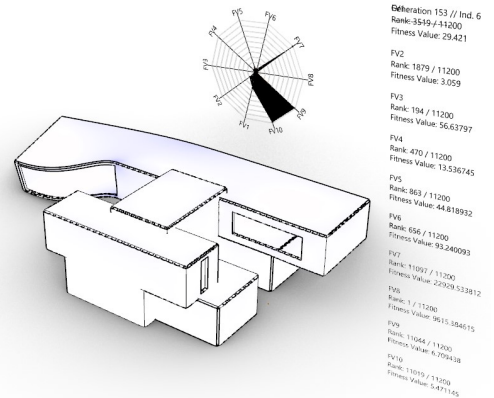
(a) Řešení 7



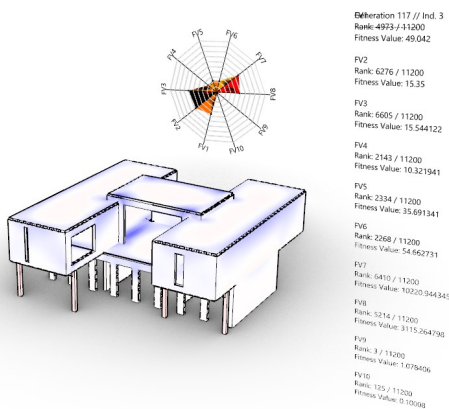
(b) Řešení 7



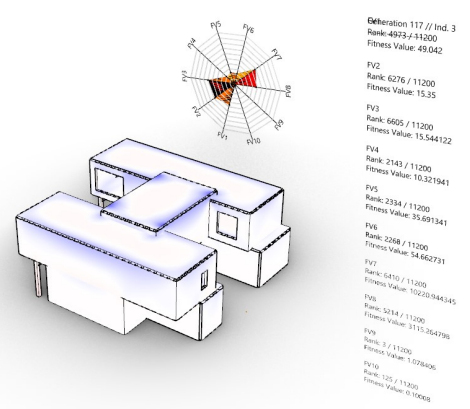
(c) Řešení 8



(d) Řešení 8

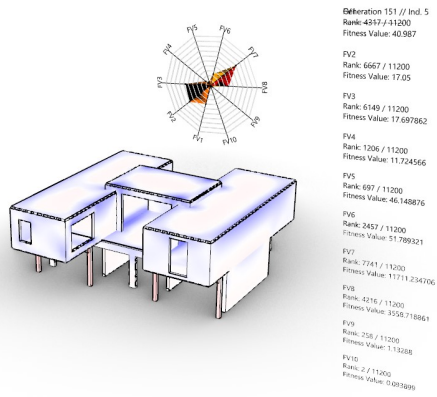


(e) Řešení 9

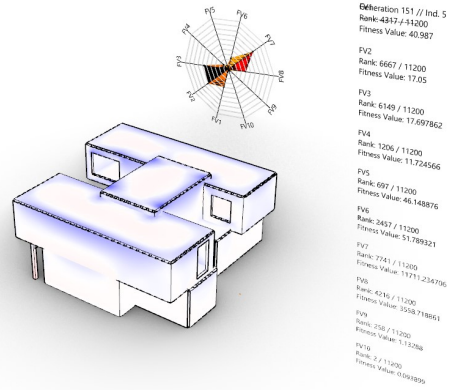


(f) Řešení 9

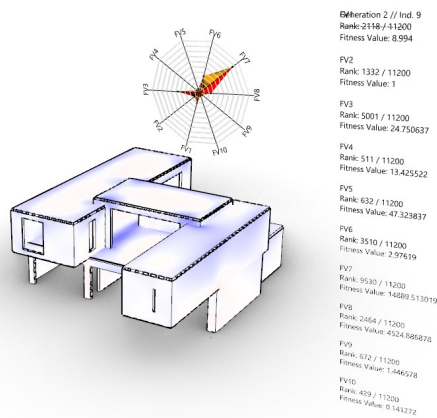
Obrázek A.3: Nejlepší řešení podle jednotlivých kritérií FV7 - 9



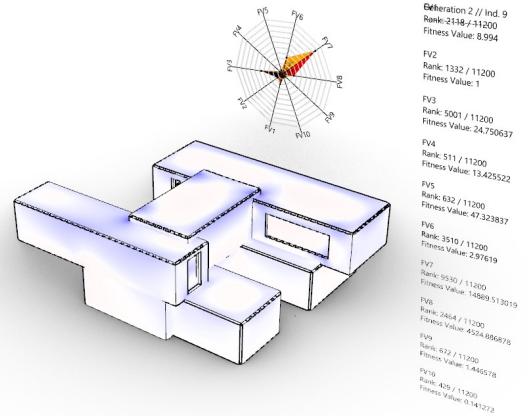
(a) Řešení 10



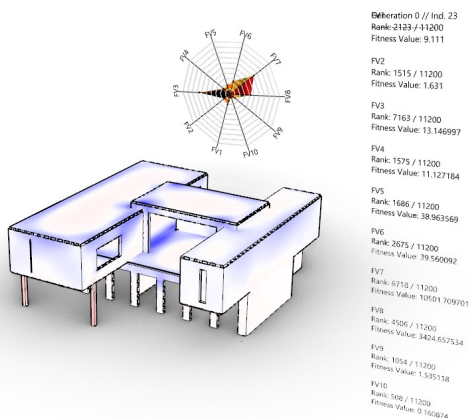
(b) Řešení 10



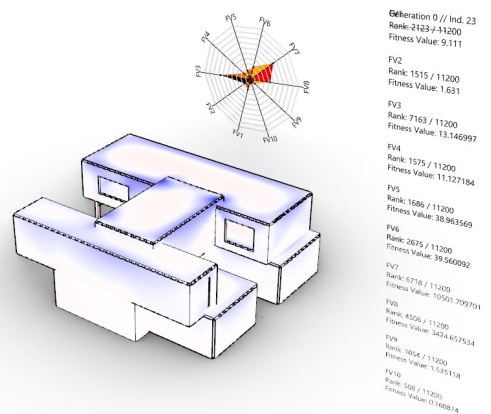
(c) Řešení 11



(d) Řešení 11

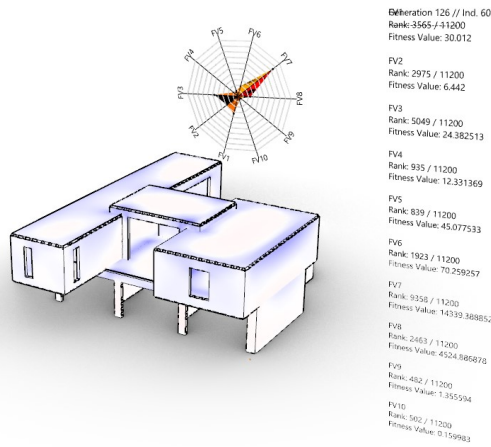


(e) Řešení 12

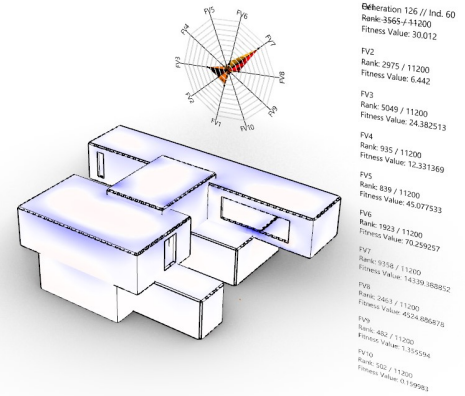


(f) Řešení 12

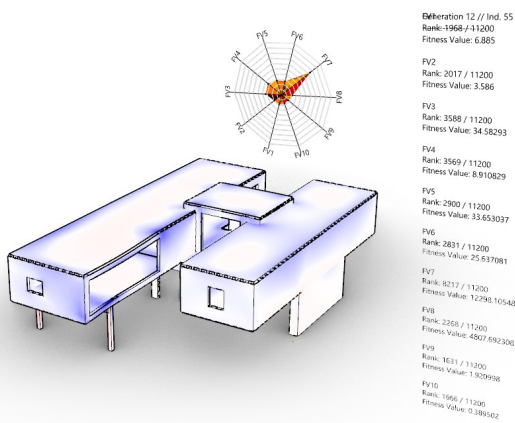
Obrázek A.4: Nejlepší řešení podle kritéria FV10 a řešení AFR 0 a 50



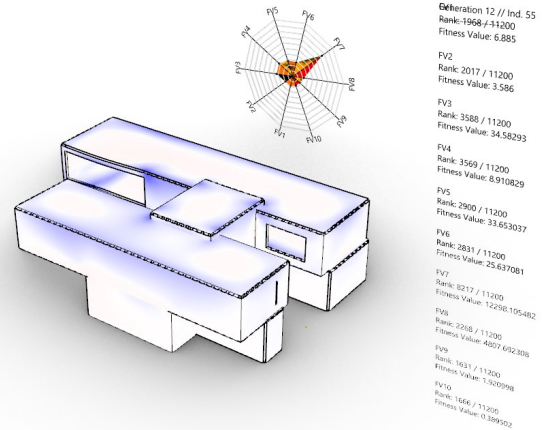
(a) Řešení 13



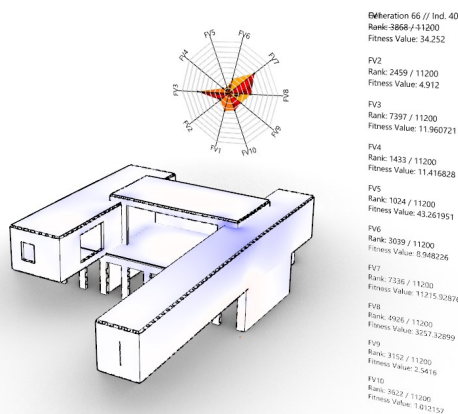
(b) Řešení 13



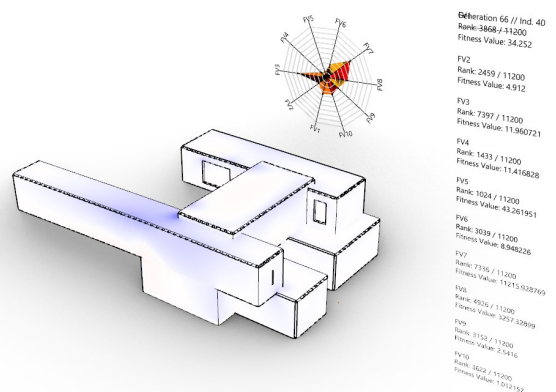
(c) Řešení 14



(d) Řešení 14

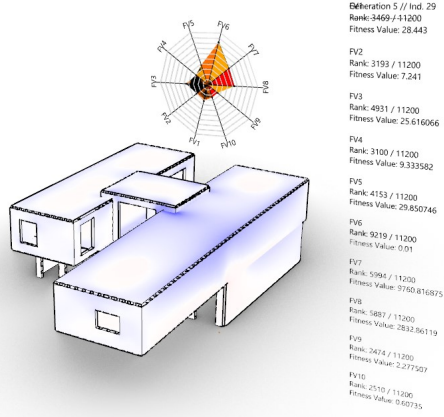


(e) Řešení 15

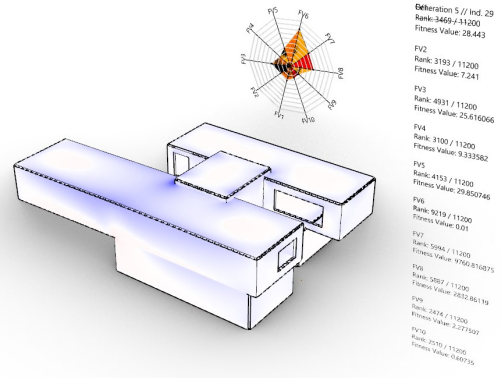


(f) Řešení 15

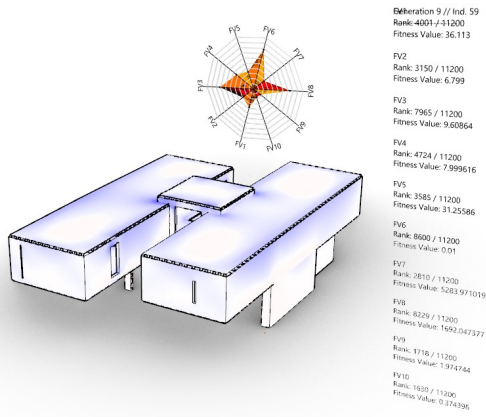
Obrázek A.5: Řešení AFR 100, 150 a RDBR 0



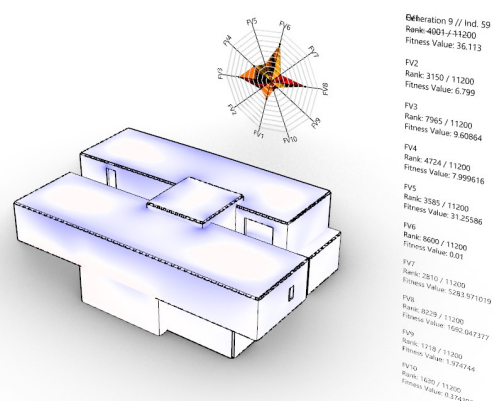
(a) Řešení 16



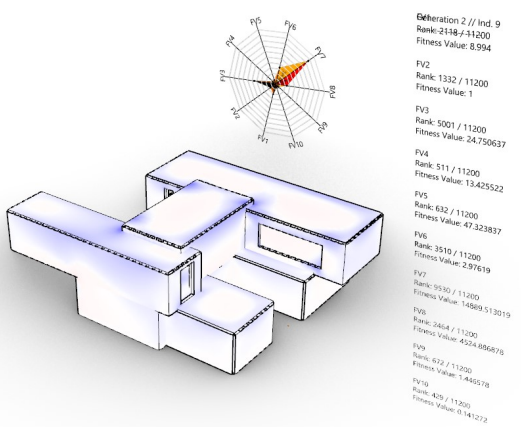
(b) Řešení 16



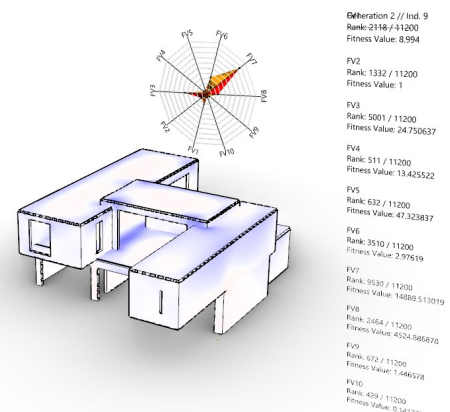
(c) Řešení 17



(d) Řešení 17

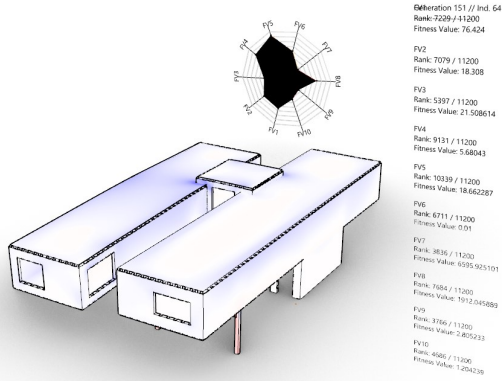


(e) Řešení 18

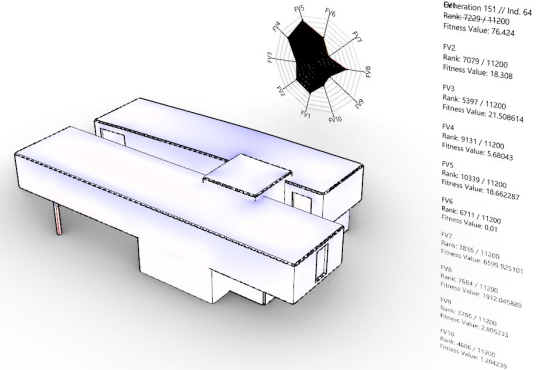


(f) Řešení 18

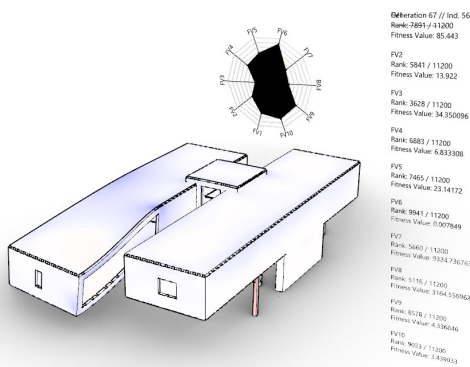
Obrázek A.6: Řešení RDBR 50, 100 a 150



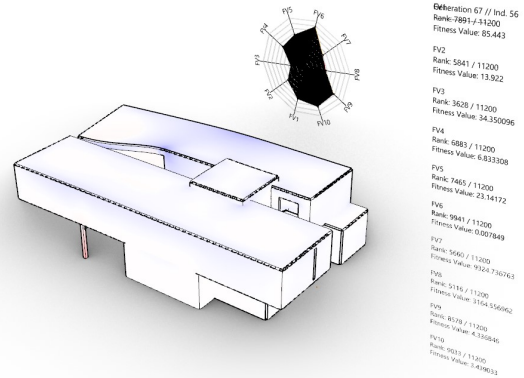
(a) Řešení 19



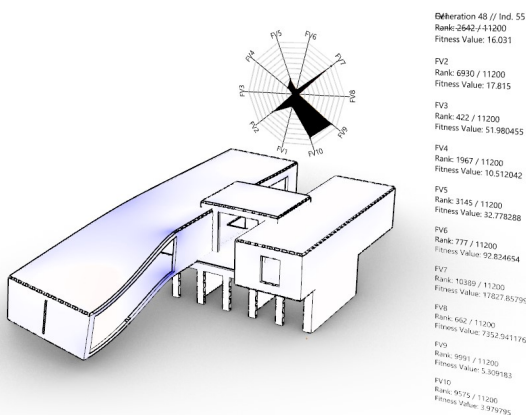
(b) Řešení 19



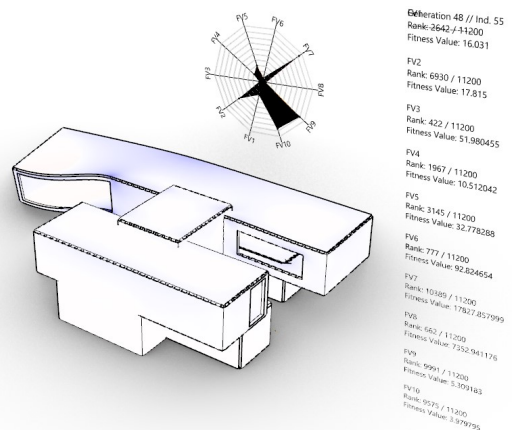
(c) Řešení 20



(d) Řešení 20

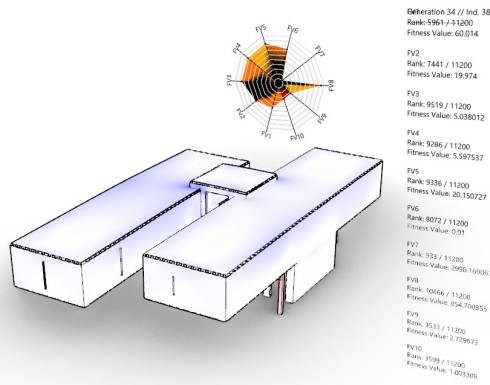


(e) Řešení 21

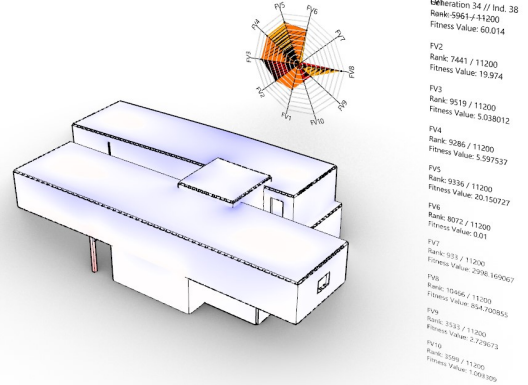


(f) Řešení 21

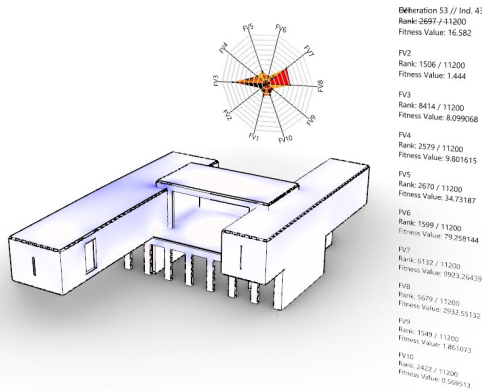
Obrázek A.7: Řešení ze shlukovacího algoritmu 1, 2 a 3



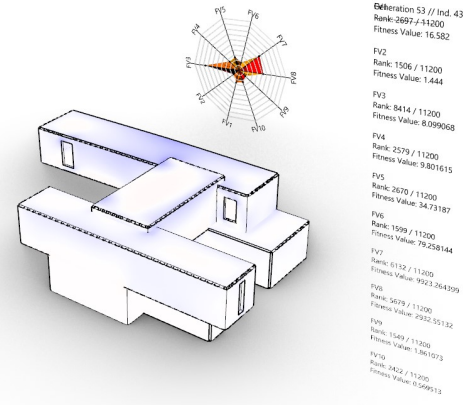
(a) Řešení 22



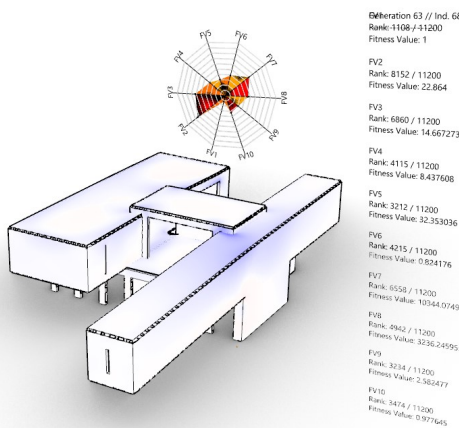
(b) Řešení 22



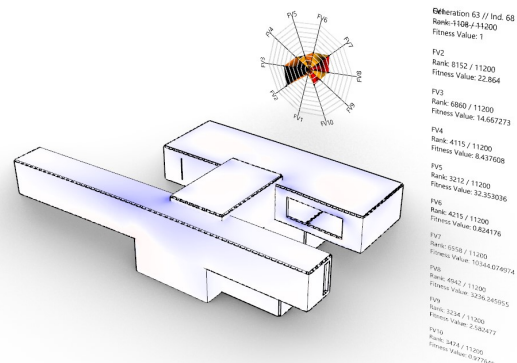
(c) Řešení 23



(d) Řešení 23

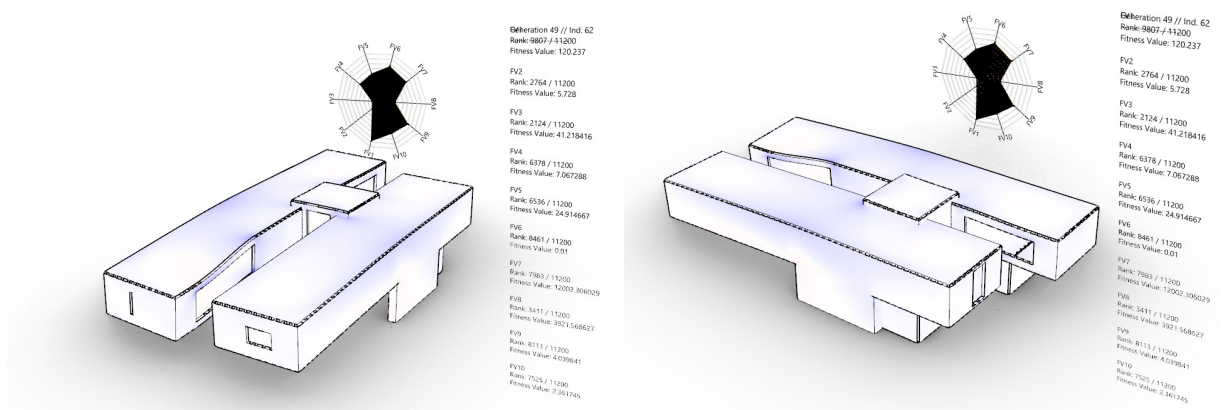


(e) Řešení 24



(f) Řešení 24

Obrázek A.8: Řešení ze shlukovacího algoritmu 4, 5 a 6



(a) Řešení 25

(b) Řešení 25

Obrázek A.9: Řešení ze shlukovacího algoritmu 7

Bibliografie

- [1] D. Čápková a D. Měšťánová, *Příprava a řízení staveb*. Praha: České vysoké učení technické, 2008, ISBN: 978-80-01-04166-6.
- [2] „Golf House / Seinfeld Arquitectos“, *Archdaily*, ún. 2013. URL: <https://www.archdaily.com/326315/golf-house-seinfeld-arquitectos> (cit. 03.10.2021).
- [3] „ČSN EN 1991-1-1 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb“, Třídící znak: 730035, Technická norma, 2004, s. 44.
- [4] M. Makki, M. Showkatbakhsh a Y. Song, *Wallacei X Primer 2.0*, lis. 2019. URL: <https://www.wallacei.com> (cit. 25.11.2021).
- [5] X. Chu a X. Yu, *Improved Crowding Distance for NSGA-II*, 2018. arXiv: 1811.12667 [cs.NE].
- [6] A. Owatsiriwong a D Eng, „Strut-and-Tie-Modeling in Reinforced Concrete Structures“, *ALPS Consultants, Bangkok*, 2013.
- [7] K. Semrád a C. Szücs, *Řešené příklady betonových konstrukcí pomocí příhradové analogie*. Projekt FRVŠ 2311/2009/G1, 2009. URL: https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/frvs2009/Prihradova_analogie_a_resene_priklady.pdf.
- [8] M. V. G. Silveira a R. Alves de Souza, „Analysis and design of reinforced concrete deep beams using the stress fields method“, *Acta Scientiarum. Technology*, roč. 39, s. 587–594, pros. 2017. DOI: 10.4025/actascitechnol.v39i5.28409.
- [9] A. Muttoni, M. Fernández-Ruiz a F. Niketić, „Design versus Assessment of Concrete Structures Using Stress Fields and Strut-and-Tie Models“, *ACI Structural Journal*, roč. 112, zář. 2015. DOI: 10.14359/51687710.
- [10] W. Kaufmann, J. Mata-Falcón, M. Weber, T. Galkovski, T Duc Thong, J Kabelac et al., „Compatible stress field design of structural concrete“, *ETH Zurich*, 2020.
- [11] „ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí“, Třídící znak: 730002, Technická norma, 2004, s. 76.
- [12] „ČSN EN 1992-1-1 - Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby“, Třídící znak: 731201, Technická norma, 2019, s. 208.
- [13] E. Bogdanovič, „Využití genetických algoritmů v rané fázi návrhu“, květ. 2020, s. 45. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/89219>.