

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební  
Katedra betonových a zděných konstrukcí



## **Optimalizace předsažené konstrukce s využitím parametrického modelování**

Diplomová práce

*Bc. Jan Chmelík*

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

Praha, leden 2023

**Vedoucí diplomové práce:**

Ing. Martin Petřík, Ph.D.  
Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Fakulta stavební  
České vysoké učení technické v Praze  
Thákurova 7  
160 00 Praha 6  
Česká republika

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chmelík

Jméno: Jan

Osobní číslo: 510746

Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí - K133

Studijní program: N3607 - Stavební inženýrství

Studijní obor/specializace: 3608T008 - Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Optimalizace předsazené konstrukce s využitím parametrického modelování

Název diplomové práce anglicky: Optimization of overhanging structure using parametric modeling

Pokyny pro vypracování:

- zpracování parametrického modelu
- alternativní návrh předsazené konstrukce
- vytvoření stínících prvků
- vyhodnocení a srovnání jednotlivých řešení
- ověření dimenzovatelnosti

Seznam doporučené literatury:

- YU, Zhenya; DAI, Hang; SHI, Ziyang. Structural form-finding of bending components in buildings by using parametric tools and principal stress lines. *Frontiers of Architectural Research*, 2022, 11.3: 561-573.
- TAM, Kam-Ming Mark; MUELLER, Caitlin T. Stress line generation for structurally performative architectural design.
- LEONE, Mattia Federico; NOCERINO, Giovanni. Advanced modelling and digital manufacturing: Parametric design tools for the optimization of UHPFR (ultra high-performance Fiber reinforced concrete) shading panels. *Automation in Construction*, 2021, 126: 103650.
- Karamba3D 2.2.0 manual

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Petřík, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 29.9.2022

Termín odevzdání DP v IS KOS: 9. 1. 2023

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“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Optimalizace předsazené konstrukce s využitím parametrického modelování" 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 Praze, leden 2023

.....  
Bc. Jan Chmelík

# Abstrakt

Tato práce se zabývá optimalizací předsazené železobetonové konstrukce. Navrhuje esteticky zajímavou alternativu ke stěnovým nosníkům. Inspiraci k vytvoření geometrie hledá v trajektoriích hlavních napětí, kterým se společně s dalšími možnostmi optimalizace konstrukcí, optimalizačními algoritmy a parametrickým modelováním věnuje teoretická část. K tvorbě konstrukce je využito výhod parametrického modelování. Samotná topologická optimalizace probíhá za pomoci evolučního algoritmu. Jednotlivá řešení jsou porovnávána a u nejlepšího řešení jsou ověřeny dimenze navrženého průřezu. Součástí práce je také parametrická úprava stínících prvků a jejich vzájemné porovnání z hlediska několika funkčních kritérií. Tato práce ukazuje výhody parametrického modelování pro snadné propojení statických a architektonických aspektů návrhu.

**Klíčová slova:** předsazená konstrukce, parametrické modelování, optimalizace, genetický algoritmus, NSGA-II, trajektorie hlavních napětí,

# Abstract

This thesis deals with the optimization of overhanging reinforced concrete construction. It proposes an aesthetically interesting alternative to deep beams. It looks for inspiration to create the geometry in the principal stress trajectories, which, together with other possibilities for optimizing structures, optimization algorithms and parametric modeling, are described in the theoretical part. The advantages of parametric modeling are used to create the structure. The topological optimization itself takes place with the help of an evolutionary algorithm. Individual solutions are compared and the dimensions of the designed cross-section are verified for the best solution. The work also includes parametric adjustment of shading elements and their mutual comparison in terms of several functional criteria. This work shows the advantages of parametric modeling to easily link the static and architectural aspects of the design.

**Keywords:** overhanging structure, parametric modeling, optimization, genetic algorithm, NSGA-II, principal stress trajectories

# Poděkování

Rád bych poděkoval za vedení této diplomové práce Ing. Martinu Petříkovi, Ph.D. Také bych chtěl poděkovat ostatním vedoucím betonového semináře, jmenovitě tedy prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng., Ing. Michaelu Frantové, Ph.D. a Mgr. Yulii Khmurovské, Ph.D. Také bych rád poděkoval autorům publikací, ze kterých tato práce čerpá. V neposlední řadě také děkuji autorům všech použitých programů a jejich pluginů.

# Seznam obrázků

2.1	Příklad zavěšeného modelu, pomocí kterých hledal Antoni Gaudí geometrii tlačných konstrukcí. [3]	4
2.2	Soap bubble experiment[4]	5
3.1	Tři druhy optimalizace: a) dimenzování; b) tvar; c) topologie [11]	7
3.2	Katarské národní kongresové centrum [14]	8
3.3	Topologicky optimalizovaná 3D úloha s vykreslenými trajektoriemi hlavních napětí	9
3.4	Porovnání tří variant topologické optimalizace konzoly, zatížené bodovou silou působící na jejím konci [19]	11
3.5	Žebrové konstrukce navržené Pierem Luigim Nervim [20]	12
3.6	Vytištěný model skořepiny dle trajektorií hlavních napětí [21]	13
3.7	Vytištěný železobetonový nosník kopírující trajektorie hlavních ohybových momentů [23]	14
3.8	Tramvajová zastávka využívající 3D tisku betonu k vytvoření žebor dle trajektorií hlavních ohybových momentů [24]	15
3.9	Část dodatečně předepnutého nosníku vytištěného z písku.[25]	16
3.10	Topologicky optimalizovaná, prefabrikovaná stropní deska vyrobená s využitím 3D tištěného bednění. [28]	16
4.1	Schéma evolučního algoritmu	20
4.2	Schéma NSGA-II	22
4.3	Ukázka rozdělení do front a určení davové vzdálenosti	23
5.1	Golf House [40]	29
6.1	Trajektorie hlavních napětí ve stěnovém nosníku	30
6.2	Zobrazení hlavních napětí pomocí vektorů, které na rozdíl od trajektorií dává informaci i o velikosti. Je tedy zřejmé, jakou intenzitou jsou jednotlivá místa namáhána.	31
6.3	Ukázka lepších vlastností prostě podepřeného nosníku při využití trajektorií hlavních napětí.[19]	32
6.4	Vazník tvořený vybranými trajektoriemi hlavních napětí	33
6.5	Tvorba vazníku	35
6.6	Komponenta pro tvorbu Bézierovi křivky	36
6.7	Grafy popisující vlastnosti evoluce	38
6.8	Shluková analýza pareto-optimálních řešení	39
6.9	Vyobrazení genů pareto-optimálních řešení	39

6.10	Vybrané řešení z menší skupiny podobných fenotypů v rámci pareto-optimálních řešení . . . . .	40
6.11	Řešení vybrané jako celkově nejlepší . . . . .	41
6.12	Interakční diagram a schéma vyztužení většího průřezu . . . . .	42
6.13	Interakční diagram a schéma vyztužení menšího průřezu . . . . .	43
6.14	Severozápadní pohled na výslednou konstrukci . . . . .	44
6.15	Severní pohled na výslednou konstrukci . . . . .	44
7.1	Lamely na Casa Cariló[41] . . . . .	45
7.2	Lamely na Casa BLQ[41] . . . . .	46
7.3	Originální stínící prvky na Casa Golf [41] . . . . .	46
7.4	Ukázka porovnání vybraných variant lamel architektonickou kanceláří Mustafa Teksoy Architecture & Design [46] . . . . .	47
7.5	Rozdílná poloha slunce v závislosti na denní době a ročním období . . . . .	49
7.6	Vliv ročního období na potřebu stínění . . . . .	50
7.7	Stínění nízkého slunce horizontálním prvkem . . . . .	50
7.8	Schéma vytvoření lamel . . . . .	52
7.9	Nejlepší řešení pro letní stínění . . . . .	54
7.10	Nejlepší řešení pro zimní solární zisky . . . . .	55
7.11	Řešení poskytující nejlepší výhled do okolí . . . . .	55
7.12	Řešení poskytující největší soukromí . . . . .	57
7.13	Zima/léto při ořezání horizontálními úsečkami . . . . .	57
7.14	Zima/léto při ořezání vertikálními úsečkami . . . . .	58
7.15	Zima/léto při rozdílném rozmístění lamel . . . . .	58
7.16	Výhled/Soukromí při ořezání horiz. úsečkami s linií výhledu . . . . .	59
7.17	Výhled/Soukromí při ořezání horiz. úsečkami s pásem výhledu . . . . .	59
7.18	Výhled/Soukromí při rozdílném rozmístění lamel . . . . .	59
7.19	Výhled/Léto při ořezání horiz. úsečkami s pásem výhledu . . . . .	60
7.20	Výhled/Léto při ořezání vert. úsečkami s pásem výhledu . . . . .	60
7.21	Výhled/Léto při rozdílném rozmístění lamel . . . . .	61
7.22	Zima/Sousedí při ořezání rovinou tvořenou vertikálními úsečkami . . . . .	61
7.23	PCP graf . . . . .	62
7.24	Grafy směrodatných odchylek a průměrných fitness hodnot . . . . .	63
7.25	Nejlepší řešení podle prvního a druhého zvažení kritérií . . . . .	66
7.26	Nejlepší řešení podle třetího a čtvrtého zvažení kritérií . . . . .	67
7.27	Navržené stínící prvky v kontextu celé budovy . . . . .	68
7.28	Schéma dynamického odlévání betonových prvků (SDC) [56] . . . . .	69



# Obsah

Abstrakt	iv
Poděkování	v
Seznam obrázků	vi
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Parametrické modelování</b>	<b>3</b>
2.1 Historie	4
2.2 Software	5
2.2.1 Rhinoceros 3D – Grasshopper	6
<b>3 Optimalizace konstrukce</b>	<b>7</b>
3.1 Topologie	7
3.1.1 SIMP	9
3.1.2 ESO	9
3.1.3 Vlastní algoritmus	10
3.1.4 Omezení topologické optimalizace	10
3.2 Hlavní napětí	10
3.2.1 Historický kontext	10
3.2.2 SLAM	13
3.2.3 ETH Curych	14
<b>4 Optimalizační algoritmy</b>	<b>17</b>
4.1 Evoluční algoritmus (EA)	19
4.1.1 NSGA-II	22
4.2 Wallacei	24
4.2.1 Nastavení evoluce – parametry genetického algoritmu	24
4.2.2 Wallacei analytics	26
4.2.3 Wallacei selection	26
<b>5 Casa Golf</b>	<b>28</b>
5.1 Luciano Kruk Arquitectos	28
<b>6 Vazník</b>	<b>30</b>
6.0.1 Výběr trajektorií hlavních napětí	31
6.1 Tvorba modelu	33
6.1.1 Tvorba trajektorií	33

6.1.2	Optimalizace průřezu . . . . .	35
6.2	Evoluce . . . . .	36
6.2.1	Nastavení evoluce . . . . .	36
6.2.2	Vlastnosti evoluce . . . . .	37
6.2.3	Analýza výsledků . . . . .	37
6.3	Ověření dimenzovatelnosti . . . . .	41
6.3.1	Zatížení . . . . .	41
6.3.2	Posudek . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Stínění lamelami</b>	<b>45</b>
7.1	Proč právě lamely . . . . .	45
7.2	Klimatické podmínky . . . . .	47
7.3	Solární zisky . . . . .	48
7.3.1	Sluneční dráha . . . . .	48
7.3.2	Stínění . . . . .	49
7.4	Tvorba lamel . . . . .	50
7.5	Kritéria . . . . .	51
7.5.1	Létno – stínění . . . . .	53
7.5.2	Zima – solární zisky . . . . .	53
7.5.3	Výhledy . . . . .	54
7.5.4	Soukromí . . . . .	56
7.6	Kombinace kritérií . . . . .	56
7.6.1	Zima/Léto . . . . .	57
7.6.2	Výhled/Soukromí . . . . .	58
7.6.3	Výhled/Léto . . . . .	60
7.6.4	Zima/Sousedí . . . . .	61
7.7	Parametry evoluce . . . . .	62
7.8	Vlastnosti evoluce . . . . .	62
7.9	Výběr nejlepších řešení . . . . .	63
7.9.1	Vybraná nejlepší řešení . . . . .	64
7.10	Vzhled na vile . . . . .	65
7.11	Digitální prefabrikace . . . . .	65
7.12	Aplikovatelnost scriptu . . . . .	69
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>70</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>75</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Digitalizace je současný trend, který stále více ovlivňuje všechna světová odvětví. Ve snaze zefektivnit procesy, ušetřit čas, energii, přírodní zdroje a finance, postupně prostupuje i stavitelstvím. Poskytuje zcela nové možnosti návrhu, posouzení i realizace stavebních konstrukcí. V současnosti stále sílí tlak na udržitelnost a nic nezasvědčuje tomu, že by tomu mělo být v budoucnu jinak. I přes velkou ekologickou stopu betonových konstrukcí se však pro jejich současné dominantní postavení nedá příliš předpokládat úplný odklon od tohoto materiálu. Pojmy jako form finding, či optimalizace topologie tak budou nabývat na stále větším významu. Automatizace a robotizace přináší do výstavby nové možnosti, což se také pomalu propisuje ve výsledných realizacích. Topologie betonových konstrukcí začíná postupně měnit zažitě stereotypy. Hranaté ortogonální konstrukce jednoduché na výrobu, budou stále častěji nahrazovány lehčími, tvarově optimalizovanými konstrukcemi plynulých tvarů.

Předsazené konstrukce jsou architektonicky velmi zajímavé, z podstaty však nebývá jejich statické působení zcela ideální. Jelikož rozložení jejich podepření v prostoru není rovnoměrné, je důraz na konstrukční efektivitu větší než u běžných konstrukcí, čímž roste tlak na úsporu hmotnosti. Paralelu k předsazeným konstrukcím lze vidět například v leteckém průmyslu, ve kterém je také díky potřebě snižovat hmotnost optimalizace v mnohem pokročilejší fázi v porovnání se stavitelstvím. Z výše popsaných důvodů je v rámci této práce optimalizována právě předsazená konstrukce. Aby však nešlo o pouhou teoretickou úlohu. Klade si za cíl alternativní, architektonicky zajímavý návrh konkrétní konstrukce argentinské vily Casa Golf, která je typická jak svým významným předsazením, tak celým tvarem vybízejícím k parametrickému návrhu. U navrženého řešení je ověřena dimenzovatelnost, čímž je snaha prokázat správnost zvoleného návrhového postupu.

Za předpokladu, že objem materiálu potřebný k přenesení daného zatížení bude minimální ve chvíli, kdy budou všechny prvky maximálně využívány v tlaku nebo tahu, je snaha o vytvoření tvaru dle trajektorií hlavních napětí logickým způsobem optimalizace. Vytvoření konstrukce respektující trajektorie hlavních napětí je s využitím parametrického modelování mnohem snazší, než by tomu bylo v případě konvenčních metod navrhování. Konstrukční analýza, nezbytná k takovému návrhu, je v případě přímého propojení s parametrickým modelem bez nutnosti migrace mezi různými softwary nástroj šetřící nejen velké množství času. Poskytuje také možnost využití optimalizačních algoritmů vycházejících z výsledků statické analýzy. Tato práce využívá evolučního algoritmu, který je schopný řešit velmi složité inženýrské úlohy a svými výsledky se blížit ideálním řešením.

Strukturální analýza, tvorba modelu a schopnost provádění jakýchkoliv změn v reálném čase jsou výhody parametrického modelování, které v porovnání s běžnými CAD softwary velmi šetří čas. Právě úpravy modelu a jejich odezva v reálném čase umožňuje vytvořit velké množství variant, ze kterých se dají vybrat varianty lepší, než které je schopen projektant navrhnout běžným způsobem. Krom statických kritérií je možné při parametrickém modelování propojovat nesčetné množství dalších návrhových hledisek. Uživatel ovládající parametrický model se tak může jednoduše stát spojujícím článkem několika profesí spolupracujících na návrhu projektu. Toho je využito v části tvorby stínících prvků, ve které se kombinují 4 kritéria, jejichž vzájemné propojení bez vhodného softwaru by bylo velmi obtížné.

# Kapitola 2

## Parametrické modelování

Běžně je ve stavitelství používáno přímé modelování. Model je nakreslen a je neměnný. Jak již plyne z názvu, parametrické modelování pracuje s parametry, které popisují daný model. Tyto parametry jsou proměnné, jejichž změnou dochází ke změnám v celém modelu. Takto je možné model tvořit a upravovat bez nutnosti dalšího kreslení, které by bylo v přímém modelování nezbytné. Parametrické může být v modelu téměř vše. U budov se typicky jedná o tvar, rozměry, materiály, použití vybraných prvků a jejich rozmístění.[1]

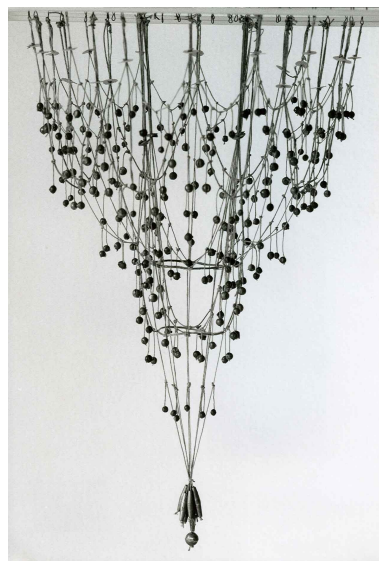
V oborech jako strojírenství nebo architektura je parametrické modelování již mnohem rozšířenější. Dá se tedy předpokládat, že tento trend bude pokračovat i ve stavitelství. Jeho výhodou je schopnost rychle a efektivně měnit geometrii navrhovaného objektu změnou jednotlivých parametrů modelu. Tato technika umožňuje rychle reagovat na změny požadavků zákazníků nebo na změny v projektu, aniž by bylo nutné ručně měnit geometrii objektu. Jedním z benefitů v rané fázi návrhu je možnost snadno vytvářet a zkoušet různé návrhové varianty tak, aby odpovídaly konkrétním potřebám nebo preferencím. To urychluje nalezení optimálního řešení, čímž se snižuje čas strávený návrhem. Parametrický model konstrukce umožňuje modifikace návrhu s automatickým přepočítáváním výsledků statické analýzy. To vede k možnosti uplatnění optimalizačních algoritmů, které dokážou nalézat téměř ideální řešení i velmi složitých úloh.

I když se parametrické modelování postupně stává více používaným nástrojem ve stavitelství, stále není zcela naplněn jeho potenciál. Důvodem může být skutečnost, že pro použití parametrického modelování je třeba mít určitý objem znalostí a dovedností, který může být pro mnoho inženýrů příliš velkou počáteční bariérou. Faktem také je, že některé projekty nevyžadují takovou flexibilitu v navrhování. Například projekty s velmi jednoduchou geometrií nebo projekty, kde jsou požadavky na ge-

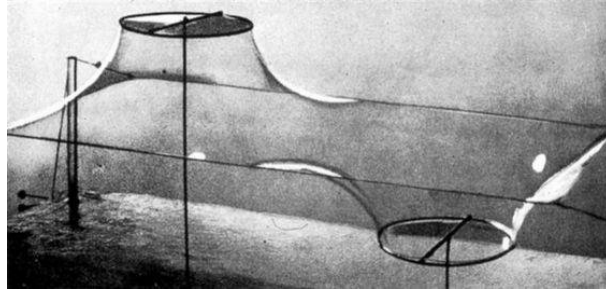
ometrii předem pevně stanoveny, mohou být navrženy bez nutnosti použití parametrického modelu. Celkově tak stále převládají tradiční způsoby navrhování. Rozvíjející se digitální výroba ve stavitelství, která zahrnuje použití technologií jako 3D tisk, robotické zpracování a automatizované stroje, má však potenciál přispět ke změně tohoto paradigmatu.

## 2.1 Historie

Spojení parametrů s geometrií se objevuje již počátkem 19. století. Španělský architekt Antoni Gaudí byl první, kdo začal používat koncem 19. století parametrických modelů pro architektonický návrh. Vycházel z faktu, že čistě tažená konstrukce bude při jejím převrácení konstrukcí čistě tlačenu. Požíval modely tvořené zavěšenými provázky a závažíčky. Parametry tohoto modelu, které mohl Gaudí měnit byly délka provázku, místo jeho zavěšení a umístění jednotlivých závažíček. Díky tomu byl schopný vytvořit geometrii, která odpovídala jak statickým možnostem, tak jeho estetickým požadavkům. Parametrické architektuře se velmi věnoval italský architekt Luigi Waltera Morettiho. Na své vlastní výstavě s názvem Parametrická architektura, která se konala roku 1960 v Milánu, představil návrh stadionu N, který byl řízen 19 parametry. Německý architekt Frei Paul Otto se zabýval převážně taženými konstrukcemi. Pro hledání tvaru jeho skořepin používal také analogové modely, podobně jako Gaudí. Roku 1961 v jeho Soap bubble experimentu ukazoval dokonale tažené tvary, která vytvářel za pomoci drátků a mýdlových bublin. [2]



Obrázek 2.1: Příklad zavěšeného modelu, pomocí kterých hledal Antoni Gaudí geometrii tlačných konstrukcí. [3]



Obrázek 2.2: Soap bubble experiment[4]

## 2.2 Software

Americký vědec Ivan Sutherland představil roku 1963 program zvaný Sketchpad, jež je předchůdcem všech současných CAD programů. Program umožňoval kreslit přesné technické výkresy, a z nichž potom vytvářet odvozené výkresy. Jakákoliv změna se automaticky propisovala. Zadání například délky nebo svíraného úhlu bylo možné provést za pomoci klávesnice. Jednalo se o první grafické uživatelské rozhraní, které umožňovalo člověku interagovat přímo s počítačem. Pomocí světelného pera uživatel kreslil geometrii přímo na monitor. Grafické uživatelské prostředí i objektově orientované programování jsou odvozeny právě z projektu Sketchpad.

Roku 1982 vznikla první verze programu AutoCAD. Pro parametrický návrh bylo možné využít ručního napsání scriptu. Takto postupoval například Mark Burry při kreslení parabol pro návrh chrámu Sagrada Família. První parametrické funkce byly implementovány až roku 2009. Profesor matematiky Samuel Geisberg vytvořil se svou společností Parametric Technology Corporation roku 1988 program s názvem Pro/ENGINEER. Motivací bylo získat možnost snadno porovnávat rozdílné inženýrské návrhy, které se dají měnit i s odstupem času. Jednalo se o první komerčně úspěšný parametrický software. Znaky parametrického modelování obsahují i první čistě architektonické softwary jako je Revit, nebo ArchiCAD. Při změně určitých prvků se mění i provázané okolní prvky. Tato změna se zároveň automaticky propíše do všech výkresů obsahujících tyto prvky. Toto parametrické propojení je však uživateli skryté v pozadí programu.

Robert Aish začal testovat v roce 2003 pod společností Bentley Systems první architektonický vizuální skriptovací jazyk s názvem Generative Components. Společnost Robert McNeel & Associates se ho neúspěšně pokusila licencovat a tak si nechala roku 2007 Davidem Ruttenem vytvořit do svého programu Rhinoceros 3D vlastní. Tento vizuální programovací jazyk zprvu nesl název Explicit History, dnes je však již přejmenován na Grasshopper. [2] Vizuální programovací doplněk pro Revit vytvořil roku 2011 Ian Keough, tehdy zaměstnaný v Buro Happold. Jeho cílem bylo

z pracovní workflow při návrhu budov odstranit proces konverze dat mezi Rhinem a Revitem. Snaha byla tedy vytvořit nástroj pro Revit, jakým je Grasshopper pro Dynamo. [5]

Ve vizuální programovací jazyku není program vytvořen napsáním kódu, ale složením grafických komponent. Tyto komponenty reprezentují bloky kódu a mají tak konkrétní funkce. Logickým propojením komponent vzniká program. Znalost běžného konvenčního programovacího jazyku tak není zapotřebí. [6]

### 2.2.1 Rhinoceros 3D – Grasshopper

Rhinoceros, zkráceně potom Rhino, je program pro přímé modelování, ve kterém je možné modelovat obdobně jako ve většině běžných 3D softwarů. Za pomoci rozšíření Grasshopper, vizuálního programovacího jazyku umožňuje parametrické modelování. Jednotlivé komponenty jsou postupně vkládány na plátno a jejich inputy a outputy jsou spojovány nody. Díky propojení Rhina a Grasshopperu je tak možné kombinovat přímé a parametrické modelování. V současné době je testován Grasshopper 2 $\alpha$ . Grasshopper obsahuje velké množství nativních komponent. Poskytuje však možnost vytvoření vlastních komponent pomocí programovacích jazyků Python, C# nebo Visual Basic (VB). Díky tomu existuje obrovské množství pluginů, obsahujících další komponenty. Tyto pluginy mají všemožné zaměření a specializace. V této práci jsou využity zejména pluginy pro tvorbu geometrie a její vizualizaci, fyzikální či environmentální simulace, analýzu konstrukce a optimalizaci. [7], [8]

### Karamba 3D

Pro tuto diplomovou práci je využit plugin Karamba 3D. Jedná se o plugin pro statickou analýzu konstrukce, využívající metodu konečných prvků (MKP). Tento plugin byl vyvinut Clementem Preisingerem ve spolupráci se společností Bollinger + Grohmann Engineers. Existují v mnohých ohledech propracovanější programy pro statickou analýzu, ale hlavní výhoda Karamby, kterou se odlišuje od ostatních, je napojení na parametrický model v reálném čase. Díky propojení je možné měnit posuzovanou geometrii pouhou změnou parametrů a uspořít tak velké množství času modelováním. Toho je využíváno zejména v rané fázi návrhu pro posouzení statické proveditelnosti. Také lze v Karambě velmi snadno vytvářet geometrie, které by se jen velmi těžko modelovaly v běžných MKP programech. Díky možnosti vyhodnocovat statické chování parametrického architektonického návrhu okamžitě je možné optimalizovat konstrukce právě například genetickými algoritmy. [9], [10]

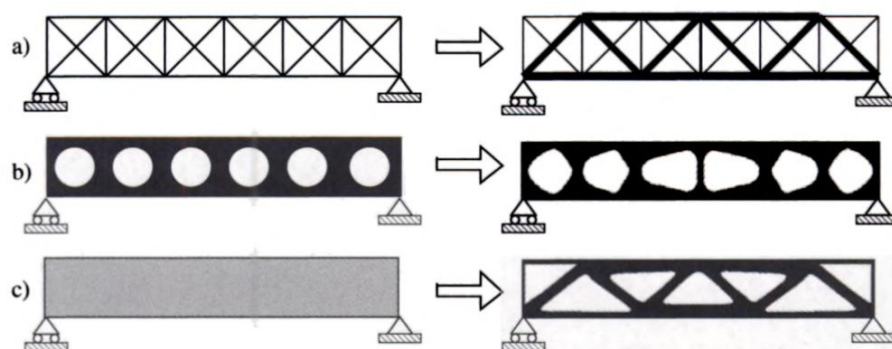


# Kapitola 3

## Optimalizace konstrukce

Konstrukci je možné optimalizovat z několika pohledů. Tato kapitola se bude věnovat statické optimalizaci. Snahou je tedy snížit spotřebu materiálu bez významného vlivu na celkovou únosnost, tedy využívat materiál v konstrukci efektivně.

Optimalizace nosné konstrukce (structural optimization) se dá rozdělit na optimalizaci dimenzí prvků, jejich tvaru a optimalizaci topologie, jak je vidět na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Tři druhy optimalizace: a) dimenzování; b) tvar; c) topologie [11]

### 3.1 Topologie

Optimalizace topologie by se dala popsat jako snaha rozmístit materiál, v daném návrhovém prostoru pro dané okrajové podmínky, s cílem maximalizovat výkon systému. Během procesu optimalizace se hledají jednotlivá propojení, tvary materiálu a umístění otvorů v daném prostoru. Nejvíce je optimalizace topologie zastoupena v leteckém a automobilovém průmyslu. V těchto odvětvích se snížení hmotnosti přímo odráží ve snížení spotřeby a s tím i spojených průběžných nákladech.

Přestože stavitelství je jedno z nejnáročnějších odvětví z hlediska spotřeby materiálu, takové metody navrhování dosud nejsou příliš rozšířené. V současné době ale stále sílí tlak na snižování emisí a tak se i stavitelství musí přizpůsobovat. [12] Je třeba stále hledat nové cesty k vylepšení konstrukcí, a to jak z hlediska materiálového, geometrického, tak i výrobního. Beton je díky cementu jedním z největších emitentů skleníkových plynů a jelikož jeho výrobní proces zahrnuje pálení vápence, při kterém přímo dochází k uvolňování  $CO_2$ , je jeho bezemisní výroba takřka nemožná. V kombinaci velmi obtížné recyklace, bude právě optimalizace betonových konstrukcí se stále rostoucím tlakem na snížení emisí nabývat na větším významu.[11]–[13]

Jednou z moderních staveb, která byla prokazatelně topologicky optimalizována, je Katarské národní kongresové centrum (QNCC) v Dauhá, Obrázek 3.2. Vzniklo ve spolupráci architekta Arata Isozakiho se společností Buro Happold. Jeho 250m střecha je podpírána velice organickou konstrukcí, která je pro celou budovu charakteristická.[14]



Obrázek 3.2: Katarské národní kongresové centrum [14]

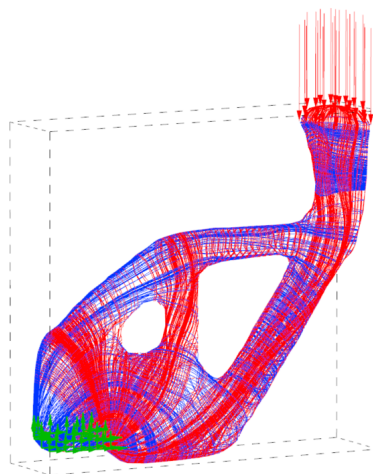
Existuje více možností pro optimalizaci topologie. typickými zástupci topologických optimalizačních algoritmů jsou SIMP a ESO. Tyto dva algoritmy využívají metodu konečných prvků. Cílem je dosáhnout co nejmenší hmotnosti a co největší tuhosti konstrukce. Snižování hmotnosti a při zachování nezbytné tuhosti, je dosa-

hováno změnou distribuce hustoty materiálu. Tyto dvě metody se liší odstraňováním materiálu. SIMP prvky penalizuje, zatímco BESO přímo odstraňuje.

### 3.1.1 SIMP

Metodu SIMP (Solid Isotropic Material and Penalization) představil roku 1989 Martin Bendsøe. Její princip je velmi jednoduchý. Na počátku je velmi hustá síť bodů. MKP výpočtem se zhodnotí využití jednotlivých bodů a ty málo využívané jsou penalizovány. Penalizované prvky postupně zanikají, dokud není dosaženo optimálního poměru mezi tuhostí a hmotností. Výsledek 2D topologické optimalizace konzoly zatížené bodovou silou působící na jejím konci je vidět na Obrázku 3.4. [15]

Na Obrázku 3.3 je vidět geometrie vytvořená topologickou optimalizací pluginem tOpos. Tento plugin, založený na principu SIMP, slouží pro optimalizaci 3D úloh. Doména úlohy je vyznačena čárkovaným kvádrem. Poloha podpor je vyznačena zeleně a působící zatížení červeně. Výsledná geometrie je následně vložena do pluginu Karamba, kde jsou vykresleny trajektorie hlavních napětí.



Obrázek 3.3: Topologicky optimalizovaná 3D úloha s vykreslenými trajektoriemi hlavních napětí

### 3.1.2 ESO

Metoda ESO (Evolutionary Structural Optimization) byla představena Stephenem Xiou roku 1992. Její princip je velmi jednoduchý. V iteračním procesu se postupně z velmi husté sítě konečných prvků odstraňují málo namáhané prvky, dokud není dosaženo optimálního poměru mezi tuhostí a hmotností. Tato metoda nyní existuje ve více variantách. AESO (Additive ESO) vychází z převrácené logiky. Algoritmus začíná s minimálním množstvím materiálu. Materiál je postupně přidáván

do míst s velkým napětím až do chvíle, kdy dojde ke splnění maximálního dovoleného napětí. BESO (Bi-directional ESO) je kombinací ESO a AESO. Materiál z nejméně využívaných míst se odstraňuje, zároveň je ale do nejvíce využívaných míst je přidáván. Díky tomu se snižuje riziko nalezení lokálního extrému. [16]

### 3.1.3 Vlastní algoritmus

Jednou z možností je vytvořit vlastní algoritmus, který umí měnit velikost a prostorové rozložení geometrie pomocí předem nastavených parametrů. Pro hledání optimálního řešení je možné používat některý z optimalizačních algoritmů popsanych v sekci 4. Tento přístup je vhodný i na složité konstrukce.

### 3.1.4 Omezení topologické optimalizace

Navzdory výpočtovým rozdílům mezi jednotlivými topologicky optimalizačními algoritmy všechny vyznačují velkou geometrickou složitostí. Důvody, proč ve stavitelství nejsou tak rozšířené jako ve strojírenství jsou následující:

- Omezená dostupnost rozsáhlých digitálních výrobních zařízení
- Omezená kompatibilita takových zařízení s materiály vhodnými pro konstrukční aplikace
- Složitost nastavení fyzicky přesných a spolehlivých modelů optimalizace topologie pro anizotropní materiály, jako je železobeton

Optimalizace topologie má velký potenciál vytvářet efektivnější konstrukce. Z důvodu výrobních omezení je však často zapotřebí vytvořit kompromis mezi ideální a proveditelnou konstrukcí. [17]

## 3.2 Hlavní napětí

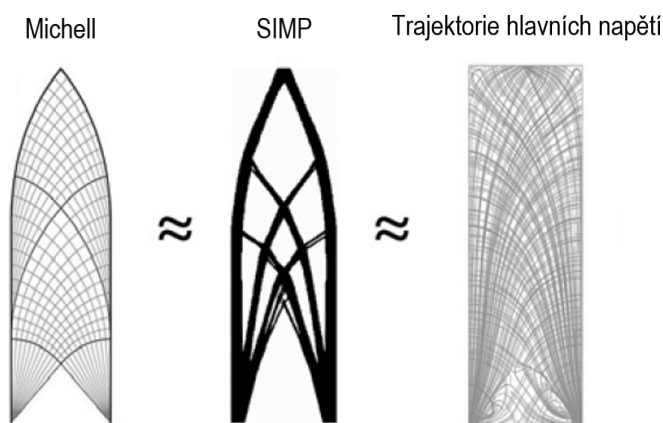
Hlavní napětí je maximální a minimální normálové napětí v takové rovině, v níž jsou smyková napětí rovna nule.

### 3.2.1 Historický kontext

#### Michell structures

Optimálnímu rozložení napěťových linií se věnoval již A.G.M. Michell v jeho článku publikovaném roku 1904.[18] Podle Michella bude mít zatížená struktura v dané

oblasti minimální objem, pokud všechny prvky budou maximálně využity v tahu nebo tlaku a poměrné přetvoření těchto prvků bude v absolutní hodnotě stejné. Prvky tedy budou ležet na dráhách maximálního přetvoření v tahu a tlaku. Podle hookova zákona jsou pro izotropní materiál směry hlavního přetvoření a hlavního napětí shodné. To tedy vysvětluje podobnost Michellových výsledků s trajektoriemi hlavních napětí. Výsledek metodou SIMP je také velmi podobný. Porovnání výsledků těchto tří metod pro osamělou silou zatíženou konzolu je vidět na Obrázku 3.4.[19]



Obrázek 3.4: Porovnání tří variant topologické optimalizace konzoly, zatížené bodovou silou působící na jejím konci [19]

### Pier Luigi Nervi

Pier Luigi Nervi byl Italský stavební inženýr a architekt působící v 20. století. Konstrukce jeho budov jsou velmi typické jejich tvary vycházejícími ze statického působení. Zde je uvedeno několik příkladů Nerviho stropních konstrukcí.

Továrny velmi často potřebují velkou únosnost vodorovných konstrukcí pro zatížení výrobními stroji v kombinaci s volnou dispozicí pro jejich umístění a obsluhu. Pro tabákovou továrnu mající přesně tyto potřeby použil Nervi ortogonální rozmístění stropních žebér podporujících železobetonovou desku, viditelnou na Obrázku 3.5–I. Její ortogonální žebra zvyšují únosnost, zároveň však šetří materiál a s tím i finanční prostředky potřebné na stavbu. Pro tvorbu těchto žebér bylo použito bednění opakovaně, čímž se snížily náklady a bylo tak ekonomicky smysluplné takovouto konstrukci realizovat. Továrna byla dokončena roku 1952.

Později přišel Aldo Arcangeli, zaměstnanec v Nerviho kanceláři s myšlenkou žebér, která by kopírovala trajektorie hlavních ohybových momentů. Stropní konstrukci kopírující trajektorie hlavních napětí (isostatic ribbed floor) si nechal Nervi

se svou kanceláří patentovat roku 1949. K první realizaci došlo při stavbě továrny na zpracování vlny v Gratti, dokončené roku 1953. Tato konstrukce podepřená sloupy v pravidelném 5m rastru je viditelná na Obrázku 3.5-II. Tohoto principu později využil i pro vynesení 10m stropních desek v Turínském paláci práce dokončeném roku 1961, který je vidět na Obrázku 3.5-III.

Půdorys předchozích stropních desek byl čtvercový. Obdélníkové desky navrhl Nervi ve velkém sportovním paláci postaveném roku 1960 pro letní olympijské hry v Římě. Na Obrázku 3.5-IV. je vidět, že rozmístění žebér je jiné, než v předchozích případech.



Obrázek 3.5: Žebrové konstrukce navržené Pierem Luigim Nervim [20]

Jak Nervi s Arcngellim došli k trajektoriím linií hlavních ohybových momentů není zcela jisté. Zde jsou uvedeny dvě experimentální metody využitelné k určení napětí průběhu napětí, o kterých se zmiňuje ve svých poznámkách.

- Tenzometrické systémy umožnily analyzovat konstrukci zmenšeného modelu na základě měření napětí. Na základě tří složek naměřeného napětí, je možné po transformaci získat hlavní napětí. K určení přesnému průběhu napětí pro získání trajektorií hlavních napětí by by však bylo zapotřebí velké množství tenzometrů. Tento postup je jak časově, tak finančně velmi nákladný.

- Photoelasticita využívá změny optických vlastností materiálu při mechanické deformaci. Díky dvojlomu světla je možné experimentálně stanovit rozložení napětí v materiálu. Nervim se fotoelastický jev velmi líbil. Dle něj byl však vhodnější pro posuzování lokálních napětí v menších tělesech, než pro analýzu celých konstrukcí.

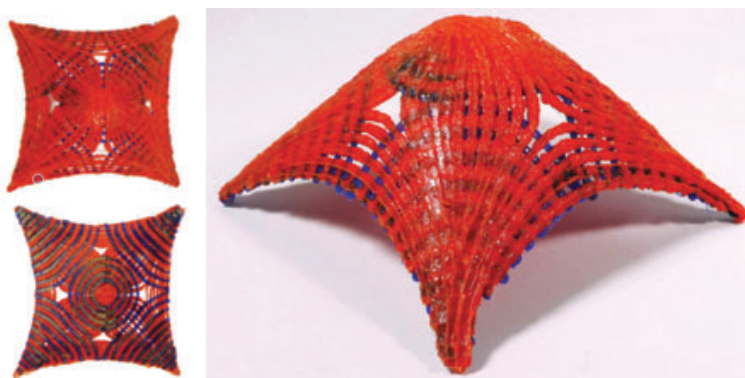
Jelikož nebylo vhodného experimentálního přístupu k hledání hlavních napětí, bylo zapotřebí teoretického přístupu. Trajektorie hlavních ohybových momentů byly tedy zřejmě navrženy pomocí teorie tenkých desek.

Dnes je možné trajektorie hlavních napětí velmi rychle získat výpočtem metodou konečných prvků. [20]

### 3.2.2 SLAM

SLAM (Stress Line Additive Manufacturing) je aditivně vyráběná konstrukce ve tvaru trajektorií hlavních napětí. Využívá možnost tvorby složité geometrie díky technologiím zejména 3D tisku, čímž se snaží maximalizovat tuhost v poměru k hmotnosti. Cílem je také snížit potřebu podpůrných konstrukcí během výroby, které přináší jak časovou, tak finanční zátěž. [21]

Výzkumu 3D tisku skořepin dle trajektorií hlavních napětí se věnují například vědci z University of Rochester. Na Obrázku 3.6 je vidět jeden z prototypů, který byl vytištěn ke statické zkoušce.



Obrázek 3.6: Vytisknutý model skořepiny dle trajektorií hlavních napětí [21]

Výzkumu spojenému s 3D tiskem betonových nosníků podle trajektorií Hlavních napětí se věnují také vědci z University of Southern Denmark. Jejich cílem je snížení negativního vlivu betonových konstrukcí na životní prostředí. Hledají tak efektivní konstrukce, které budou šetrnější zejména díky úspoře materiálu. Jejich prostě podepřený nosník respektující trajektorie hlavních napětí je vidět na Obrázku 3.7. [13], [22]



Obrázek 3.7: Vytištěný železobetonový nosník kopírující trajektorie hlavních ohybových momentů [23]

V českém prostředí byla společností So Concrete postavena tramvajová zastávka v Holešovickém výstavišti (obr. 3.8). Nosná konstrukce střechy je vytvořena žebry kopírujícími trajektorie hlavních ohybových momentů, jako v případě Nerviho konstrukcí popsaných v sekci 3.2.1. V tomto případě jsou však betonová žebra vytištěna. Díky topologické optimalizaci tak bylo ušetřeno 60 % materiálu.

### 3.2.3 ETH Curych

Výzkumný tým Any Anton vytvořil 4,5m oboustranně vykonzolovaný nosník. Geometrie je vytvořena na základě trajektorií hlavních napětí. Celý nosník je vytištěn z písku technologií zvanou Binder Jetting. Kvůli rozměrovým omezením tiskárny byl však vytištěn a složen ze 7 dílů. Jelikož písek neodolává tahům, byl tento nosník dodatečně předeprnut tak, aby ve všech 7 dílech byl pouze tlak. Dva z těchto dílů jsou vidět na Obrázku 3.9. Tento nosník je součástí pokračujícího výzkumu technologií digitální výroby budov (Digital Fabrication – DFAB) v rámci Švýcarského národního výzkumného centra spadajícího pod univerzitu v Curychu (ETHZ). [25]

#### Binder Jet 3D printing

Binder jetting je rychlý způsob aditivní výroby pro tisk celých objemů, nikoliv pouze povrchů. Výrobní proces probíhá v několika krocích. Nejprve je tenká vrstva materiálu prášku rozprostřena na plochu. Poté se nanese na vybraná místa kapalné





Obrázek 3.8: Tramvajová zastávka využívající 3D tisku betonu k vytvoření žebér dle trajektorií hlavních ohybových momentů [24]

pojivo, obdobným způsobem jako v kancelářských tiskárnách. Tyto dva kroky se stále opakují a vrstvu po vrstvě tak postupně vzniká geometrie tvořená slepeným materiálem. Po dokončení se výtisk nechá vytvrdnout a odstraní se volný neslepený materiál. Touto technologií je možné tisknout nejen z písku, ale i z určitých kovů. [26]

Velkoformátový Binder Jet byl také použit v rámci výše zmíněného výzkumu digitální výroby budov pro výrobu bednění prefabrikovaného žebrového stropu při stavbě DFAB Housu. Tento způsob výroby je nazýván 3D-Printed Stay-in-Place Formwork (PSPF). Oboustranně vykonzolovaná, topologicky optimalizovaná deska byla pojmenována Smart Slab a je vidět na Obrázku 3.10. Vykonzolování dosahuje místy až 4,5 m, což v kombinaci se zatížením dalšími dvěma patry přináší značné statické namáhání. Tomu právě pomáhá odolávat geometrie tvořená mřížkou zvlněných žebér, které nabývají až 60 cm výšky. Naopak v nejtenčím místě je tloušťka desky



Obrázek 3.9: Část dodatečně předepnutého nosníku vytištěného z písku.[25]

pouhé 2 cm. Díky optimalizaci bylo ušetřeno 70 % betonu v porovnání s masivní deskou. Kvůli rozměrovým možnostem výroby bednění a transportu je deska tvořena 11 později předepnutými prefabrikovanými segmenty. [27], [28]



Obrázek 3.10: Topologicky optimalizovaná, prefabrikovaná stropní deska vyrobená s využitím 3D tištěného bednění. [28]

# Kapitola 4

## Optimalizační algoritmy

Optimalizace je proces, během kterého je snaha dosáhnout lepších výsledků. Výsledky jsou posuzovány podle předem daných kritérií. Objevují se zde však dva problémy, které daný proces komplikují. Prvním problémem jsou mnohonásobná, často protichůdná kritéria (objectives), podle kterých jsou výsledky hodnoceny. U jednoho kritéria je posouzení, zda se jedná o lepší řešení snadné. U multikriteriální optimalizace tomu tak již není, jelikož vede k souboru kompromisních řešení, označovaných jako pareto-optimální. Bez preferencí jednotlivých kritérií nelze považovat jedno řešení lepší než druhé a při vylepšení jednoho kritéria zde nutně dojde k zhoršení jiného kritéria. Druhým problémem způsobuje příliš velký a příliš komplexní prohledávaný prostor, znemožňující užití exaktních řešení.[29] [9]

Deterministické řešení postupuje dle přesných matematických pravidel. Je zde však potřeba velké množství okrajových podmínek a předpokladů, které reálné inženýrské úlohy často nesplňují. Prohledávaný prostor možných řešení je pro užití exaktních metod příliš velký a komplexní. Enumerativním postupem jsou zjištěny všechny možné kombinace řešení a následně je vybráno to nejlepší. Tento přístup lze díky délce výpočtu uplatnit jen na úlohy s velmi malým počtem možných řešení a tak je na většinu úloh také nevhodný. Další možností jsou stochastické algoritmy. Tyto algoritmy obsahují prvek náhody. Nedávají záruku nalezení přesného řešení v konečném počtu kroků. Poskytují však přibližná řešení v přijatelném čase. Tato přibližná řešení se mohou při opakovaném spuštění díky prvku náhody lišit.

Zde je uvedeno několik příkladů stochastických optimalizačních algoritmů. Nejprimitivnější je slepý algoritmus (blind algorithm). Ten pouze náhodně generuje řešení, které si pamatuje do doby, než náhodně vygeneruje řešení lepší.

**Horolezecký algoritmus (hill climbing)**

Horolezecký algoritmus prohledává prostor následovně. Začne s náhodným bodem, vygeneruje okolní body, ohodnotí je a bod s nejlepším hodnocením je nový bod okolo kterého se vygenerují body okolní. Tento proces probíhá do chvíle, kdy všechny okolní vygenerované body mají horší hodnocení. Tento algoritmus je náchylný k nalezení pouze lokálního minima.

**Zakázané vyhledávání (tabu search)**

Zakázané vyhledávání je vylepšený horolezecký algoritmus o nemožnost generování okolních bodů v místech několika předchozích nejlepších bodů. Algoritmus si pamatuje transformace, pomocí kterých byly vygenerovány body a následně zakáže inverzní transformace, aby se nemohl vracet do stejných míst. To snižuje riziko nalezení lokálního extrému.

**Mravenčí kolonie (ant colony optimization – ACO)**

Mravenčí kolonie řeší problémy složené z dílčích problémů. Kratší cesty k dílčím řešením dávají pozitivní zpětnou vazbu, na základě čehož jsou následně více vybírány. Ohodnocení je s každou další cestou silnější, naopak nepoužívaná cesta slábne. Algoritmus je inspirován chováním mravenců, jež si své úspěšné cesty značkují feromony, na základě kterých se rozhodují jejich následovníci.

**Roj částic (particle swarm optimization – PSO)**

Jedná se o algoritmus inspirovaný chováním rojů a hejn. Každá částice představuje jedno řešení. Prohledávaným prostorem postupně „prolétává“ roj částic. Každá částice má svůj vektor pohybu stanovený na základě její pozice a pozice doposud nejlepší částice v okolí. [30], [31]

**Neuronové sítě (neural network – NN)**

Neuronové sítě (neural network – NN) jsou inspirovány skutečnými biologickými systémy neuronů. Neuron reprezentuje perceptron, který má několik vstupů s různou vahou, avšak pouze jeden výstup. Vážený průměr vstupních hodnot figuruje jako proměnná v aktivační funkci na výstupu. Získaná hodnota je výstupem daného neuronu. Aktivační funkce se liší dle požadovaného využití NN. Existuje mnoho způsobů vzájemného propojení neuronů do sítě. To se nazývá topologie. Vstupní a výstupní

vrstva může být doplněna dalšími vrstvami a jejich uspořádání může být jak přímé, tak vracející se (rekurentní).

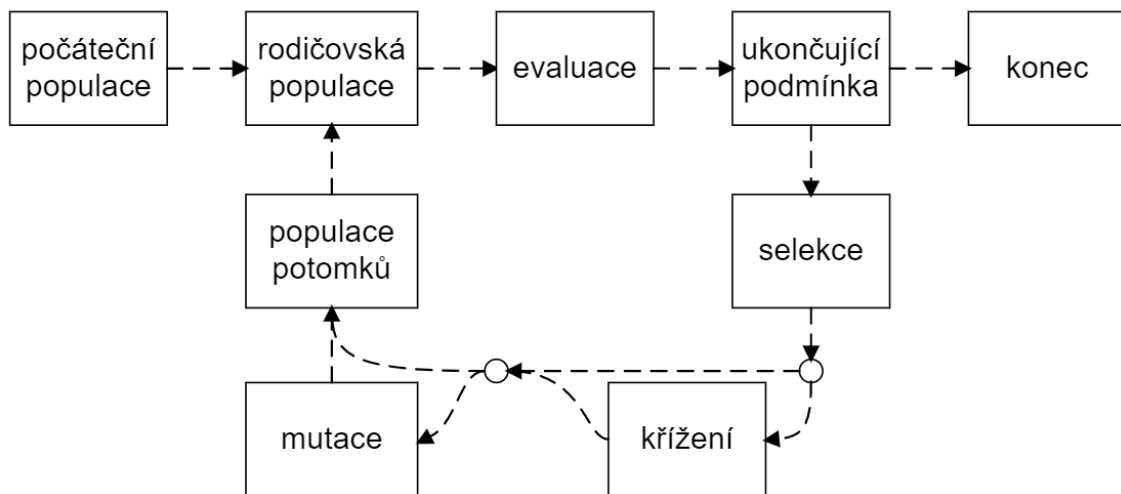
Učení, nebo také trénování NN je proces, kdy jsou upravovány jednotlivé váhy vstupů tak, aby výstupní hodnoty co nejvíce odpovídaly požadovaným výsledkům. Obdobný jev probíhá při učení i v mozku. Pakliže jsou neurony aktivní ve stejnou chvíli, jeden ovlivňuje druhý, tak je zesílena jejich vzájemná vazba, obdobně jako je zde posílena váha vstupu. Učení s učitelem je případ, kdy je poskytnuta sada tréninkových dat, které obsahují jak vstupní, tak výstupní hodnoty. Při učení bez učitele jsou poskytnuty pouze vstupní data, na kterých je prováděna shluková analýza (cluster analysis). Přeučení (overlearning) je možný stav, kdy síť poskytuje skvělé výsledky s tréninkovými daty, avšak s novými daty jsou výsledky nepoužitelné. Neuronové sítě nabyly na velké popularitě v posledních letech zejména díky obrovskému nárůstu výpočetního výkonu, díky kterému je možné natrénovat daleko větší neuronové sítě, jež dokáží provádět daleko větší úlohy a poskytovat velmi uspokojivé výsledky. [30], [32], [33]

## 4.1 Evoluční algoritmus (EA)

Evoluční algoritmus stojí na stejných základech, které popsal již Darwin. Dle základního principu evoluce přežijí jedinci, kteří mají nějakou pozitivní odlišnost, jež jim umožnila na rozdíl od ostatních přežít a reprodukovat se, předávají svou výhodu dalším generacím.[34] V přírodě funguje přirozený výběr, ke kterému je zapotřebí určitý selekční tlak (selective pressure), díky němuž mají lepší jedinci větší pravděpodobnost, že přežijí a rozmnoží se. Zda jedinec přežije a dokáže se rozmnožit probíhá však často podle ne zcela zřetelných zásad a pravidel.

V EA jedinec reprezentuje jedno řešení. Jeho vlastnosti a znaky jsou determinovány jeho genotypem, uspořádaným souborem všech jeho genů. Každý gen reprezentuje jeden parametr a nabývá předem určených hodnot. Kritéria, na základě kterých se vybírá (selekce), zda jedinec přežije, a poskytne tak geny dalším generacím, jsou zde předem definovaná. Hodnocení podle těchto kritérií je vyjádřeno účelovou funkcí (fitness value). Aby však nebyla další generace identická, dochází ke křížení a mutacím rodičovských genů. Právě mutace přináší záruku, že se nebudou kombinovat stále stejní jedinci, čímž se zvyšuje diverzita celkové populace. Následující generace se tedy od sebe mírně liší, a je tak algoritmu umožněn stálý progres. Díky tomu je možné dosáhnout dostatečně optimálního řešení. Ačkoliv je EA velmi robustní nástroj, není zaručena jeho konvergence ke globálnímu extrému.

Díky prvkům náhodnosti nedojde EA vždy ke stejným výsledkům. Opakovaným spuštěním lze minimalizovat riziko lokálního extrému.



Obrázek 4.1: Schéma evolučního algoritmu

Obecné schéma evolučního algoritmu je na Obrázku 4.1. Před započítáním iteračního cyklu probíhá inicializace, tedy náhodné vytvoření populace rodičů. Poté již začíná iterační proces, využívající třech hlavních operátorů. Jimi jsou selekce, křížení a mutace, které společně vytváří nové potomky. Z potomků se poté stávají rodiče a celý proces se opakuje, dokud není splněna ukončující podmínka.

### Populace

Populace jedinců je množina řešení daného problému. EA probíhá v cyklech. Množina řešení každého cyklu se nazývá generace a skládá se z populace rodičů a potomků. Rodičovská populace každé generace vzniká na základě potomků z předchozí generace. Způsobů vytvoření rodičovské populace je více. Obecně však potomci nahrazují špatné jedince z populace rodičů.

### Evaluace

Evaluace je hodnocení jedinců v daných kritériích účelovou funkcí (fitness hodnotou) a přiřazení pořadí (rank) jednotlivým jedincům v generaci na základě jejich fitness hodnoty.

### Ukončení algoritmu

Pro ukončení genetického algoritmu lze obecně stanovit několik podmínek. Algoritmus končí dosažením předem nastavené velikosti populace, nebo dosažením stano-

veného času výpočtu. Algoritmus lze také ukončit při dosažení požadované fitness hodnoty některým z jedinců, popřípadě při dosažení určitého statistického hodnocení fitness funkcí. Tyto podmínky je možné vzájemně kombinovat.

### **Selekce**

Selekce je výběr jedinců do další generace. Míra preference lepších jedinců se nazývá selekční tlak a závisí na způsobu výběru. Jedná se o klíčový operátor genetických algoritmů. Reprezentuje přirozený výběr v přírodě. Pakliže bude selekční tlak příliš nízký, jedinci se nebudou příliš vyvíjet a k nalezení vhodného řešení je zapotřebí obrovské množství jedinců. V extrémním případě se jedinci přestanou vyvíjet a tato stagnace tak znemožní nalezení výsledků. Příliš vysoký selekční tlak po počátečním velkém progresu díky nedostatečné diverzitě také začne stagnovat. Je velmi pravděpodobné nalezení lokálního extrému. Způsobů výběru existuje vícero. Mezi nejčastější patří ruletový a turnajový výběr.

### **Ruletový výběr (roulette wheel selection)**

V ruletovém výběru je jedinci přiřazena přímo úměrná výseč, interval reálných čísel, na virtuální ruletě dle jeho hodnocení, tedy fitness hodnoty nebo pořadí (rank). Spuštěním rulety (náhodným vygenerováním čísla z rozsahu všech intervalů) je vybrán takový jedinec, kterému přísluší interval, do kterého patří náhodně vygenerované číslo. Použití fitness hodnot více zohledňuje rozdíly mezi jedinci. Při výskytu velmi rozdílných jedinců však příliš upřednostňuje ty dobré a populace tak ztrácí různorodost.

### **Turnajový výběr (tournament selection)**

Pro turnajový výběr je nejprve vybrán daný počet jedinců do turnaje. V turnajovém pavouku jedinci soupeří porovnáním hodnocení (fitness hodnot). Ten s lepším hodnocením postupuje dál. Vítěz turnaje se stává jedním ze dvou rodičů nového potomka. Druhý rodič je vybrán dalším turnajem. Takto výběr probíhá až do nalezení potřebného množství rodičovských dvojic. Čím více vstupuje jedinců do turnaje, tím větší je selekční tlak, jelikož se zvyšuje pravděpodobnost, že se jedinec setká s daleko lepším jedincem. Nejčastěji však do turnaje vstupují pouze dva jedinci a je tak větší šance, že turnajem projdou i obecně horší jedinci, než je tomu u větších turnajů, nebo ruletové metody. To potom způsobuje větší rozmanitost řešení.

### Křížení (crossing over) a mutace (mutation)

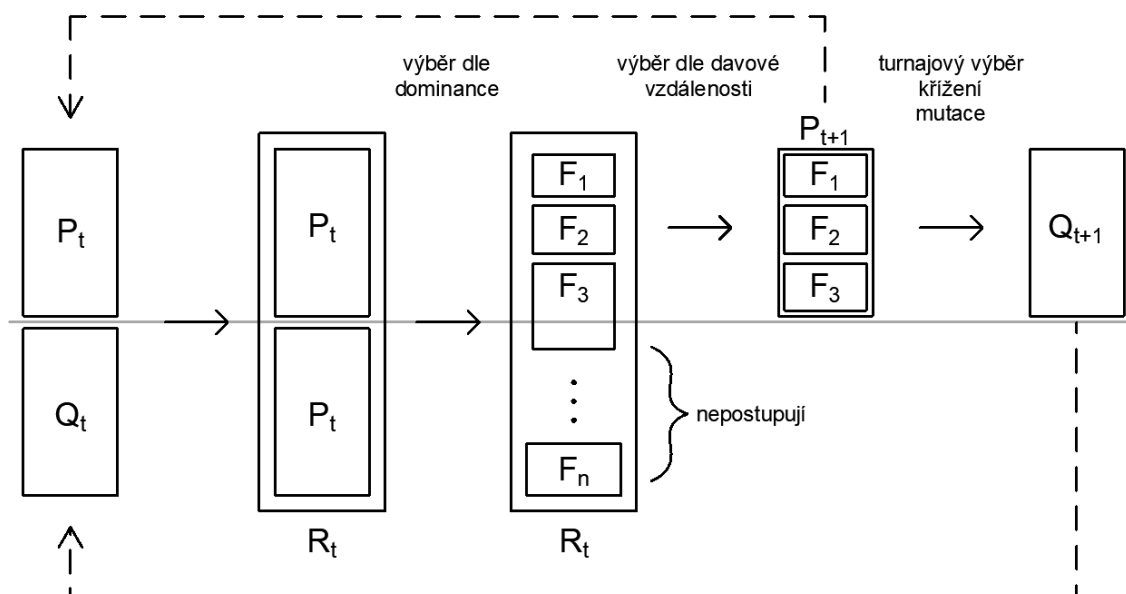
Křížení je proces, při kterém z 2 rodičovských genomů vznikají 2 genomy potomků. Způsobů, jak se geny mohou promíchat existuje mnoho. Nejjednodušším variantou je jednobodové křížení. Kdy se oba rodičovské genomy rozdělí v náhodném místě a jejich geny za tímto rozdělením se mezi genomy prohodí. Více bodové křížení funguje stejně, s tím rozdílem, že rozdělovacích bodů je více. Existují však i sofistikovanější druhy křížení. V dále popsaném NSGA-II vznikne jeden potomek složením z náhodné poloviny genů jednoho rodiče a zbylé poloviny genů druhého rodiče. Druhý potomek vznikne z opačných polovin genů.

Mutace je náhodná změna náhodného genu. Předchází kombinaci stále stejných jedinců, čímž způsobuje potřebnou diverzitu. [29], [30]

#### 4.1.1 NSGA-II

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) je jedním z multikriteriálních evolučních algoritmů (Multi-objective evolutionary algorithm – MOEA) vytvořený týmem Indických vědců v čele s Kalyanmoyem Debem. Tento algoritmus reaguje na nedostatky předchozích evolučních algoritmů, zejména na výpočetní náročnost a absenci elitářství.

Myšlenkou elitářství je zachovat nejlepší jedince do další generace bez úpravy. Tento postup vede k rychlejší konvergenci. Schéma NSGA-II zahrnující elitářství je na Obrázku 4.2.



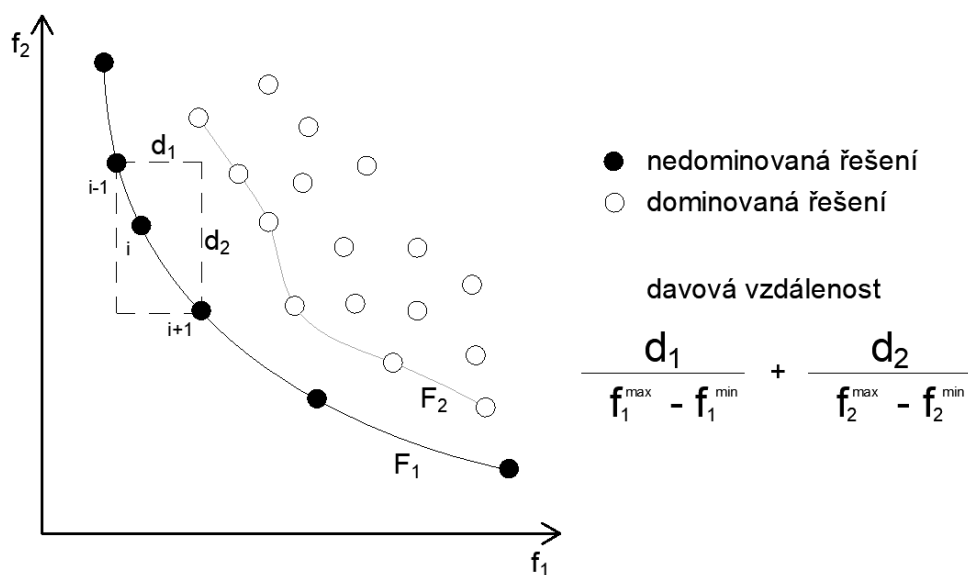
Obrázek 4.2: Schéma NSGA-II



Každá generace jedinců  $R_t$  je tvořena rodiči  $P_t$  (parents) a jejich potomky  $Q_t$  (offspring). Pro výběr rodičů následující generace  $P_{t+1}$  je použito třídění dle dominance a davové vzdálenosti. Jako rodiče následující generace  $P_{t+1}$  jsou vybráni jedinci z nejlepších front (ranků). Pakliže se některá fronta s jedinci již nevejde celá, jsou doplněni jedinci dle největší davové vzdálenosti z nejlepší fronty, která se nevešla do výběru. Potomci nové generace  $Q_{t+1}$  následně vznikají za pomoci křížení a mutace z rodičů  $P_{t+1}$ , kteří prošli výběrem turnajovou metodou. Dohromady tak tvoří novou generaci  $R_{t+1}$  a cyklus se opakuje, dokud není splněna podmínka pro ukončení cyklu.

### Výběr dle dominance (non-dominated sorting)

Řešení dominuje jiné řešení právě tehdy, když není v žádném kritériu horší než ostatní řešení a existuje alespoň jedno kritérium, ve kterém je lepší než ostatní řešení. Takto jsou všechna řešení v generaci posouzena a postupně rozdělena do front od  $F_1$  až po  $F_n$ . Fronta  $F_1$  se nazývá Paretofronta a obsahuje pouze řešení, která nejsou dominována jinými řešeními. Všechna řešení v této množině jsou dle daných kritérií stejně dobrá a vylepšením jednoho kritéria dojde nutně ke zhoršení kritéria jiného. Zbylá řešení, která jsou dominována řešeními  $F_1$  jsou označena jako  $F_2$ . Takto se řešení postupně rozdělí do front od  $F_1$  až po  $F_n$ . Fronta příslušící danému řešení je též jeho hodnota(rank). Dominance zaručuje, přenos genů nejlepších jedinců do dalších generací.



Obrázek 4.3: Ukázka rozdělení do front a určení davové vzdálenosti

### Davová vzdálenost (crowding distance)

Crowding distance je relativní vzdálenost jedince od sousedních jedinců v daném kritériu. U multikritériálních úloh se jedná o sumu všech vzdáleností jednotlivých kritérií. Davová vzdálenost se vypočítá jako podíl rozdílu menšího a většího souseda a rozdílu maximální a minimální hodnoty v daném kritériu. Jedinci s nejmenší a největší hodnotou kritéria mají davovou vzdálenost nekonečno. Upřednostňována jsou řešení s větší davovou vzdáleností. To způsobuje rovnoměrnější prohledávání prostoru. Celková diverzita potom snižuje riziko nalezení lokálního extrému. [35], [36]

## 4.2 Wallacei

Wallacei je evoluční nástroj implementovaný v Prostředí Rhino Grashopper, stojící na evolučním algoritmu NSGA-II. Jedná se o plugin zdarma poskytovaný všem uživatelům. Wallacei vznikl na základě architektonické doktorské Práce Mohammeda Makkiho pod vedením doktora Weinstocka. Po spojení s Miladem Showkatbakhshem, který byl též doktorandem Weinstocka, vzniklo roku 2018 první vydání Wallaceie. Hlavní kostru týmu poté doplnil Yutao Song. Motivací pro následná vylepšení první verze bylo vytvořit kompletní ucelený nástroj obsahující nejen genetický algoritmus, ale také možnost podrobně analyzovat a vybírat jednotlivá řešení. Jméno Wallacei bylo zvoleno jako čestné uznání Britského vědce Alfreda Russella Wallace, který byl u zrodu teorie evoluce, stejně jako později více proslavený Charles Darwin.

Hlavní komponentou je WallaceiX. Požadovanými vstupy jsou geny (parametry) a fitness hodnoty (hodnocení v daných kritériích). Fitness hodnoty jsou algoritmem minimalizovány. Pro maximalizaci kritéria je tak třeba vložit převrácenou hodnotu. Dále je také možné vložit pozorovaná data a fenotyp. Pro spuštění algoritmu je třeba nastavit jednotlivé parametry evoluce.

### 4.2.1 Nastavení evoluce – parametry genetického algoritmu

#### Populace

Celková velikost populace je dána velikostí generace a počtem generací. Toto jsou dva parametry, které je třeba nastavit. Velikost populace zásadně ovlivňuje čas výpočtu. U příliš malého počtu generací není dostatečný prostor pro vylepšení jednotlivých řešení. U příliš malého počtu jedinců hrozí nalezení lokálního extrému kvůli nedostatečné diverzitě.

### **Inicializace**

Inicializace je náhodné vygenerování všech jedinců první generace. Díky možnosti nastavit tzv. seed je možné zvolit, zda při opakovaném spuštění evoluce dojde k vygenerování stejné počáteční generace a následně proběhne i identická evoluce, nebo bude počáteční generace pokaždé jiná a tedy i každá evoluce bude jedinečná. Možnost této volby je velice praktická. Opakovaným spuštěním s rozdílnou počáteční generací se zvětší prohledaný prostor, a je tak možné se lépe vyvarovat lokálnímu extrému. Naopak nastavením seedu na nenulovou hodnotu lze dobře zkoumat, jak se změna v definici úlohy propisuje na samotné evoluci. Kdyby byla evoluce vždy jedinečná, nebylo by rozpoznatelné, jestli jsou změny způsobeny definicí, nebo náhodou v rámci evoluce.

### **Pravděpodobnost křížení**

Pravděpodobnost křížení udává poměr, kolik párů vybraných selekcí se zkříží. Nabývá hodnot 0 až 1 a literaturou doporučená hodnota je 0,9.

### **Pravděpodobnost mutace**

Parametr pravděpodobnosti mutace nabývá hodnot 0 až 1. Stanovuje pravděpodobnost, že jedinec bude zmutován. Ve Wallacei je přednastavená hodnota  $1/n$ , kdy  $n$  je počet proměnných. Pro případ s dvěma geny, které nabývají hodnot 1 až 10 je tedy  $n$  rovno 20. Tuto hodnotu lze však měnit. Neměla by příliš přesahovat 20 %, potom nejsou dostatečně zachováváni kvalitní jedinci, což komplikuje konvergenci.

### **Rozložení křížení a mutace**

Index rozložení křížení a mutace (Crossover and Mutation Distribution Index) umožňuje nastavit podobnost mezi potomky a jejich rodiči. Velká hodnota způsobuje vznik potomků, kteří jsou podobní jejich rodičům. Naopak nízká hodnota umožňuje vznik potomků vzdálených od jejich rodičů. Přednastavená hodnota je 0,2. Příliš malá hodnota způsobuje velkou rozmanitost a zpomaluje tak konvergenci. Naopak příliš velká hodnota rozmanitost snižuje a hrozí nalezení lokálního extrému.

Ukončení evoluce nastává dosažením předem nastavené velikosti populace. Nelze nastavit jinou ukončující podmínku.

### 4.2.2 Wallacei analytics

#### Směrodatná odchylka

Graf směrodatné odchylky (standard deviation chart) popisuje směrodatnou odchylku. Čím širší je křivka směrodatné odchylky, tím jsou jednotlivá řešení rozdílnější a populace je tedy více variabilní. Starší generace jsou červené, novější jsou potom modré. Posun křivky vlevo ukazuje snížení průměrné fitness hodnoty. Pokud se tedy křivky postupně posouvají vlevo a zužují se, generace se v daném kritériu zlepšuje.

Graf trendu směrodatné odchylky (standart deviation trendline) ukazuje, jak se vyvíjí směrodatná odchylka během celé evoluce, tedy jak jsou jednotlivá řešení v generacích variabilní.

#### Fitness hodnoty

Graf fitness hodnot (fitness value chart) zobrazuje každé řešení jako bod a každou generaci jako křivku spojující dané body. Zploštění křivky ukazuje na menší rozdíly mezi řešeními. Celkové posunutí křivky dolů značí menší fitness hodnoty dané generace.

Z grafu průměrné fitness hodnoty lze pozorovat trend výsledků. Zda se výsledky postupně zlepšují, stagnují, či se dokonce zhoršují.

### 4.2.3 Wallacei selection

V rámci Wallacei selection lze zobrazit jednotlivá řešení v prohledávaném prostoru (objective space). Tento prostor má tolik dimenzí, kolik má úloha kritérií. Pro vykreslení větších než třetích rozměrů slouží barva, velikost a transparentnost.

Nejlepší jedinci nejsou pouze v poslední generaci. Mohou se vyskytovat napříč celou populací. Jelikož postupné prohlížení všech řešení by bylo značně neefektivní, existují nástroje pro výběr těch nejlepších.

#### Parallel coordinate plot

Parallel coordinate plot je graf s rovnoběžnými souřadnicemi. Každá souřadnice reprezentuje jedno kritérium. Fitness hodnoty jednotlivých řešení jsou vyneseny na příslušné svislé osy reprezentující daná kritéria a jsou spojeny lomenou čarou. Každá lomená čára tedy reprezentuje jedno řešení. Pro lepší vyobrazení jsou všechny hodnoty normalizovány. Jelikož se algoritmus snaží daná kritéria minimalizovat platí, že lepší řešení nabývá menší fitness hodnoty a tedy i čím je čára níž, tím je řešení lepší. Vzájemně křížící se čáry poukazují na protichůdná kritéria, naopak rovnoběžné čáry

na kritéria přímo závislá. Jedinci jsou zbarveni podle jejich stáří. Nejstarší řešení jsou červené, nejnovější potom modré. Je tedy patrné, jak se jednotlivá řešení postupně vyvíjí. Z PCP grafu lze extrahovat řešení řešení s nejvíce opakovanými fitness hodnotami, řešení s nejčastěji se opakujícími fitness hodnotami, řešení s nejmenším relativním rozdílem v pořadí (rank) a řešení s průměrným pořadím (rankem).

### Shluková analýza

Shluková analýza (cluster analysis) patří do třídy metod učení bez učitele (unsupervised machine learning algorithm). U této třídy nejsou vstupy provázány s výstupy. Snaží se tedy získat určité vzory z neroztříděných dat. Jedná se tak o určitou samoorganizaci výsledků. Pro shlukovou analýzu je možné vybrat konkrétní generaci, nebo celou pareto-frontu. Počet shluků je také volitelný. Jednotlivé shluky je možné vykreslit na PCP grafu.

Clustery jsou typ učení bez učitele (unsupervised machine learning) které bylo zmíněno v části 4. Jedná se o nehierarchickou shlukovou analýzu, která probíhá v několika krocích. Nejprve je nutné zvolit počet clusterů a množinu, pro kterou se analýza provede. Poté jsou náhodně vybrány body, které reprezentují centra clusterů. Následně je pro každý bod zjištěna vzdálenost od všech center. U vícedimenzionálních úloh je vzdálenost euklidovská. Poté se body přiřadí k nejbližším centrům. Nakonec se vypočítají těžiště těchto přiřazených bodů. Tento proces se opakuje, dokud se shluky nepřestanou lišit.

Centrum clusteru by mělo reprezentovat všechna řešení. To je však mnohdy problematické. Podobnou euklidovskou vzdálenost mohou mít velmi rozdílná řešení se značně odlišnými jednotlivými hodnotami fitness funkcí. Centrum potom nedostatečně reprezentuje celý cluster, protože jednotlivá řešení jsou příliš různá.

Shluky se vytváří na základě fitness hodnot. Shlukování tedy spojuje řešení se stejnými výsledky, i když fenotypy řešení mohou být naprosto odlišné.

Hierarchické clusterování je typ shlukové analýzy, kdy se k sobě postupně přiřazují dvě nejpodobnější řešení. Takto vzniká mnohoúrovňový pavouk.[37]–[39]

# Kapitola 5

## Casa Golf

Celá tato práce je volně inspirována vilou architektonické kanceláře Luciano Kruk Arquitectos, která je vidět na Obrázku 5.1. Objekt byl dokončen v roce 2015. Nachází se v Argentině, na kraji golfového hřiště nedaleko pobřežního resortu Pinamar. Jedná se o luxusní prázdninový dům navržený k využívání během všech ročních období. [40] Charakteristické pro Casa Golf jsou velkoformátová okna, ostré linie tvořené pohledovým betonem a značná předsazení konstrukce. Objekt je tvořen třemi vzájemně natočenými boxy ve třech různých výškových úrovních. Předsazení nejvyššího boxu je velmi výrazné a velmi silně tak utváří celkový dojem. Statická optimalizace právě tohoto boxu je tématem první části diplomové práce.

Při návrhu Casa Golf byl kladen velký důraz na výhledy z jednotlivých místností do okolí, a tak je velká část domu prosklená. Aby však díky solárním ziskům nedocházelo k přehřívání interiéru, je zde využito několik velmi efektivních způsobů stínění. Stínění prostředního boxu zajišťují lamely. Právě tyto stínící prvky jsou tématem druhé části diplomové práce.

Jelikož by přidání stínění do optimalizace konstrukce předsazené části tvořilo příliš komplexní úlohu, ve které by nebyla kombinace statiky a stínění příliš přehledná, je práce rozdělena na dvě separátní části. Předsazená konstrukce je optimalizována ze statického hlediska. Zatímco stínící prvky pod touto předsazenou částí jsou optimalizovány z hlediska užívání vnitřních prostor.

### 5.1 Luciano Kruk Arquitectos

Luciano Kruk, autor návrhu Casa Golf, je osmačtyřicetiletý argentinský architekt s velmi specifickým stylem. Kruk vystudoval architekturu na univerzitě v Buenos Aires, kde později i sám vyučoval projekty. Dnes působí jako hostující profesor na



Obrázek 5.1: Golf House [40]

několika univerzitách Latinské Ameriky, ale i ve Španělsku či Itálii. S Českou republikou je spojen od roku 2015, kdy byl vybrán jako zástupce Argentiny na Architecture Week Prague. V minulosti byl partnerem v kanceláři BAKarquitectos, nyní však vede svou vlastní kancelář s názvem Luciano Kruk Arquitectos.

Všechny jeho stavby jsou velmi dobře rozpoznatelné pro jejich tak specifický styl. Portfolio Krukových projektů tvoří z velké části luxusní vily. Ostré hranaté tvary pravoúhle poskládaných vzájemně odsazených boxů z pohledového betonu ztvárňují hlavní geometrii všech budov. Velkoformátové otvory, nebo i celé prosklené stěny doplňují tento surový vzhled a zároveň poskytují obrovský kontakt s okolím. Přehřívání brání důmyslně vybrané stínícími prvky. Interiér sází na jednoduchost. Prostorné velmi prosklené místnosti doplňuje beton, ať už se jedná o stoly, lavice, police, bary, či všemožné designové příčky. Velký architektonický um Luciana Kruka přináší originální stavby, reagující jak na specifika okolního prostředí, tak na rozmanité požadavky investora, které však spojuje jednotný jasně rozpoznatelný styl.[41]

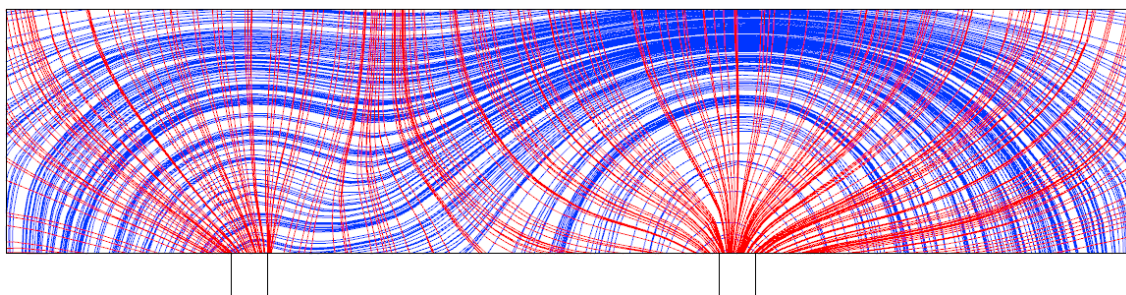
# Kapitola 6

## Vazník

Jedním z nejzajímavějších prvků Casa Golf je předsazení nejvýše umístěného boxu. Toto předsazení je v poměrech celého domu velmi výrazné a strhává tak na sebe pozornost. Jeho význam však není pouze estetický. Poskytuje ochranu před sluncem nižšímu podlaží. Krom stínící funkce také tvoří ochranu před deštěm pro značnou částí severovýchodní terasy. Snahou je najít architektonicky zajímavou a staticky velmi funkční alternativu konstrukce tohoto předsazeného boxu.

Současná konstrukce působí jako stěnový nosník. Statické působení této konstrukce velmi dobře demonstruje Obrázek 6.1. Červené trajektorie hlavního napětí vykreslují působící tlak, modré trajektorie hlavního napětí reprezentují tah. Zjednodušeně by se dalo říct, že nad podporami působí tlak vertikálně a tah horizontálně. V předsazených částech se působení mění ve vertikální tah a horizontální tlak.

Právě trajektorie hlavního napětí jsou inspirací pro vytvoření alternativní konstrukce. Jak bylo popsáno v části 3.2.1, konstrukce vytvořená podle těchto trajektorií hlavních napětí je koncept existující už delší dobu.

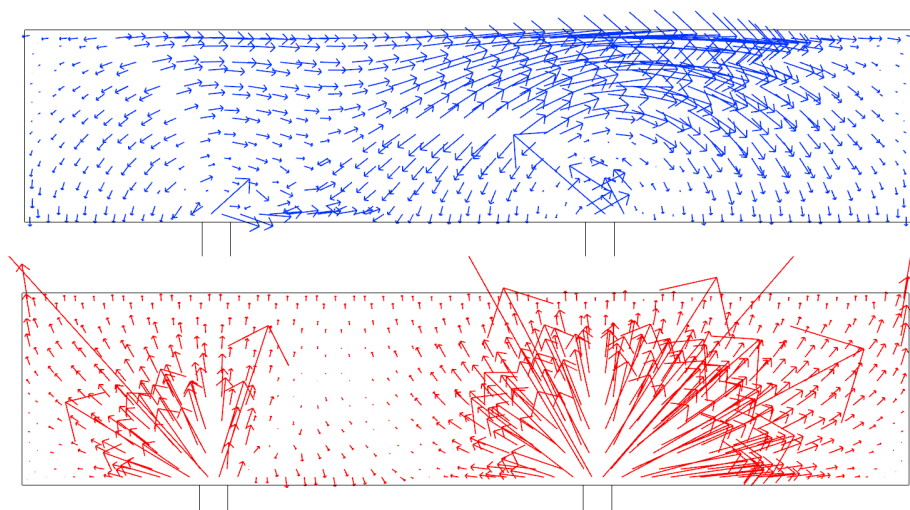


Obrázek 6.1: Trajektorie hlavních napětí ve stěnovém nosníku



### 6.0.1 Výběr trajektorií hlavních napětí

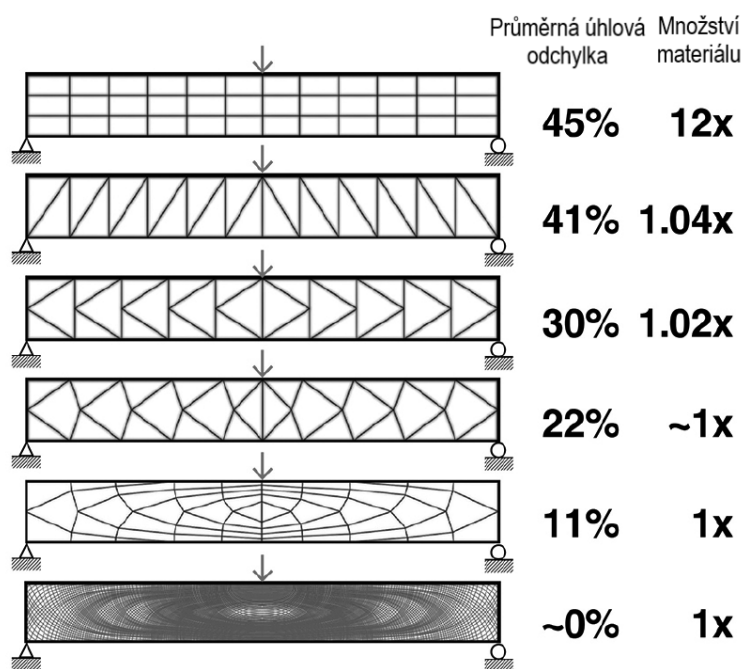
Hlavní napětí je maximální a minimální normálové napětí v takové rovině, v níž jsou smyková napětí rovna nule. Metodou konečných prvků je možné vypočítat a zobrazit hl. napětí jako dva vzájemně kolmé vektory pro každý element (Obr. 6.2). Vektory hl. napětí v každém bodě jsou tedy rozptýlená data, které je potřeba interpolovat a vytvořit tím tak trajektorie hlavních napětí. Trajektorie vzniká postupným propojováním výchozích a sousedních bodů dané iterace podle směrů vektorů hl. napětí. Výchozí bod nulté iterace je předem zvolen. Pro přesnější interpolaci je vhodné vektory interpolovat z více okolních bodů. Trajektorie je tvořena z orientace vektorů, nikoliv však jejich velikostí. Výsledné trajektorie tedy nezohledňují velikost napětí a tak nejsou umístěny ve více namáhaných částech konstrukce. Velikosti hl. napětí také nemusí být podél trajektorie konstantní. Pro jakoukoli konstrukci existuje nekonečný počet možných drah trajektorií hl. napětí a kombinací těchto trajektorií. Každá tato kombinace má jinou tuhost a tedy i schopnost přenášet zatížení.[42], [43]



Obrázek 6.2: Zobrazení hlavních napětí pomocí vektorů, které na rozdíl od trajektorií dává informaci i o velikosti. Je tedy zřejmé, jakou intenzitou jsou jednotlivá místa namáhána.

Obrázek 6.3 ukazuje jak je geometrie konstrukce tvořená podle linií hl. napětí efektivní v porovnání s běžnými geometriemi. Také je patrné, že hustší rozmístění subtilnějších prvků je efektivnější než řídké rozmístění robustnějších prvků.

Příliš husté rozmístění trajektorií však není realizovatelné, obzvláště potom z železobetonu. Aby bylo možné vytvořit reálnou konstrukci, která sleduje dráhy hlavního napětí, je zapotřebí vybrat omezený počet vhodných trajektorií. Zde jsou uvedeny příklady vytvoření a výběru trajektorií.



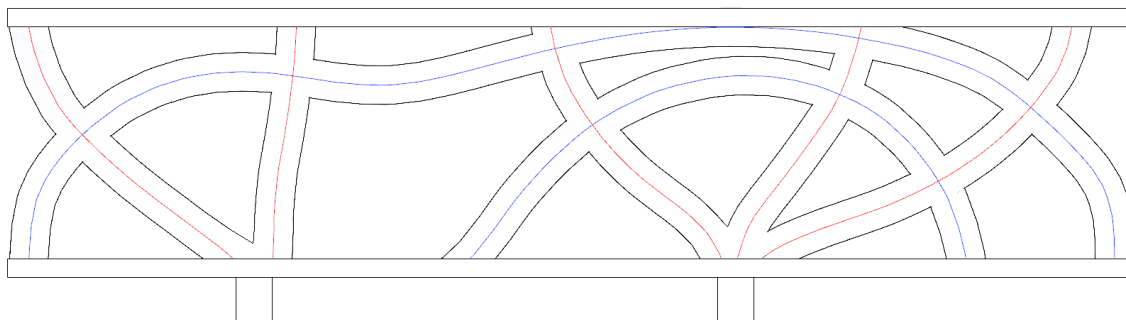
Obrázek 6.3: Ukázka lepších vlastností prostě podepřeného nosníku při využití trajektorií hlavních napětí.[19]

- Vytvoření pouze žádoucích trajektorií na základě konkrétních výchozích bodů, kterými prochází. Může se jednat o místa v blízkosti podpor, v blízkosti působícího zatížení, nebo třeba konstrukčně či architektonicky důležitá místa.
- Vytvoření trajektorií na základě pravidelně rozmístěných výchozích bodů. Výběr jedné trajektorie a následný automatický výběr trajektorií v předem definované vzdálenosti, která může vycházet z nárůstu napětí, materiálových požadavků, proveditelnosti, nebo estetického hlediska.
- Ohodnocení trajektorií podle velikostí normálových napětí v bodech, kterými prochází. Následný výběr trajektorií procházejících místy s největším napětím. Zde však hrozí velmi nerovnoměrné rozmístění trajektorií negativně ovlivňující výslednou celkovou tuhost.
- Použití optimalizační algoritmu k výběru kombinace trajektorií s největší tuhostí.

[15], [19], [21]

Na Obrázku 6.4 je vidět vazník vytvořený výběrem několika trajektorií hlavních napětí, které byly vidět z Obrázku 6.1. Tento výběr byl proveden čistě manuálně. Pro automatický výběr trajektorií by bylo vhodné užití některého optimalizačního

algoritmu (4. kapitola), který by vybral takovou kombinaci trajektorií, aby bylo dosaženo co největší tuhosti.



Obrázek 6.4: Vazník tvořený vybranými trajektoriemi hlavních napětí

Tato práce se hlavním napětím inspiruje. Postup však nevede přes vybírání vhodných trajektorií hlavního napětí získaných z výpočtu. Cílem je vytvoření optimalizované geometrie pomocí 5 parametrických křivek a genetického algoritmu. Tvar těchto křivek by se potom v ideálním případě měl blížit trajektoriím hlavního napětí.

## 6.1 Tvorba modelu

### 6.1.1 Tvorba trajektorií

Jelikož originální řešení předsazeného boxu obsahuje na kratších stranách boxu konzoly sloužící jako sluneční clony, je s nimi uvažováno i v tomto případě. Severovýchodní hrana stropní konstrukce je tedy 2 m předsazena, jihozápadní potom 1 m. Tento rozdíl vyplývá z větší potřeby stínit slunce právě na severovýchodě. Podrobněji je rozdílná potřeba stínění v závislosti na orientaci rozebrána v sekci 7.3.2. Jelikož není podstatné, jestli okraje budou skutečně vykonzolované, nebo budou podpírány konstrukcí, je tvar stěnového nosníku změněn z původního obdélníku, na lichoběžník zahrnující zmiňované předsazení stropní konstrukce.

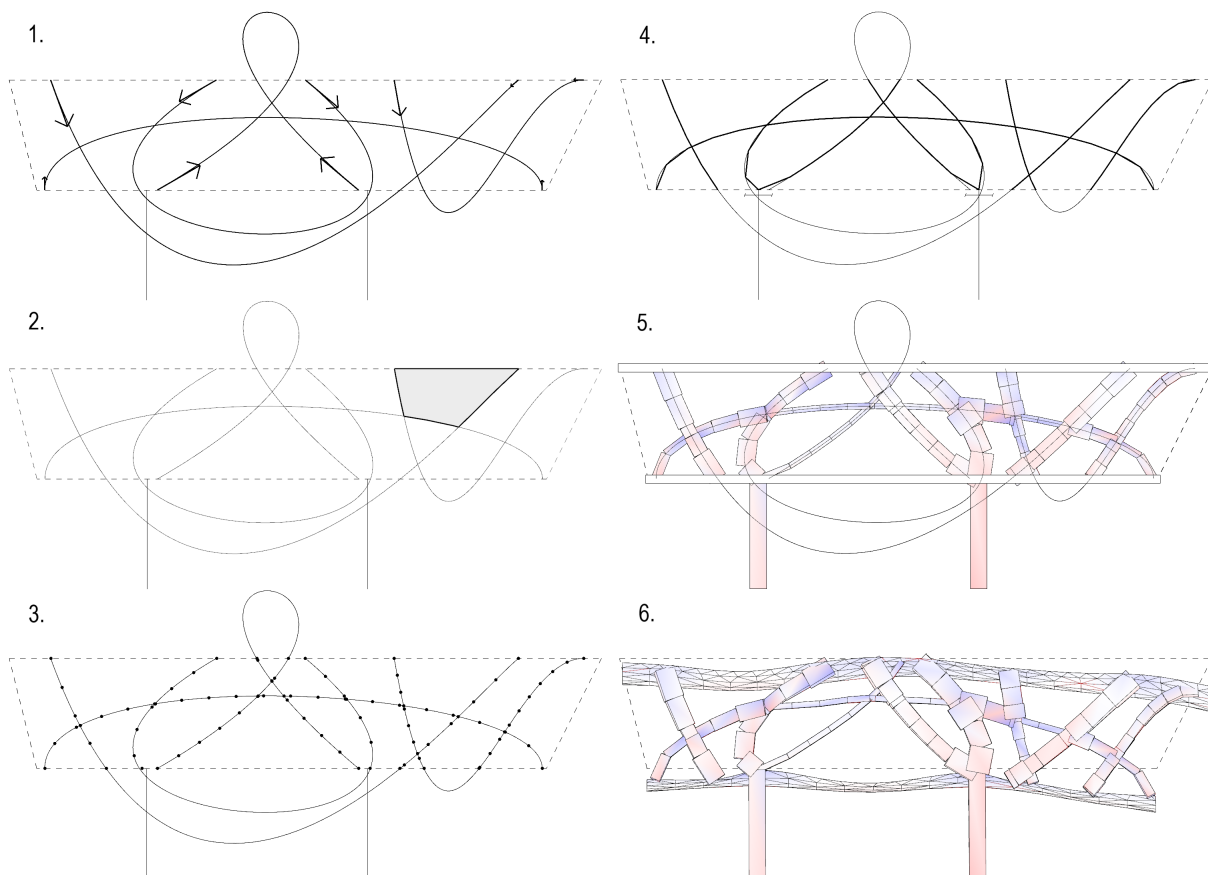
1. Pro parametrické křivky bylo zvoleno 5 Bézierových křivek. Jejich tvar se dá velmi snadno ovládat několika parametry. Těmito parametry jsou umístění počátečního bodu, koncového bodu a tangenty v těchto bodech. Pro lepší orientaci ve scriptu byla pro tuto práci vytvořena komponenta vytvářející Bézierovu křivku, která je vidět na Obrázku 6.6. Vstupem je povrch konstrukce na kterém má být křivka vytvořena a 8 číselných parametrů tvořící samotnou křivku. Jedná se o  $UV$  souřadnice počátečního a koncového bodu

+ velikost a směr tangenciálních vektorů. Červeně označené vstupy jsou geny pro tvorbu jedinců v genetickém algoritmu. Aby se snížil prohledávaný prostor jsou počáteční a koncové body pouze na horní nebo spodní hraně. Proto V souřadnice nevstupují jako geny. Tři křivky začínají a končí na horní hraně. Zbylé dvě křivky začínají a končí na hraně spodní.

Příklad jednoho možného rozvržení baziérových křivek je vidět na Obrázku 6.5–1.

2. V následujícím kroku je plocha lichoběžníku rozdělena křivkami na menší plochy. Jedna menší plocha je vidět na Obrázku 6.5–2. Hrany těchto ploch nahradí původní křivky. Tím je zajištěno spolupůsobení jednotlivých křivek. Křivky již nejsou definovány tak, jak byly vytvořeny, ale pouze mezi jednotlivými průsečíky. [44]
3. Jelikož je k následné optimalizaci geometrie využito genetického algoritmu, který využívá velké množství dílčích řešení, je potřeba aby výpočet každého řešení byl co nejkratší a simulace tak mohla být díky většímu vzorku populace daleko robustnější. To umožňuje dojít k celkově lepším výsledkům. Z toho důvodu je výpočetní model vazníku vytvořen z prutových prvků, nikoliv z prvků plošných. Karamba pracuje pouze s rovnými nosníky, a tak je třeba křivky rozdělit na jednotlivé úsečky. Počet úseček, na kolik se křivka rozdělí je nastaven na 20. Na křivce je tedy vytvořeno 19 dělicích bodů. další dělicí body jsou v každém průsečíku křivky s jinou křivkou, nebo hranicí lichoběžníku. Dělicí body mimo lichoběžník se odstraní.
4. Pokud je dělicí bod blíže než 0,5 m od sloupu, je přemístěn právě do sloupu. To vede k rychlejšímu napojení vazníku na podpůrnou konstrukci během evoluce. Mezi dělicími body se vytvoří úsečky.
5. Z každé úsečky je vytvořen nosník. Průřez nosníků je optimalizován, jak je popsáno v části 6.1.2. Stropní konstrukce jsou vytvořeny z pravidelných sítí bodů. Dělicí body z kroku 3, které leží na horní nebo spodní hranici lichoběžníku jsou přidány mezi body pro tvorbu sítě. Tím je zajištěno spolupůsobení stropních desek s nosníky. Stropní desky jsou 25 cm vysoké z betonu C30/37. Pro přiblížení reálnému stavu, je příklad vymodelován včetně 4 podpírajících sloupů. Konstrukce pod těmito sloupy se považuje za již dostatečně tuhou a sloupy jsou tak modelovány jako vetknuté.
6. Konstrukce je zatížena kombinací MSÚ, která je více popsána v sekci 6.3.1.

Výsledná deformace je jedním evolučním kritériem. Druhým kritériem je celková hmotnost konstrukce.

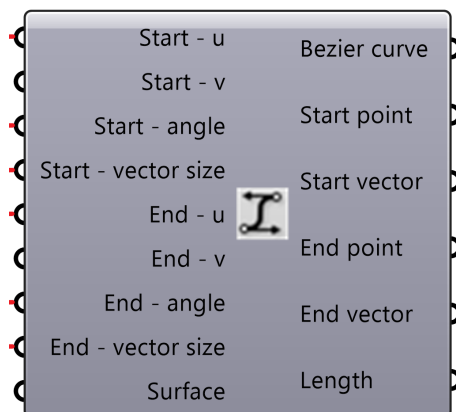


Obrázek 6.5: Tvorba vazníku

### 6.1.2 Optimalizace průřezu

Komponenta pro optimalizaci průřezu vybírá nejvhodnější průřez dle požadovaného využití. Pro výběr je také možné přidat maximální dovolenou deformaci konstrukce. Výběr probíhá z předem zvolené množiny. Tato množina je seřazena od nejpreferovanějších průřezů po ty nejméně preferované. Ze nich potom algoritmus vybere první průřez splňující podmínky jeho využití, popřípadě deformaci. Jelikož větší průřezy díky své tuhosti přenášejí více zatížení, probíhá celý proces v několika iteracích. Množina průřezů je tvořena čtverci od délky hrany 30 cm až po délku hrany 1 000 cm. Průřezy jsou seřazeny od nejmenších po největší. Jejich výběr tedy preferuje co nejmenší a tak i nejlehčí průřez.

Z důvodu, že Karamba neumí pracovat s železobetonem, je zvýšena tahová pevnost betonu C30/37 na 10 MPa. Tato hodnota reprezentuje zvýšení tahové únosnosti



Obrázek 6.6: Komponenta pro tvorbu Bézierovi křivky

ocelovou výztuží. Díky tomu se pohybují navrhované průřezy v reálných dimenzích. Tato komponenta je primárně určena pro optimalizování ocelových konstrukcí podle Eurokódu 3 a tak je třeba brát návrh pro železobeton s dostatečnou rezervou. Výběr průřezů je také nastaven tak, aby tlačené prvky byly stále masivní a vliv vzpěru tak nebyl významný.

## 6.2 Evoluce

### 6.2.1 Nastavení evoluce

Pro evoluci je využito pluginu Wallacei, více popsaného v části 4.2. Fitness hodnoty kritérií jsou maximální deformace a celková hmotnost konstrukce, dvě klasická protichůdná kritéria pro optimalizaci konstrukcí. Parametry jsou tvořeny hodnotami pro tvorbu Bézierovy křivky jak je popsáno v prvním bodě v sekci 6.1.1. Pro každou křivku je potřeba 6 číselných hodnot. Pro pět křivek je tedy celkem 30 genů. Počáteční a koncový bod se může vytvořit kdekoliv na horní respektive spodní hraně. Orientace vektoru je možná jakýmkoliv směrem v polorovině stěny. Velikost vektoru je od 1 do 15. Celkový počet hodnot genů je 1212. Velikost prohledávaného prostoru je  $7,7 * 10^{43}$ .

Samotné parametry bylo poměrně problematické nastavit tak, aby celá simulace nekonvergovala k lokálnímu extrému a zároveň docházelo v přijatelném čase k rozumným výsledkům. Bylo tedy spuštěno velké množství menších pomocných simulací, u kterých byly pozorovány jednotlivé vlastnosti těchto evolucí. Nakonec byly pro nastavení evoluce vybrány následující hodnoty.

- 150 jedinců, 150 generací
- Pravděpodobnost křížení: 0,9
- Pravděpodobnost mutace: 0,1
- Distribuční index pro křížení a mutaci: 10

Výpočet s tímto nastavením zabere zhruba 9,5 h.

### 6.2.2 Vlastnosti evoluce

Na Obrázku 6.7 jsou vidět grafy popisující vlastnosti evoluce. V obou grafech směrodatné odchytky (SD value trend line) a průměrné fitness hodnoty (mean value trend line) je vidět velmi strmě klesající začátek. Variabilita řešení v počáteční generaci je velká. Jelikož jsou počáteční řešení vygenerována naprosto náhodně, obsahují totiž i ty nejhorší varianty, u kterých například nedojde ke spojení stropních desek žádnou konstrukcí vazníku. Takové řešení má nekonečnou deformaci. Obdobně je to i s hmotností. Velmi nevhodně rozmístěné prvky jsou velmi namáhány. To způsobuje zvětšení jejich požadovaného průřezu, což má za následek nárůst celkové hmotnosti. Tato řešení však neprojdou do dalších generací a tak je počáteční progres velmi rychlý.

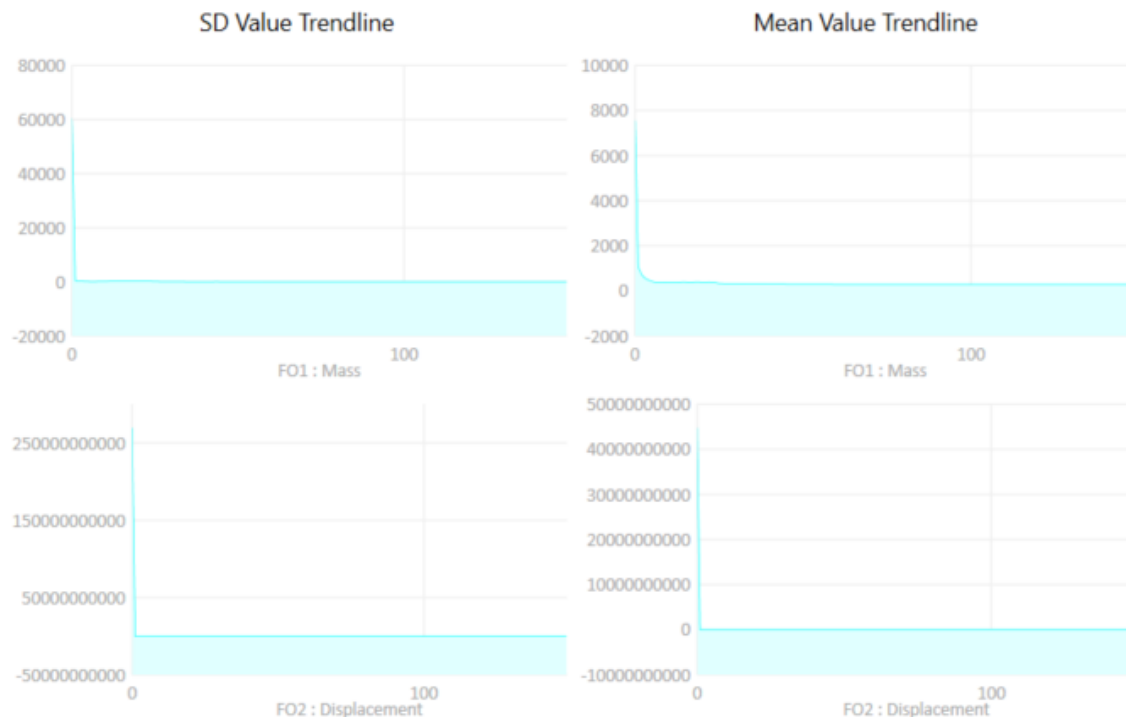
Zbylá část evoluce vypadá že stagnuje. Jde však pouze o problém lineárního měřítka těchto grafů. Až na krátké úseky jsou celé grafy klesající.

Jelikož se velikost průřezu řídí podle využití, je směrodatná odchylka na konci evoluce relativně malá. Nevznikají příliš extrémní případy v podobě velmi masivních řešení s velmi malou deformací a naopak subtilní řešení s velmi velkou deformací. To by nastávalo, pokud by velikost průřezu byla jedním z genů evoluce. Takto vznikají tedy již řešení s optimálním využitím materiálu. Evoluce není matena variantami stejně rozmístěných linií s rozdílnými dimenzemi prvků a může přímočařeji optimalizovat rozmístění trajektorií.

### 6.2.3 Analýza výsledků

Malá relativní odchylka poukazující na malou rozmanitost řešení způsobuje také malý počet pareto-optimálních řešení. V tomto případě jich je těchto řešení 66.

Na Obrázku 6.8 je výsledek shlukové analýzy (cluster analysis) pareto-optimálních řešení při požadovaných 4 shlukách. V rozmístění výsledků není příliš patrný typický tvar paretofronty. To je však způsobeno měřítkem osy pro hmotnost. Je vidět, že



Obrázek 6.7: Grafy popisující vlastnosti evoluce

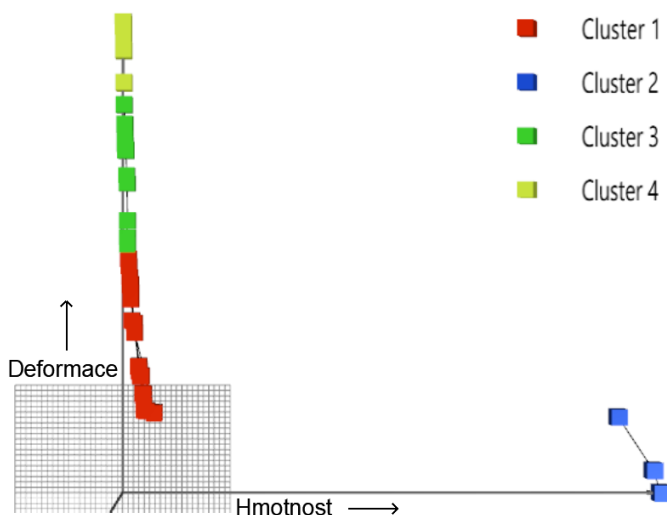
tři modrá řešení 2. shluku jsou velmi vzdálená od ostatních. Jejich vznik je chybou algoritmu, který vytváří jednotlivá řešení.

Tyto tři řešení vznikla díky malému počtu iterací v optimalizaci průřezu. Při zvýšení počtu iterací u těchto konkrétních jedinců se průřezy zmenší, čímž se zvětší deformace a tato řešení přestanou vybočovat. Větší počet iterací poskytující dobré výsledky i v těchto třech případech však dvojnásobně prodlužuje výpočetní čas. Jelikož je počet iterací nedostatečný jen pro velmi málo řešení, je efektivnější přezkoumání takovýchto extrémů po simulaci zvlášť, než prodlužovat výpočetní čas všech řešení zvýšením iterací při optimalizaci průřezu, jelikož to pro naprostou většinu znamená pouze prodloužení výpočtu. Pokud by počet řešení, pro které jsou iterace nedostatečné byl větší, bylo by potřeba již algoritmus upravit. Tato neplatná řešení by příliš mátna evoluci a zpomaloval by se tak progres celé evoluce.

Zbylá řešení jsou rozdělena do 3 shluků. Při nastavení jiného počtu shluků by se však přerozdělila. Roztřídění je pouze na základě fitness hodnot. Jednotlivé fenotypy mohou být tedy velmi odlišné, ale pro jejich podobné fitness hodnoty to není patrné. K rozklíčování fenotypů je třeba zkoumat výsledný vzhled řešení, nebo jejich genotypy.

Na Obrázku 6.9 jsou vidět genotypy všech pareto-optimálních řešení. Každý řádek představuje jedno řešení. Každý sloupec potom jeden gen. Pro lepší orientaci je číselným hodnotám genů přiřazena barva. V tomto případě se jedná pouze

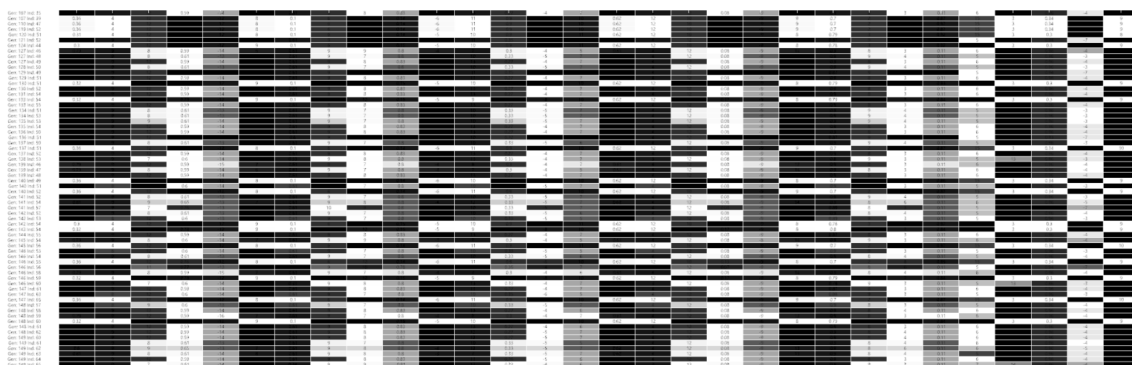




Obrázek 6.8: Shluková analýza pareto-optimálních řešení

o černobílé spektrum. To totiž nejlépe ukazuje dvě rozdílné skupiny genotypů. Při pohledu například na první dva sloupce je vidět, že 17 řádků je bílých a zbylých 49 řádků černých. Tyto dvě skupiny si zachovávají svou vzájemnou rozdílnost i ve zbylých 28 genech.

Z každé této skupiny podobných fenotypů bylo vybráno jedno reprezentativní řešení. Fenotypy jsou si ve větvi velmi podobný. U zhruba poloviny fenotypů nejde rozlišit rozdíly pouhým pohledem. Jelikož jsou všechna řešení pareto-optimální, byl výběr proveden již pouze na základě estetiky. Kdyby však řešení byla vybrána náhodně, vypadala by velmi velmi podobně.



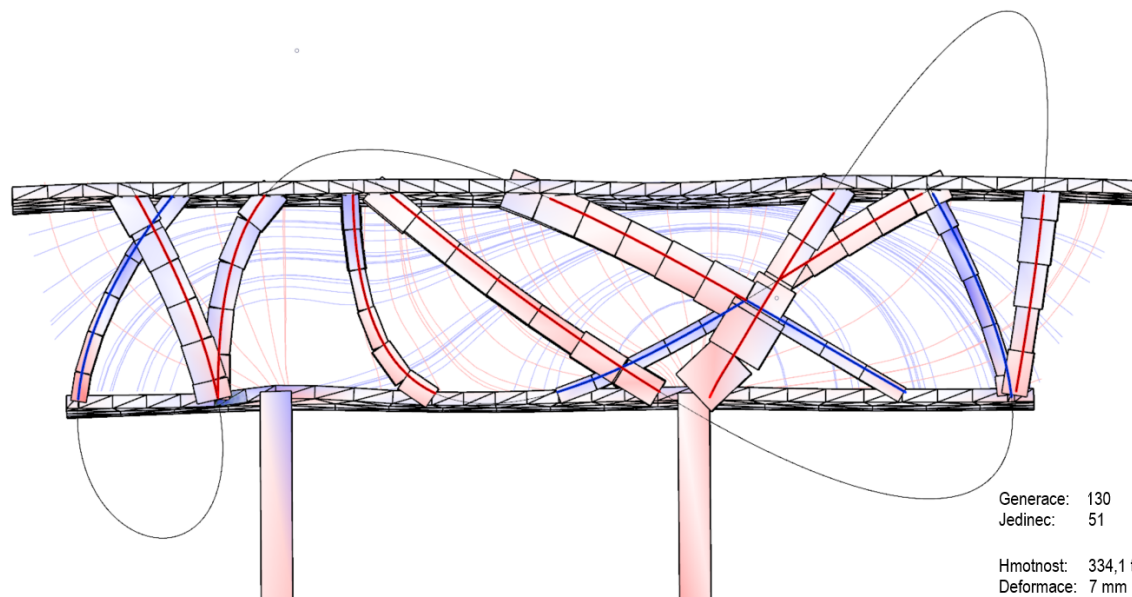
Obrázek 6.9: Vyobrazení genů pareto-optimálních řešení

### Nejlepší řešení

Vybrané řešení z menší, 17 členné skupiny, je vidět na Obrázku 6.10. Řešení je pro lepší pochopení statického chování vykresleno v mírně zdeformovaném stavu.

Zbarvení modelu je dle využití  $\pm 100\%$ . Pro orientaci, jak geometrie vznikla jsou vykresleny také Bézierovy křivky.

V pozadí jsou slabě vykresleny modré a červené trajektorie hlavních napětí. Bézierovi křivky mají v prostoru modelu také modrou nebo červenou barvu podle toho, jestli reprezentují tah nebo tlak.

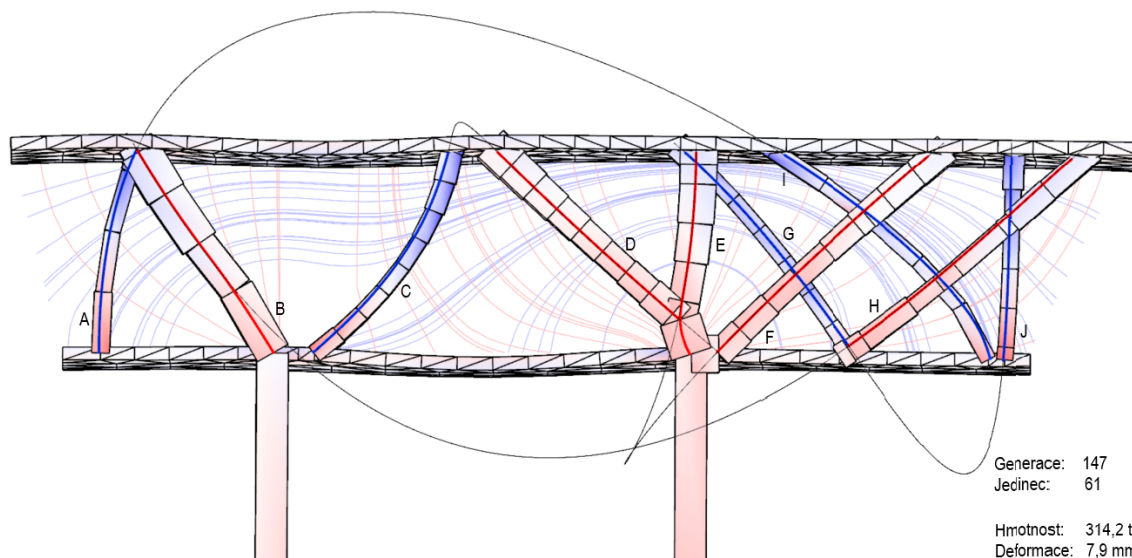


Obrázek 6.10: Vybrané řešení z menší skupiny podobných fenotypů v rámci pareto-optimalních řešení

Řešení vybrané z větší skupiny podobných fenotypů je vidět na Obrázku 6.11. Je vidět, že Bézierovy křivky jsou naprosto odlišné a nepatří tak do stejných vývojových skupin. I zde jsou podkresleny trajektorie hlavních napětí pro lepší porovnání podobnosti.

Ačkoliv se podle kritérií nedá rozhodnout, které z těchto dvou řešení je lepší, lze toto rozhodnutí učinit na základě estetického hlediska. Za nejlepší je tedy považováno 61. řešení z 147. generace, jehož maximální deformace při zatěžovací kombinaci MSÚ je 7,9 mm a celková hmotnost činí 314,2 t.

Ačkoliv křivky které definují geometrii konstrukce měly obrovskou volnost je patrné, že obě konstrukce optimalizované evolučním algoritmem se geometricky podobají trajektoriím hlavních napětí. Nalezené řešení pravděpodobně není nejoptimálnější ze všech možných, rozhodně však poskytuje užitečnou alternativu ke konvenčním pravidelným geometriím. Argumentem pro užití optimalizačního algoritmu může být i fakt, že ani přes snahu nalezení nejlepšího řešení manuálním způsobem, s využitím veškerého inženýrského citu a zkušeností získaných několikaletým studiem staveních konstrukcí, se nedaří najít lepší řešení než algoritmu.



Obrázek 6.11: Řešení vybrané jako celkově nejlepší

### 6.3 Ověření dimenzovatelnosti

Nejlepší vazník je posouzen ve vybraných bodech A–J vyznačených na Obrázku 6.11. Pro celý vazník jsou navrženy dva průřezy. Prvky více namáhány tlakem jsou tvořeny větším průřezem. To odpovídá dílcům B, D, E, F. Pro zamezení vzpěru je průřez dostatečně masivní. Zbylé dílce A, C, G, H, I, J jsou tvořeny průřezem menším. Tyto dva průřezy byly importovány do programu IDEA StatiCa 22.0, kde bylo navrženo jejich vyztužení a po zadání vnitřních sil byl proveden posudek.

#### 6.3.1 Zatížení

Jelikož se jedná o optimalizaci v rané fázi návrhu, je působící zatížení zjednodušeno na pouhé tři zatěžovací stavy. Tyto tři stavy jsou vlastní tíha (ZS1), stálé zatížení (ZS2) a užitné zatížení (ZS3). Vlastní tíha železobetonové konstrukce je počítána z objemové hmotnosti železobetonu o hodnotě  $\gamma_c = 2500 \text{ kg/m}^3$ . Charakteristická hodnota stálého zatížení pro podlahu je  $g_k = 3 \text{ kN/m}^2$ , pro střechu potom  $g_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ . Jelikož se jedná o obytnou budovu, je charakteristická hodnota užitného zatížení pro podlahu  $q_k = 2 \text{ kN/m}^2$ . Střecha není pochozí, a tak je uvažováno pouze servisní zatížení s charakteristickou hodnotou  $q_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$ .

Pro ověření mezního stavu únosnosti a použitelnosti jsou vytvořeny kombinace dle normy ČSN EN 1990 [45].

- $MSÚ = 1,35 * ZS1 + 1,35 * ZS2 + 1,5 * ZS3$
- Charakteristická =  $1 * ZS1 + 1 * ZS2 + 1 * ZS3$

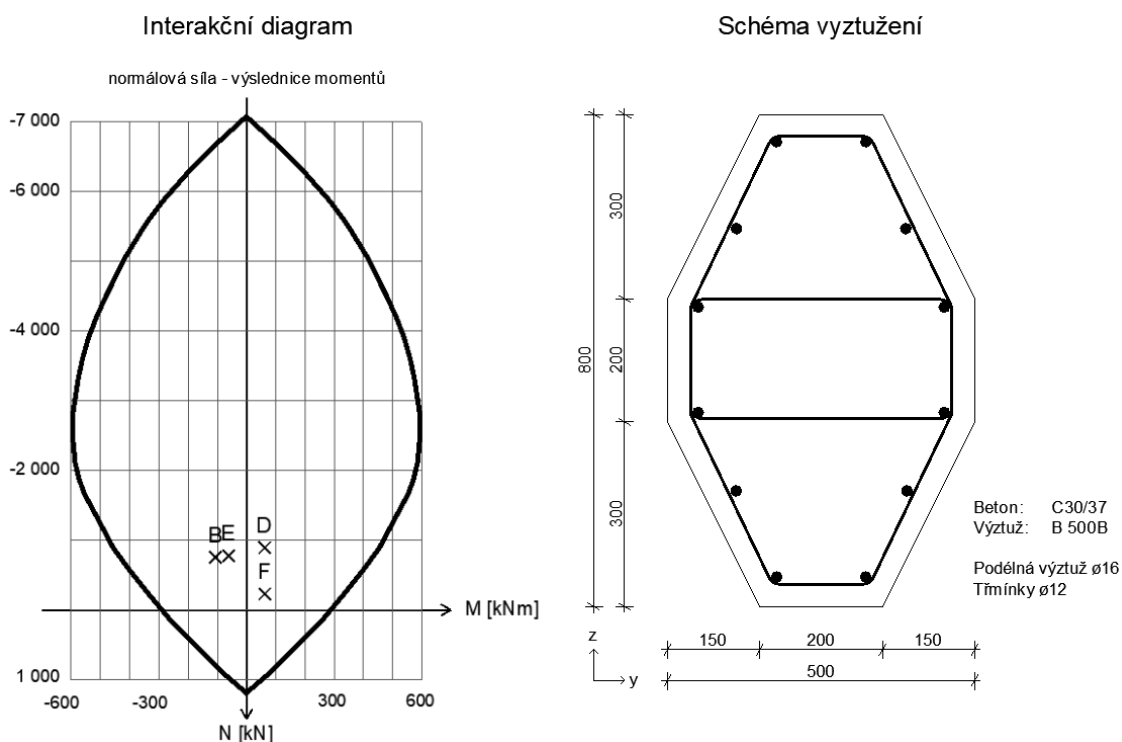
- Kvazistálá =  $1 * ZS1 + 1 * ZS2 + 0,3 * ZS3$  (podlaha) +  $0 * ZS3$  (strop)

### 6.3.2 Posudek

Schéma vyztužení většího průřezu je vidět v pravé části Obrázku 6.12. Levá část ukazuje interakční diagram, ve kterém jsou vyznačeny body pro všechny dílce tohoto průřezu. Jednotlivé hodnoty vnitřních sil při zatěžovací kombinaci MSÚ jsou uvedeny v první části Tabulky 6.1. V druhé části této tabulky jsou potom vidět využitelnosti MSÚ a MSP. Interakční diagram a tabulka dokazuje, že navržený průřez je dimenzovatelný.

Dílec	Vnitřní síly při MSÚ						MSÚ				MSP	
	N kN	V <sub>z</sub> kN	V <sub>y</sub> kN	M <sub>t</sub> kNm	M <sub>y</sub> kNm	M <sub>z</sub> kNm	Únosnost N-M-M	Smyk	Kroucení	Interakce	Omezení napětí	Šířka napětí
B	-757,5	-68	68,1	-3,8	-1,4	106,8	24,8%	43,3%	3,5%	47,4%	38,9%	0%
D	-892,5	46,4	-22,8	-21,3	59,6	25,4	16,5%	13,4%	19,4%	20,1%	25%	0%
E	-781,1	86,1	68,1	-1,2	-0,7	-63	17,5%	54%	1,1%	54%	28,2%	0%
F	-234,4	78	2,5	-22,0	0,8	25,5	6,3%	65,5%	20%	89,2%	10%	0%

Tabulka 6.1: Posudek většího průřezu



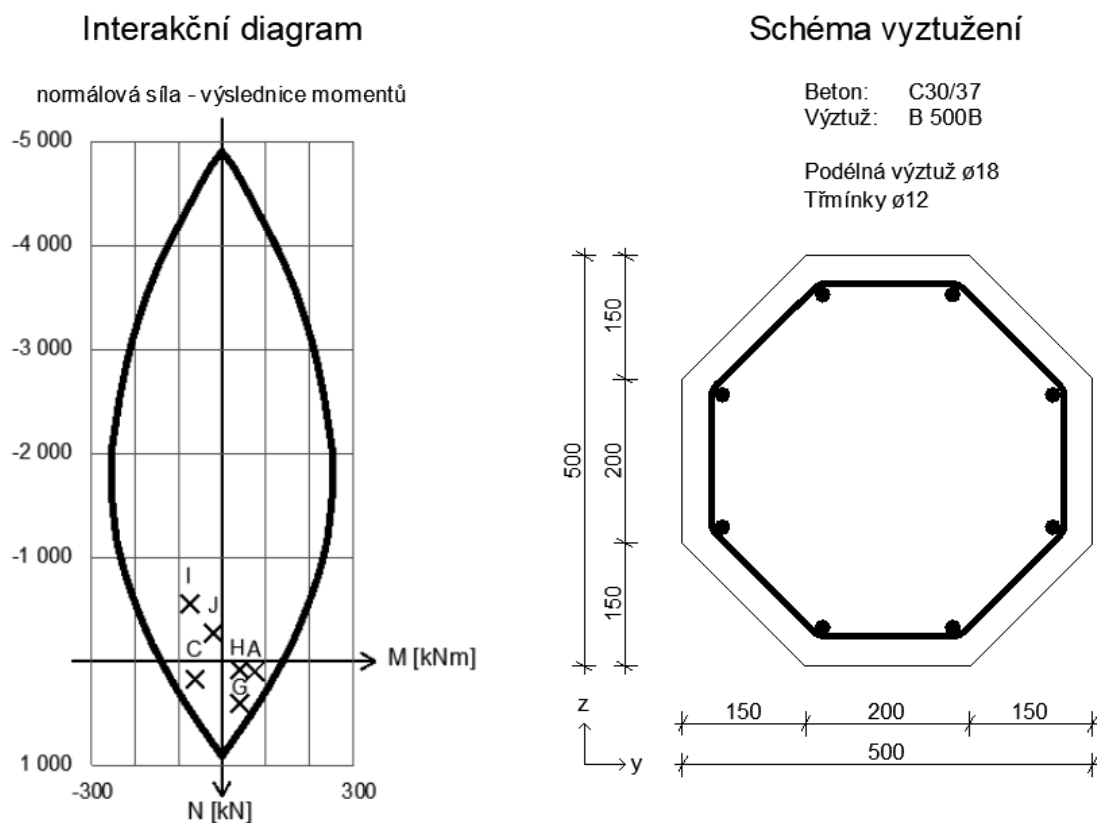
Obrázek 6.12: Interakční diagram a schéma vyztužení většího průřezu

Schéma vyztužení menšího průřezu je vidět v pravé části Obrázku 6.13. Levá část obrázku ukazuje interakční diagram, ve kterém jsou vyznačeny body pro všechny

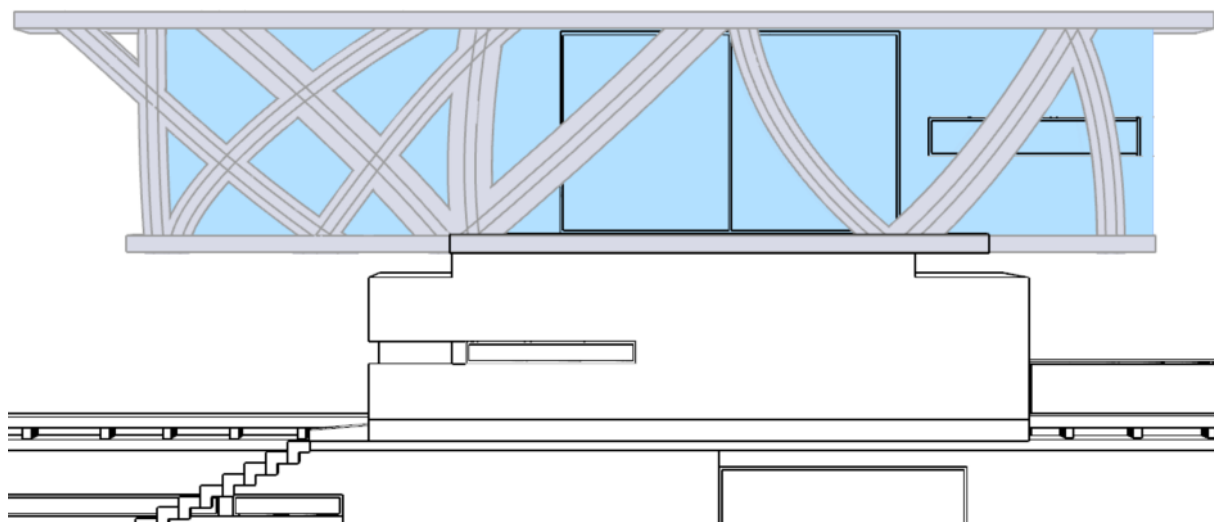
dílce tohoto průřezu, analogicky jako pro větší průřez. V Tabulce 6.2 jsou opět uvedeny vnitřní síly a využitelnosti. Ani pro menší průřez žádná z hodnot nepřesahuje maximální hodnotu, což dokazuje že navržený průřez je bez problému dimenzovatelný.

Dílec	Vnitřní síly při MSÚ						MSÚ				MSP	
	N kN	Vz kN	Vy kN	Mt kNm	My kNm	Mz kNm	Únosnost N-M-M	Smyk	Kroucení	Interakce	Omezení napětí	Šířka trhlin
A	101,5	32	41,8	11,6	20,2	-72,2	51,8%	63%	20,5%	80%	74,2%	61,9%
C	169,5	-43,5	32,6	-6,9	-42	-49,9	52,2%	72,4%	12,2%	90,2%	45,9%	46,6%
G	408,8	56,3	-15,2	-11,3	33,1	27,2	65,3%	61,2%	20,0%	93,3%	68,7%	86,4%
H	87,3	-8,7	41,8	0,2	3,8	41,7	31,8%	33,8%	0,4%	45,3%	12,8%	0%
I	-551,3	45	31,5	-14,5	-71,5	24	24,4%	35,7%	25,7%	73%	40,5%	0%
J	-269,0	5,3	25,2	13,6	-9,7	-18	8,3%	15,9%	24,1%	36,5%	10,7%	0%

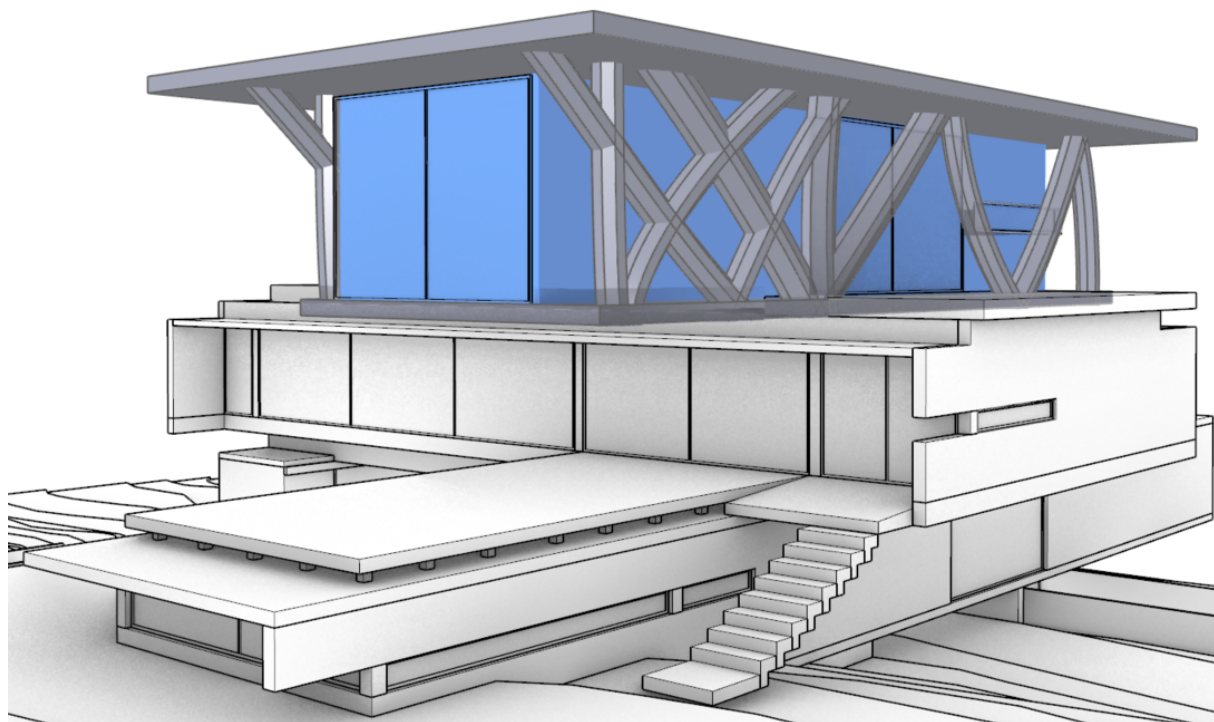
Tabulka 6.2: Posudek menšího průřezu



Obrázek 6.13: Interakční diagram a schéma vyztužení menšího průřezu



Obrázek 6.14: Severozápadní pohled na výslednou konstrukci



Obrázek 6.15: Severní pohled na výslednou konstrukci

# Kapitola 7

## Stínění lamelami

### 7.1 Proč právě lamely

Jedním ze spojujících prvků Krukovi architektury je krom hranatých tvarů, velkých oken, pohledového betonu a značného předsazení jednotlivých částí, také velký důraz na precizní stínění. Vyskytuje se na všech úrovních všech jeho staveb, a to od orientace domu, přes samotný tvar domu, až po jednotlivé dílčí stínícími prvky. Okna nebývají ani při příznivé orientaci bez stínících prvků. Menší okna chrání vertikální, horizontální nebo i kombinované rohové konzoly prodlužující jednotlivé hlavní tvary domu. Toto částečné zapuštění oken tak přináší významné stínění při ponechání většiny výhledu do okolí. Širší otvory, pro které by tyto konzoly již nebyly dostatečné, bývají doplněny vertikálními lamelami. Na Obrázcích 7.1 a 7.2 lze vidět, jak vypadají lamely navržené Lucianem Krukem. Právě častý výskyt lamel byl podnětem pro jejich zahrnutí do diplomové práce.



Obrázek 7.1: Lamely na Casa Cariló[41]



Obrázek 7.2: Lamely na Casa BLQ[41]

Základní inspirace tedy vychází z reálného stavu. Osazení lamel na na jihozápadní straně prostředního boxu je vidět na Obrázku 7.3.

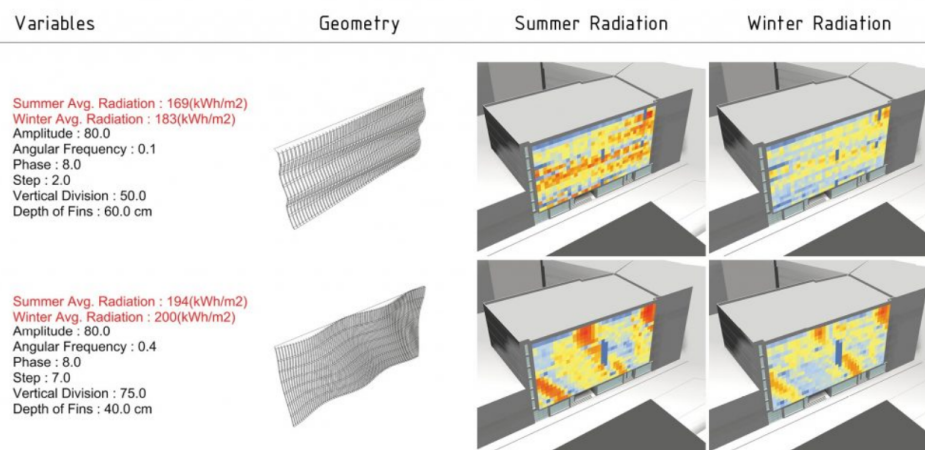
Cílem je vytvořit a následně optimalizovat parametrický design lamel z hlediska stínění slunce a pohledu skrz.



Obrázek 7.3: Originální stínící prvky na Casa Golf [41]

Návrh parametricky řízených lamel tvořící fasádu vytvořila již například architektonická kancelář Mustafa Teksoy Architecture & Design [46]. Jejich práce však nehledá nejlepší řešení, pouze porovnává několik vybraných variant z hlediska letní a zimní radiace.





Obrázek 7.4: Ukázka porovnání vybraných variant lamel architektonickou kancelář Mustafa Teksoy Architecture & Design [46]

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Průměrná denní teplota [°C]	20	20	19	16	13	10	9	10	11	14	16	19

Tabulka 7.1: Průměrná denní teplota v Pinamaru [48]

## 7.2 Klimatické podmínky

Stavba je umístěna v těsné blízkosti Argentinského Pinamaru. Pinamar je přímořský resort na břehu Atlantského oceánu, ležící na 37. rovnoběžce jižní šířky. Zdejší podnebí se klasifikuje jako vlhké subtropické (Cfa) až oceánské (Cfb). [47]. Celkově by se dalo označit za mírné s mírnou zimou a teplým až horkým létem, bez výrazného období sucha během celého roku. Jednotlivé průměrné denní teploty jsou uvedeny v Tabulce 7.1. Vzhledem k tomu, že se jedná o jižní polokouli, je zde léto a zima v opačných částech roku, než je tomu na severní polokouli. Teploty zde nedosahují velkých extrémů. Mráz se zde téměř nevyskytuje. Všeobecně by se dalo říct, že je větší problém s horkem než se zimou.

To je mimo jiné patrné i z Krukovi architektury. Jeho stavby nejsou příliš tepelně izolované. Velmi často se jedná pouze o pohledový beton bez jakéhokoliv kontaktního zateplovacího systému, sendvičové konstrukce, nebo jiné formy izolace. Malý důraz na izolaci domu však neznamená, že by během zimy nebylo potřeba vytápět vůbec. Solární zisky během zimního období jsou i v těchto zeměpisných šířkách velice žádoucí.

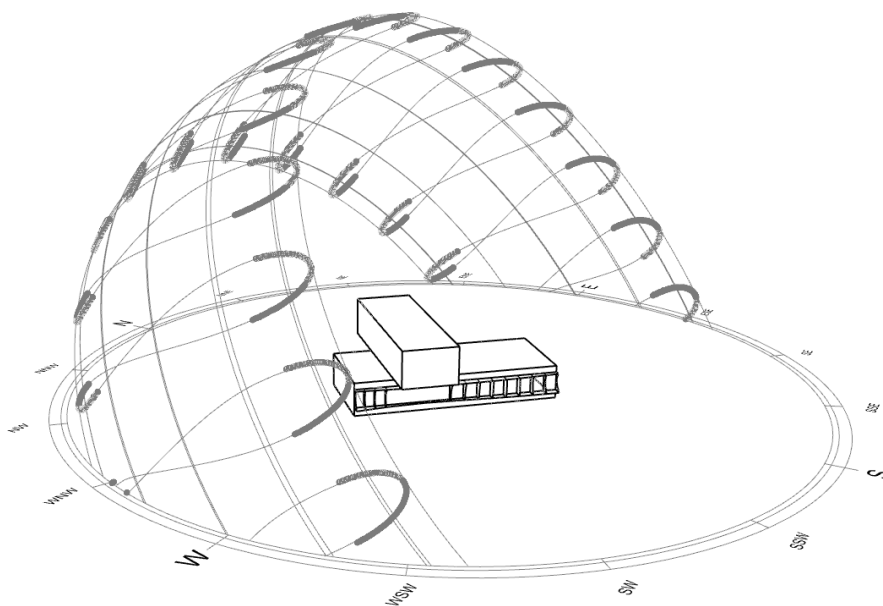
## 7.3 Solární zisky

Tepelný komfort je jedním z hlavních požadavků při užívání budovy. Lidem není příjemné přílišné teplo, ale ani zima. Je tedy třeba držet teplotu v interiéru na přiměřené úrovni. Díky tomu je nutné během zimního období budovy vytápět. Naopak během letního období je často potřeba přehřátý prostor chladit. Jak chlazení, tak vytápění je energeticky velmi náročné a tvoří velmi významnou část nákladů spojených s užíváním budovy. Je tedy snaha redukovat tuto potřebu. Jednou z hlavních potřeb je tepelná izolace obálky budovy. Jsou zde ale i další aspekty. Slunečním zářením je spousta energie, se kterou by měl návrh budovy pracovat. Zejména díky skleníkovému efektu poskytují velké prosklené plochy značné solární zisky a velmi tak mohou ohřívat interiér. Jestli jsou tyto zisky žádoucí nebo nežádoucí, závisí především na ročním období. V létě, kdy je v exteriéru teplo, je další ohřívání interiéru nežádoucí, a je tak snaha tyto zisky eliminovat. Naopak v zimním období je žádoucí díky solárním ziskům snížit potřebu vytápění. Vhodný návrh zahrnující solární zisky může velmi snížit energetickou náročnost budovy, což je zřejmý cíl nejen jednotlivců, ale i celé společnosti. O tom jak, moc velkou roli hraje v slunce v energetické náročnosti budov, rozhoduje zeměpisná poloha a s ní spojené klimatické podmínky.

### 7.3.1 Sluneční dráha

Poloha slunce na obloze se mění v závislosti na denní době, fázi roku a poloze pozorovatele na Zemském povrchu. Slunce díky rotaci Země putuje každý den po obloze od východu na západ. Severní polokouli obíhá v poledních hodinách z jihu, naopak jižní polokouli ze severu. To je zapříčiněno natočením osy spojující severní a jižní pól, okolo které se Země otáčí. Díky natočené zemské ose se také během roku mění přiklonění, respektive odklonění severní, respektive jižní polokoule ke slunci. V závislosti na tom, která z polokoulí je právě přikloněna ke slunci, se střídá zima s létem. Od prosince do března, kdy je jižní polokoule přikloněna, a slunce tak vystoupá vysoko na oblohu odkud svítí kolmo na zem, je na jižní polokouli léto. Naopak na severní polokouli je slunce nízko na obloze a je zde zima. Od června do září je přikloněna ke slunci severní polokoule, na které je tak léto, zatímco na severní je v této části roku zima. Tento efekt se zvětšuje s narůstající vzdáleností od rovníku. Na rovníku nezpůsobuje přiklonění severní nebo jižní polokoule střídání léta se zimou. Naopak v polárních oblastech je tento efekt tak výrazný, že v část zimy slunce vůbec nevychází a naopak část léta nezapadá. [49]

Tepelný komfort je jedním z hlavních požadavků při užívání budovy. Lidem není příjemné přílišné teplo, ale ani zima. Je tedy třeba držet teplotu v interiéru na přiměřené úrovni. Díky tomu je nutné během zimního období budovy vytápět. Naopak během letního období je často potřeba přehřátý prostor chladit. Jak chlazení, tak vytápění je energeticky velmi náročné a tvoří velmi významnou část nákladů spojených s užíváním budovy. Je tedy snaha redukovat tuto potřebu. Jednou z hlavních potřeb je tepelná izolace obálky budovy. Jsou zde ale i další aspekty. Slunečním zářením je spousta energie, se kterou by měl návrh budovy pracovat. Zejména díky skleníkovému efektu poskytují velké prosklené plochy značné solární zisky a velmi tak mohou ohřívat interiér. Jestli jsou tyto zisky žádoucí nebo nežádoucí, závisí především na ročním období. V létě, kdy je v exteriéru teplo, je další ohřívání interiéru nežádoucí, a je tak snaha tyto zisky eliminovat. Naopak v zimním období je žádoucí díky solárním ziskům snížit potřebu vytápění. Vhodný návrh zahrnující solární zisky může velmi snížit energetickou náročnost budovy, což je zřejmý cíl nejen jednotlivců, ale i celé společnosti. O tom jak, moc velkou roli hraje v slunce v energetické náročnosti budov, rozhoduje zeměpisná poloha a s ní spojené klimatické podmínky.

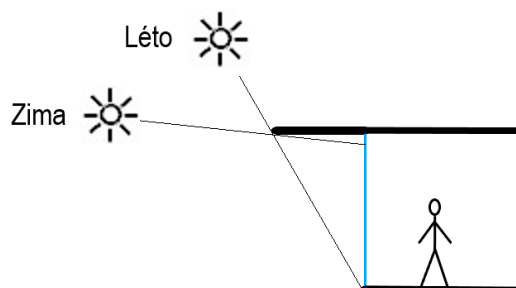


Obrázek 7.5: Rozdílná poloha slunce v závislosti na denní době a ročním období

### 7.3.2 Stínění

Efektivnější je umístění stínících prvků v exteriéru, jelikož slunce, které projde oknem již ohřívá interiér, což je nežádoucí. Z rozdílné polohy slunce na obloze vyplývají

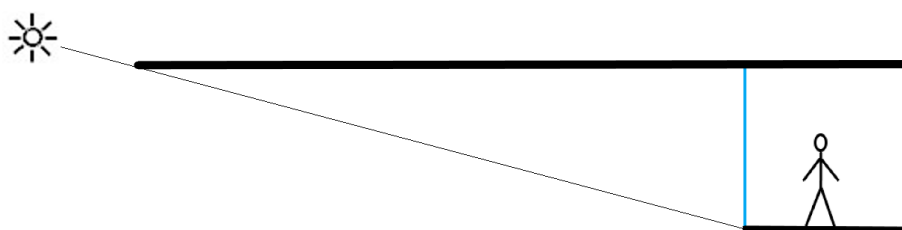
i rozdílné strategie stínění. Jižní fasády na severní polokouli a severní fasády na jižní polokouli, na které dopadá slunce během poledních hodin je nejvhodnější stínit exteriérovou horizontální clonou. Letní slunce je velmi vysoko na obloze a tato clona ho tak velmi efektivně odstíní. Naopak nízkému zimnímu slunci není bráněno a může ohřívat interiér, jak je vidět na Obrázku 7.6.



Obrázek 7.6: Vliv ročního období na potřebu stínění

Stínění východní a západní je často náročnější než stínění severní a jižní. Nízké slunce v ranních a večerních hodinách nelze příliš stínit horizontálními prvky. Obrázek 7.7 ukazuje, že pro potřebné zastínění nízkého slunce horizontální clonou by bylo zapotřebí nepřijatelné délky této konzoly.[50] Cestou pro stínění jsou tedy vertikální stínící prvky, které mohou být z exteriéru velmi kvalitně navrženy z hlediska stínění i estetiky. Omezení uživatelů na jejich výhledu z interiéru je ale zjevné.

Výše popsané jevy jsou pravidelné a je možné podle nich stínící prvky naplánovat. Počasí je však nepravidelné. Oblačnost, nebo změna studené a teplé fronty může měnit potřebu stínění během celého roku. Tomuto faktu se lépe přizpůsobují aktivní stínící prvky. Ty však nejsou tématem této práce. Snahou je navrhnout pasivní stínění tak, aby co nejvíce vyhovovalo po celý rok.



Obrázek 7.7: Stínění nízkého slunce horizontálním prvkem

## 7.4 Tvorba lamel

Lamely jsou vytvořeny na základě 16 parametrů, které vstupují jako geny do evolučního algoritmu. Jak je z genotypu daného jedince vytvořen jeho fenotyp, je vidět na

Obrázku 7.8.

1. V prvním kroku je vytvořena křivka pro rozmístění lamel. Křivka je tvořena 4 parametry, jedná se o posun 4 bodů ve směru šipky v rozmezí 0–15 m. Na křivce jsou následně rozmístěny jednotlivé body ve vzdálenosti 1,5 m. Výjimku tvoří vchod na terasu, kde se body nerozmisťují vůbec. Každý bod reprezentuje jednu lamelu. Celkový počet lamel tedy závisí na délce křivky.
2. V druhém kroku jsou rozmístěny lamely podle průmětu bodů na úsečku v místě nadpraží. Lamely jsou poté vytvořeny podle výšky okna, tedy 2 m. Šířka lamel byla zvolena 1 m.
3. V třetím kroku jsou vytvořeny 3 křivky obdobně jako v kroku 1. Jedna je ve výšce spodní hrany okna, druhá uprostřed okna a třetí na jeho horní hraně. Každá z 3 křivek je opět tvořena 4 body. Celkem je tedy 12 parametrů, které umožňují posun bodů ve směru šipky v rozmezí 0,2-1 m. (Maximální šířka lamely je tedy 1 m, minimální potom 20 cm)
4. Ve čtvrtém kroku je z křivek z bodu 3 vytvořena plocha, podle které jsou ořezány lamely z bodu 2.
5. V posledním kroku jsou již vidět rozmístěné a ořezané lamely. Horní a spodní strana lamel je ještě doplněna o horizontální desku kopírující šířku lamel.

Takto je tedy vytvořena geometrie, která je následně posuzována podle jednotlivých kritérií.

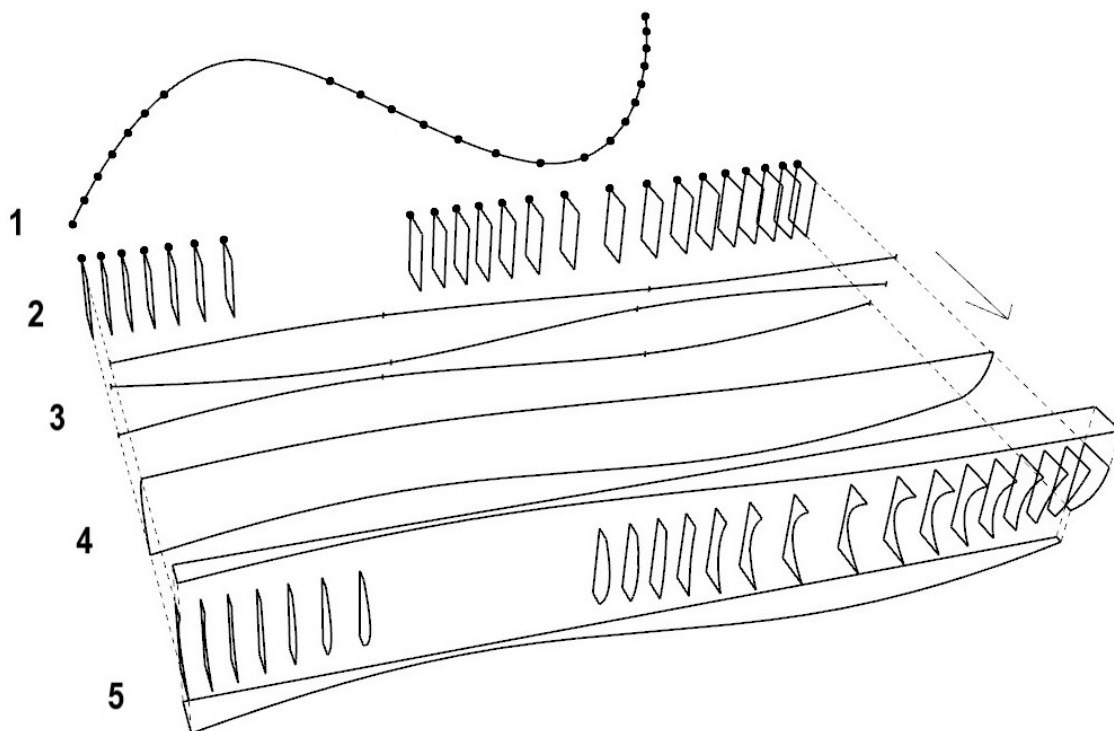
## 7.5 Kritéria

Cílem je lamely rozmístit a vytvarovat optimálně pro užívání vnitřního prostředí. To je v této práci definováno 4 kritérii. Konkrétně tedy solárními zisky v létě, solárními zisky v zimě, výhledem do okolí z interiéru a soukromím které lamely poskytují.

Pro zjištění, k jakým výsledkům vedou jednotlivá kritéria bylo použito dílčích úloh. Jedině tak je možné mít plnou kontrolu nad finální multikriteriální optimalizací.

Pro získání fitness hodnot jednotlivých kritérií je využíváno komponent open source pluginu Ladybug, nástroje pro environmentální analýzu.

Komponenta *Dopadající záření* (*incident radiation*) načte matici oblohy, která popisuje polohu slunce a následně vypočte dopadající záření na zvolenou geometrii s přihlédnutím na stínění okolním prostředím. Výpočet posuzuje prostup kolize



Obrázek 7.8: Schéma vytvoření lamel

vektorů reprezentující záření s kontextem, který stíní danou geometrii. Výpočet obsahuje přímou a rozptýlenou složku záření. Nezahrnuje ale už odrazy slunečního záření od geometrie, což je však pro tuto práci dostatečné. Pro podrobnější analýzu zahrnující odražené záření od okolní geometrie by bylo nutné použít Honeybee radiance.

Je třeba pro simulaci získat data obsahující hodnoty radiace v požadované lokalitě. V mapě na stránkách LadybugTools je možné vyhledat a stáhnout klimatická data z mnoha lokalit a různých původních formátů konvergovaných do formátu *.epw*, který využívá Ladybug.[51] Jelikož data přímo pro Pinamar nebyla nalezena, jsou využita data z Uruguayského Montevidea. Geograficky bližší data byla k dispozici pro Buenos Aires. Vzhledem však většímu obklopení pevninou je podobnější klima právě v Montevideu. V Tabulce 7.2 je vidět, že hodnoty radiace v Montevideu se příliš neliší od hodnot v Pinamaru, a tak je možné s nimi pracovat bez úprav.

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Buenos Aires [kWh]	7,6	6,7	5,5	4,1	3,0	2,5	2,7	3,6	4,8	6,2	7,3	7,8
Montevideo [kWh]	7,7	6,7	5,5	4,0	2,9	2,4	2,6	3,4	4,7	6,1	7,3	7,9
Pinamar [kWh]	7,7	6,7	5,3	3,8	2,6	2,1	2,3	3,2	4,5	6,0	7,2	7,8

Tabulka 7.2: Celková denní krátkovlnná sluneční energie dopadající na  $m^2$  v Buenos Aires, Montevideu a Pinamaru [48], [52], [53]

Komponenta *Výhled (view percent)* hodnotí procentuální výhled do okolí z daného místa přes určitý kontext. Metoda je založena na vyhodnocení průniku paprsků skrz daný kontext. Je možné posoudit výhled 360° pouze v horizontální rovině, nebo v horizontálním pásu  $\pm 30^\circ$  vertikálně. Tato varianta lépe odpovídá vnímání okolí lidským okem.

Komponenta *Viditelnost (visibillity percent)* hodnotí viditelnost posuzovaných bodů z určité geometrie skrz kontext. V případě viditelnosti všech bodů je tedy hodnota 100 %. [54], [55]

### 7.5.1 Létno – stínění

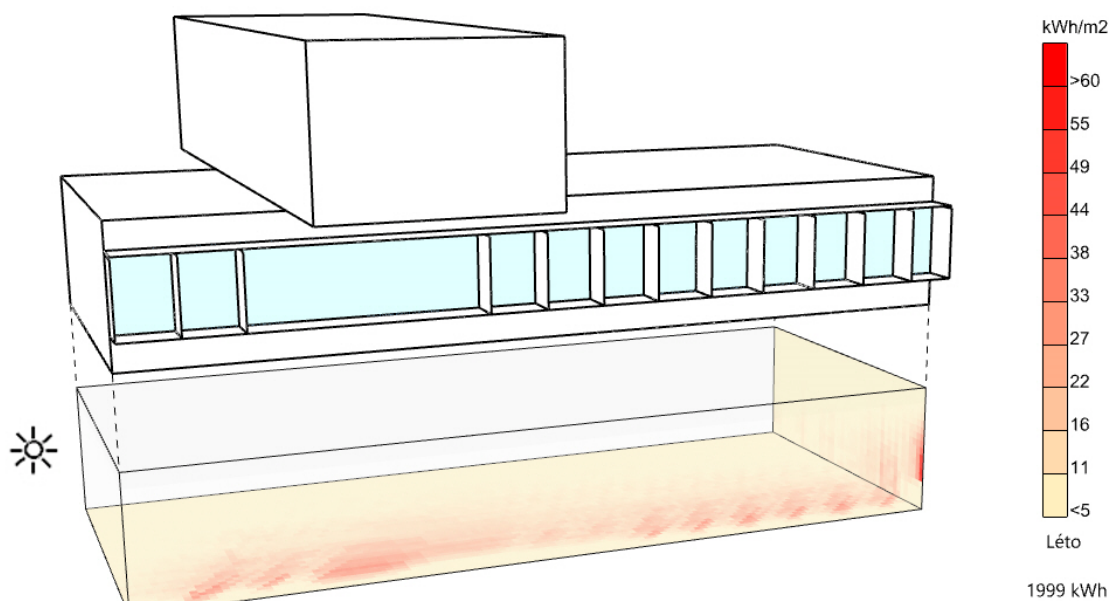
Prvním kritériem jsou solární zisky během letního období, které je snaha minimalizovat, aby nedocházelo k přehřívání interiéru, a snížila se tak potřeba chlazení. Posuzována je tedy energie dopadající na podlahu a vnitřní severně orientovanou stěnu v období 1. 11. – 1. 2. Pro simulaci je použita komponenta dopadající záření. Velikost posuzované sítě na podlaze a stěně je 200 mm. To je dostatečná jemnost pro omezení zkreslení vzniklého přílišným průměrováním osluněných a stíněných míst. Vektory reprezentující sluneční paprsky jsou nastaveny na nejvyšší hustotu a tedy i přesnost simulace, ve snaze zabránit průměrování, obdobně jako u velikosti sítě.

Obrázek 7.9 ukazuje množství dopadající energie na zvolenou geometrii za pomoci barevné škály od žluté až po červenou. Energie dopadající na podlahu blíže k oknům je větší, a tedy červenější, než podlaha ve větší vzdálenosti od oken, která je vyobrazena žlutě. Škála barev je absolutní pro celou práci a je tak možné porovnávat navzájem jednotlivá řešení. Rozmezí zvolené od  $5 \text{ kWh/m}^2$  do  $60 \text{ kWh/m}^2$  by mělo umožnit rozlišit jak jednotlivé oblasti v místnosti, tak vzájemně porovnávat jednotlivá řešení.

Do této evoluce nevstupovaly parametry ovlivňující rozmístění lamel, ale pouze parametry ovlivňující jejich ořez. Řešení na Obrázku 7.9 je z hlediska této jednokriteriální optimalizace ideální. Evoluce poměrně rychle konvergovala k maximální ploše lamel, což je při snaze co největšího stínění předvídatelné. Je tedy patrné, že toto kritérium se bude snažit, aby plocha jednotlivých lamel byla vždy co největší.

### 7.5.2 Zima – solární zisky

Druhým kritériem jsou solární zisky během zimního období, které je snaha maximalizovat a snížit tak potřebu vytápění. Posuzována je dopadající energie na stejnou plochu jako v létě, tedy na podlahu a severně orientovanou vnitřní stěnu. Ob-



Obrázek 7.9: Nejlepší řešení pro letní stínění

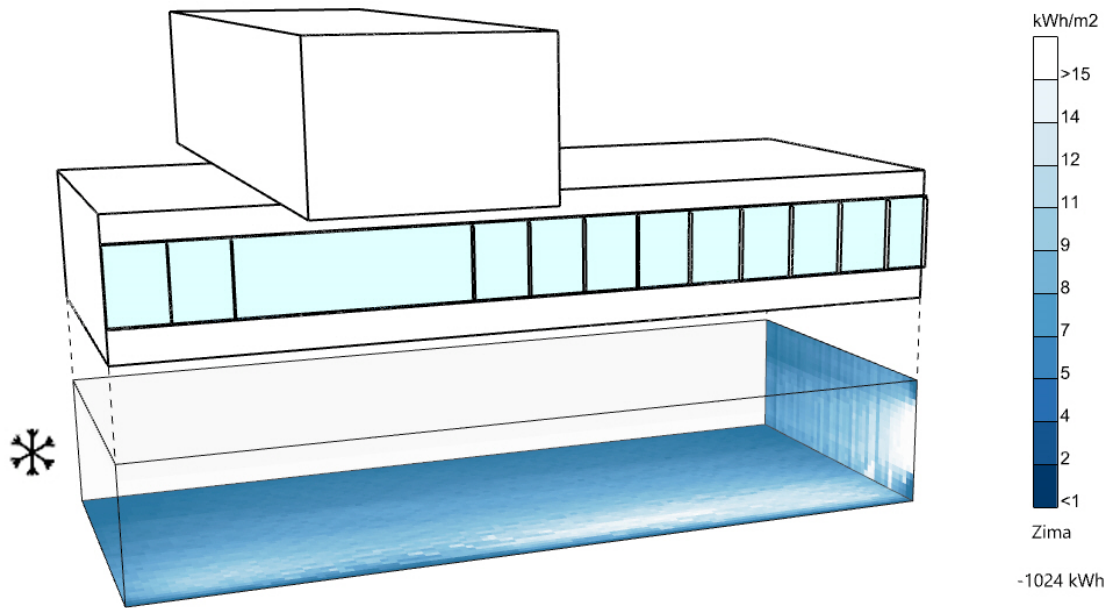
dobí je stejně dlouhé jako v létě a trvá od 1.5 do 1.8. Nastavení simulace je stejné jako pro letní období. Škála barev je od tmavě modré barvy pro hodnoty menší než  $1 \text{ kWh/m}^2$ , až po bílou barvu reprezentující místa, na které dopadne více než  $15 \text{ kWh/m}^2$ . Škála barev je opět jednotná pro celou práci.

Na Obrázku 7.10 je vidět optimální řešení z pohledu tohoto kritéria. Řešení má 20 cm dlouhé lamely, což je minimální délka, na kterou se mohou lamely oříznout. Je tedy jasné, že toto kritérium se bude snažit celkovou plochu lamel co nejvíce minimalizovat.

### 7.5.3 Výhledy

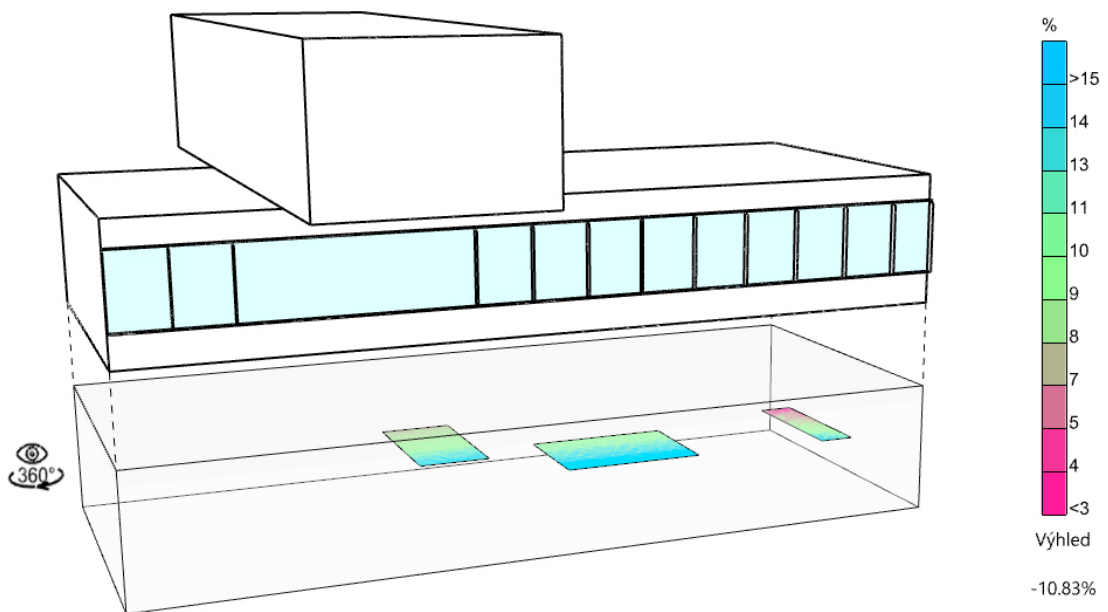
Třetím kritériem je výhled do okolí. Výhled je posuzován pro 3 oblasti, vybrané podle dispozice vnitřních prostor. Jedná se o oblast jídelního stolu vlevo, gauče s křesly uprostřed a menšího gauče vpravo. Plocha reprezentující jídelní stůl je ve výšce 1200 mm nad podlahou a zbylé dvě plochy potom 1000 mm nad podlahou. Toto umístění vychází z výšky očí při sezení na židli, respektive gauči. Pro simulaci je použita komponenta dopadající záření. Posuzované tři zóny jsou posuzovány s 100 mm velikostí sítě. Počet posuzovaných vektorů byl  $3\times$  zvětšen. Hustší počet vektorů vykazuje výrazně plynulejší přechody mezi výsledky na jednotlivých posuzovaných oblastech. Barevná škála je od růžové barvy pro místa, ze kterých je vidět méně než 3 % okolí, přes zelenou, která vykresluje místa s 10 %, až po modrou, reprezentující místa, ze kterých je vidět více než 15 % okolí.





Obrázek 7.10: Nejlepší řešení pro zimní solární zisky

Na obrázku 7.11 je řešení poskytující nejlepší výhled do okolí v horizontálním pásu 7.5. Lamely jsou tak jako v případě zimních solárních zisků oříznuty na minimálních 20 cm. Při použití výhledů pouze v horizontální rovině, se minimalizuje šíře lamel pouze uprostřed, jelikož v této výšce jsou zhruba posuzované oblasti. Šířka lamel nahoře a dole může být však různá, protože na bránění pouze v horizontálním výhledu nemá vliv. Je tedy patrné, že toto kritérium se bude tedy snažit plochu lamel minimalizovat, obdobně jako kritérium zimních solárních zisků.



Obrázek 7.11: Řešení poskytující nejlepší výhled do okolí

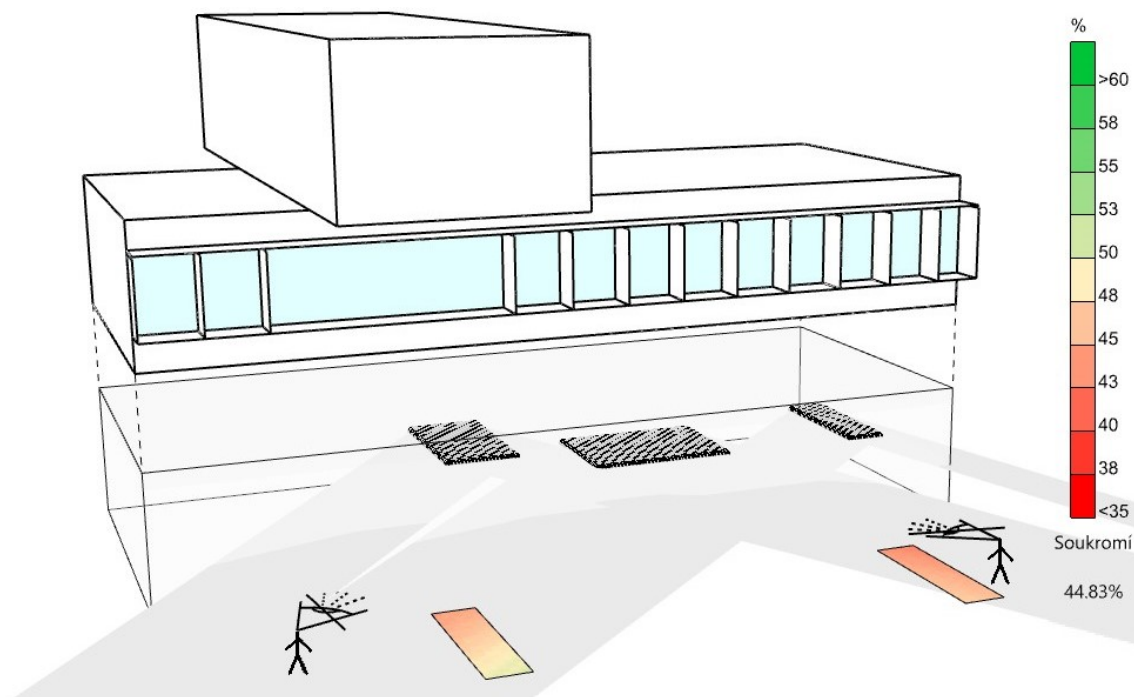
#### 7.5.4 Soukromí

Posledním, čtvrtým kritériem je soukromí, které lamely poskytují lidem uvnitř před lidmi z venku. Posuzovány jsou stejné tři oblasti jako v kritériu výhledů, kde každý 100 mm čtverec sítě představuje jeden bod o kterém je rozhodováno, jestli je přes lamely viditelný z venku, nebo ne. Místa, odkud se viditelnost posuzuje se nacházejí zhruba 40 m od domu. Jedná se o dvě golfová odpaliště přilehlého hřiště. Tato místa byla vyhodnocena jako nejbližší místa s největší koncentrací osob, které by mohly narušovat soukromí obyvatel domu. Tato místa se nacházejí od 4 m níže, než je úroveň podlahy, což zhruba odpovídá skutečnému stavu. Síť popisující tato místa je tvořena čtverci o velikosti 200 mm. Pro simulaci je použita komponenta viditelnost. Všechny místa na odpalištích mají stejnou váhu pro posudek. Viditelnost je vyjádřena v procentech viděných bodů. Jelikož jsou odpaliště relativně vzdálená, musel by pro jejich skutečné zobrazení být obrázek velmi velký. Při zobrazení výsledků jsou tedy posunuta blíže k domu. Pro zachování kontextu vedou od skutečného umístění šedé paprsky. Škála je nastavena od červené barvy pro méně než 35 % až po zelenou barvu pro více než 60 %. Čím je tedy barva více červená, tím větší poskytuje soukromí. Škála barev je pro celou práci stejná a je tak možné pozorovat nejen rozdíly v rámci jednoho řešení, ale i porovnávat jednotlivá řešení navzájem.

Na Obrázku 7.12 je vidět jedno z nejlepších řešení pro soukromí. Nejlepších řešení je více. Vyříznutí lamel v horní části totiž nehraje při posouzení viditelnosti interiéru z míst odpališť vliv. Toto kritérium tedy vede k širokým lamelám v jejich spodku a prostředku. Jedná se tedy o velmi podobné výsledky jako pro kritérium letního stínění.

### 7.6 Kombinace kritérií

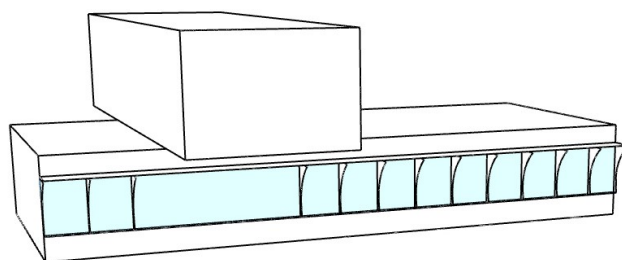
Jednokritériální úlohy potvrdily předpokládatelné chování. Pro stínění v létě a soukromí jsou nejlepší velké lamely. Naopak pro solární zisky v zimě a výhledy je vhodná co nejmenší plocha lamel. Je tedy jasné, že dvoukritériální úloha zahrnující první dvojici povede také k maximální ploše lamel, tak jako obě tyto kritéria. Druhá dvojice naopak povede k minimální ploše lamel, tak jako obě její kritéria. V následujících testech je tedy zkoumáno pouze chování dvojic protichůdných kritérií.



Obrázek 7.12: Řešení poskytující největší soukromí

### 7.6.1 Zima/Léto

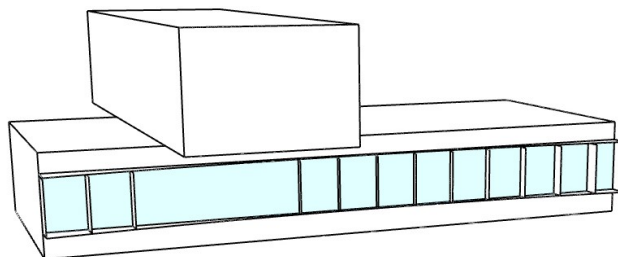
Aby byly tlaky kritérií co nejvíce patrné, jsou v prvním případě lamely ořezány pouze rovnými horizontálními liniemi. Všechny body jedné linie popsané v třetím kroku části 7.4 se posouvají společně. Ořezovou plochu tedy tvoří 3 horizontální křivky, ale 3 horizontální úsečky. Výsledkem tohoto zadání je řešení na Obrázku 7.13. Šířka vrchní části je maximální, naopak prostřední a spodní část jsou minimální. Tento příklad reaguje na fakt, že letní slunce je výš než zimní a clonění shora je tak kompromis který stíní letní slunce, zároveň však část zimního nechá projít dovnitř.



Obrázek 7.13: Zima/léto při ořezání horizontálními úsečkami

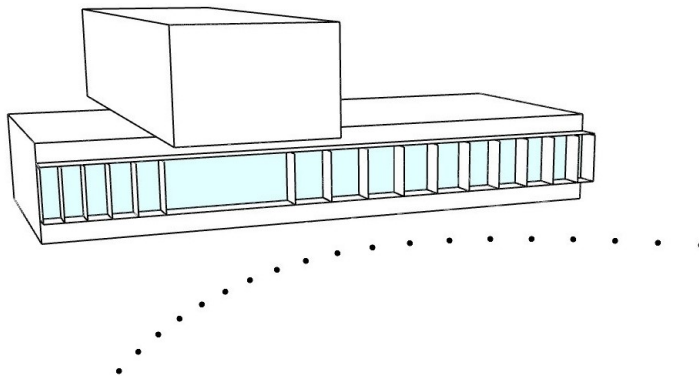
Pro zjištění, jestli evoluce reaguje na tato dvě kritéria rozdílným oříznutím vlevo uprostřed či vpravo byla spuštěna úloha pouze s ořezem umožňující pohyb všech  $n$ -tých řídicích bodů horizontálních křivek současně. Dalo by se tak říct, že ořezovou plochu tvoří 3 horizontální křivky, ale 4 vertikální přímky. Obrázek 7.14 ukazuje

nejlepší řešení. Díky předsazenému hornímu boxu je v prostřední části odstíněno vyšší letní slunce a tak jsou zde lamely úzké, aby nebránily pronikání zimního slunce. Na stranách, kde není letnímu slunci bráněno jsou lamely široké, a stíní tak jak letní, tak zimní slunce. z obrázku to není rozpoznatelné avšak velmi mírně stíní i slunce v pravé části a tak jsou lamely vpravo o trochu menší než lamely vlevo.



Obrázek 7.14: Zima/léto při ořezání vertikálními úsečkami

Obdobný efekt je jako u vertikálního ořezu je vidět na Obrázku 7.15. Jde o úlohu, která nemá možnost lamely ořezávat, pouze pracuje s jejich rozmístěním. Předsazený box nad oknem stíní letní sluníčko v prostřední a mírně i pravé části. Není v nich tedy potřeba taková plocha lamel jako vlevo, kde box nestíní.

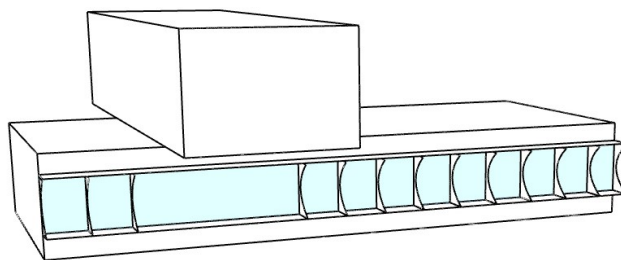


Obrázek 7.15: Zima/léto při rozdílném rozmístění lamel

### 7.6.2 Výhled/Soukromí

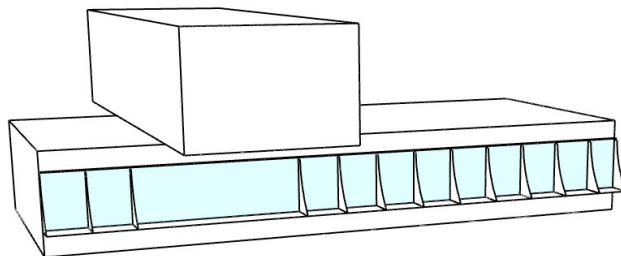
Zde došlo opět k testování horizontální linie a horizontálního pásu výhledu, popsané v sekci 7.5. Pro případ, kdy je umožněn pouze ořez horizontálními liniemi a je posuzován výhled pouze v horizontální linii, vede řešení k vyříznutí lamel uprostřed výšky. Výsledné lamely připomínající písmeno k jsou vidět na Obrázku 7.16.

Výhled/Soukromí při ořezání horizontálními úsečkami a použití horizontální linie výhledu



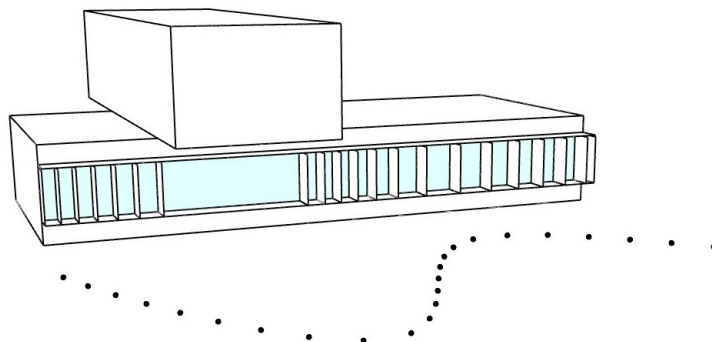
Obrázek 7.16: Výhled/Soukromí při ořezání horiz. úsečkami s linií výhledu

V případě, kdy je umožněn pouze ořez horizontálními liniemi, ale výhled je posuzován v celém horizontálním pásu je ideální řešení tvořeno širokými spodky lamel, díky kterým je zajištěno soukromí. Zbylá část lamel lamel je úzká, a umožňuje tak výhled do okolí, jak ukazuje Obrázek 7.17.



Obrázek 7.17: Výhled/Soukromí při ořezání horiz. úsečkami s pásem výhledu

Případ, kdy je umožněno měnit jen rozmístění lamel, vede k řešení na Obrázku 7.18. Lamely jsou rozmístěny hustě s výjimkou pravé prostřední čtvrtiny. Důvod k tomuto rozmístění je zřejmý. Jelikož odpalovací plochy jsou na krajích, k poskytnutí soukromí slouží nejvíce lamely právě na stranách. V blízkosti ploch ze kterých je posuzován výhled jsou lamely řídké a nebrání tak výhledu.

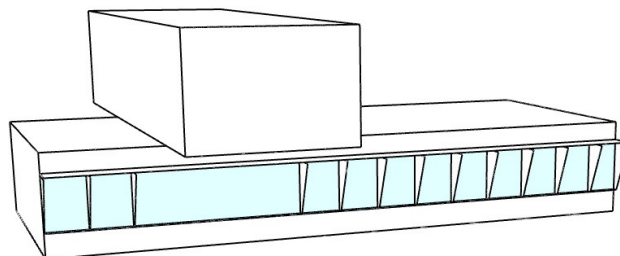


Obrázek 7.18: Výhled/Soukromí při rozdílném rozmístění lamel

### 7.6.3 Výhled/Léto

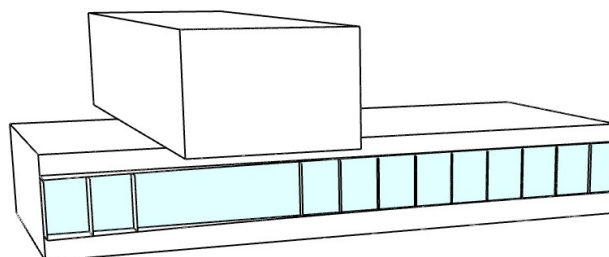
Další dvojicí protichůdných kritérií je letní stínění a výhled.

V případě ořezávání plochou tvořenou horizontálními úsečkami a analýze výhledu pouze v rovině horizontu je vede optimalizaci k řešení stejnému, jako v případě kritérií Výhled/Soukromí. Toto řešení je vidět na obrázku 7.16. Lamely tvaru k mají malou šířku v rovině výhledů, zatímco nad i pod ní jejich šířka narůstá a lamely tak lépe stíní letnímu slunci. V případě posouzení výhledu v horizontálním pásu jsou lamely nejvíce vyříznuty ve spodní části, kde stínění nemá velký efekt a je tak vhodné zde nebránit ani výhledu. Vrchní část lamel je široká kvůli stínění letního slunce. V prostřední části dochází ke kompromisu. Toto řešení je vidět na Obrázku 7.19



Obrázek 7.19: Výhled/Léto při ořezání horiz. úsečkami s pásem výhledu

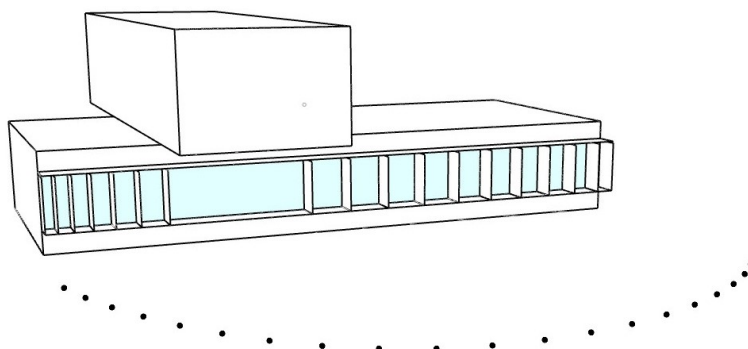
V případě ořezávání plochou tvořenou vertikálními úsečkami vede nejlepší řešení k maximální šířce lamel vlevo od vrchního boxu, aby bylo zajištěno dostatečné stínění.



Obrázek 7.20: Výhled/Léto při ořezání vert. úsečkami s pásem výhledu

Pokud je umožněno pouze rozdílné rozmístění lamel, vede optimalizace těchto dvou kritérií k výsledku na Obrázku 7.21. Jedná se o podobný výsledek jako pro ořez rovinou tvořenou vertikálními úsečkami. Lamely jsou od sebe nejvíce vzdálené uprostřed. Prostředek je totiž stíněn předsazeným horním boxem, a tak zde není taková dodatečného stínění. Zároveň je zde největší plocha posuzovaná na výhled, který preferuje co největší vzdálenosti mezi lamelami. Levá část není nijak jinak

stíněna a zároveň je již poměrně daleko od výhledových ploch. To vede k maximálnímu zhuštění lamel. Pravá část je stále trochu stíněna horním boxem, zároveň je už ale vzdálenější od výhledových ploch. To vede ke kompromisu. Lamely nejsou tak husté jako vlevo, ale ani tak řídké jako uprostřed.

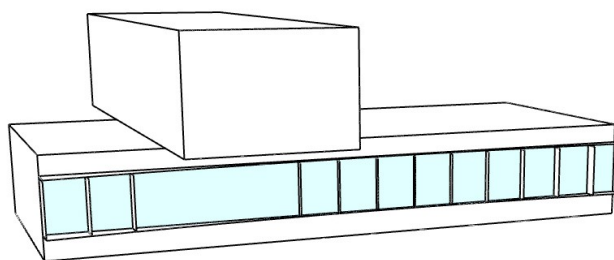


Obrázek 7.21: Výhled/Léto při rozdílném rozmístění lamel

#### 7.6.4 Zima/Sousedí

V případě ořezávání plochou tvořenou horizontálními úsečkami vede optimalizace k řešení shodnému jako s kritérii výhled/sousedí, které je vidět na Obrázku 7.17. Velká plocha lamel ve spodní části brání pohledu dovnitř. Zbylá část lamel je úzká pro poskytnutí maximálního výhledu do okolí.

V případě ořezávání plochou tvořenou vertikálními úsečkami vede optimalizace k širokým lamelám na krajích a tenkým uprostřed boxu, jak ukazuje Obrázek 7.22.



Obrázek 7.22: Zima/Sousedí při ořezání rovinou tvořenou vertikálními úsečkami

Rozmístění lamel pro tato dvě kritéria vede ke stejnému výsledku jako v případě kritérií Zima/Léto, který je vidět na Obrázku 7.15. Po stranách jsou lamely široké, aby bránily viditelnosti z odpališť, zatímco uprostřed jsou lamely úzké a poskytují tak velký výhled.

V předchozích dvoukriteriálních úlohách byla použita analýza výhledu horizontální roviny i celého horizontálního pásu. Horizontální pás minimalizuje lamely

po celé výšce, zatímco horizontální linie minimalizují lamely pouze uprostřed jejich výšky. Varianta celého horizontálního pásu lépe vystihuje lidské oko a je tak pro kritérium výhledu vhodnější. V další části tedy bude použita už jen tato varianta.

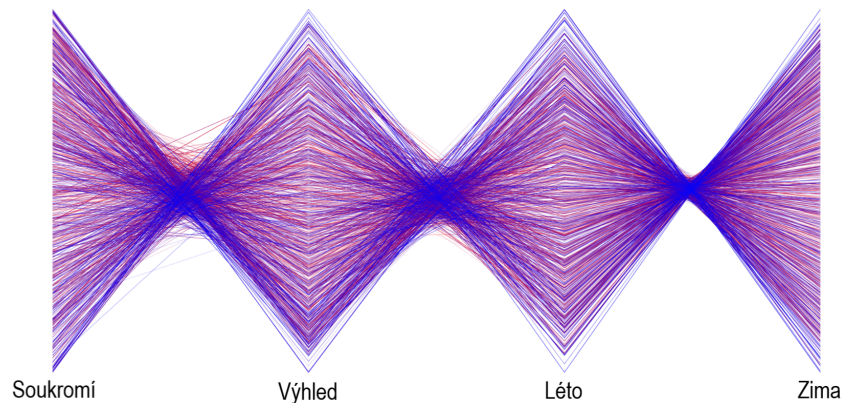
## 7.7 Parametry evoluce

Populace je tvořena 50 jedinci v 50 generacích, celkově tedy 2500 řešení. Pravděpodobnost křížení je 0,9, pravděpodobnost mutace  $1/n$ , crossover and mutation distribution index 20.

Velikost populace není příliš velká z důvodu velké časové náročnosti výpočtu každého řešení. Jedno řešení se počítá zhruba 30 vteřin a celá evoluce tak zabere okolo 20 hodin.

## 7.8 Vlastnosti evoluce

z PCP grafu na Obrázku 7.23 je vidět jak protichůdná jsou kritéria. Díky barevnému rozlišení starších řešení červenou barvou a nových řešení barvou modrou je patrné že nejnovější řešení spíše zvětšují rozmanitost, než že by posouvala evoluci určitým směrem. Celá evoluce tedy nekonverguje k žádnému konkrétnímu výsledku. Rozmístění linií na osách kritérií ukazuje rovnoměrné vyplnění hledaného prostoru.

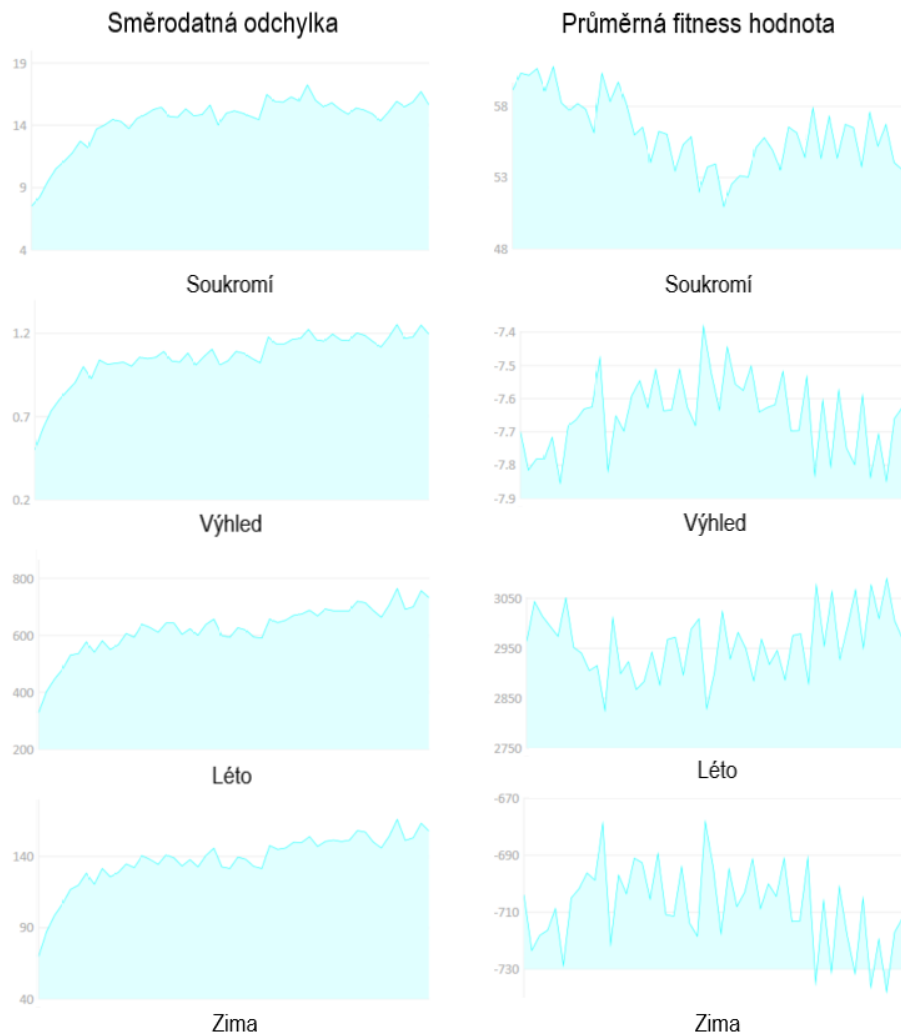


Obrázek 7.23: PCP graf

Na Obrázku 7.24 jsou další grafy popisující vlastnosti evoluce. Graf směrodatné odchylky (SD value trend line) ukazuje, vývoj variability během evoluce. U všech 4 kritérií se hodnota během evoluce postupně zvětšuje, variabilita řešení tedy roste. Grafy průměrné fitness hodnoty (mean value trend line) opět ukazují na protichůdnost kritérií. Pokud hodnoty na grafech soukromí a létá klesají, hodnoty na grafech



výhledů a zimy naopak rostou. Celkový trend všech grafů není klesající, a evoluce tak nekonverguje.



Obrázek 7.24: Grafy směrodatných odchylek a průměrných fitness hodnot

## 7.9 Výběr nejlepších řešení

Vzhledem k povaze design problému je velmi obtížný výběr nejlepších řešení. Jak je popsáno ve vlastnostech evoluce (7.8), jsou jednotlivá kritéria velmi protichůdná. Množina výsledků je velmi rozmanitá. Ve výsledcích se neobjevuje žádné větší maximum, nedá se tedy pozorovat žádná větší koncentrace nejlepších řešení v prostoru. Výběr nejlepších řešení v rámci Wallacei selection není vůbec jednoduchý. Best average of fitness ranks je vhodnější pro případy s výraznějším globálním maximem. Relative difference between ranks také neobsáhne škálu řešení. Výběr celé pareto fronty je příliš hrubý. Evoluce o 2500 jedincích obsahuje 669 řešení v pareto frontě,

což také ukazuje, jak je hledaný prostor široký. Roztřídění do klusterů ve shlukové analýze se nabízí jako vhodná metoda výběru. Euklidovská vzdálenost řešení řešení v klusteru může být stejná, avšak vzdálenosti jednotlivých dimenzí velmi rozdílné. Celkově tedy nemusí být fenotypy v rámci shluku příliš podobné, jak bylo již ukázáno v případě vazníku.

Jelikož je paretofronta takto široká, je nezbytné nějakým vhodným způsobem specifikovat, jaká řešení budou vybrána. Pro výběr nejlepších řešení byl zvolen vážený průměr kritérií. Budoucí obyvatel domu zvolí od 0 do 10, jakou váhu přikládá jednotlivým kritériím. Těmito váhami jsou poté násobeny fitness hodnoty všech řešení. Ze součtu zvážených fitness hodnot je vybráno řešení nejlepší. Aby při součtu kritéria s velkou fitness hodnotou nebyla silnější než kritéria s malou hodnotou, jako například solární zisky v tisících procent oproti výhledu v jednotkách procent, jsou jednotlivé fitness hodnoty převedeny z absolutních hodnot na relativní. Interval fitness hodnot každého kritéria je převeden na interval od 0 do 100.

### 7.9.1 Vybraná nejlepší řešení

Jako příklady možných preferencí investora byly vybrány následující váhy kritérií.

První výběr kritérií byl zvolen následovně Soukromí 6, Výhled 7, Léto 3, Zima 9. Řešení je vidět na horní polovině Obrázku 7.25. Toto řešení má nadvážená kritéria zimy a výhledů. Obě tato kritéria snižují plochu lamel, a tak jsou výsledkem značně ořezané lamely. Hodnocení ve zbylých kritériích, tedy soukromí a výhledech je tak výrazně horší než v kritériích zimy a výhledů.

Většina lamel je kvůli výhledům a solárním ziskům v zimě velmi úzká. Jsou zde však patrné znaky pozorované v dvoukritériálních úlohách. Široké spodní části lamel vlevo snižují viditelnost do interiéru. Zvětšení horní části lamel v pravé části snižuje letní solární zisky.

Druhý výběr vah kritérií je soukromí 6, výhled 2, léto 8, zima 4. Řešení je vidět spodní polovině Obrázku 7.25. Toto řešení je výrazně vychýleno k letnímu stínění a ochraně soukromí. Lamely jsou povětšinou široké a blízko u sebe. plocha lamel je tak celkově velká. Zúžení lamel v horní části za předsazeným boxem je známý znak z dvoukritériální optimalizace, zapříčiněný stíněním vysokého letního slunce boxem. Větší vzdálenost lamel v pravé prostřední čtvrtině poskytuje lepší výhled. Tento znak byl vidět již na Obrázku 7.18.

Třetí výběr vah kritérií je soukromí 5, výhled 4, léto 2, zima 3. Řešení je vidět na horní polovině Obrázku 7.26. Jedná se o daleko více kompromisní výběr než v předchozích dvou případech. Tomu odpovídá i absence extrémů v relativním

hodnocení. Lamely jsou širší na stranách než uprostřed boxu. To je způsobeno nadváženým soukromím. Větší plocha lamel v levé části výrazně nezhoršuje výhled, jelikož je již velmi vzdálená od posuzovaných ploch. Rozšíření lamel ve spodní části brání soukromí a nezhoršuje ostatní kritéria.

Čtvrtý výběr vah kritérií je soukromí 0, výhled 0, léto 5, zima 5. Řešení je vidět na spodní polovině Obrázku 7.26. Tento výběr říká, že ho nezajímá soukromí ani výhledy, ale chtěl by mít vyvážené stínění v létě a solární zisky v zimě. Z toho důvodu jsou v řešení jasně vidět znaky znaky z dvoukriteriální optimalizace Zima/Léto. Širší lamely v horní části, které byly vidět již na Obrázku 7.13 a také širší lamely na krajích boxu v porovnání s prostředkem, což bylo také již vidět na obrázku 7.14. Zhuštění lamel v levé části, jako je na Obrázku 7.15 zde není příliš patrné. Potřebná plocha lamel byla vytvořena šířkou lamel, a tak již není zapotřebí jejich zahuštění.

## 7.10 Vzhled na vile

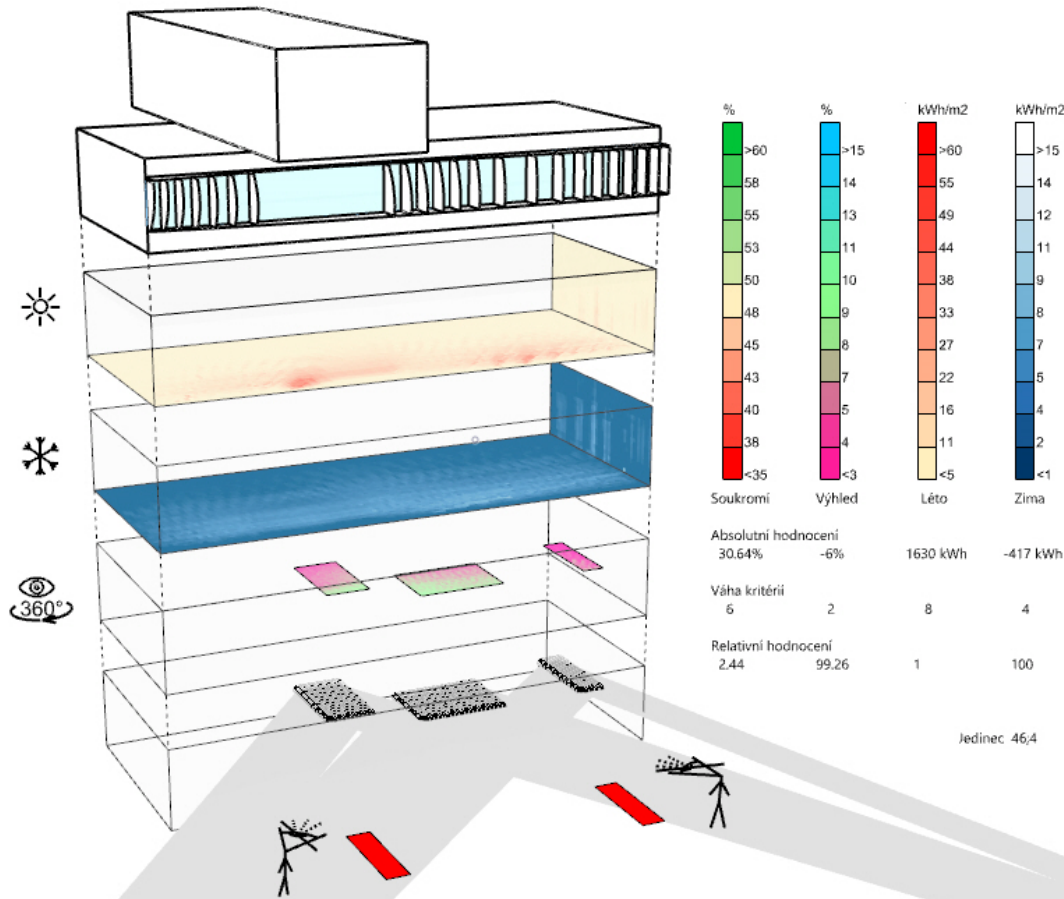
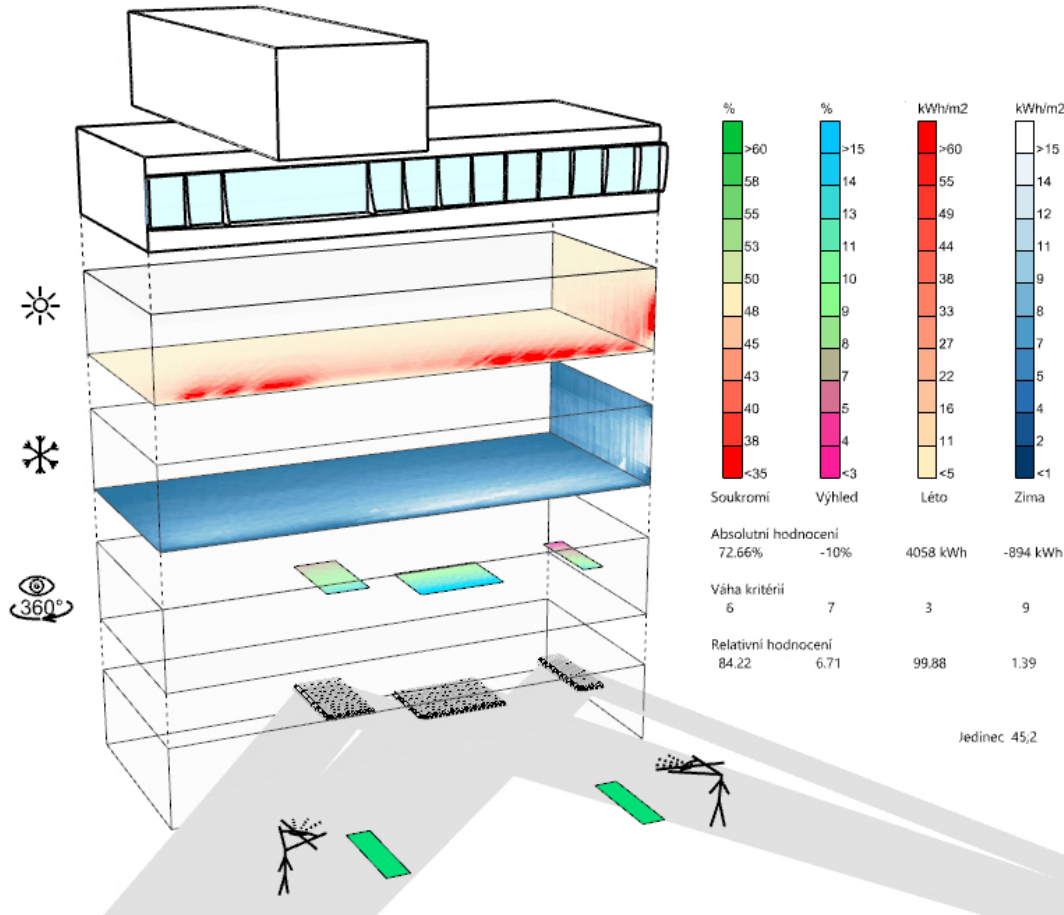
Na Obrázku 7.27 je vidět jedna z vybraných variant stínění na modelu celé budovy. Pravá část ukazuje pohled na celkové zvlnění lamel, které z předchozích obrázků nebylo příliš patrné. Dalo by se konstatovat, že stínící prvky nejsou pouze funkční záležitostí, ale i estetickou. Plynulé křivky ořezové roviny velmi dobře doplňují zbylé pravoúhlé tvary a zajímavě tak rozbourávají celkovou ostrou geometrii.

## 7.11 Digitální prefabrikace

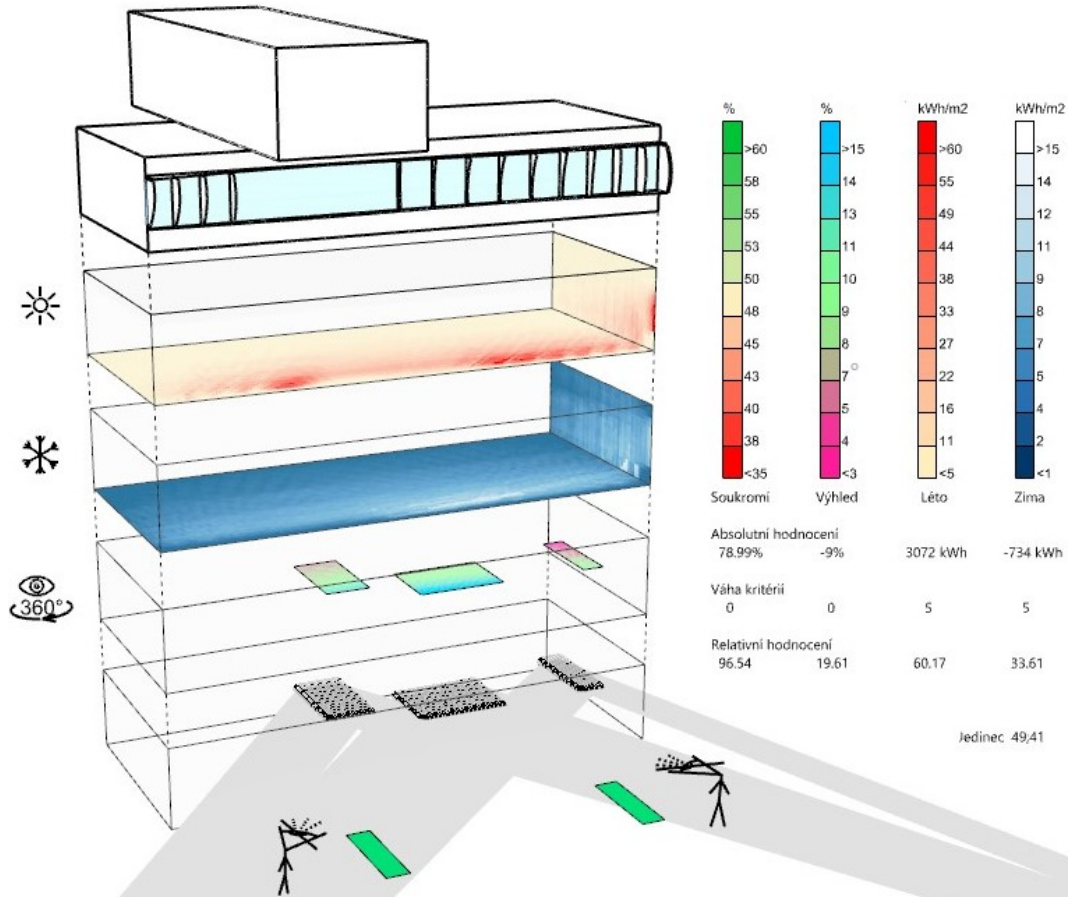
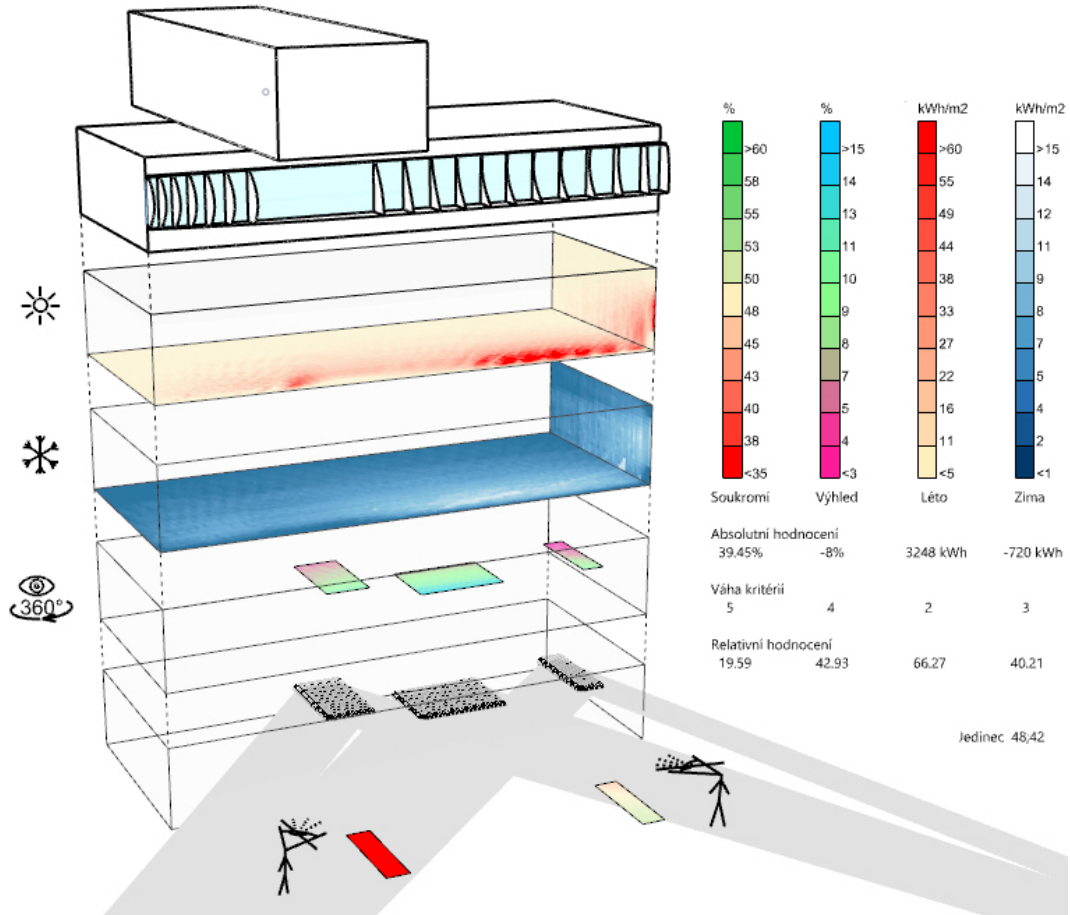
Jedním z důvodů, proč se příliš nenavrhují prvky nestandardních tvarů je cena jejich výsledné realizace. Náklady na výrobu zakázkového bednění značně prodražují celou stavbu a originální geometrie jsou tak velmi často nahrazeny běžnými tvary.

Digitální výroba je rychle se rozvíjející obor poskytující v současné době hned několik možností výroby betonových prvků bez potřeby objemného bednění. Jednou z možností je vytvoření prvku 3D tiskem, tedy postupným vrstvením vytlačované betonové směsi (3DCP). Další možností je použití ztraceného bednění, které může být vytvořeno několika způsoby. Může se jednat o již zmíněný 3D betonový výtisk, robotem svařenou výztuž (Mesh Mould), nebo třeba tkanou textilií. Pro výrobu navržených lamel by se však nejlépe hodilo dynamické odlévání.

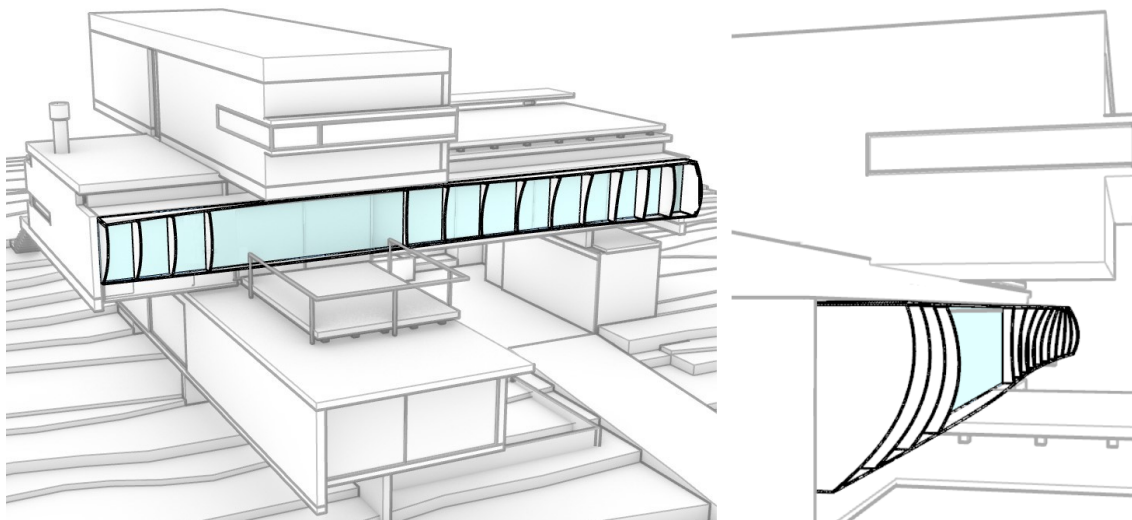
Smart dynamic casting (SDC) je způsob výroby betonových prvků, vyvíjený od roku 2012 již dříve zmiňovanou ETH v Curychu (3.2.3. Hlavní výhodou je možnost výroby originálních prvků bez potřeby vytvářet jednorázové bednění. Jedná se o for-



Obrázek 7.25: Nejlepší řešení podle prvního a druhého zvažení kritérií



Obrázek 7.26: Nejlepší řešení podle třetího a čtvrtého zvážení kritérií



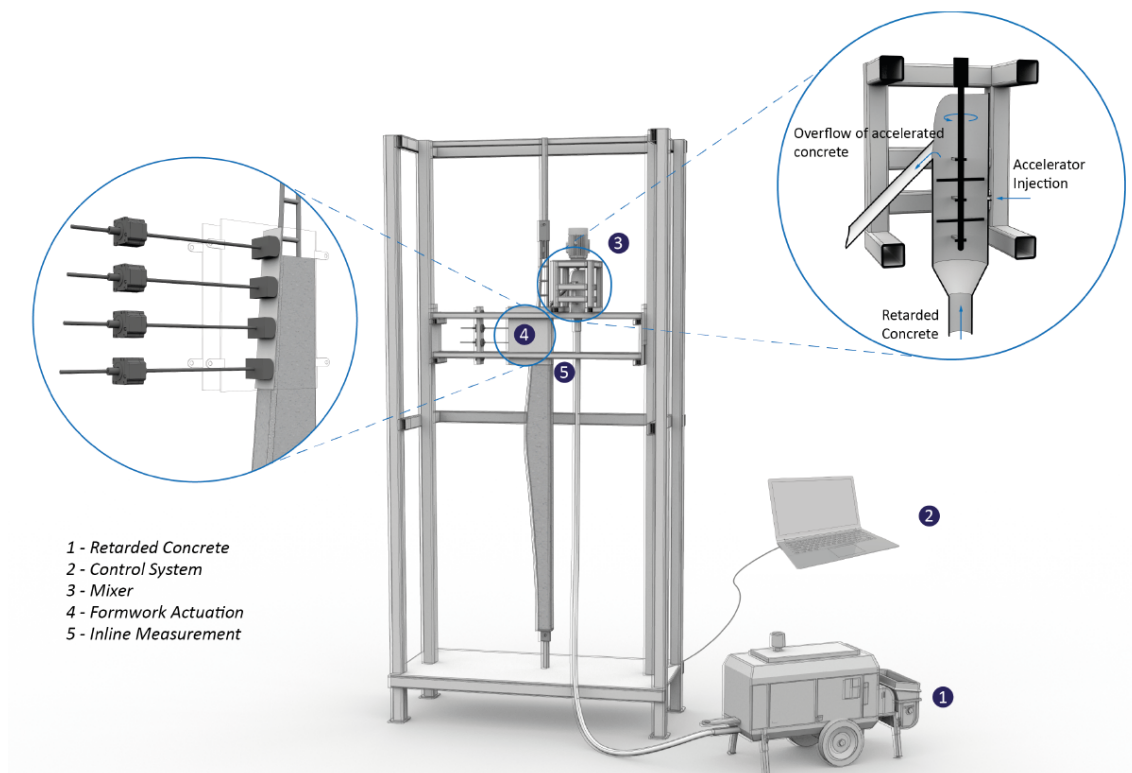
Obrázek 7.27: Navržené stínící prvky v kontextu celé budovy

mativní výrobu využívající automatizaci univerzálního posuvného bednění. Beto­nový prvek vzniká postupným prokluzem betonové směsi skrz bednění posouvající se pomalu vzhůru. Otáčením, či změnou průřezu bednění mohou vznikat geometrie, které by se běžným způsobem výroby vytvářely jen velmi složitě.

Obrázek 7.28 ukazuje schéma výroby metodou SDC. Retardovaný beton je umístěn do čerpadla (1) a čerpán do míchacího zařízení (3) kde se mísí s urychlovači tuhnutí. To je umístěno nad bedněním a samozhutnitelný beton tak vytéká přímo do bednění (4). Systém pro zpětnou vazbu (5) informuje o materiálu a tlaku v bednění. Řídicí systém (2) se zahrnutím těchto informací synchronizovaně upravuje rychlost čerpání betonové směsi, změnu tvaru bednění a jeho vertikální rychlost pro optimální výsledek kontinuálního odlitku. Beton je možné odlévat okolo předem připravené ocelové výztuže. Výsledný prvek tak může být vyztužen stejně jako při běžném způsobu výroby.

Klíčem k dobrému výsledku při odlévání betonu je kontrola hydratace. Během výrobního procesu je několik fází, ve kterých je potřeba, aby betonová směs měla určité vlastnosti. První potřebnou vlastností směsi je její čerpatelnost. Ta je nutná k dopravení betonu do bednění. Po průchodu bedněním je zapotřebí, aby beton držel svůj tvar. Tato vlastnost by se dala nazvat jako umístitelnost (placeability). Již tvarovaný beton po průchodu bedněním musí dosahovat dostatečné meze kluzu, aby dokázal unést svou vlastní váhu bez jakéhokoliv zborcení či jiné deformace. Tuto vlastnost lze nazvat stavitelnost (buildability).

Samotný odlévací proces se musí pohybovat mezi dvěma možnými extrémy. Jedním je nedostatečná pevnost betonu, která způsobuje deformace již odlité konstrukce. Druhým je potom příliš tuhá směs, která se odtrhává pod bedněním z důvodu



Obrázek 7.28: Schéma dynamického odlévání betonových prvků (SDC) [56]

příliš velkého tření při průchodu bedněním. Aby nenastal jeden z těchto dvou stavů, jsou v bednění instalována čidla pro získání zpětné vazby o betonové směsi, zejména jeho kluzu. Pro snížení tření mezi procházejícím betonem a povrchem bednění je také využíváno kapilárních olejnicěk průběžně ošetřující povrch bednění. [57]

Jedná se zatím spíše o experimentální způsob výroby. Avšak pro výrobu právě například parametricky zvlněných lamel, kdy každý kus má originální tvar, se zdá jako velmi vhodný.

## 7.12 Aplikovatelnost scriptu

Celý script je napsaný tak, aby byl univerzální. Je tedy možné využít ho na úplně jinou, případně daleko větší budovu. Lze si například představit využití na celé fasádě kancelářské budovy. Bylo by třeba importovat 3D model budovy včetně okolního prostředí. Popřípadě může být okolní prostředí importováno z map, na základě umístění budovy. Dále je třeba importovat *.epw* data obsahující informace o počasí dané lokality. Poté se definují geometrie, pro které se budou jednotlivá kritéria posuzovat. V případě velké simulace by bylo vhodnější provést serverový výpočet.

# Kapitola 8

## Závěr

Tato práce se věnuje návrhu předsazené konstrukce a stínících prvků s využitím parametrického modelování. V úvodní teoretické části popisuje parametrické modelování, možnosti optimalizace konstrukcí a k ní vhodné použití různých optimalizačních algoritmů. Popisuje také trajektorie hlavních napětí a realizované konstrukce, které jsou jimi inspirovány. Parametrický model je volně inspirovaný skutečným stavem vily zvané Casa Golf. Předsazená část parametrického modelu byla staticky optimalizována evolučním algoritmem. Tvar konstrukce nalézá inspiraci právě v trajektoriích hlavních napětí. Výsledky simulace jsou porovnány a je vybráno nejlepší řešení. Pro toto řešení je ověřena dimenzovatelnost dané konstrukce, což poskytuje potvrzení vhodnosti návrhové metody. Práce ukazuje výhody parametrického modelování pro návrh a optimalizaci alternativ konstrukce v rané fázi návrhu.

V druhé části byly na stejném objektu navrženy vertikálních stínících prvků inspirované skutečným stavem. Stínící prvky jsou taktéž optimalizovány evolučním algoritmem, jako tomu je v případě předsazené konstrukce. Jejich kritéria však nejsou statická, ale užitná. Jelikož se jedná o protichůdná kritéria u kterých není na první pohled zřejmé, jakým směrem návrh vedou. Jsou zprvu rozebrány zvlášť. Výsledná simulace obsahující všechna 4 kritéria potom přináší velmi různorodý vzorek výsledků. Tento vzorek je analyzován a s přihlédnutím k možným preferencím potenciálního investora jsou vybrána 4 možná řešení.

Script pro předsazenou konstrukci i pro tvorbu stínících prvků je velmi univerzální. Bylo by tedy snadné je aplikovat na jiných budovách a s rozdílnými okrajovými podmínkami. Použití optimalizace předsazené konstrukce v jiném kontextu by mohlo zahrnovat užití více zatěžovacích stavů, které v tomto případě nebyly potřebné. Generování geometrie by se dalo vylepšit i do jiných směrů než pouze směru předsazení. Pro ověření univerzálnosti by mohla být předsazená konstrukce



například vícepodlažní. Díky parametrickému modelu a použití skriptu by bylo možné všechny tyto navrhovaná vylepšení implementovat velmi snadno implementovat.

Jako největším problémem se ukázalo odladění algoritmu. Zejména nastavení správných parametrů evoluce vyžaduje při nižším výpočetním výkonu běžného počítače značné testování. Je totiž nezbytné, aby algoritmus správně fungoval i na relativně menším vzorku populace zapříčiněného pomalejším výpočtem každého řešení, než by tomu bylo v případě možnosti výpočtů na výkonném serveru. Nedosažení požadovaných výsledků, příliš pomalá konvergence, nebo nalezení pouze lokálních extrémů jsou případná rizika malých evolučních simulací.

Hlavní možnost vylepšení návrhu stínících prvků tkví v kritériích. Přidat by se dal například tepelný komfort v místnosti nebo její osvětlení a oslunění. Také by bylo možné převést kritéria na jednotky uspořené energie, množství emisí, popřípadě finanční prostředky a zvážit tak jejich důležitost. Samotný script je připravená pro jakoukoliv budovu, velikost stíněného prostoru, orientaci a okolní prostředí. Jediným limitem pro velké konstrukce by byl dostatečný výpočetní výkon pro průběh simulace v reálném přijatelném čase.

Při navrhování konstrukcí je třeba velmi často podstupovat kompromisy. Ať už jsou vynuceny z podstaty protichůdnými požadavky, nebo jen rozdílné požadavky jednotlivých oborů pracujících na návrhu odděleně. Parametrické modelování se ukazuje jako vhodný nástroj k jejich propojení. Díky jeho jednoduchosti upravovat daný model na základě pouhých parametrů umožňuje velmi snadno a rychle zahrnovat jednotlivé požadavky pro návrh.

# Bibliografie

- [1] F. Fu, *Design and analysis of tall and complex structures*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [2] D. Davis. “A History of Parametric”. (2013), URL: <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/> (cit. 17. 12. 2022).
- [3] P. Vada. “Details about Lisbon Triennale 2019”. (), URL: <https://www.archdaily.com/921450/details-about-lisbon-triennale-2019> (cit. 23. 12. 2022).
- [4] S. Zexin a H. Mei, “Robotic form-finding and construction based on the architectural projection logic”, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, sv. 216, 2017, s. 012058.
- [5] Z. Kron. “Q&A about Dynamo”, Dynamo. (2014), URL: <https://dynamobim.org/qa-about-dynamo/> (cit. 17. 12. 2022).
- [6] W. M. Johnston, J. P. Hanna a R. J. Millar, “Advances in dataflow programming languages”, *ACM computing surveys (CSUR)*, roč. 36, č. 1, s. 1–34, 2004.
- [7] “The Grasshopper Primer”, Mode Lab. (2015), URL: [http://grasshopperprimer.com/en/1-foundations/1-1/3\\_talking-to-rhino.html](http://grasshopperprimer.com/en/1-foundations/1-1/3_talking-to-rhino.html) (cit. 14. 12. 2022).
- [8] D. Rutten. “Grasshopper 2-Alpha available for testing”. (2022), URL: <https://discourse.mcneel.com/t/grasshopper-2-alpha-available-for-testing/140401> (cit. 17. 12. 2022).
- [9] C. Preisinger, “Linking Structure and Parametric Geometry”, *Architectural Design*, roč. 83, č. 2, s. 110–113, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1564>.
- [10] “Karamba 3D”. (), URL: <https://www.karamba3d.com/> (cit. 14. 12. 2022).
- [11] M. P. Bendsoe a O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [12] H. Hodgson, “Cement”, IEA, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/cement> (cit. 16. 12. 2022).
- [13] S. Gislason, S. Bruhn, L. Breseghello, B. Sen, G. Liu a R. Naboni, “Lightweight 3D Printed Concrete Beams Show an Environmental Promise: A Cradle-to-Grave Comparative Life Cycle Assessment”, 2022.
- [14] R. Naboni a I. Paoletti, “Architectural morphogenesis through topology optimization”, in *Handbook of research on form and morphogenesis in modern architectural contexts*, IGI global, 2018, s. 69–92.

- [15] M. T. Wojciechowski et al., “Determining Optimal Geometries of Plane Stress Truss Structures using Numerically Mapped Principal Stress Trajectories.”, 2016.
- [16] K. Januszkiewicz a M. Banachowicz, “Nonlinear shaping architecture designed with using evolutionary structural optimization tools”, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, sv. 245, 2017, s. 082042.
- [17] A. Jipa, M. Bernhard, M. Meibodi a B. Dillenburger, “3D-printed stay-in-place formwork for topologically optimized concrete slabs”, in *Proceedings of the 2016 TxA Emerging Design+ Technology Conference*, Texas Society of Architects, 2016, s. 97–107.
- [18] A. G. M. Michell, “LVIII. The limits of economy of material in frame-structures”, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, roč. 8, č. 47, s. 589–597, 1904.
- [19] K.-M. M. Tam a C. T. Mueller, “Stress line generation for structurally performative architectural design”, ACADIA, 2015.
- [20] A. B. Halpern, D. P. Billington a S. Adriaenssens, “The ribbed floor slab systems of Pier Luigi Nervi”, in *Proceedings of IASS Annual Symposia*, International Association for Shell a Spatial Structures (IASS), sv. 2013, 2013, s. 1–7.
- [21] K.-M. M. Tam a C. T. Mueller, “Additive manufacturing along principal stress lines”, *3D Printing and Additive Manufacturing*, roč. 4, č. 2, s. 63–81, 2017.
- [22] S. Gislason, S. Bruhn, L. Breseghello, B. Sen, G. Liu a R. Naboni, “Porous 3D printed concrete beams show an environmental promise: a cradle-to-grave comparative life cycle assessment”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, roč. 24, č. 8, s. 2639–2654, 2022.
- [23] “3DLIGHTBEAM”, SDU. (), URL: <https://www.create-sdu.com/projects/3dlightbeam> (cit. 18.12.2022).
- [24] “Projekty - Zastávka Výstaviště”, So Concrete. (), URL: <https://so-concrete.com/projekty/> (cit. 18.12.2022).
- [25] “3D Printed Reinforced Beam”, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich - Digital Building Technologies. (), URL: <https://dbt.arch.ethz.ch/project/3d-printed-reinforced-beam/> (cit. 19.12.2022).
- [26] A. Martel. “The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing”, 3D natives. (2019), URL: <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/#!> (cit. 16.12.2022).
- [27] J. Burry, J. Sabin, B. Shei a M. Skavara, “Fabricate 2020: Making Resilient Architecture”, 2020.
- [28] “DFAB House”, DFAB House. (), URL: <https://dfabhouse.ch/> (cit. 19.12.2022).
- [29] E. Zitzler, *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications*. Shaker Ithaca, 1999, sv. 63.

- [30] E. Volná. “Evoluční algoritmy a neuronové sítě”. (2012), URL: [https://web.osu.cz/~Volna/Evolucni\\_algoritmy\\_a\\_neuronove\\_site.pdf](https://web.osu.cz/~Volna/Evolucni_algoritmy_a_neuronove_site.pdf) (cit. 19. 11. 2022).
- [31] I. Zelinka, Z. Oplatková, P. Ošmera, M. Šeda a F. Včelař, *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. BEN, 2008.
- [32] L. Horký a K. Břinda, *Neuronové sítě*, 2009.
- [33] J. Materna. “6 Neuronové sítě a deep learning”, Machine Learning College. (2020), URL: [https://www.youtube.com/watch?v=0Hqz8u2TEcg&t=1s&ab\\_channel=MachineLearningCollege](https://www.youtube.com/watch?v=0Hqz8u2TEcg&t=1s&ab_channel=MachineLearningCollege) (cit. 19. 11. 2022).
- [34] F. J. Ayala. “evolution scientific theory”. (čvn. 1999), URL: <https://www.britannica.com/science/evolution-scientific-theory/Modern-conceptions> (cit. 19. 11. 2022).
- [35] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal a T. Meyarivan, “A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II”, *IEEE transactions on evolutionary computation*, roč. 6, č. 2, s. 182–197, 2002.
- [36] F. Rang. “NSGA-II Optimization: Understand fast how it works [complete explanation]”, YouTube. (2019), URL: [https://www.youtube.com/watch?v=SL-u\\_7hIqjA&ab\\_channel=paretos](https://www.youtube.com/watch?v=SL-u_7hIqjA&ab_channel=paretos) (cit. 27. 11. 2022).
- [37] M. Makki, M. Showkatbakhsh a Y. Song. “Wallacei Primer 2.0”. (lis. 2019), URL: <https://www.wallacei.com> (cit. 19. 11. 2022).
- [38] “Wallacei”, YouTube. (2018), URL: <https://www.youtube.com/@Wallacei> (cit. 27. 11. 2022).
- [39] J. MacQueen, “Classification and analysis of multivariate observations”, in *5th Berkeley Symp. Math. Statist. Probability*, 1967, s. 281–297.
- [40] “Golf House / Luciano Kruk Arquitectos”. (2015), URL: <https://www.archdaily.com/779399/golf-house-luciano-kruk-arquitectos> (cit. 18. 11. 2022).
- [41] “Luciano Kruk studio”. (2015), URL: <https://lucianokruk.com/en> (cit. 18. 11. 2022).
- [42] “Rovinná a prostorová napjatost”, Západočeská Univerzita - Katedra mechaniky. (), URL: [https://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/12\\_natp\\_01.pdf](https://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/12_natp_01.pdf) (cit. 18. 12. 2022).
- [43] J. šejnoha a J. Bittnarová, *Pružnost a pevnost*, 1996.
- [44] “Karamba3D TidBits #26 Ribs from Principal Moments”, YouTube-karamba3d. (), URL: [https://www.youtube.com/watch?v=Qmcet13Ky\\_g%5C&ab\\_channel=karamba3d](https://www.youtube.com/watch?v=Qmcet13Ky_g%5C&ab_channel=karamba3d) (cit. 22. 12. 2022).
- [45] “ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí”, Technická norma. (2004).
- [46] M. Teksoy. “Performance-Based Facade Design”, Mustafa Teksoy Architecture & Design. (2013), URL: <https://www.mtad.com.tr/performance-based-facade-design-research-i/> (cit. 12. 12. 2022).

- [47] J. Arnfield. “Köppen Climate Classification”. (srp. 2009), URL: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification> (cit. 18. 11. 2022).
- [48] “Climate and Average Weather Year Round in Pinamar”, Weather Spark. (), URL: <https://weatherspark.com/y/29202/Average-Weather-in-Pinamar-Argentina-Year-Round> (cit. 18. 11. 2022).
- [49] V. Khavrus a I. Shelevytsky, “Introduction to solar motion geometry on the basis of a simple model”, *Physics Education*, roč. 45, č. 6, s. 641–653, lis. 2010. DOI: 10.1088/0031-9120/45/6/010.
- [50] N. Lechner, *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John wiley & sons, 2014.
- [51] “Map with epw files”, Ladybug Tools. (), URL: <https://www.ladybug.tools/epwmap/> (cit. 18. 11. 2022).
- [52] “Climate and Average Weather Year Round in Montevideo”, Weather Spark. (), URL: <https://weatherspark.com/y/29220/Average-Weather-in-Montevideo-Uruguay-Year-Round> (cit. 18. 11. 2022).
- [53] “Climate and Average Weather Year Round in Buenos Aires”, Weather Spark. (), URL: <https://weatherspark.com/y/28981/Average-Weather-in-Buenos-Aires-Argentina-Year-Round> (cit. 18. 11. 2022).
- [54] “Ladybug Primer”, Ladybug Tools. (), URL: [https://docs.ladybug.tools/ladybug-primer/components/1\\_analyzedata](https://docs.ladybug.tools/ladybug-primer/components/1_analyzedata) (cit. 01. 12. 2022).
- [55] “What is Ladybug Tools?”, Ladybug Tools. (), URL: <https://www.ladybug.tools/> (cit. 18. 11. 2022).
- [56] E. Lloret-Fritschi, F. Scotto, F. Gramazio et al., “Challenges of real-scale production with smart dynamic casting”, in *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Springer, 2018, s. 299–310.
- [57] E. Lloret-Fritschi, T. Wangler, L. Gebhard et al., “From smart dynamic casting to a growing family of digital casting systems”, *Cement and Concrete Research*, roč. 134, s. 106 071, 2020.