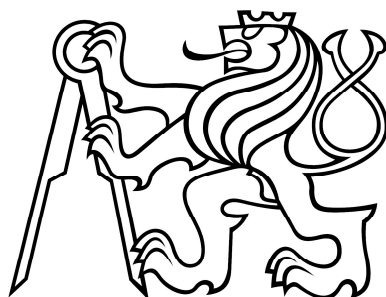


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra mechaniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace železobetonového skeletu
a analýza získaných výsledků

Praha, 2011

David Šedlbauer

ABSTRAKT

Snížení nákladů na konstrukci v celém jejím životním cyklu je dnes ve stavebnictví stále více jmenované téma. Nejvýhodnější je zabývat se touto otázkou již v návrhu konstrukce. To platí i pro železobetonové konstrukce. Zatím se projektanti při navrhování optimálních staveb musí spolehnout především na své zkušenosti. Statické softwary totiž nabízí pouze omezené možnosti optimalizace.

Tato práce se zabývá novým optimalizačním modulem pro obecnou optimalizaci, který je součástí statického softwaru. Nejprve jsou představeny práce na akademickém poli na téma optimalizace železobetonu. Následně je optimalizační modul představen a využit k návrhu železobetonového skeletu. Pro optimalizaci bude sestaveno několik verzí parametrizace. V části výsledků je ukázána nejen optimální konstrukce s ušetřenými náklady, ale je provedena i analýza průběhu optimalizace, skupin parametrizace či vstupních a výstupních parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace, železobeton, cena, software, analýza, shluková analýza

ABSTRACT

Reduction of all costs during the life-time of a structure is one of the main subjects studied within a civil engineering industry. The most promising area of a reduction of a total price is the initial design. In case of reinforced concrete structures, this statement is valid as well. Up to now, the buildings were designed only based on designers' experience. Also software vendors did not offer tools for numerical optimization of the buildings' designs.

This work is dealing with a brand new optimization tool for a general optimization which is closely coupled with the statical software. Firstly, the history of reinforced concrete structures optimization is presented. Next, the optimization tool is introduced and shown on the design of a reinforced concrete frame. Several tasks are presented with different types of parameterizations. The results show not only the optimal designs with the final price of the structure, but also analysis of the optimization runs, analysis of obtained groups of parameters and sensitivity analysis of results to particular inputs.

KEYWORDS

Optimization, reinforced concrete, price, software, analysis, data clustering

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Optimalizace železobetonového skeletu a analýza získaných výsledků* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v bibliografii na konci práce.

V Praze, dne:

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Matějovi Lepšovi, Ph.D. za metodickou a odbornou pomoc, pevnou vůli a velkou dávku trpělivosti a porozumění při zpracování mé diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří také Ing. Jiřímu Podvalovi za pomoc a projevenou podporu.

Práce vznikla za podpory projektu SGS11/021/OHK1/1T/11.

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vii
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
1 Úvod	11
1.1 Motivace	11
1.2 Historický přehled.....	12
2 Modely	15
2.1 Železobetonový skelet	15
2.2 Původní model	17
2.2.1 Zatížení	17
2.2.1 Materiály a prvky	18
2.3 Modely pro optimalizaci	19
2.3.1 Zatížení a materiály	20
2.3.2 Parametrizace	23
2.3.1 Posudky a XML soubory	24
3 Optimalizace	26
3.1 EOT	27
3.1.1 Prostředí modulu	27
3.1.2 Metody modulu	28
3.1.3 Nastavení parametrů a vybrané metody.....	31
4 Výsledky a analýza	38
4.1 Časová náročnost	38
4.2 Optimální hodnoty	39
4.2.1 Základní skupina parametrů.....	39
4.2.2 Rozšířená skupina parametrů.....	42
4.2.3 Rozšířená původní skupina	47
4.2.4 Porovnání skupin parametrizace	48
4.3 Kontrola výsledků a praktický úhel pohledu	50
4.3.1 Optimalizovaná vs. původní konstrukce.....	55

4.4	Multikriteriální optimalizace	57
4.4.1	Shluková analýza	59
5	Závěr	64
	Bibliografie	66
	Seznam příloh	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Tabulka výskytu použitých rozměrů nosníků (obrázek vlevo) a sloupů (obrázek vpravo) pro třináct reálných budov, převzato z (2)</i>	12
<i>Obr. 1-2 Vyztužení průřezu podle britské národní normy (vlevo) a optimalizované vyztužení (vpravo), převzato z (8)</i>	14
<i>Obr. 2-1 Skica podzemního patra původního projektu</i>	16
<i>Obr. 2-2 Skica druhého a třetího nadzemního podlaží</i>	16
<i>Obr. 2-3 Obrysový model původního provedení v programu FEAT 2000</i>	19
<i>Obr. 2-4 Obecné plošné zatížení s využitím zatěžovacího panelu na prutové prvky</i>	21
<i>Obr. 2-5 Rozpočítané zatížení ze zatěžovacího panelu na prutové prvky</i>	21
<i>Obr. 2-6 Umístění a podoba ikon pro posouzení železobetonu v klasické stromové nabídce</i>	25
<i>Obr. 2-7 Obrysový model objektu v programu Scia Engineer 2011</i>	26
<i>Obr. 3-1 Modul EOT s načtenými vstupními a výstupními parametry</i>	27
<i>Obr. 3-2 Příklad postupu metody simplexů pro 2D případ – převzato z (26)</i>	30
<i>Obr. 3-3 Porovnání metod modulu EOT dle různých kritérií – převzato z (27)</i>	31
<i>Obr. 3-4 Ukázká překročení posudku konstrukčních zásad – podélná rozteč trémíků</i>	36
<i>Obr. 3-5 Řešení překročení posudku konstrukčních zásad – menší podélná vzdálenost trémíků</i>	36
<i>Obr. 4-1 Průměrné časy jednoho řešení pro vyšetřované skupiny parametrů</i>	39
<i>Obr. 4-2 Závislost průřezových parametrů na výsledné ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů</i>	40
<i>Obr. 4-3 Závislost parametrů výztuže na výsledné ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů</i>	41
<i>Obr. 4-4 Závislost objemu použitého betonu na ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů</i>	41
<i>Obr. 4-5 Závislost hmotnosti použité výztuže na ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů</i>	42
<i>Obr. 4-6 Postupné snižování teploty v algoritmu vybrané metody</i>	43
<i>Obr. 4-7 Optimální (minimální) hodnoty cílové funkce pro jednotlivé teplotní hladiny</i>	43
<i>Obr. 4-8 Závislost parametrů průřezu nosníku na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina</i>	45
<i>Obr. 4-9 Závislost parametrů průřezu sloupů na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina</i>	46
<i>Obr. 4-10 Závislost parametrů výztuží na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina</i>	46
<i>Obr. 4-11 Zastoupení cen betonu a výztuže k celkové ceně konstrukce – Rozšířená skupina</i>	47
<i>Obr. 4-12 Grafické posouzení sloupů pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů</i>	51
<i>Obr. 4-13 Grafické posouzení nosníků na konstrukční zásady pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů</i>	51
<i>Obr. 4-14 Grafické posouzení nosníků metodou mezních přetvoření pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů</i>	52
<i>Obr. 4-15 Grafické posouzení sloupů pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů</i>	53
<i>Obr. 4-16 Grafické posouzení nosníků na konstrukční zásady pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů</i>	54
<i>Obr. 4-17 Grafické posouzení nosníků metodou mezních přetvoření pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů</i>	54
<i>Obr. 4-18 Pareto povrch pro závislost ceny na průhybu pro Rozšířenou skupinu parametrizace</i>	58
<i>Obr. 4-19 Rozdělení Pareto povrchu do 4 clusterů na základě podobnosti vstupních parametrů</i>	60
<i>Obr. 4-20 Rozdělení Pareto povrchu do 2 clusterů na základě podobnosti vstupních parametrů</i>	60
<i>Obr. 4-21 Normalizované hodnoty vstupů a jejich průměry pro 4 clusterly – podobnost vstupů</i>	61
<i>Obr. 4-22 Normalizované hodnoty vstupů a jejich průměry pro 2 clusterly – podobnost vstupů</i>	61
<i>Obr. 4-23 Rozdělení Pareto povrchu do 4 clusterů na základě podobnosti výstupů (cena, průhyb)</i>	62
<i>Obr. 4-24 Rozdělení Pareto povrchu do 2 clusterů na základě podobnosti výstupů</i>	62
<i>Obr. 4-25 Normalizované hodnoty vstupů pro 4 clusterly – podobnost výstupů</i>	63
<i>Obr. 4-26 Normalizované hodnoty vstupů pro 2 clusterly – podobnost výstupů</i>	63

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Výpis zatěžovacích stavů pro původní model</i>	17
<i>Tab. 2-2 Výpis kombinací pro původní model</i>	18
<i>Tab. 2-3 Vlastnosti materiálů pro původní model</i>	18
<i>Tab. 2-4 Výpis zatěžovacích stavů pro optimalizační modely</i>	20
<i>Tab. 2-5 Vlastnosti nově použitých materiálů podle evropských norem</i>	22
<i>Tab. 2-6 Sada uvažovaných parametrů v modelu pro optimalizaci</i>	23
<i>Tab. 3-1 Použité výstupní parametry</i>	32
<i>Tab. 3-2 Použití parametrů v uvažovaných skupinách</i>	33
<i>Tab. 3-3 Použití posudků v uvažovaných skupinách</i>	33
<i>Tab. 3-4 Meze a kroky vstupních parametrů</i>	34
<i>Tab. 3-5 Proměnné v nastavení optimalizační metody</i>	37
<i>Tab. 4-1 Časová analýza optimalizace</i>	38
<i>Tab. 4-2 Hodnoty vstupních parametrů a cílové funkce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrizace</i>	40
<i>Tab. 4-3 Posouzení optim na prvních třech teplotních hladinách Rozšířená skupina parametrů</i>	44
<i>Tab. 4-4 Hodnoty parametrů průřezu nejlepších řešení poslední populace optimalizace Rozšířené skupiny parametrů</i>	44
<i>Tab. 4-5 Hodnoty parametrů vyztužení nejlepších řešení poslední populace optimalizace Rozšířené skupiny parametrů</i>	45
<i>Tab. 4-6 Hodnoty parametrů průřezu nejlepších řešení – skupina Rozšířená původní</i>	48
<i>Tab. 4-7 Hodnoty parametrů vyztužení vybraná řešení – skupina Rozšířená původní</i>	48
<i>Tab. 4-8 Průměrné časy řešení pro vybrané skupiny parametrizace</i>	49
<i>Tab. 4-9 Porovnání optim vybraných skupiny parametrizace</i>	49
<i>Tab. 4-10 Nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrizace pro kontrolu modelu</i>	50
<i>Tab. 4-11 Nejlepší řešení Základní skupiny parametrizace pro kontrolu modelu</i>	53
<i>Tab. 4-12 Celkové kvantitativní hodnoty materiálů a ceny původních modelů v SEN</i>	55
<i>Tab. 4-13 Porovnání optim s původní cenou pro Základní skupinu parametrizace</i>	56
<i>Tab. 4-14 Porovnání optim s původní cenou pro Rozšířenou skupinu parametrizace</i>	56
<i>Tab. 4-15 Porovnání optim s původní cenou pro skupinu parametrizace Rozšířená původní</i>	56
<i>Tab. 4-16 Hodnoty parametrů průřezu pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů</i>	58
<i>Tab. 4-17 Hodnoty parametrů vyztužení pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů</i>	59

1 ÚVOD

Do stavebnictví téměř ve všech jeho podobách se negativně promítá celosvětová ekonomická krize, kterou zjevně alespoň v Evropě čeká v nejbližších letech další kolo. Investice státních i soukromých sektorů do oprav infrastruktury či nové výstavby jsou tím pádem omezeny. Navíc při výběrových řízeních na stavební zakázku hrají prim nejlevnější podané nabídky, které často vyřachují ze hry menší stavební firmy, které by ale ve finále provedly zakázku mnohem kvalitněji. S pojmem ekonomie staveb souvisí nejen spotřeba materiálu, ale i doprava, čas a v neposlední řadě pracnost.

Během návrhu jakékoliv konstrukce je již dnes běžnou a nutnou praxí uvažovat i ekologické aspekty. Čím dál tím více je kladen důraz na pojmy jako výroba materiálů, produkce škodlivin, životnost, tepelná pasivita, okolí stavby nebo šetrná likvidace.

V předešlých odstavcích je zmíněno jen pár důvodů, proč se vůbec optimalizací stavebních konstrukcí zabývat a to nejlépe již při jejich návrhu.

1.1 Motivace

Optimalizace železobetonových konstrukcí je známá již několik desetiletí, jak je možné se přesvědčit nejen v následujícím Historickém přehledu. V praxi je ale proces optimalizace poměrně mladšího data a často se nejedná o optimalizaci konstrukce jako celku, nýbrž jen jejich jednotlivých částí, jako jsou například nosníky, sloupy nebo panely. Navíc v inženýrském životě se s optimalizací nejvíce setkáme u prefabrikovaných konstrukcí, respektive prefabrikovaných komponentů, ze kterých se stavba skládá. Zde jde o přímou analogii ke strojírenskému průmyslu, kdy je optimalizována hromadná výroba součástek. Když už jde o optimalizaci většího stavebního celku vyrobeného in-situ, jako jsou rámy, skelety či stěnové konstrukce, děje se tak z valné většiny projektů na akademickém poli.

Na tuto situaci má vliv několik aspektů. Jedním z těch hlavních je používání poměrně složitých matematických vztahů a algoritmů ve spolupráci s chybějícím podpůrným softwarovým nástrojem pro obecnou optimalizaci pro projektanty. Dnešní statické softwary nabízejí povětšinou jen autodesign, tedy automatický nástroj vybírající vhodné profily či skladby, který ovšem nedává spolehlivé výsledky při optimalizaci staticky neurčitých konstrukcí. Navíc v praxi bývají návrh a dimenzace chybně vnímány jen jako výpočty s následným posouzením tak, aby vše vyhovovalo předepsaným normám. Dalším problémem je výpočetní náročnost optimalizačních problémů větších konstrukcí. Ovšem tento problém se zdá být postupně překlenut díky stále se zvyšujícím výkonům výpočetní techniky jak pro domácí, tak i pro komerční účely.

1.2 Historický přehled

V této části bude představeno několik prací dřívějšího data z oblasti optimalizací železobetonových konstrukcí, potažmo železobetonových ráků, které by dle autorových nejlepších znalostí měly být zmíněny.

Pro mnohé stavební konstrukce, které jsou z jednoho určitého materiálu (ocel, dřevo, sklo), se obvykle optimalizuje celková hmotnost konstrukce. To ovšem neplatí pro železobetonové konstrukce, které se skládají ze dvou a více materiálů rozdílných mechanických vlastností a které navíc při výstavbě in-situ vyžadují bednění. Což dává dohromady multikriteriální optimalizaci minimálně o třech položkách. Abychom se více kritériím vyhnuli a úlohy výpočetně zjednodušili, lze hmotnosti nahradit jedním parametrem. Výzkumy a zkušenost ukazují, že oním vhodným parametrem je celková cena konstrukce, skládající se z dílčích cen jednotlivých materiálů a prací. Sarma a Adeli ve svém příspěvku (1) sumarizovali publikované a významné optimalizace z hlediska celkových nákladů na konstrukce. Ke každé kategorii železobetonových konstrukcí (nosníky, sloupy, desky, rámy, vodní nádrže atd.) byly uvedeny obecné rovnice ceny, jejichž formulace lze s úspěchem využít i v dnešní době. Konkrétně pro rákové konstrukce může být rovnice celkové ceny konstrukce zapsána následovně:

$$C_o = C_m + C_{FB} + C_{TR} + C_S + C_{CD} + C_E$$

Kde C_m , C_{FB} , C_{TR} , C_S , C_{CD} a C_E jsou ceny materiálů – beton, bednění, výztuž eventuálně předpínací výztuž nebo vlákna (materials), výroby (fabrication), dopravy (transport), spodní stavby – základy (substructure), obložení (cladding) a postavení (errection).

Ve spoustě výzkumů, které se zabývaly optimalizací kolem šedesátých až osmdesátých let, se uvažovalo spojitě rozložení proměnných, které do procesu vstupovaly. V praktických úlohách se ale ukazuje, že proměnné (dimenze betonových prvků, průměry výztuží) jsou diskrétní a mají praktická a normativní omezení, na což poukazují pánové Choi a Kwak ve své práci (2). Svá tvrzení opírají mimo jiné o statistické tabulky průřezů sloupů a nosníků, které obsahují data ze třinácti reálných existujících budov Obr. 1-1.

H \ B	20	21~24	25	26~29	30	31~34	35	36~39	40	41~44	45
120											
119~111											
110											
109~101											
100											
99~91											
90											
89~81											
80											
79~71											
70											
69~61											
60											
59~51											
50											
49~41											
40											
39~31											
30											

H \ B	30	31~39	40	41~49	50	51~59	60	61~69	70
100									
99~91									
90									
89~81									
80									
79~71									
70									
69~61									
60									
59~51									
50									
49~41									
40									
39~31									
30									

Obr. 1-1 Tabulka výskytu použitých rozměrů nosníků (obrázek vlevo) a sloupů (obrázek vpravo) pro třináct reálných budov, převzato z (2)

Díky těmto datům a podmínkám daných příslušným předpisem či normou lze vytvořit databázi průřezů splňujících určité požadavky. Součástí článku jsou i heuristické algoritmy pro návrh sloupů a nosníků, které využívají právě danou databázi.

Pro optimalizaci jako proces existuje mnoho optimalizačních metod. Vzhledem k povaze úloh návrhu železobetonových konstrukcí, které se vyznačují diskrétními proměnnými, nespojitými cílovými funkcemi a vysokou nelinearitou jsou výhodné genetické algoritmy (3). Ty se řídí podle teze přirozeného výběru, kde přežívají jen nejlépe přizpůsobení jedinci populace. Schopnost přežití a reprodukce je dána silou jedince (hodnotou fitness). K nalezení nejsilnějšího se využívá nejen reprodukce dvou silných jedinců, takzvaného křížení, ale i mutací. Kupříkladu Dr. Coello ve svém příspěvku (4) porovnává modifikace genetického algoritmu pro návrh průřezu železobetonových nosníků. Jedná se o jeden z prvních příspěvků optimalizace železobetonu, kde byl použitý výše zmíněný algoritmus, ovšem některé vstupní parametry (plocha výztuže) byly spojitého charakteru.

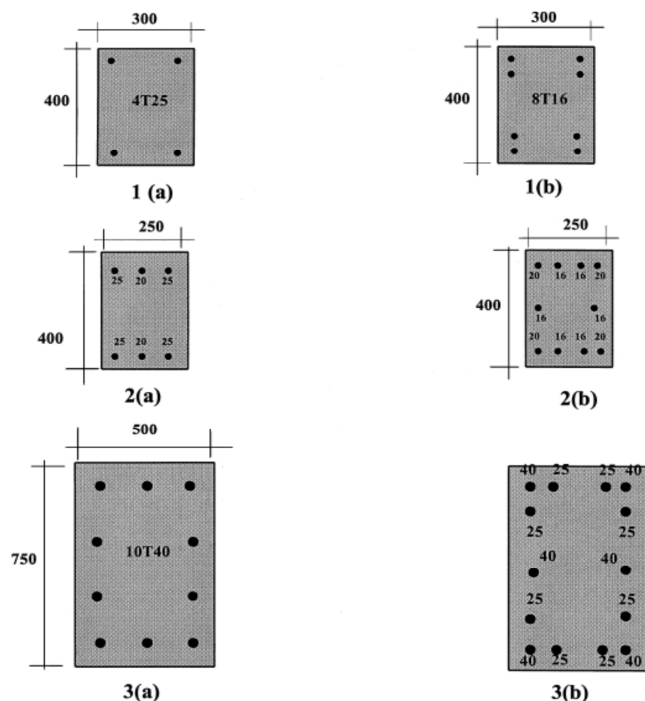
Camp a kol. v (5) nebo profesor Lee v (6) dále používají jednoduché genetické algoritmy i jejich pozměněné verze. V první publikaci je algoritmus využit k optimalizaci železobetonových referenčních rámců s uvážením kombinací gravitačních a bočních sil. Druhý článek pojednává o návrhu železobetonových rámců na únosnost a spolehlivost podle amerických betonářských norem (American concrete institute building code and comentary).

Balling a spol. se v (7) zabývají návrhem 3D rámců. Používají dvou původních a jedné vynalezené zjednodušené návrhové metody. První metoda, v té době tradiční, při optimálním návrhu konstrukce uvažuje kromě parametrů výšky a šířky průřezu pouze s parametrem A, který zastupuje počet, průměr a rozmístění výztužných prutů. Oproti tomu stojí tzv. „ multilevel “ metoda, která naopak počítá se zmíněnými proměnnými pro výztuž jako se vstupními parametry. Zjednodušená metoda měla svůj základ v tradičním přístupu a s pomocí implementované analýzy jednotlivých prvků se ukázalo, že nabízí podobné výsledky jako tradiční metoda, ovšem se značnou úsporou času. Multilevel metoda vykazovala vyšší úsporu nákladů ovšem za cenu podstatně většího výpočetního času.

Rafiq a Southcombe se zaměřují ve svém díle (8) na využití genetického algoritmu pro optimální návrh vyztužení sloupů, které jsou namáhány dvouosým ohybovým momentem a normálovou silou. Výsledky nejen na 3D interakčních diagramech ukazují, že díky návrhu rozmístění výztuže pomocí genetického algoritmu lze dosáhnout větších únosností a tím i ekonomičtějšího návrhu, než pomocí jednoduché metody uváděné v britské národní normě BS8110, dnes nahrazené Eurokódy (Obr. 1-2).

Další aplikace genetického algoritmu je popsána v (9) – Raajev, Krishnamoorthy. Ovšem zde již nejsou optimalizovány jen jednotlivé prvky, ale proces je aplikován na 2D rámech. Důraz je kladen na reálné a obecně dané podmínky při výstavbě konstrukcí.

Uspokojivých optimálních návrhů železobetonových konstrukcí lze dosáhnout i jinými metodami kromě genetických algoritmů, které jsou ale také založené na přírodních principech. Těmito jsou Evoluční strategie (10), které byly použity například v článku (11) – Rizzo k návrhu železobetonového rámu.



Obr. 1-2 Vyztužení průřezu podle britské národní normy (vlevo) a optimalizované vyztužení (vpravo), převzato z (8).

Kritéria optimality byly využity i k optimálnímu návrhu 3D železobetonových konstrukcí v publikaci (12) – Fadaee, Grierson. Zmíněná práce obsahuje mimo jiné i citlivostní analýzu.

Do popředí zájmů se zhruba od devadesátých let minulého století dostávají spřažené ocelo-betonové konstrukce. Navrhováním kratších sloupů betonových a kompozitních, složených z ocelového profilu, betonu a výztuže, geometricky obecných průřezů se zabývali vědci kolem S. F. Chena v (13).

V optimalizaci železobetonu by se měly uvažovat nejen počáteční náklady, ale i náklady během životního cyklu konstrukce. Na druhý zmíněný úhel pohledu se zaměřili F. Biondini a D. M. Frangopol ve své práci (14). Pro optimální návrh průřezů uvažovali s umístěním konstrukce v agresivním prostředí a jeho vlivem na spolehlivost konstrukce v průběhu jejího života. Použité optimalizační metody byly ale deterministické oproti výše zmíněným vesměs heuristickým přístupům.

Když se nepoužije ceny nebo jiné podobné cílové funkce pro jednokriteriální optimalizaci, je nutné provádět optimalizaci multikriteriální. Na poli železobetonových konstrukcí se jako jedni z prvních o vícekriteriální optimalizaci pokusili Řekové Koumoussis a kol. (15). Na optimalizaci použili heuristického postupu a pomocí váhových funkcí zkombinovali tři kritéria: minimální váhu použité výztuže, maximální jednodušnost výztuže v prvku a minimální počet prutů v prvcích. O větší aplikovatelnost jejich práce se přičinili také umožněním grafických výstupů v DXF¹ formátu, který podporují například CAD systémy.

¹ DXF - (Drawing Exchange Format) je CAD formát vyvinutý firmou Autodesk, umožňující výměnu dat mezi AutoCADem a dalšími programy (31)

2 MODELKY

2.1 Železobetonový skelet

Objekt řešený v této práci je železobetonový skelet postavený za účelem bytového domu. Stavba byla dokončena v roce 2005 a nachází se v části Prahy 6, konkrétně v lokalitě Veleslavín v ulici Pod novým lesem 137/52. Dům byl postaven do proluky k jednomu již stávajícímu objektu. Objekt má jedno podzemní patro, kde se nacházejí garážová stání a pět nadzemních podlaží, kde se nalézají byty. Vzhledem ke svažitému terénu je i přízemní patro částečně pod úrovní terénu. Pomyslný kvádr, kterým bychom mohli ohraničit objekt, by měl rozměry 17,4 x 35,8 x 20,1 m (šířka x délka x výška).

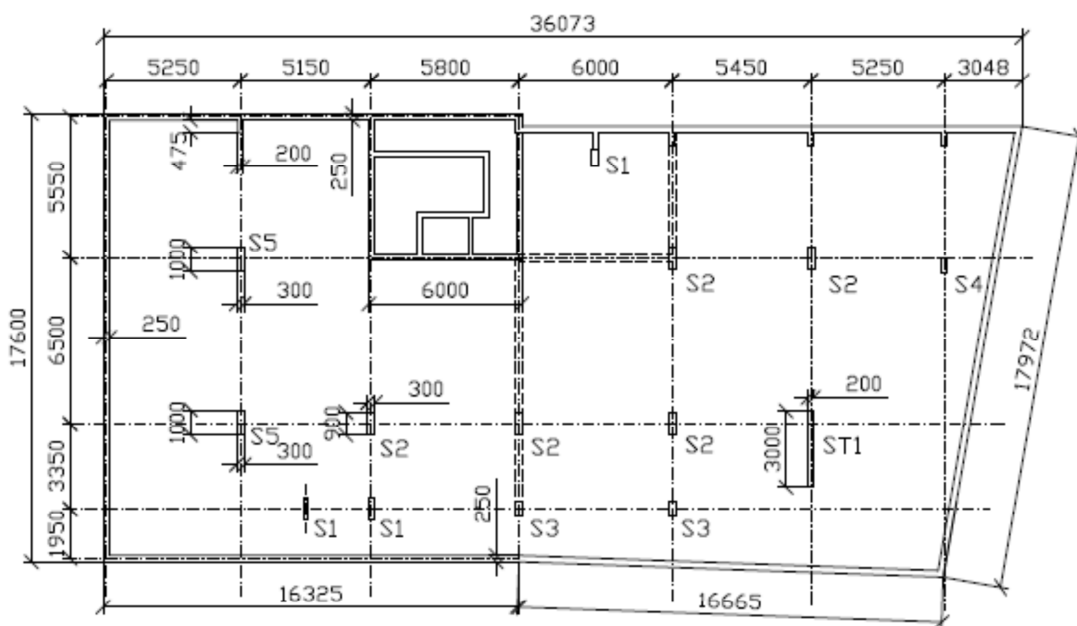
Půdorysně je podzemní podlaží tvaru lichoběžníku s výměrou přibližně 605 m². V tomto podlaží tvoří sloupy relativně pravidelnou síť s oky 5,15 x 3,35 m až 6,00 x 6,50 m Obr. 2-1. Dalšími prutovými prvky jsou průvlaky ve střední části stropu, které pomáhají roznést zatížení, ztužují konstrukci stropu a fungují pozitivně také proti protlačení desky. Podzemní podlaží je kromě prutových prvků tvořeno ještě obvodovou železobetonovou zdí, která částečně zasahuje i do dalšího patra. Dále je v prostoru vertikálních komunikací železobetonové stěnové ztužující jádro, které prochází celým objektem.

Přízemí ustupuje oproti spodnímu patru o jednu řadu sloupů a půdorysně je již rektangulární s výměrou zhruba 450 m². Síť sloupů s drobnými výjimkami navazuje na síť o patro níže. Jádrové stěny zůstávají a jsou doplněny dalšími železobetonovými stěnami určující horizontální komunikaci v okolí jádra. Obvodová zeď již chybí z té strany, kde půdorys patra ustoupil vzhledem k podlaží s garážemi. Průvlaky ve střední části objektu v nadzemních podlažích již nefigurují, ovšem přibýly ztužující žebra na okrajích desky, kde není obvodová zeď.

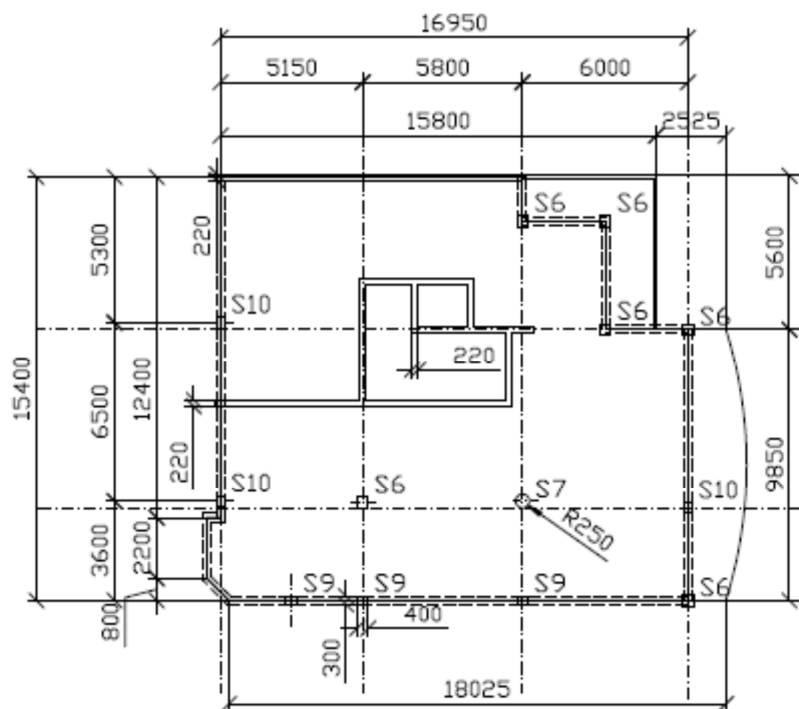
Půdorys nadzemních pater opět ustoupil o jednu řadu sloupů ve stejném směru, jako tomu bylo u přízemí. Plocha pater se zmenšila i díky ústupu konstrukce přibližně o 1,5 m z opačné strany, než je přiléhající stavba. Železobetonové nosné stěny vesměs kopírují geometrii z přízemí. Ztužující žebra na deskách jsou na všech volných okrajích, což znamená všude, kromě místa přilehajícího k vedlejšímu objektu. Ve třetím a čtvrtém nadzemním patře se navíc objevují vykonzolované konstrukce balkonů a to jak na jižní tak i severní straně objektu. Na jižní straně jsou na zmíněných patrech menší obdélníkové balkónky, zatím co na protější straně je v obou patrech obloukový balkon spolu s balkónem půdorysu tvaru písmene L Obr. 2-2.

Posledním páté patro je se svými půdorysnými rozměry 11,8 x 10,95 m nejmenší obytné patro objektu. Ze severní strany ustupuje patro o 6,0 m a ze strany východní pak o 3,6 m. Sloupy podepírají strop již jen po obvodu, samozřejmě opět kromě strany původní zástavby, kde je železobetonová stěna. Naopak jádrové a jím přiléhající stěny zůstávají stejné jako v předešlých patrech. Opět pro ztužení jsou kolem stropu žebra.

Nad konstrukcí posledního obytného patra jsou pouze jádrové stěny a jimi ohraničený prostor již slouží jen jako strojovna.



Obr. 2-1 Skica podzemního patra původního projektu



Obr. 2-2 Skica druhého a třetího nadzemního podlaží

2.2 Původní model

Původní statický model byl vytvořen v programu FEAT 2000. Na území Slovenské a České republiky to byl v době vytvoření modelu nejrozšířenější software pro projektanty statiky. Na přelomu tisíciletí již bylo možné používat sjednocené nadnárodní normy tzv. Eurokódy, ale původně byl projekt navrhnut a postaven podle bývalých ČSN norem.

2.2.1 Zatížení

Zatěžovací stavy použité v původním modelu konstrukce je možné vidět na následujícím výpisu.

Výpis zatěžovacích stavů		
Jméno	Typ zatížení	Působení
Vlastní tíha	Statické zatížení	Permanentní
Stálé	Statické zatížení	Dlouhodobé
Užitné	Statické zatížení	Krátkodobé
Vztlak	Statické zatížení	Krátkodobé
Vítr	Statické zatížení	Krátkodobé

Tab. 2-1 Výpis zatěžovacích stavů pro původní model

Vlastní tíha konstrukce byla uvažována dle navržených prvků a počítána automaticky na základě vlastností použitých materiálů (objemová hmotnost - viz podkapitola Materiály a prvky). Tíhové zrychlení se zaokrouhlilo na dvě desetinná místa na hodnotu $9,81 \text{ m/s}^2$. Stálé zatížení působilo liniově, plošně i osamělou silou. V obvodové části konstrukce na výztužná žebra působilo liniově od výplňového zdiva. Na stropních deskách a balkónech působilo spojitě a bylo vyvozováno vlastní hmotností podlah. Bodová síla pak zastupovala nosný dělicí prvek uprostřed oválného balkónu. Užitné zatížení působilo plošně a zastupovalo polohu osob a přemístitelných objektů v nadzemních podlažích, respektive polohu vozidel v podzemním podlaží. Vztlak plošně nahrazuje působení spodní vody. Zatížení větrem bylo aplikováno opět na výztužná žebra a to ve směru jižním a severním a počítáno bylo pouze s tlakovým zatížením. Další z klimatických zatížení a to zatížení sněhem nebylo uvažováno. Důvody k zanedbání tohoto zatížení byly hlavně dva. Prvním byl oválný téměř půlkruhový tvar střešní konstrukce. Dalším byl fakt, že mnohem větších hodnot nabývá užitné zatížení, než právě zatížení sněhem. Tato dvě posledně jmenovaná zatížení jsou totiž výběrová. Nemohou tedy být vzhledem k plochým pochozím typům konstrukcí a směru působení brány do kombinace společně, ale zatížení s vyšší hodnotou může reprezentovat obě zatížení.

Samozřejmě pro návrh a zjištění účinků nelze uvažovat zatížení pouze jednotlivě, ale je nutné je vhodně prokombinovat. V následující tabulce jsou uvedeny kombinace zatížení spolu s jejich obsahem použité v původním modelu skutečného provedení.

Výpis kombinací								
Jméno	Zat. stav	Souč.	Jméno	Zat. stav	Souč.	Jméno	Zat. stav	Souč.
KZS1	Vl.tíha	1,10	KZS2	Vl. tíha	1,10	KZS3	Vl. tíha	1,00
	Stálé	1,10		Stálé	1,10		Stálé	1,10
	Užitné	1,40		Užitné	1,40		Užitné	1,40
	Vítr	1,20		Vztlak	1,10		Vztlak	1,10
							Vítr	1,20

Tab. 2-2 Výpis kombinací pro původní model

2.2.1 Materiály a prvky

Vzhledem k tomu, že byl původní projekt vypracován podle ČSN norem, tak tomu odpovídají nejen součinitele pro zatěžovací stavy v kombinacích, ale i použité materiály. V modelu je hlavním materiálem beton B35, jehož charakteristiky se využijí především k určení zatížení vlastní tíhou a k následnému návrhu výztuže. Objemová hmotnost betonu je uvažována 2500 kg/m^3 . Již program FEAT 2000 nabízel možnost návrhu nutné plochy výztuže a to jak pro pruty, tak i pro plošné prvky. Pro vyztužení prutů se použila betonářská ocel 10 505(R) a pro plošné prvky KARI (W), které jsou si svými parametry téměř totožné. Základní mechanické vlastnosti použitých materiálů jsou následující.

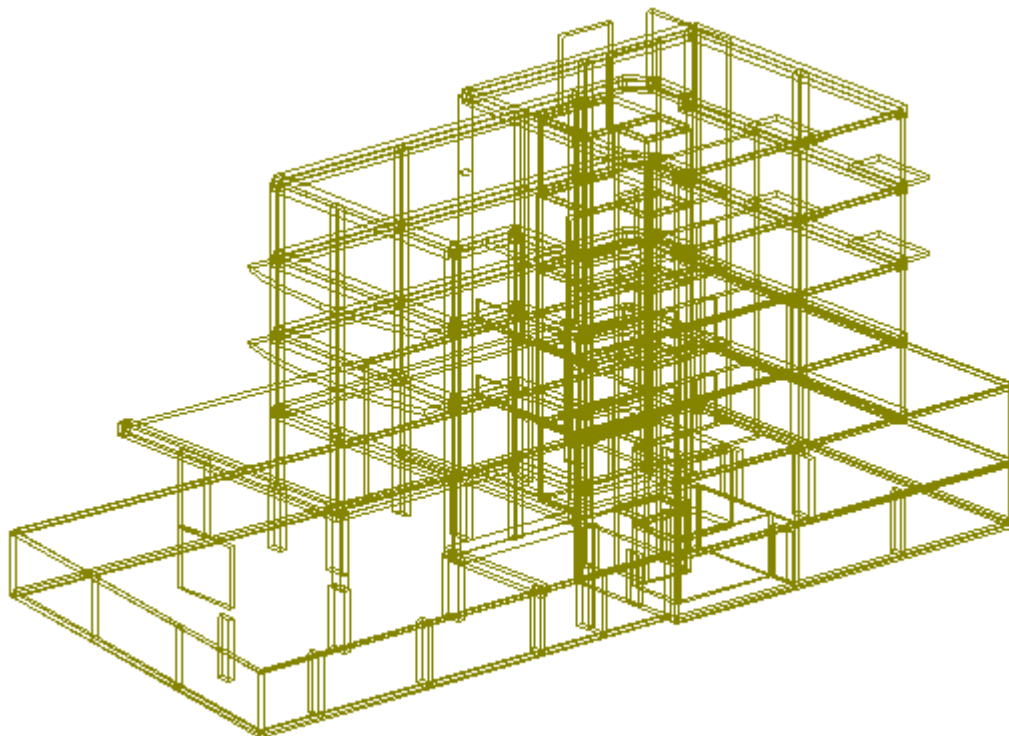
Vlastnosti dané třídy betonu					
Třída	Normová pevnost [MPa]		Výpočtová pevnost [MPa]		Základní modul pružnosti [MPa]
	v tlaku	v tahu	v tlaku	v tahu	
B35	25,50	1,95	19,50	1,30	34 500

Vlastnosti použitých ocelí					
Značka	Typ	Mez kluzu (0,2) [MPa]	Výp. pevnost [MPa]	Povrch	Modul pružnosti [MPa]
10 505	R	490,0	450,0	Žebírkovaný	210 000
KARI	W	490,0	450,0	Žebírkovaný	210 000

Tab. 2-3 Vlastnosti materiálů pro původní model

Jak již bylo uvedeno, objekt je železobetonový skelet doplněný ztužujícími žebry na okrajích desek a průvlaky v podzemním podlaží. Stěny jsou v okolí vertikální komunikace, taktéž tvoří obvodové zdi, ale jsou i jako zábradlí balkonů. Konkrétně bylo použito obdélníkových průřezů 300x400mm až 900x420mm a kruhového průřezu

o průměru 500mm pro prutové prvky. Plošné prvky měly tloušťky od 100 mm pro zábradlí balkónu až po 300mm, což je tloušťka základové desky. Přesný výpis prvků použitých v původním modelu se nalézá v příloze A na konci této práce. Objem betonu, který by byl spotřebován na prutové prvky, je 86,72 m³. Plošné prvky měly objem 821,71 m³. Celkový objem použitého betonu podle původního modelu tedy činí 917 m³.



Obr. 2-3 Obrysový model původního provedení v programu FEAT 2000

2.3 Modely pro optimalizaci

Z důvodů využití optimalizačního nástroje a možnosti aplikování dnes platných evropských norem bylo nutné vytvořit model, respektive modely ve statickém programu Scia Engineer. Přesněji byla použita verze programu Scia Engineer 2011.0, dále již jen SEN. Původní model ovšem nebylo možné otevřít se všemi entitami v novém programu, i když oba použité nástroje jsou v jakési společné vývojové linii. Při modelování v novém prostředí se nabízelo využití ve své době novinky v předchozím zmíněném softwaru FEAT 2000. Ten umožňuje mimo jiné i export modelu do CAD programů. Již namodelovaná konstrukce se tedy bez zatížení přenesla jako čárové schéma ve formátu DXF do CAD programu a odtud se importovala do nového projektu v SEN. Obecně je nutné dát si pozor při pozdější modelaci v programu SEN na geometrické odchylky vzniklé převodem a také na to, aby byly použity pouze čáry, které představovaly osy stavebních prvků. Při nedůkladném přístupu v tomto kroku se mohlo zadání konstrukce již od prvopočátku razantně změnit a k výsledkům bychom se nedopracovali nebo by pro porovnání nebyly relevantní. Jednou z možností, jak druhému problému předejít je vyfiltrování nepotřebných čar při načítání nebo přímo v některém z CAD programů.

Proč se v názvu podkapitoly objevuje množné číslo, si následně vysvětlíme. Pro porovnání optimalizovaného objektu s původním je nutné vytvořit minimálně dva modely. Budou se totiž porovnávat parametry závislé na velikosti prvků a vyztužení dané příjím počtem určitých profilů. Z tohoto důvodu bude jeden model původního provedení, který bude reflektovat originální návrh podle původních ČSN norem. Dalším modelem bude parametrizovaný model v programu SEN, který bude optimalizován, ale stále bude v souladu s dnes již neplatnými národními normami. Proces parametrizace bude vysvětlen v dalších kapitolách.

Tím ale výčet modelů nekončí. Pro potřeby dneška a pro ukázkou rozdílů v návrhu mezi starými ČSN normami a dnes platnými Eurokódy bude vytvořena další sada. V té bude opět figurovat původní návrh, kde budou pokud možno zachovány dimenze prvků, a vyztužení se provede automatickým návrhem, který je součástí softwaru SEN. S tímto modelem se pak budou porovnávat modely s různým stupněm parametrizace. Lze tím následně zjistit, jakých úspor dosáhneme různými stupni parametrizace a zda je vzhledem k výpočetní a časové náročnosti výhodné zvyšovat počet parametrů, eventuálně do jaké míry. Zároveň bude možné analyzovat závislosti parametrů na různých výstupních hodnotách. Například závislost hodnoty parametru na průhybu a tím pádem i tuhosti celé konstrukce.

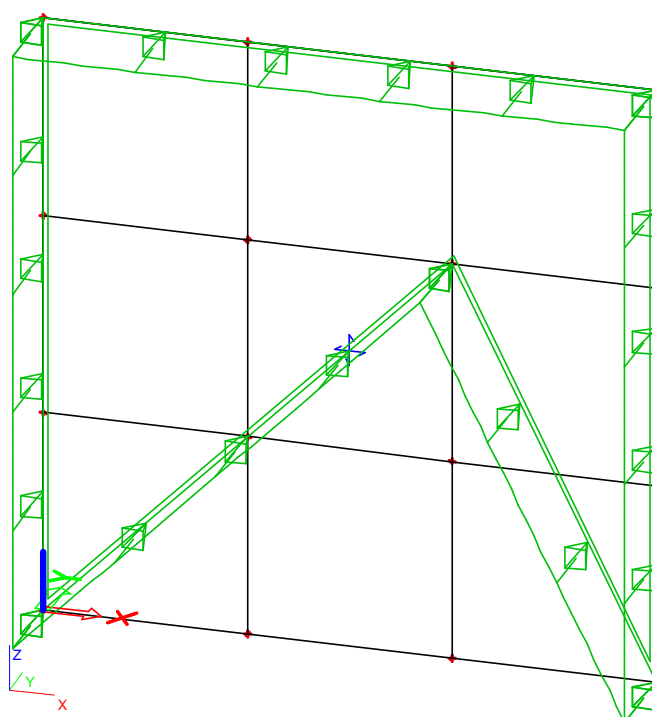
2.3.1 Zatížení a materiály

V prvním modelu v programu SEN se zatížení oproti modelu v programu FEAT 2000 nikterak nezměnilo, neboť má tato sada sloužit pouze jako konfrontace bez zahrnutí dnešních nároků a podmínek. Pro další sady se uvažuje s korekturami, které vznikají především díky přechodu norem, ale také díky různým možnostem softwaru.

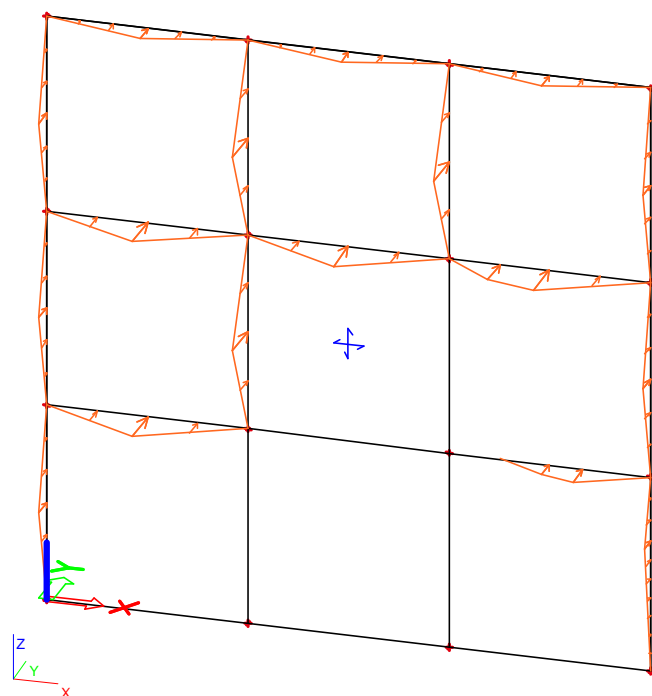
Počet zatěžovacích stavů se zvýšil na osm. Je to z důvodu rozdělení zatížení větrem podle směru působení. Kalkuluje se s čtyřmi směry vanutí větru, vzájemně otočenými o devadesát stupňů. Všechny uvažované zatěžovací stavy jsou přehledně v tabulce Tab. 2-4.

Výpis zatěžovacích stavů			
Jméno	Typ zatížení	Působení	Vztah
Vlastní tíha	Statické zatížení	Permanentní	Standard
Stálé	Statické zatížení	Dlouhodobé	Standard
Užitné	Statické zatížení	Krátkodobé	Standard
Vztlak	Statické zatížení	Krátkodobé	Standard
Vítr směr +x	Statické zatížení	Krátkodobé	Výběrový
Vítr směr -x	Statické zatížení	Krátkodobé	Výběrový
Vítr směr +y	Statické zatížení	Krátkodobé	Výběrový
Vítr směr -y	Statické zatížení	Krátkodobé	Výběrový

Tab. 2-4 Výpis zatěžovacích stavů pro optimalizační modely



Obr. 2-4 Obecné plošné zatížení s využitím zatěžovacího panelu na prutové prvky



Obr. 2-5 Rozpočítané zatížení ze zatěžovacího panelu na prutové prvky

Při zadávání zatížení větrem se může využít tzv. generátoru 3D větru. Tento nástroj umožňuje automatické generování plošného zatížení větrem na základě normových parametrů. V datech o projektu musí být vybrána větrová oblast dle normy. Dále je nutné otevřené části konstrukce obalit zatěžovacími panely a nastavit zde data pro 3D vítr. Na vnějších stěnách a střešních deskách je dále potřeba zaškrtnout položku 3D vítr ve vlastnostech té či oné entity. V nynější verzi SEN navíc musí být konstrukce uzavřená, aby generátor zatížení větrem fungoval. Panely mohou být různých typů podle způsobu uložení od rohů panelu až po obvod panelu a vnitřní nosné prvky. Důležité je přiřadit panelům požadovaný směr a poměr roznosu. Pokud si nejsme jisti, zda námi zadaný typ uložení v kombinaci s roznosem zatížení je vůbec vzhledem ke konstrukci reálný, provedeme kontrolu geometrických dat, kde program vypíše případné nekorektně zadané zatěžovací panely. Aplikované zatížení se poté rozdělí na nosné prvky samo a to buď přesně pomocí FEM, nebo pomocí přibližné metody. Panely je možné použít na jakékoliv plošné zatížení Obr. 2-4 a Obr. 2-5, nejen jako pomůcku při generování 3D větru.

Dnešní statické softwary již celkem tradičně nabízejí implementované různé národní normy. To umožňuje nejen učinit návrh konstrukce podle předpisů dané země, ale například zjednodušuje zadávání zatížení do zatěžovacích stavů a jejich následné kombinace. Kromě kombinací z původního modelu jsou nově vytvořeny kombinace podle Eurokódu pro mezní stav únosnosti a pro mezní stav použitelnosti. Rozdíl v kombinacích původních a nynějších je značný. Původní kombinace byly lineární s ručně nastavenými součiniteli, zatímco ty nově vytvořené mají automaticky vygenerované součinitele z normy. Navíc se kombinace sestávají z dílčích lineárních kombinací a z nich se tvoří obalová křivka pro výsledky. Zvláštností je pak samostatná kombinace pro normově závislé průhyby, ve které se zohledňuje dotvarování a smršťování betonu.

Třída betonu se dle nových norem změnila na C30/37, který se svými parametry nejvíce přibližuje původní třídě betonu B35. Pro výztuž byl zvolen materiál B500B, a to jak pro výztuž prutových prvků, tak i pro vyztužení plošných prvků. Základní charakteristiky nově použitých materiálů jsou následující.

Vlastnosti dané třídy betonu				
Třída	Jedn. hm. [kg/m ³]	Modul pružnosti E [MPa]	Char. válcová pevnost v tlaku [MPa]	Výpočtová pevnost v tlaku [MPa]
C30/37	2 500	32 800	30,00	20,00

Vlastnosti použité oceli				
Označení	Jedn. hm. [kg/m ³]	Modul pružnosti E [MPa]	Char. mez kluzu [MPa]	Výpočtová mez kluzu [MPa]
B 500B	7 850	200 000	500,00	434,80

Tab. 2-5 Vlastnosti nově použitých materiálů podle evropských norem

2.3.2 Parametrizace

Nedílným úkonem, pokud chceme využít optimalizačního nástroje v softwaru SEN, je parametrizace modelu. Jde o definování a přiřazení parametrů v modelu vybraným entitám. Do optimalizace poté vstupují tyto parametry jako proměnné. Parametry mohou být různého typu a zadány mohou být číselně nebo pomocí logický operátorů. Typy mohou být například číslo, součinitel, délka, zatížení, ale i čas, válcovaný průřez, plocha výztuže atd. Vyhodnocením může být přímo hodnota nebo dokonce vzorec. Zároveň již v modelovém prostředí lze parametrům přiřadit meze, čehož může být využito při následném definování okrajových podmínek. Návod, jak je možné postupovat při parametrizaci modelu takřka krok po kroku je popsán v (16). Ve zmíněném příspěvku se jednalo o parametrizaci idealizovaného posledního patra objektu, jež byl vybrán i pro tuto práci.

V našem případě se soustředíme na optimalizaci prutových prvků z důvodů výpočetní náročnosti a individuálních rozlišností jednotlivých desek a stěn. I přes optimalizaci pouze prutových prvků bude do projektu zaneseno relativně větší množství parametrů. Jejich výčet je v tabulce Tab. 2-6 i s počátečními odhadnutými hodnotami.

Popis uvažovaných parametrů v modelu			
Jméno	Typ	Popis	Hodnota [mm]
a_beam	Délka průřezu	Šířka žebra	200
b_beam	Délka průřezu	Výška žebra	200
a_colA	Délka průřezu	1. šířka sloupu sk.A	300
b_colA	Délka průřezu	2. šířka sloupu sk.A	300
a_colB	Délka průřezu	1. šířka sloupu sk.B	400
b_colB	Délka průřezu	2. šířka sloupu sk.B	400
D_beam	Průměr výztuže	Výztuž podélná žebra	20
Dst_beam	Průměr výztuže	Průměr třmínku žebra	12
D_colA	Průměr výztuže	Výztuž podélná sloupy sk.A	20
Dst_colA	Průměr výztuže	Průměr třmínku sloupy sk.A	12
D_colB	Průměr výztuže	Výztuž podélná sloupy sk.B	20
Dst_colB	Průměr výztuže	Průměr třmínku sloupy sk.B	12

Tab. 2-6 Sada uvažovaných parametrů v modelu pro optimalizaci

Všechny parametry ale nebudou v tom kterém případě optimalizace aktivní. Vysvětlení počtu, názvů a typů parametrů si hned osvětlíme. Teoreticky by bylo možné každému prvku přiřadit jednu určitou sadu parametrů, která by jej charakterizovala. Pro jeden prutový prvek, ať už sloup, průvlak nebo ztužující žebro by tedy mohla být jedna unikátní sada. Ta by obsahovala minimálně průměr hlavní výztuže, průměr třmínků, vzdálenost větví třmínků a dva parametry určující geometrii průřezu. Vzhledem

k celkovému počtu prutových prvků, bychom rázem dostali přes šest set parametrů pro prutové prvky! Což je nevhodné nejen vzhledem k výpočtovým nárokům, ale hlavně vůči praxi, kde je snaha o co největší unifikaci z důvodů nezaměnitelnosti a jednoduchosti provedení.

Maximální možný počet aktivních parametrů je tedy pro náš případ dvanáct. Přičemž se uvažuje rozdělení prutových prvků do tří skupin. Sloupy pro první tři patra, sloupy pro druhá tři patra a žebra s průvlaky. Pro každou z těchto skupin jsou dva parametry vyjadřující geometrii průřezu a dva popisující vyztužení.

2.3.1 Posudky a XML soubory

Abychom získali relevantní optimální výsledky, je nutné převést pomocí omezujících podmínek do procesu optimalizace normové požadavky. Pro správný návrh je samozřejmě určující, aby vyhověl těmto požadavkům. Konkrétně půjde o splnění kritéria únosnosti a použitelnosti, pro které byly vytvořeny nové potřebné kombinace zatížení podle dnes platných evropských norem spolu s českým národním dodatkem. Možností posouzení odezvy konstrukce v programu SEN je několik. Ovšem ne všechny typy posudků se hodí pro všechny prvky konstrukce. Základní je rozdělení konstrukcí na plošné a prutové prvky. Rozebereme si tedy možnost posouzení prutových prvků.

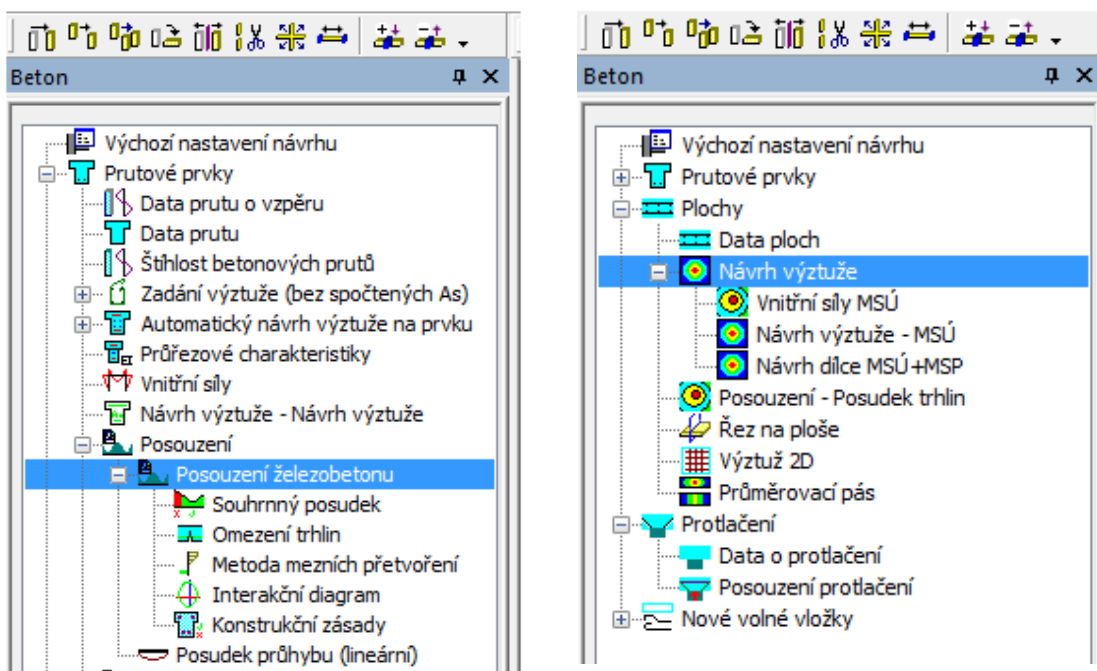
Pouze pro modely, které jsou podle modelu původního provedení, bude výztuž navržena automaticky a nebude podléhat zavedeným parametrům pro optimalizaci. Vzhledem k faktu, že parametrizovaná hlavní podélná výztuž se uvažuje bez krácení a všechny pruty probíhají od podpory k podpoře, tak je žádoucí si i v automatickém návrhu tyto předpoklady zajistit. Odstraníme tím rozdíl v porovnání způsobený různou délkou prutů, která v našem případě parametrizovaná není. Zpětným posouzením automaticky navržené výztuže si bude možné ověřit platnost výsledků.

Typů posouzení prutových prvků v programu SEN je v zásadě pět. Nejprve je vhodné si prvky posoudit z hlediska konstrukčních zásad. Vyvarujeme se tím například návrhu příliš velkých průměrů, malých příčných či podélných osových vzdáleností třmíneků apod. Toto posouzení ale samo o sobě nezaručuje únosnost konstrukce. Dalšími posouzeními, která by se dala dát pod název posouzení pro mezní stav únosnosti, je posouzení metodou mezních přetvoření a interakční diagram. Další dva posudky se užijí pro mezní stav použitelnosti. Jde o posudek omezení trhlin a posudek lineárních průhybů. Můžeme provést jednotlivé posudky a všechny jejich výsledné hodnoty porovnat s jednotkovým posudkem, kdy je konstrukce či prvek právě sto procentně využit. Lze ale také využít možnost souhrnného posudku, který umožňuje provést posouzení pro zmiňované skupiny posudků kromě posudku průhybu, který je nutné případně provést zvlášť. Jediné menší úskalí, které se zde může objevit, je správné zadání kombinací pro tu kterou skupinu posudků. Možností, jak toto úskalí obejít, je vytvořit si v programu skupinu výsledků, kam se zahrnou kombinace pro všechny mezní stavy únosnosti i použitelnosti.

Plošné konstrukce v modelu původního provedení budou vyztuženy automaticky pomocí sítí a to na oba výše zmíněné mezní stavy. Další možností jak vyztužit plošné prvky je zadat uživatelskou výztuž. Ovšem pro plošné konstrukce neexistuje souhrnný posudek, jako tomu je u prutových prvků. Lze si ale zkontrolovat uživatelsky zadanou výztuž pomocí nutné přídatné plochy výztuže. Je-li tato plocha minimální nebo nulová, lze konstatovat, že uživatelem zadaná výztuž pro plošné prvky je vyhovující. Oblasti

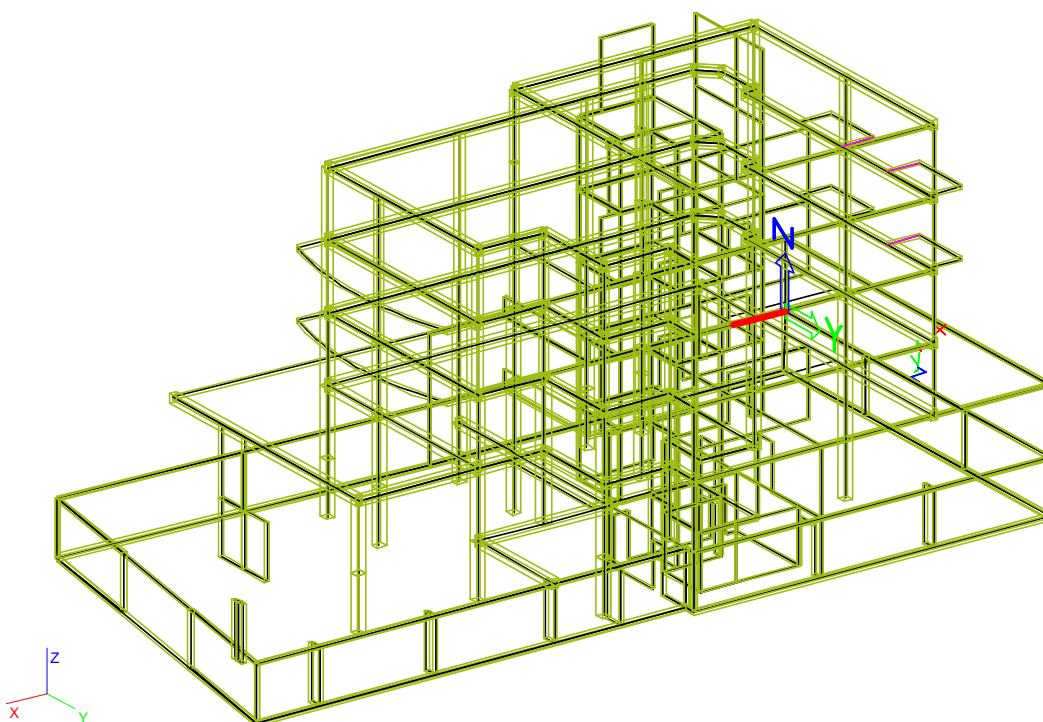
s menší nenulovou hodnotou v řádech desítek mm^2 se z praktického hlediska mohou uvažovat jako plochy s dodatečně přidanou lokální výztuží.

Samostatná posouzení pro plošné prvky jsou dvě. Jedním z nich je posouzení trhlin, které jako výstup nabízí buď šířku trhliny, nebo přímo hodnotu posudku. Druhým je pak posouzení protlačení desky, kde je výstupem pouze hodnota posudku. Umístění ve stromu nabídek a podoba ikon, pomocí kterých lze v programu SEN výše zmíněné posudky vyvolat, je na obrázku Obr. 2-6.



Obr. 2-6 Umístění a podoba ikon pro posouzení železobetonu v klasické stromové nabídce

Veškeré výstupy a informace o projektu lze přehledně vytisknout do dokumentu. Buď klasického, jehož součástí mohou být i například obrázky, anebo do takzvaného XML dokumentu. Druhý jmenovaný bude v práci využit, jelikož je to formát dokumentu, pomocí kterého bude optimalizační aplikace komunikovat s modelem. Vygenerované dokumenty budou dva. Jeden se vstupními proměnnými, čímž jsou parametry, druhý obsahující výstupní data, která se použijí pro definování cílové funkce nebo omezujících podmínek. Výstupní data se skládají z výkazu materiálu, deformací a posudků. První dvě základní složky budou ve výstupech vždy. Další výstupy, jako je souhrnný posudek se v dokumentu objeví v závislosti na stupni parametrizace. Respektive mohou tam být také vždy, ale pak se musí v optimalizační aplikaci označit jako neaktivní.



Obr. 2-7 Obrysový model objektu v programu Scia Engineer 2011

3 OPTIMALIZACE

Ve stavební praxi je pojem optimalizace v pravém slova smyslu znám již v řádu desetiletí. Nejinak tomu je i u železobetonu. Proces optimalizace je doposud využíván hlavně v prefabrikaci železobetonových výrobků. Dříve optimalizaci v této části výroby nahrávalo všeobecně rozšířené nesprávné podvědomí, že optimalizace se ve větší míře vyplatí pouze u sériově vyráběných komponentů. Ovšem dnešní nároky investorů, architektů a v neposlední řadě státních vykonavatelů na výstavbu monolitických staveb dávají tušit, že vysoké uplatnění optimalizace naleznou i projekty postavené in-situ. Problémem ale zatím zůstává dostupnost a náročnost optimalizačních nástrojů, kterých by mohli využívat běžní projektanti. Většina z nich totiž logicky nejsou absolventi matematických či IT škol a oborů. Pokažd' si projektant neobjedná specialistu, nezbyvá mu než využít svých zkušeností tak, aby byl jeho návrh ekonomický a tím pádem i konkurence schopný. Nejběžnějšími nástroji projektantů při navrhování staveb jsou dnes kromě kreslicích programů hlavně statické softwary. Optimalizace v nich bývá pouze pomocí autodesignu, který však není všemocný a univerzální.

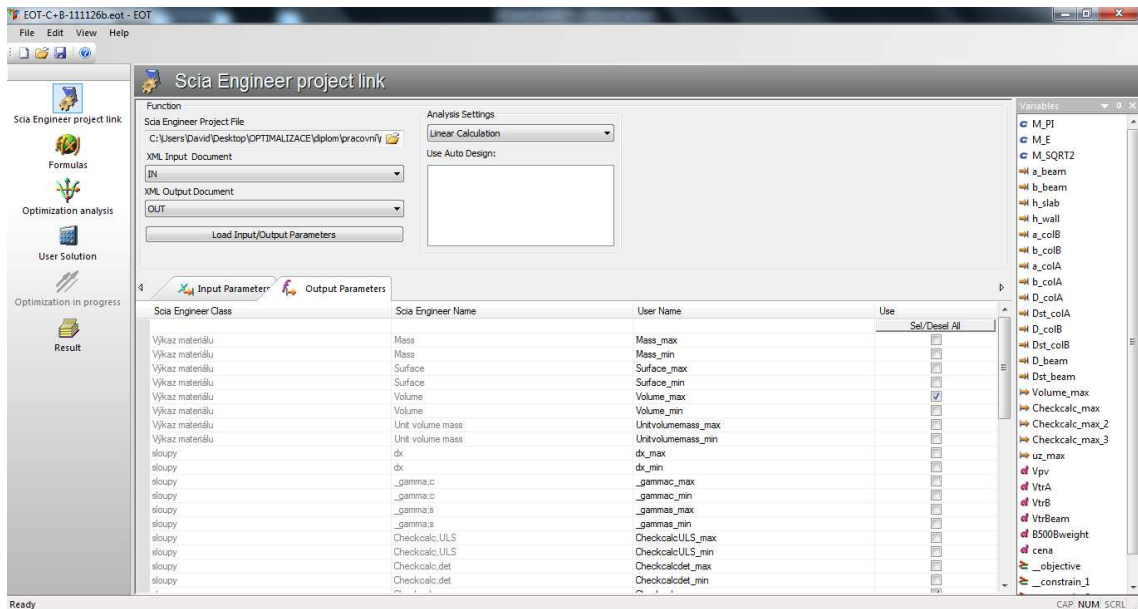
Z důvodů popsaných v předchozím odstavci vznikl za spolupráce mezi katedrou mechaniky Fakulty stavební ČVUT a firmou Nemetschek Scia s.r.o. univerzální optimalizační modul EOT (Scia Engineer Optimization Toolbox) jako součást statického softwaru Scia Engineer.

3.1 EOT

Optimalizační modul EOT je samostatně spustitelná aplikace. Pracuje tedy mimo statický program Scia Engineer, pouze s ním komunikuje prostřednictvím XML souborů. Při standardní instalaci se soubor EOT.exe nachází ve složce Engineer s příslušným označením verze například 2010.0, 2010.1, 2011.0 atd. První příklad označení verze nebyl vybrán náhodně. Poprvé se totiž optimalizační modul objevil až ve verzi SEN 2010.0. Od verze SEN 2011.0 se při standardní instalaci spustitelný soubor nachází přímo v programech nabídky Start (pro operační systémy Microsoft Windows), tedy na stejném místě jako soubor ESA.exe, kterým se spustí samotný SEN.

3.1.1 Prostředí modulu

Po spuštění souboru EOT.exe se okno aplikace s anglickou jazykovou mutací. Okno je rozděleno na tři hlavní podokna a horní lištu klasických nabídek Obr. 3-1.



Obr. 3-1 Modul EOT s načtenými vstupními a výstupními parametry

Levá část obsahuje nabídky, kterými se mění prostředí hlavního editovatelného okna. K tomuto slouží první tři nabídky [**Scia engineer project link**], [**Formulas**] a [**Optimization analysis**]. V pořadí čtvrtá nabídka shora [**User solution**] je pro nastavení uživatelsky zadaných hodnot parametrů, které do optimalizace vstupují. Její princip a použití bude vysvětleno v další části textu. Další ikona v pořadí [**Optimization in progress**] znázorňuje právě probíhající proces optimalizace. Přes poslední nabídku [**Result**] se dostaneme do výsledků proběhnuté optimalizace. Poslední dvě nabídky jsou neaktivní před započítáním optimalizace a do prostředí s výsledky se lze logicky dostat až po ukončení celého procesu optimalizace.

V pravé liště je po celou dobu nastavování a průběhu optimalizace seznam použitých vstupních i výstupních dat. Původní seznam se z přednastavených třech rozšíří o všechny vstupní proměnné a výstupní hodnoty z načtených XML dokumentů. Přidat se mohou i další proměnné, které si uživatel může nadefinovat přímo v modulu

a použít jich jako omezujících podmínek či při definování cílové funkce. Dále se výčet zredukuje vzhledem k tomu, které položky budou opravdu při optimalizaci využity.

Hlavní podokno při otevření modulu EOT a při aktivní první nabídce z levé lišty vybízí uživatele k načtení ESA souboru, tedy modelu z programu SEN. Spolu s ním se vyberou i příslušné vstupní a výstupní XML dokumenty. Po načtení XML se objeví veškeré parametry v nich obsažené. Tato data je poté možné odškrtnutím deaktivovat a tím, jak bylo řečeno výše, vybrat jen ta pro optimalizaci skutečně potřebná. Počet načtených dále nepotřebných vstupů a výstupů je závislý na šabloně tabulky při definování XML dokumentů již v programu SEN.

Při aktivní druhé nabídce z levého podokna se v centrální části zobrazí komentář a návod k možnosti definovat své vlastní proměnné přímo v optimalizační aplikaci. K aktivaci nových proměnných stačí je, s využitím popsanych funkcí (goniometrické, logaritmické atd.), nebo již použitých dat z pravé lišty, pouze zapsat pod návod. Při správné formulaci se v checkboxu pod oknem na definici nových dat vypíše hláška **Formulas are OK**. V opačném případě se checkbox zbarví a vypíše chybovou hlášku.

Při výběru nabídky [**Optimization analysis**] se ve středním okně objeví dvě záložky. První z nich zobrazuje vstupní proměnné a umožňuje editaci jejich hodnot, respektive mezí, ve kterých se bude moci ten který vstup pohybovat při optimalizaci. Kromě minim a maxim lze nastavit i krok, po kterém se proměnné mohou měnit. Posledně zmíněná možnost je velmi důležitá z praktického hlediska, kde ze vstupů jako jsou například rozměry betonových prvků, dělá nespojitou množinu. Tím se lépe zohlední skutečně betonované rozměry prvků, které se uvádějí většinou jako násobek pěti nebo lépe deseti milimetrů. V druhé záložce [**Optimization**] je prostor pro výběr optimalizační metody a nastavení jejich parametrů a to pod hlavičkou Type of Strategy. Jednotlivé metody i s jejich možným nastavením jsou podrobněji rozepsány v následující podkapitole. Pod nadpisem *Objective* je rolovací lišta, kde uživatel vybírá, zda se bude hledat minimum či maximum cílové funkce. V tom samém řádku jako rolovací lišta je pak okénko, do kterého se vepíše název cílové funkce. Po nastavení omezujících podmínek pod nápisem *Constraint* je již možné spustit celou optimalizaci stiskem tlačítka [**!RUN!!**].

V průběhu optimalizace se v centrálním podokně nacházejí opět dvě záložky, kde jedna informuje o všech výsledcích včetně těch, která nesplňují dané podmínky. Druhá podává zprávu o průběhu procesu. Vypisuje jen optimální výsledky v té které části optimalizace spolu se změnami důležitých parametrů optimalizačních metod.

Při ukončení optimalizace se zaktivní nabídka z levé části informující o konečných výsledcích. Jsou zde vypsána nejlepší řešení spolu s reportem o optimalizaci, který obsahuje například informace o celkovém času optimalizace nebo času potřebného na výpočet jednoho řešení.

3.1.2 Metody modulu

Součástí vývoje optimalizačního modulu jsou i metody optimalizace, jejich výběr a začlenění. Obecně existuje mnoho optimalizačních metod, které se svou podstatou a vnitřním algoritmem hodí na různé optimalizační problémy. Samotné druhy optimalizací je možné rozdělit podle profesora Granta Stevena (17) do čtyř kategorií.

- Topologická optimalizace
- Optimalizace tvaru
- Rozměrová optimalizace
- Optimalizace skladby

Vzhledem k faktu, že optimalizační metody často kombinují své principy navzájem a mohou řešit různé typy optimalizací, tak jejich diverzifikace není ani zdaleka tak jasná a jednoduchá. V optimalizačním modulu EOT je momentálně na výběr z pěti optimalizačních metod, které mohou být rozděleny podle své podstaty následovně.

- Stochastické metody
 - Rozšířené simulované žhání / Modified simulated annealing (MSA)
 - Diferenciální evoluce / Diferetial evolution (DE)
- Gradientní metody
 - Sekvenční kvadratické programování / Sequential quadratic programming (SQP)
- Heuristické metody
 - Nelder-Meadova metoda / Nelder – Mead strategy (N-M)
- Jednparametrické metody
 - Metoda zlatého řezu / Golden section

Výše zmíněné optimalizační metody si dále v krátkosti představíme.

Rozšířené simulované žhání

Stochastická metoda, která využívá přírodních zákonitostí. Konkrétně genetických a fyzikálních zákonitostí. Je to metoda, která kombinuje principy jiných dvou metod, a to sice genetického algoritmu, Goldberg (18) a simulovaného žhání, Press a kol. (19). Část genetického algoritmu se projevuje populací jedinců a jejím postupným vývojem. Simulované žhání je zakořeněno v metodě díky principu spojeného s minimálními energetickými stavy. Nejprve se v metodě zvolí počáteční teplota tak, aby byl poměr přijatých jedinců vůči všem vytvořeným přibližně poloviční. Dále je nutné nastavit maximální počet iterací a počet úspěšných iterací na dané teplotní hladině. Poté přijde na řadu část genetického algoritmu, kdy se vyberou dva jedinci, ze kterých pomocí křížení nebo mutací vznikne nový jedinec. Následuje jeho zatřídění do populace. Po splnění počtu iterací se sníží teplota a proces výběru, reprodukce a začlenění běží znovu. Algoritmus metody je popsán v práci doktora Lepše (20).

Praktický příklad využití EOT:

Návrh železobetonových konstrukcí

Diferenciální evoluce

Druhá z metod v aplikaci EOT pracující na principu evoluce je diferenciální evoluce. Její výhodou i nevýhodou je velmi malý počet nastavitelných parametrů. I přes malý počet parametrů je metoda poměrně robustní, jak se můžeme přesvědčit na grafu na obrázku Obr. 3-3. Na počátku se tedy stanoví parametry a počet jedinců v populaci, následuje tvorba první generace v náhodně zadaných mezích. Poté algoritmus provede reprodukční cyklus. Nově vytvořený jedinec je ohodnocen, a pokud je jeho funkční hodnota lepší než rodiče, postupuje nový jedinec. Pokud tomu tak není, postupuje dále

nezměněný rodič. Cyklus se opakuje až do zastavovací podmínky. Touto metodou se podrobněji zabývá R. Storn ve svém článku (21). Jak si stojí diferenciální evoluce ve srovnání s evoluční strategií na elementárních praktických příkladech, pak nabízí práce Ing. Noska (22).

Praktický příklad využití EOT:

Návrh průřezu ocelových konstrukcí

Sekvenční kvadratické programování

Gradientní metody jsou velmi účelné pro optimalizaci spojitých úloh. Příkladem gradientní metody je Sekvenční kvadratické programování. Metoda, která je vhodná na řešení nelineárních optimalizačních úloh. Metoda neřeší úlohu přímo, ale převádí jí na posloupnost (sekvenci) podúloh. Každá tato podúloha je pak řešena klasickým kvadratickým programováním. Jejím výsledkem je přiblížení se k hledaným optimálním řešením. Další informace a možnosti metody jsou v práci Čermáka (23) nebo Boggse a Tolle (24). Vzhledem k první větě odstavce se nedoporučuje používat tuto metodu v modulu EOT při optimalizaci, kde se vybírá z knihoven průřezů nebo materiálů.

Praktický příklad využití EOT:

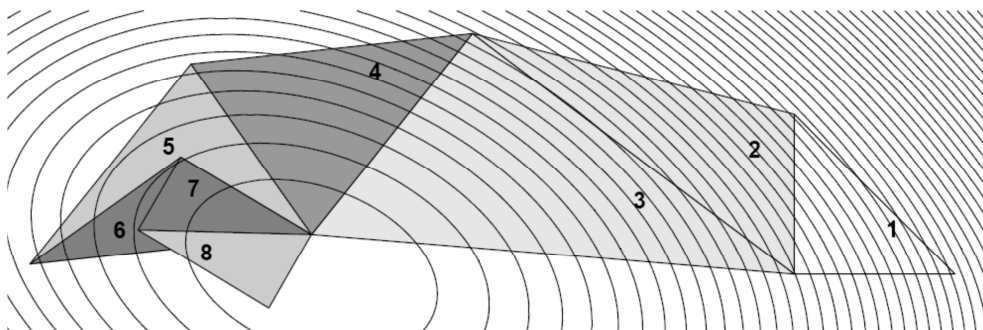
Optimalizace tvaru konstrukce

Nelder-Meadova metoda

Heuristická metoda, taktéž známá jako metoda simplexů. Simplex je n-rozměrné zobecnění trojúhelníku. Pro n-rozměrný prostor je simplex velikosti n+1, což znamená, že v 1D prostoru je simplexem úsečka, ve 2D trojúhelník a ve 3D čtyřstěn. Základem metody je výpočet funkčních hodnot cílové funkce ve vrcholech simplexů. Dále se určí vrchol s nejmenší či největší hodnotou podle toho, zda se jedná o maximalizaci nebo minimalizaci. Tento bod se překlopí přes těžiště do směru nejmenšího (největšího) spádu. Vzdálenost překlopení se může měnit v závislosti na přiblížení se k extrémům. Příklad postupu metody pro 2D případ je na obrázku Obr. 3-2. Nevýhodou dané metody je možnost jejího použití na optimalizaci s menším počtem parametrů přiřazených entitám v modelu programu Scia Engineer a také její zpomalení v oblasti extrémů. Více informací o této metodě je například v práci autorů Gioda, Maier (25).

Praktický příklad využití EOT:

Optimalizace tvaru příhradového nosníku



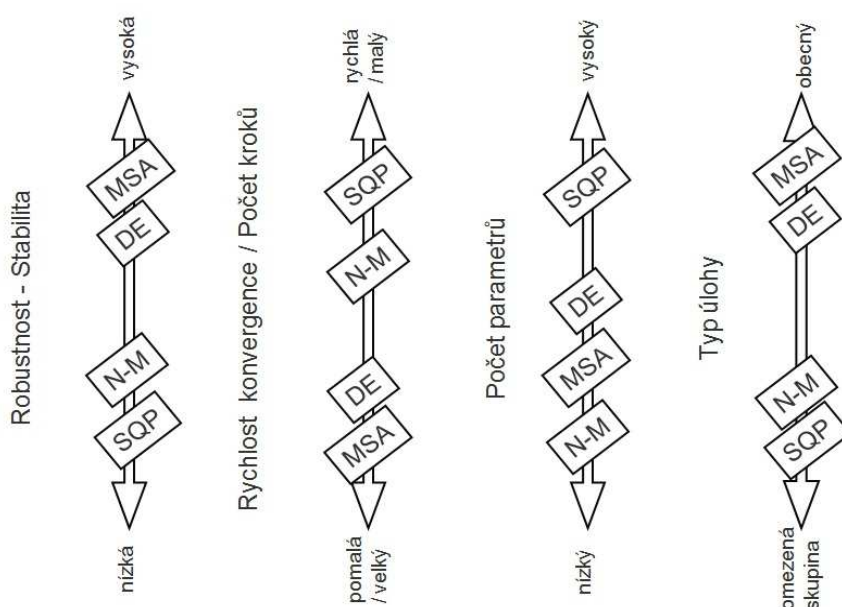
Obr. 3-2 Příklad postupu metody simplexů pro 2D případ – převzato z (26)

Metoda zlatého řezu

Používá se při hledání extrému funkce jedné proměnné. Na počátku jsou zvoleny dva body například a a c , mezi kterými leží hledané optimum. Nutné je vyřešit, zda přímo okrajové body nejsou optímum. Následně jsou do intervalu umístěny dva body b a x , které oba dělí interval z jedné a druhé strany v poměru zlatého řezu. Bod b uvažujme, že je blíže krajnímu bodu intervalu c a obdobně bod x blíže bodu a . Přiřadíme novým bodům funkční hodnotu a z jejich nerovností zjistíme, zda se hledaný extrém nachází v intervalu $\langle a, b \rangle$ nebo $\langle x, c \rangle$. Ve vybraném intervalu znovu zvolíme bod tak, aby opět dělil interval v poměru zlatého řezu, a využijeme i bod v předchozím zvoleném kroku k porovnání funkčních hodnot. Takto pokračujeme až do nalezení optima s určitou zadanou odchylkou. Podrobnější popis metody je v přednášce docenta Čermáka a doktora Hlavičky (26).

Praktický příklad využití EOT:

Zatížitelnost prostého nosníku



Obr. 3-3 Porovnání metod modulu EOT dle různých kritérií – převzato z (27)

Ne všechny metody, jak je patrné již z jejich stručného popisu, jsou vhodné na všechny typy úloh. Do budoucna je snaha analyzovat různé projekty s optimalizací a vytvořit pomůcku pro uživatele při hledání vhodné metody pro svůj projekt. Již nyní ale existuje obecný graf porovnání metod pro optimalizaci s více parametry, Obr. 3-3.

3.1.3 Nastavení parametrů a vybrané metody

Prvním krokem po načtení vstupních i výstupních parametrů z XML dokumentů by mělo být roztrídění dat, respektive odškrtnutí dat, která nejsou v dalším potřebná pro další průběh optimalizace. V našem případě zůstanou vstupní parametry zaškrtnuty všechny tak, jak je sepsáno v tabulce Tab. 3-2. Případné nepoužití vstupních parametrů bude kompenzováno nastavením jejich konstantní hodnoty. Soupis vybraných zaškrtnutých výstupních parametrů se nalézá v následující tabulce Tab. 3-1

Použité výstupní parametry	
Jméno výstupu	Popis
Volume_max	Objem betonu prutových prvků, respektive celé konstrukce
Checkcalc_max	Souhrnný posudek sloupů na mezní stav únosnosti – metoda interakčního diagramu a posouzení konstrukčních zásad
Checkcalc_max_2	Posouzení konstrukčních zásad pro nosníky
Checkcalc_max_3	Posouzení nosníků na mezní stav únosnosti – metoda mezních přetvoření
Uz_min	Globální maximum průhybu nosníků (záporné hodnoty)

Tab. 3-1 Použité výstupní parametry

Posouzení na mezní stav použitelnosti u prutových prvků (trhliny) bude provedeno „ručně“ po skončení optimalizace. Jednak z důvodů časové náročnosti, ale také vzhledem k použití posudku konstrukčních zásad a přídatku hmotnosti výztuže, které by případné lokální překročení jednotkového posudku kompenzovaly.

Vstupní parametry z XML dokumentu, které se načtou do modulu, mají svojí počáteční hodnotu z modelu programu SEN. Při optimalizaci budeme používat několik stupňů parametrizace. Z tohoto důvodu zůstanou některé parametry se svojí původní hodnotou konstantní. Ostatním parametrům budou přisouzeny meze, ve kterých se budou v průběhu optimalizace pohybovat. V našem případě optimalizaci a pozdější analýzu budeme provádět na dvou stupních parametrizace pro tři skupiny. Optimalizovat se budou pouze prutové prvky. V první skupině pro všechny sloupy budou zavedeny dva parametry pro hlavní výztuž a jeden parametr bude mít charakter rozměru průřezu. Z uvedeného plyne, že sloupy budou čtvercové. Ztužujícím žebřům a průvlakům zůstanou dva geometrické parametry pro průřez prvku a parametr pro průměr hlavní výztuže. Průměr třmínků bude stejný jako pro sloupy a uvažován s konstantní hodnotou. Pracovně bude tato skupina parametrů nazvána Základní.

V druhé skupině budou sloupy rozděleny na dvě skupiny po třech podlažích tak, jak je to vysvětleno v podkapitole Parametrizace v části Modely. Každá ze dvou skupin sloupů bude mít své parametry pro průřez i pro průměry výztuže a to i pro třmínky. Dále se bude uvažovat již s možností obdélníkového průřezu pro sloupy. Celkově tedy přibude pět parametrů s možnou proměnnou hodnotou. Název této skupiny parametrů bude Rozšířená.

Třetí skupina bude téměř totožná se skupinou druhou. Pouze budou jiné posudky vztahující se k původním ČSN normám. Konkrétně v automatickém posudku nebude figurovat posouzení konstrukčních zásad, za to bude v optimalizaci zahrnut posudek trhlin, který je v prvních dvou skupinách proveden až v ruční kontrole. Její pojmenování bude Rozšířená původní.

Použití parametrů v uvažovaných skupinách			
Jméno parametru	Skupina parametrů		
	Základní	Rozšířená	Rozšířená původní
a_beam	ano	ano	ano
b_beam	ano	ano	ano
a_colA	ano	ano	ano
b_colA	roven a_colA	ano	ano
a_colB	roven a_colA	ano	ano
b_colB	roven a_colA	ano	ano
D_beam	ano	ano	ano
Dst_beam	konst.= 10 mm	ano	ano
D_colA	ano	ano	ano
Dst_colA	konst.= 10 mm	ano	ano
D_colB	ano	ano	ano
Dst_colB	konst.= 10 mm	ano	ano

Tab. 3-2 Použití parametrů v uvažovaných skupinách

Použití posudků v uvažovaných skupinách				
Prvek	Posudek	Skupina parametrů		
		Základní	Rozšířená	Rozšířená původní
sloupy	Konstr. zásady	ano	ano	ano - interně
	Interakční diagram	ano	ano	ano
nosníky	Konstr. zásady	ano	ano	ano - interně
	Metoda mezních přetvoření	ano	ano	ano
	Posudek trhlin	ručně	ručně	ano

Tab. 3-3 Použití posudků v uvažovaných skupinách

Pro jednotlivé vstupní parametry, pokud budou aktivní, budou jejich meze pro všechny skupiny parametrů stejné. Nejinak tomu je i u nastavení kroku, po kterých se budou moci hodnoty vstupních dat pohybovat. Hodnoty mezí pro vstupní parametry s velikostmi kroků viz Tab. 3-4.

Meze a kroky vstupních parametrů pro optimalizaci							
Jméno parametru	Meze [mm]		Krok [mm]	Jméno parametru	Meze [mm]		Krok [mm]
	Dolní	Horní			Dolní	Horní	
a_beam	180	400	10	D_beam	16	32	2
b_beam	180	400	10	Dst_beam	8	14	2
a_colA	200	460	10	D_colA	16	36	2
b_colA	200	460	10	Dst_colA	8	14	2
a_colB	200	460	10	D_colB	16	36	2
b_colB	200	460	10	Dst_colB	8	14	2

Tab. 3-4 Meze a kroky vstupních parametrů

V hierarchii postupu nastavování v optimalizačním modulu EOT následuje definování případných dalších vlastních proměnných a funkcí. Pro naši optimalizaci zde bylo nutné zadat rovnice pro výpočet hmotnosti použité výztuže v modelu. Další rovnice byla použita pro definování cílové funkce. Představení výpočtu obou zmíněných datových položek následuje.

Hmotnost použité výztuže pro prutové prvky se skládá z hmotností hlavní podélné výztuže prvků a třmíneků. Šablona vyztužení počítala s umístěním hlavní výztuže vždy do rohů. Tím pádem je v průřezu jakéhokoliv prvku uvažováno se čtyřmi výztužnými pruty. Samozřejmě je hlavní výztuž ještě obalená třmínky, kdy průměr třmíneků je jedním ze vstupních parametrů. Krytí bylo nastaveno na 35 mm, respektive 0,035 m. Dále je nutné znát délku prutových prvků, která je vždy daná geometrií modelu a je nezávislá na vstupních parametrech. Délka prvků pro sloupy skupiny A je 88,5 m, pro sloupy skupiny B je 114,35 a pro nosníky 289,709 m. Z výše uvedených fakt a za použití určitých vstupních parametrů můžeme již lehce sestavit rovnici pro objem výztuže prutových prvků. Popis neznámých v rovnici je v Tab. 2-6.

$$V_{PV} = 4 \cdot \left(\frac{88,5 \cdot D_{colA}^2 \cdot \pi}{4} + \frac{114,35 \cdot D_{colB}^2 \cdot \pi}{4} + \frac{289,709 \cdot D_{beam}^2 \cdot \pi}{4} \right)$$

$$V_{PV} = 88,5 \cdot D_{colA}^2 \cdot \pi + 114,35 \cdot D_{colB}^2 \cdot \pi + 289,709 \cdot D_{beam}^2 \cdot \pi$$

$$V_{PV} = 278 \cdot D_{colA}^2 + 359 \cdot D_{colB}^2 + 910 \cdot D_{beam}^2$$

Příčná rozteč třmíneků ve sloupech i nosnících je konstantní a má hodnotu 200 mm, respektive při použití základních jednotek 0,2 m. Pro zjištění přibližného počtu použitých třmíneků tedy stačí podělit celkové délky prvků právě hodnotou 0,2. Délka jednoho třmínku se uvažuje jako obvod průřezu prvku bez osminásobku krytí (pro každou stranu dvojnásobek krytí). S těmito předpoklady lze celkový objem třmíneků pro jednotlivé skupiny prvků určit následovně. Opět jsou použité neznámé v tabulce parametrů Tab. 2-6.

$$V_{TrA} = \frac{88,5}{0,2} \cdot 2 \cdot (a_{colA} + b_{colA} - 4 \cdot 0,035) \cdot \frac{Dst_{colA}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$V_{TrA} = \frac{88,5}{0,4} \cdot Dst_{colA}^2 \cdot \pi \cdot (a_{colA} + b_{colA} - 0,14)$$

$$V_{TrA} = 695,1 \cdot Dst_{colA}^2 \cdot (a_{colA} + b_{colA} - 0,14)$$

Výše uvedená rovnice platí pro třmínky skupiny sloupů A. Obdobně lze vypočítat objem třmínků pro sloupy skupiny B a nosníky.

$$V_{TrB} = \frac{114,35}{0,2} \cdot 2 \cdot (a_{colB} + b_{colB} - 4 \cdot 0,035) \cdot \frac{Dst_{colB}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$V_{TrB} = \frac{114,35}{0,4} \cdot Dst_{colB}^2 \cdot \pi \cdot (a_{colB} + b_{colB} - 0,14)$$

$$V_{TrB} = 898,1 \cdot Dst_{colB}^2 \cdot (a_{colB} + b_{colB} - 0,14)$$

$$V_{Trbeam} = \frac{289,709}{0,2} \cdot 2 \cdot (a_{beam} + b_{beam} - 4 \cdot 0,035) \cdot \frac{Dst_{beam}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$V_{Trbeam} = \frac{289,709}{0,4} \cdot Dst_{beam}^2 \cdot \pi \cdot (a_{beam} + b_{beam} - 0,14)$$

$$V_{Trbeam} = 2275,4 \cdot Dst_{beam}^2 \cdot (a_{beam} + b_{beam} - 0,14)$$

Po definování objemů všech typů výztuží již můžeme určit celkovou hmotnost výztuže prutových prvků. Objemová hmotnost oceli se uvažuje 7850 kg/m^3 . Proměnné ve vzorcích budou pro jednotlivé skupiny parametrů modifikovány dle Tab. 3-2

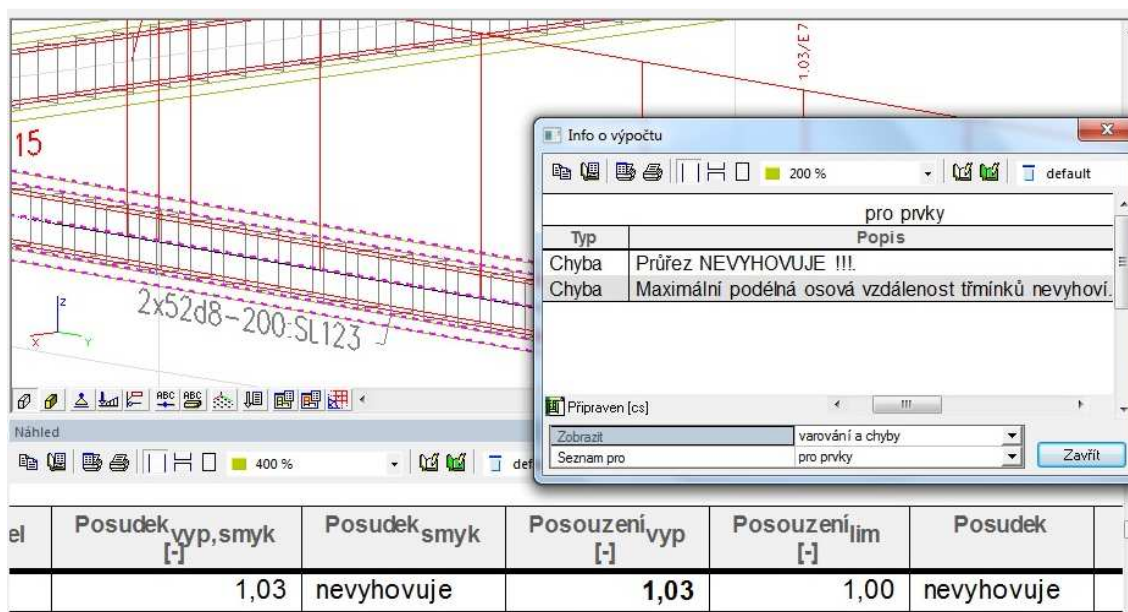
$$B500B_{weight} = (V_{PV} + V_{TrA} + V_{TrB} + V_{Trbeam}) \cdot 7850$$

Následuje definování cílové funkce. Tou je celková cena konstrukce skládající se z cen objemu použitého betonu a z ceny celkové hmotnosti výztuže prutových prvků. Hmotnost výztuže bude při optimalizaci dle Eutokódů zvýšena o rezervu pěti procent. To je díky omezující podmínce z posouzení konstrukčních zásad pro nosníky, která byla stanovena na hodnotu 1,5. Překročení jednotkového posudku jsme si mohli dovolit díky tomu, že je většinou kvůli třmínkům, respektive jejich malé podélné vzdálenosti. Přidáním a zhuštěním třmínků se dostaneme pod jednotkový posudek, ale zároveň zůstaneme v pětiprocentním přídatku. Při nevyhovění posudku maximální příčné vzdálenosti třmínků postačí přidat větev třmínku. Grafický příklad překročení posudku pro konstrukční zásady a jeho řešení je ukázáno na Obr. 3-4, Obr. 3-5.

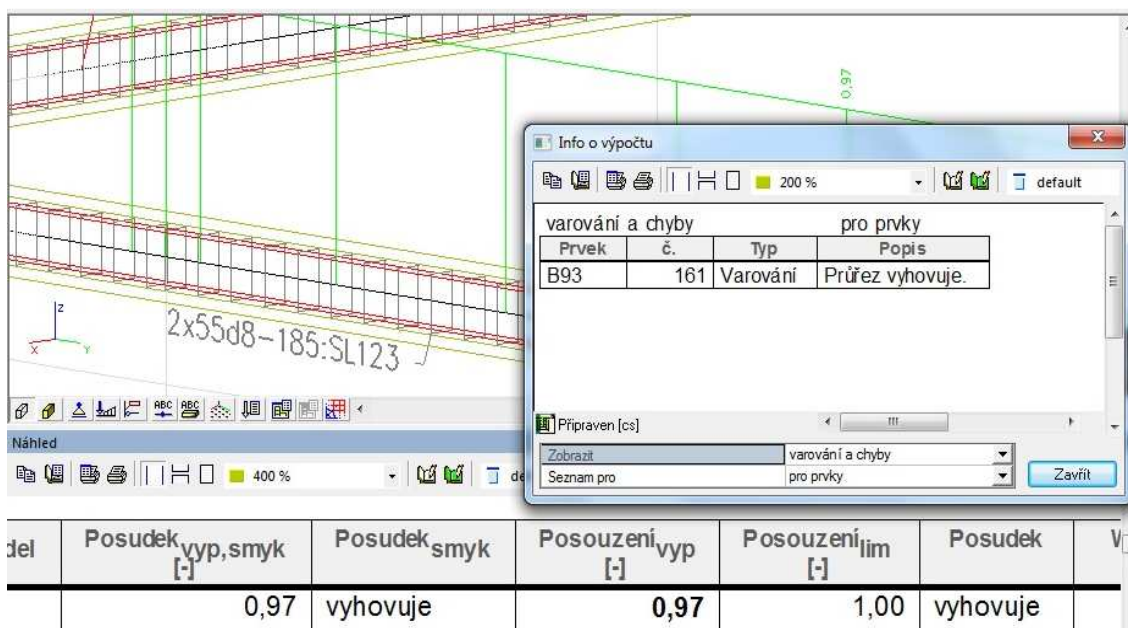
V rovnici celkové ceny konstrukce nefiguruje cena bednění, jelikož by bednění

bylo pro prutové prvky stále stejné, tedy nerozdílové. Jednotková hmotnost betonu je stanovena na 2000 Kč/m³. Jednotková cena pro betonářskou ocel je 14 Kč/kg. Ceny jsou průměrem z publikovaných cen několika výrobců v České republice pro rok 2011. Výsledná rovnice pro určení cílové funkce má tedy podobu:

$$cena = Volume_{max} \cdot 2000 + B500B_{weight} \cdot 14 \cdot 1,05$$



Obr. 3-4 Ukázka překročení posudku konstrukčních zásad – podélná rozteč třmíneků



Obr. 3-5 Řešení překročení posudku konstrukčních zásad – menší podélná vzdálenost třmíneků

Po určení všech potřebných vstupních a výstupních dat spolu s cílovou funkcí zbývá určit omezující podmínky a nastavit parametry vybrané metody. Omezujícími podmínkami budou hodnoty posudků z tabulky Tab. 3-1. Pro posudek sloupu bude nastavena omezující hodnota 0,95. Zrovna tak bude tato hodnota pro posudek nosníků na mezní stav únosnosti metodou mezních přetvoření. Prakticky to znamená, že v návrhu konstrukce je ještě místo pro menší přídatné zatížení či lehká bezpečnostní rezerva. Naopak mezní hodnota posudku pro konstrukční zásady nosníků je stanovena na hodnotu 1,5. Jak již bylo řečeno, překročení jednotkového posudku v rámci této meze je pouze lokálního charakteru, což lze vyrovnat přidáním podélným prutem v prvku eventuelně zmenšením příčné rozteče třmínků a opět přidáním třmínků. Hmotnost použité výztuže v rovnici cílové funkce s těmito přídatky kalkuluje.

Metodou pro optimalizaci železobetonového skeletu bylo zvoleno rozšířené simulované žhání. Tato metoda má ve svém středu několik proměnných, které může uživatel editovat. V následující tabulce je jejich výčet s krátkým popisem s defaultními a skutečně nastavenými hodnotami.

Proměnné v nastavení optimalizační metody				
Jméno proměnné	Popis proměnné	Hodnoty Defaultní	Hodnoty pro skupiny	
			Základní	Rozšířená
Population	Velikost populace	20	5	10
Num. of iter	Počet iterací	20	5	10
succmax	Max. počet úspěšných klonů za iteraci	30	5	10
countmax	Maximální počet klonů v iteraci	300	50	100
Standart error	Relativní chyba pro parametry bez kroku	0,005	0,005	0,005
pmutation	Pravděpodobnost mutace	0,125	0,125	0,125
coefTmaxmin	Poměr minimální k maximální teplotě	0,01	0,01	0,01
Kspecimen	Pravděpodobnost přijmutí horšího řešení	0,4	0,4	0,4
alphamax	Maximální penalizace omezení	0,15	0,15	0,15
alphamin	Minimální penalizace omezení	0,01	0,01	0,01
gammamax	Maximální penalizace omezení	0,01	0,01	0,01
gammamin	Minimální penalizace omezení	0,01	0,01	0,01

Tab. 3-5 Proměnné v nastavení optimalizační metody

4 VÝSLEDKY A ANALÝZA

V této části si představíme výsledné hodnoty parametrů z procesu optimalizace pro výsledná nejlepší řešení. Zabývá se též budeme doprovodnými ukazateli a výsledky podrobíme analýze z různých úhlů pohledu.

4.1 Časová náročnost

Pro tuto práci byly k dispozici notebook Acer – Aspire 5750G, na kterém byly provedeny optimalizace pro všechny tři skupiny parametrizace. Údaje o hardwaru a softwaru pro výše zmíněný počítač jsou následující.

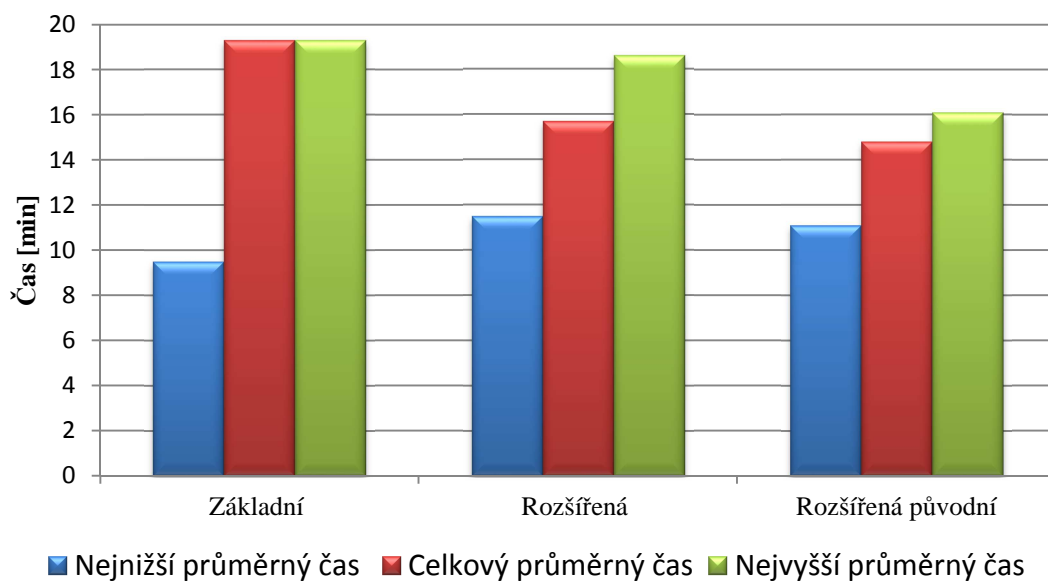
Acer – Aspire 5750G

Processor:	Intel Core i7 – 2630QM CPU @ 2.00GHz 6 MB L3 Cache, 4 jádra 8 threadů
Paměť RAM:	4 GB DDR
Pevný disk:	750 GB, 5400 RPM
Operační systém:	Microsoft Windows 7 Home Premium 64bit Service Pack 1

V optimalizačním modulu EOT se v centrálním okně při průběhu optimalizace zobrazuje celkový čas i čas potřebný na jedno řešení. Tyto číselné údaje závisí nejen na výpočetních možnostech použitých strojů, ale i na nastavení optimalizační metody, anebo třeba na omezujících podmínkách či mezích pro jednotlivé vstupní parametry. Neméně důležité pro co nejkratší celkový čas optimalizace je nutné dát si pozor na nastavení počítače. Zvláště pak na možnosti automatického režimu spánku, hibernace nebo vypnutí systému. Autor doporučuje před spuštěním optimalizace nebo krátce po něm zkontrolovat tyto údaje a nastavit u nich frekvenci **NIKDY**. Naopak se ukázalo, že další běžná práce na počítači průměrný čas optimalizace téměř neovlivňuje. V následující tabulce si ukážeme celkové a extrémní hodnoty průměrného času na jedno řešení a celkové časy optimalizace ať už řádně ukončené nebo zastavené uživatelem. Průměrné časy jsou pro ilustraci a lepší porovnání vyvedeny také do sloupcových grafů.

Časová analýza optimalizací jednotlivých skupin parametrů					
Skupina	Nejnižší průměrný čas [min]	Celkový průměrný čas [min]	Nejvyšší průměrný čas [min]	Celkový čas optim. [h]	Ukončení optimalizace
Základní	9,5	19,3	19,3	29,3	Řádně
Rozšířená	11,5	15,7	18,6	62,4	Řádně
Rozšířená původní	11,1	14,8	16,1	27,1	Uživatelem

Tab. 4-1 Časová analýza optimalizace



Obr. 4-1 Průměrné časy jednoho řešení pro vyšetřované skupiny parametrů

4.2 Optimální hodnoty

4.2.1 Základní skupina parametrů

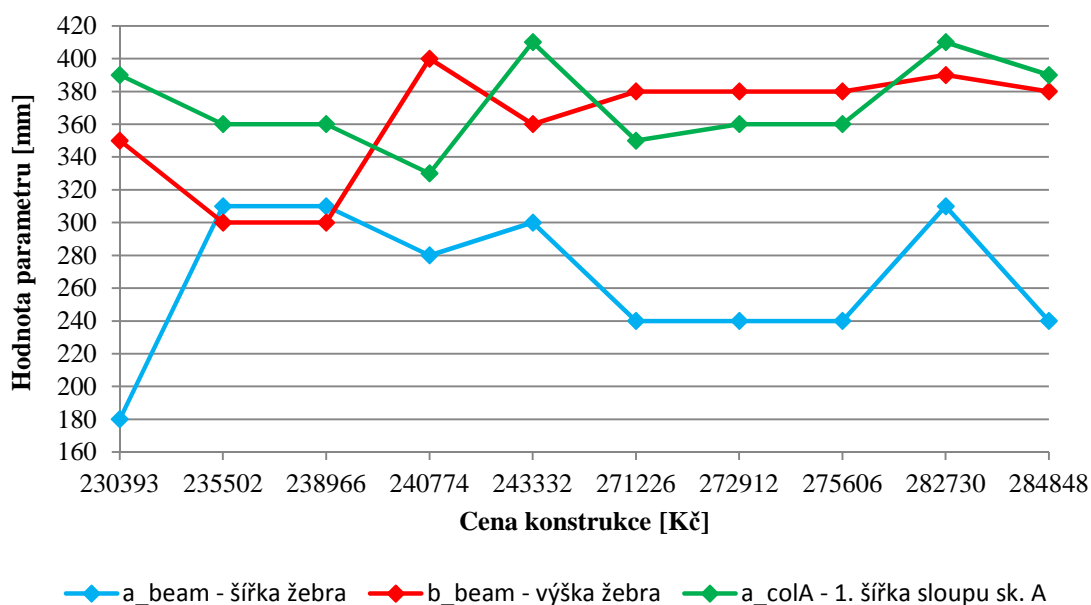
První Základní skupina parametrizace uvažuje se šesti parametry pro optimalizaci sloupů a nosníků, polovičním počtem oproti skupině parametrů rozšířené. Názorně jsou parametry ve skupině v Tab. 3-2.

Optimalizace s nastavením použité metody dle Tab. 3-5 byla řádně ukončena za 33,5 hodiny. Celkem bylo vygenerováno 91 řešení, ze kterých bylo celkem 35 splňujících dané okrajové podmínky. Jako optimální byla zjištěna cena 230 393 Kč, která byla dosažena v posledních dvou iteracích.

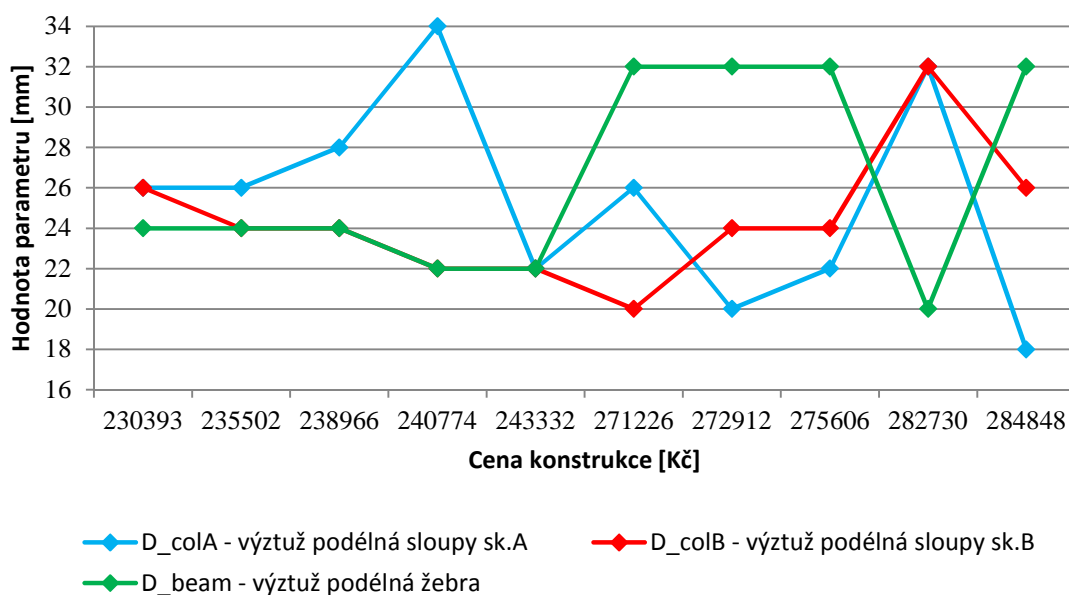
Analýzu postupu metody rozšířeného simulovaného žíhání si představíme až v následující podkapitole, kde jsou vzhledem ke zvoleným parametrům optimalizační metody závislosti a průběhy markantnější. Ve zprávě z aplikace EOT se jako optimum vytiskne poslední populace. Její počet je nastavitelný v parametrech metody. Pro první metodu byla zvolena hodnota pro tento parametr pět. Ovšem pro lepší znázornění výsledků si nyní představíme nejlepších deset řešení, která podrobíme dalšímu zkoumání. Výsledná cena pro vybraných deset optim, stejně tak jako příslušné vstupní parametry, se nacházejí v Tab. 4-2. Závislost vstupních parametrů na cílové funkci pro vybraná řešení je ale nejlépe patrná na grafech z Obr. 4-2 a Obr. 4-3.

Hodnoty vstupních parametrů a ceny pro celkově deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrizace						
Cena	Parametry [mm]					
	a_beam	b_beam	a_colA	D_colA	D_colB	D_beam
230393	180	350	390	26	26	24
235502	310	300	360	26	24	24
238966	310	300	360	28	24	24
240774	280	400	330	34	22	22
243332	300	360	410	22	22	22
271226	240	380	350	26	20	32
272912	240	380	360	20	24	32
275606	240	380	360	22	24	32
282730	310	390	410	32	32	20
284848	240	380	390	18	26	32

Tab. 4-2 Hodnoty vstupních parametrů a cílové funkce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrizace

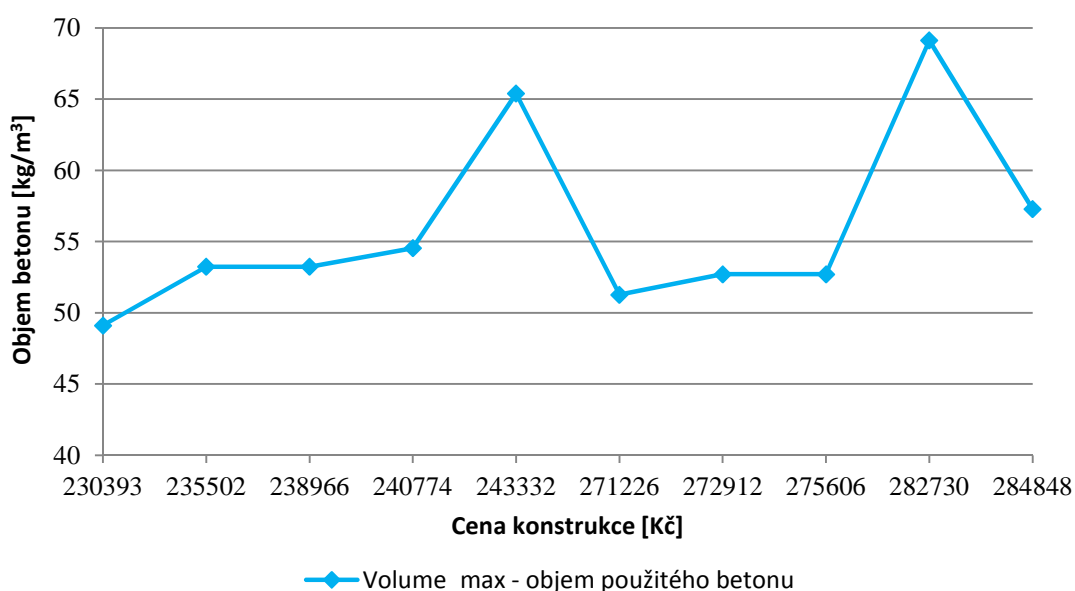


Obr. 4-2 Závislost průřezových parametrů na výsledné ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů

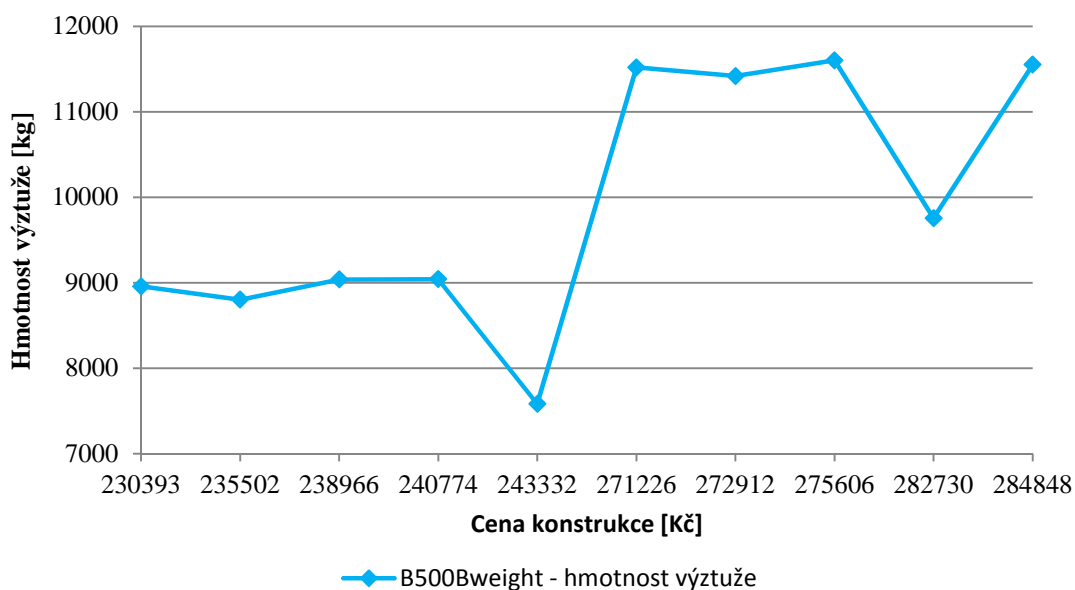


Obr. 4-3 Závislost parametrů výztuže na výsledné ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů

Na uvedených grafech všechny vstupní parametry značně oscilují. V této skupině parametrů tedy není dominantní parametr, který by měl rozhodující vliv na výslednou cenu konstrukce. Tato teze platí i pro celkový objem respektive hmotnost použitých materiálů Obr. 4-4, Obr. 4-5, kde pouze první čtyři optima vykazují konstantní charakter. Při překrytí grafů bychom zjistili, že sledované veličiny mají oproti sobě inverzní charakter.



Obr. 4-4 Závislost objemu použitého betonu na ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení Základní skupiny parametrů



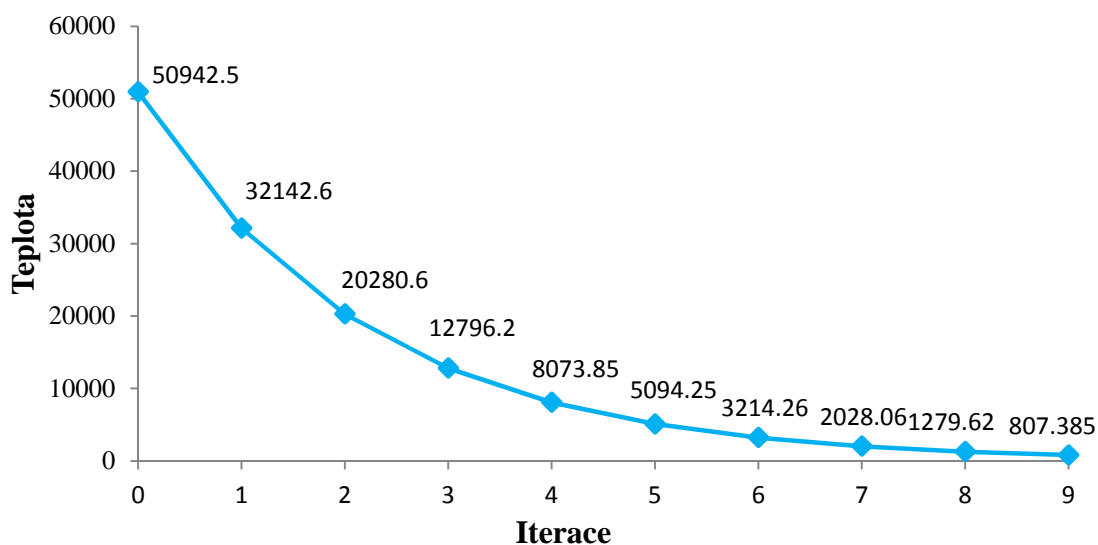
Obr. 4-5 Závislost hmotnosti použité výztuže na ceně konstrukce pro deset nejlepších řešení
Základní skupiny parametrů

4.2.2 Rozšířená skupina parametrů

Pro tuto skupinu bylo v optimalizaci aktivních celkem dvanáct parametrů. Jejich výčet se nalézá v kapitole Optimalizace v části Nastavení parametrů a vybrané metody, konkrétně jsou data v Tab. 3-2.

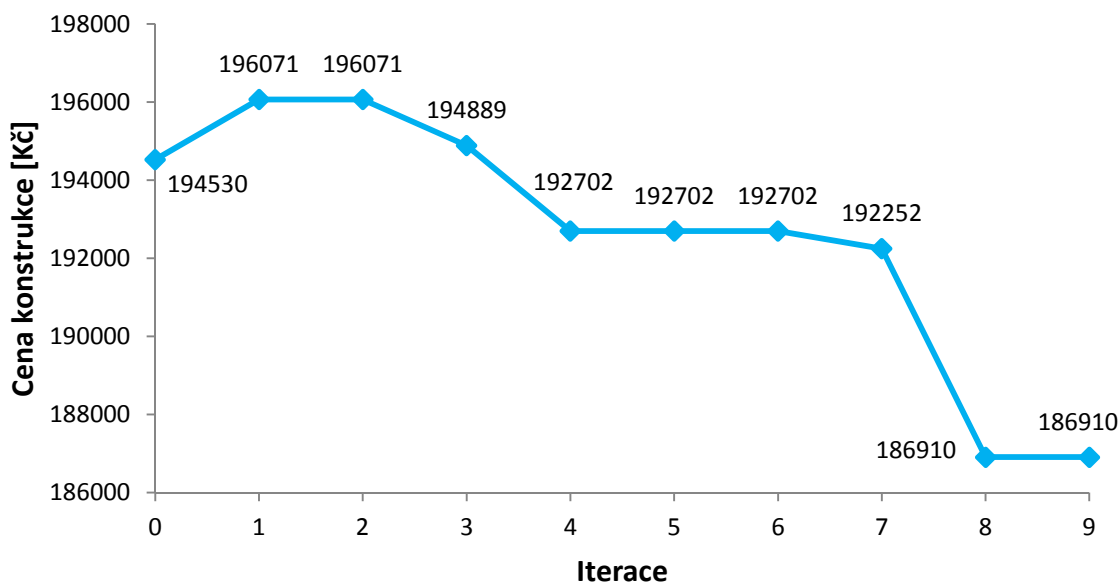
Optimalizace byla úspěšně ukončena za 62,4 hodiny. Při nastavení optimalizační metody jak je znázorněno v Tab. 3-5 a mezích pro jednotlivé parametry podle Tab. 3-4, bylo celkem vygenerováno 242 řešení. Z uvedeného počtu řešení bylo 79 platných řešení, tj. řešení, která všechna splňovala zadané okrajové podmínky. Nejmenší dosažené cílové funkce neboli ceny konstrukce bylo dosaženo v předposlední a poslední provedené iteraci. Její hodnota je 186 910 Kč.

Nejprve si ukážeme, kterak algoritmus postupoval, respektive jak se měnily jeho parametry. Sledovaným parametrem bude teplota pro danou iteraci. Z výpisu nastavených skutečných hodnot proměnných v algoritmu optimalizační metody uvedeném v Tab. 3-5 plyne, že počet iterací a tím pádem i počet změn teploty při řádně dokončené optimalizaci je deset. Postupné ochlazování je patrné na grafu závislosti teploty na iteraci Obr. 4-6. Interní číslování iterací v modulu EOT začíná číslem 0 ne 1, jak by se mohlo očekávat.



Obr. 4-6 Postupné snižování teploty v algoritmu vybrané metody

Budeme-li pokračovat v analýze průběhu optimalizace po iteracích, můžeme ještě připojit grafický pohled na nejlepší (minimální) hodnoty cílové funkce právě pro jednotlivé teplotní hladiny.



Obr. 4-7 Optimální (minimální) hodnoty cílové funkce pro jednotlivé teplotní hladiny

Na posledním grafu jsou patrné charakteristiky metody rozšířeného simulovaného žitání. Optimum na první teplotní hladině by se dalo označit za možné lokální minimum funkce. Navíc optimální hodnoty pro první tři teplotní hladiny nesplňují úplně omezující podmínky. Jednotkový posudek sloupů je zde překročen o hodnotu 0,06, respektive 0,03, jak ukazuje tabulka posudků pro optima prvních tří teplotních hladin Tab. 4-3 (druhá a třetí teplotní hladina má stejné optimum). Tato minimální překročení

jsou možná vzhledem k povaze optimalizační metody a nastavení jejich proměnných. Navíc i zde se ukazuje výhoda pětiprocentní rezervy v posudcích. Vyztužení sloupů potažmo nosníků by se i přes lehké překročení omezujících podmínek nemuselo vůbec měnit. Samozřejmě při celkovém překročení jednotkového posudku je nutné se zabírat dalšími dílčími optimy v řadě, která již plně naplní představy a požadavky uživatele.

Posouzení optim prvních iterací			
Cena konstrukce [Kč]	Checkcalc_max / omezující hodnota	Checkcalc_max_2 / omezující hodnota	Checkcalc_max_3 / omezující hodnota
194530	1,013823 / 0,95	1,141168 / 1,5	0,927437 / 0,95
196071	0,982629 / 0,95	1,119796 / 1,5	0,573534 / 0,95

Tab. 4-3 Posouzení optim na prvních třech teplotních hladinách Rozšířená skupina parametrů

V praxi nejspíš nebude často nutné nechat optimalizaci běžet až do konce. Pokaždé budeme spokojeni s průběžně nalezeným extrémem cílové funkce, můžeme optimalizaci zastavit, jak jsme se o tom mohli přesvědčit u třetí skupiny parametrizace. Za zvážení by určitě stálo zahrnout do algoritmu optimalizačních metod alternativní zastavovací podmínku, kterou by byla uživatelem zvolená hodnota cílové funkce. Další možnou praktickou zastavovací podmínkou, tentokrát hlavně pro metodu rozšířeného simulovaného žhání, by mohlo být dosažení opakovaně stejných optimálních hodnot pro určitý počet po sobě jdoucích iterací.

Nyní si představme nejlepší řešení v poslední populaci tak, jak nám je nabídla optimalizační aplikace EOT. V Tab. 4-4 a Tab. 4-5 jsou nejen hodnoty cílové funkce, ale i hodnoty příslušných vstupních parametrů charakterizujících konstrukci.

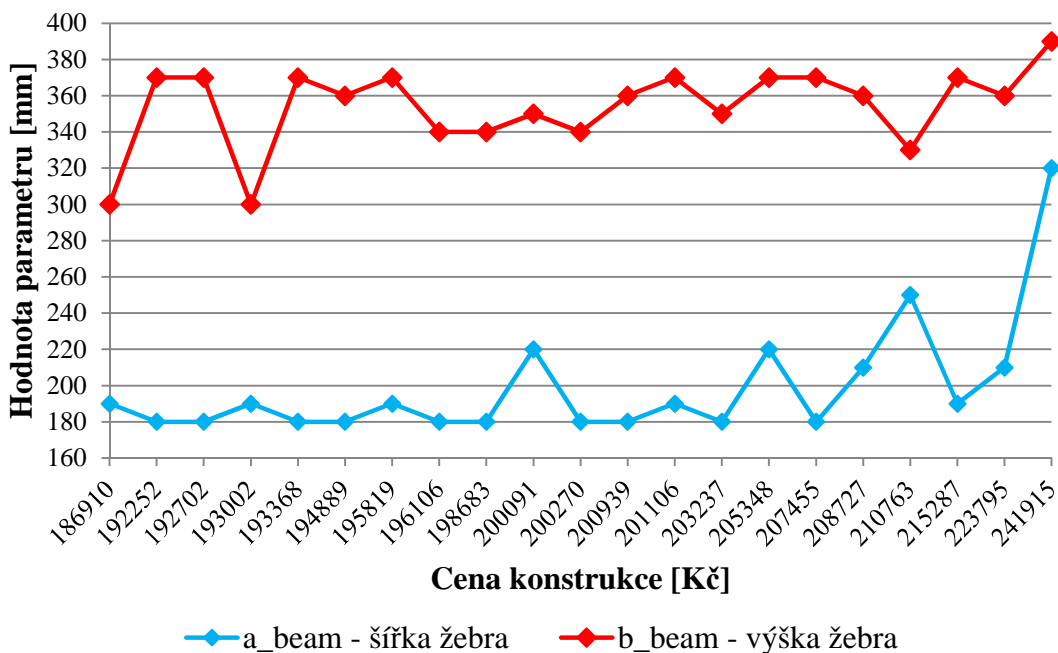
Hodnoty parametrů průřezu prutových prvků a ceny pro nejlepší řešení poslední populace - Výstup z EOT						
Cena	Parametry [mm]					
	a_beam	b_beam	a_colA	b_colA	a_colB	b_colB
186910	190	300	410	370	270	420
192252	180	370	250	420	430	300
196106	180	340	320	420	320	370
242674	240	310	450	300	410	430
244110	350	360	430	340	400	420
246401	350	370	430	340	400	420

Tab. 4-4 Hodnoty parametrů průřezu nejlepších řešení poslední populace optimalizace Rozšířená skupina parametrů

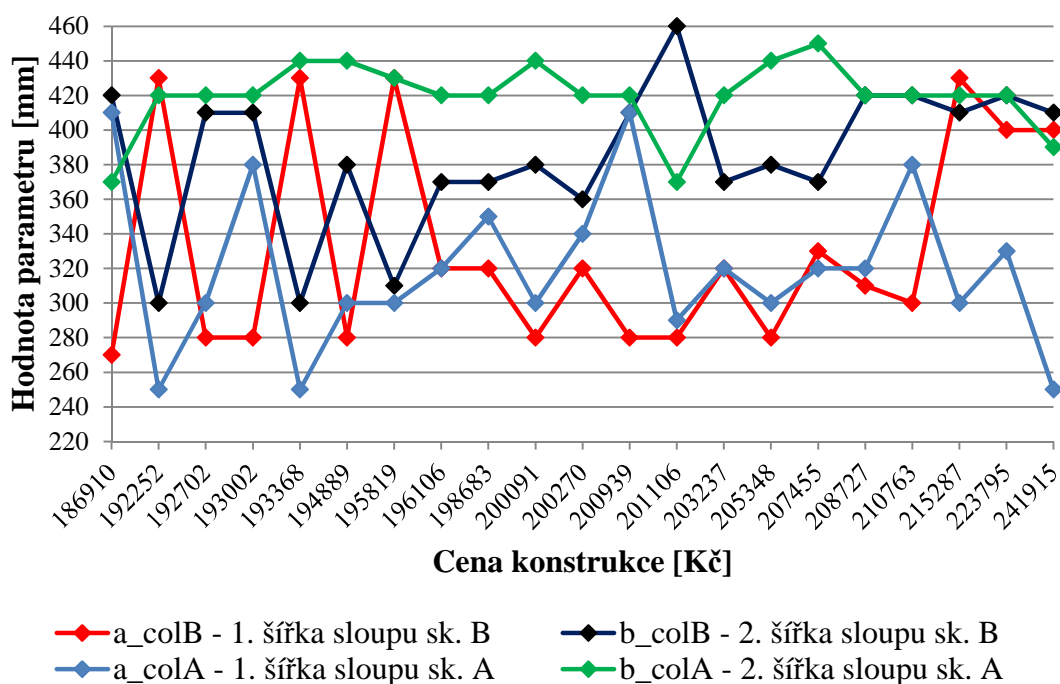
Hodnoty parametrů vyztužených prutových prvků a ceny pro nejlepší řešení poslední populace - Výstup z EOT						
Cena	Parametry [mm]					
	D_beam	Dst_beam	D_colA	Dst_colA	D_colB	Dst_colB
186910	16	8	30	12	24	12
192252	16	8	30	12	26	12
196106	22	10	18	12	26	8
242674	20	10	34	12	26	12
244110	20	10	20	14	22	10
246401	20	10	20	14	22	10

Tab. 4-5 Hodnoty parametrů vyztužení nejlepších řešení poslední populace optimalizace Rozšířené skupiny parametrů

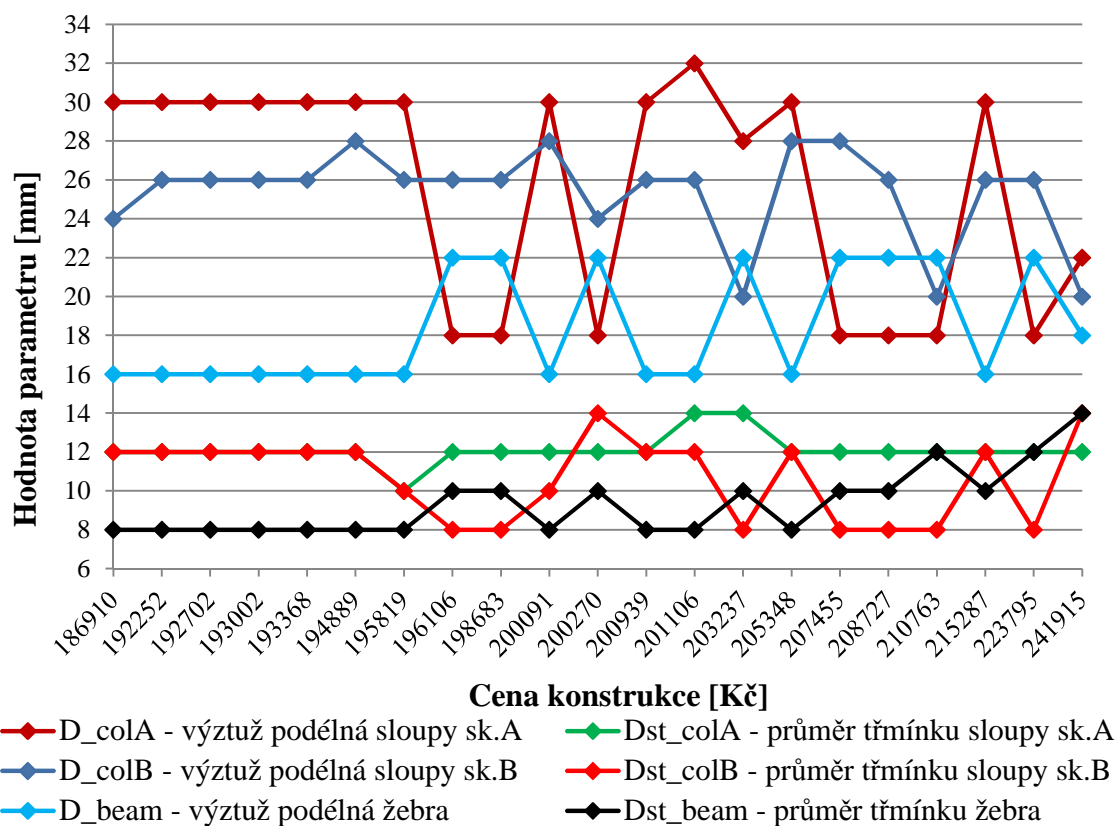
V tabulce se neobjevují výsledky stejných hodnot, i když je výstup z EOT obsahuje. Je to dáno tím, že se vypisuje poslední populace řešení, která může obsahovat stejná data. Projektanta potažmo investora ale nezajímají jen výsledné ceny konstrukce a hodnoty parametrů, ale i jak velký vliv má ten který parametr na cílovou funkci. Odpověď na tuto otázku můžeme nalézt v grafickém vyjádření závislosti parametrů tentokrát na celkově nejlepších jedenadvaceti řešení Obr. 4-8, Obr. 4-9 a Obr. 4-10. Kdybychom brali v úvahu pouze data z posledních dvou tabulek, závislost parametrů by mohla být zkreslující a nenesoucí dostatečnou informaci.



Obr. 4-8 Závislost parametrů průřezu nosníku na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina

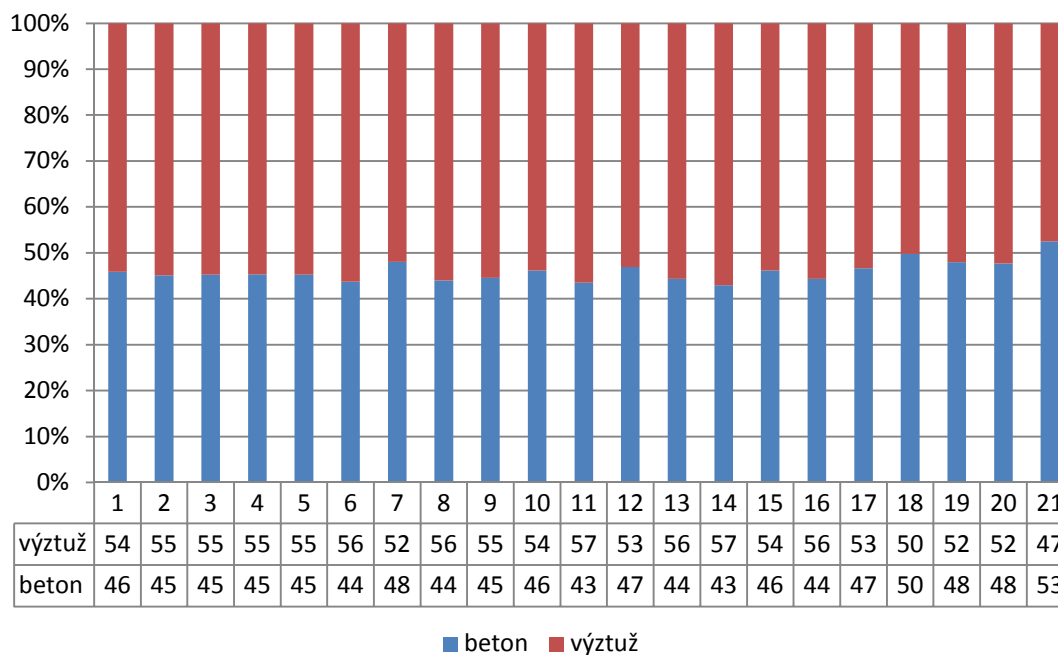


Obr. 4-9 Závislost parametrů průřezu sloupů na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina



Obr. 4-10 Závislost parametrů výztuží na ceně pro nejlepší řešení – Rozšířená skupina

Z grafů závislosti parametrů na ceně konstrukce je patrné, že pro prvních šest řešení jsou rozdílovými parametry průřezy prutových prvků, zvláště pak sloupů. Naopak průměry výztuží jsou z počátku téměř konstantní. Z grafu na OBRXX je ale patrné, že s rostoucí cenou konstrukce se poměr celkových cen jednotlivých použitých hlavních materiálů mění jen minimálně. Navíc poměrové hodnoty oscilují kolem padesáti procent, což znamená, že žádný z materiálů není vzhledem k ceně a zadaným omezujícím podmínkám dominantním parametrem.



Obr. 4-11 Zastoupení cen betonu a výztuže k celkové ceně konstrukce – Rozšířená skupina

Zajímavým ukazatelem jsou pak parametry nosníků. Zde je patrné, že průměr použité hlavní výztuže a šířka nosníku často dosahují hodnoty minimálních nastavených mezí. Vzhledem k uvedenému faktu lze říci, že výsledná cena konstrukce (vyztužených prutových prvků) by ještě mohla klesnout při vhodněji zvolených mezích pro parametry. Posouzení průhybu nosníků nehrálo v optimalizaci velkou roli, ale určitě bude stát za povšimnutí závislost průhybu na ceně konstrukce. Respektive převedení jednokriteriální optimalizace, kterou zatím disponuje modul EOT, na úlohu multikriteriální. To bude provedeno spolu s rozříděním dat na základě podobnosti vstupů či výstupů v podkapitole Shluková analýza.

4.2.3 Rozšířená původní skupina

Co do výčtu parametrů se tato skupina rovná skupině předešlé. Rozdíl je v použitých materiálech a posouzeních podle původní ČSN normy. I v tomto případě ale bude provedena číselná analýza závislostí parametrů na výsledné ceně konstrukce. Pro ukázkou možností optimalizačního modulu EOT byla optimalizace ukončena uživatelem po dosažení několika výsledků, které byly se svojí celkovou cenou konstrukce lepší, než původní model. Hodnoty parametrů a cílové funkce pro pět nejlepších řešení vygenerovaných do zastavení optimalizace jsou v Tab. 4-6 a Tab. 4-7.

Hodnoty parametrů průřezu prutových prvků nejlepších řešení uživatelem ukončené optimalizace - skupina Rozšířená původní						
Cena [Kč]	Parametry [mm]					
	a_beam	b_beam	a_colA	b_colA	a_colB	b_colB
218922	280	410	370	360	390	320
221162	330	420	310	320	330	380
227310	250	380	320	340	340	380
232992	300	400	400	400	350	350
248170	300	400	270	410	410	370

Tab. 4-6 Hodnoty parametrů průřezu nejlepších řešení – skupina Rozšířená původní

Hodnoty parametrů vyztužení prutových prvků nejlepších řešení uživatelem ukončené optimalizace - skupina Rozšířená původní						
Cena [Kč]	Parametry [mm]					
	D_beam	Dst_beam	D_colA	Dst_colA	D_colB	Dst_colB
218922	20	10	22	10	18	8
221162	18	8	18	8	22	14
227310	18	8	26	8	30	8
232992	20	8	20	10	24	12
248170	20	8	30	12	24	12

Tab. 4-7 Hodnoty parametrů vyztužení vybraná řešení – skupina Rozšířená původní

Z výše uvedených dat by se mohlo zdát, že určujícím vstupním parametrem v této skupině parametrizace je průměr třmínek nosníků, který má pro daná řešení téměř konstantní hodnotu. Ovšem tato závislost může být i náhodná vzhledem k tomu, že tato hypotéza byla vyřčena nad příliš malým počtem vzorků. Proto se u této skupiny parametrizace soustředíme, kromě již provedené časové analýzy v podkapitole časová náročnost, na porovnání výsledných hodnot cílové funkce s původním modelem. To bude provedeno v podkapitole Optimalizovaná vs. původní konstrukce.

4.2.4 Porovnání skupin parametrizace

Celkově jsme uvažovali se dvěma skupinami parametrizace, Základní a Rozšířenou. Druhá jmenovaná skupina byla použita jak pro optimalizaci konstrukce podle nyní platných Eurokódů, tak i pro optimalizaci s normovými požadavky podle starých ČSN norem. Zde budeme v opozici proti skupině parametrizace Základní porovnávat skupinu Rozšířenou, a to část dle současných norem. Cílem této práce totiž není ukazovat rozdíly mezi normami.

První podstatné srovnání nabízí již graf průměrných časů pro jedno řešení na Obr. 4-1v podkapitole Časová náročnost. Pro připomenutí jsou data z grafu pro vybrané skupiny v následující tabulce, kde je pro názornost i počet uvažovaných parametrů.

Průměrné časy jednoho řešení pro vybrané skupiny parametrizace				
Skupina	Počet parametrů	Nejmenší průměrný čas [min]	Celkový průměrný čas [min]	Nejvyšší průměrný čas [min]
Základní	6	9,5	19,3	19,3
Rozšířená	12	11,5	15,7	18,6

Tab. 4-8 Průměrné časy řešení pro vybrané skupiny parametrizace

Nejvyšší a celkové průměrné časy během optimalizace jsou nejspíše vzhledem k nereálným vygenerovaným sadám parametrů a díky tomu dlouhému výpočtu a posouzení. Hodnotou vhodnou pro porovnání jsou tedy nejmenší průměrné časy, které již ukazují na očekávaný poměr. Celkový čas optimalizace vychází pro Základní skupinu téměř 30 hodin, zatím co pro Rozšířenou skupinu je to přes 62 hodin. Rozdíl je dán nejen počtem vstupních parametrů, ale hlavně nastavením optimalizační metody. Podle Tab. 3-5 jsou rozhodující parametry v Základní skupině poloviční oproti druhé skupině.

Kromě času je dalším rozhodujícím údajem dosažená minimální hodnota cílové funkce. Pro porovnání je prvních pět optimálních hodnot z obou skupin v Tab. 4-9.

Prvních pět optim pro jednotlivé skupiny					
Skupina	Optimalizovaná cena konstrukce [Kč]				
Základní	230 393	235 502	238 966	240 774	243 332
Rozšířená	186 910	192 252	192 702	193 002	193 368
Rozdíl	43 483	43 250	46 264	47 772	49 964

Tab. 4-9 Porovnání optim vybraných skupiny parametrizace

Optima Základní skupiny vykazují minimálně o 40 tisíc horší cenu celkové konstrukce než je tomu u optim skupiny Rozšířené. Poměrově jde o 25 procent z ceny levnějšího optima. Za zmínku jistě stojí i fakt, že až dvacátému optimu Rozšířené skupiny parametrizace se vyrovná z pohledu ceny nejlepší řešení Základní skupiny parametrizace. I když optimalizace první skupiny trvá přibližně poloviční dobu než u skupiny druhé, tak úspora finančních hodnot je značná. Druhou stránkou věci je, že skupina s horšími optimy pro svou poměrně vysokou uniformitou prvků a vyztužení je více pro praktické využití.

4.3 Kontrola výsledků a praktický úhel pohledu

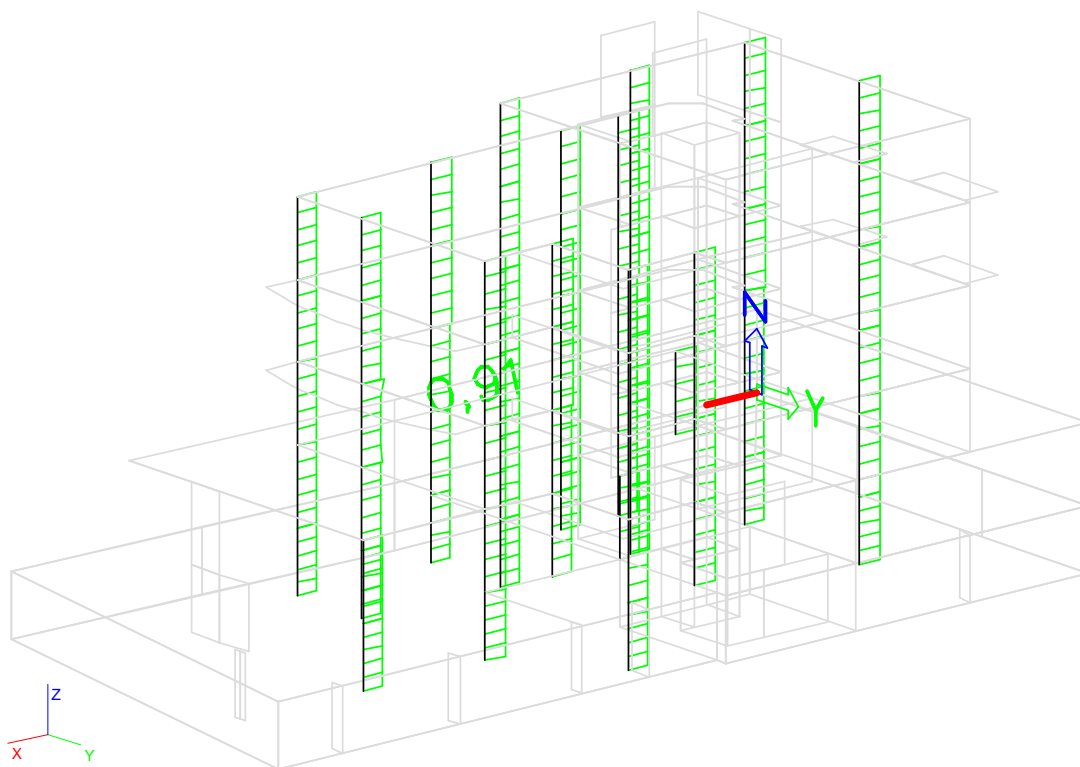
V této části práce se budeme zabývat už jen optimalizací podle aktuálních normových požadavků. Převedeno do skupin parametrizace budeme uvažovat optimální řešení pro skupinu Základní a Rozšířenou.

Výsledná data optimalizované konstrukce pro druhou zmíněnou skupinu si můžeme připomenout v Tab. 4-4, respektive v Tab. 4-5. Pro kontrolu omezujících podmínek a eventuální úpravu modelu při lehkém překročení posudku konstrukčních zásad vybereme nejlepší řešení z aplikace EOT. Toto řešení se budeme snažit střízlivě ohodnotit i praktickým okem. Vybrané řešení obsahuje následující data.

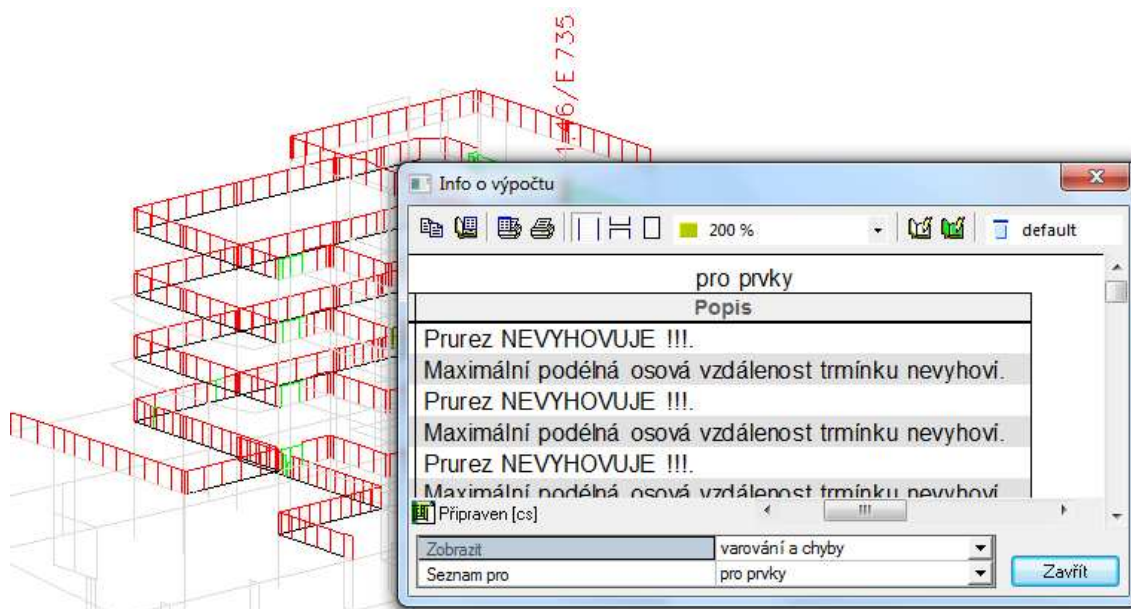
Data nejlepšího řešení z aplikace EOT pro Rozšířenou skupinu parametrizace					
Parametr	Hodnota [mm]	Parametr	Hodnota [mm]	Výstupní parametry	Hodnota
a_beam	190	D_beam	16	cena	186910 [Kč]
b_beam	300	Dst_beam	8	Uz_min	-4,572 [mm]
a_colA	410	D_colA	30	Checkcalc_max	0,908017 [-]
b_colA	370	Dst_colA	12	Checkcalc_max_2	1,455731 [-]
a_colB	270	D_colB	24	Checkcalc_max_3	0,734143 [-]
b_colB	420	Dst_colB	12		

Tab. 4-10 Nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrizace pro kontrolu modelu

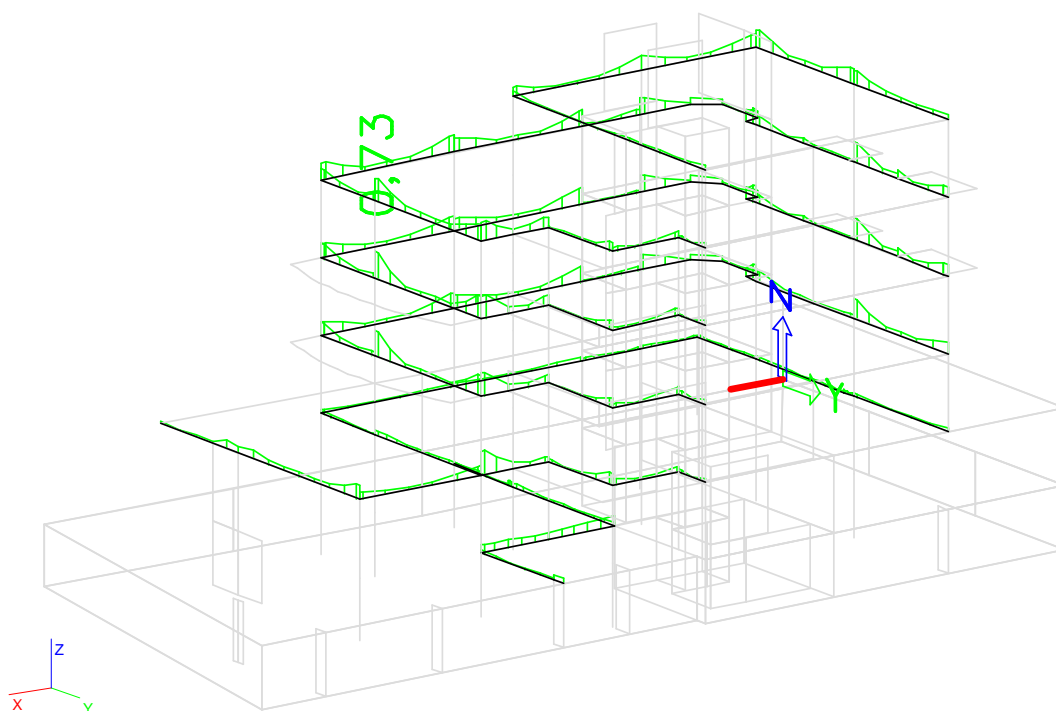
Nejprve provedeme grafickou porovnání posouzení z výstupních parametrů s hodnotami z modelu. Prvním bude souhrnný posudek sloupů na konstrukční zásady a posudek kapacity metodou interakčního diagramu Obr. 4-12. Následuje posouzení konstrukčních zásad nosníků Obr. 4-13. Další obrazovou kontrolou bude posouzení odezvy metodou mezních přetvoření pro nosníky Obr. 4-14. Posouzení pro mezní stav použitelnosti – trhliny, bylo provedeno až ručně po skončení optimalizace. Tato hodnota není v posudcích rozhodující. Překročení konstrukčních předpokladů, při jejichž dodržení se nemusí počítat šířka trhliny, bylo pouze v ojedinělých případech a navíc lokálního charakteru. Ke změně posudku do vyhovujících mezí povětšinou stačí lokálně upravit příčnou vzdálenost nebo průřez hlavní použité výztuže. Posledním ručním ověřením výsledků Rozšířené skupiny parametrizace jsou normové průhyby, které jsou počítány z nelineární kombinace zatížení pro beton a uvažují se smršťováním a dotvarováním betonu. Jeho globální extrém je -5,940 mm, což je hodnota stále ještě vyhovující i vzhledem k poloze extrému na dlouhém nosníku.



Obr. 4-12 Grafické posouzení sloupů pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů



Obr. 4-13 Grafické posouzení nosníků na konstrukční zásady pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů



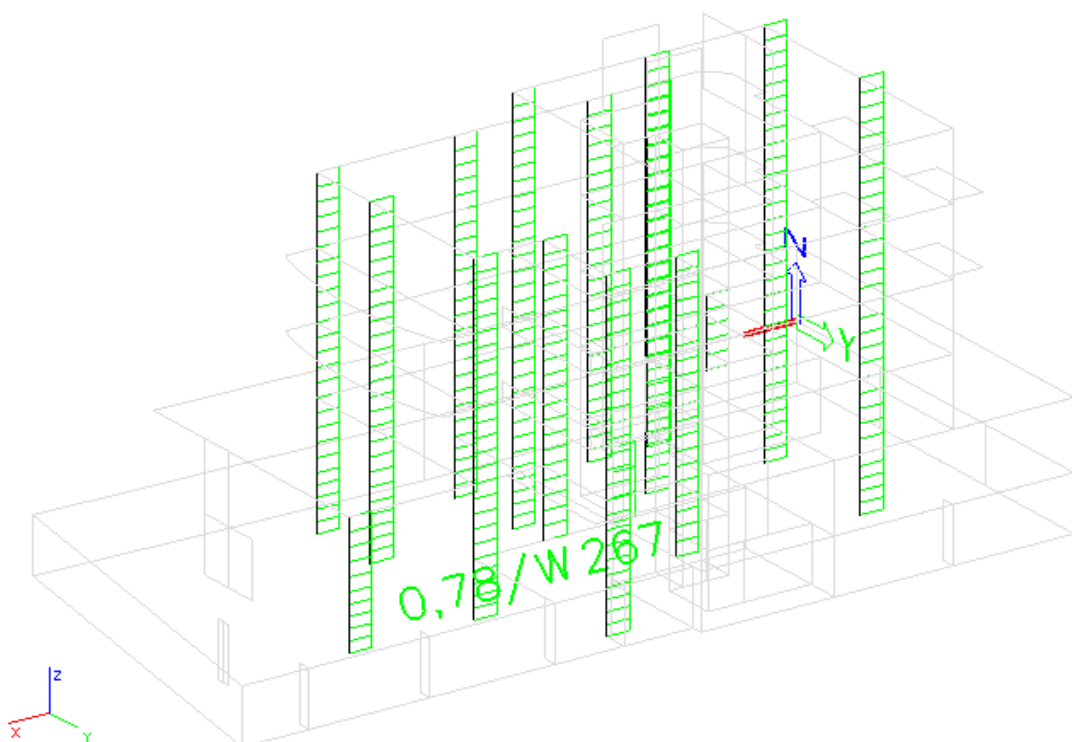
Obr. 4-14 Grafické posouzení nosníků metodou mezních přetvoření pro nejlepší řešení Rozšířené skupiny parametrů

Z grafických výstupů programu SEN je patrné, že výsledky dosažené optimalizací jsou pro dané vstupní parametry platné. Posudek konstrukčních zásad je v mezích okrajových podmínek a překročení jednotkového posouzení je díky nedodržení maximální možné podélné rozteče třmínků. Řešením problému je zkrácení rozteče a přidání potřebných třmínků tak, jak je to znázorněno na Obr. 3-4 a Obr. 3-5. Po zjemnění roztečí třmínků, které pak vyhovovaly konstrukčním zásadám, se hmotnost použité výztuže zvýšila o 50 kg. Vzhledem k tomu, že původní vypočítaná hmotnost výztužení $B500B_{weight}$ se rovnala 6550 kg, tak jsme se s hmotností přidanych třmínků snadno vešli do kýžených pěti procent z této hodnoty.

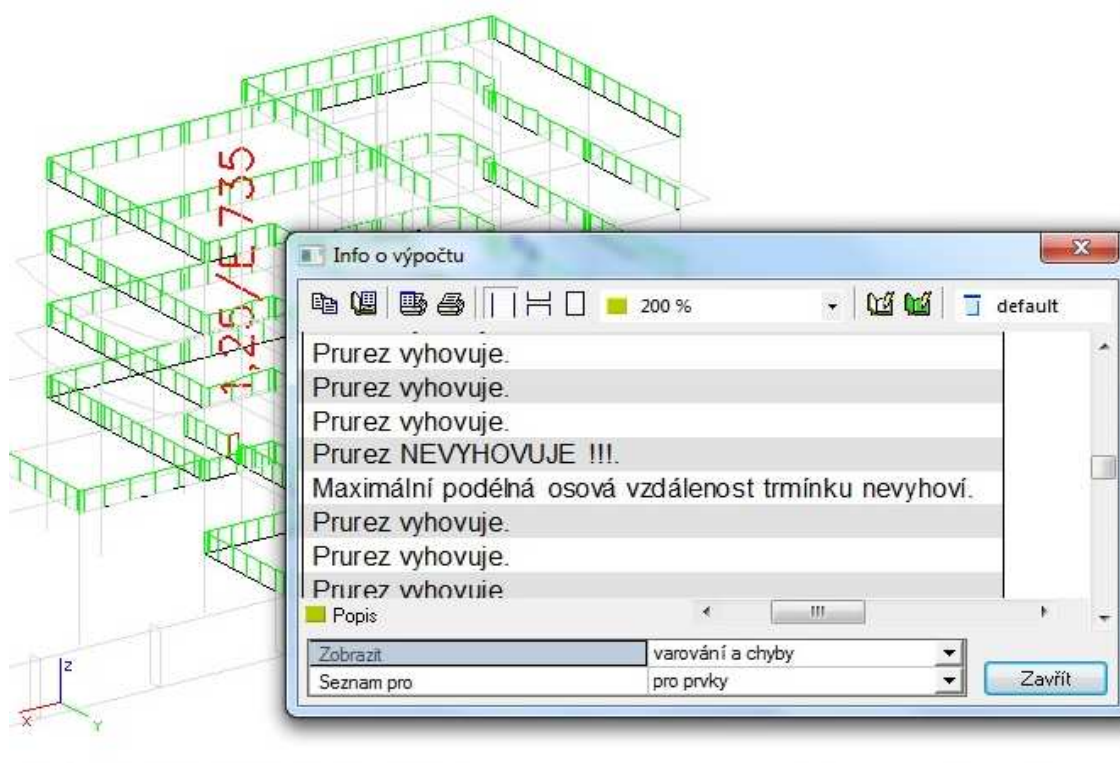
V dnešní době není problém technologicky navázat na sebe konstrukce rozličných tvarů. Trochu jiného názoru je dosavadní praxe, která se snaží o co největší uniformitu a jednoduchost. Z toho hlediska se nejlepší řešení z optimalizačního nástroje EOT nejeví jako ideální. Už tím, že výše postavené sloupy mají větší rozměry, než sloupy skupiny zahrnující první tři patra. Proto se podíváme i na posouzení nejlepšího řešení ze Základní skupiny parametrizace, i když je cenově méně výhodné, než řešení ze skupiny Rozšířené. Vstupní i výstupní hodnoty pro nejlepší řešení této skupiny parametrů je v Tab. 4-11. Opět se bude jednat o tři grafická posouzení Obr. 4-15, Obr. 4-16, Obr. 4-17 a dvě textová posouzení v pořadí, jako tomu bylo v Rozšířené skupině parametrů.

Data nejlepšího řešení z aplikace EOT pro Základní skupinu parametrizace			
Parametr	Hodnota [mm]	Výstupní parametry	Hodnota
a_beam	180	cena	230393 [Kč]
b_beam	350	Uz_min	-4,045 [mm]
a_colA	390	Checkcalc_max	0,782857 [-]
D_colA	26	Checkcalc_max_2	1,253142 [-]
D_colB	26	Checkcalc_max_3	0,507288 [-]
D_beam	24		

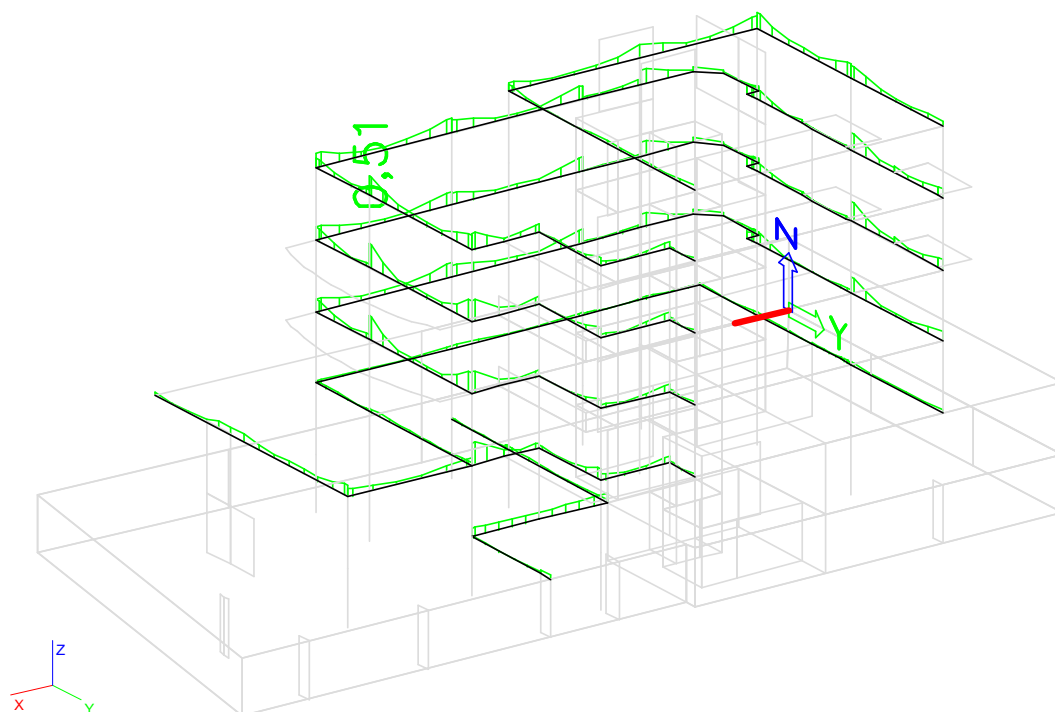
Tab. 4-11 Nejlepší řešení Základní skupiny parametrizace pro kontrolu modelu



Obr. 4-15 Grafické posouzení sloupů pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů



Obr. 4-16 Grafické posouzení nosníků na konstrukční zásady pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů



Obr. 4-17 Grafické posouzení nosníků metodou mezních přetvoření pro nejlepší řešení Základní skupiny parametrů

Jak je z grafických posouzení patrné, i v případě Základní skupiny parametrů nejlepší řešení vyhovuje zadaným omezujícím podmínkám. Překročení posudku konstrukčních zásad bylo jen malého lokálního charakteru a lze říci, že přídavek hmotnosti výztuže započítaný v optimalizaci by se mohl pro tento konkrétní příklad zpět odečíst. Hodnota cílové funkce by se tedy ještě přibližně o dvě až tři procenta snížila. Zároveň je z posudků sloupů patrné, že pro nejlepší řešení rozhodují u tohoto prvku konstrukční zásady.

Posudek trhlin na mezní stav použitelnosti pro nosníky vykazuje stejné chování a hodnoty, jako v předešlé skupině parametrizace. Opět dochází pouze k minimálním lokálním překročením. Normově závislý nelineární průhyb i s dotvarováním dosáhl pro prutové prvky maximálního globálního extrému -4,673 mm, což je hodnota vyhovující.

4.3.1 Optimalizovaná vs. původní konstrukce

Jestliže chceme porovnávat původní hodnoty cílové funkce s hodnotami, které jsou jako výstupy z optimalizační aplikace EOT, musíme nejprve stanovit pro původní modely celkový objem respektive hmotnost hlavních použitých materiálů. Tato data musíme určit jak pro model podle Eurokódů, tak pro model podle původních ČSN norem. Abychom získali porovnatelné hodnoty, musíme dodržet předpoklady automatického vyztužení, jakými jsou například maximální procento využití průřezu či uvažované profily výztuže. V parametricky vyztuženém modelu je nastaven jeden typ šablony s výztuží umístěnou v rozích prvku. Oproti tomu automatický návrh konstrukce při nenastavení dat na prutu předem vybranou šablonu vyztužení nemá. Navíc zde byla ponechána možnost krácení délky prutů při zachování třiceti procent výztuže, které jdou z podpory na podporu. Pro výpočet ceny konstrukcí původních modelů byla použita stejná rovnice jako při optimalizaci. Hodnoty hmotnosti výztuže, objemu betonu a celkové ceny konstrukce pro původní modely jsou v Tab. 4-12. Poté následuje přímo číselné porovnání cílové funkce pěti optimálních řešení jednotlivých skupin parametrizace s původními modely.

Celkové kvantitativní hodnoty materiálů a ceny pro původní modely v SEN			
Sada norem	Objem betonu [m ³]	Hmotnost výztuže [kg]	Cena konstrukce [Kč]
ČSN	86,769	5 640	252 498
Eurokódy	86,769	5 480	250 258

Tab. 4-12 Celkové kvantitativní hodnoty materiálů a ceny původních modelů v SEN

Porovnání ceny konstrukce původního a optimalizovaného modelu pro Základní skupinu parametrizace			
Optimum	Původní cena	Ušetřeno v %	Ušetřeno v Kč
230 393	250 258	7,72	19 865
235 502	250 258	5,89	14 756
238 966	250 258	4,51	11292
240 774	250 258	3,79	9484
243 332	250 258	2,77	6926

Tab. 4-13 Porovnání optim s původní cenou pro Základní skupinu parametrizace

Porovnání ceny konstrukce původního a optimalizovaného modelu pro Rozšířenou skupinu parametrizace			
Optimum	Původní cena	Ušetřeno v %	Ušetřeno v Kč
186 910	250 258	25,31	63 348
192 252	250 258	23,18	58 006
192 702	250 258	23,00	57 556
193 002	250 258	22,88	57 256
193 368	250 258	22,73	56 890

Tab. 4-14 Porovnání optim s původní cenou pro Rozšířenou skupinu parametrizace

Porovnání ceny konstrukce původního a optimalizovaného modelu pro skupinu parametrizace Rozšířená původní			
Optimum	Původní cena	Ušetřeno v %	Ušetřeno v Kč
218 922	252 498	13,30	33 576
221 162	252 498	12,41	31 336
227 310	252 498	9,96	25 188
232 992	252 498	7,73	19 506
248 170	252 498	1,71	4 328

Tab. 4-15 Porovnání optim s původní cenou pro skupinu parametrizace Rozšířená původní

Z předchozích tabulek je patrné, že čím více parametrů jsme do modelu zanesli, tím větší úspory se nám oproti původnímu modelu dostalo. A to i vezmeme-li v úvahu

optimalizaci podle původních ČSN norem, kde do porovnání vstupovaly průběžné hodnoty optimalizace. Zde se ukazují tři obecně možné postupy optimalizace železobetonových konstrukcí pomocí aplikace EOT s použitou metodou rozšířeného simulovaného žíhání.

Potřebujeme-li konstrukci optimalizovat v co nejrychlejším čase i s ohledem na praktické zvyklosti a bez zásahu uživatele, vyplatí se zavést do modelu jen několik parametrů a nastavit vybranou optimalizační metodu na rychlejší ukončení. Čas tak ušetříme nejen přímo při průběhu optimalizace, ale již při přiřazování parametrů entitám v modelu. Ovšem nezískáme moc velkou úsporu.

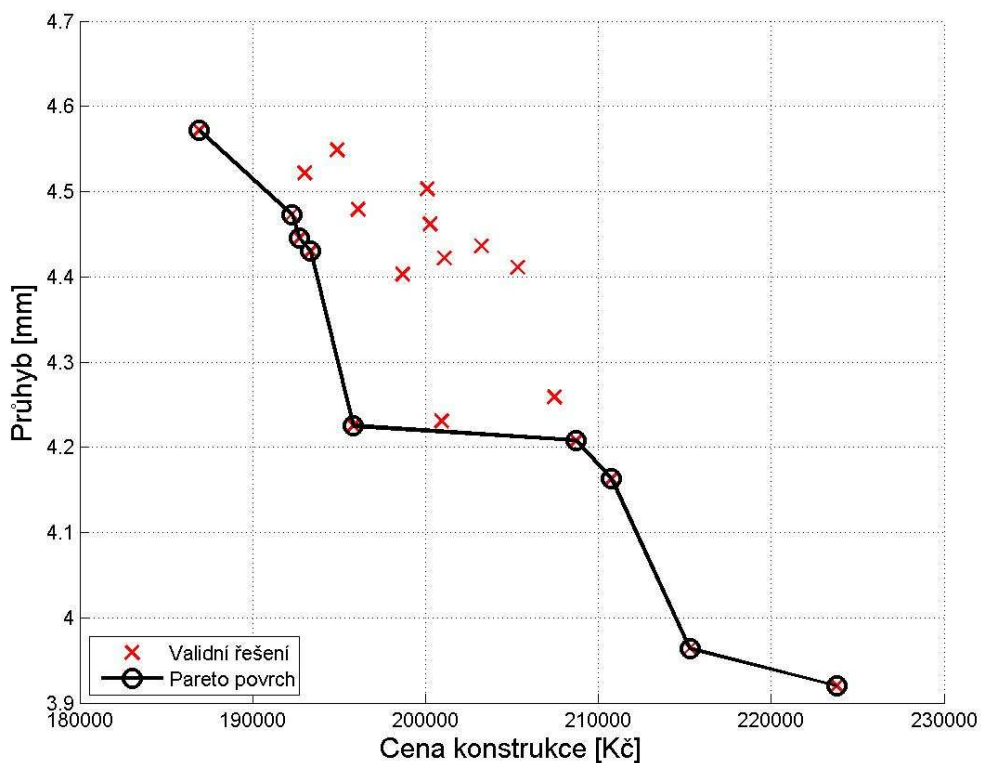
Naopak když tolik nespěcháme, například při výpočtu přes víkend, můžeme do modelu zavést větší počet parametrů i omezujících podmínek. Při vhodně zvolených omezujících podmínkách se nemusíme dostat mimo praktické řešení. Navíc úspora na hlavních materiálech konstrukce bývá v desítkách procent původních nákladů.

Kdybychom chtěli ušetřit více než v prvním případě, ale zároveň bychom nechtěli či nemohli čekat delší čas, vyplácí se použít více parametrů v kombinaci s náročnějším nastavením optimalizační metody. Ovšem samotnou optimalizaci ukončíme jako uživatelé sami například při dosažení uspokojivé hodnoty cílové funkce.

4.4 Multikriteriální optimalizace

V této části práce se soustředíme na další úpravu, roztřídění a analýzu výsledků z aplikace EOT. V té lze prozatím využít pouze jednokriteriální optimalizace. V praxi se ale často projektanti setkávají s úlohami vícekriteriální optimalizace. Jako příklad může posloužit dosažení co nejlevnější celkové ceny konstrukce spolu s požadavkem na co největší tuhost konstrukce, potažmo na minimální deformace. I když v našem případě optimalizace železobetonového skeletu hodnoty průhybů nebyly rozhodující a nedosahovaly závratných hodnot, pro ukázkou možného řešení multikriteriálního problému pomocí Pareto² povrchu budou tato data dostačující. Paretovo optimum je stav původně z ekonomické sféry, kdy žádný subjekt na trhu nemůže zvýšit svůj obrat či jiný parametr aniž by zároveň nesnížil obrat jiného subjektu. Využívá se v této teorii principu dokonalé konkurence. Paretův povrch budeme aplikovat na validní řešení z optimalizace Rozšířené skupiny parametrizace. V této skupině máme dostatečný počet vzorků k reprezentativní analýze. Na následujícím grafu jsou vynesena validní řešení Rozšířené skupiny parametrizace a to v závislosti výsledné ceny prutové konstrukce na maximální hodnotě průhybu. Průhyb je vynášen v kladných hodnotách, i když původně jsou jeho hodnoty vzhledem ke globální ose z záporné.

² Vilfredo Frederico Damaso Pareto – italský ekonom a sociolog. Tvůrce teorie oběhu elit.



Obr. 4-18 Pareto povrch pro závislost ceny na průhybu pro Rozšířenou skupinu parametrizace

Hodnoty parametrů průřezu prutových prvků a ceny pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů						
Cena [Kč]	Parametry [mm]					
	a_beam	b_beam	a_colA	b_colA	a_colB	b_colB
186 910	190	300	270	420	410	370
192 252	180	370	430	300	250	420
192 702	180	370	280	410	300	420
193 368	180	370	430	300	250	440
195 819	190	370	430	310	300	430
208 727	210	360	310	420	320	420
210 763	250	330	300	420	380	420
215 287	190	370	430	410	300	420
223 795	210	360	400	420	330	420

Tab. 4-16 Hodnoty parametrů průřezu pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů

Hodnoty parametrů vyztužení prutových prvků a ceny pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů						
Cena [Kč]	Parametry [mm]					
	D_beam	Dst_beam	D_colA	Dst_colA	D_colB	Dst_colB
186 910	16	8	30	12	24	12
192 252	16	8	30	12	26	12
192 702	16	8	30	12	26	12
193 368	16	8	30	12	26	12
195 819	16	8	30	10	26	10
208 727	22	10	18	12	26	8
210 763	22	12	18	12	20	8
215 287	16	10	30	12	26	12
223 795	22	12	18	12	26	8

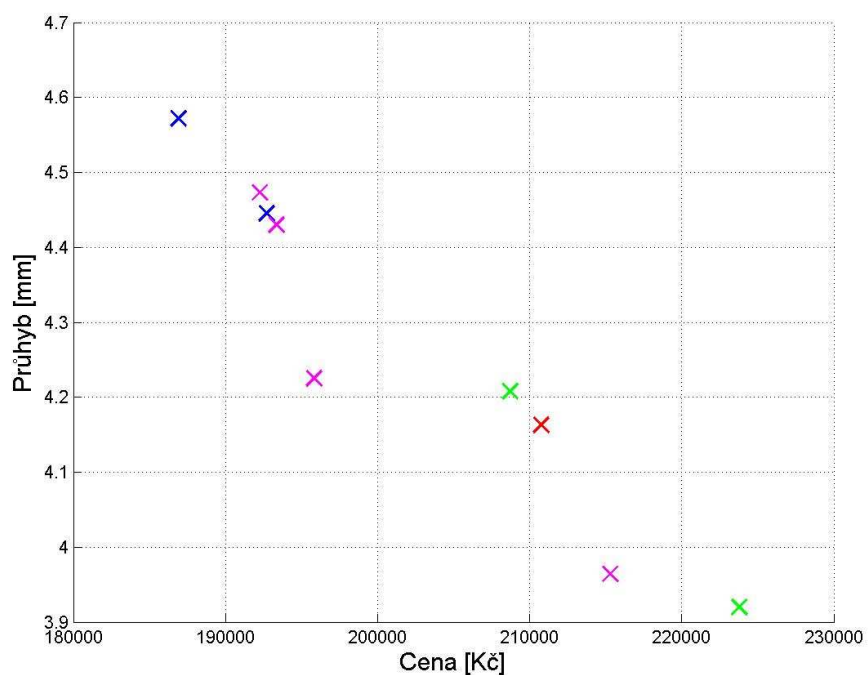
Tab. 4-17 Hodnoty parametrů vyztužení pro Pareto povrch – Rozšířená skupina parametrů

Tab. 4-16 a Tab. 4-17 nám ukazují hodnoty vstupních parametrů pro řešení nacházející se na křivce Paretova povrchu. Z těchto dat je jasné, že největší vliv na průhyb pro vybraná optima mají parametry nosníků, jejichž hodnoty s klesajícím průhybem rostou. Což se dalo očekávat vzhledem k tomu, že největšího průhybu dosahuje optimalizovaná konstrukce na výztužných žebrech. Obecně mají průřezové parametry sloupů oscilující charakter, oproti parametrům pro vyztužení, které jsou ve většině průběhu v závislosti na ceně konstantní. To je patrné již z grafu závislosti parametrů na ceně pro jednokriteriální optimalizaci Obr. 4-8, Obr. 4-9 a Obr. 4-10.

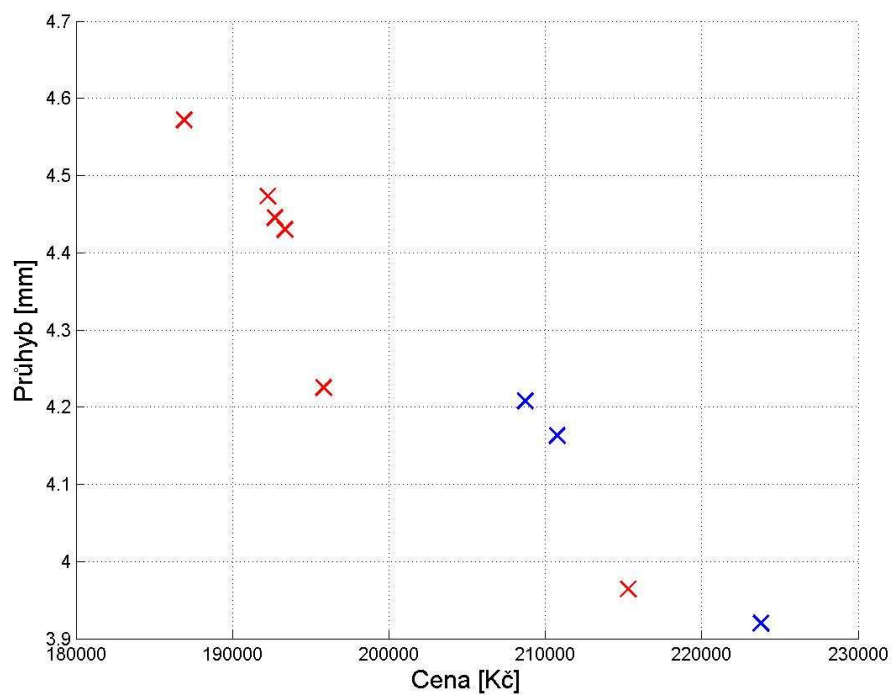
4.4.1 Shluková analýza

Sadu optim, kterou jsme získali nalezením Paretova povrchu z Obr. 4-18 podrobíme nadále analýze. Konkrétně provedeme shlukovou analýzu (angl. data clustering). Set rozdělíme na další oblasti na základě statistiky. Ucelený přehled a vysvětlení některých přístupů a metod klasifikace je například v práci od A. K. Jain a kol. v (28). Pro náš případ jsme vybrali iterační algoritmus K-means. Jeho vstupem je sada dat a počet vektorů. Nejprve se nastaví počáteční hodnota vektorů náhodně anebo pomocí heuristiky. Následuje klasifikace dat do skupin určených vektory podle minima Euklidovské vzdálenosti. Poté se vypočítají střední hodnoty dat ve skupinách, čímž se určí nové hodnoty vektorů. Poslední dva zmíněné kroky se provádí až do dosažení konvergenčního kritéria, kterým může být žádné opakované přiřazení vzorku do nové skupiny či minimální snížení střední kvadratické chyby. B. Balasko a kol. v práci (29) podrobněji popisují algoritmus v programu Matlab, který jsme pro analýzu použili.

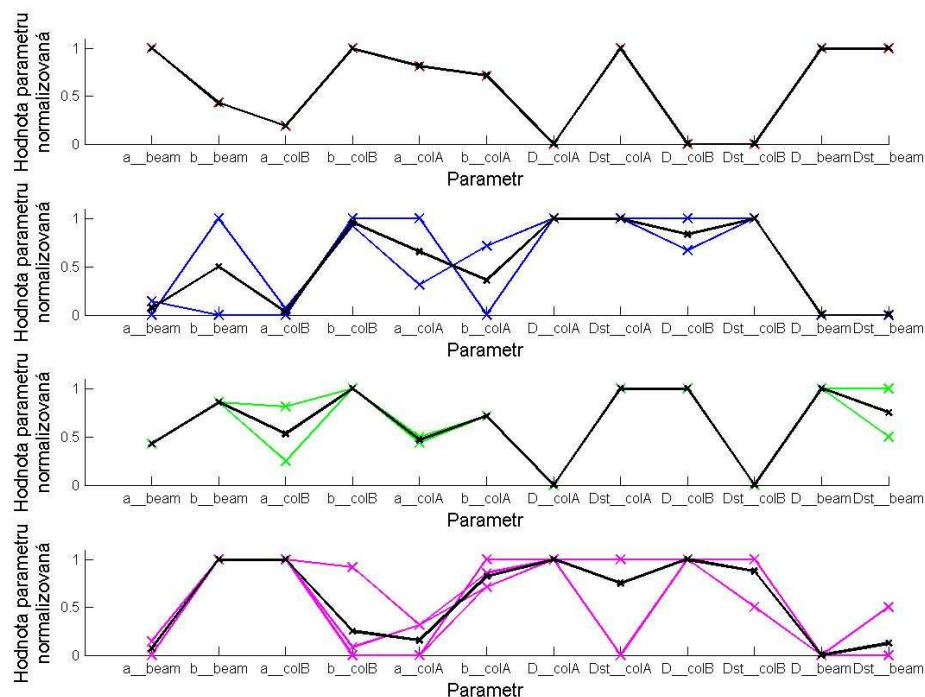
Sada dat byla algoritmem K-means rozdělena do dvou, respektive čtyř clusterů. Zároveň jsme analyzovali data na základě podobnosti vstupů ale i výstupů. Obrazová podoba analýzy je na následujících grafech.



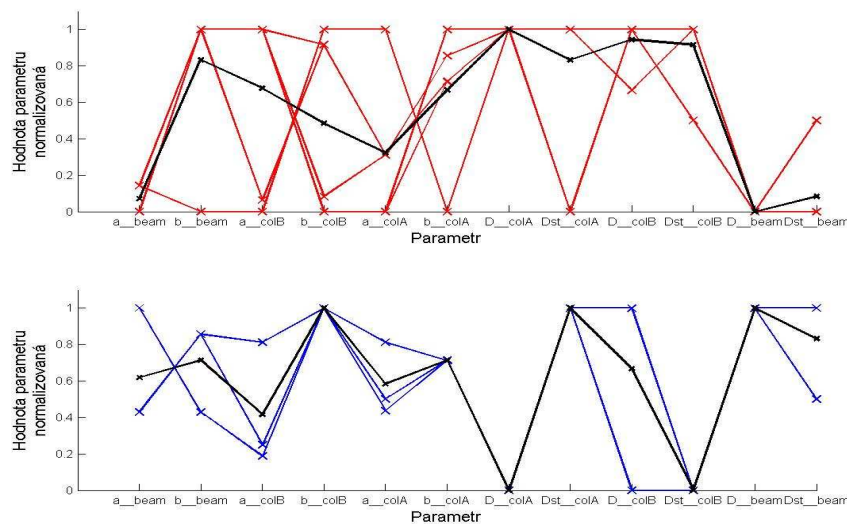
Obr. 4-19 Rozdělení Pareto povrchu do 4 clusterů na základě podobnosti vstupních parametrů



Obr. 4-20 Rozdělení Pareto povrchu do 2 clusterů na základě podobnosti vstupních parametrů

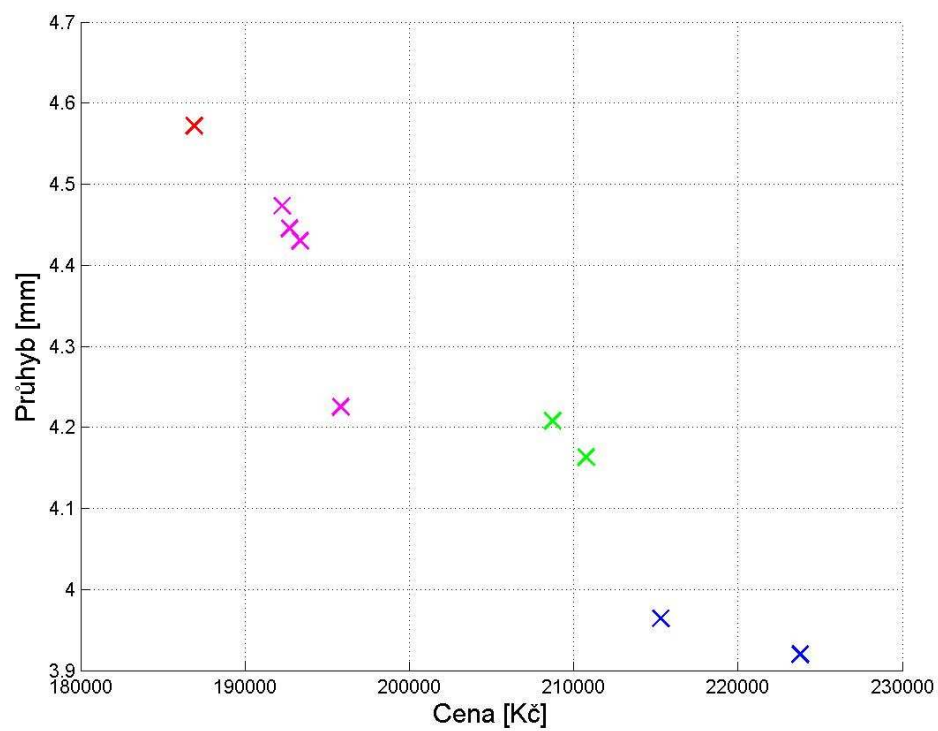


Obr. 4-21 Normalizované hodnoty vstupů a jejich průměry pro 4 clustery – podobnost vstupů

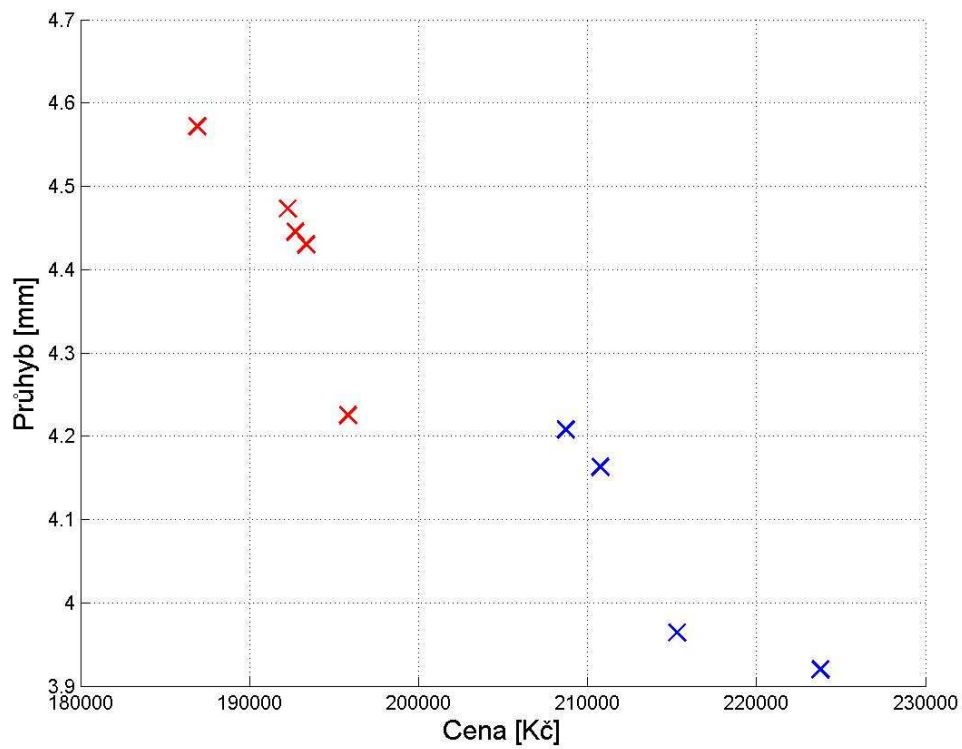


Obr. 4-22 Normalizované hodnoty vstupů a jejich průměry pro 2 clustery – podobnost vstupů

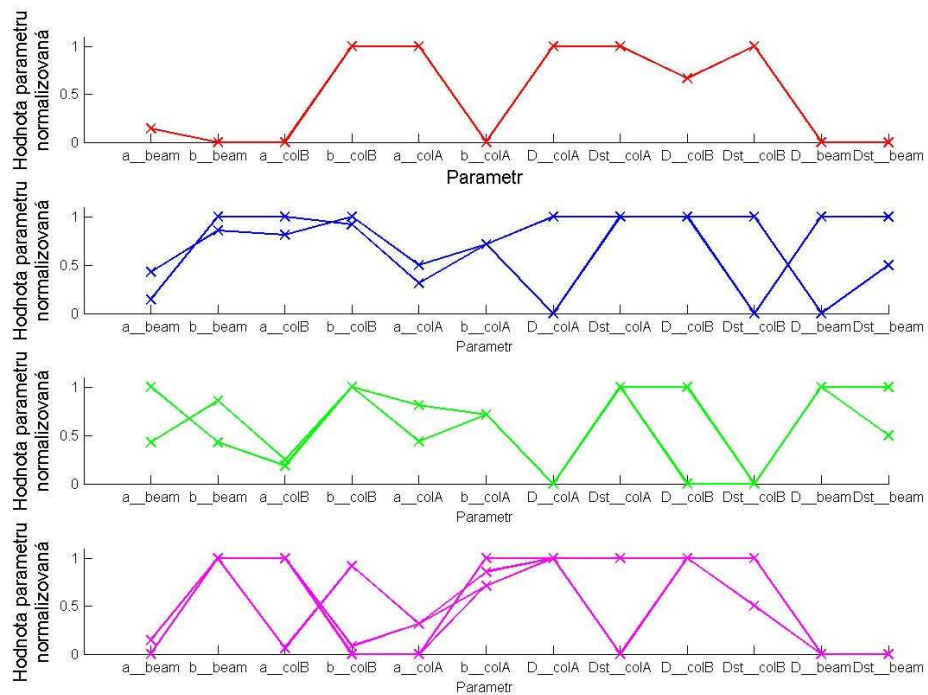
Z Obr. 4-19 a Obr. 4-20 je patrné, že podobnost vstupů rozděluje Pareto povrch na první pohled nejednoznačné části, což by se při neznalosti vstupů mohlo zdát jako špatné rozdělení. Ovšem křivky normalizovaných parametrů nám pro toto rozdělení poskytují důkaz, alespoň v případě rozdělení na čtyři clustery. V případě dvou clusterů je správnost rozdělení patrná až ze spojnice průměrů vstupních parametrů pro danou skupinu roztříděných vzorků. Podívejme se na rozdělení na základě výstupů.



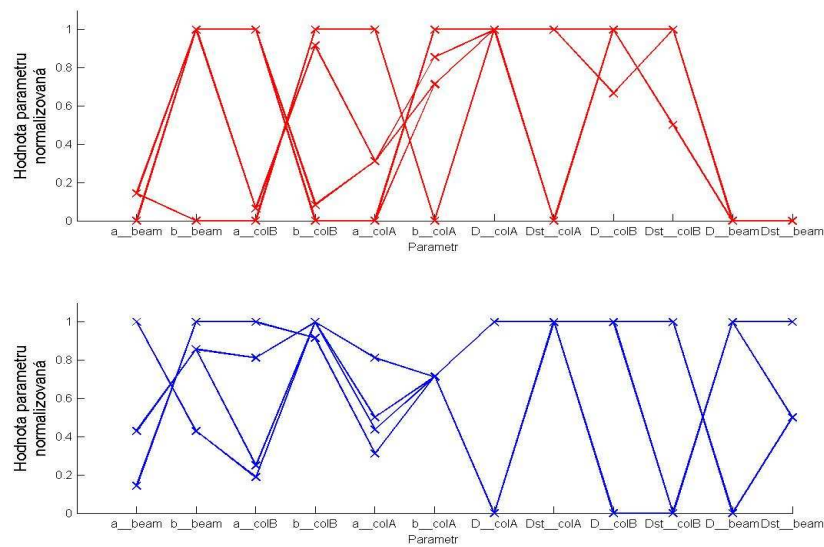
Obr. 4-23 Rozdělení Pareto povrchu do 4 clusterů na základě podobnosti výstupů (cena, průhyb)



Obr. 4-24 Rozdělení Pareto povrchu do 2 clusterů na základě podobnosti výstupů



Obr. 4-25 Normalizované hodnoty vstupů pro 4 clustery – podobnost výstupů



Obr. 4-26 Normalizované hodnoty vstupů pro 2 clustery – podobnost výstupů

Rozdělení Pareto povrchu na základě výstupů má plně očekávanou grafickou podobu. Průměrné hodnoty vstupních parametrů by vzhledem k značně oscilujícím hodnotám a porovnávání výstupů neměly žádnou vypovídající hodnotu. Ale i tak se nám potvrzuje teze, že nejmenších průhybů dostaneme při velké tuhosti žeber, tím pádem při větších hodnotách výšky průřezu nosníků, což ukazuje druhý ze čtyř clusterů.

5 ZÁVĚR

Průmyslem v Evropě dnes zmítá ekonomická krize. Ne jinak tomu je i ve stavebnictví. Stále větší nároky z řad investorů, státních orgánů a v neposlední řadě aktuálních norem, tzv. Eurokódů nutí projektanty využívat co nejvíce svých zkušeností a navrhovat ekologické a ekonomicky optimální stavby. I když jsou z matematické a IT oblasti známy metody a modely, jak lze provádět optimalizaci, projektant bez studování příslušného oboru jich těžko může využít. Ve stavebnictví se totiž nachází minimum nástrojů, které by rychle a efektivně inženýrům v projekci s problémem optimalizace pomohly. Navíc ve většině lidí, kteří se zabývají stavebnictvím, stále dřímá pocit, že optimalizace z hlediska konstrukce je vhodná pouze pro prefabrikaci a sériově vyráběné prvky. U železobetonu by podle nich šlo maximálně o panely a nosníky, které nejsou vyráběny in-situ. I tuto tezi jsme se snažili v uvedené práci vyvrátit.

Práce představuje stále se vyvíjející univerzální optimalizační modul EOT (Engineer Optimization Toolbox) v programu Scia Engineer, při návrhu železobetonového skeletu. Aplikace vznikla za spolupráce mezi firmou Nemetschek Scia a katedrou mechaniky Fakulty stavební ČVUT. Optimalizace a výsledky z ní jsou dále podrobeny analýze nejen z hlediska konstrukce, ale i samotného modulu.

Při návrhu skeletu jsme se soustředili na prutové prvky konstrukce, tedy sloupy, průvlaky a ztužující žebra. Jako podklad pro porovnání posloužil původní model dnes již postavené konstrukce. Model byl proveden podle požadavků v nynější době neplatných ČSN norem.

Proces optimalizace pomocí aplikace EOT se zkráceně skládá z tvorby a parametrizace modelu v programu Scia Engineer. Vytvořením XML souborů, které komunikují mezi optimalizačním modulem a modelem jako takovým. Následuje určení mezí pro vstupní parametry, vybrání potřebných výstupů, definování cílové funkce a omezujících podmínek, výběr a nastavení optimalizační metody. V současnosti je na výběr pět různých optimalizačních metod a možnost provádět jednokriteriální optimalizaci.

Pro analýzu optimalizace skeletu bylo vytvořeno několik modelů. Jeden reflektující původní návrh podle ČSN norem a další podle dnešních Evropských sjednocených norem – Eurokódů. Druhý zmíněný typ modelů byl navíc rozdělen do skupin parametrizace, pro ukázkou závislosti výstupů a času optimalizace při uvažování rozdílného počtu parametrů. Vybraná optimalizační metoda, konkrétně rozšířené simulované žíhání, byla nastavena odlišně pro jednotlivé skupiny parametrizace.

Z analyzovaných výsledků plyne, že již při malém počtu parametrů, velké unifikaci prvků a vyztužení, základním nastavení optimalizační metody a řádně ukončené optimalizaci se během dne dostaneme téměř na desetiprocentní úspory nákladů na konstrukci z hlediska jejich hlavních stavebních materiálů. Při vyšším počtu vstupních parametrů, nastavení větších hodnot proměnných metody a řádném ukončení optimalizačního procesu jsme se dostali dokonce na čtvrtinové úspory oproti původnímu návrhu konstrukce ovšem za cenu téměř dvojnásobného času než v prvním případě. Jako nejlepší možnost se jeví jakási kombinace výše uvedených přístupů, kdy při vyšším počtu parametrů je optimalizace zastavena uživatelem po dosažení uspokojivé hodnoty cílové funkce. Tím docílíme vyšších úspor za kratší časový úsek.

V praxi je často projektant postaven před mulikriteriální úlohu. Například získání co nejmenší ceny spolu s co největší tuhosti konstrukce. Vzhledem k tomu, že je v aplikaci EOT implementována pouze jednokriteriální optimalizace, byly výsledky z ní dále zpracovány a ukázána optima pomocí Pareto povrchu. Vždy je dobré vědět, jaký parametr má jaký vliv na optimální hodnoty cílové funkce. Proto byla provedena analýza jak pro samotný výstup z EOT, tak i pro data z Pareto povrchu, která navíc byla klasifikována a rozdělena na základě statistiky pomocí jednoduchých algoritmů.

V dalším pokračování vývoje aplikace bude snaha o paralelizaci výpočtů a tím i plné využití výkonu nejen jednoho vícejádrového počítače, ale i soustavy výpočetních strojů například ve statických kancelářích. To umožní nejen zavedení mnohem vyššího počtu parametrů, ale zároveň odpadnou časové limity a optimalizace proběhne na ještě složitějších konstrukcích. Naším dlouhodobým záměrem je optimalizace takzvaně přes noc. Samozřejmě je nutné optimalizační aplikaci vyzkoušet na více projektech a vytvořit tím tak podklad a pomůcku pro uživatele nejen při přiřazování parametrů entitám, ale také při výběru a nastavení optimalizačních metod.

BIBLIOGRAFIE

1. **Sarma, K. C. a Adeli, H.** Cost optimization of concrete structures. *Journal of structural engineering*. May 1998, stránky 570-578.
2. **Choi, Ch. K. a Kwak, H. G.** Optimum RC member design with predetermined discrete section. *Journal of Structural Engineering*. October 1990, stránky 2634-2655.
3. **Goldberg, D. E.** *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1989.
4. **Coello, C. C., Hernández, F. S. a Farrera, F. A.** Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert systems with applications*. 1997, stránky 101-108.
5. **Camp, Ch. V., Pezeshk, S. a Hansson, H.** Flexural design of reinforced concrete frames using genetic algorithm. *Journal of structural engineering*. January 2003, stránky 105-115.
6. **Lee, C. a Ahn, J.** Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm. *Journal of structural engineering*. June 2003, stránky 762-774.
7. **Balling, R. J.** Optimization of reinforced concrete frames. *Journal of structural engineering*. February 1997, stránky 193-202.
8. **Rafiq, M. Y. a Southcombe, C.** Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete biaxial columns supported by a declarative approach for capacity checking. *Computers and structures*. 1998, stránky 443-457.
9. **Rajeev, S. a Krishnamoorthy, C. S.** Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*. 1998, stránky 63-74.
10. **Rechenberg, I.** *Evolution strategy: Optimization of technical systems by means of biological evolution*. Stuttgart : Fromman-Holzboog, 1973.
11. **Rizzo, S., Spallino, R. a Giambanco, G.** Shakedown optimal design of reinforced concrete structures by evolution strategies. *Engineering Computations*. 2000, stránky 440-458.
12. **Fadaee, M. J. a Grierson, D. E.** Design optimization of 3D reinforced concrete structures. *Structural optimization*. 1996, stránky 127-134.
13. **Chen, S. F., Teng, J. G. a Chan, S. L.** Design of biaxially loaded short composite columns of arbitrary section. *Journal of structural engineering*. June 2001, stránky 678-685.
14. **Biondini, F. a Frangopol, D. M.** Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion. *Structural safety*. 2009, stránky 483-489.
15. **Koumoussis, V. K., Arsenis, S. J. a Vasiloglou, V. B.** Detailed design of reinforced concrete buildings using logic programming. *Advances in engineer software*. 1996, stránky 161-176.

16. **Šedlbauer, D.** Optimalizace železobetonového skeletu. Bakalářská práce, Praha : ČVUT, 2010.
17. **Steven, G.** Product and system optimization in engineering simulation. *FEnet Newsletter*. January 2003.
18. **Goldberg, D. E.** *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1989.
19. **Press, W. H., a další.** *Numerical recipes in C*. Cambridge : Cambridge University Press, 1992.
20. **Lepš, M.** Optimalizace železobetonového spojitého nosníku. Diplomová práce, Praha : ČVUT, 2000.
21. **Storn, R.** On the usage of differential evolution for function optimization. *In NAPHS*. pages 519-523,1996.
22. **Nosek, J.** *Stochastická optimalizace návrhu konstrukcí*. Diplomová práce, Praha : ČVUT, 2008.
23. **Čermák, M.** *Algoritmy pro nelineární prediktivní řízení*. Diplomová práce, Praha : ČVUT, 2006.
24. **Boggs, P. T. a Tolle, J. W.** Sequential Quadratic Programming. *Acta Numerica*. 4, pages 1-51, 1996.
25. **Gioda, G. a Maier, G.** Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity: Identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests. *International journal for numerical methods in engineering*. Vol. 15, pages 1823-1848, December 1980.
26. **Čermák, L. a Hlavička, R.** Mathonline. *Numerické metody*. [Online] 23. Leden 2006. [Citace: 20. 11 2011.] <http://mathonline.fme.vutbr.cz/UploadedFiles/246.pdf>.
27. **Blažek, R., a další.** Scia-Online. *White paper - Scia Engineer MOOT: Automatická optimalizace stavebních konstrukcí*. [Online] [Citace: 10. 12 2011.] [http://www.scia-online.com/WWW/WebSiteUS.nsf/0/ec7b97dcf5d8a199c1257935005865a6/\\$FILE/AT_TSL7KS.pdf/Scia-Engineer-MOOT-2011-CZE.pdf](http://www.scia-online.com/WWW/WebSiteUS.nsf/0/ec7b97dcf5d8a199c1257935005865a6/$FILE/AT_TSL7KS.pdf/Scia-Engineer-MOOT-2011-CZE.pdf).
28. **Jain, A. K., Murty, M. N. a Flynn, P. J.** Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*. 1999, 31.
29. **Balasko, B., Abonyi, J. a Feil, B.** Fuzzy clustering and data analysis toolbox. Veszprem, Hungary : autor neznámý, Veszprem 2008.
30. **Rizzo, S., Spallino, R. a Giambanco, G.** Shakedown optimal design of reinforced concrete structures by evolution strategies. *Engineering Computations*. 2000, stránky 440-458.
31. **Wikipedie.** *DXF - Wikipedie*. [Online] 8. 6 2011. [Citace: 27. 11 2011.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/DXF>.

SEZNAM PŘÍLOH

A	Výpis prvků a materiálů původního modelu z programu FEAT 2000	69
B	CD s .doc, .esa, .eot a .prj soubory	70

A VÝPIS PRVKŮ A MATERIÁLŮ PŮVODNÍHO MODELU Z PROGRAMU FEAT 2000

Výpis zadaných a použitých materiálů:

E1, E2	[kPa]	moduly pružnosti (E2 pouze pro ortotropní materiál)
ni		Poissonův součinitel
gama	[t/m3]	objemová hmotnost
K1, K2	[kN/m3]	koeficienty tepelné roztažnosti
útlum		dekrement útlumu

Materiál	Typ	E 1	ni	gama	K 1	E 2	K 2	útlum
	[kPa]		[t/m3]	[kN/m3]	[kPa]	[kN/m3]		
B35 BETON		3.250e+07	0.200	2.500	1.000e-05			0.100

Výpis zadaných a použitých průřezů:

Iy, Iz	[m4]	hlavní momenty setrvačnosti
Ik	[m4]	moment tuhosti v prostém kroucení
beta y, beta z		koeficienty smykové poddajnosti
P		plný průřez
S		složený
D		dílčí

Průřez	Materiál	Plocha [m2]	Iy [m4]	Iz [m4]	Ik [m4]	beta y	beta z
sloup30x90	B35	0.270	0.018	2.025e-03	6.561e-03	0.833	0.833
sloup30x60	B35	0.180	5.400e-03	1.350e-03	3.888e-03	0.833	0.833
sloup40x40	B35	0.160	2.133e-03	2.133e-03	3.840e-03	0.833	0.833
trám 40x47	B35	0.188	3.461e-03	2.507e-03	5.233e-03	0.833	0.833
trám 30x62	B35	0.186	5.958e-03	1.395e-03	4.069e-03	0.833	0.833
sloup20x90	B35	0.180	0.012	6.000e-04	2.058e-03	0.833	0.833
sloup 50	B35	0.196	3.068e-03	3.068e-03	6.136e-03	0.900	0.900
trám 30x42	B35	0.126	1.852e-03	9.450e-04	2.253e-03	0.833	0.833
trám 90x42	B35	0.378	5.557e-03	0.026	0.016	0.833	0.833
trám 40x42	B35	0.168	2.470e-03	2.240e-03	4.229e-03	0.833	0.833
sloup30x40	B35	0.120	9.000e-04	1.600e-03	2.074e-03	0.833	0.833

Výpis zadaných a použitých tloušťek:

Označení	Materiál	Tloušťka [m]
deska 22	*B35	0.220
stěna 20	*B35	0.200
stěna 25	*B35	0.250
zábradlí 10	*B35	0.100
balkon 18	*B35	0.180
zákl deska	*B35	0.300

B CD S .DOC, .ESA, .EOT A .PRJ SOUBORY