

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



Víceúčelová optimalizace betonové konstrukce v rané fázi návrhu

Diplomová práce

Bc. Michal Doležal

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

Praha, Prosinec 2020

Vedoucí práce:

Ing. Martin Petřík, Ph.D.
Katedra betonových a zděných konstrukcí
Fakulta stavební
České vysoké učení technické v Praze
Thákurova 7
166 29 Praha 6
Česká republika

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Doležal Jméno: Michal Osobní číslo: 458802

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí - K133

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Víceúčelová optimalizace betonové konstrukce v rané fázi návrhu

Název diplomové práce anglicky: Multiobjective Optimization of Concrete Structure in Early-Stage Design Process

Pokyny pro vypracování:

- Vysvětlení pojmů (parametrické modelování (PM), genetický algoritmus (GA), víceúčelová optimalizace (MOO) apod.)
- Vyřešení MOO úlohy většího měřítka (stavební objekt nebo jeho část) s pomocí GA a PM
- Rozbor výsledků optimalizace

Seznam doporučené literatury:

- * ZELINKA, Ivan, et al. Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace. BEN, 2008.
- * HYNEK, Josef. Genetické algoritmy a genetické programování. Grada Publishing as, 2008.
- * Wallacei Primer 2.0
- * BEGHINI, Lauren L., et al. Connecting architecture and engineering through structural topology optimization. Engineering Structures, 2014, 59: 716-726.
- * BROWN, Nathan C.; MUELLER, Caitlin T. Design for structural and energy performance of long span buildings using geometric multi-objective optimization. Energy and Buildings, 2016, 127: 748-761.
- * DEB, Kalyanmoy, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6.2: 182-197.
- * Karamba3D manual 1.3.3

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

Datum zadání diplomové práce: 28.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 4.1.2021

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“.

29.9.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Víceúčelová optimalizace betonové konstrukce v rané fázi návrhu" 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, Prosinec 2020

.....
Bc. Michal Doležal

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím parametrického modelování a genetických algoritmů pro víceúčelovou optimalizaci v rané fázi návrhu betonové konstrukce. Tyto moderní metody umožňují zlepšení spolupráce více profesí v jednom modelu vytvořeném v programovém prostředí. Dále zprostředkují společný přístup k tvorbě budovy jako funkčního celku, který zohledňuje požadavky architekta, statika, technologa a mnoha dalších v rané fázi návrhu, což umožňuje předejít mnoha problémům nejen v dalších fázích projektu, ale celém životním cyklu stavby. Využití těchto metod je demonstrováno na budově, kdy se nejdříve využijí standartní optimalizační postupy, a následně je budova podrobena analýze pomocí genetických algoritmů. Celkově je hodnoceno několik kritérií včetně enviromentálních vlivů. V daném případě představuje využití těchto metod snížení hmotnosti o 13,8 % oproti tradičnímu návrhu.

Klíčová slova: parametrický návrh, genetický algoritmus, efektivita, víceúčelová optimalizace, Grasshopper, vliv na životní prostředí

Abstract

The diploma thesis deals with usage of parametric modelling and genetic algorithms in multiobjective optimization in early stages of design of one particular structure. These modern methods present different ways for more specialists to cooperate on one model created in programme background. It provides collective approach on creating a building as a functional unit, that take in to account the requirements of different specialists, as architects, civil engineers, technicians and others in early stages of design. This helps to prevent more problems, that can occur in the next stages of design process and in the whole lifecycle of the building. Usage of these methods is demonstrated on one particular building. First the building is optimized with more traditional approach, and then the building is optimized by genetic algorithms. Several criteria were evaluated, including environmental aspects. These modern methods present weight reduction of 13,8 %, opposite to the traditional approaches on this particular building.

Keywords: Parametric design, genetic algorithm, effectiveness, multipurpose optimization, Grasshopper, environmental impact

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Petříkovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotu a neúnavnost při poskytování konzultací a vedení práce. Dále děkuji studentovi programu Architektura a stavitelství Bc. Patriku Kučerovi za spolupráci na architektonickém ztvárnění a dalším řešení budovy. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a blízkým za podporu při mém studiu.

Seznam tabulek

2.1	Empirický návrh tloušťky desky	15
2.2	Empirický návrh Výšky průvzlaku	16
2.3	Stálé zatížení v 2.NP	17
2.4	Stálé zatížení na pochozí střeše	17
2.5	Hodnoty zatížení na jednotlivých podlažích	18
2.6	Hodnoty momentů závislé na pootočení φ	21
2.7	Hodnoty momentů od zatížení a dimenzačních momentů v osových směrech	21
2.8	Tabulka vyztužitelnosti průřezů	22
2.9	Hodnoty napětí závislé na pootočení φ	23
2.10	Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech	24
2.11	Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech	24
2.12	Předběžné ověření množství výztuže v průřezu nad podporou	26
2.13	Předběžné ověření množství výztuže v průřezu v poli	26
2.14	Vyčíslení tepelných zisků	30
3.1	Využití jednobodového křížení [4]	40
4.1	Geometrie příkladu - konzola	44
4.2	Hodnoty průhybu pro jednotlivé výšky průřezu konzoly	44
5.1	Tabulka vybraných jedinců s výsledky hodnocených kritérií	53
5.2	Výběr jedinců po provedení selekce	53
5.3	Porovnání dimenzí parametrického modelu a ručního návrhu	54
5.4	Hodnoty momentů od zatížení a dimenzačních momentů v osových směrech	55
5.5	Tabulka vyztužitelnosti průřezů parametrického modelu s porovnáním s ručním návrhem	55
5.6	Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech parametrického modelu	56
5.7	Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech parametrického modelu	56
5.8	Předběžné ověření množství výztuže v průřezu nad podporou - parametrický model	57
5.9	Předběžné ověření množství výztuže v průřezu v poli - parametrický model	57
5.10	Vyčíslení tepelných zisků s porovnáním	58

Seznam obrázků

2.1	Chrám svaté Barbory v Kutné Hoře ¹	3
2.2	Jednotlivé fáze projektu a jejich vliv na náklady [1]	6
2.3	Pohled na budovu	7
	7figure.2.4	
	8figure.2.5	
2.6	Pohled severní	8
2.7	Prvotní návrh nosných prvků architektem	9
2.8	Rozdělení desky nad 1.NP průvlaků	11
2.9	Konstrukční úpravy ve 2.NP	11
2.10	Schéma hlavních směrů pnutí stropních desek	12
2.11	Dodatečné úpravy konstrukcí v 1.NP	13
2.12	Dodatečné úpravy konstrukcí v 2.NP	13
2.13	Výsledný konstrukční návrh 1. NP	14
2.14	Výsledný konstrukční návrh 2.NP	15
2.15	T průřez - průvlak P	16
2.16	Schéma míst pro momentové diagramy	19
2.17	Momentový diagram v místě 1	20
2.18	Momentový diagram v místě 6	20
2.19	Schéma bodů pro analýzu napětí ve stěně	23
2.20	Diagram napětí v místě 6	24
2.21	Průběh ohybového momentu v místě extrému	26
2.22	Oblast zobrazená v řezu	26
2.23	Maximální průhyb konzoly	27
2.24	Maximální průhyb desky se spolupůsobením průvlaků	27
2.25	Grafické znázornění pohybu slunce po obloze	28
2.26	Grafické vyjádření tepelných zisků za letní období 1. dubna - 30. září	29
2.27	Grafické vyjádření tepelných zisků za zimní období 1. října - 31. března	29
2.28	Doba oslunění okolí budovy v rozmezí 14-16 hodin 11. června	30
2.29	Doba přímého ozáření sluncem v interiéru budovy 10-16 hodin 11. června	31
2.30	Doba přímého ozáření sluncem v interiéru budovy 7-18 hodin 1. března	31
2.31	Procentuální podíl výhledu do exteriéru	32
2.32	Procentuální podíl vystavení obloze	33
3.1	Paretova množina ²	36
3.2	Diagram selekčního procesu genetického algoritmu	37
3.3	Lokální a globální optimum na prohledávaném prostoru [8]	39
3.4	Proces výběru jedinců pomocí NSGA-II [9]	41
3.5	Zobrazení nejmenší vzdálenosti od zadaného bodu pomocí „Crowding distance” [9]	41
4.1	Použití komponent v programovacím prostředí grasshopper 3D	43

4.2	Grafické znázornění změny vstupního parametru a následky změny (průhyb 3,5x převýšen)	44
4.3	3D model budovy vytvořený v programovém prostředí Grasshopper	45
4.4	Shogakukan Building Tokyo, Japonsko ³	46
4.5	Radiační růžice - přímá i odražená energie	47
4.6	Grafické znázornění postupu výpočtu genetického algoritmu	48
4.7	Zobrazení clusterů (shluků) ve 3D	48
4.8	Parallel coordinate Plot	49
4.9	Růžicový graf	49
4.10	Ukázka grafického výstupu z programu Rhino	50
5.1	Schéma bodů na stěně	56
5.2	Maximální průhyb na konstrukci - parametrický model	57
A.1	3D zobrazení výsledné varianty budovy v prostředí Rhinoceros	63
A.2	Definice budovy v Grasshopper 3D	64

Obsah

Abstrakt	v
Poděkování	vi
Seznam tabulek	vii
Seznam obrázků	viii
1 Úvod	1
2 Raná fáze návrhu	3
2.1 Vývoj k moderní architektuře	3
2.2 Studie	5
2.2.1 Studie a její význam	5
2.2.2 Studie řešeného objektu	6
2.3 Víceúčelová optimalizace ručního návrhu	8
2.3.1 Konstrukční řešení	9
2.3.2 Konstrukční požadavky	9
2.3.3 Hlavní kritéria návrhu	10
2.4 Konstrukční návrh	11
2.4.1 Základní řešení	11
2.4.2 Úpravy po prvotních analýzách	13
2.4.3 Výsledný návrh	14
2.5 Analýza ručního návrhu	15
2.5.1 Statická analýza	15
2.5.2 Enviromentální analýza	28
2.6 Hodnocení ručního návrhu	33
3 Víceúčelová optimalizace pomocí genetických algoritmů	35
3.1 Základy víceúčelové optimalizace	35
3.2 Genetické algoritmy	36
3.2.1 Proces výběru v genetických algoritmech	37
3.3 Jednotlivé prvky genetických algoritmů	38
3.3.1 Selektce	38
3.3.2 Mutace	39
3.3.3 Křížení	39
3.4 NSGA-II	40
4 Parametrické modelování	42
4.1 Základy parametrického modelování	42
4.2 Parametrický model a jeho tvorba	43
4.2.1 Grasshopper	43

4.2.2	Karamba3D	45
4.2.3	Ladybug	47
4.2.4	Wallacei	47
4.2.5	Rhinoceros	50
5	Parametrické modelování pro analýzu konstrukce	51
5.1	Parametrický model	51
5.1.1	Základní řešení parametrického modelu	51
5.1.2	Sloučené architektonické kritérium	52
5.1.3	Nastavení výpočtu	52
5.1.4	Výběr výsledného řešení	52
5.2	Analýza výsledků parametrického modelu a porovnání s ručním návrhem	53
5.2.1	Statická analýza	54
5.2.2	Enviromentální analýza	58
5.3	Zhodnocení	58
6	Závěr	60
A	Definice v prostředí Grasshopper	62
	Bibliografie	65

Kapitola 1

Úvod

Uhlíková stopa, vliv na životní prostředí, optimalizace, využití nerostných surovin, šetrné zasažení objektů do prostředí, spotřeba energie. V dnešní době velmi oblíbená témata. Každý z nás se s nimi již setkal, a slýcháme je stále častěji. Jsou to pojmy, které se dostávají do popředí priorit celého světa. Stavebnictví není výjimkou, a to hlavně z důvodů, že se v něm využívají nerostné suroviny jako v žádných jiných oborech. Pro výstavbu nové budovy např. vysoké školy je potřeba nepřehledné množství materiálů a výrobků vyrobených z těchto zdrojů. Nemluvě o dodatečné dopravě, lidských zdrojích, a i následném provozu a demolici stavby. Samotná výroba materiálů pro využití ve stavebnictví je často velmi energeticky náročná, často také s poměrně zásadním dopadem na životní prostředí.

Tato témata se ve stavebnictví objevují již delší dobu, nicméně v posledních letech se obecně klade větší důraz na ekologii výstavby. Bohužel stavebnictví je obor, který má v mnoha ohledech velmi konzervativní názory a postupy. Ať už z důvodů, že dané řešení funguje dobře a jen se vyvíjí, tak i z důvodů, že ve stavební praxi se moderní trendy prosazují jen pomalu. Může za to řada faktorů, jako jsou projektanti sami, zažitá postupy v navrhování nebo i konečný řemeslník, který práce provádí. Důvody můžou být i ekonomické, nebo dokonce politické.

Nedá se očekávat, že by ve stavebnictví v dalších několika letech došlo k nenadálému zvratu ve využívání materiálů, nebo že by se materiály přestaly používat pro jejich uhlíkovou stopu. Co se ale dá očekávat je, že se s dalšími generacemi odborníků budou dostávat do popředí metody, které dosud nebyly využívány, často i proto, že dosud vůbec neexistovaly.

Doposud se optimalizace dala provádět tak, že se vytvořil model konstrukce, následně se vyjmuly části konstrukce a ty se předběžně posuzovaly podle zjednodušených metod návrhu. Případně se použije software, který může proces poměrně dost urychlit. Jenže proces stále závisí pouze na lidském faktoru, jeho úsudku a zkušenostech, zda konkrétní úloha vyhoví nebo nevyhoví. Proces se komplikuje se zapojením všech ostatních profesí, které by se na začátku projektu zapojit měly. Pro člověka, který zpracovává požadavky od ostatních se projekt může velmi rychle stát nepřehledným, protože se do tvorby jednotlivých požadavků zapojuje více než jeden člověk. Dále je potřeba s ostatními být neustále v kontaktu. Tím se proces stává méně efektivní.

Proces optimalizace tak může zabrat dlouhou dobu a konvergence ke správnému řešení

spočívá v podstatě výhradně na týmu lidí a jejich zkušenostech. V dnešní době ale tento systém začíná vykazovat určité nedostatky. Není totiž snadné optimalizovat úlohu, která má mnoho vstupních parametrů, které jdou velmi často proti sobě. Ne úplně ve smyslu požadavků jiných profesí, ale v tom, že je potřeba brát v úvahu všechny dopady stavby zmíněné výše. V takovém případě je vhodné vyzkoušet řádově více variant řešení daného problému, tím se také násobně zvyšuje čas, který musí člověk do práce vložit i se všemi návaznostmi. Pokud se zjistí, že některá z dimenzí prvků musí být jiná, proces se opakuje, ať už máme naprogramovaný tabulkový editor, nebo bez něj, je potřeba se tím znovu zabývat a provést nový výpočet. Následně musíme manuálně změnit dimenzi, případně nejmenší dimenzi zvolí program. Často však bez hlubšího kontextu.

Pokud chceme proces zefektivnit, tak můžeme využít nástrojů jako jsou parametrické modelování, genetické algoritmy a z nich vycházející víceúčelovou optimalizaci. Za použití všech těchto nástrojů lze docílit mnohem rychlejšího řešení požadovaných problémů. Navíc lze využít další možnosti, jelikož tento přístup dokáže skloubit jak statiku, tak i například množství tepla získaného ze slunečního záření. Upravuje tedy velikosti oken, nosné prvky a jejich dimenze tak, aby se vyhovělo požadavkům, které na konstrukci klademe. Algoritmus běžně posoudí tisíce až desetitisíce řešení v řádu hodin, přičemž záleží na složitosti konkrétní úlohy. Zvýšením výpočetního výkonu lze však snížit čas potřebný k nalezení optimálního řešení.

Jedná se tedy o univerzální nástroje, které umožňují komplexnější řešení a výrazně zkracují dobu strávenou nad řešením jednotlivých variant. V budoucnu, kdy se výpočetní výkon počítačů bude stále zvyšovat, lze očekávat, že si tyto metody najdou své místo v běžných návrzích budov a pomůžou vybudovat lepší prostředí pro spolupráci všech subjektů.

Z těchto řádků vyplývá, že tímto způsobem lze šetřit čas při návrhu, objemy konstrukcí, vhodně umístit konstrukční prvky a volit jejich dimenze. Přímo tím ovlivníme také dopad na životní prostředí a využívání přírodních zdrojů.

Samotné algoritmy jsou kontrolovány uživatelem a mají určité limity. Fungování a možnosti genetických algoritmů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

Kapitola 2

Raná fáze návrhu

2.1 Vývoj k moderní architektuře

V průběhu mnoha staletí, kdy lidé stavěli budovy všech druhů, se architektura posunula významným způsobem vpřed. Mnohokrát se takto posunula i v dobách, kdy se budovy stavěly hlavně kvůli jejich primární funkci, a to poskytnout obyvatelům přístřeší s možností udržování vnitřního klimatu. Dříve byl hlavní problém zimní vytápění. Stěny tvořily mohutné konstrukce, a tak se v létě nepřehřívaly.

V minulých staletích budova pro běžného obyvatele znamenala hlavně funkční záležitost, aby poskytla přístřeší a vhodnější vnitřní prostředí k životu než v exteriéru. Ovšem i tak existovalo jen několik stavitelů, kteří dokázali vybudovat i v dnešních měřítkách architektonicky velmi hodnotné budovy. Tyto budovy byly ale nákladné a velmi složité na provedení. Nebyla výjimka, aby stavba probíhala i několik desetiletí. Jedna z takových budov je i chrám svaté Barbory v Kutné Hoře.



Obrázek 2.1: Chrám svaté Barbory v Kutné Hoře ¹

Bohatě zdobené a architektonicky výrazné prvky jsou nedílnou součástí budovy. Jedná se jen o jeden z mnoha případů, které mohou být i o mnoho starší. Nicméně to vypovídá o tom, že architektonické řešení bylo na svou dobu náročné, a zvládlo ho jen malé množství lidí. Běžný obyvatel nedisponoval ani potřebnými prostředky ani znalostmi pro podobné řešení. U těchto budov je explicitně vidět stavařské umění, neboť jsou přímo odhaleny nosné prvky konstrukcí. Tyto prvky plně respektují statické požadavky a jsou umístěny tak, aby přesně a jednoduše vystihovaly cestu zatížení konstrukcemi. Tento příklad uvádím primárně proto, že architektura byla úzce spjatá se statickou funkcí, a i přes to dokázala tuto funkci pro nezasvěcené oko potlačit. Proto musel stavitel výborně rozumět staticce a využít ji pro svůj prospěch. Nemohl totiž využívat metody a materiály jako používáme dnes. V dalších staletích přicházela nová řešení, nové technologie, nové metody využití materiálů. Významným způsobem také pokročila výuka stavitelského řemesla, proto jsme tady i my.

Moderní architektura je dnes pojem, který je blízký téměř každému z nás. Výjimečná architektonická řešení jsou dostupnější jak po finanční, tak po stránce proveditelnosti. Proto se do návrhu budov stále více zapojují i architekti, kteří mohou budovu posunout správným směrem, aby odpovídala modernímu pojetí staveb.

V dnešní době je architektura i statika na podobné úrovni. Proto je velmi důležitá spolupráce lidí, kteří pracují odděleně na každé části projektu. Pokud by návrh měl pouze architektonickou hodnotu, můžeme očekávat, že konstrukce bude odvážná a bude působit krásným dojmem. Ovšem může být velmi drahá a těžko proveditelná. Pokud by návrh byl pouze statický, budovy by byly velmi jednoduché a tvořily by staticky ideální tvary bez dalších prvků. Tyto dva parametry můžeme považovat za úplný základ pro rozvoj budov. Nicméně je mnoho faktorů, které naše stavby ovlivňují. Tím utváří požadavky jak na architekturu i statiku, tak na využívání materiálů a zdrojů, kvalitu vnitřního prostředí a mnoho dalších faktorů. Vysoké požadavky na kvalitu vzduchu, tepelnou pohodu, dostatek světla, vizuální dojem budovy, i provedení konstrukcí utváří tlak na vývoj budov. A jejich důležitost stoupá, proto je potřeba se důkladně věnovat návrhu budovy v rané fázi návrhu tak, aby budova odpovídala co největšímu množství požadavků na takové úrovni, aby všem vyhověla v dostatečné míře. V blízké budoucnosti bude vyvíjen ještě mnohem větší tlak na udržitelnost výstavby.

Velmi důležitými aspekty staveb se stávají i další parametry jako například spotřeba energií. Výroba stavebních materiálů bývá často velmi energeticky náročná. Proto je vhodné volit konstrukce, které materiál využívají v co největší míře a nevytváří zbytečné nároky na spotřebu materiálů pocházejících z náročných provozů. Je proto také vhodné volit systémy s menší spotřebou materiálů nebo se snažit konstrukce co nejvíce optimalizovat. Z dlouhodobého hlediska objem výstavby stále stoupá a zároveň klesají zásoby nerostných surovin. Je tedy potřeba tyto skutečnosti vnímat a směřovat výstavbu k udržitelnému vývoji. S tím souvisí také energetická náročnost pro samotný provoz budovy. Ta je se stoupajícími nároky na kvalitu vnitřního prostředí stále vyšší. Spotřebu energií na chlazení a vytápění lze totiž omezit vhodným využitím tvarů konstrukcí a jinými konstrukčními prvky.

¹Zdroj:<https://khfarnost.cz/cs/2020/05/31/chram-sv-barbory-se-znovu-otevira-25-5/>, [citováno: 2.12.2020]

Větší pozornost se věnuje i zasazení budov do krajiny a změnám v nejbližším okolí stavby. Velmi důležité je například zadržení vody v krajině, což směřuje k výstavbě dalších systémů napojených na budovy. Nejběžnější součástí může být hospodaření s dešťovou vodou. S řešením zadržujícím vodu v krajině je spojeno často i přirozené ochlazování prostoru kolem staveb. Správným řešením všech těchto proměnných lze vytvořit udržitelný systém výstavby, který bude nadále sloužit bez toho, aby narušoval další vývoj životní úrovně na úkor příštích generací.

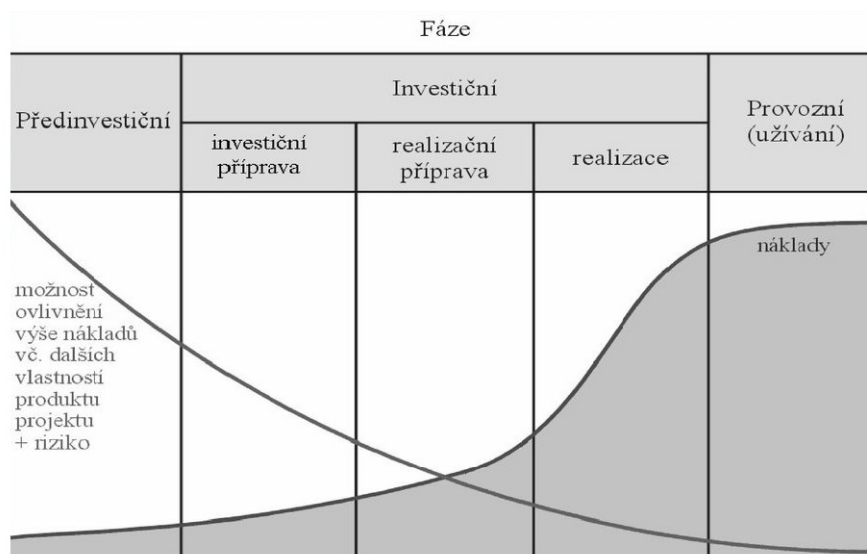
Se všemi zmíněnými problémy musíme jako inženýři pracovat. V posledních letech se tak dostávají do popředí netradiční metody umožňující určitý posun vpřed. Funkce jednotlivých prvků se tak spojují a stoupá jejich složitost na návrh. Je totiž důležité, aby jednotlivé profese znaly dopad jejich rozhodnutí a vnímaly možnosti, jak skloubit různé aspekty dohromady. Příkladem může být využití nosných konstrukcí tak, aby poskytovaly dostatečnou statickou oporu, ale zároveň například optimalizovat jejich tvary a rozmístění, aby v maximální možné míře v létě blokovaly sluneční záření a v zimě umožnily pravý opak. To klade vyšší nároky na jednotlivce, který návrh zpracovává. S výhodou se v tomto ohledu dá využít moderních optimalizačních metod využívajících počítačové simulace. Použitím genetických algoritmů lze docílit přiblížení ke všem cílům, které jsou pro konkrétní stavbu důležité. Tyto metody navíc umožňují zpracovateli jedné části návrhu pochopit vlivy jeho rozhodnutí na další fáze projektu. Proto je důležité se mu věnovat v dostatečné míře. S využitím uvedených moderních metod lze dosáhnout lepší návaznosti jednotlivých fází a minimalizovat problematická řešení již v raných fázích návrhu, kdy je snadné je odstranit či upravit.

2.2 Studie

2.2.1 Studie a její význam

Studie budovy je prvotní návrh budovy, který zpracovává hlavně architekt. Je to součástí předinvestiční fáze projektu. Navrhnu se komunikační celky, funkce místností včetně jejich rozmístění a také další koncepční záležitosti. Architektonická studie je výchozí pro všechna další dílčí řešení. To znamená, že další zpracovatelé dokumentace by měli návrh architekta respektovat. Zároveň je ale potřeba, aby architekt bral zřetel i na další profese. Měl by tedy vědět, že bude v budově například umístěna vzduchotechnika, takže bude potřeba do budovy umístit podhled pro vedení technologií, případně by měl alespoň rámcově umístit nosné prvky tak, aby jeho návrh byl realizovatelný. V ideálním případě se na tvorbě studie podílí i další zpracovatelé projektu. Vzniká tedy celek, který se každému dalšímu v pořadí návrhu bude lépe zpracovávat.

Důležité to je hlavně proto, že v rané fázi návrhu lze zásadním způsobem ovlivňovat náklady, které jsou nevyhnutelné v dalších fázích realizace projektu. Mimo organizační a finanční aspekt, je součástí předinvestiční fáze právě i studie. Tato fáze je tedy kritická pro vytvoření ideálního návrhu. V této fázi je ochota a finanční náročnost na změnu na velmi dobré úrovni. Proto by se měla této fázi věnovat velká pozornost. Zásadně se tím ovlivňuje další vývoj návrhu a přímo ovlivňuje náklady v dalších fázích. Umožňuje také změny v celkovém řešení stavby. [1]



Obrázek 2.2: Jednotlivé fáze projektu a jejich vliv na náklady [1]

Hlavní cíl této fáze je tedy vytvořit návrh budovy, který bude už dopředu mít vyřešené konstrukční, architektonické, technické a enviromentální problémy. Pokud se vše podaří, můžeme snížit náklady na samotnou přípravu projektové dokumentace, výstavbu, dobu výstavby, ale i změny v průběhu výstavby, kdy se už relativně špatně implementují. Ovlivníme tím také vliv na životní prostředí přes již dříve uvedené mechanismy spojené s optimalizací návrhu.

Tato práce se zabývá hlavně ranou fází návrhu, kdy statik a architekt musí společně vytvořit takový návrh, který je pro obě strany vyhovující a bude respektovat všechny požadavky kladené na budovu.

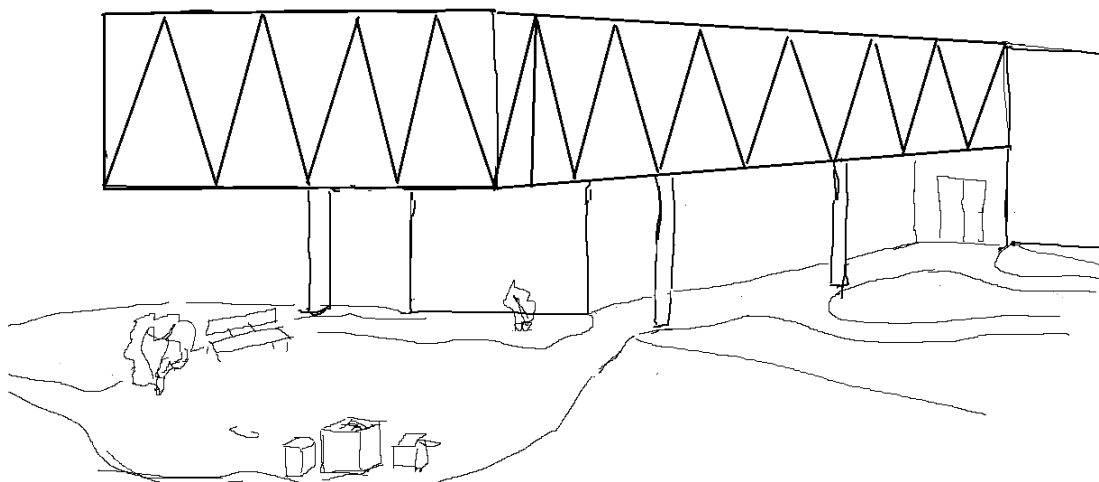
2.2.2 Studie řešeného objektu

Za pomoc se zpracováním studie, dalšího řešení a poskytnutí zpětné vazby děkuji studentovi magisterského programu Architektura a stavitelství Bc. Patriku Kučerovi. Spolupráce měla pro zpracování práce zásadní přínos.

Popis objektu

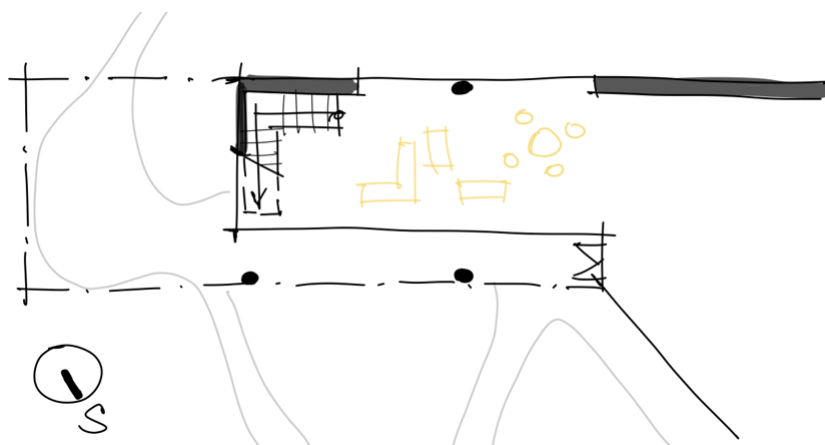
Návrh se zabývá konstrukčním řešením budovy sloužící jako část univerzity nebo výukového centra. Konstrukci tvoří dvě nadzemní podlaží. Druhé nadzemní podlaží tvoří dominantní prvek v podobě tubusové konstrukce. Druhé nadzemní podlaží přesahuje rozsah podlaží prvního. V prvním nadzemním podlaží se nachází ve vnitřní části vnitřní pobytový prostor. Zbývající část pod druhým nadzemním podlažím tvoří venkovní pobytový prostor. Druhé nadzemní podlaží obsahuje jednu hlavní přednáškovou místnost a jednu prezentační místnost. Celkové půdorysné rozměry jsou 16 x 40 m. Konstrukční výška prvního nadzemního podlaží je 5 metrů a druhého nadzemního podlaží 4,6 m. Střecha je plochá s extenzivní zelení, pochozí.

V prvním nadzemním podlaží je největší důraz kladen na otevřenost prostoru a splynutí s okolím, což je docíleno hlavně subtilními nosnými konstrukcemi, které v minimální míře zasa-



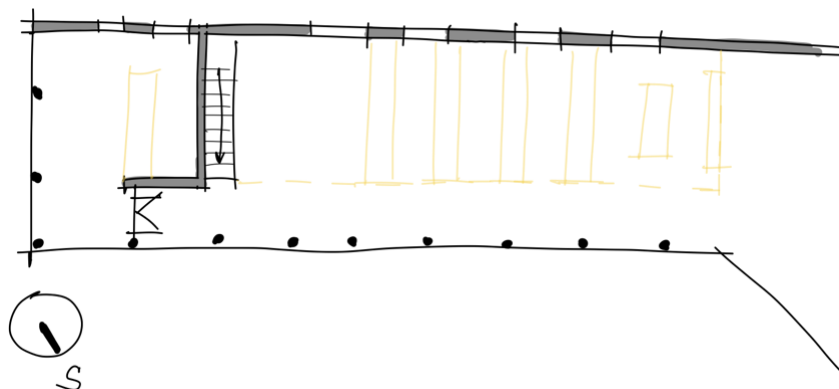
Obrázek 2.3: Pohled na budovu

hují do vnitřního prostoru. Je to hlavní prostor v budově pro setkávání osob a jejich vzájemnou komunikaci. Vnitřní dispozice není omezována, a tak je možné prostor využít například i jako další prezentační prostory. Z uzavřeného prostoru lze vystoupit do vnějšího, který je tvořen přesahujícím druhým nadzemním podlažím. Vzniká tak unikátní prostor chráněný před deštěm pro další využití. Smysl přesahujícího druhého nadzemního podlaží je také v co nejmenším omezení průchodu v místě budovy, kde se nacházela spojnice mezi dalšími částmi areálu. Myšlenka architekta je vytvoření dominantní části, kterou tvoří druhé nadzemní podlaží, a zároveň zachování stávajících cest a rozšíření venkovních pobytových prostor v areálu.

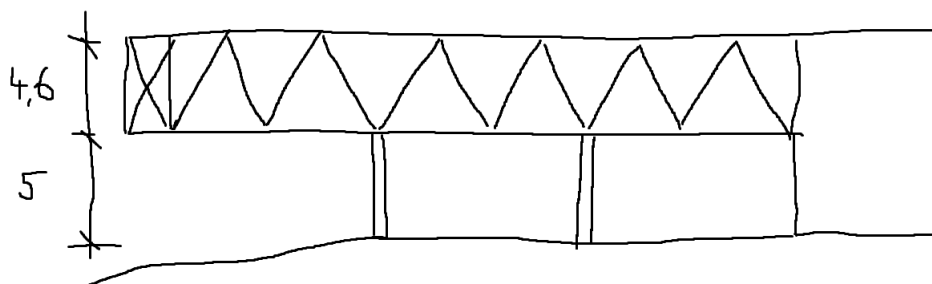
Obrázek 2.4: Studie 1.NP²

Druhé nadzemní podlaží je určeno pro výuku a prezentování prací. Pro umocnění dojmu tvoří celou severozápadní a severovýchodní část fasády sklo. To umožňuje další spojení s exteriérem a dalšími dominantami viditelnými z budovy. Prosklená fasáda je doplněna ocelovými nosnými prvky tvořící příhradu a tím dotváří také interiér budovy.

²Bc. Patrik Kučera (1. 1. 2021)

Obrázek 2.5: Studie 2.NP³

Společně s tvarováním okolního terénu a místy pro procházení pod budovou i v jejím nejbližším okolí budova vytváří jedinečný celek. Dojem propojení s exteriérem pro studenty uvnitř. Pro kolemjdoucí zase vytváří neobvyklý dojem celkový předsazený tvar konstrukce. Spolu s dalšími prvky v okolí tak budova tvoří společně fungující systém.



Obrázek 2.6: Pohled severní

2.3 Víceúčelová optimalizace ručního návrhu

Víceúčelová optimalizace znamená, že se v průběhu návrhu budovy musí při řešení jednotlivých částí zohlednit další požadavky. Je tedy nutné vnímat jednotlivé úpravy komplexně a brát v úvahu vliv jednotlivých rozhodnutí na další části návrhu. Nelze tedy učinit jednoúčelové rozhodnutí bez zvažování vlivu na ostatní části.

Víceúčelová optimalizace je náročný proces a dá se k ní přistupovat různými způsoby. V následujících kapitolách je provedena optimalizace nejdříve pomocí tradičnějších metod s podporou jen několika nástrojů za použití hlavně osobních zkušeností. Poté je optimalizace provedena za podpory pokročilejších nástrojů a metod.

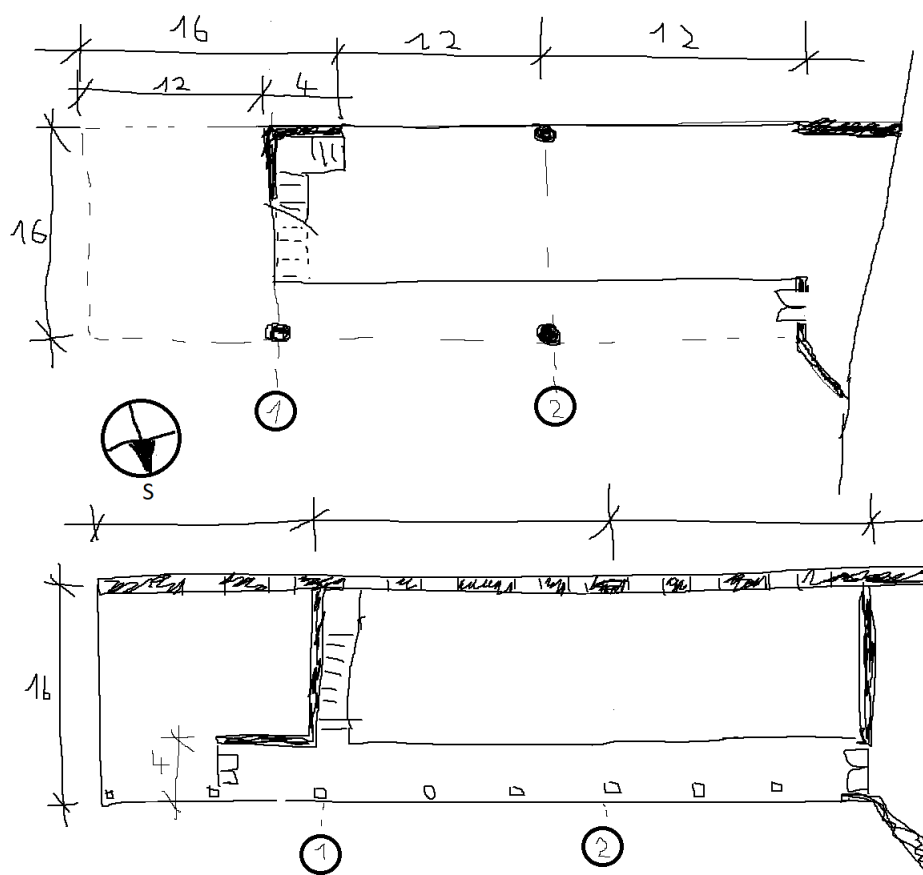
³Bc. Patrik Kučera (1. 1. 2021)

2.3.1 Konstruktivní řešení

Nosné konstrukce tvoří monolitický železobeton spolu s částmi z konstrukční oceli. Vodorovné nosné konstrukce představují desky a průvlaky. Svislé nosné konstrukce jsou tvořeny monolitickými železobetonovými stěnami a sloupy. Budova vytváří jeden dilatační celek. V řešené části objektu se nachází jedno schodiště se dvěma monolitickými železobetonovými rameny vetknutými do stěny a zavěšených na táhlech. Celá část druhého nadzemního podlaží se dá považovat za předsazenou konstrukci. Tuto konstrukci podepírá sada sloupů a stěny. Rozmístění nosných prvků je provedeno dle studie a bude dále řešeno.

Jako hlavní konstrukční materiál je zvolen beton třídy C30/37-XC1-C10,2-Dmax 16-S3 vyztužen betonářskou výztuží třídy B500B. Dále je použita konstrukční ocel třídy S235. Při návrhu konstrukcí je využit také program SCIA Engineer 19. V programu jsou provedeny výpočty pro předběžnou analýzu navržených prvků. Síť MKP je tvořena prvky o hraně 0,5 m s automatickým lokálním zahuštěním pro přesnější analýzu kritických míst.

2.3.2 Konstruktivní požadavky



Obrázek 2.7: Prvotní návrh nosných prvků architektem

Návrh architekta je ztvárněn studií. Studie obsahuje výchozí návrh konstrukčních řešení a je dále analyzována s přihlédnutím k dalším profesím a řešením. Dispoziční návrh je řešen na

obrázcích 2.4 a 2.5. Rozmístění nosných konstrukcí dle návrhu architekta pak na obrázku 2.7. Dispozice vychází z potřeby využití prostoru a navazujících částí. Koncepční řešení návrhu je potřeba dodržovat, aby výsledný dojem působil tak, jak byl zamýšlen architektem.

V druhém nadzemním podlaží architekt navrhl v jihovýchodní části stěnový nosník s okenními otvory. Na severní straně nosné prvky tvoří příhradová konstrukce z ocelových profilů procházející celou délkou budovy. Vnitřní dispozice je rozdělena do několika částí v obou podlažích, čímž se vytváří meze pro využití nosných prvků. Důležité jsou pro návrh i požadavky na zachování vnějších rozměrů budovy. Z finančních důvodů je nevhodné použití předpínacích systémů a dalších náročných stavebních technologií. Tímto je vytvořena základní představa o konstrukcích. Dále se budeme zabývat komplexním řešením budovy s ohledem na všechny požadavky pro tvorbu moderních budov.

2.3.3 Hlavní kritéria návrhu

Jako nejdůležitější součást návrhu se dají považovat tyto body:

- Spotřeba materiálu - tloušťka prvků
- Optimalizace geometrie nosných prvků
- Umístění nosných prvků
- Analýza vyztužitelnosti konstrukcí
- Vyhnutí se komplexním řešením jako jsou předpínací systémy

Další kritéria, která mají vliv na výsledný návrh

- Analýza možných míst pro vedení technologií
- Zjištění tepelných zisků v období léto/zima
- Analýza průhybů a dalších deformací a jejich vliv na ostatní konstrukce
- Složitost procesu výstavby

Váhování kritérií

Při ručním návrhu konstrukcí je potřeba všechny tyto podmínky mít na paměti při zpracování návrhu. Každé z nich má na konkrétní budovu rozdílný vliv a je potřeba si určit jejich žebříček. Tím pádem bude jasně dané, jaká kritéria se musí bezpodmínečně splnit a jaká mají menší důležitost a budou se řešit jiným způsobem. Často proto, že nemají velký vliv na proces rané fáze návrhu.

Všechna tato kritéria je nutné kombinovat. Velmi často je jedno kritérium v rozporu s dalším. Například musíme minimalizovat průhyb, ale zároveň snížit výšku průvlastku. Hledáme tedy optimální řešení s co nejmenší výškou, ale zároveň průhybem splňujícím nastavené limity.

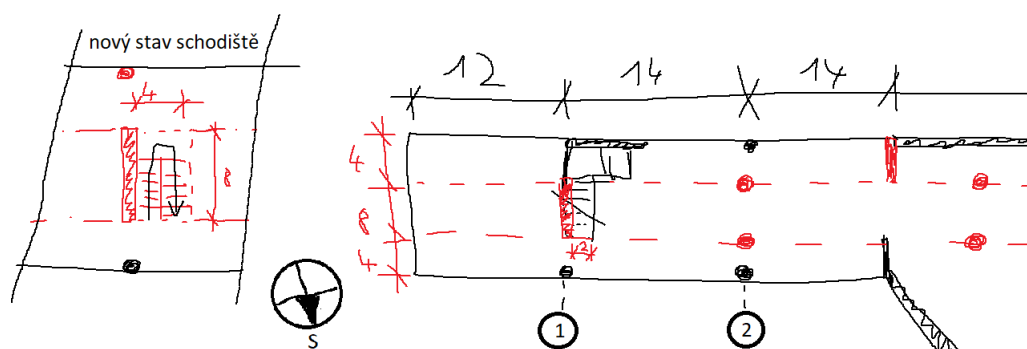
2.4 Konstrukční návrh

Návrh všech konstrukcí vychází ze studie. Je potřeba dodržet v co největší míře myšlenku architekta. Zároveň také splnit další požadavky na konstrukce jako prostupy technologií, případně další vlivy, které mají nosné konstrukce na ostatní kompletační konstrukce.

2.4.1 Základní řešení

Jako první přichází na řadu návrh konstrukcí, aby bylo možné splnit limitní namáhání a průhyby. Proto dochází k přidávání konstrukčních částí, které doplňují původní návrh.

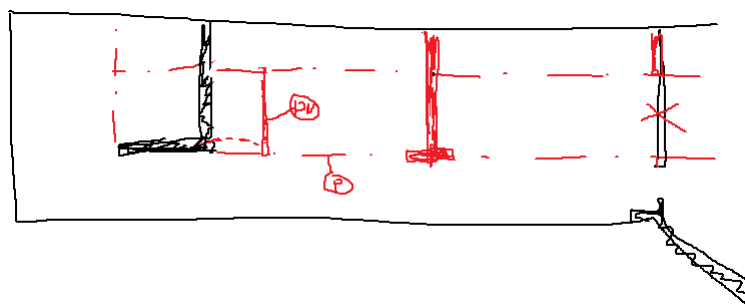
Hlavní součástí je umístění průvlaků v rámci půdorysu pro zmenšení rozponu desek. Základní myšlenka je dodržet maximální rozpon 8 m. Černá barva znázorňuje původní návrh, červená potom nové konstrukce a úpravy.



Obrázek 2.8: Rozdělení desky nad 1.NP průvlaků

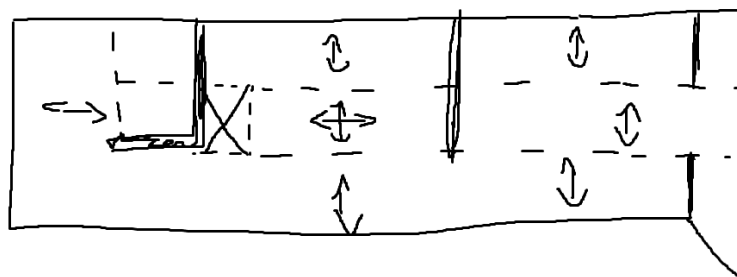
V prvním nadzemním podlaží tato změna vyžaduje přidání dalších 2 sloupů do řady 2 a změnit systém schodiště. Nyní je schodišťový prostor umístěn mezi průvlaků a je nutné změnit geometrii schodiště. Je také nutné přidat podporu v místě napojení na další část budovy, k tomu slouží nová stěna. Desky mají díky geometrii průvlaků definované hlavní směry pnutí, nicméně komplexnost tvaru konstrukcí způsobuje, že nelze zanedbat kroutící moment. Ten mění směr hlavních namáhání a určuje návrhový přístup.

Rozmístění stěn a nosníků dále respektuje požadavky na umístění a zachování rovného pohledu. Dále umožňuje umístění vzduchotechniky a dalších vedení instalací z hlavní části budovy. Vedení pro učebny neprotínají nosníky a ve stěnách lze zřídit instalační průchodky.



Obrázek 2.9: Konstrukční úpravy ve 2.NP

Druhé nadzemní podlaží má průvlaky umístěny ve stejné poloze jako podlaží první. Zde ovšem dochází k dalším změnám geometrie. Ve vykonzolované části je potřeba udělat výměnu, protože ocelové nosníky umístěné v čele budovy znemožňují ukončení průvlaku v konstantní výšce průřezu. Návrh bude ověřen při bližší analýze. Dále je kolem schodišťového prostoru umístěn parapetní nosník PN. Ten tvoří výměnu mezi průvlaky u volného okraje desky u schodiště. Prvek zároveň tvoří zábradlí a je na něj umístěna skleněná stěna na oddělení učebny od prostoru schodiště. Zároveň byla upravena stěna v místě napojení na zbývající část budovy. Hlavní změna je přidání nosné stěny uvnitř dispozice druhého nadzemního podlaží. Tím dojde k rozdělení prostoru na dvě menší části. Ze statického hlediska je to ovšem nutná úprava.



Obrázek 2.10: Schéma hlavních směrů pnutí stropních desek

Názor architekta

„Konstrukce je v počátku navržena tak, aby se jednalo o vzdušný a flexibilní prostor, který svým vzhledem zapadá co nejvíce do kontextu okolí a nenarušuje ho. Oproti původnímu požadavku zcela otevřených dispozic je patrná hlavní změna – vložení podpůrné stěny do prostoru a jeho následné dispoziční rozčlenění na více celků. Vnitřní funkčnost touto změnou díky své velikosti neutrpí. Návrh v maximální možné míře využívá sloupů jako hlavní svislé nosné konstrukce, díky čemuž je zachována zmiňovaná flexibilita. Přidané průvlaky jsou ze statického hlediska možné. Průvlaky jsou komponované v podhledech a výrazným způsobem původní záměr negativně neovlivní. Tvar schodiště vedoucího do spodního podlaží je oproti záměru pozměněn, tato úprava ale nehraje zásadní roli ve funkčnosti.“

Návrh celkově ctí estetickou čistotu, která je podpořena návazností nosných konstrukcí v rámci celého objektu. Po zvážení všech kladů i záporů jsou všechny provedené změny z hlediska zachování rázu a prvotní myšlenky zcela akceptovatelné. S výslednou podobou návrhu jsem v plné míře spokojen.”⁴

Názor statika

Návrh konstrukce se snaží reflektovat potřeby pro vhodné statické působení s dalšími vlivy jako jsou proveditelnost nebo vymezení míst pro vedení technologií. Důležité v průběhu návrhu je také to, aby se konstrukčními úpravami neměnil ráz budovy navržený architektem. Nebylo

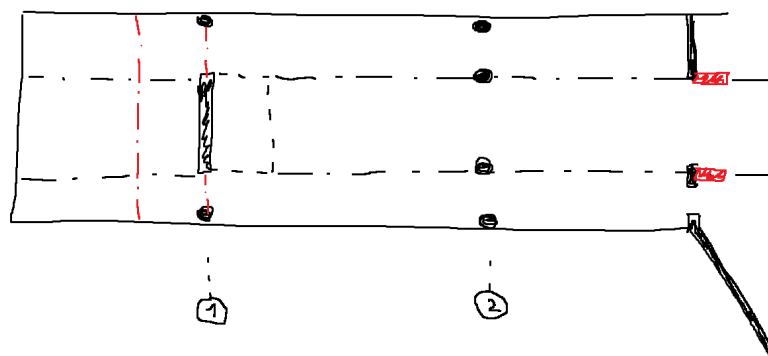
⁴Bc. Patrik Kučera (26. 12. 2020)

tedy možné, ačkoliv by to bylo staticky výhodné, umístit na spodní stranu desky nad druhým nadzemním podlažím obvodový nosník jako v případě prvního nadzemního podlaží. Dále bylo omezeno využití nosných stěn v prvním nadzemním podlaží, aby nedocházelo zbytečně k dělení prostoru a zůstala tak zachována vzdušnost této části budovy. Staticky by takovéto řešení bylo výhodnější. Vyhnutí se předpínacím systémům zase snižuje technologickou náročnost a umožňuje využití standardních postupů bez navyšování nákladů na výstavbu a statický návrh. Určuje to také možnost zapojení firem bez potřebných technických možností.

2.4.2 Úpravy po prvotních analýzách

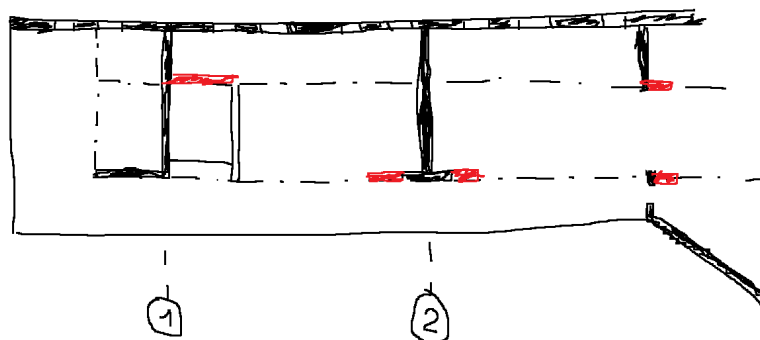
Po bližší analýze bylo zjištěno, že na několika místech namáhání přesahuje možnosti materiálů a vyžaduje tak drobné konstrukční úpravy. Průvlaky mají dostatečné dimenze a jejich deformace jsou v rámci daných mezí. Deska svými dimenzemi postačuje a nedochází k nadměrným deformacím nebo namáhání.

Pro další návrh byly provedeny následující úpravy.



Obrázek 2.11: Dodatečné úpravy konstrukcí v 1.NP

Vzhledem k velkým vnitřním silám je potřeba upravit šířku průvlaku z 260 na 300 mm, a v místě jejich uložení je nutné zvětšit tuhost podpor v podélném směru.

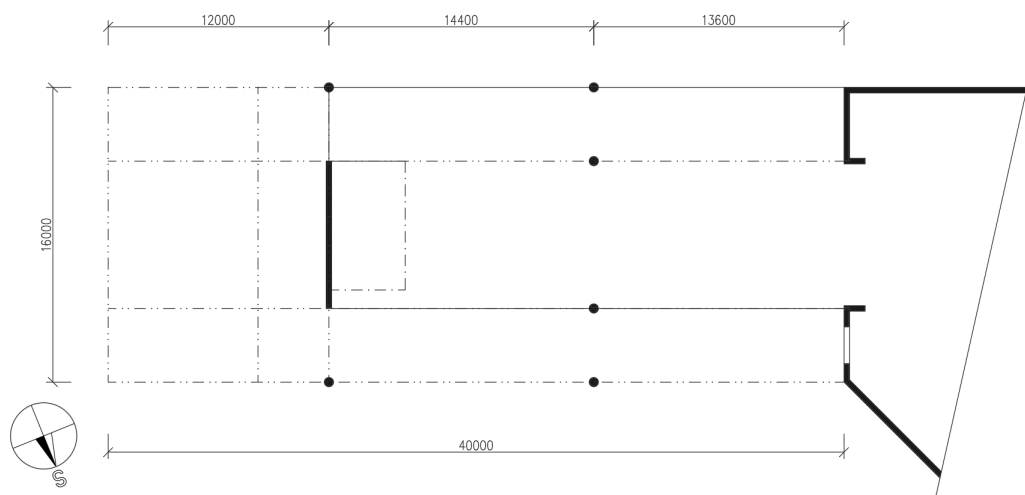


Obrázek 2.12: Dodatečné úpravy konstrukcí v 2.NP

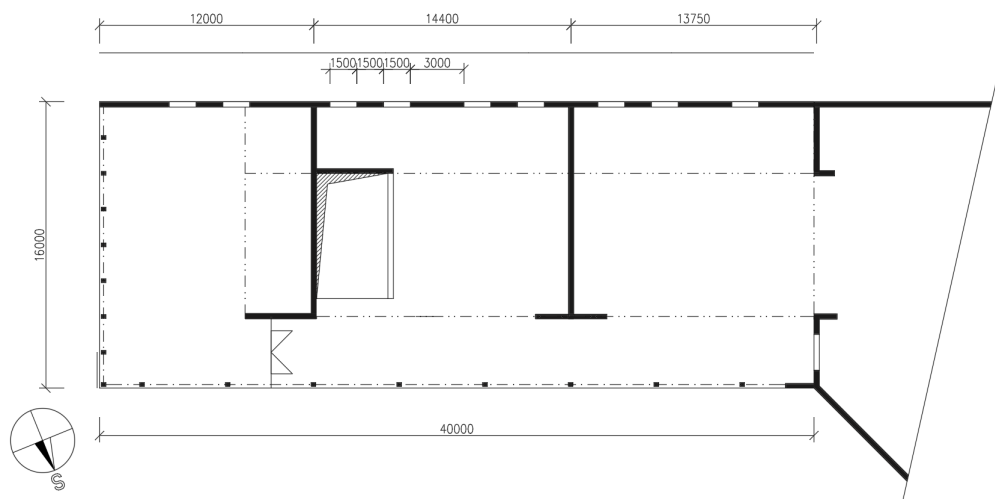
V dalších místech, kde jsou ukončeny stěny volně na desce bylo umístěno několik dalších výztužných žebér kvůli vysokým hodnotám napětí v konstrukci. V druhém nadzemním podlaží dochází k obdobným úpravám z důvodu nadměrného namáhání konstrukcí. Zvětšení tuhosti podpor průvlaků v podélném směru a úprava stěn pro lepší odolávání vnitřním silám. Dále přidání nosné stěny u schodišťového prostoru v druhém nadzemním podlaží.

2.4.3 Výsledný návrh

Výsledný návrh vychází z prvotních ověření konstrukčního řešení. Konstrukce je ručně navržena se zohledněním všech vlivů ovlivňujících architektonické i statické ztvárnění. Návrh je proveden v maximálním možném rozsahu implementace souvislostí v rané fázi návrhu. Reprezentuje dnešní proces návrhu a dokládá jeho důležitost. Kritická je přitom komunikace s dalšími účastníky projektu. V rámci ručního návrhu jsou již použity metody pro získávání dat o enviromentálních a dalších vlivech na budovu mimo statiku a architekturu. Konkrétní ověření konstrukcí je provedeno v analýze ručního návrhu.



Obrázek 2.13: Výsledný konstrukční návrh 1. NP



Obrázek 2.14: Výsledný konstrukční návrh 2.NP

2.5 Analýza ručního návrhu

Pro další porovnání je nutné konstrukci analyzovat a zjistit, jestli daný návrh vyhovuje všem požadavkům. Na konstrukci bude zkoumána možnost vyztužení konkrétních prvků a jejich částí, dále také provedena analýza tepelných zisků a denního světla v místnostech. Tato analýza může v určitých oblastech přesahovat základní myšlenku rané fáze návrhu, ale je nezbytná pro další analýzu a porovnání s návrhem pomocí genetických algoritmů.

2.5.1 Statická analýza

Konstrukce je v této fázi vymodelována v programu SCIA Engineer 19 a je na ní provedeno několik návrhových procesů.

Návrh vodorovných nosných konstrukcí

Pro návrh jsou použity obecné empirické vztahy na určení dimenzí konstrukcí. Stropní deska je navržena podle místa s největším rozponem.

Vzorec pro návrh tloušťky desky.

[mm]

$$h_d = (1/35 - 1/30) * l \quad (2.1)$$

Deska	Rozpon	h_{d1}		h_{d2}	h_d
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]
D1	8 000	228	-	267	260
D2	4 000	115	-	133	260

Tabulka 2.1: Empirický návrh tloušťky desky

Tloušťka desky je volena 260 mm, a bude použita na všechny desky bez ohledu na rozpon kvůli zjednodušení návrhu a betonáže.

Průvlaky jsou empiricky navrženy obdobným způsobem.

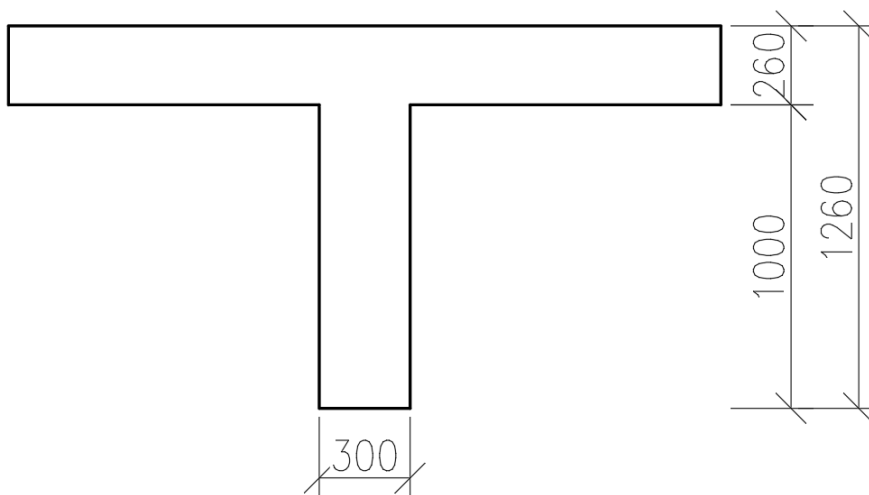
[mm]

$$h_p = (1/12 - 1/10) * l \quad (2.2)$$

Průvlak	Rozpon	h_{p1}		h_{p2}	h_p
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]
P1	14 400	1200	-	1440	1 260
P1	13 750	1145	-	1375	1 260

Tabulka 2.2: Empirický návrh Výšky průvlaku

Průvlaky jsou navrženy s konstantní výškou jako T průřez. Šířka průvlaku je navržena 300 mm.



Obrázek 2.15: T průřez - průvlak P

Návrh svislých nosných konstrukcí

Pro sloupy již byl dříve zvolen kruhový průřez o průměru 600 mm. Hodnota je neměnná a daná architektonickým návrhem. Pro návrh je potřeba mít na paměti, že namáhání sloupu nepředstavuje pouze dostředný tlak, ale i ohybové momenty, které snižují jeho únosnost v prostém tlaku. Podrobný návrh interakčního diagramu však není předmětem této práce a byl by vytvořen v dalších fázích návrhu. Stěnové nosné konstrukce jsou zvoleny stejné tloušťky jako desky a to 260 mm, kvůli jednoduchosti návrhu. V dalších fázích lze tuto hodnotu podrobnějším návrhem a posouzením změnit.

Předběžné stanovení zatížení

Další návrhový proces se týká zatížení. Objekt není podsklepen, první nadzemní podlaží se svým zatížením tudíž na návrhu nepodílí. Zatížení je záměrně zvoleno jako celoplošné pro reprezentaci prvotní fáze návrhu a není tak možné tyto hodnoty považovat za konečné. Pokud by projekt byl dále zpracováván, je potřeba udělat samostatnou statickou analýzu, návrh a posouzení všech nosných konstrukcí.

Hodnota zatížení se odvíjí od využití prostoru. V druhém nadzemním podlaží se nachází výukové prostory a prezentační místnost. Proměnné zatížení spadá do kategorie C2 (přednáškové místnosti). Hodnota užitného zatížení je $q_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$. Střecha je pochozí a spadá tak do kategorie I (střechy přístupné s užíváním dle běžných kategorií) s plošným zatížením $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$. Zatížení ploch je uvedeno v následující tabulce.

Vrstva	Tl. vrstvy	Obj. hmotnost	g_k
	[mm]	[kg/m ³]	[kN/m ²]
Souvrství podlahy	160	1 600	2,56
ŽB deska	260	2 500	6,5
Podhled	-	-	0,5
Celkové zatížení			9,56
Stálé zatížení	$g_{k2} =$		9,56

Tabulka 2.3: Stálé zatížení v 2.NP

Střecha je pochozí a určuje následující zatížení.

Vrstva	Tl. vrstvy	Obj. hmotnost	g_k
	[mm]	[kg/m ³]	[kN/m ²]
Souvrství střechy	230	1 600	3,68
ŽB deska	260	2 500	6,5
Podhled	-	-	0,5
Celkové zatížení			10,68
Stálé zatížení	$g_{ks} =$		10,68

Tabulka 2.4: Stálé zatížení na pochozí střeše

Celkové zatížení je vypočteno z hodnot získaných z výpočtu a normách pro zatížení.

Celkové zatížení na podlaží jsou spočtena dle vzorce. Kde f_d je návrhové plošné zatížení, a γ_g , γ_q jsou součinitele zatížení.

[kN/m²]

$$f_d = g_k * \gamma_g + q_k * \gamma_q \quad (2.3)$$

Pro účely ověřování je vytvořen model v programu SCIA Engineer 19, kde je zadána hodnota zatížení bez vlastní tíhy nosných konstrukcí. Pro správný výpočet je vytvořena kombinace z přídatného zatížení a vlastní tíhy konstrukcí. V tabulce 2.6 je uvedeno zatížení včetně vlastní tíhy konstrukcí.

Celkové zatížení podlaží			
2.NP	f_{k1}	13,56	[kN/m ²]
	f_{d1}	18,906	[kN/m ²]
Střecha	f_{ks}	13,68	[kN/m ²]
	f_{ds}	18,918	[kN/m ²]

Tabulka 2.5: Hodnoty zatížení na jednotlivých podlažích

Podrobnější analýza dimenzí konstrukcí

S využitím statického software jsou zjištěny hodnoty napětí a vnitřních sil. Následující návrhy se zabývají hlavně zjištěním, zda lze dané průřezy vyztužit a jestli nejsou nadměrně namáhány. Pokud ano, je nutné aplikovat konstrukční úpravy a daný detail nebo oblast upravit. Návrh se zabývá hlavně mezním stavem únosnosti (MSÚ). Mezní stav použitelnosti (MSP) je nutné posoudit samostatně. Další podmínky, jako omezení napětí ve výztuži a jiné používané při podrobném návrhu konstrukcí by byly aplikovány v pozdějších fázích návrhu, což přesahuje obsah této práce.

Proces optimalizace prošel několika iteracemi v průběhu návrhu konstrukcí. Následné zkoumání vlastností je provedeno na výsledné variantě vycházející z předchozích zkušebních variant.

Ověření návrhu desky

Na deskách byla použita metoda, při které je potřebná výztuž pro každý směr získána z momentového účinku od zatížení. Na konstrukci je vybráno několik míst, kde se získají ze statického modelu momentové účinky ve směru x (m_x), y (m_y) a kroutící moment (m_{xy}). Ze zjištěných hodnot se dále pomocí momentových diagramů získá hodnota dimenzačních momentů pro navzájem kolmé směry. Ze získaných hodnot lze přímo navrhovat a posuzovat výztuž v průřezu.

Z určených míst se pomocí statického software získají ohybové momenty od zatížení ve směrech osy x a y a kroutící moment. Moment m_x otáčí kolem osy y , respektive m_y kolem osy x . Směry os jsou vyznačeny ve schématu.

Dimenzační momenty pro směr x a y . [kNm/m']

Spodní povrch

$$m_{Rdx} = m_x + |m_{xy}| \quad (2.4)$$

$$m_{Rdy} = m_y + |m_{xy}| \quad (2.5)$$

Horní povrch

$$m'_{Rdx} = -m_x + |m_{xy}| \quad (2.6)$$

$$m'_{Rdy} = -m_y + |m_{xy}| \quad (2.7)$$

Při kladných hodnotách dimezačního ohybového momentu je daný povrch a směr tažený a je nutné k němu umístit výztuž, ta bude tažená. Pokud bude dimezační ohybový moment záporný, povrch je tlačný a není nutné k němu umisťovat tahovou výztuž, pouze konstrukční.

Ohybový moment od zatížení podle úhlu otočení φ vychází ze vztahu:

[kNm/m']

$$m_{\varphi} = m_x * \cos^2\varphi + m_y * \sin^2\varphi + 2 * m_{xy} * \sin\varphi * \cos\varphi \quad (2.8)$$

Dimenzační momenty podle úhlu natočení φ .

[kNm/m']

Spodní povrch

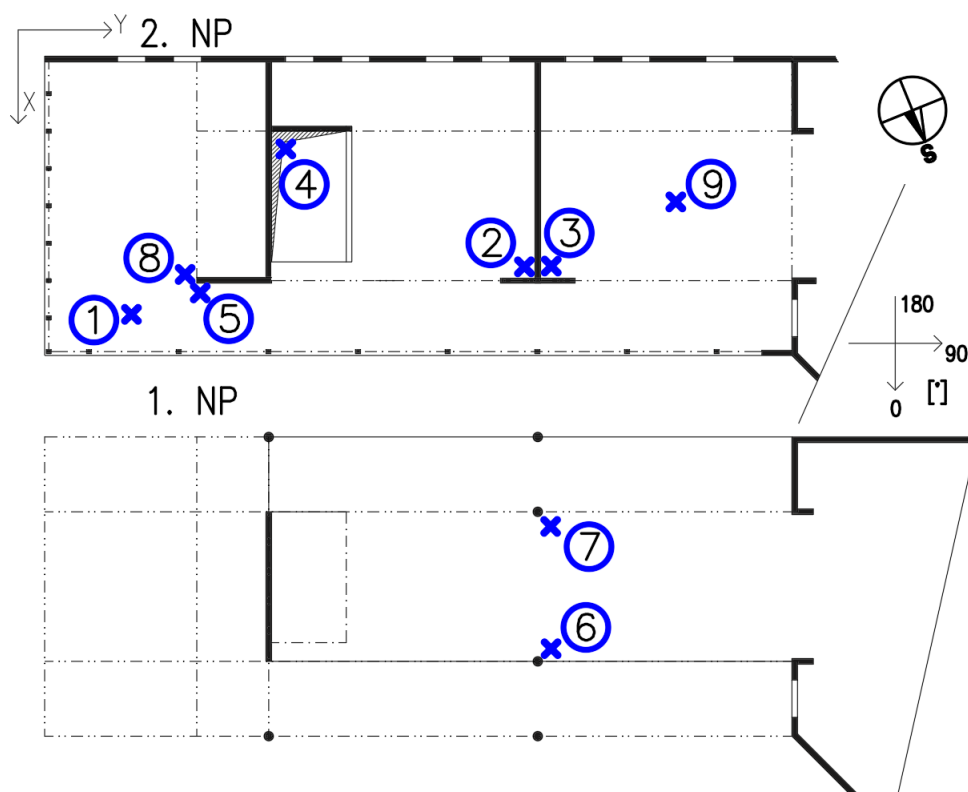
$$m_{Rd\varphi} = m_{Rdx} * \cos^2\varphi + m_{Rdy} * \sin^2\varphi \quad (2.9)$$

Horní povrch

$$m_{Rd\varphi}^i = m_{Rdx}^i * \cos^2\varphi + m_{Rdy}^i * \sin^2\varphi \quad (2.10)$$

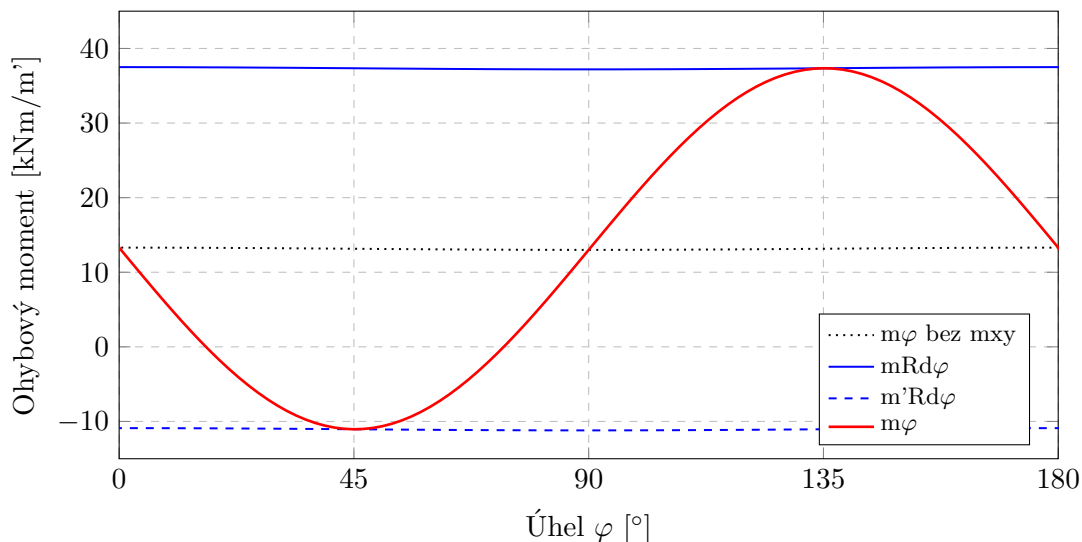
Z takto získaných hodnot momentů lze dopočítat momentové účinky podle úhlu natočení φ .

Pro tuto analýzu bylo vybráno několik míst na obou deskách. Schéma míst pro vnitřní síly je zakresleno na schématu 2.16.



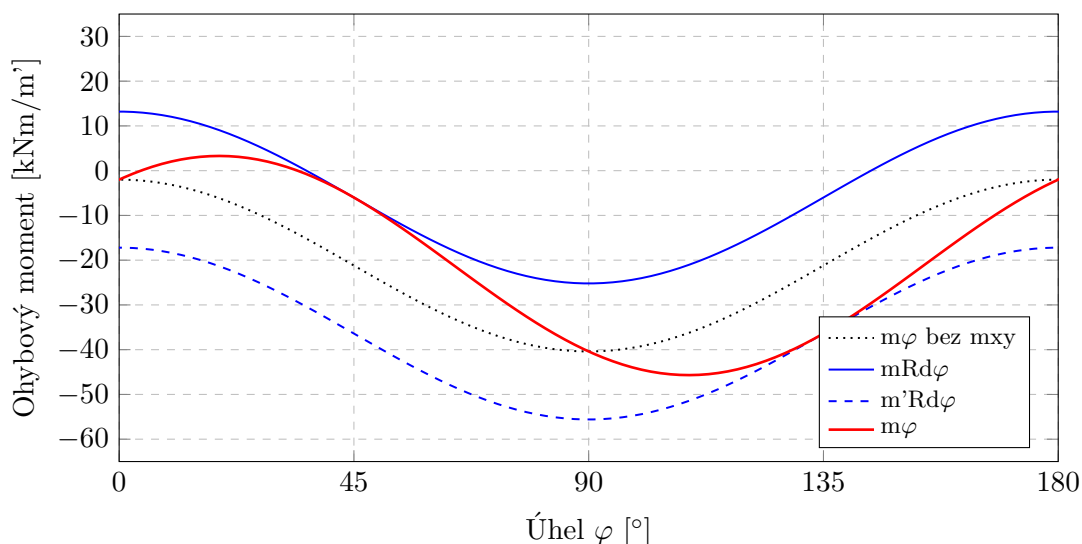
Obrázek 2.16: Schéma míst pro momentové diagramy

Při výběru bodů se ukázalo, že kroutící moment má velký vliv na hodnoty ohybových momentů od zatížení ve směrech x a y. U těchto bodů se hodnota ohybových momentů při obou površích a směrech významně mění. Pro příklad jsou vybrány dva body.



Obrázek 2.17: Momentový diagram v místě 1

Bod číslo 1 má ve směru x a y porovnatelné a relativně malé kladné hodnoty ohybového momentu, který způsobuje tah na spodním povrchu. Proto je křivka průběhu dimenzačního momentu jen málo zakřivená. Ovšem v tomto místě je velký vliv kroutícího momentu, ten výrazně zvyšuje namáhání v úhlu 45° a 135°. Z tohoto důvodu musíme posílit výztuž v základních směrech x a y, případně zvážit umístění natočených příložek.



Obrázek 2.18: Momentový diagram v místě 6

Oproti tomu bod číslo 6 má téměř nulový ohybový moment ve směru x a významný záporný ohybový moment ve směru y, avšak vlivem kroutícího momentu je třeba navýšit potřebnou plochu výztuže v obou směrech. Ve směru x na spodním povrchu bude navíc pravděpodobně potřeba

navýšit plochu výztuže nad rámec konstrukční. Momentový diagram byl získán z následující tabulky. Krok pootočení je 5° . Body získáme ze vzorců uvedených dříve. Pro ukázkou je uvedeno pouze pro bod 1.

Úhel natočení	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$m_{Rd\varphi}$	$m'_{Rd\varphi}$	$m\varphi$	$m\varphi$ bez m_{xy}
°	-	-	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']
0	0,000	1,000	37,5	-10,90	13,30	13,30
5	0,087	0,996	37,5	-10,9	9,10	13,30
10	0,174	0,985	37,49	-10,91	5,01	13,29
15	0,259	0,966	37,48	-10,92	1,18	13,28
45	0,707	0,707	37,35	-11,05	-11,05	13,15
90	1,000	0,000	37,20	-11,20	13,00	13,00
135	0,707	-0,707	37,35	-11,05	37,35	13,15
180	0,000	-1,000	37,50	-10,90	13,30	13,30

Tabulka 2.6: Hodnoty momentů závislé na pootočení φ

Pro analýzu vyztužitelnosti jsou vytvořeny následující tabulky. Tabulka 2.7 zobrazuje hodnoty ohybových momentů od zatížení a dimenzačních momentů v osových směrech x a y pro všechny analyzované body.

Bod	m_x	m_y	m_{xy}	m_{Rdx}	m_{Rdy}	m'_{Rdx}	m'_{Rdy}
-	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']
1	13,3	13,0	-24,2	37,5	37,2	10,9	11,2
2	-8,0	-13	-16	8,0	3,0	24,0	29,0
3	-7,5	-50,0	15,0	7,5	-35,0	22,5	65,0
4	-14,0	-11,0	-20,8	6,8	9,8	34,8	31,8
5	-129,8	-123,6	19,35	-110,5	-104,3	149,1	142,9
6	-2,0	-40,4	15,2	13,2	-25,2	17,2	55,6
7	-23,5	-33,3	-18	-5,5	-15,3	41,5	51,3
8	-96,0	-200,0	17,0	-79,0	-183,0	113,0	217,0
9	63,9	35,0	-4,5	68,4	39,5	-59,4	-30,5

Tabulka 2.7: Hodnoty momentů od zatížení a dimenzačních momentů v osových směrech

Tyto hodnoty jsou dále využity pro analýzu vyztužitelnosti. V tabulce 2.8 jsou uvedeny příklady na několika bodech konstrukce, neobsahuje však návrh všech bodů.

V tabulce jsou uvedeny zjištěné hodnoty ohybových momentů a jim příslušné dimenzační momenty. Dále je uveden vždy bod, směr výztuže a zda se jedná o spodní či vrchní povrch. K tomu náleží dimenzační momenty. Z nich je následně vypočtena plocha výztuže nutné pro přenesení ohybového momentu. Z hodnot lze určit hned několik věcí. většina průřezů obsahuje běžné hodnoty a lze je snadno vyztužit, reprezentováno bodem 1 a 6. Bod číslo 1 má tažené oba povrchy v obou směrech zvolených os. Ohybový moment v bodě číslo 6 je ve směru osy y záporný a zároveň kroutící moment nemá vyšší hodnotu. To znamená, že spodní povrch je v tomto směru tlačný. Z toho důvodu v něm může být umístěna pouze konstrukční výztuž. Body,

u kterých hodnota ohybového momentu na horním nebo spodním povrchu nepřekračuje určitou malou hodnotu postačí pro přenesení tahu pouze konstrukční výztuž.

bod	Dimenzační momenty				h	d	d_t	d_s	z	$a_{s,req}$	výztuž
	[kNm/m´]										
1-x	m_x	13,3	m_{Rdx}	37,5	260	223	0	14	201	430	ano
1-y	m_y	13,0	m_{Rdy}	37,2	260	209	14	14	188	455	ano
1-x'	m_{xy}	-24,2	m'_{Rdx}	10,9	260	209	14	14	188	kční	ano
1-y'			m'_{Rdy}	11,2	260	209	0	14	201	kční	ano
5-x	m_x	-129,8	m_{Rdx}	-110,5	260	223	0	14	201	kční	ano
5-y	m_y	-123,6	m_{Rdy}	-25,2	260	209	14	14	188	kční	ano
5-x'	m_{xy}	19,3	m'_{Rdx}	149,1	260	207	14	18	186	1841	ano
5-y'			m'_{Rdy}	142,9	260	221	0	18	199	1652	ano
6-x	m_x	-2,0	m_{Rdx}	13,2	260	223	0	14	201	kční	ano
6-y	m_y	-40,4	m_{Rdy}	-25,2	260	209	14	14	188	kční	ano
6-x'	m_{xy}	15,2	m'_{Rdx}	17,2	260	209	14	14	188	kční	ano
6-y'			m'_{Rdy}	55,6	260	223	0	14	201	623	ano
8-x	m_x	-96,0	m_{Rdx}	-79,0	260	223	0	14	201	kční	ano
8-y	m_y	-200,0	m_{Rdy}	-183,0	260	209	14	14	188	kční	ano
8-x'	m_{xy}	17,0	m'_{Rdx}	113,0	260	209	18	14	185	1409	ano
8-y'			m'_{Rdy}	217,0	260	223	0	18	199	2509	ano

Tabulka 2.8: Tabulka vyztužitelnosti průřezů

Body 5 a 8 za to obsahují další případy výsledků. Spodní povrch je v obou směrech tlačný. Ovšem horní povrch je namáhán velmi vysokou kladnou hodnotou ohybového momentu. To odhaluje problematické místo pro následné vyztužování. Místa s vysokou požadovanou plochou výztuže jsou označena žlutou nebo oranžovou barvou podle množství výztuže. Tyto metody jsou použité proto, že mohou ukázat na problematická místa již během rané fáze návrhu a dají se tak konstrukční změnou odstranit. Pokud jsou momentové účinky alespoň teoreticky vyztužitelné, je možné posunout konkrétní návrh detailu do dalších fází návrhu, kde se místa podrobně navrhnu a posoudí.

Ověření návrhu stěnového nosníku

Ověření na stěnovém nosníku probíhá obdobným způsobem jako na desce. Je vybráno několik míst s vyšším napětím a tato místa jsou předběžně ověřena. Body jsou vyznačeny na schématu 2.19.

Pro návrh stěnového nosníku jsou použity následující vzorce: Dimenzační napětí pro směr y a z.

[MPa]

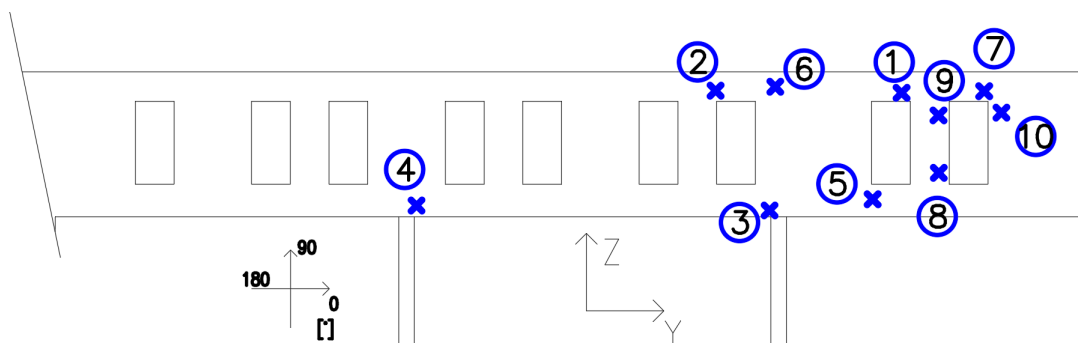
$$f_{tdy} = \sigma_y + |\tau_{yz}| \quad (2.11)$$

$$f_{tdz} = \sigma_z + |\tau_{yz}| \quad (2.12)$$

Dimenzační napětí podle úhlu natočení φ .

[MPa]

$$\sigma_\varphi = \sigma_y * \cos^2\varphi + \sigma_z * \sin^2\varphi + 2 * \tau_{yz} * \sin\varphi * \cos\varphi \quad (2.13)$$



Obrázek 2.19: Schéma bodů pro analýzu napětí ve stěně

Pro další návrh jsou využity hodnoty napětí z jednotlivých bodů obdobně jako u desky. Kladná hodnota napětí znamená tah a záporná tlak. Bod 6 je umístěn v horní části nosníku nad podporou. Vzhledem k umístění je předpoklad tahového napětí ve směru osy y .

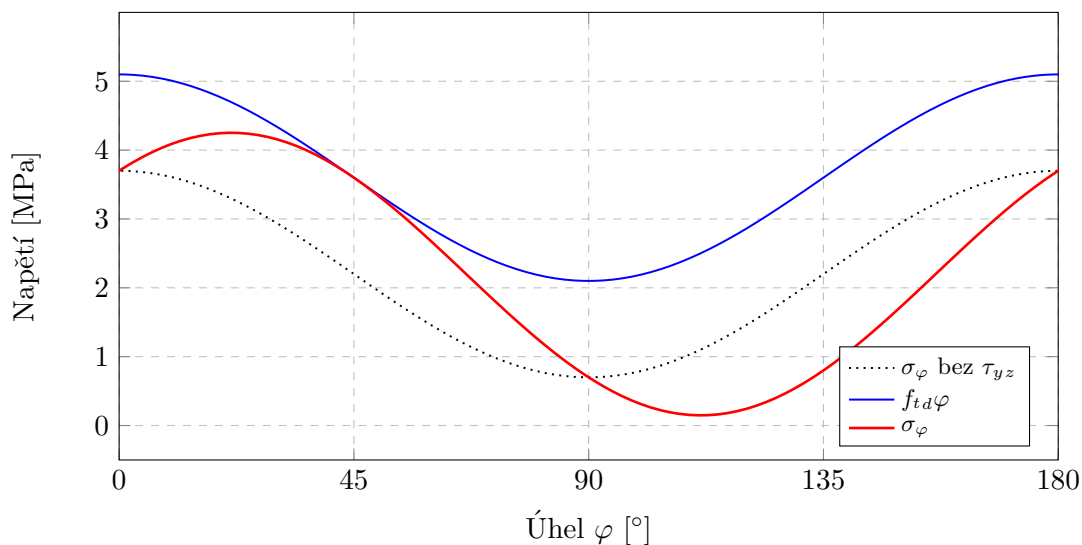
Úhel natočení	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$f_{td\varphi}$	σ_φ	σ_φ bez τ_{yz}
°	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	0,000	1,000	5,10	3,70	3,70
5	0,087	0,996	5,08	3,92	3,68
10	0,174	0,985	5,01	4,09	3,61
15	0,259	0,966	4,90	4,20	3,50
45	0,707	0,707	3,60	3,60	2,20
90	1,000	0,000	2,10	0,70	0,70
135	0,707	-0,707	3,60	0,80	2,20
180	0,000	-1,000	5,10	3,70	3,70

Tabulka 2.9: Hodnoty napětí závislé na natočení φ

V bodě 6 jsou vypočtené hodnoty ve všech směrech napětí kladné. Bude tedy místo potřeba vyztužit oběma směry dle velikosti dimenzačních napětí. K bodu náleží graf s vykreslením hodnot napětí podle úhlu natočení.

Pro další body je uvedena následující tabulka přehledu napětí. V určitých částech stěnového nosníku je poměrně významný vliv smykového napětí. Z tohoto důvodu bude nutné v konkrétních místech navrhnout příložky, které by byly natočeny ve směru hlavního tahového napětí. Při vyztužování míst se zvýšeným tlakovým namáháním bude nutné zahustit spony pro příčné sepnutí.

Následně vyhodnotíme místa pro zjištění vyztužitelnosti průřezu.



Obrázek 2.20: Diagram napětí v místě 6

Bod	σ_y	σ_z	τ_{yz}	f_{tdy}	f_{tdz}
-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	-3	-2,4	6,4	3,4	4
2	1,7	2,3	-2,3	4	4,6
3	-9,4	-3,5	-2,3	-7,1	-1,2
4	-1,7	-2,8	2,1	-0,7	0,4
5	-9	1,3	2,6	-6,4	3,9
6	3,7	0,7	1,4	5,1	2,1
7	7,8	-1,7	2,2	10	0,5
8	0,3	13	3,0	3,3	16
9	2	-12	3,7	5,7	-8,3
10	4,7	1,6	3,0	7,7	4,6

Tabulka 2.10: Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech

Oblast	Napětí		Dim. napětí		Stupeň vyztužení		Plocha výztuže		Lze vyztužit
		[MPa]		[MPa]		[%]	a	[mm ²]	
1	σ_y	-3	f_{tdy}	3,4	ρ_y	0,783	a_y	815	ano
	σ_z	-2,4	f_{tdz}	4	ρ_z	0,922	a_z	959	ano
	τ_{yz}	6,4							
8	σ_y	0,3	f_{tdy}	3,3	ρ_y	0,76	a_y	791	ano
	σ_z	13	f_{tdz}	16	ρ_z	3,69	a_z	3834	ano
	τ_{yz}	3							
9	σ_y	2	f_{tdy}	5,7	ρ_y	1,313	a_y	1366	ano
	σ_z	-12	f_{tdz}	-8,3	ρ_z	TLAK	a_z	kční	ano
	τ_{yz}	3,7							

Tabulka 2.11: Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech

Tabulka 2.11 znázorňuje postup výpočtu pro hodnocení vyztužitelnosti. Tloušťka stěny byla zadána 260 mm, délka průřezu pro danou plochu výztuže je 400 mm. V místě, kde je tlak je

nutné použít mimo spon pouze konstrukční výztuž. V bodě 8 je ve směru osy z vysoké tahové napětí a je potřeba toto místo podrobně posoudit v dalších fázích návrhu.

Sloupy

Sloupy mají definovaný kruhový průřez o průměru 600 mm . Pro prvotní stanovení únosnosti využijeme základní vzorec pro únosnost, kterou dále porovnáme s maximální hodnotou zatížení. Přibližně určená únosnost sloupu N_{Rd} v $[kN]$. Pro sloupy je použit beton třídy C30/37. Pevnost tlačené výztuže je omezena na 400 MPa .

[kN]

$$N_{Rd} = 0,8 * A_c * f_{cd} + A_s * \sigma_s \quad (2.14)$$

$$N_{Rd} = 0,8 * \pi * d^2 / 4 * f_{ck} / \gamma_c * \rho * A_c * \sigma_s$$

$$N_{Rd} = 0,8 * \pi * 0,6^2 / 4 * 30000 / 1,5 + 0,01 * 0,8 * \pi * 0,6^2 / 4 * 400000$$

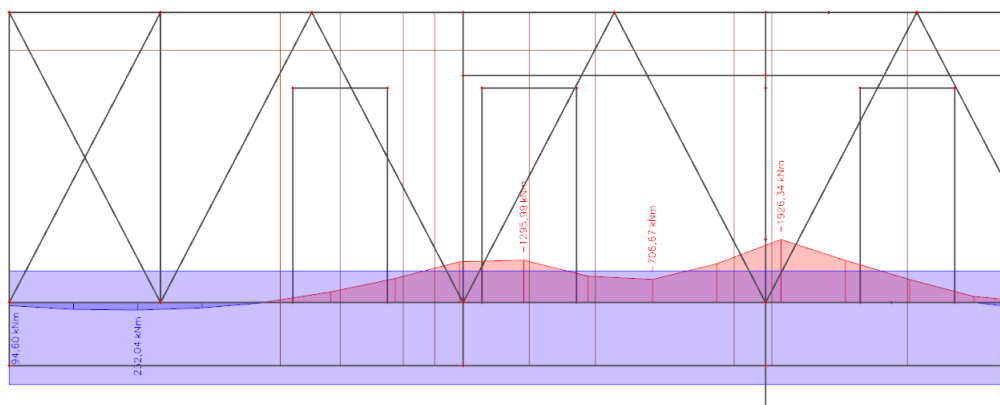
$$N_{Rd} = 5428\text{ kN}$$

Ze statického software byla získána data o osových silách v prutových prvcích. Sloupy podpírající budovu mají nejvyšší hodnotu osové síly $N_{Ed} = 4105\text{ kN}$. Únosnost průřezu je přitom 5428 kN . Průřez tak má dostatečnou rezervu. I při působení přídatných ohybových momentů by dimenze měla být dostatečná a není nutné tak průřezy upravovat. Podrobné posouzení je předmětem dalších fází návrhu, pokud by průřez nevyhověl, můžeme upravit dimenzi prvku, nebo zvýšit třídu betonu.

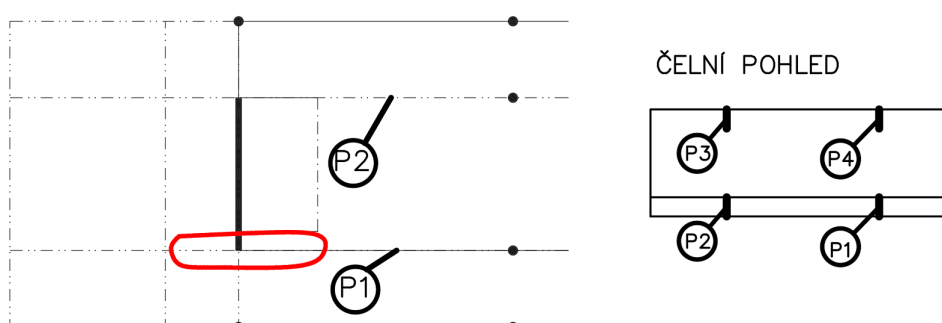
Dimenze ocelových prutů příhrady jsou předmětem podrobnějšího návrhu. Pruty jsou svařené a jsou tak vetknuté. Pro ranou fázi návrhu byl zvolen čtvercový průřez typu SHS 260x16,0, kdy je možné měnit tloušťku jeho stěny. Měl by se tak zachovat vnější rozměr, ale zároveň je záměr umožnit změnu tloušťky stěny podle podrobného návrhu každého prvku z důvodu rozdílného namáhání.

Průvlaky

Ve statickém software jsou průvlaky modelovány jako plošné prvky. Pro získání hodnot vnitřních sil je použita funkce „Integrační dílec“, který ze zadané geometrie integruje vnitřní síly a vytvoří jejich výsledný průběh na dílci. V obrázku 2.21 je znázorněn pohled na integrační dílec. Na nejvíce namáhaných průřezech je následně proveden základní výpočet potřebné výztuže. Vzhledem k vysokému účinku ohybového momentu však byla zvolena větší šířka žebra. Z 260 mm je tedy žebro upraveno na 300 mm . Byl vybrán průvlak P1 s největším ohybovým momentem nad podporou a průvlak P3 s největším ohybovým momentem v poli.



Obrázek 2.21: Průběh ohybového momentu v místě extrému



Obrázek 2.22: Oblast zobrazená v řezu

Výpočet potřebné plochy výztuže v jednotlivých průřezech je uveden v tabulce 2.12 a 2.13. Kvůli nutnosti vložení většího množství tažené výztuže do průřezu je v posuzovaném místě průvzlaku P1 nad podporou zachován tvar T průřezu, i když omezuje velikost schodišťového prostoru.

Průvzlak	Rozpětí	Výška	Šířka žebra	Moment	d	Plocha výztuže	ρ
-	[mm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm ²]	[%]
P1	14 400	1260	300	1930	1060	5064	1,948

Tabulka 2.12: Předběžné ověření množství výztuže v průřezu nad podporou

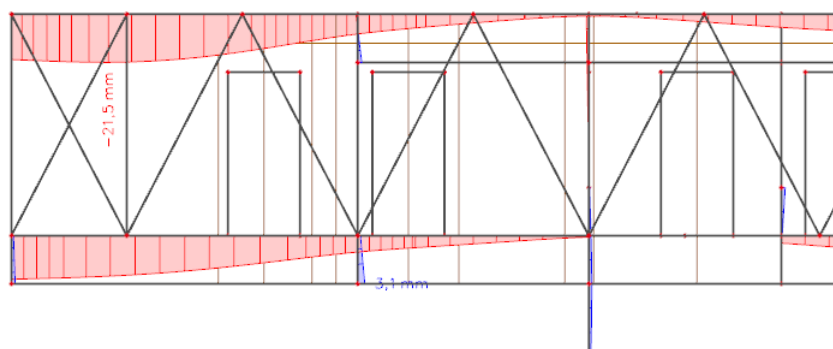
Průvzlak	Rozpětí	Výška	Šířka žebra	Moment	d	Plocha výztuže	ρ
-	[mm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm ²]	[%]
P3	14 400	1260	300	1046	1204	2135	0,821

Tabulka 2.13: Předběžné ověření množství výztuže v průřezu v poli

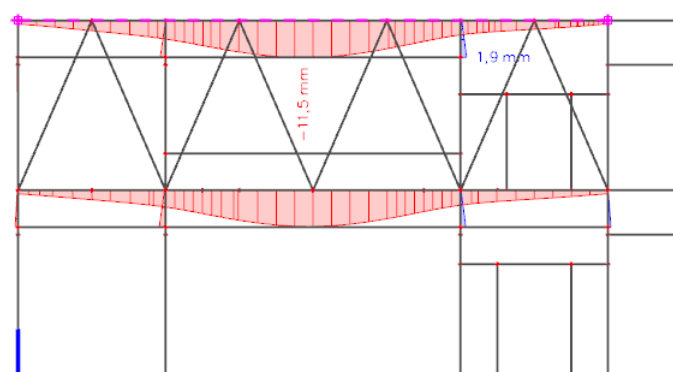
Průhyb konstrukcí

Jedním z hodnotících kritérií je průhyb vodorovných konstrukcí. Průhyby byly vypočteny pomocí statického softwaru a maximální hodnoty jsou vyznačeny na řezech.

Na obrázku 2.24 je znázorněn maximální průhyb vykonzolované části. Jedná se o maximální průhyb desky. Výpočet je lineární a nereflktuje tak změnu tuhosti průřezu, dotvarování nebo smršťování. Průřezy totiž mohou vykazovat trhliny vlivem zvýšeného namáhání, což snižuje jejich tuhost. Nejvíce exponované body a průřezy jsou posuzované body na deskách v kapitole 2.5.1, kde vznikají extrémní ohybové momenty. Případně navrhované průřezy na průvlacích. Hodnota průhybu nepřesahuje stanovené limity, které jsou pro tuto konstrukci voleny jako $1/400$ rozpětí. V opačném případě je možné například nadvýšit bednění a průhyb tak významně redukovat. Hodnota nadvýšení by musela být stanovena pro hodnoty průhybu po dotvarování a smršťování, které finální průhyb oproti uvedenému lineárnímu výpočtu zvýší řádově 3-5 x. Tyto hodnoty by ovšem byly získány až z podrobného návrhu konstrukce v dalších fázích návrhu.



Obrázek 2.23: Maximální průhyb konzoly



Obrázek 2.24: Maximální průhyb desky se spolupůsobením průvlaků

Návrh provedený v těchto kapitolách je proveden na finální variantě konstrukce s již provedenými úpravami. Jedná se tedy o konečný návrh připravený na další fáze projektu.

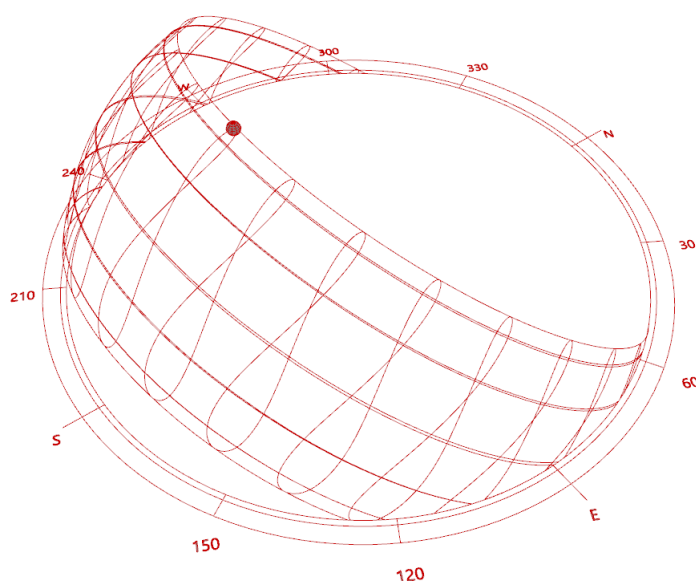
2.5.2 Enviromentální analýza

Budova je v programovém prostředí Grasshopper (část 4.2.1) vymodelována. Prostředí Grasshopper umožňuje provádět různé enviromentální analýzy na zadaných konstrukcích.

Na řešené konstrukci jsou použity funkce pro analýzu slunečního záření, konkrétně tepelných zisků a hodin slunečního záření v interiéru. Podrobnější vysvětlení nástrojů pro získávání dat je v části 4.2.3.

Tepelné zisky

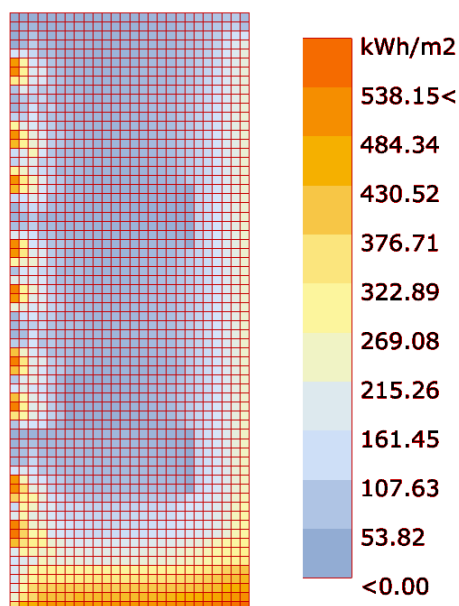
Pro druhé nadzemní podlaží je analyzováno celkové množství tepla v $[kWh/m^2]$. Pro analýzy vlivů slunečního záření se používá model pohybu slunce po obloze.



Obrázek 2.25: Grafické znázornění pohybu slunce po obloze

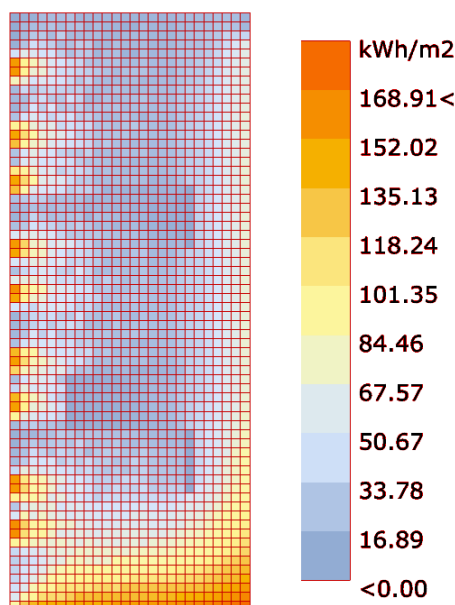
Na obrázku 2.25 je znázorněn prostorový model polohy slunce na denní obloze pro celý rok v Praze. Na obrázku je slunce v poloze 11. června ve 12 hodin. Zadáním parametrů zvolíme sever a umístíme do modelu budovu, na které zkoumáme sluneční vlivy. V konkrétním případě návrhu budovy můžeme na základě nadefinování velikosti oken regulovat tepelné zisky a tím omezovat vliv slunečního záření na vnitřní prostředí budovy. Významným způsobem se tyto vlastnosti promítají do energetické náročnosti na chlazení nebo vytápění.

Obrázek 2.26 zobrazuje celkové tepelné zisky v druhém nadzemním podlaží v létě. Při návrhu této budovy bylo provedeno řešení solárních zisků velikostí a rozmístěním otvorů bez dalšího použití stínící techniky. Jižní strana je tedy řešena jako plný stěnový nosník. V případě, kdy by byla zvolena příhradová konstrukce na této fasádě, vznikla by potřeba dalších řešení stínění, nebo volby skel se sníženým průnikem slunečního záření.



Obrázek 2.26: Grafické vyjádření tepelných zisků za letní období 1. dubna - 30. září

V zimním období toto řešení neomezuje tepelné zisky a umožňuje průnik slunečních paprsků do interiéru budovy. Konkrétní hodnoty množství energie vyzářené na plochu interiéru v zimním období jsou na obrázku 2.27.



Obrázek 2.27: Grafické vyjádření tepelných zisků za zimní období 1. října - 31. března

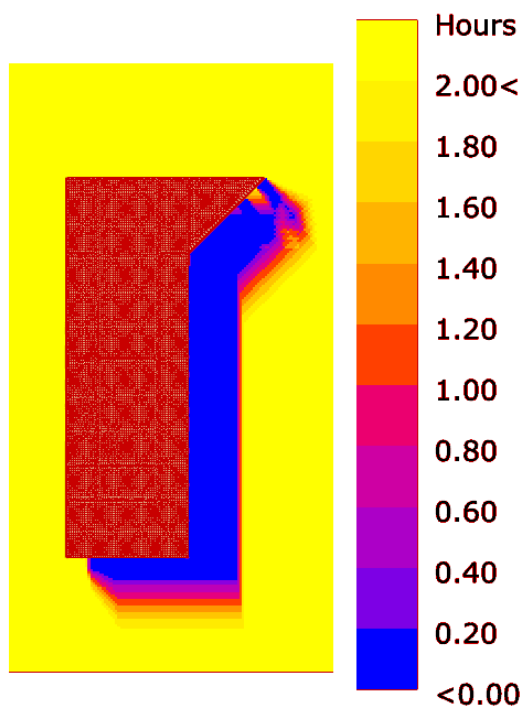
Ze získaných dat lze dopočítat konkrétní hodnotu tepelných zisků za dané období. Tento nástroj může pomoci při rané fázi návrhu, protože můžeme vypočítat konkrétní hodnoty z již vytvořeného modelu budovy. Další výhodou spočívá v možnosti získat přibližnou hodnotu v daleko dřívější fázi, než se již hotový návrh budovy dostane do rukou technikovi řešícímu stínění nebo vnitřní technologie.

Tepelné zisky za období	
	[kWh]
1.4.-30.9.	67 655
1.10.-31.3.	24 699

Tabulka 2.14: Vyčíslení tepelných zisků

Oslunění interiéru

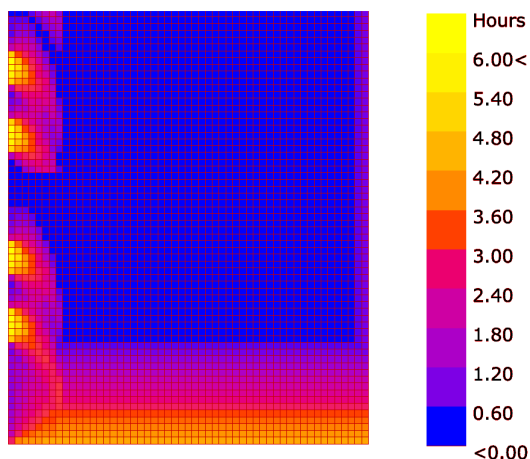
Analyzovat se také dají data o době přímého slunečního záření do interiéru. Lze získat data o ploše na přímém slunci a trvání, kdy slunce dané místo přímo osazuje. Nejedná se o přímou náhradu výpočtu oslunění, ale můžeme ji považovat za dobré vodítko pro návrh v rané fázi. Tento nástroj je vhodný nejen z pohledu analýzy interiéru, ale velmi pomáhá i při návrhu nejbližšího okolí. V tomto případě je vymodelována budova a přilehlý terén reprezentovaný rovinou umístěnou pod budovu. Velmi snadno tak získáme tvar a dosah stínu, který budova na své okolí vrhá. V této fázi návrhu mohou zmíněné metody vést na včasné upravení celkového řešení konstrukcí dříve, než postoupí projekt do dalších fází, kdy jsou možnosti pro změny již omezené. Pro statické řešení jsou tato data přínosná, protože lze přímo upravovat nosné konstrukce v souladu s požadavky architekta a slunečních vlivů bez nutnosti nechávat někoho data přepočítávat.



Obrázek 2.28: Doba oslunění okolí budovy v rozmezí 14-16 hodin 11. června

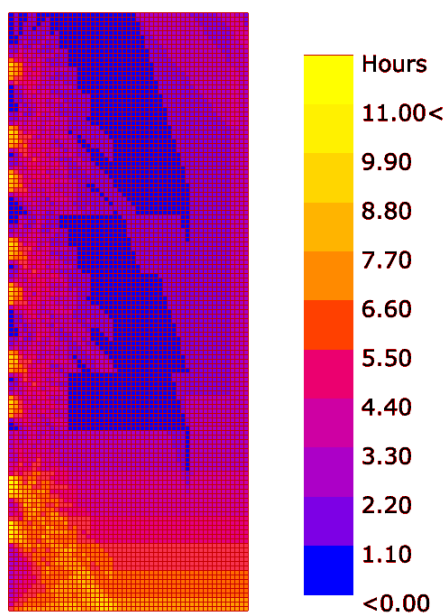
Obrázek 2.28 ukazuje stín v nadefinované dobu. Škála zobrazuje dobu záření slunce na zadanou plochu po dobu dvou hodin. Stíny byly určovány každých 15 minut. Tmavší barva znamená, že na dané místo slunce dopadlo menší dobu. Rozpětí je uvedeno v legendě.

Užití v interiéru je demonstrováno na výseku budovy na obrázku 2.29. Zobrazuje delší časový úsek pro názornost. Je zde dobře vidět, kudy přechází slunce a vytváří na podlaze obrys stínu vrhaným okny. V modelu lze zadat i okolní prostředí a získat tak konkrétní vizualizaci ovlivnění budovy například stínem z okolních budov. Tím pádem lze rozmisťovat okenní otvory mimo tyto stíny a docílit tak maximálního využití slunečního záření.



Obrázek 2.29: Doba přímého ozáření sluncem v interiéru budovy 10-16 hodin 11. června

Analýza oslunění interiéru je jedna z těch, které je nutné dokládat například u bytových i jiných prostor, kde je normový požadavek na minimální dobu přímého slunečního záření na plochu místnosti nebo celé obytné plochy. Tato hodnota je různá pro jiné typy budov a jejich využití. Analýza umožňuje toto zjistit a zařadit jako kritérium minimální podíl osluněné plochy pro splnění normových požadavků. Na obrázku 2.30 je uvedena doba vystavení slunci ve dne 1. března od 7 do 18. hodin.



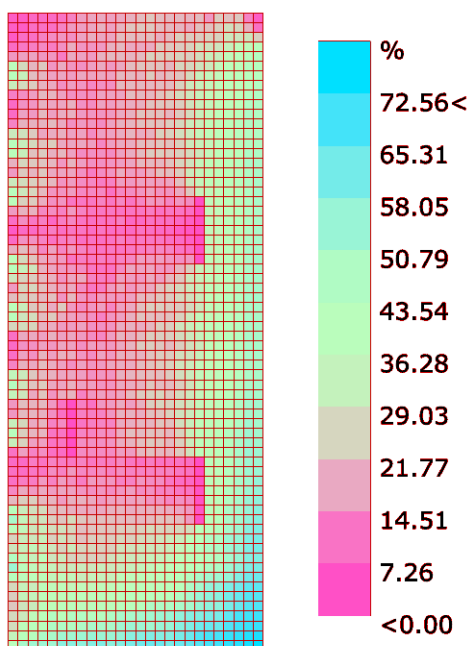
Obrázek 2.30: Doba přímého ozáření sluncem v interiéru budovy 7-18 hodin 1. března

V této konfiguraci budovy se podle analýzy při 1. březnu slunce dostane na více než 3 hodiny na 32,6 % celkové plochy druhého nadzemního podlaží. Analýzu lze provést i pro druhou možnost výpočtu, kdy v daném období 10. 2. až 21. 3. musí být součet doby oslunění nejméně 3600 minut.

Využití je v tomto případě opravdu široké. Program umožňuje analyzovat tyto parametry v reálném čase a lze do něj nadefinovat i okolní zástavbu, což je při analýzách oslunění a dalších světelných podmínek neocenitelné. Je tedy možné ho využít k optimalizaci s přehledem o širším okolí, a tím pádem vytvořit návrh reprezentující přesné požadavky konkrétní řešené budovy.

Horizontální studie výhledu

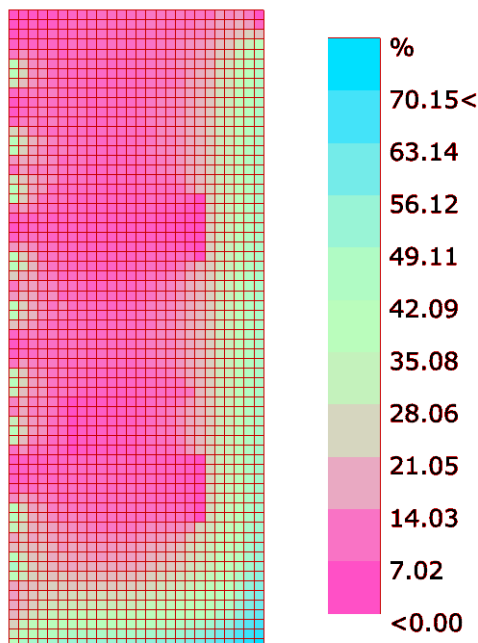
Jako další můžeme řešit horizontální studii výhledu. V každém bodě na síti je v zadané výšce (v tomto případě 1,5 m) umístěn pozorovací bod. Simuluje se možnost výhledu z daného bodu do exteriéru. Využívá se 60° rozsah (30° nahoru a dolů od horizontální polohy). Postupně se s touto výsečí otáčí okolo bodu v horizontálním směru celkem o 360°. Výsledná hodnota v % vyjadřuje, jaký je procentuální podíl výhledu do exteriéru přes okenní otvory z daného místa a kolik procent je blokováno konstrukcemi.



Obrázek 2.31: Procentuální podíl výhledu do exteriéru

Vystavení bodu přímé obloze

Pro tuto analýzu je v úrovni podlahy pro každý pod vypočteno, kolik procent z výhledu bodu je vystaveno přímé obloze.



Obrázek 2.32: Procentuální podíl vystavení obloze

Získané hodnoty mají spíše informativní význam, ale utváří představu o tom, jak se dá využít programové prostředí pro různé environmentální analýzy budov. Lze toho s výhodou využít pro výše uvedené analýzy, ale i mnoho dalších, které programové prostředí umožňuje. Analýzy tohoto typu jsou spíše výsadou konkrétních profesí, které budovu hodnotí až v dalších fázích návrhu. Tímto lze velmi jednoduše připravit budovu na tyto hodnocení již v rané fázi návrhu a předejít tak většině problémům, které mohou případně vzniknout. Veliká výhoda uvedeného přístupu je, že se dynamicky mění a přepočítává výsledky dle změn v modelu. Tím lze bez zbytečných časových prodlev při čekání na výsledky od dalších zpracovatelů projektu pokračovat v návrhu.

2.6 Hodnocení ručního návrhu

Pro ranou fázi návrhu je kritická spolupráce všech účastníků, kteří se na ní podílí. Při ruční analýze je možné využít podpory programů a doplnit tak lidský úsudek a rozšířit tak možnosti návrhu. Tím pádem se prodlouží doba zpracování při rané fázi. Ovšem jak je uvedeno v diagramu 2.2, tak raná fáze je zdaleka ta nejdůležitější. Při ručním návrhu je zásadní dosavadní zkušenost pracovníků a jejich schopnost vnímat okolní prostředí a jeho vlivy na budovu, kterou zpracovávají. Můžeme tak postupně analyzovat všechny potřebné části budovy a samostatně je implementovat do návrhu. Ruční návrh je ve své podstatě poměrně efektivní. Rámcový statický návrh konstrukcí je možné udělat i bez větších předchozích zkušeností, za předpokladu dobrého chápání fungování konstrukcí a jejich částí. Následná optimalizace je již na zkušenostech více

závislá a doba jejího zpracování také. Zkušený statik při předběžném návrhu dokáže najít vhodné kombinace geometrie konstrukcí nebo jejich částí tak, aby dokázal popsat jejich vliv na ostatní části konstrukce. Dokáže také předpokládat, kde mohou vznikat problematická místa a těmto místům se více věnovat již při prvotním návrhu. Je tedy komplikované pro jednotlivce najít ze všech možných kombinací jednotlivých parametrů jejich nejlepší kombinaci. Ideálních řešení totiž může být pouze zlomek z celkových stovek, či dokonce tisíců řešení. Nemusí tak odhalit všechna možná místa nebo konstrukční části, které optimalizaci umožňují. Může se tedy stát, že nějaké konstrukční části buď dále optimalizovat nebude, anebo to v dané fázi nelze udělat, protože například nezná požadavky na oslunění interiéru či jiné „soft“ vlivy.

Pro efektivní optimalizaci by bylo potřeba rané fázi návrhu věnovat o mnoho více času, než je dnes v praxi možné. Proto se v některých případech ani zásadní optimalizací nikdo nezabývá a daný potenciál mizí. Bohužel toto lze dávat i za vinu investorům a dalším faktorům, které ovlivňují přísun času a financí, a tak se hledá dostatečně efektivní řešení za co nejkratší čas. To vede jen na několik kroků v optimalizaci. Z pohledu dnešní praxe je to dostatečné, ovšem pokud budeme dále směřovat ke zmenšování dopadu na životní prostředí, je potřeba metody posouvat dále a hledat ještě efektivnější řešení než dosud.

Kapitola 3

Víceúčelová optimalizace pomocí genetických algoritmů

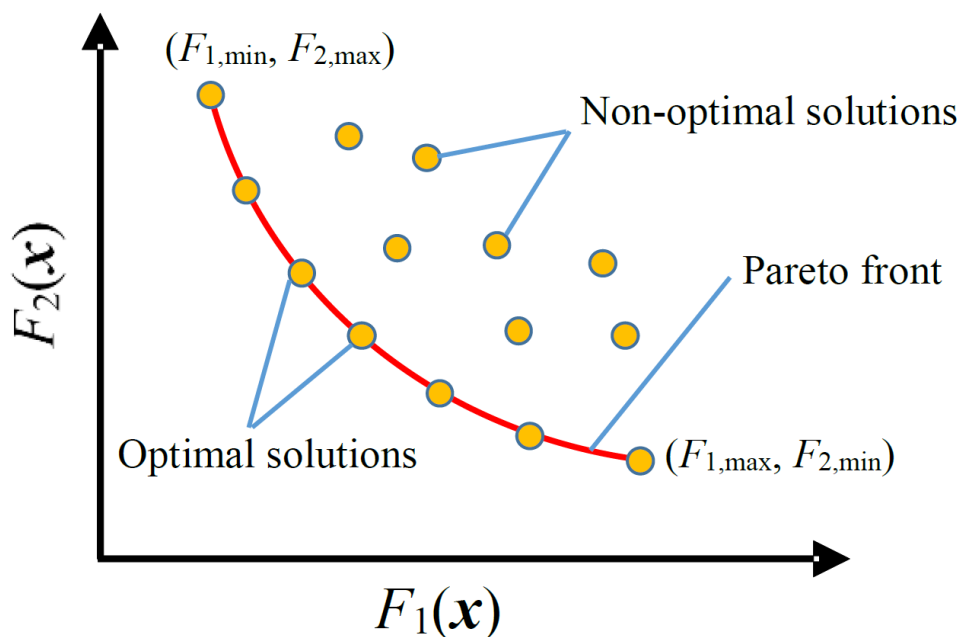
3.1 Základy víceúčelové optimalizace

Optimalizace je proces, kdy se snažíme z určitých okrajových podmínek získat jedno nebo více řešení, která jsou pro daný problém optimální. U optimalizace jednoho kritéria je proces poměrně snadný. Snažíme se vybrat to řešení, které podle konkrétní úlohy maximalizuje nebo minimalizuje požadované hodnoty. Můžeme tedy například minimalizovat rozměry stěny a tím zmenšovat její únosnost tak, aby ale stále vyhověla.

Tyto metody jsou bohužel pro stavebnictví, jako i pro další inženýrské obory, velmi omezeně využitelné. A to z několika důvodů. Je totiž velmi obtížné v tak komplexních úlohách, jakými stavby nebo strojní zařízení jsou, vybrat jedno číslo, které bude reprezentovat výsledek hodnotící funkce. Parametrů, které se mohou měnit, totiž může být mnoho.

V tom případě musíme přejít k optimalizaci několika kritérií najednou. K tomu slouží **víceúčelová optimalizace**, která již představuje poměrně komplikovanější úlohu. Můžeme se snažit optimalizovat jedno kritérium, ale druhé se tím velmi pravděpodobně bude od svého cíle vzdalovat. Budeme-li tedy minimalizovat hmotnost konstrukce, bude klesat i její únosnost a zvětšovat se průhyb. Případně naopak. Z principu věci vyplývá, že nelze najít jen jedno řešení, které by bylo lepší než všechna ostatní. K tomu se využívá grafické znázornění body v ploše nebo prostoru. Množina bodů reprezentující nejlepší řešení se nazývá **Paretova množina** (Pareto front) [2]. Na obrázku 3.1 je patrné, že všechna řešení tvořící křivku jsou vhodná jako řešení úlohy.

Zadavatel úlohy musí následně z Paretovy množiny vybrat řešení, která považuje za ta nejvíce vhodná. Samotný proces optimalizace je totiž samostatně fungující algoritmus, který sám o sobě prakticky nedokáže vyhodnotit, jaké konkrétní řešení je nejvíce vhodné za daných podmínek. Paretova množina má tedy zásadní význam ve výběru optimálních řešení.

Obrázek 3.1: Paretova množina ¹

Graf 3.1 znázorňuje úlohu, kdy se funkce f_1 a f_2 minimalizují. Výsledkem je množina řešení dané úlohy. Ze všech vypočtených řešení musíme vybrat taková, která jsou pro danou úlohu optimální.

Tato množina bodů se také označuje tzv. Non-dominated front - tyto hodnoty nejsou oproti jiným řešením nacházejícím se na paretově množině dominantní. Takže všechna jsou si rovna. Nelze také měnit pouze jednu funkci tak, aby se druhá nezměnila. Obě jsou na sobě totiž závislé a není možné je oddělit. Paretova množina je dominantní oproti všem ostatním řešením, která se nachází mimo ni (Non-optimal solutions). Protože alespoň jedno kritérium bude horší než to, které se nachází přímo na křivce. Hledání různých řešení spočívá na genetickém algoritmu, který hledá v určitých mezích hodnoty výsledků a z nich vybírá ta, která se přibližují požadovaným hodnotám.

3.2 Genetické algoritmy

Charles Darwin a jeho první publikace týkající se přirozeného výběru přírodních druhů byla vydána již v roce 1859. Tento rok lze tedy považovat za úplný počátek teorie evoluce, kde dochází k přírodní selekci druhů. Vítězí ti nejschopnější, kteří se snadno adaptují dynamicky měnícím se podmínkám. Druhy s pomalejší adaptací mají tedy menší šanci na přežití a postupně se jejich populace zmenšuje, případně úplně vymizí na úkor silnějších druhů.

V 50. letech 20. století se myšlenka adaptace evolučního výběru na matematický model dostala do povědomí vědců a ti se ho snažili vytvořit. Ovšem problém byl výpočetní výkon tehdejších počítačů, který nedosahoval potřebné úrovně. Další nedostatky byly přímo v metodice

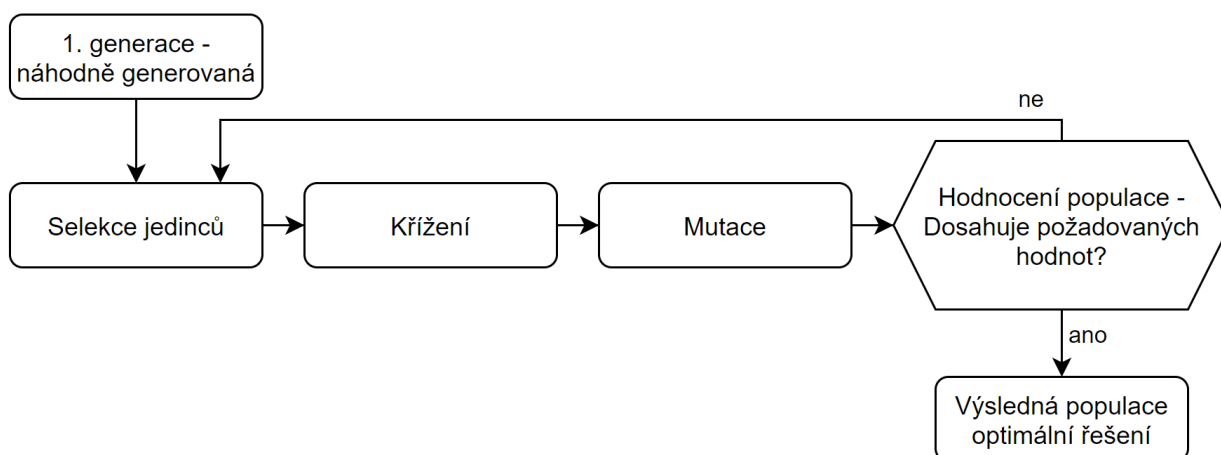
¹Zdroj: [3], [citováno: 9.11.2020]

jednotlivých výpočetních přístupů.

Průlom přišel s Johnem Hollandem, který popsal elementární procesy v populacích a z nich navrhl genetický algoritmus jako matematickou interpretaci evolučních algoritmů. Princip spočívá v tom, že jedinci, kteří jsou silnější, úspěšnější, tak mají větší šanci na přežití a reprodukci v dynamicky měnícím se prostředí. Úspěšnější jedinci budou mít tedy i větší počet potomků oproti méně úspěšným jedincům. Vhodné geny silnějších jedinců jsou předány dalším generacím a populace se tím vyvíjí dále. Potomek může mít dokonce lepší vlastnosti než mají jeho předchůdci a tím se opět zvyšuje šance na další šíření vhodných genů. [4]

3.2.1 Proces výběru v genetických algoritmech

V aplikacích na praktické úrovni se využívají principy evoluce v podobě popsané na obr.3.2, který znázorňuje postup při hledání optimálního řešení našeho problému.



Obrázek 3.2: Diagram selekčního procesu genetického algoritmu

Každý jedinec reprezentuje jedno konkrétní řešení v úloze. Jedinci v našich úlohách mají několik genů, které jsou náhodně zvoleny v daných mezích a následně použity jako součást populace v algoritmu.

První populace je zvolena náhodně a vytvoří startovací populaci pro algoritmus. Ta následně projde procesem ohodnocení (fitness) a dále pokračuje křížením jedinců podle jejich umístění a nastavení procesu. Výsledná populace je ohodnocena, výsledky každých jedinců se porovnávají s těmi požadovanými. Pokud populace nedosahuje požadovaných výsledků, vrací se na začátek a nahrazuje populaci v předchozím kroku. Proces se poté opakuje do dosažení požadovaných hodnot.

3.3 Jednotlivé prvky genetických algoritmů

3.3.1 Selekcce

Tento proces je přímo založen na Darwinově evoluční teorii. Selekcce jedinců pro další křížení je zásadní proces při optimalizaci a nalezení globálního optima. Proces je nastaven tak, aby náhodně vybíral jedince z populace podle pravděpodobnosti přiřazené z hodnocení jedince. Určitá část dané generace s horším hodnocením se do dalšího výběru nedostane, nicméně je určitá pravděpodobnost, že se tak stane na základě náhodného výběru. I když má jedinec malou pravděpodobnost výběru, šance není nulová, a tak se může dostat do dalšího procesu. Existuje proto několik možností, jak jedince hodnotit a vybírat je ke křížení.

Ruletová selekcce

Jedna z prvních metod. Po vytvoření první náhodné populace je každý jedinec samostatně ohodnocen. Toto hodnocení je v tomto typu selekcce zásadní. Hodnocení jedince je totiž přímo úměrné pravděpodobnosti, s jakou bude jedinec vybrán pro křížení. Bude-li mít jedinec p_1 hodnocení 10 na škále 1-10 a bude stát oproti jedinci p_2 s hodnocením 3, tak je více než trojnásobná šance, že bude zvolen jedinec p_1 . Na celé populaci totiž jedinec p_1 zabere 10 polí a jedinec p_2 pouze 3. Nicméně i p_2 může být zvolen, protože jeho šance na výběr není rovna nule. Tato vlastnost je přirozená, v přírodě se slabší jedinec může dostat k reprodukci i přes to, že má menší šanci než silnější jedinec. V matematickém modelu je toto reprezentováno výběrem náhodného čísla. Šance na výběr jedinců je potom daná podle množství zabraných polí každého jedince na základě jeho ohodnocení. Metoda je citlivá na předčasnou konvergenci.

Metoda je vhodná pouze pro maximalizační úlohy a velké populace, má několik dalších variant. Některé z nedostatků řeší metoda pořadová, která sestavuje posloupnost a tu teprve škáluje, takže se odstraňuje předčasná konvergence.

Turnajová selekcce

Využívá jiné principy než ruletová selekcce. Z populace se náhodně vybírají n -tice jedinců, kteří se porovnají v jejich hodnocení (fitness). Můžeme snadno vytvořit větší tlak na výběr jedinců zvětšením množství jedinců v každém turnaji. Jedinec, který zvítězí, pokračuje dále a podílí se na dalším křížení. Není potřeba předchozí řazení jedinců, čímž se zmenšuje čas výpočtu. Velmi snadno můžeme upravovat parametry výběru jedinců do turnaje i následné selekcce. Existuje proto mnoho variant, u kterých je možné je snadno adaptovat na konkrétní úlohu. [5]

Elitismus

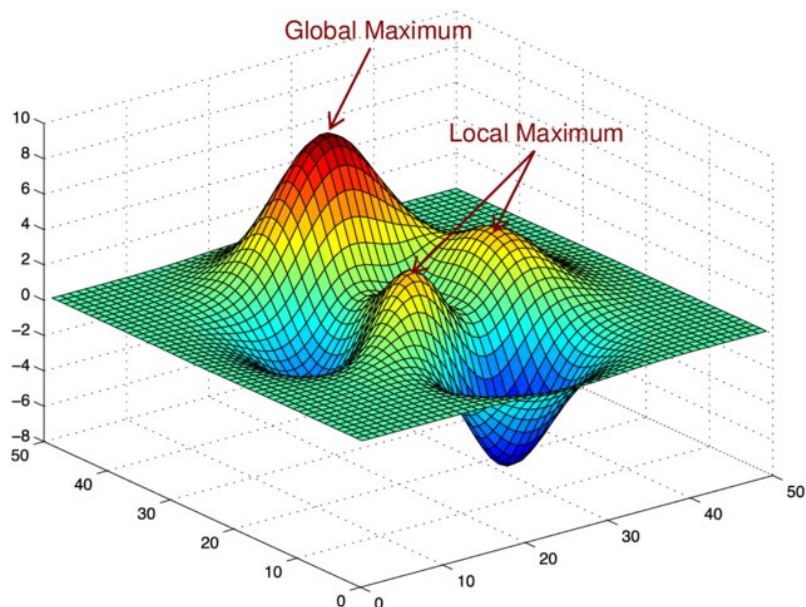
Není samostatnou metodou. Může doplňovat ostatní metody. Měl by zaručit, že se v dalších generacích nebude snižovat kvalita řešení oproti předchozím. Algoritmus v generacích uchovává nejlepší řešení, udrží tak kvalitní jedince, kteří nesou hlavní zlepšení mezi generacemi. Tím také urychluje hledání optima. Má určité nevýhody, a to v přílišném omezení diverzity řešení

z důvodu uchovávání těch předchozích. Za pomoci elitismu se dají snadněji najít jedinci na paretově množině. Využití ve víceúčelových úlohách je ideální, protože metoda nebude předčasně konvergovat. [6]

3.3.2 Mutace

Do metod selekce také zasahují další parametry upravující genetickou informaci jedinců. Jeden z nich je mutace, která zajišťuje zachování diverzity a zabraňuje předčasné konvergenci ke zdánlivému optimu. Mutace totiž s určitou pravděpodobností mění určitou část genů jedince a tím se předchází přílišné jednotvárnosti genů v procesu křížení.

Prostor, kde hledáme řešení úlohy je poměrně rozsáhlý. Často se na něm nachází lokální optima mimo globální. Mutace je v tomto smyslu velmi důležitý aspekt, protože pokud se algoritmus bude snažit dosáhnout optima, může snadno najít pouze lokální optimum v blízkosti počátečního bodu. Samotný algoritmus nepozná, že se jedná o suboptimální řešení. Se zavedením mutace a náhodnou úpravou genů jedinců se pravděpodobnost nalezení globálního optima výrazně zvyšuje. [7]



Obrázek 3.3: Lokální a globální optimum na prohledávaném prostoru [8]

3.3.3 Křížení

Anglicky Crossover. Podstata genetických algoritmů. Jedinci, kteří prošli systémem selekce a můžou vytvářet potomky, se podílí na křížení. Každý jedinec má svou vlastní genetickou informaci. Tyto informace jsou u počáteční generace náhodně generované, u dalších generací se po křížení a výběru uchovává genetická informace blížící se k optimu. Genetická informace má podobu chromozomu, ten se dá reprezentovat řadou čísel. Velmi často se využívá selekce jednobodová. U vybraných jedinců se náhodně vybere číslo z množiny $\{1; l - 1\}$, kde l je počet chromozomů jedince. Touto definicí zaručujeme, že alespoň jeden chromozom jedince bude

pozměněn a dojde ke křížení se změnou alespoň jednoho chromozomu. Někdy je vhodné, aby jedinec přežil beze změny a uchoval genetickou informaci rodičů. Celý proces křížení má proto určitou pravděpodobnost aplikace. Obecně poměrně vysokou, aby nedocházelo k nadměrnému zachování jedinců. Pravděpodobnost křížení je obvykle $0,8 - 0,9$.

Na příkladu 3.1 je znázorněn proces křížení. Rodič 1 a 2 má 7 chromozomů. Náhodně zvolený bod křížení je 3, takže 4. a další čísla se zkříží. Z nich vzniknou potomci. Kdybychom vzali další pár, je možné, že by bod křížení byl například za 5. chromozomem a měnily by se pouze 2 čísla.

Na vzniklé potomky se aplikuje mutace. Mutace má malou pravděpodobnost aplikace, kolem $0,001 - 0,05$. Slouží také jako omezení rychlého zjednotvárnění vlastností. Projevuje se náhodnou změnou hodnoty určitého genu, na němž se aplikuje mutace. V tabulce 3.1 se mutace aplikuje u prvního potomka. U druhého potomka se mutace neuplatní a tím pádem pokračuje dále beze změny. [4]

Rodiče	Potomci	Mutace
554 6852	554 4231	5544631
648 4231	648 6852	6486852

Tabulka 3.1: Využití jednobodového křížení [4]

Mimo jednobodové křížení existuje také vícebodové, které sdílí stejné principy, ovšem aplikuje se na několika hodnotách genů.

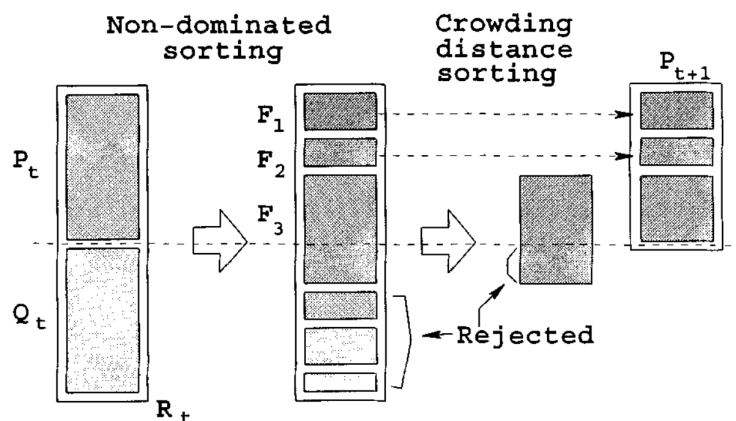
3.4 NSGA-II

S příchodem náročnějších výpočetních úloh s využitím několika kritérií vzniká potřeba použití algoritmu, který dokáže efektivně hledat navzájem nedominantní řešení ležící na paretově množině. Je tedy potřeba nalézt co největší počet těchto nedominantních řešení. Mnoho optimalizačních metod vyžaduje, aby se kritéria sdružila do jednoho jediného hodnoceného parametru, tím se hledá v jednom cyklu vždy jen jedno řešení.

Existuje více druhů multikriteriálních evolučních algoritmů, jejich hlavní výhoda je v tom, že dokáží hledat mnoho řešení v jednom pracovním cyklu simulace. Genetické algoritmy typu NSGA (Non-dominated sorting genetic algorithm) mají určité nevýhody. A to vysokou náročnost na výpočetní výkon, absenci elitismu a nutnost manuálně specifikovat parametr σ_{share} pro zachování diverzity v procesu řešení. Z těchto důvodů byl vyvinut algoritmus NSGA-II. Ten odstraňuje uvedené nedostatky předchozích typů algoritmů a stává se tak velmi vhodnou variantou pro použití v komplexních problémech s potřebou řešení mnoha kritérií najednou. [9]

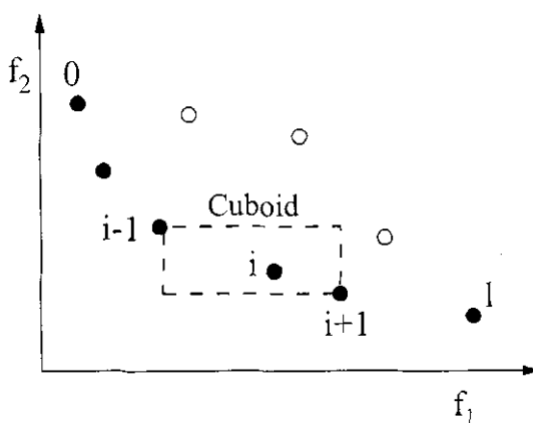
Posloupnost procesu je následující. Jako první je vytvořena náhodná generace P_0 o velikosti N . Pro každé řešení je dané jeho ohodnocení a podle něj jsou nedominantně seřazena. Jako další krok je provedena mutace a selekce, z ní potom vychází druhá množina řešení Q_0 , také o velikosti N . Z množin P_0 a Q_0 je vytvořena populace R_t (t pro obecné číslo generace) o velikosti

2N. Tato populace je seřazena podle hodnocení jedinců. Zde už se aplikuje elitismus a z něj vychází populace rozdělená do jednotlivých částí F_i . Řešení jsou seřazena a z nich se vybírají jedinci do dalších generací P_{t+1} . Celkové množství jedinců vycházejících z předchozí generace je větší než množství řešení, která mohou být použita v následující generaci. Pokud algoritmus při výběru jedinců dosáhne maximálního počtu řešení, zbytek jedinců je odmítnut a v dalších procesech již nefiguruje. Graficky je proces znázorněn na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Proces výběru jedinců pomocí NSGA-II [9]

Omezení počtu jedinců pokračujících do další generace se řídí podle „Crowding difference“. To vyjadřuje vzdálenost nejbližších bodů od vybraného místa. Čím menší plocha obdélníku, tím lepší hodnocení. Výběr jedinců je tak dokončen a algoritmus může pokračovat.



Obrázek 3.5: Zobrazení nejmenší vzdálenosti od zadaného bodu pomocí „Crowding distance“ [9]

Kapitola 4

Parametrické modelování

4.1 Základy parametrického modelování

Při víceúčelové analýze konstrukce se obvykle vyskytuje velké množství proměnných. Proměnné mohou být dimenze jednotlivých konstrukcí, materiálové charakteristiky, tvary a skladby konstrukcí. Z výčtu je poměrně jasné, že se může jednat o velké množství parametrů, které se dají měnit a optimalizovat. Parametrický model obsahuje všechny tyto proměnné a vytváří z nich jednotný model. Při použití tradičních procesů je potřeba vytvořit konkrétní model s parametry, které si jako zadavatel úlohy zvolíme. Model potom reprezentuje jednu variantu, tu podrobíme potřebným analýzám. Pokud zjistíme, že daný model potřebuje upravit, čeká nás zpravidla manuální změna všech souvisejících částí modelu a někdy i v okrajových podmínkách. Tento proces by při komplexní optimalizační úloze byl velmi zdoluhavý s nejistým výsledkem. Proto se nástroje jako parametrické modelování hodí na komplikovanější úlohy, což budovy jistě představují. Parametrické modelování je v tomto ohledu vhodný nástroj pro tvorbu modelů pro další analýzu.

Při návrhu budov je tento přístup vhodný z několika důvodů. Vývoj výkonu počítačů a digitalizace návrhu budov umožňuje širší využití těchto nástrojů. Velmi užitečné jsou hlavně pro pokročilé modelování, automatizaci, simulace, nebo digitální fabrikaci. Velmi užitečná je možnost řešit i komplikovanější geometrii nosných konstrukcí nebo fasád s neobvyklými tvary. Automatizace funkcí je jedna z věcí, co běžné programy pro tvorbu modelů neumožňují v takové míře, jako parametrické modely. Dnes hojně používané CAD (computer-aided design) systémy jsou složeny z jednoduchých příkazů, ty nelze snadno kombinovat do automatických sekvencí, a tak je tvorba modelu složitějších tvarů časově náročná. To souvisí také s tím, že většina dnešních inženýrů neovládá programovací jazyky, a tak je komplikované si podobné automatické funkce sám naprogramovat. Proto se v běžné stavební praxi příliš nevyužívají. Model se v parametrické podobě dá velmi rychle upravovat. Pokud navíc disponujeme dostatečným výpočetním výkonem, můžeme v reálném čase zobrazovat vlivy na statiku, tepelný komfort, případně spotřebu energií. Velmi rychle tak můžeme nalézt optimální řešení pro konkrétní úlohu. V neposlední řadě se dá parametrické modelování použít k digitální fabrikaci. Využití digitální fabrikace je v moderním

prostředí důležité. Může přinést nová řešení do fasádních prvků, ale také do jednotlivých konstrukčních prvků budovy. To umožňuje výrobu komplikovaných tvarů prvků bez předešlých manuálních návrhů, tvorby dokumentací pro výrobu a samotnou výrobu prototypů. [10]

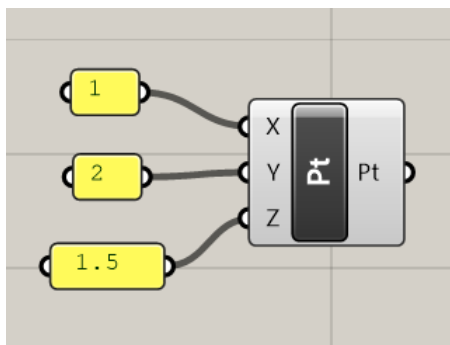
Parametrické modelování je tedy nástroj pro tvorbu modelu budovy s možností úprav v reálném čase. To je umožněno tím, že model tvoří série matematických a logických definicí. Jednotlivé komponenty jsou předprogramované, a tak lze využít tzv. grafického programování. Při využití těchto nástrojů je tedy velmi snadné opravit konkrétní hodnotu vstupního parametru, Celá definice se podle této změny projeví ve všech jednotlivých částech a model se automaticky upraví. Díky těmto možnostem lze upravit řadu vlastností konstrukce během několika málo okamžiků.

4.2 Parametrický model a jeho tvorba

Model se skládá ze série funkcí, to jsou jednotlivé matematické a logické definice, které se postupně do prostředí vkládají a spojují. Ze zadané definice se vygeneruje model budovy. K vytváření těchto spojení je určeno prostředí pro grafické programování **Grasshopper**. V modelu se dají definovat také materiálové a geometrické vlastnosti.

4.2.1 Grasshopper

Základní pracovní prostředí grafického programování. Obsahuje velké množství funkcí, které může uživatel libovolně kombinovat (v rámci kompatibility jednotlivých komponent) a vytvářet tím geometrii, materiálové charakteristiky, parametry zatížení a další vlastnosti modelu. Grafické programování je na stejném principu jako programování klasické, ale je upraveno tak, že daná naprogramovaná funkce je uschovaná do grafického bloku, který funkci reprezentuje. Uživatel tak může využívat programování, i když nezná samotné programovací jazyky. Pokud by nějaká funkce potřebám uživatele nestačila, může si svůj komponent vytvořit sám v programovacím jazyce, jako je například Python. To je také případ doplňků, které mají za úkol doplnit základní sadu nástrojů. Umožňují tak využití nástroje jako je Karamba3D a Wallacei, které jsou využívány pro návrh v této práci.



Obrázek 4.1: Použití komponent v programovacím prostředí grasshopper 3D

Komponenty se navzájem propojují, a tím si předávají informace mezi sebou. Na obrázku

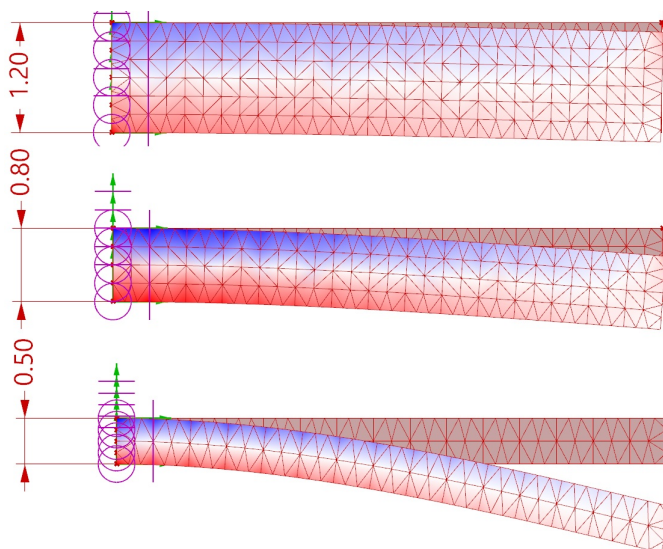
4.1 je využití komponent demonstrováno na příkladu vytvoření bodu v prostoru. Na obrázku je komponent zkonstruování bodu, ten pro vytvoření bodu v konkrétním místě využije souřadnice, které zadáme pomocí panelu s číselnou hodnotou. Výsledek je bod v zadaných souřadnicích. Tímto způsobem se nadefinuje celý objekt a je možné ho prostou změnou parametru upravovat. Model automaticky zareaguje a upraví všechny související atributy v reálném čase.

Jako příklad je uveden model konzoly o dané délce a průřezu, geometrie je uvedena v tabulce 4.1. Na příkladu je ukázáno, jak reaguje model na změnu vstupního parametru výšky průřezu.

Délka	6	m
Tloušťka	0.1	m
síla	200	kN

Tabulka 4.1: Geometrie příkladu - konzola

Na následujícím obrázku 4.4 je znázorněno, jak model reaguje na změnu geometrie. V této fázi lze nadefinovat algoritmus, aby hledal výšku průřezu s nejmenším průhybem nosníku. Algoritmus by velmi rychle našel řešení, které má největší možnou výšku průřezu, a dosáhly by tak zadaného cíle. V tabulce 4.2 je uvedena hodnota průhybu při konkrétních výškách průřezu.



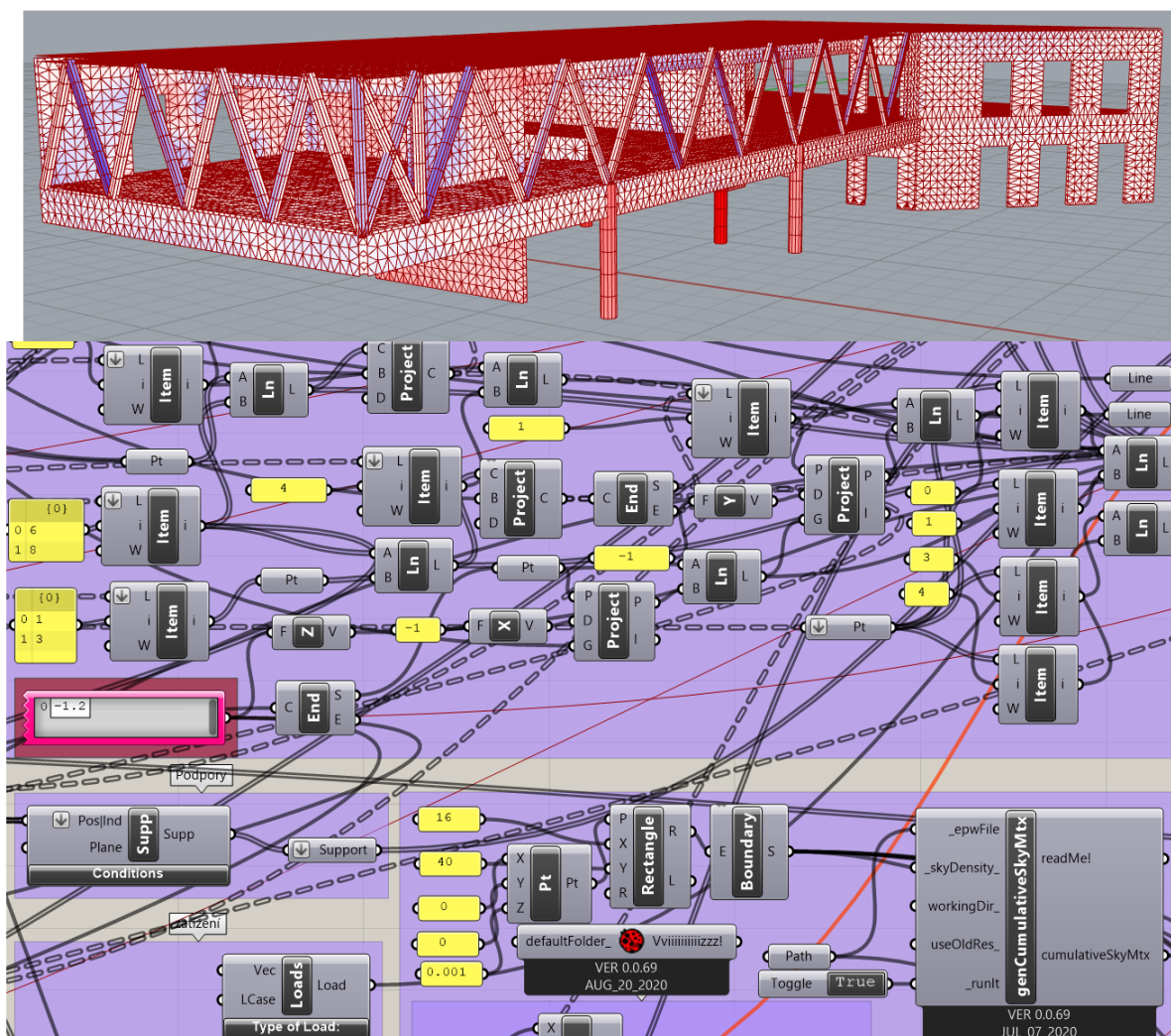
Obrázek 4.2: Grafické znázornění změny vstupního parametru a následky změny (průhyb 3,5x převýšen)

Výška průřezu	Hodnota průhybu	
500	284	mm
800	89,6	mm
1 200	30,6	mm

Tabulka 4.2: Hodnoty průhybu pro jednotlivé výšky průřezu konzoly

Prostředí Grasshopper umožňuje změnu parametrů buď změnou konkrétního čísla, nebo posunem na předem zadané škále (slider). Toto je jedna z hlavních předností programovacího

prostředí. Projeví se hlavně při složitějších definicích, kdy změna jednoho parametru změní celou řadu vlastností konstrukce a není potřeba dále manuálně měnit další parametry. Například změnou jednoho čísla můžeme zvětšit čtvercovou síť sloupů oběma směry. Změna se promítne do všech pater budovy a upraví se s ní i další navazující konstrukce nebo zatížení. Dnešní konvenční programy tyto funkce neobsahují v tak rozsáhlé míře a přehledném prostředí.



Obrázek 4.3: 3D model budovy vytvořený v programovém prostředí Grasshopper

4.2.2 Karamba3D

Jedna z nástaveb pro programovací prostředí Grasshopper je Karamba3D. Jedná se o sadu nástrojů pro analýzu konstrukčních prvků. Umožňuje v reálném čase analyzovat vlastnosti konstrukce pomocí metody konečných prvků.

Za vývojem stojí Clemens Preisinger společně se společností Bollinger und Grohmann ZT GmbH in Vienna. Společnost má díky podpoře těchto programů za sebou mnoho mimořádných návrhů konstrukcí, které byly po světě realizovány.

V programovacím prostředí Grasshopper lze vytvořit pomocí linií a ploch prostorový model. Nástavba Karamba3D potom umožňuje tuto geometrii dále analyzovat. Jednotlivé prvky se převedou na plochy s definovaným průřezem a materiálovými vlastnostmi, které se dále využívají k výpočtům pomocí metody konečných prvků. Síť konečných prvků je vytvořena automaticky pomocí komponent. Karamba3D umožňuje přímo v grafickém prostředí Rhinoceros zobrazovat aktuální deformace či využití materiálu. Lze tak budovy analyzovat ve fázi, kdy neexistuje model pro statický návrh. To umožňuje v reálném čase sledovat odezvu konstrukce na uživatelem provedené změny v řádu vteřin. Konkrétní parametry jsou zadané pomocí genů s definovaným rozpětím hodnot, které mohou být použity.

Prostředí přímo umožňuje používat výsledky z něj získané pro další optimalizaci za pomocí dalších nástrojů. Analýza reaguje dynamicky na změnu vstupních parametrů. Je tedy vhodná pro užití s genetickými algoritmy pro optimalizaci konstrukcí. Za příklad může být konstrukce kancelářské budovy Shogakukan Building v Japonském Tokyu.

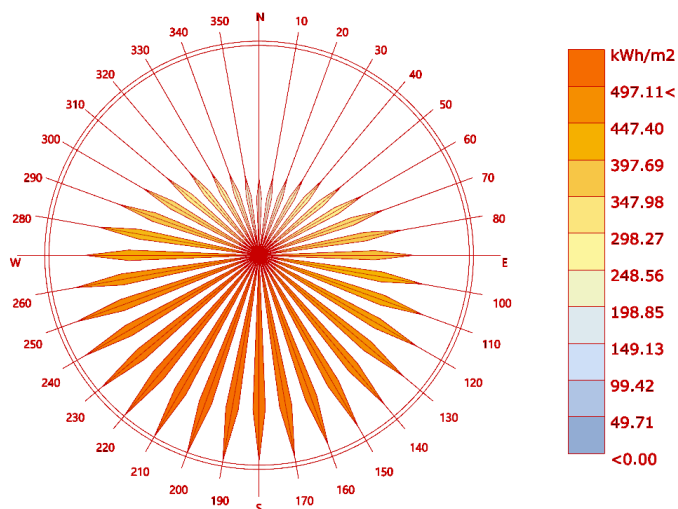


Obrázek 4.4: Shogakukan Building Tokyo, Japonsko ¹

Budova je primárně ze železobetonu a její hlavní předností je odolnost vůči zemětřesení díky speciálním prvkům seismické izolace mezi prvním nadzemním podlažím a suterénem. Optimalizace byla cílena na zjištění vlivu otvorů ve stěně na její namáhání a tuhost. Zvláště pak, jak ovlivňují odezvu konstrukce na zemětřesení. Zjistilo se, že nejlepší řešení je takové, kdy se okenní otvory směrem k okrajům budovy zužují. Okna jsou tvořena třemi modulovými šířkami.

¹Zdroj:<https://www.karamba3d.com/wp-content/uploads/2018/04/nikkensekkei-ShogakukanBuilding-2.jpg>, [citováno: 14.12.2020]

4.2.3 Ladybug



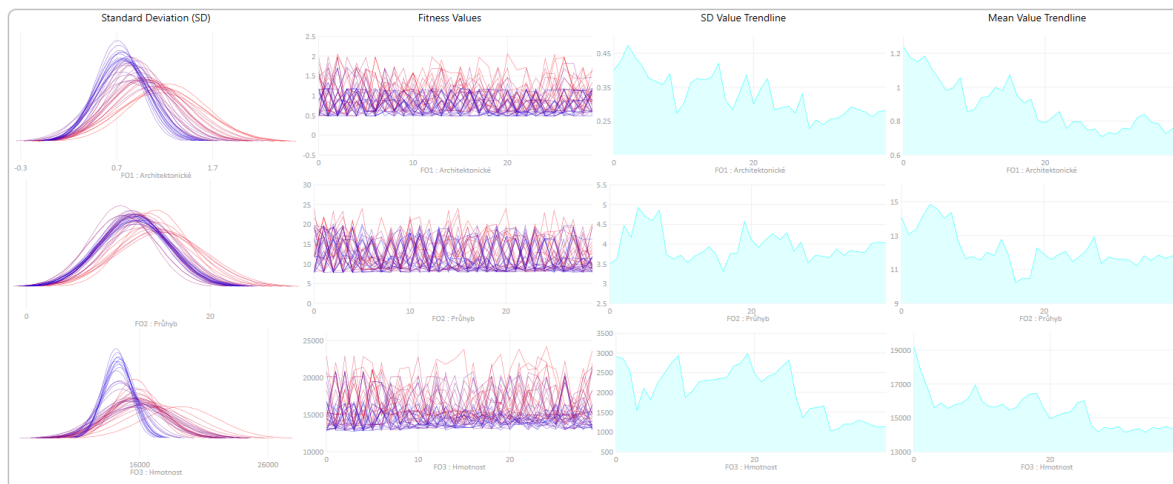
Obrázek 4.5: Radiční růžice - přímá i odražená energie

Ladybug je nástroj pro enviromentální analýzu modelu. Lze v něm definovat rozmanitá klimatická data a jejich vliv na konstrukci vytvořenou v prostředí Grasshopper. Umožňuje analyzovat vlastnosti jako dobu přímého oslunění zadaných ploch, světelné analýzy uvnitř budov, stanovení tepelných zisků, stínové studie, tepelné vlivy na konstrukce a tepelnou pohodu v interiéru. Obsahuje velké množství možností, jak tyto prvky kombinovat, a tím pomáhá učinit konstrukční a jiná rozhodnutí v rané fázi návrhu. Všechny tyto analýzy jsou vychází z enviromentálních dat v daných lokalitách, kde se tyto vlivy opravdu sledují. Data se získávají z konkrétní hydrometeorologické stanice. Ze získaných dat se dále počítá teplota, intenzita větru, nebo poloha slunce na obloze. V této práci je použita pouze část všech možných enviromentálních analýz vycházejících z Ladybug. Využití modulu Ladybug je velmi přínosné pro rozhodování v rané fázi návrhu.

Na obrázku 4.5 je uvedena růžice intenzity slunečního záření ve směrech. Obsahuje společně odraženou i přímou složku záření za období 1.4. - 30.9. pro Klementinum, Praha.

4.2.4 Wallacei

Další ze sady nástrojů pro programovací prostředí Grasshopper. Jedná se o evoluční řešič na bázi genetického algoritmu NSGA-II. Je to ideální nástroj pro víceúčelovou optimalizaci. Komponent pro svou funkci potřebuje zadání několika vstupních hodnot. V definici je potřeba zadat tzv. geny, hodnoty s proměnnou hodnotou, kterou řešič využívá při optimalizaci. Jako geny jsou voleny parametry konstrukce, které chceme optimalizovat (např. výška průvlastku). Model obsahuje větší množství nadefinovaných genů, z kterých se kombinují jednotlivá řešení. Dále jsou zadána optimalizovaná kritéria ("objectives"). Ta reprezentují hodnoty funkcí, které má za úkol řešič minimalizovat, případně maximalizovat (průhyb, napětí, hmotnost a další).



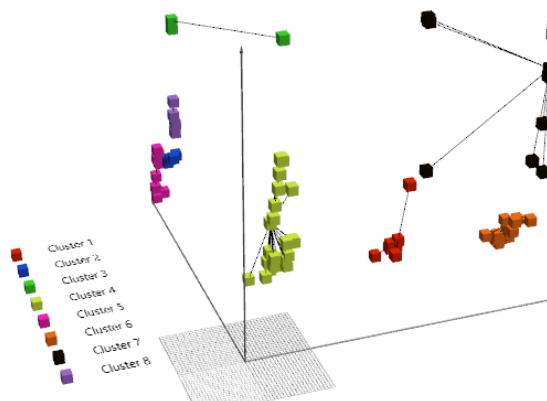
Obrázek 4.6: Grafické znázornění postupu výpočtu genetického algoritmu

Hlavní součástí je ovšem možnost práce a výběru jednotlivých řešení, které genetický algoritmus vytvoří. Řešič hledá optimální řešení vycházející ze zadaných parametrů a jejich kombinací. Z výsledných řešení se vytvoří plocha nebo křivka pareto front. Z těchto jedinců se za použití jednotlivých nástrojů vyberou nejlepší jedinci reprezentující nejlepší řešení. Selektce jedinců se provádí několika způsoby.

Pareto front

V UI (grafické prostředí) je možné zvolit zobrazení všech pareto front řešení. Těchto řešení je ovšem velké množství a je obtížné se v nich orientovat. Ovšem zobrazuje nejlepší řešení dosažená ve výpočtu.

K-means cluster



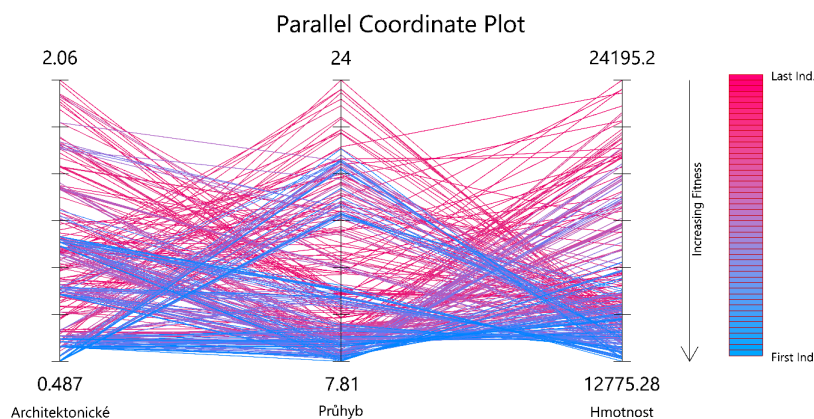
Obrázek 4.7: Zobrazení clusterů (shluků) ve 3D

Za vylepšení pareto front výběru je možné považovat tzv. clusterování (shlukování). To

umožňuje vytvořit clustery, tedy místa, která reprezentují centrální body z nejbližších pareto front řešení sdružených do clusteru. Tím můžeme omezit počet řešení pro další ruční výběr a najít tak vhodné řešení snáze.

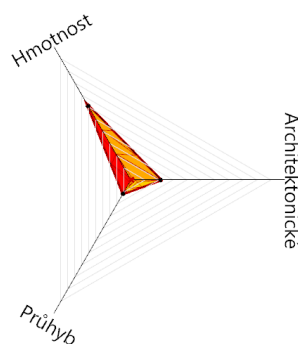
Parallel Coordinate Plot

Neboli PCP - Graf s paralelními souřadnicemi. V grafu lze analyzovat data hned několika způsoby.



Obrázek 4.8: Parallel coordinate Plot

- Nejvíce opakovaná fitness hodnota - Zobrazí nejvíce opakovanou hodnotu daného kritéria.
- Řešení s nejvíce opakovanou fitness hodnotou kritéria - Zobrazí řešení obsahující nejvíce opakovanou fitness hodnotu pro dané kritérium.
- Relativní rozdíl mezi umístěním fitness hodnot - Nejvhodnější řešení je to, které je v grafu vykresleno vodorovnou čarou. Zobrazuje řešení se stejnou hodnotou fitness funkce.
- Průměr hodnocených fitness hodnot - Seřadí řešení podle průměrného hodnocení všech fitness hodnot.



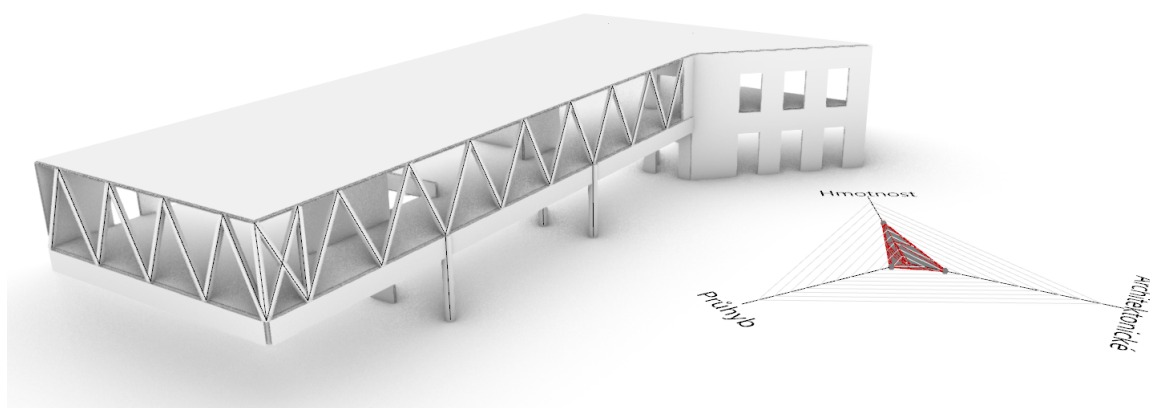
Obrázek 4.9: Růžicový graf

Nakonec lze pro finální výběr použít jako doplňkový ukazatel růžicový graf. Ten zobrazuje kvalitu každého řešení graficky, a tím zlepšuje orientaci v řešeních.

Mimoходом, samotná ikona a název jsou inspirovány biologem a zeměpisce jménem Alfred Russel Wallace. Ten nezávisle na Ch. Darwinovi přišel s myšlenkou přirozené evoluce v přírodě. [11]

4.2.5 Rhinoceros

Program určený pro grafické zobrazení modelů z připojených softwarů. Jeho součástí je plug-in pro grafické programování Grasshopper. Definovaná geometrie je potom z Grasshopper komponent převedena do grafického prostředí Rhinoceros. Obecně je používán ke 3D modelování v průmyslu, ale i jiných odvětvích jako je například produktový design. Umožňuje i zpracování 3D tisku.



Obrázek 4.10: Ukázka grafického výstupu z programu Rhino

Kapitola 5

Parametrické modelování pro analýzu konstrukce

5.1 Parametrický model

Pro účely optimalizace je vytvořen parametrický model v prostředí Grasshopper. Výpočet pomocí metody konečných prvků, zavedení materiálových a průřezových charakteristik a statické analýzy je proveden pomocí nástavby Karamba3D. Pro optimalizaci byl využit evoluční řešič Wallacei. Pro enviromentální analýzu je použit Ladybug. S pomocí těchto programů je vytvořen parametrický model budovy. Pro doplnění statické analýzy je použit SCIA Engineer. Dosažené výsledky jsou následně porovnány s ručním návrhem.

5.1.1 Základní řešení parametrického modelu

Rámcový návrh tvaru budovy a konstrukcí byl již proveden v kapitole 2.2.2. Zde byla popsána základní myšlenka a rozsah objektu.

Tvorba modelu

Model je vytvořen pomocí jednotlivých komponent programového prostředí Grasshopper. Dále byly použity nástroje z rozšíření Wallacei pro řešení pomocí genetických algoritmů, Karamba3D pro výpočet pomocí metody konečných prvků a Ladybug pro analýzu enviromentálních vlivů.

Pro optimalizaci bylo zvoleno několik proměnných hodnot. Celkově se jedná o 10 genů, které jsou ovládány řešičem Wallacei. Jedná se hlavně o tloušťku stěn, velikost oken, polohu sloupů v podélném směru objektu, výšku průvlaků nebo délku jednoho pole příhradové konstrukce. Geny byly zvoleny tak, aby zvolená hodnocená kritéria přímo s geny souvisela a nedocházelo tak k náhodným změnám bez vlivu na výsledky.

Hodnocená kritéria:

- Sloučené architektonické hledisko
- Maximální průhyb

- Hmotnost konstrukce

Hmotnost je ovlivňována hlavně tloušťkou konstrukcí a jejich dimenzemi. Pro průhyb je důležitá volba geometrie prvků. Architektonické hledisko se skládá ze tří hodnot, které je potřeba navzájem sloučit do jednoho kritéria.

5.1.2 Sloučené architektonické kritérium

Pro architektonické hledisko bylo zvoleno několik vstupních parametrů. Kvůli náročnosti optimalizace mnoha kritérií byla zvolena strategie dvojího přístupu. Kritéria hmotnosti a průhybu byla použita, vzhledem k jejich důležitosti, samostatně. Ovšem zřízení architektonického hlediska se nedá vyjádřit pouze jednou hodnotou z modelu. Je proto nutné více hodnot sloučit v jedno kritérium. Pro tento účel je vytvořeno kritérium podle následujícího vzorce.

$$FV_t = a * FV_1 + b * FV_2 + c * FV_3 \quad (5.1)$$

Tímto způsobem vznikne jedna virtuální hodnota reprezentující hned několik dalších hodnot. První dvě kritéria jsou geometrická a ovlivňuje je umístění řad sloupů 1 a 2 v podélném směru. První reprezentuje poměr polí, které je nastaveno tak, aby pole byla co nejvíce vyrovnaná. Druhé a třetí kritérium obsahují hodnoty tepelných zisků. Hodnota zisků se v létě minimalizuje a v zimě maximalizuje, což má vliv na velikost okenních otvorů. Všechna kritéria jsou váhována následujícími hodnotami. $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$. Pro získání nejlepších řešení je potřeba vybrat několik výsledných řešení a vzájemně je porovnat. Stejná výsledná hodnota kritéria totiž může být sestavena z různých hodnot dílčích. [12]

5.1.3 Nastavení výpočtu

Pro výpočet byl genetický algoritmus nastaven následovně.

- Populace má 30 jedinců a počet generací pro výpočet je 40. Dohromady tedy výpočet vytvoří 1200 možných řešení problému.
- Pravděpodobnost křížení je 90 % a mutace 3,3 %.

Zadané hodnoty nevystihují ideální nastavení pro všechny úlohy. Algoritmus je potřeba nastavit individuálně pro každou optimalizační úlohu.

5.1.4 Výběr výsledného řešení

Výběru jedinců se musí věnovat zvýšená pozornost. Vybrané řešení by mělo náležet do paretovy množiny a mělo by být co nejvhodnější podle zvolených kritérií. Pro výsledný výběr bylo zvoleno 10 řešení. Řešení s nejnižším průměrným hodnocením kritérií. Dále řešení s nejmenším rozdílem hodnocení kritérií. Posledních 8 řešení je vyhledáno pomocí clusteru. Tedy selekce několika řešení ze shluků v paretově množině. Porovnání jedinců je znázorněno v následující tabulce.

Řešení		Kritérium		
Generace	Jedinec	Architektonické	Průhyb	Hmotnost
17	14	0,609	9,62	13609
22	6	0,48	16,06	15707
23	10	0,48	19,14	13255
23	11	0,902	11,33	13243
27	12	0,56	8,04	15114
29	27	1,17	11,48	13167
31	5	0,486	16,42	13920
31	27	0,57	9,014	13683
33	29	0,609	9,02	13686
38	7	1,13	7,942	15674

Tabulka 5.1: Tabulka vybraných jedinců s výsledky hodnocených kritérií

V tabulce 5.1 jsou vypsány hodnoty hodnocených kritérií („Fitness hodnota“). Každé řešení je dále hodnoceno podle k němu příslušných výsledků. Z těchto základních řešení není zcela patrné jaká jsou pro účel úlohy nevhodnější. Žádné z nich nemá více kritérií hodnocených jako nejlepší z uvedených. Pro další výběr tedy provedeme několik kroků. Zvolíme meze, které odpovídají požadavkům na konkrétní konstrukci. Architektonické kritérium musí mít hodnotu menší než 1, průhyb musí být menší než 12 mm. Tímto vyloučíme řešení, u kterých jsou hodnoty výsledků nevhodné. Bylo vyloučeno 5 řešení a zbývající jsou znázorněny v tab. 5.2.

Řešení		Kritérium		
Generace	Jedinec	Architektonické	Průhyb	Hmotnost
17	14	0,609	9,62	13609
23	11	0,902	11,33	13243
27	12	0,56	8,04	15114
31	27	0,57	9,014	13683
33	29	0,609	9,02	13686

Tabulka 5.2: Výběr jedinců po provedení selekce

Podle hodnocených kritérií je nejlepší řešení 12 z generace 27. Toto řešení svými hodnotami vytváří nejlepší řešení dané úlohy. Pro další porovnání bude provedena analýza z architektonických i statických hledisek. Získané hodnoty budou porovnány s ručním návrhem.

5.2 Analýza výsledků parametrického modelu a porovnání s ručním návrhem

Pro zhodnocení parametrického návrhu je využita stejná metodika jako u ručního návrhu. Budou porovnány hodnoty obdobných charakteristik pro přímé porovnání jednotlivých variant návrhu.

5.2.1 Statická analýza

Parametrický model stanovil geometrii prvků následovně.

	Deska	Stěna	Průvlak		Sloup
	h	b	b	h	r
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Parametrický	200	200	350	1200	600
Ruční	260	260	300	1000	600

Tabulka 5.3: Porovnání dimenzí parametrického modelu a ručního návrhu

Ruční návrh vychází z empirických vzorců a je tak na straně bezpečnosti. Pro konkrétní zadání lze následně výpočtem prokázat možnost využití subtilnějších prvků. V tomto případě by tenčí deska měla výpočtu vyhovět, a tak by se i v ručním návrhu dimenze desek mohla zmenšit. Oproti tomu průvlaky mají větší dimenze a jsou tak únosnější. To může částečně kompenzovat menší tloušťka desky. Ovšem všechny tyto prvky podléhají konkrétnímu návrhu a posouzení v dalších fázích návrhu, kde se prvky posoudí.

Zatížení

Zatížení bylo počítáno bez vlastní tíhy a na další výpočet nemá tato úprava vliv. Vlastní tíha v ploše podlahy se sníží o hodnotu odpovídající zmenšení tloušťky desky a výpočet bude proveden na upravené konstrukci.

Ověření návrhu desky

Metodika ověření je obdobná jako v ručním návrhu. Pro analýzu byla vybrána místa reprezentující největší namáhání konstrukce. Vzhledem k podobnosti geometrie parametrického a ručního návrhu se poloha bodů nezměnila. Vnitřní síly jsou v porovnání s ručním návrhem vyrovnanější a nevytváří tak velké extrémy. Plochy výztuže s momenty jsou porovnány v tabulce 5.5.

Porovnání ploch výztuže znázorňuje, že se součet ploch výztuže ve vybraných místech příliš nezměnil (součet ploch para. modelu: 14678 mm^2 a ručního návrhu 14771 mm^2). Zmenšení tloušťky desky má ovšem pozitivní vliv na množství použitého betonu a jeho využití v běžných částech konstrukce. Vybraná místa reprezentují místa se zvýšeným namáháním, tato místa lze dodatečně upravit pro lepší působení. V místech s malými momentovými účinky bude tenčí deska lépe využívat vlastnosti materiálu.

Zelenou barvou jsou zvýrazněné vždy průřezy s menší plochou výztuže v daném bodě, povrchu a směru. Obecně je více míst s menší plochou výztuže v ručním modelu, to může znamenat lepší působení průřezu kvůli větší tloušťce desky. Dá se říci, že vyztužení není ani v jednom z případů vždy lepší. Velmi záleží na konkrétních bodech a geometrii.

Tenká deska ovšem bude mít větší dlouhodobé průhyby. Je tedy potřeba přímo posouzením dokázat, že zvolená dimenze je dostačující a že splní limity pro mezní stav použitelnosti. Samozřejmě po dotvarování a smršťování.

Bod	m_x	m_y	m_{xy}	m_{Rdx}	m_{Rdy}	m'_{Rdx}	m'_{Rdy}
-	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']	[kNm/m']
1	17,0	22,0	-15,4	32,4	37,4	-1,6	-6,6
2	-3,9	-4,5	6,5	2,6	2,0	10,4	11,0
3	-8,9	-30,0	-11,1	2,2	-19,0	20,0	41,1
4	-17,2	-5,2	-16,2	-1,0	11,0	33,4	21,4
5	-63,8	-125,0	11,1	-52,7	-113,9	74,9	136,1
6	-2,8	-18,3	14,9	12,1	-3,4	17,7	33,2
7	-18,0	-23,3	-8,6	-9,4	-14,7	26,65	31,9
8	-99,7	-132,0	14,0	-85,7	-118,0	113,7	146,0
9	52,8	21,3	-1,0	53,8	22,3	-51,8	-20,3

Tabulka 5.4: Hodnoty momentů od zatížení a dimenzačních momentů v osových směrech

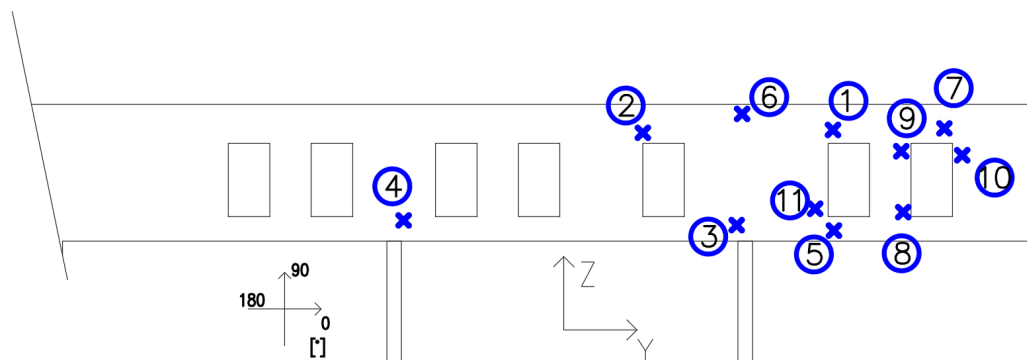
bod	Dimenzační momenty			h	d	d_t	d_s	$a_{s,req}$	$a_{s,req} ruční$	
		[kNm/m']		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	
1-x	m_x	17,0	m_{Rdx}	32,4	200	163	0	14	508	430
1-y	m_y	22,0	m_{Rdy}	37,4	200	149	14	14	641	455
1-x'	m_{xy}	-15,4	m'_{Rdx}	-1,6	200	149	14	14	kční	kční
1-y'			m'_{Rdy}	-6,6	200	163	0	14	kční	kční
5-x	m_x	-63,8	m_{Rdx}	-52,7	200	163	0	14	kční	kční
5-y	m_y	-125,0	m_{Rdy}	-113,9	200	149	14	14	kční	kční
5-x'	m_{xy}	11,1	m'_{Rdx}	74,9	200	147	14	18	1302	1841
5-y'			m'_{Rdy}	136,1	200	161	0	18	2161	1652
6-x	m_x	-2,8	m_{Rdx}	12,1	200	163	0	14	kční	kční
6-y	m_y	-18,3	m_{Rdy}	-3,4	200	149	14	14	kční	kční
6-x'	m_{xy}	14,9	m'_{Rdx}	17,7	200	149	14	14	kční	kční
6-y'			m'_{Rdy}	32,6	200	163	0	14	521	637
8-x	m_x	-99,7	m_{Rdx}	-85,7	200	163	0	14	kční	kční
8-y	m_y	-132,0	m_{Rdy}	-118,0	200	149	14	14	kční	kční
8-x'	m_{xy}	14,0	m'_{Rdx}	113,7	200	147	18	14	2005	1409
8-y'			m'_{Rdy}	146,0	200	161	0	18	2318	2509

Tabulka 5.5: Tabulka vyztužitelnosti průřezů parametrického modelu s porovnáním s ručním návrhem

Ověření návrhu stěny

Stěna má díky rozdílným rozměrům otvorů jinou geometrii a některé body již nejsou v místech s největším napětím. Body, které jsou více namáhané jsou body číslo 8 a nový bod 11 vyznačený na obrázku. Obecně se napětí díky menší tloušťce desky zvětší. Napětí je však stále v přijatelných mezích. Pro upřesnění je uvedeno schéma bodů v obrázku 5.1

V tabulce 5.7 jsou znázorněna místa s největším tahovým napětím. Tlakové napětí nepřesáhne pevnost betonu v tlaku, a tak zde není uvedeno. Napětí dosahuje v některých místech vysokých hodnot, a tak je potřeba návrhem a posouzením určit přesnou plochu výztuže.



Obrázek 5.1: Schéma bodů na stěně

Bod	σ_y	σ_z	τ_{yz}	f_{tdy}	f_{tdz}
-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	-4,8	-6,2	5,5	0,7	-0,7
2	1,3	0,3	-2,5	3,8	2,8
3	-7,9	-3,7	-2,5	-5,0	-0,8
4	-1,3	-2,9	2,2	0,9	-0,7
5	-11,2	1,6	3,2	-8	4,8
6	5,1	1,1	1,3	6,4	2,4
7	4,7	-2,8	2,3	7,0	-0,5
8	0,3	10,5	2,0	2,3	12,5
9	-0,5	-10,8	2,0	1,5	-8,8
10	4,7	2,2	1,4	6,1	3,6
11	0,4	11,6	2,4	2,8	14

Tabulka 5.6: Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech parametrického modelu

Oblast	Napětí		Dim. napětí		Stupeň vyztužení		Plocha výztuže		Lze vyztužit
		[MPa]		[MPa]		[%]	a	[mm ²]	ano/ne
6	σ_y	5,1	f_{tdy}	6,4	ρ_y	1,47	a_y	1534	ano
	σ_z	1,1	f_{tdz}	2,4	ρ_z	0,553	a_z	575	ano
	τ_{yz}	1,3							
8	σ_y	0,3	f_{tdy}	2,3	ρ_y	0,53	a_y	551	ano
	σ_z	10,5	f_{tdz}	12,5	ρ_z	2,88	a_z	2995	ano
	τ_{yz}	2,0							
11	σ_y	0,4	f_{tdy}	2,8	ρ_y	0,645	a_y	671	ano
	σ_z	11,6	f_{tdz}	14,0	ρ_z	3,22	a_z	3355	ano
	τ_{yz}	2,4							

Tabulka 5.7: Hodnoty napětí od zatížení a dimenzačních napětí v osových směrech parametrického modelu

Vyztužení stěny by nemělo být problematické a lze ho realizovat. Při podrobném posouzení v dalších fázích návrhu se připouští drobné úpravy prvků.

Průvlaky

Extrémy vnitřních sil vznikají ve stejných místech jako při ručním návrhu. Tedy u průvlatku P1 nad podporou a P3 v poli. Hodnoty momentových účinků jsou uvedeny v tabulce 5.8 a 5.9

Průvlak	Rozpětí	Výška	Šířka žebra	Moment	d	Plocha výztuže	ρ
-	[mm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm ²]	[%]
P1	14 400	1400	350	2497	1150	5959	2,3

Tabulka 5.8: Předběžné ověření množství výztuže v průřezu nad podporou - parametrický model

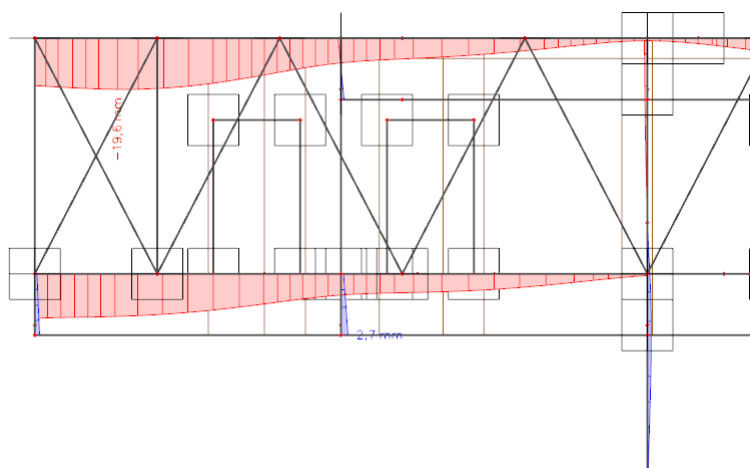
Průvlak	Rozpětí	Výška	Šířka žebra	Moment	d	Plocha výztuže	ρ
-	[mm]	[mm]	[mm]	[kNm]	[mm]	[mm ²]	[%]
P3	14 400	1400	350	1298	1200	2677	1,03

Tabulka 5.9: Předběžné ověření množství výztuže v průřezu v poli - parametrický model

V obou případech lze průřezy vyztužit. Průvlak P1 nad podporou lze vyztužit různými způsoby, uvedený výpočet je pro výztuž průměru 22 mm v počtu 20 ks. Pro průřez v poli je nutné umístit výztuž do více řad nad sebou.

Průhyb

Hodnoty průhybu jsou sledovány v několika místech. Extrémní hodnota se nachází ve vykonzolané části, kdy se deska prohýbá více než ostatní prvky. Maximální hodnota průhybu je menší než u ručního návrhu a to konkrétně $u_z = 19,6 \text{ mm}$ oproti 21,5 mm při ručním návrhu.



Obrázek 5.2: Maximální průhyb na konstrukci - parametrický model

Průhyb desky v běžném poli je kvůli tloušťce desky větší, ovšem stále plní stanovené limity na průhyb. Ty jsou stanoveny na 1/400 rozpětí desky. Což pro desku s rozpětím 8 m znamená 20 mm. Průhyb desky z lineárního výpočtu je i se spolupůsobením průvlatků 14,9 mm. Hodnota

není konečná a je potřeba posoudit průhyb i po smršťování a dotvarování. Podrobné analýzy jsou předmětem dalších fází návrhu.

5.2.2 Enviromentální analýza

Vzhledem ke změnám geometrie se mění i sledované parametry z enviromentálního hlediska. Budou porovnány hodnoty s ručním návrhem již bez grafického znázornění.

Tepelné zisky

Tepelné zisky za období	Ruční	Parametrický
	[kWh]	[kWh]
1.4.-30.9.	67 655	61 838
1.10.-31.3.	24 699	22 341

Tabulka 5.10: Vyčíslení tepelných zisků s porovnáním

Při porovnání obou období je zřejmé, že došlo ke zmenšení tepelných zisků díky změně geometrie okenních otvorů. Celkově poklesla hodnota tepelných zisků v letním období o 8,6 % a v zimním období 9,5 %. Sice se zmenšily zisky i v zimním období, kdy představují pozitivní dopad na spotřebu energie pro vytápění, tak hlavní úspora je v letním období. Při úspoře 8,6 % se může v absolutních číslech jednat o poměrně dobré zmenšení náchylnosti interiéru k přehřívání v letním období.

Oslunění interiéru

Oslunění interiéru je omezeno celkovým zmenšením plochy otvorů kvůli tepelným ziskům.

Při ručním návrhu bylo více než tři hodiny v daném období osluněno 32,6 %. Z parametrického návrhu vychází poměr osluněné části na 29,5 %.

Snížení oproti ručnímu návrhu v osluněné ploše je 9,5 %. Tyto hodnoty jsou pouze orientační a je potřeba v dalších fázích návrhu konkrétní hodnoty spočítat a posoudit, zda jsou hodnoty dostatečné. Avšak pro prvotní návrh jsou tato porovnání velmi přínosná.

5.3 Zhodnocení

Evoluční algoritmy jsou zcela jistě posun vpřed v procesu optimalizace konstrukcí. Pro konkrétní budovu je zřetelný směr optimalizace. Její výsledek je přímo závislý na přesnosti definice. To klade zvýšené nároky na schopnosti člověka, který problém definuje. Samotná optimalizace v tomto typu úloh má za účel nasměrovat řešitele správným směrem, ovšem nenahrazuje přímo obvyklé procesy návrhu. Je totiž stále potřeba si předem nadefinovat geometrii a určit jí pohyblivé meze, ve kterých se může pohybovat. To může být těmito nástroji zefektivněno. Každý účastník rané fáze návrhu může implementovat požadavky, které se do modelu zařadí. Tím pádem se tento nástroj stává vhodným také pro komplikovanější konstrukce, kde je celá řada

požadavků, u kterých například static při každé změně musí tuto změnu adresovat na další profese, aby vytvořili posudek vlivu na jejich zaměření. Pokud se již dopředu dané požadavky nadefinují, může zpracovatel modelu pracovat efektivněji a dané požadavky řešit okamžitě s pomocí modelu. Příklad za všechny může být například procentuální vyjádření plochy s dostatečně dlouho dobou oslunění v normovém období. V tomto případě klesla u parametrického modelu hodnota pod 30 % plochy podlaží. To může být již pod limitní hodnotu. Lze tedy tuto podmínku do modelu nadefinovat a získávat tak řešení, která danou podmínku splňují. Je tedy možné se věnovat blíže jiným částem návrhu, a přitom bude zajištěno, že po změnách provedených na konstrukci se daný limit stále splní. Pokud se nesplní, je snadné tento problém najít a upravit definici tak, aby se vyhovělo kritériím v akceptovatelné míře.

Hlavní výhoda tkíví právě v tom, že lze v modelu v reálném čase řešit i tyto „soft“ vlivy, ovlivňující konstrukci. Při správném nadefinování je tedy optimalizace srovnatelná s přístupem ručním. Toto je ovšem závislé na zkušenostech daného člověka. Jak při ručním návrhu, tak při definici parametrického modelu se všemi vnesenými požadavky. Výhoda je nesporně i to, že se může snížit čas strávený při změnách geometrie budovy. Při využití parametrického modelování jsou změny geometrie průvlaků, sloupů, či otvorů otázkou několika vteřin. Je v rukou každého, jak k dané problematice přistupuje. V dnešní praxi je čas velmi drahá komodita, a pokud se tyto metody ukážou jako efektivní a odpovídající požadavkům praxe, můžeme očekávat, že si nové metody optimalizace najdou cestu i k menším a jednodušším projektům, než ke kterým se tyto nástroje používají dnes.

Parametrický návrh umožnil snížit množství použitého betonu při obdobných hodnotách průhybu a únosnosti. Parametrický model při své hmotnosti 1523 tun, představuje úsporu hmotnosti 13,8 % oproti ručnímu návrhu s hmotností 1767 tun. To představuje úsporu i ve všech fázích realizace budovy. Snižuje tak množství skleníkových plynů z výroby, dopravy cementu, zpracování betonu, dopravy a ukládání. Snižujeme tak vliv na životní prostředí ve všech ohledech. To navíc vyjadřuje jen jeden vliv, který můžeme tímto typem návrhu ovlivnit.

Kapitola 6

Závěr

Se zohledněním všech trendů a stoupajících nároků na návrhy budov je tento nástroj vhodný pro dosažení mnoha ambiciózních cílů. Pomocí genetických algoritmů a parametrického modelování lze omezit množství času potřebného pro vývoj návrhu budovy v raných návrhových fázích. Využití těchto metod umožňuje do jednoho modelu implementovat všechny požadavky od několika profesí najednou. K efektivnímu návrhu můžeme dojít i při ručním návrhu, ovšem s využitím těchto nástrojů můžeme navrhovat efektivněji větší množství budov a najít i řešení, která by se při ručním návrhu jen těžko odhalovala. Ve spojení s BIM může být tento typ návrhu velmi progresivním, a tím ovlivňovat budoucí vnímání návrhu staveb.

Při dnešních trendech, kdy je potřeba navrhovat konstrukce dostatečně rychle a efektivně, představuje tento proces možnost navrhovat efektivnější konstrukce za kratší časový úsek a tím zlepšit celý proces návrhu. Pozitivně se tímto typem návrhu můžeme podepsat i na jednotlivých fázích realizace. Můžeme mnoho míst nebo částí již dopředu podrobněji navrhnout a tím ušetřit čas i finance při realizaci. V ruce zkušeného stavebního inženýra může tento nástroj znamenat zlepšení a zpřesnění jeho práce.

Výhody parametrického návrhu

Pro zkušeného inženýra uvedené metody představují usnadnění práce a umožňují získat náhled na různé další prvky, které mu objasní důležitost dalších částí a vlivů na tvary konstrukcí, nebo jejich dimenze a tvary. Při využití všech dostupných nástrojů potom dokáže jeden člověk posoudit vliv jeho řešení na další části a může je přímo v reálném čase i řešit. Případně lze vnést požadavky více profesí do jednoho modelu, který je zohlední.

- Možná úspora času při hledání optimálních řešení.
- Zjištění vlivů úprav na ostatní vlastnosti konstrukce v reálném čase a možnost jich při návrhu využít.
- Možnost využití předdefinovaných hodnot od ostatních profesí a jejich automatická implementace do modelu.

- Velmi jednoduchá práce s geometrií ve smyslu úprav a jejich okamžitého projevu na všechny sledované vlastnosti.
- Sdružení požadavků z různých hledisek v jednom modelu (nabízející se implementace s BIM).
- Snadná vizualizace problémů pro investora.
- Možnost dosáhnout úspory materiálu nebo zefektivnění konstrukcí.
- Inspirace vycházející z výsledků.

Nevýhody genetických algoritmů

Každá metoda má i nevýhody. V tomto případě se jedná hlavně o tyto.

- Složitost definování budovy, jejích konstrukčních částí a definování hodnocených kritérií.
- Potřeba dostatečně vysokého výpočetního výkonu.
- Někdy obtížné vybírání optimálního řešení.
- Nemusí zohledňovat náročnost na provádění a další vlivy.
- Nenahrazuje větší část úkonů prováděných člověkem, jen pomáhá činit rozhodnutí.

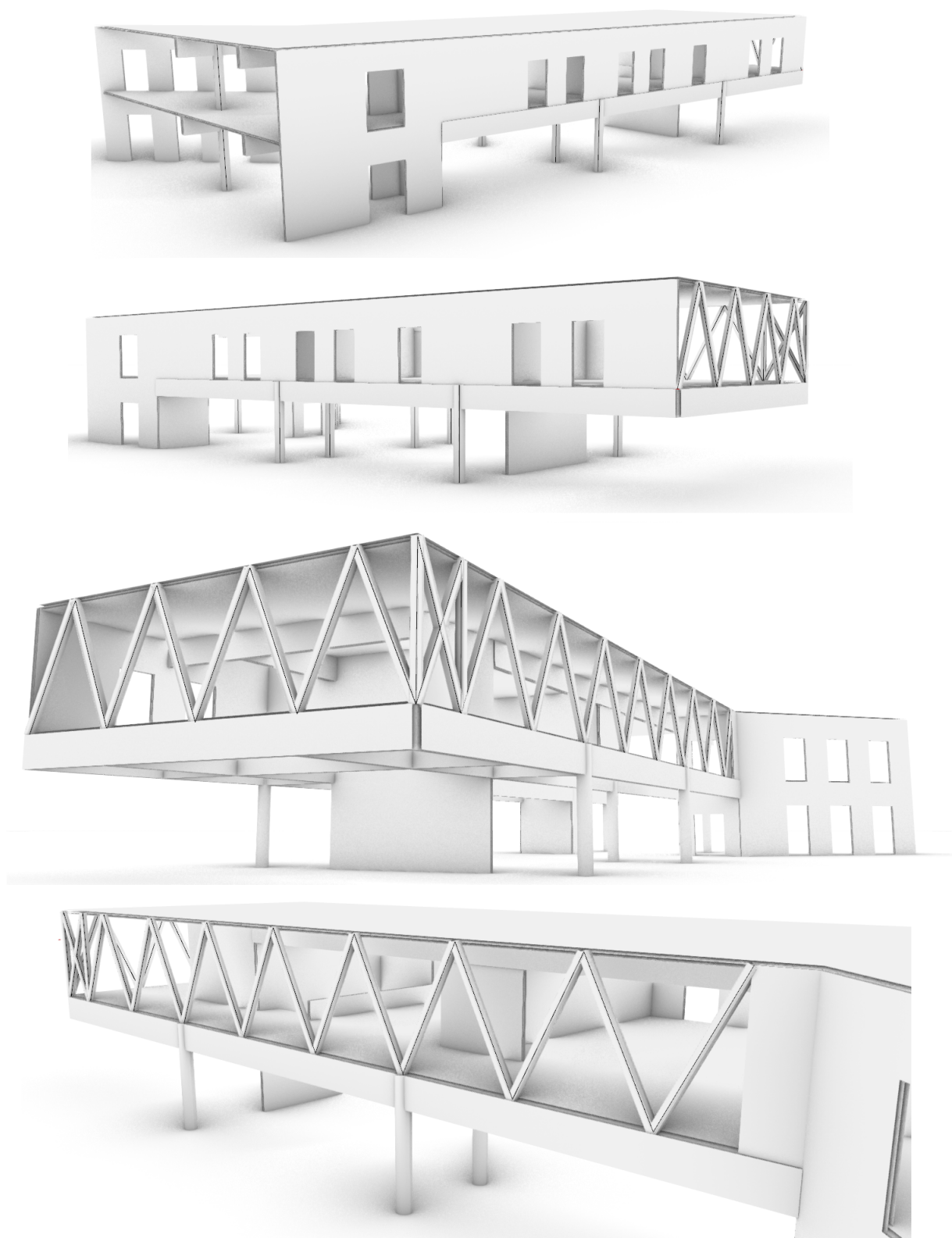
I když tyto návrhové přístupy usnadňují a zefektivňují práci, stále je potřeba jednotlivé části ručně posoudit a učinit rozhodnutí o implementaci daných řešení. Algoritmy sice dokáží velmi efektivně najít optimum pro zadané požadavky, ovšem nedokáží již najít optimum pro jiné vlivy. Proveditelnost konstrukcí může být jeden z těchto požadavků, jelikož její implementace se jeví jako komplikovaná a nejistá.

Jedná se tedy o vhodný nástroj pro vylepšení a zefektivnění práce člověka zpracovávajícího raný návrh. Může to také usnadnit komunikaci mezi jednotlivými profesemi a implementovat do modelu jejich požadavky. Tím lze dosáhnout lepšího návrhu, který vyhovuje ve více směrech.

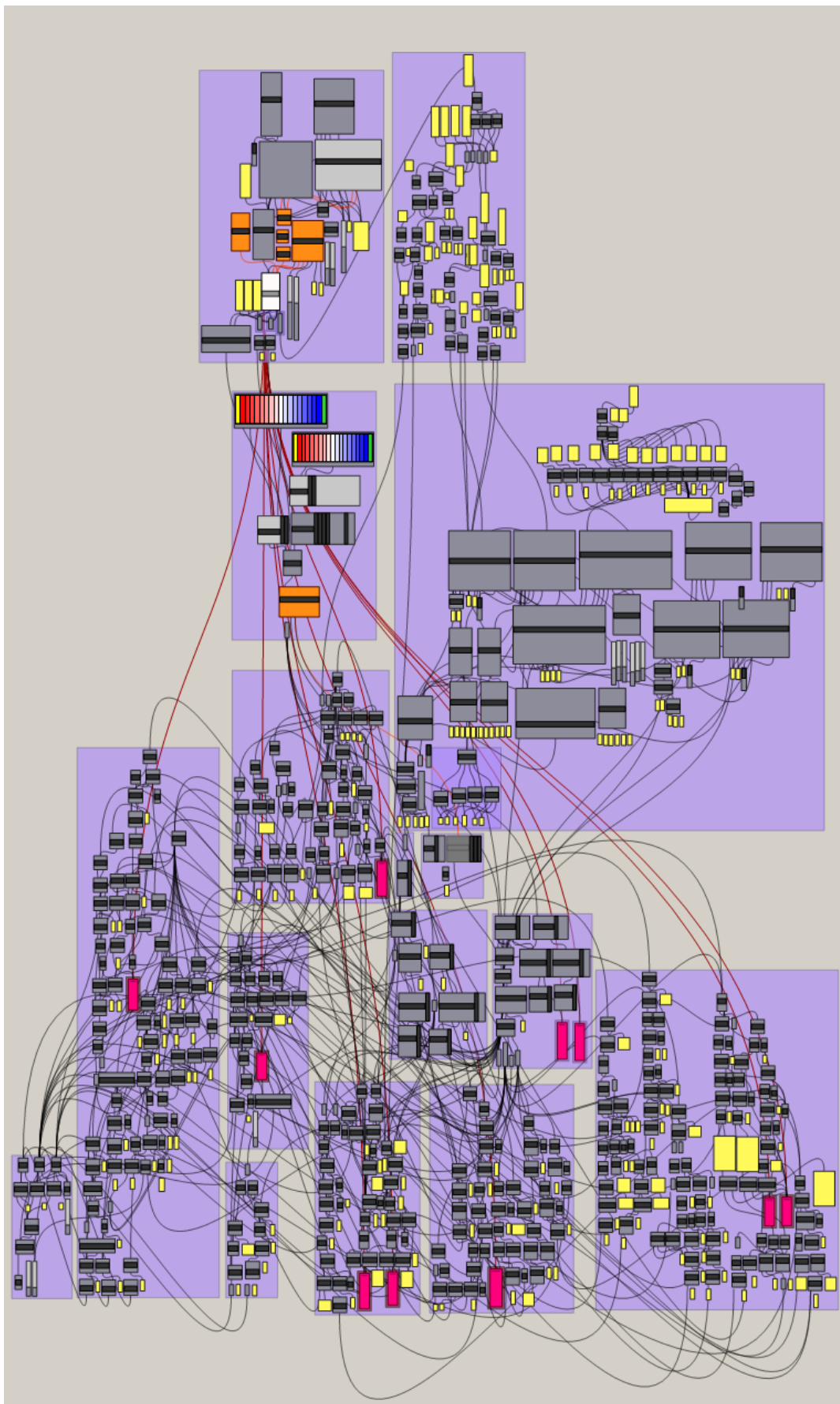
Přínos pro budoucí vývoj optimalizačních procesů ve výstavbě je nesporný. Na takto malé konstrukci došlo k úspoře hmotnosti o celých 13,8% při zachování obdobných celkových vlastností konstrukce jako celku. To jen podporuje důležitost myšlenky a důležitost optimalizačních procesů.

Příloha A

Definice v prostředí Grasshopper



Obrázek A.1: 3D zobrazení výsledné varianty budovy v prostředí Rhinoceros



Obrázek A.2: Definice budovy v Grasshopper 3D

Bibliografie

- [1] D. Měšťanová, J. Tománková a D. Čápková, *Příprava a řízení staveb*. 2009.
- [2] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, 2001, sv. 16.
- [3] P. Mergos a A. Sextos, *Multi-objective optimum selection of ground motion records with genetic algorithms*. červ. 2018.
- [4] J. Hynek, *Genetické algoritmy a genetické programování*. čvc 2008, s. 200.
- [5] Y. Fang a J. li, “A Review of Tournament Selection in Genetic Programming”, říj. 2010, s. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-642-16493-4_19.
- [6] F. B. Pereira a J. M. C. Marques, “A Hybrid Evolutionary Algorithm for Cluster Geometry Optimization: The Importance of Structural Elitism”, in *2008 Eighth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, 2008, s. 911–914. DOI: 10.1109/HIS.2008.98.
- [7] P. Pošík, “Genetické algoritmy”, 2000.
- [8] J. Chao, “A Sequential Process Monitoring Approach using Hidden Markov Model for Unobservable Process Drift”, dis, čvc 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.32537.83041.
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal a T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, roč. 6, č. 2, s. 182–197, 2002. DOI: 10.1109/4235.996017.
- [10] J. Cudzik a K. Radziszewski, “Parametric design in architectural education”, *World Transactions on Engineering and Technology Education*, roč. 17, s. 448–453, pros. 2019.
- [11] M. Makki, M. Showkatbakhsh a Y. Song, *Wallacei X Primer 2.0*, lis. 2019. WWW: <https://www.wallacei.com> (cit. 12. 12. 2020).
- [12] I. Zelinka, *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. PRAHA: BEN - technická literatura, 2009, ISBN: 978-80-7300-218-3.