

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební  
Katedra mechaniky



Soutěžní práce

Optimalizace podrobného návrhu  
železobetonového skeletu

Soutěž o cenu akademika Bažanta

Praha, duben 2011

Bc. David Šedlbauer

## **ABSTRAKT**

V této práci se budeme zabývat železobetonovými stavbami a jejich optimalizací. Pokusíme se sestavit a namodelovat konkrétní příklad železobetonového skeletu a na něm ukázat využití a možnosti statického softwaru, respektive jedné z jeho aplikací, která umožňuje ruku v ruce s modelem provádět proces optimalizace. Bude nutné vytvořit nejméně dvě verze modelu a to jednu, která bude simulovat skutečnou stavbu a druhou, do které budou implementovány parametry. Parametry budou mít charakter jednak rozměrů samotných železobetonových prvků, ale také charakter průměrů výztužných prutů. Snahou bude ukázat, zda pomocí optimalizace lze snížit náklady na stavbu snížením nákladů na použité hlavní materiály, které charakterizují vlastnosti jako je hmotnost nebo objem. Samozřejmostí v procesu optimalizace ale bude splnění podmínek, které nám ukládají nové evropské normy, takzvané Eurokódy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

železobeton, optimalizace, parametry, rozšířené simulované žíhání, cena, Eurokódy

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on optimization of reinforcement concrete structures. We will try to construct and simulate a particular example of a load-bearing skeleton and expose static software opportunities, particularly one application, which is a part of this software. Mentioned application makes it possible to use the static model together with optimization. We will have to create two sets of models. The first one mimics a real structure. The second one is described by several parameters which include not only structural dimensions but also reinforcement dimensions as well as steel bars diameters. We would like to investigate, if it is possible to decrease structure costs, especially main material costs consisting of steel and concrete prices. Of course, each solution must fulfil european standards, so-called Eurocodes.

## **KEYWORDS**

reinforced concrete, optimization, parameters, augmented simulated annealing, price, Eurocodes

# OBSAH

<b>Obsah</b>	<b>iii</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>1</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>1</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Železobetonový skelet</b>	<b>2</b>
2.1 Charakteristika objektu .....	2
2.2 Materiálové a konstrukční řešení .....	3
2.3 Modely .....	6
2.3.1 Model v programu FEAT 2000 .....	7
2.3.2 Model v programu Scia Engineer 2010 .....	10
2.3.3 Porovnání modelů .....	12
<b>3 Optimalizace</b>	<b>13</b>
3.1 Optimalizace ve stavebnictví .....	13
3.2 Druhy optimalizací konstrukce .....	14
3.2.1 Topologická optimalizace .....	14
3.2.2 Optimalizace tvaru .....	14
3.2.3 Rozměrová optimalizace .....	15
3.2.4 Optimalizace skladby .....	15
3.3 Optimalizační metody .....	15
3.3.1 Příklady deterministických metod .....	16
3.3.2 Příklady stochastických metod .....	17
3.3.3 Příklady smíšených metod .....	18
3.4 Rozšířené Simulované žihání .....	20
3.5 Model pro optimalizaci .....	22
3.5.1 Model skutečného provedení .....	23
3.5.2 Parametrický model .....	28
3.6 EOT .....	35
<b>4 Výsledky</b>	<b>41</b>
4.1 Výsledky dosažené optimalizací .....	41
4.2 Kontrola a porovnání výsledků .....	45

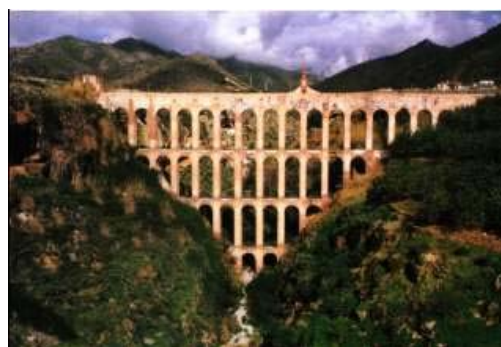
<b>5 Závěr</b>	<b>49</b>
<b>Literatura</b>	<b>50</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>52</b>

# 1 ÚVOD

Optimalizace, co se matematiky týče, je snahou o nalezení takových hodnot proměnných, pro které daná cílová funkce nabývá minimální nebo maximální hodnoty [1].

Ve 21. století a za současné hospodářské a ekonomické krize se většina optimalizací v kterémkoliv odvětví průmyslu točí, ať už přímo nebo okrajově, kolem otázky financí. Ve svém konečném důsledku důvody proč optimalizovat mohou být dvojího typu. Buď chceme maximalizovat zisk nebo minimalizovat náklady. Když se ale podíváme podrobněji na optimalizace přímo ve stavebnictví, není dělení těchto úloh tak jednoznačné.

Počátky optimalizace ve stavebním oboru se objevují již ve starověku. Jako příklad vezměme v úvahu stavbu typu řeckého Amfiteátru, kde hlavním účelem bylo, aby diváci mohli vidět z každého pro ně určeného místa doprostřed arény (obr. 1-1 - vlevo). Nabízelo se zajisté mnoho variant. Obdélníková stavba s ustupujícím hledištěm, polokruhová stavba s vysokou zdí a okolním hledištěm nebo výsledná kruhová stavba s patrovým hledištěm, která je z uvedených variant nejlepší a za daných podmínek tedy optimální. Z dalších staveb, kde je možné použít optimalizaci, můžeme zmínit akvadukty (obr. 1-1 - vpravo). Překonat účelně a ekonomicky výhodně území se složitým terénem a zachovat sklon stavby, aby mohla voda podle svých fyzikálních vlastností volně téci, je úloha pro optimalizaci jako stvořená. Ovšem nejen architektonická, ale i materiálová řešení se zefektivňovala. Samozřejmostí je použití přírodního materiálu na stavbu hráze (kamene zeminy), který se nachází v oblasti budoucí stavby, než složitě dopravovat o něco vhodnější materiál. Toto pravidlo platilo ve středověku, ale s úspěchem je využíváno i v dnešní době.



**Obr. 1-1:** Historické stavby možné pro využití optimalizace, vlevo Koloseum [2], vpravo akvadukt [2]

S nástupem moderní výpočetní techniky však získaly optimalizační úlohy zcela nový rozměr. Už se neřeší problémy pouze s jedním či dvěma parametry se ziskem jen několika výsledných variant, ale díky rychlosti počítačů můžeme užít i desítku parametrů a dostat i několik stovek tisíc výsledných možných variant a z nich vybrat tu, která nás zajímá. I samotný počet typů optimalizačních metod se výrazně rozrostl, ale o tomto podrobněji až v samotné kapitole Optimalizace.

## 2 ŽELEZOBETONOVÝ SKELET

### 2.1 Charakteristika objektu

Objekt, který se v dalších částech práce budeme snažit optimalizovat, je situován do části Prahy 6, Veleslavín, konkrétně do ulice Pod novým lesem 137/52. Jedná se o bytový dům, který byl navržen jako železobetonový skelet o pěti nadzemních a jedním podzemním podlažím (obr. 2-1). V prvním až pátém nadzemním podlaží se nacházejí byty a v podzemním podlaží je garážové stání pro residenty. V každém z obytných podlaží je 4-5 bytů. Objekt byl postaven v roce 2003 do proluky k již stávajícímu obytnému domu. Fotodokumentace stavby se nachází v příloze A.

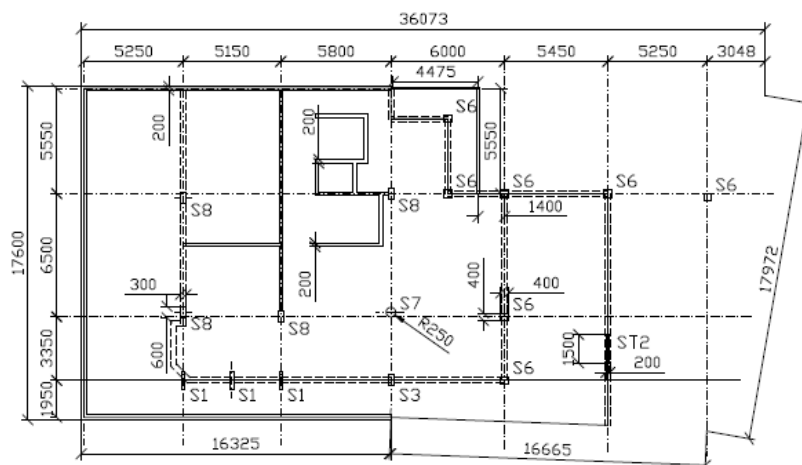
Pozemek, na kterém byl objekt postaven, je rozměrů zhruba 18x40m, má celkovou výměru přibližně 700 m<sup>2</sup>. Pozemek je v relativně příkrém svahu, tudíž garáže jsou částečně zapuštěné v zemi. Ve spodní části garáží, která není v zemi, je vjezd do garáží. Na opačné straně objektu a o patro výše je hlavní vchod. Vzhledem k základovým poměrům má zemina v okolí vesměs pískovcový charakter.



**Obr. 2-1:** Pohled na jižní fasádu obytného domu

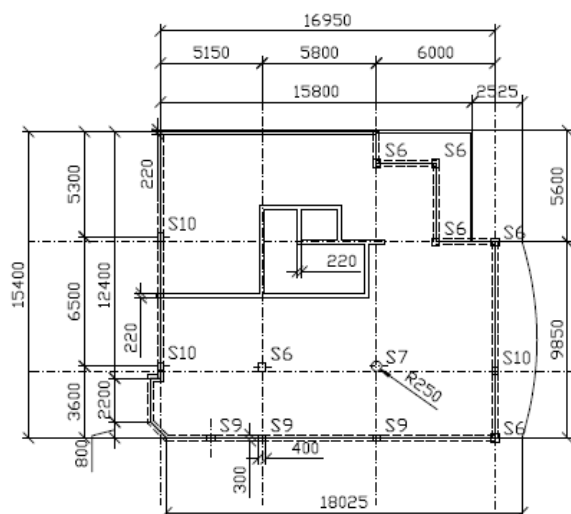


Síť sloupů pro první nadzemní podlaží není úplně pravidelná (obr. 2-3). Důvody, proč na sebe nenavazují sloupy z garáží jsou: rozdílný účel podlaží, kdy první nadzemní patro už slouží jako obytné, rozdílná geometrie patra, jiné hodnoty zatížení, ale především architektonický záměr. Obvodová železobetonová stěna je již pouze ve styku s původní zástavbou, a v místech, kde konstrukce ještě není zcela nad úroveň terénu (jižní strana stavby). V tomto patře se také nachází hlavní vchod do budovy a na severní části konzolově uložený balkón půdorysného tvaru L. Celková plocha podlaží i s balkónem je zhruba 450 m<sup>2</sup>. Konstrukční výška 1. NP je 2,95 metru.



**Obr. 2-3:** Skica 1. NP (rozměry v milimetrech)

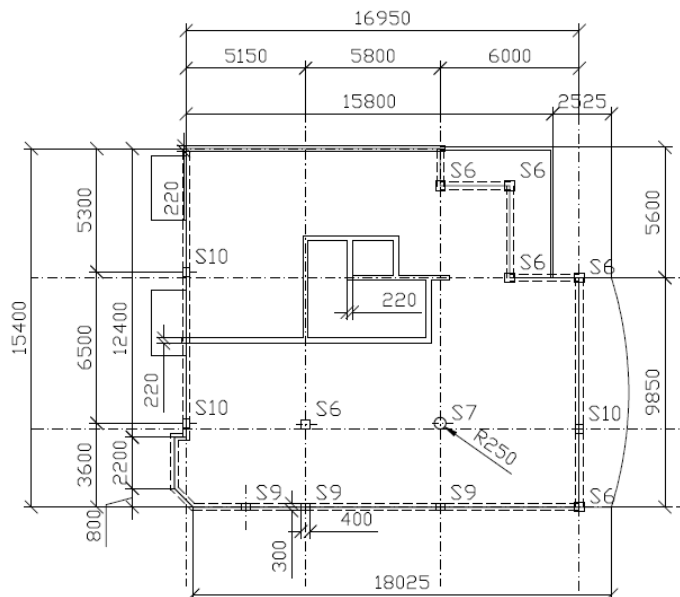
Druhé nadzemní podlaží je, co se sítě sloupů ve skeletovém systému týče, shodné s prvním nadzemním podlažím. To, co obě podlaží od sebe odlišuje, je další balkón na severní straně objektu a železobetonová zeď pouze na straně zástavby (obr. 2-4). Tento balkón je přes celou stranu patra a jeho kontura je zaoblená, narozdíl od ostrých tvarů, které charakterizují většinu objektu. Další odlišností je menší půdorys. Celková půdorysná plocha 2. NP je 265 m<sup>2</sup>. Konstrukční výška patra je stále 2,95 m.



**Obr. 2-4:** Skica 2. NP (rozměry v milimetrech)

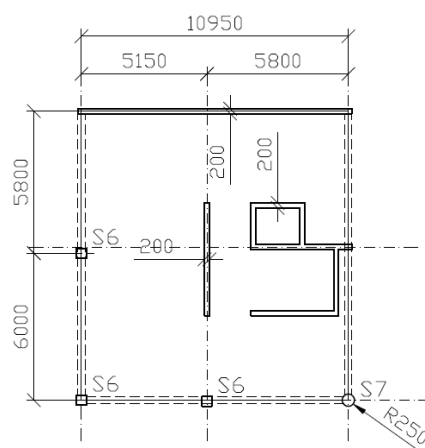


Třetí a čtvrté nadzemní podlaží je konstrukčně a rozměrově totožné. Odlišnostmi od druhého nadzemního patra jsou především dva balkóny, tentokrát na jižní straně bytového domu (obr. 2-5). Narozdíl od balkonů na protilehlé straně patra mají tyto balkóny čistě obdélníkový půdorys. Hlavně díky těmto konzolovým konstrukcím se nepatrně zvýší půdorysná plocha patra na 275 m<sup>2</sup>. Konstrukční výška patra je 2,95 m.



**Obr. 2-5:** Skica 3 a 4 NP (rozměry v milimetrech)

Páté nadzemní podlaží postrádá oproti předešlým patřům jakoukoliv konzolovou, předsunutou konstrukci. Zachována je síť sloupů a železobetonová stěna na styku s vedlejším obytným domem (obr. 2-6). Jako ve všech nižších patrech i zde je ke ztužení využito obvodových žeber desky a konstrukce železobetonového schodišťového jádra. Nad tímto patrem se ještě nachází strojovna výtahu a je sem vytažena i konstrukce schodů a jádrové stěny.



**Obr. 2-6:** Skica 5 NP (rozměry v milimetrech)

## 2.3 Modely

Železobetonový skelet byl postaven dle statického posouzení modelu vytvořeném v programu FEAT 2000. Jak sám název programu a datum dokončení stavby (2003) ukazují, doba, ve které byla statika počítána, byl přelom milénia. V tom čase se na území České republiky často navrhovalo podle norem ČSN, i když v platnosti byly již takzvané přechodné evropské normy ENV, které byly mezikrokem k přechodu z českých ČSN norem na evropské normy, takzvané Eurokódy. Dnes se již navrhuje právě podle Eurokódů, kdy v návaznosti na povinnosti vyplývající z členství v CEN (evropská normalizační organizace) se od 1. dubna 2010 nahrazují původní ČSN pro navrhování stavebních konstrukcí souborem ČSN EN Eurokódů.

Z důvodů popsaných v prvním odstavci je velice zajímavé porovnání původního navrhování objektu, kdy bylo použito norem ČSN a programu FEAT 2000, s navrhováním objektu podle dnes platných norem ČSN EN a s použitím novějšího statického softwaru Scia Engineer 2009 a Scia Engineer 2010.

I když se to vzhledem ke jménům obou statických programů nezdá, jeden je vývojovým předchůdcem druhého. Z čísel roků za jmény softwarů, tedy z čísel 2000 a 2009 respektive 2010 je patrné, který program ze kterého vycházel. Různé označení programů má však své historické opodstatnění. Scia, původem belgická firma, totiž kupila společnost IDA. To byla firma, která je podepsána pod statickým programem NEXIS. Ten byl rozšířený hlavně na území Moravy a Slezska. Ovšem tímto expanze „Belgičanů“ do české republiky neskončila. Ba naopak. Scia koupila další firmu, která se zabývala softwarem pro statiky a projektanty. Tou firmou byl Smartsoft. A právě jeho produktem byl FEAT 2000, hojně rozšířený na území Čech. Později koupila akcie Scii firma Nemetschek a tím pádem se změnil i její název na Nemetschek Scia, která stojí za druhým, v této práci hodně skloňovaným programem Scia Engineer. Postupný vývoj s některými mezi produkty je ukázán v následujícím přehledu.

### **Přehled vybraných verzí jednotlivých programů**

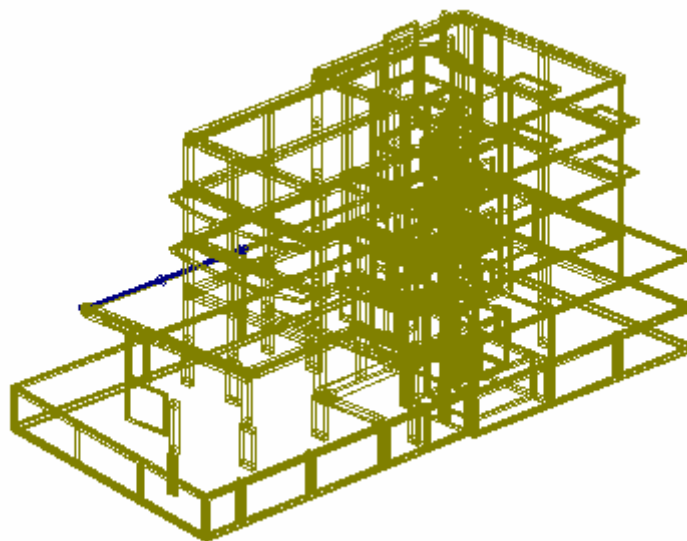
FEAT 98	Esa.PT	Scia Engineer 2008
FEAT 2000		Scia Engineer 2009
		Scia Engineer 2010

Pozn.: Produkt Esa. PT se odlišoval označením verzí například 5.1 a podobně, nikoliv podle jednotlivých roků.

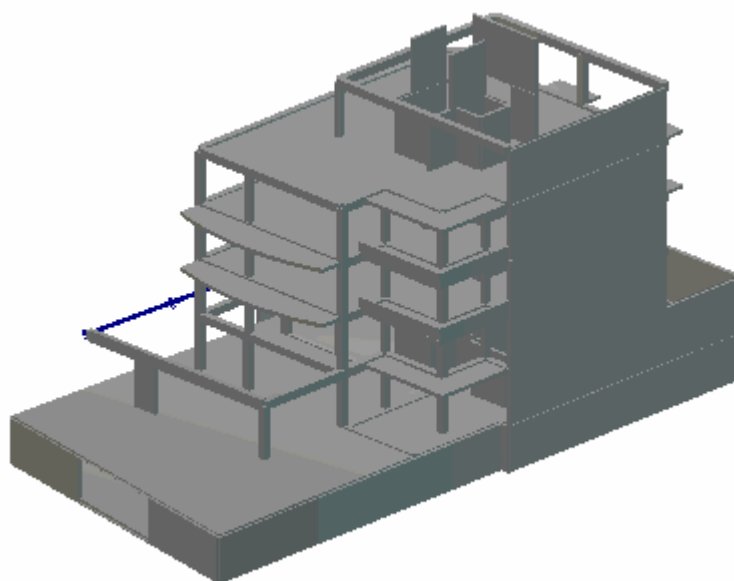
### 2.3.1 Model v programu FEAT 2000

Ve statickém softwaru FEAT 2000 byl vytvořen model objektu a vyhodnoceny účinky zatížení působící na konstrukci. Tento výsledný model a výsledky se skutečně objevily ve statickém posouzení dnes již stojícího objektu.

V kapitole Materiálové a konstrukční řešení již bylo poznamenáno, že v objektu není v každém podlaží stejná síť sloupů, ani stejné rozměry použitých prvků konstrukce. Z tohoto důvodu si řekneme postupně po patrech, jaké byly přesně prvky a jejich dimenze použité v modelu.



**Obr. 2-7:** Obrysový model objektu z programu FEAT 2000



**Obr. 2-8:** Rendrový model objektu z programu FEAT 2000

<b>1. podzemní patro</b>		
<b>Hlavní účel podlaží</b>	garážová stání	
<b>Typ konstrukce</b>	<b>Prvek</b>	<b>Hlavní rozměrové parametry</b>
svislé konstrukce	sloupy	300x900 mm 300x600 mm 200x900 mm
	stěny vnitřní, jádrové	tloušťka 200 mm
	stěny obvodové	tloušťka 250 mm
vodorovné konstrukce	stropní deska	tloušťka 300 mm
	průvlaky	300x420 mm 900x420 mm
<b>1. nadzemní patro</b>		
<b>Hlavní účel podlaží</b>	obytné plochy	
<b>Typ konstrukce</b>	<b>Prvek</b>	<b>Hlavní rozměrové parametry</b>
svislé konstrukce	sloupy	400x400 mm 300x600 mm 200x900 mm Ø500 mm
	stěny vnitřní, jádrové	tloušťka 200 mm
	stěny obvodové	tloušťka 250 mm
vodorovné konstrukce	stropní deska	tloušťka 250 mm
	průvlaky	400x470 mm 400x420 mm
<b>2. nadzemní patro</b>		
<b>Hlavní účel podlaží</b>	obytné plochy	
<b>Typ konstrukce</b>	<b>Prvek</b>	<b>Hlavní rozměrové parametry</b>
svislé konstrukce	sloupy	400x400 mm 300x400 mm Ø500 mm
	stěny vnitřní, jádrové	tloušťka 220 mm
vodorovné konstrukce	stropní deska	tloušťka 220 mm
	průvlaky	400x470 mm
<b>3. a 4. nadzemní patro</b>		
<b>Hlavní účel podlaží</b>	obytné plochy	
<b>Typ konstrukce</b>	<b>Prvek</b>	<b>Hlavní rozměrové parametry</b>
svislé konstrukce	sloupy	400x400 mm 300x400 mm Ø500 mm
	stěny vnitřní, jádrové	tloušťka 220 mm
vodorovné konstrukce	stropní deska, balkón	tloušťka 220 mm, balkón 150 mm
	průvlaky	400x470 mm
<b>5. nadzemní patro + strojovna</b>		
<b>Hlavní účel podlaží</b>	obytné plochy	
<b>Typ konstrukce</b>	<b>Prvek</b>	<b>Hlavní rozměrové parametry</b>
svislé konstrukce	sloupy	400x400 mm Ø500 mm
	stěny vnitřní, jádrové	tloušťka 200 mm
vodorovné konstrukce	stropní deska	tloušťka 220 mm
	průvlaky	400x470 mm

**tab. 2-1:** Tabulka specifikací konstrukčních prvků jednotlivých podlaží

Součástí každého statického návrhu, ať už předběžného či finálního, je určení zatížení na konstrukci a poté výpočet vnitřních sil v konstrukci. Ve statických softwarech je velmi výhodné používaná zatížení dávat do zatěžovacích stavů. Jednak nám rozdělení zlepšuje přehlednost použitých zatížení, ale hlavně se pro jednotlivé zatěžovací stavy snáze vytvoří kombinace. Z kombinací vzejdou výstižnější výsledky vnitřních sil, než kdybychom násobili pouze jednotlivá zatížení zvlášť.

U modelu z programu FEAT 2000 pro zvolenou konstrukci bylo použito pět zatěžovacích stavů a tři kombinace zatížení, jak ukazuje následující výpis z programu.

**Výpis zatěžovacích stavů:**

Jméno	Koeficient	Typ zatížení
vl. tíha	1.100	Perm - stálé 0
stálé	1.100	Long - dlouhodobé
užitné	1.400	Short - krátkodobé
vztlak	1.100	Short - krátkodobé
vítr	1.200	Short - krátkodobé

**Výpis kombinací zatěžovacích stavů:**

Jméno	ZS	Koeficient	Jméno	ZS	Koeficient	Jméno	ZS	Koeficient
KZS1	vl. tíha	1.100	KZS2	vl. tíha	1.100	KZS3	vl. tíha	1.000
	stálé	1.100		stálé	1.100		stálé	1.100
	užitné	1.400		užitné	1.400		užitné	1.400
	vítr	1.200		vztlak	1.100		vztlak	1.100
							vítr	1.200

Přiřazení koeficientu u zatěžovacích stavů a zatěžovacích kombinací se řídí normou ČSN 73 0035 Zatížení stavebních konstrukcí, která už s datem 1.4.2010 pozbyla své platnosti. Tato norma byla nahrazena nyní platnými Eurokódy.

Náhrady normy ČSN 73 0035		
označení	název normy	účinnost
ČSN EN 1990	Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí	IV.04
ČSN EN 1991-1-1	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb	IV.04
ČSN EN 1991-1-3	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem	VII.05
ČSN EN 1991-1-4	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem	V.07
ČSN EN 1991-1-5	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou	VI.05
ČSN EN 1991-1-6	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-6: Obecná zatížení - Zatížení během provádění	XI.06
ČSN EN 1991-1-7	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-7: Obecná zatížení - Mimořádná zatížení	I.08
ČSN EN 1991-3	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 3: Zatížení od jeřábů a strojního vybavení	II.08

**tab. 2-2:** Náhrady normy ČSN 73 0035 [7]

### 2.3.2 Model v programu Scia Engineer 2010

Pro potřeby optimalizace je program FEAT 2000 nedostačující. Jediný prvek optimalizace, kterou v sobě FEAT 2000 obsahuje, je totiž Autodesign. V navazujících statických softwarech od firmy Nemetschek se již objevují optimalizace v tom pravém slova smyslu. Nejnovější nástroj této firmy, který umí využít některé typy optimalizačních metod, je Scia Engineer 2010. Díky zmíněným důvodům bylo nutné vymodelovat danou konstrukci i v tomto programu. Zároveň se nám nabízí možnost posouzení a srovnání nejen přímo statických programů, ale i vstupů a výstupů z nich.

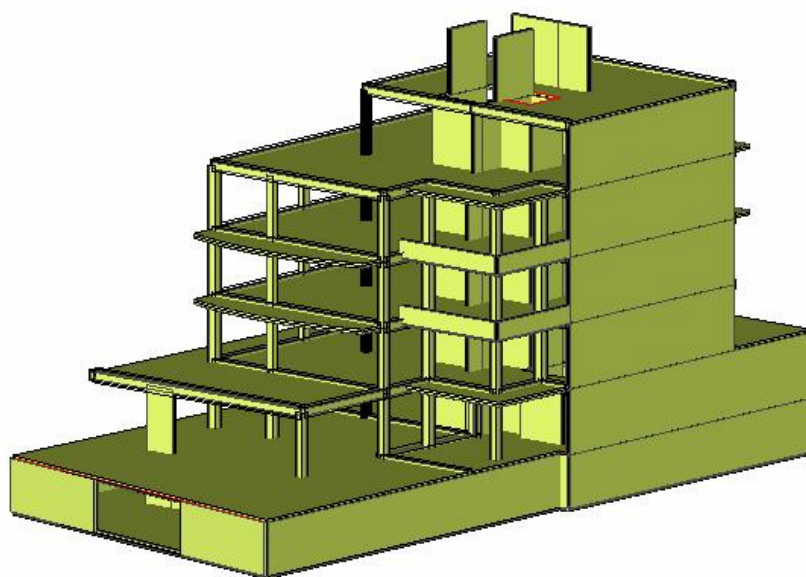
Ač jsou oba programy ve vývojové návaznosti, nebylo možné model z FEATu 2000 otevřít i v programu Scia Engineer 2010. Možnosti, jak vyřešit tento problém, byly v podstatě dvě. Můžeme celou konstrukci znova namodelovat takzvaně od nuly nebo využít novinky ve své době z FEATu a přenést model do CAD systému. Druhá jmenovaná možnost byla použita v našem případě. Samozřejmostí v programu Scia Engineer 2010 je totiž importování formátu DWG<sup>1</sup>. Jediné úskalí, ale časově ne nenáročné i pro méně pokročilé uživatele tohoto softwaru, byl fakt, že využít z DWG formátu lze jen osy a jim přiřadit příslušné prvky (pruty, desky, stěny). V druhém modelu tedy zůstaly dimenze prvků i jejich poloha z prvně zmiňovaného modelu (obr. 2-9,2-10).

Zatížení ale bylo nutné zadat celé znova. Jednak z důvodu, že nelze importovat zatížení přes formát DWG, a také z důvodu použití jiných norem pro celý model. Na začátku celého procesu modelování je vhodné určit si normy, podle kterých bude statický software počítat a navrhovat. Jelikož od 1.4.2010 už skončilo v České republice období koexistence Evropských norem a v té době platných národních norem, byla zvolena pro tento projekt norma EN-EC (Eurokód). Jako hlavní materiál byl určen C30/37, který je nejbližší třídou dle staré normy použitého betonu B35. Velkou výhodou programu Scia Engineer je, že u zatížení stačí správně určit jeho typ a všechny koeficienty pro kombinace si pak program určí podle normy sám. Zrovna tak program vytvoří, když se mu dá podnět, všechny možné kombinace pro mezní stavy, jak je uvedeno v Eurokódech. Menší nevýhodou tohoto systému může být výpočet obrovského množství kombinací a tím i zatížení paměti počítače a zvětšení velikosti souboru. K zatížení, které bylo použito v prvním modelu přibýlo ještě zatížení od schodišťových ramen, která budou pnutá do železobetonových jádrových stěn.

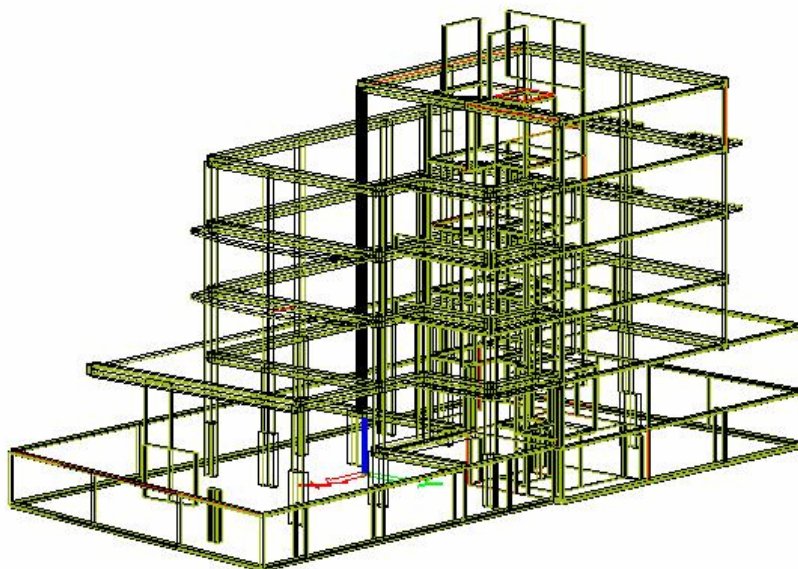
Velmi prospěšným prvkem pro projektanty je možnost navrhování a posuzování železobetonových prvků. V knihovně materiálů je možno si nejen vybrat z velkého množství druhů betonů, ale zároveň i druhů výztuže. Pro náš model byla zvolena výztuž B500B. Samotný návrh a vyztužení je možné provést dvěma způsoby. Buď vše nastavit ručně, průměr výztuže, vzdálenosti vložek, typ třmínků a poté vše posoudit nebo nechat navrhnout výztuž do betonových prvků funkcí Autodesign, jež byl v jednodušší formě implementován i do FEATu 2000.

---

<sup>1</sup> DWG-nativní formát výkresů CAD programů



**Obr. 2-9:** Rendrový model skeletu v programu Scia Engineer 2010



**Obr. 2-10:** Obrysový model skeletu v programu Scia Engineer 2010

### 2.3.3 Porovnání modelů

V předešlých odstavcích jsme si představili dva použité modely jedné a té samé konstrukce. Jeden byl vytvořen programem FEAT 2000 a druhý programem Scia Engineer 2010. Oba modely mají spoustu vlastností společných, ale zároveň se v několika věcech, někdy ne malých, liší.

Jelikož se jedná o identické konstrukce, samotná geometrie modelů zůstává na počátku stejná. Vysvětlení pojmu „na počátku stejná“ je jednoduché. Jak již bylo uvedeno výše, v obou modelech je rozdíl v zatížení, což může a nemusí mít vliv na rozměry samotných prvků. Záležet bude na posudku prvků z kombinací pro mezní stav únosnosti a pro mezní stav použitelnosti. Posouzení, zda prvek vyhověl či nikoliv, je závislé na materiálech, které v daném prvku budou, jejich rozmístění a na omezujících podmínkách, které nám ukládá norma. Omezením může být například maximální dovolené namáháním v různém směru nebo maximální procento vyztužení prvku. Pokud by prvek například nevyhověl ani při maximálním možném procentu vyztužení, musela by na řadu přijít pro mezní stav únosnosti a při neměnném typu výztuže, změna rozměrů prvku. Tím pádem by mohla být geometrie konstrukce odlišná od geometrie na počátku.

Hlavním rozdílem mezi oběma modely je použitá norma a s tím spojené označení a charakteristika materiálů, koeficienty zatížení a kombinace zatížení. Vybrané rozdíly vyplývající z použitých norem pro ten který model jsou znázorněny v tabulce tab. 2-3.

		ČSN (pro FEAT 2000)	EN-EC (pro Scia Engineer 2010)
materiál	beton	B35	C30/37
	výztuž	10 505 (R)	B 500B
	součinitel materiálu	neuvažováno <sup>2</sup>	$\gamma_c = 1,5$
koeficienty zatížení	stálé	$\gamma_f = 1,1$	$\gamma_f = 1,35$
	nahodilé	$\gamma_f = 1,4$	$\gamma_f = 1,5$

tab. 2-3: Vybrané rozdíly mezi modely plynoucí z použitých norem

Samozřejmě, když je program Scia Engineer 2010 téměř o deset let mladším kolegou programu FEAT 2000, má prvně jmenovaný několik funkcí, které se ve starším softwaru neobjevily. Za zmínku stojí automatické vyztužování železobetonových prvků, generování zatížení větrem a možnost parametrizace a následné optimalizace konstrukce nebo jejích prvků.

Oba zmíněné statické programy v dnešní době nacházejí velké uplatnění a jsou silnými nástroji a pomocníky v ruce projektantů. Oba mají své pro a proti. Starší program je oblíbenější hlavně z důvodů konzervativnosti projektantů a své delší historie na území České republiky. Naproti tomu novější program je užíván například díky své intuitivnosti, mnoha možnostem posudků a návrhu konstrukcí a také z důvodu, že jsou v něm implementovány Eurokódy i s národními dodatky pro vybrané země.

---

<sup>2</sup> V ČSN 73 1201 se určovala přímo výpočtová namáhání betonu



## 3 OPTIMALIZACE

V dnešní době se žádné odvětví průmyslu neobejde bez výpočetní techniky. Nejinak tomu je i u stavebnictví, kde počítače využívají všechny dotčené profese. Architekt jej upotřebí k přenesení své vize či zadání investora do dále zpracovatelné formy, ekonom počítač potřebuje k efektivnímu zjištění zisků a nákladů a v neposlední řadě projektant využije počítač ke statickému posouzení stavby a k vyhotovení výkresů, podle kterých se stavba bude realizovat. Samotný vývoj výpočetní techniky umožňuje další zefektivnění práce a využití nových přístupů k řešení úloh stavebního inženýrství.

### 3.1 Optimalizace ve stavebnictví

Stavební výroba je ve své podstatě téměř vždy unikátní. I když se opakuje proces výstavby a zvenku objekt vypadá stejně, základové poměry jsou vždy jiné. Toto odlišuje stavebnictví od ostatních odvětví průmyslu, kde jde často o masovou výrobu jednoho produktu. I díky tomuto podvědomému faktu se slovo optimalizace často ve spojitosti se stavebnictvím nevyskytovalo. Ale optimalizace není jen o nalezení vhodného tvaru produktu a pak jeho puštění do masivní výroby [10].

Současná ekonomická situace nutí projektanty co nejvíce šetřit na konstrukci a tím zvýšit svoje akcie na trhu stavebních nabídek. Šetření na konstrukci jde ale často v rozporu s omezeními, které projektant chtě nechtě musí respektovat. Většinu těchto omezení ukládá norma. V době, kdy jsou stavby často velmi složité a k vypracování zadaného úkolu má projektant šibeniční termíny, má samotná stavba velké rezervy. Jednak z časových důvodů, kdy nemůže být provedena dopodrobna analýza každého prvku, a pak také z důvodů, že díky velké rozmanitosti staveb projektant nemůže využít svých znalostí z předchozích projektů. Podpůrným nástrojem pro projektanty v těchto případech může být optimalizace. Nenahradí plně projektanta, ale může mu dát na výběr z několika řešení a projektant se sám rozhodne na základě výsledků optimalizace a svých zkušeností, která z nabízených variant nejvíce zapadá do jeho koncepčního návrhu. Nemalou pomoc může optimalizace nabídnout při změnách během návrhu od investora či projektanta. Stačí pozměnit parametr a sledovat, jaký vliv má tato změna na celou konstrukci, eventuálně vybrat jiné optimální řešení [10].

Pro pojem optimalizace musíme rozlišovat dvě různá pojetí:

- Globální optimalizace; tj. optimalizace funkce nebo funkcí bez předchozích znalostí problému uvnitř těchto funkcí.
- Optimalizace konstrukcí; tj. aplikovaná věda, kde jsou metody z globální optimalizace aplikovány do modelu konstrukce a nebo do materiálů.

## 3.2 Druhy optimalizací konstrukce

Rozdělení optimalizací konstrukcí může být například podle výsledku, kterého chceme dosáhnout. Podle prof. Granta Stevena [9] je toto rozdělení na topologickou, tvarovou, rozměrovou a optimalizaci skladeby.

### 3.2.1 Topologická optimalizace

Pod pojmem topologická optimalizace se rozumí hledání předem neznámého optimálního tvaru a optimální topologie konstrukce (obr. 3-1). Předem je známo pouze prostředí, optimalizační kritéria a podmínky, které mají být dodrženy. Tato optimalizace se objevuje nejvíce ve strojním průmyslu, obzvláště pak v odvětví automobilovém a leteckém. Ve stavebnictví je klasickým případem topologické optimalizace navrhování výztuže do betonu. Zadán, a tím pádem předem znám, bývá objem betonu, neznámými naopak jsou pozice výztužných prutů s předem neznámými rozměry a umístěním. Dalším příkladem může být optimalizace příhradových konstrukcí, kde neznámými jsou jak topologie prutů, tak i souřadnice jednotlivých styčniců. Tyto typy optimalizací mívají za cíl minimalizaci hmotnosti použitého materiálu a to proto, že hmotnost použitých materiálů se nejvíce promítá do cen jednotlivých stavebních objektů. V uvedených příkladech by se tedy jednalo o minimalizaci hmotnosti betonářské respektive konstrukční oceli. Optimalizačních metod, díky nimž pracujeme s topologickou optimalizací je několik. Podrobněji se jimi budeme zabývat v podkapitole Optimalizační metody.



Obr. 3-1: Topologické optimalizace mostu, vlevo počáteční prostředí, vpravo optimum [11]

### 3.2.2 Optimalizace tvaru

Optimalizace tvaru může být dále rozdělena do dvou odlišných kategorií. První se zabývá konstrukcí, kde mohou na několika místech vznikat místa s velkými napětími a nazývá se lokální optimalizací tvaru. V druhé kategorii, globální optimalizaci tvaru, se hledá optimální tvar celé konstrukce. V optimalizaci tvaru je celková topologie konstrukce známá. Cílem těchto optimalizací je najít vhodný tvar konstrukce z hlediska redistribuce napětí. Jako parametry bývají voleny dimenze optimalizovaných částí nebo proměnné, která charakterizují a ovlivňují výsledný tvar konstrukce. Příkladem může být optimalizace tvaru páky.



Obr. 3-2: Příklad optimalizace tvaru páky, vlevo základní tvar, vpravo optimalizovaný tvar [11]

### 3.2.3 Rozměrová optimalizace

Při tomto druhu optimalizace je konstrukce definována rozměry, dimenzemi či příčnými řezy. Kombinací těchto parametrů se snažíme dosáhnout optimalizačních kritérií. Rozměrovou optimalizaci využívá i již výše zmíněný Autodesign, kde se buď z předem daného seznamu prvků nebo postupnými iteracemi dospívá k optimálním řešením. Tyto dva postupy ukazují také na nutnost rozdělit rozměrovou optimalizaci na část se spojitými proměnnými a na část s diskrétními proměnnými. Příkladem může být optimalizace ocelové prutové konstrukce, kde spojitou proměnnou může být délka či šířka svaru a naopak diskrétní proměnnou příčný profil, který je vybírán z knihoven statických programů či z uživatelem zadaných hodnot. Co se navrhování a optimalizace železobetonových konstrukcí týče, úlohy, kde je oblast vyztužování ocelovými pruty neznámá, vedou k užití rozměrové optimalizace se spojitými proměnnými.

### 3.2.4 Optimalizace skladby

Optimalizace skladby se tak trochu odlišuje od zbylých tří metod tím, že může být považována jako přechodová optimalizace právě mezi výše zmíněnými metodami. Při této metodě jsou nezátížené části konstrukce odstraňovány. Důležitým počátečním prvkem je určení základní konstrukce, která definuje všechny možné pozice styčníků a prutů. Jako příklad užití metody může být optimalizace mostu přes terén s velkými výškovými rozdíly [10].

## 3.3 Optimalizační metody

Optimalizační problém se dá řešit v zásadě dvěma možnými způsoby. Buď můžeme využít analytickou cestu nebo se můžeme vydat cestou optimalizačních algoritmů. V některých případech inženýrské praxe se lze vydat analytickou cestou, ale mnohdy je tato cesta velmi zdlouhavá a řešení občas bývá nevhodné či nereálné. To se děje zejména díky složitosti optimalizačních problémů v inženýrství. V případě zjištění nevhodnosti analytické cesty se můžeme obrátit na mocné nástroje optimalizace, a tím jsou optimalizační algoritmy [12].

Rozdělení optimalizačních metod může být různé v závislosti na kritériích, požadavcích, použití a nebo podle principu jejich činnosti. Možné rozdělení podle principu činnosti optimalizačních metod je patrné z tabulky tab. 3-1, kde je dělení metod na deterministické, stochastické a smíšené.

Deterministické metody jsou řízené metody, které jsou obvykle založeny na výpočtu optimálních řešení pomocí technik lineárního programování. Tyto metody jsou výpočetně velmi účinné za předpokladu užití malého množství proměnných, jelikož vyžadují i malé množství iterací. S větším počtem proměnných velice rychle roste čas potřebný k výpočtu. Hlavním problémem těchto metod ale je, že nejsou schopny řešit nespojitě problémy. Stochastické metody oproti deterministickým zavádějí do výpočtu náhodná čísla, což má za následek náhodné chování. Náhodnost je využita například v možnosti úniku z lokálních extrémů a nalezení globálních extrémů [12].

DETERMINISTICKÉ	STOCHASTICKÉ	SMÍŠENÉ
GREEDY	RANDOM WALK	SEARCH- MATHEMATICAL PROGRAMMING
HILL-CLIMBING	SIMULATED ANNEALING	ANT COLONY OPTIMIZATION
BRANCH & BOUND	MONTE CARLO	IMMUNE SYSTEM METHODS
DEPTH-FIRST	TABU SEARCH	MEMETIC ALGORITHMS
BROADTH-FIRST	EVOLUTIONARY COMPUTATION	SCATTER SEARCH & PATH REL.
BEST-FIRST	STOCHASTIC CLIMBING	HILL- PARTICLE SWARM
CALCULUS BASED		GENETIC ALGORITHMS DIFFERENTIAL ALGORITHMS SOMA

tab. 3-1: Možné rozdělení některých optimalizačních metod dle principu činnosti metod [12]

### 3.3.1 Příklady deterministických metod

#### Hill-climbing (Horolezecký algoritmus)

Nejjednodušší metoda prohledávání prostoru. Optimalizační metoda, která na základě prohledání svého okolí volí směr nevhodnějšího postupu. V prvním kroku se zvolí počáteční řešení, poté se prohledá a ohodnotí okolí daného bodu. Z okolí je vybráno nejvýhodnější další řešení a takto se postupuje až k bodu, kdy je jeho okolí ohodnoceno hůře. Nevýhoda této metody je časté uvíznutí v lokálním extrému, které může být částečně omezeno vícenásobným spuštěním algoritmu z různých počátečních míst. Jako příklad užití horolezeckého algoritmu může být návrh složeného ozubeného převodu [13].

#### Branch & bound (Metoda větví a mezí)

Jak již název napovídá, půjde v této metodě o dvě různé procedury, větvení a určování mezí. Množina řešení je rozdělena a větvena na dvě a více menších podmnožin a v nich se stanoví meze hodnoty účelové funkce. Samotné podmnožiny mohou být dále větveny a proces stanovení mezních hodnot se v nich také opakuje. V průběhu optimalizace se vytváří seznam dosud nepoužívaných uzlů, které nebudou eliminovány, ale pro které se zatím nevygenerovaly jejich problémy. V této metodě se také můžeme setkat s pojmem strategie výběru uzlů, respektive strategie prohledávání z množiny uzlů. Obvykle jsou tyto strategie dvě, prohledávání do hloubky a prohledávání do šířky. Prohledávání do hloubky znamená, že jsou potomci rodičovského řešení prohledávány v určitém pořadí. Při prohledávání do šířky je pro prohledání z dosud neprohledaných řešení vždy vybráno to, které má minimální dolní mez. Tyto zásady v důsledku znamenají, že při prohledávání do šířky může proces větvení přeskakovat z jedné větve do druhé, zatím co u prohledávání do hloubky nikoliv [13]. Užití metody větví a mezí je vhodné například u rozvrhování výroby nebo u problému batohu.

### 3.3.2 Příklady stochastických metod

#### Simulated annealing (Simulované žihání)

Simulované žihání patří ke stochastickým metodám, jejíž základ je ve fyzice, oproti tomu ostatní stochastické metody mají povětšinou svůj základ v biologii. Tato metoda je založena na analogii mezi žiháním tuhých těles a optimalizačním problémem. Ve fyzice žihání označuje proces, ve kterém je těleso umístěné do pece vyhřáté na vysokou teplotu a postupným pomalým snižováním teploty se odstraňují vnitřní defekty tělesa. Při vysoké teplotě jsou částice tělesa náhodně uspořádány v prostoru a při pomalém ochlazení se částice mohou dostat do rovnovážné polohy a tím se snižuje energie tělesa [16]. V aplikaci tohoto postupu do optimalizace se částice bere jako jedno z možných řešení, které je možno přiřadit funkční hodnotu (energii). Aktuální řešení je přeměněno náhodnou transformací na nové řešení z okolí aktuálního řešení. Původní řešení se nahradí novým v procesu simulovaného žihání s určitou pravděpodobností. Jestliže funkční hodnota nového řešení je lepší nebo rovna hodnotě původního řešení, je pravděpodobnost přijetí rovna jedné a toto řešení je automaticky přijato. Jestliže funkční hodnota nového řešení je horší než hodnota původního řešení, pravděpodobnost přijetí tohoto řešení je menší než 1 [13]. V důsledku to znamená, že může být přijato i horší řešení než bylo původní, což nám mnohdy pomůže k vyskočení z lokálních extrémů. Díky tomuto je metoda simulovaného žihání tak robustní. Jako konkrétní příklad využití simulovaného žihání může být optimalizace rozměrů prvků.

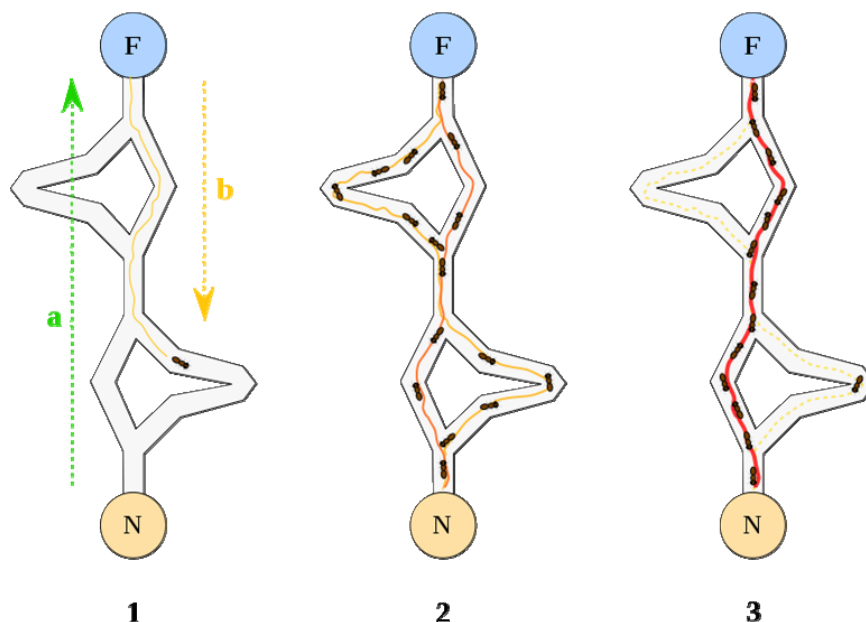
#### Tabu search (metoda zakázaného prohledávání)

Metoda zakázaného prohledávání vychází z horolezeckého algoritmu a snaží se jej vylepšit pomocí prvku krátkodobé paměti a tím omezit zacyklení v lokálních minimech. Krátkodobá paměť si po určitý interval předcházející historie algoritmu pamatuje inverzní transformace k lokálně optimálním transformacím řešení, použitým k získání nových řešení. Část algoritmu, díky kterému je metoda zakázaného prohledávání zařazena do metod stochastických, se nazývá zakázaný seznam (tabu list). Tento list právě dočasně obsahuje inverzní transformace a tyto transformace jsou zakázané při tvorbě nového okolí pro dané aktuální řešení. Zakázaný seznam je transformací sestavený a obnovovaný v průběhu celého algoritmu. Na začátku je seznam ovšem prázdný. Po naplnění seznamu po určitém počtu iterací je postupně nahrazována nejstarší transformace nejnovější transformací. Seznam se tedy cyklicky obnovuje. Velikost seznamu je zásadním parametrem metody. Má-li totiž seznam malou kapacitu, potom se může vyskytovat zacyklení algoritmu. Podobný neblahý fakt má právě horolezecký algoritmus, ale v metodě zakázaného prohledávání je obvykle zacyklení ve více iteracích ne jen po dvou následujících krocích. Zároveň nadměrná kapacita seznamu má za následek přeskočení dosti významných lokálních extrémů, které mohou být i globálním extrémem. Zakázané prohledávání nemusí být spojeno pouze s horolezeckým algoritmem. Možnost spojení je i se simulovaným žiháním nebo genetickými algoritmy. Nevýhodou ve spojení s těmito metodami je nepřilíš efektivní vyhledávání extrému. Simulované žihání či genetické algoritmy totiž neprohledávají celé okolí aktuálního řešení a působení a výhody tabu seznamu jsou tím pádem značně malé. Klasickými příklady užití metody zakázaného prohledávání, vycházejícího z horolezeckého algoritmu, jsou rozvrhy práce pro stroje nebo strategické rozmístění skladů [14].

### 3.3.3 Příklady smíšených metod

#### Ant colony (mravenčí kolonie)

ACO-Ant Colony Optimization, jak je celý originální název optimalizační metody mravenčí kolonie, se obrací, jako spousta optimalizačních metod, k přírodním principům a mechanismům. Mravenec jako jedinec nevykazuje složité chování, pouze reaguje na své okolí a ostatní mravence. Více mravenců spojených do kolonií však dokáží zvládnout velice složité problémy. Příkladem složitějšího problému je nalezení potravy, kdy je kolonie velice rychle schopná najít nejkratší cestu a jedinci pak po ní neomylně pochodují jako po dálnici. Žádná překážka pro ně neexistuje, vždy si najdou další optimální trasu. Efekt nalezení neoptimálnější cesty je dán tím, že si mravenci svou cestu značkují feromonem. Jeho intenzita pak ovlivňuje rozhodnutí mravenců. Pokud dorazí na rozcestí dvou cest vedoucích k cíli (potravě) první mravenec, jeho rozhodnutí, kterou cestou se vydat, je zcela náhodné. Ti kteří zvolí kratší cestu ji označují a zpět se vrací po této kratší cestě. Další mravenci už díky silnějšímu působení feromonů snáze poznají, která z cest je optimálnější, v tomto případě kratší (obr. 4-3). Při optimalizaci je feromon nahrazen váhou, která je přidělena dané cestě vedoucí k cíli. K této váze je možno přidávat od dalších „mravenců“ další „feromon“ neboli váhu. V ACO je zohledněno i vypařování, to znamená, že váha je u jednotlivých spojů oslabována. Ovšem toto oslabení má velmi pozitivní vliv na možnost vyskočení z lokálního extrému a díky tomu se stává ACO velmi robustní metodou. Klasický případ, kdy lze využít této metody, je např. problém obchodního cestujícího. I svojí podstatou nalezení nejkratších cest, jak navštívit více míst, jsou si, principem hledání nejkratší cesty pro potravu, s mravenci velmi společní [12].



**Obr. 3-3:** Nalezení optimální cesty z hnízda pro potravu u mravenců [15]  
(F-Food = potrava, N-Nest = hnízdo, a – cesta tam, b – cesta zpět)

## **Genetic algorithm** (genetický algoritmus)

Genetický algoritmus patří také k algoritmům, které vycházejí svou podstatou ze vztahů, poznatků a zákonitostí v přirozených cyklech přírody. Analogie s evolučními procesy ukazuje jistou možnost usměrnit jinak náhodné generování bodů k hodnotám blízkým optimálním hodnot. Darwinova teorie evoluce se zakládá na tezi přirozeného výběru, podle kterého přežívají jen nejlépe přizpůsobení jedinci populace. Z reprodukce dvou silných jedinců vznikne s velkou pravděpodobností potomek, který bude také velice silným jedincem. Samotná reprodukce ale nezaručí, že potomek bude mít nejlepší vlastnosti k přežití. Z toho důvodů je nutné zapojit do evoluce vliv mutace, náhodného ovlivnění genetického materiálu. Důležitým faktorem v reálném životě jedince je síla, neboli schopnost přežít a reprodukce. V počítačovém světě je tomu stejně, jen je místo pojmu síla uváděn pojem fitness. Tato fitness je kladná hodnota přiřazovaná umělým jedincům na základě toho, jak jsou schopni plnit si v daném prostředí své úlohy [17].

Přežití silnějšího se projeví tak, že jedinci s lepším ohodnocením mívají více potomků. Ale vybírání aktuálně nejlepších jedinců automaticky nezaručí, že algoritmus nespadne do lokálního extrému. Nová kvalitní řešení můžou vznikat postupně a nemusí se zdát ze začátku přínosné. Teprve při vhodném křížení se ukáže jejich síla. Pro určení množství potomků slabých i silnějších jedinců se užívá několik metod a principů. Za zmínku určitě stojí princip rulety, elitismu, turnajového výběru a v neposlední řadě princip sestavení žebříčku a dle něho přisuzování šancí na pokračování linie jedince. Reprodukce jedince prochází přes dvě fáze. První fáze je křížení a to jednobodové či vícebodové, v krajních případech dokonalá reprodukce rodiče. V druhé fázi pak můžou a nemusí přijít přehmaty přírody, mutace. Nově vzniklý jedinec se zařadí do populace [13].

Cyklus se opakuje až do nalezení uspokojivého řešení. Tato metoda má široké pole působnosti. V technice se s výhodou využívá přirozené paralelnosti této metody a tudíž může být do procesu optimalizování zapojeno více počítačů najednou. Oblasti nebo problémy, na které lze s úspěchem nasadit genetický algoritmus jsou například určování vhodných tvarů a parametrů mechanických součástí či zapojení analogových obvodů. Samotným odvětvím je užití algoritmu pro genetické programování. A za povšimnutí stojí i využití genetického algoritmu při skládání hudby nebo v umění a grafice, kde je genetického algoritmu použito ve speciálních filmových efektech.

### 3.4 Rozšířené Simulované žihání

V optimalizační aplikaci EOT, který je součástí statického programu Scia Engineer 2010, se nachází několik metod, pomocí kterých je možné řešit optimalizační problémy. Jednou z nich je právě metoda rozšířeného simulovaného žihání. Svoji podkapitulu v této práci má proto, že právě této metody budeme později využívat k optimalizaci dané konstrukce.

Rozšířené simulované žihání, neboli AUSA (z anglického názvu Augmented simulated annealing method) je poměrně mladá metoda, zato velice zajímavá a hlavně velice robustní. Zajímavá je hlavně tím, že využívá a kombinuje principy dvou výše zmíněných metod. Jedná se o metody simulovaného žihání a genetického algoritmu. Z metody simulovaného žihání se využívá principu spojených s teorií minimálních energetických stavů a z genetického algoritmu je využito principu populace jedinců oproti vyhledávacímu bodu. Samotný algoritmus metody rozšířeného simulovaného žihání lze zapsat následovně [18]:

```
1  $T = T_{max}, t = 0$ 
2 vytvoř  $P_0$ , ohodnot'  $P_0$ 
3 while ( not zastavovací podmínka) {
4      $count = succ = 0$ 
5     while(  $count < countmax \ \& \ succ < succmax$ ) {
6          $count = count + 1, t = t + 1$ 
7         vyber jedince  $I_t$  z  $P_{t-1}$ 
8         vyber operátor  $O$ 
9         změň  $I_t$  operátorem  $O$ ,  $I'_t$  je výsledek
10         $p = \exp ((F(I'_t) - F(I_t))/T)$ 
11        if (náhodné číslo  $u[0,1] \leq p$ ) {
12             $succ = succ + 1$ 
13            vlož  $I'_t$  do  $P_t$ 
14            ohodnot'  $P_t$ 
15        }
16    }
17    sniž T
18 }
```



Nyní si vysvětlíme, co se v ten který krok děje a co jsou jaké parametry uvnitř algoritmu.

- Krok 1:** Počáteční teplotu  $T_{max}$  je potřeba zvolit tak, aby poměr přijatých jedinců ke všem vytvořeným byl  $\approx 50\%$ . Nastavení této hodnoty vyžaduje experimentování metodou „pokusu a omylu“.
- Krok 3:** Jako zastavovací podmínka je použit počet iterací
- Krok 5:** Parametr  $count_{max}$  udává maximální počet všech iterací a  $succ_{max}$  počet úspěšných iterací na dané teplotní hladině. Doporučený poměr těchto hodnot je  $count_{max} = 10 \cdot succ_{max}$ .
- Krok 7:** Vybrání dvou jedinců metodou SUS<sup>3</sup>.
- Krok 8:** Vybrání mutace nebo křížení. Doporučená je větší pravděpodobnost výběru pro operátor mutace, podle [19] je doporučený poměr mezi křížením a mutací  $\approx 0,1$ .
- Krok 9&10:** Krok řídicí zatřídění jedinců do nové populace. Pro tento úkon je použito Metropolisovo kritérium, které umožňuje výměnu rodiče horším potomkem pouze s určitou pravděpodobností. Tato pravděpodobnost se s konvergencí do globálního optima snižuje. V případě  $F(I') > F(I)$ , je pravděpodobnost přijetí větší než jedna. To znamená, že je rodič vždy nahrazen a to lepším potomkem.
- Krok 17:** Krok ochlazování. Pro snižování teploty je použit jednoduchý vztah, který má tvar  $T_{i+1} = T_{mult} \cdot T_i$ . Součinitel  $T_{mult}$  je nastaven tak, aby při zvoleném maximálním počtu iterací  $iter_{max}$  dosáhl minimální teploty  $T_{min}$ , jejíž doporučená hodnota je  $T_{min} = 0,01 \cdot T_{max}$

Vzorec pro výpočet  $T_{mult}$  má tvar:

$$T_{mult} = (T_{min}/T_{max}) ^ (succ_{max}/iter_{max}) \quad [18]$$

Hodnoty jednotlivých parametrů, se kterými budeme tuto metodu používat, a hodnoty parametrů, které jsou přednastaveny pro tuto metodu v optimalizační aplikaci EOT, si určíme až v další části práce.

Abychom mohli oddělit nepřijatelná řešení, které nesplňují předepsané podmínky, je nutné rozšířit cílovou funkci o penaltu. Jedna z podmínek v konkrétním příkladě bude překročení maximálního využití průřezů. Pro posouzení v uzavřeném intervalu  $< 0,1 >$  bude penalizace nulová. Pro posouzení větším než  $1+\alpha$ , kde  $\alpha$  je parametr udávající procentuální hranici mezi přípustnou a nepřijatelnou hodnotou posudku, bude hodnota penalizační funkce  $\alpha^2$ . Parametry určující tvar penalizační funkce jsou pevně dané. Parametr  $\alpha$  si může uživatel v aplikaci EOT sám nastavit. Parametr  $\alpha$  není v průběhu penalizace konstantní, ale je zmenšován v závislosti na teplotě podle výše uvedené rovnice pro teplotu.

---

<sup>3</sup> SUS – Stochastic universal sampling – metoda výběru jedinců, zobecněná metoda rulety

### 3.5 Model pro optimalizaci

Hlavním záměrem této práce je zoptimalizovat železobetonový skelet a ukázat, zda se dá pomocí optimalizace ušetřit náklady na materiál a zda má podobná úloha v reálném inženýrském podvědomí a životě šanci se uchytit.

Pro optimalizaci byl vybrán objekt popisovaný ve druhé kapitole této práce. Připomeneme, že se jedná o železobetonový skelet s jedním podzemním a pěti nadzemními patry. Hlavní konstrukční systém je skeletový, který je doplněn železobetonovým stěnovým jádrem a železobetonovými obvodovými stěnami, jak ukazují náčrtky jednotlivých podlaží na obrázcích obr. 2-1 až obr. 2-6.

Při procesu optimalizace se větší problémy, pokud je to možné, dělí na menší oblasti, aby optimalizace mohla být efektivní. Spuštění optimalizace za daných podmínek a při zvolených parametrech, by bylo velmi, zvláště časově a z hlediska hardware, náročné. Proces optimalizace je totiž závislý nejen na zvolené metodě a použitých parametrech, ale také na výkonu a možnostech dostupného technického vybavení. Pro tuto práci byl k dispozici notebook ASUS F5V s následujícími parametry:

#### Notebook ASUS F5V

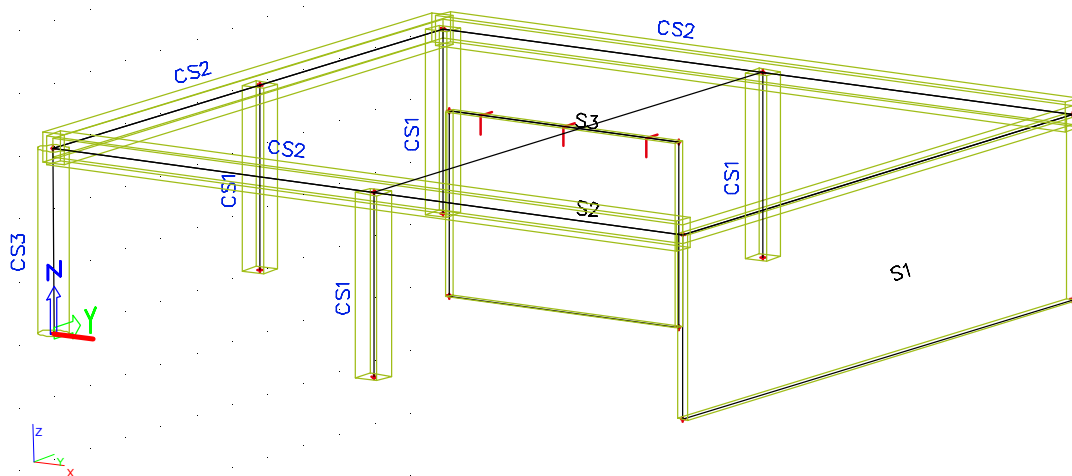
Procesor:	Mobile DualCore Intel Celeron M, 1866 MHz
Paměť:	1024 MB
Grafická karta:	ATI mobility Radeon X2300, 256 MB
Pevný disk:	ST9160831AS, 149 GB IDE
Operační systém:	Microsoft Windows XP Home Edition Service pack 3

Nejen díky těmto parametrům, ale také kvůli jednodušší interpretaci bylo k optimalizaci vybráno a zjednodušeno pouze jedno patro. I tak ale bude zajímavé vidět, jakou odezvu má volba parametrů na výslednou optimalizovanou funkci. V našem případě budou volenými parametry rozměry sloupů a výztužných žeber. Délky těchto prvků zůstanou zachované tak, jak jsou ve skutečnosti a parametrizovaný bude průřez. Další rozměrový parametr bude tloušťka desky. Zajímavé bude také sledovat různé vyztužení prvků. Parametry výztuže budou průměry podélných výztuží a třmíneků prutových prvků a průměr výztuže pro deskovou konstrukci.

Pro názornost, jaký vliv na výslednou konstrukci bude mít optimalizace, si postupně představíme idealizovaný model skutečného provedení s veškerým uvažovaným zatížením a i s vyztužením použitých prvků. Postup vytvoření modelu a jeho vyztužení bude ukázán na druhém, parametrickém modelu, který bude potřeba pro optimalizaci. Rozdíly v postupech vytváření parametrického modelu a modelu skutečného provedení budou vysvětleny v následujících podkapitolách.

### 3.5.1 Model skutečného provedení

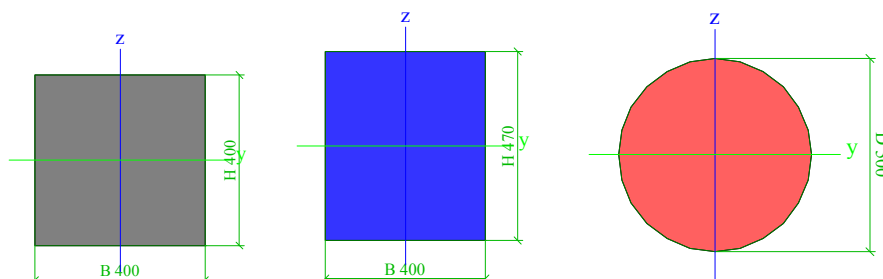
Jako první bude ukázán idealizovaný model skutečného provedení. Idealizace spočívá v zanedbání otvoru v prostoru schodiště. Zatížení, které působí na konstrukci modelovaného patra, je vlastní tíha, stálé zatížení, užité zatížení a zatížení větrem. Zatížení sněhem se dle normy ČSN EN 1991-1-3 (Eurokód 1: Zatížení konstrukcí-Část 1-3:Obecná zatížení-zatížení sněhem) a vzhledem k půlkruhovému tvaru střešní konstrukce, uvažuje nulové. Typy a dimenze použitých prutových i deskových prvků, stejně tak jako typy zatížení, si ukážeme na následujících obrázcích a výpisech.



Obr. 3-4: Model skutečného provedení, drátěný model se jmény prvků

#### Vlastnosti prutových prvků použitých v modelu skutečného provedení

Jméno:	CS1	CS2	CS3
Typ:	Obdélník	Obdélník	Kruh
Průřez:	400x400 mm	470x400 mm	Ø500 mm
Materiál:	C30/37	C30/37	C30/37



### Vlastnosti deskových prvků použitých v modelu skutečného provedení

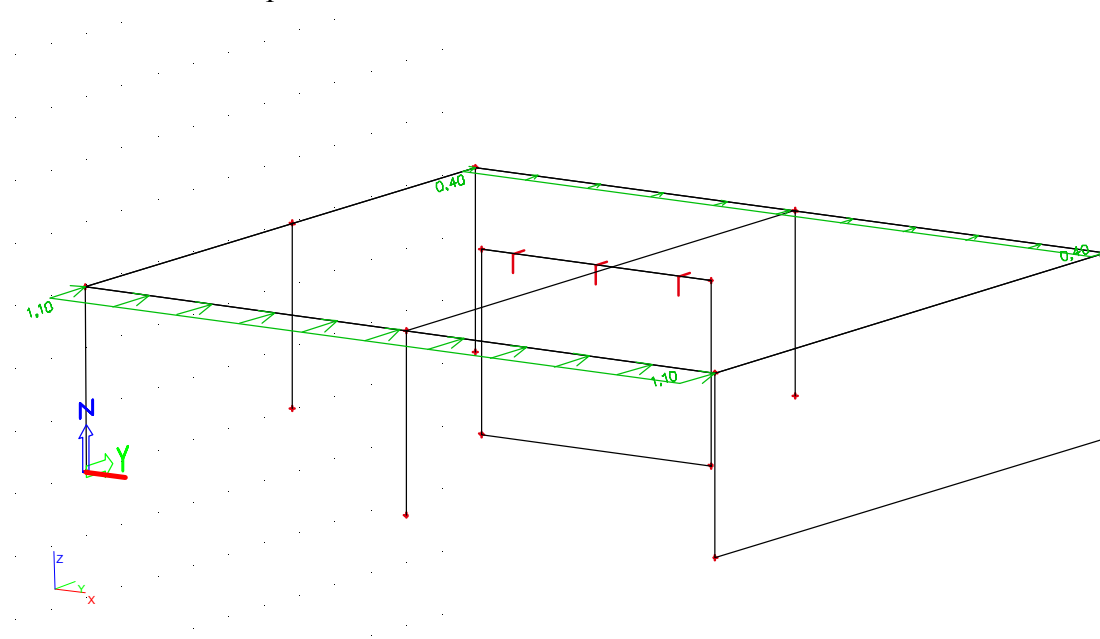
Jméno:	S1	S2	S3
Typ:	Stěna	Stěna	Deska
Tloušťka:	200 mm, konstantní	200 mm, konstantní	300 mm, konstantní
Rozměry:	2,95x10,95 m	2,95x4,30 m	10,95x11,80 m
Materiál:	C30/37	C30/37	C30/37

### Zatížení na model skutečného provedení

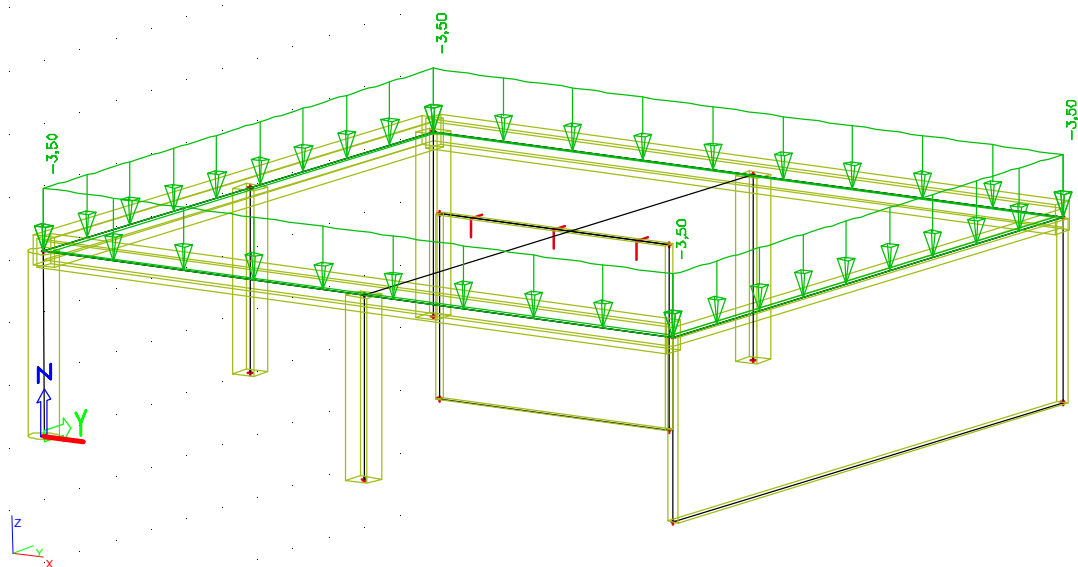
Jméno:	Charakteristické[kN/m <sup>2</sup> ]:	Součinitel $\gamma_f$ :	Návrhové[kN/m <sup>2</sup> ]:
Vlastní tíha	-	1,35	-
Stálé	3,5	1,35	4,725
Užitné	1,5	1,5	2,25

Pozn.: Vlastní tíha nebyla zadávána externě, proto je kolonka charakteristické a návrhové u tohoto zatěžovacího stavu proškrtnuta. V modelu však zatížení vlastní tíhou je uvažováno a generováno je podle použitých prvků a materiálů.

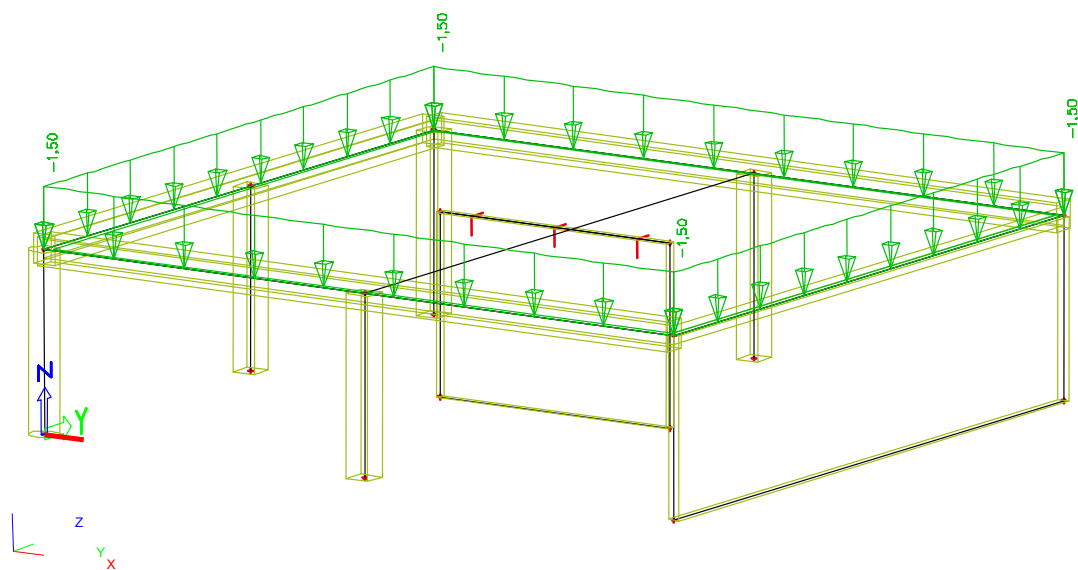
Zatížení větrem na model bylo rozpočítáno z plošného zatížení na liniové zatížení na dva protilehlé průvlaky, kde na jednom je tlak 1,1 kN/m a na druhém sání 0,4 kN/m. Zatížení větrem je bráno jako výběrové, tudíž se uvažuje vždy vání větru pouze z jedné strany. Pro daný případ, kdy je ze dvou stran objektu již zástavba, a pro zvolený souřadný systém os se směr vanutí větru bere pouze buď ve směru kladné osy Y nebo v opačném, záporném směru osy Y. Zatížení větrem při vanutí větru v kladném směru osy Y je možno vidět na obrázku obr. 3-5. Stálé a užitné zatížení je pak na obrázku obr. 3-6 respektive obr. 3-7.



**Obr. 3-5:** Zatížení větrem ve směru osy Y na model skutečného provedení



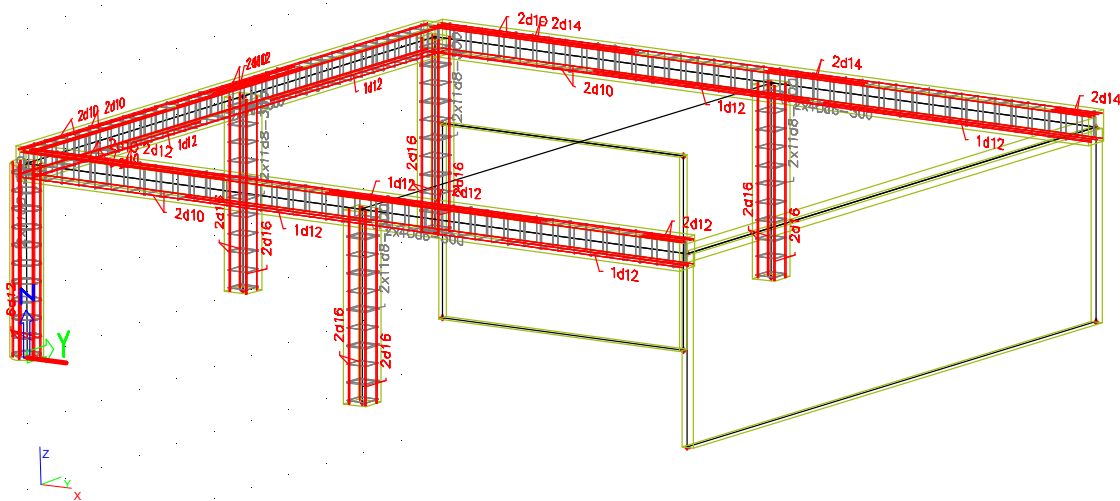
**Obr. 3-6:** Stálé zatížení na model skutečného provedení



**Obr. 3-7:** Užité zatížení na model skutečného provedení

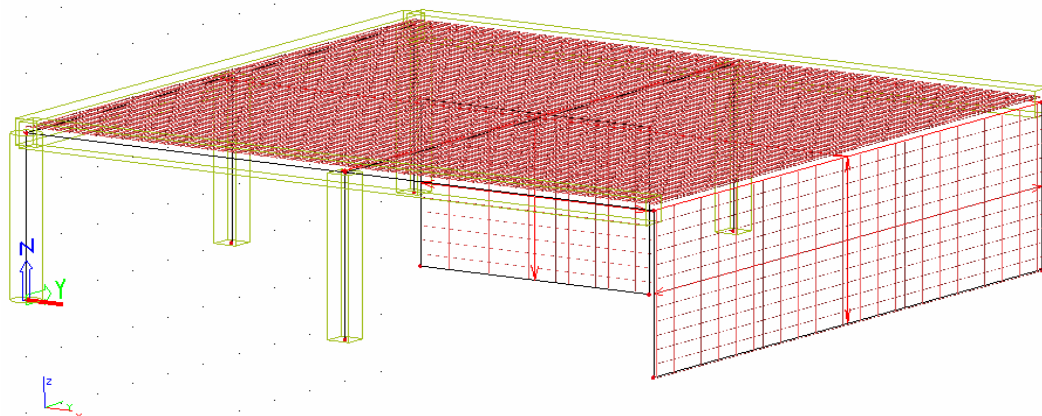
Pro správné přenesení zatížení je nutné, aby spolu prvky spolupůsobily. Velký pozor při modelování musíme věnovat modelování průniků prvků. Například kdyby stěna, která zhruba uprostřed rozpětí podpírá strop, byla modelována bez průniku se stropem, těžko bychom dostali rozumný výsledek dimenze a vyztužení stropní konstrukce, která by vykazovala velké kladné ohybové momenty uprostřed rozpětí. Určitý vliv na reakce v podporách sloupů a stěn má poddajnost konstrukce pod modelovaným patrem. Pro náš model však byly zvoleny tuhé, nepoddajné podpory.

Do procesu optimalizace nám budou vstupovat jako parametry i rozměry, zvláště tedy průměry vyztužující oceli pro prutové prvky i pro plošné prvky. Zvolený materiál vyztužných prutů je B 500B. Abychom měli s čím porovnávat náš optimální návrh, musíme nejdříve vyztužit model skutečného provedení. Vzhledem k tomu, že detailní čísla, jaká a kolik výztuže bylo v betonu skutečně použito, nemáme, budeme brát jako výchozí hodnotu automaticky navrženou výztuž prutových prvků z programu Scia Engineer a pro vyztužení plošných betonových prvků si zvolíme průměr výztuže a její rozteč tak, aby nám vyšly posudky pro mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Podrobný popis, jak vyztužit model ocelovými pruty, bude v další kapitole Parametrický model, kde díky použití parametrů bude tento popis více potřeba. Na obr. 3-8 pak můžeme vidět výsledek procesu automatického vyztužování prutových prvků. Průměr výztuže ve středové stěně je 8 mm, v obvodové stěně 10 mm a pro stropní desku byla zvolena výztuž při dolním povrchu průměru 12 mm a při horním povrchu 14 mm. Vyztužení deskových konstrukcí je patrné z obr. 3-9.



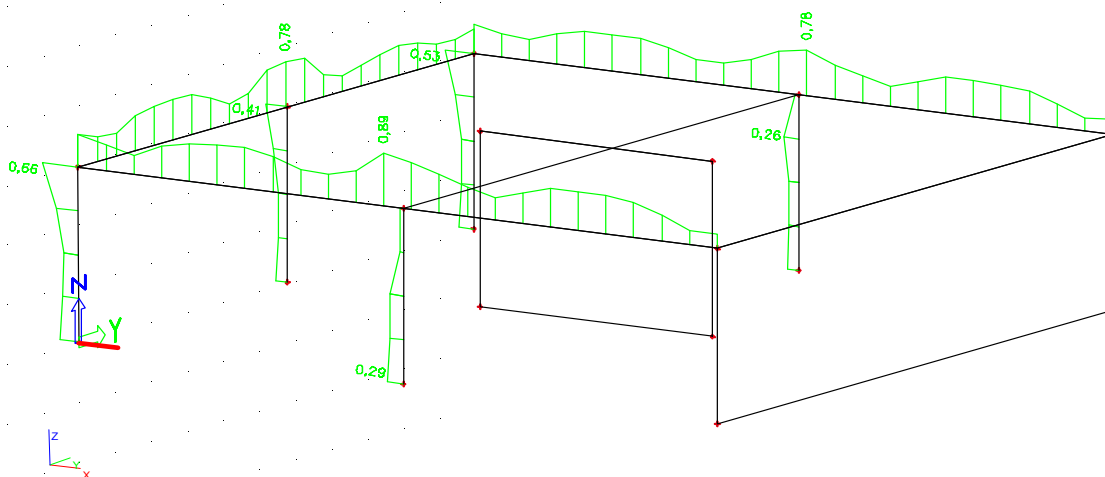
**Obr. 3-8:** Grafický výsledek automatického vyztužení prutových prvků

Podle automatického návrhu bylo použito výztuže s poměrně velkým rozsahem průměrů od průměru 6 mm použitého pro smykovou výztuž, až po průměr 16 mm, který byl využit pro vyztužení sloupů. Podrobný výpis výztuže se nalézá v příloze B.1. Pro porovnání s optimalizovaným patrem bude důležitá hlavně celková hmotnost navržené výztuže. Pro model skutečného provedení je hmotnost výztuže prutových prvků, včetně hmotnosti třmínek 325,81 kg. Do této hmotnosti není započítáno zaoblení třmínek a koncové zaoblení podélné výztuže. Hmotnost výztuže v plošných konstrukcích je ve stěnách i ve stropní desce při výše zmíněných průměrech vyztužných prutů 5089,76 kg. Opět podrobný výpis výztuže je k vidění v příloze B.2. Celková hmotnost výztuže pro model skutečného provedení je 5414,57 kg, po zaokrouhlení 5415 kg. Hlavní položkou v ceně konstrukce podobného typu je nejen hmotnost oceli, ale i hmotnost betonu. Objem betonu dané třídy C30/37 potřebného k vytvoření naší konstrukce patra je 46,386 m<sup>3</sup>. Celkový výkaz materiálu pro model skutečného provedení se nachází v příloze B.3.



**Obr. 3-9:** Grafické vyztužení deskových konstrukcí (horní povrch)

Návrh vyztužení vychází z kombinace zatížení pro mezní stav únosnosti a z kombinace zatížení pro mezní stav použitelnosti. Samozřejmostí úspěšného návrhu je, že všechny prvky musí vyhovět na tyto dva mezní stavy, řečeno jinak, *unit checky*<sup>4</sup> daných prvků budou mít hodnotu menší nebo rovno než je hodnota jedna. Při hodnotě rovné jedné je prvek maximálně využit. Při hodnotě větší než jedna už prvek nevyhoví. Bohužel toto jednoduché testování vyhovění či nevyhovění prvků lze aplikovat v programu pouze na prutové prvky. Kontrola či posouzení, zda vyhoví návrh výztuže v desce či stěně je možný například při zobrazení nutné přídavné výztuže, která musí být nulová. Na obr. 3-10 jsou grafické *unit checky* prutových prvků neboli průběhy využití prutových prvků z modelu skutečného provedení.



**Obr. 3-10:** Grafické znázornění využití vyztužených prutových prvků na mezní stav únosnosti

<sup>4</sup> unit checky – posouzení prvků, které při plně využitém prvku ukazuje hodnotu 1,00

### 3.5.2 Parametrický model

Pro účely optimalizace musíme do zvoleného modelu vnést parametry, jejichž vhodnou kombinací se budeme snažit dostat optimální, v našem případě minimální, hodnotu cílové funkce. Cílovou funkcí je cena, která bude složena z cen objemu respektive hmotnosti použitých materiálů betonu a oceli. Pro beton bude brána v úvahu cena 1850 Kč/m<sup>3</sup> a cena ocelové výztuže je stanovena na 20 Kč/kg. Návrh cen vychází z ceníků některých výrobců betonu a betonářské oceli. Cena koresponduje s cenou betonu C30/37 a s cenou pro výztuž průměrů přibližně 8 mm až 16 mm. Nými zvolené parametry jsou průřezové délky prutových prvků, tloušťka stěn a stropní desky, průměry podélné výztuže ve sloupech a žebrech, průměr použitých třmínků a průměr výztuže plošných konstrukcí. Pro namodelování musíme za parametr dosadit určitou hodnotu. Meze hodnot pro tyto parametry nastavíme až při sestavování optimalizačních kritérií v aplikaci EOT-viz. kapitola EOT. Označení proměnných v parametrickém modelu je následující:

#### Zvolené parametry a jejich vlastnosti

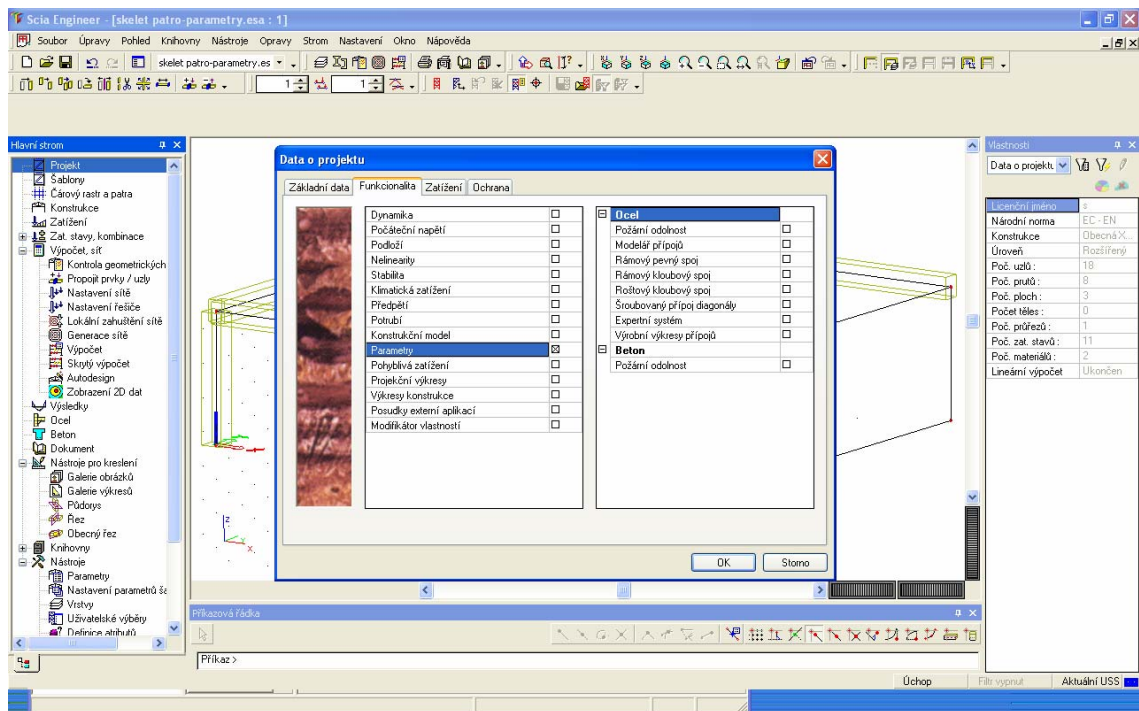
Jméno:	Typ:	Popis:	Hodnota:	Jednotka:
h	Délka průřezu	Tloušťka desky	300	mm
a	Délka průřezu	Výška průřezu	500	mm
b	Délka průřezu	Šířka průřezu	400	mm
d	Průměr výztuže	Průměr výztuže pruty	24	mm
d1	Průměr výztuže	Průměr třmínků	8	mm
d2	Průměr výztuže	Průměr výztuže plochy	8	mm

Do modelu skutečného provedení musí být tyto parametry začleněny. Nejprve si vysvětlíme postup zapsání a vnesení parametrů do projektu a poté jejich implementaci do prutových a plošných prvků.

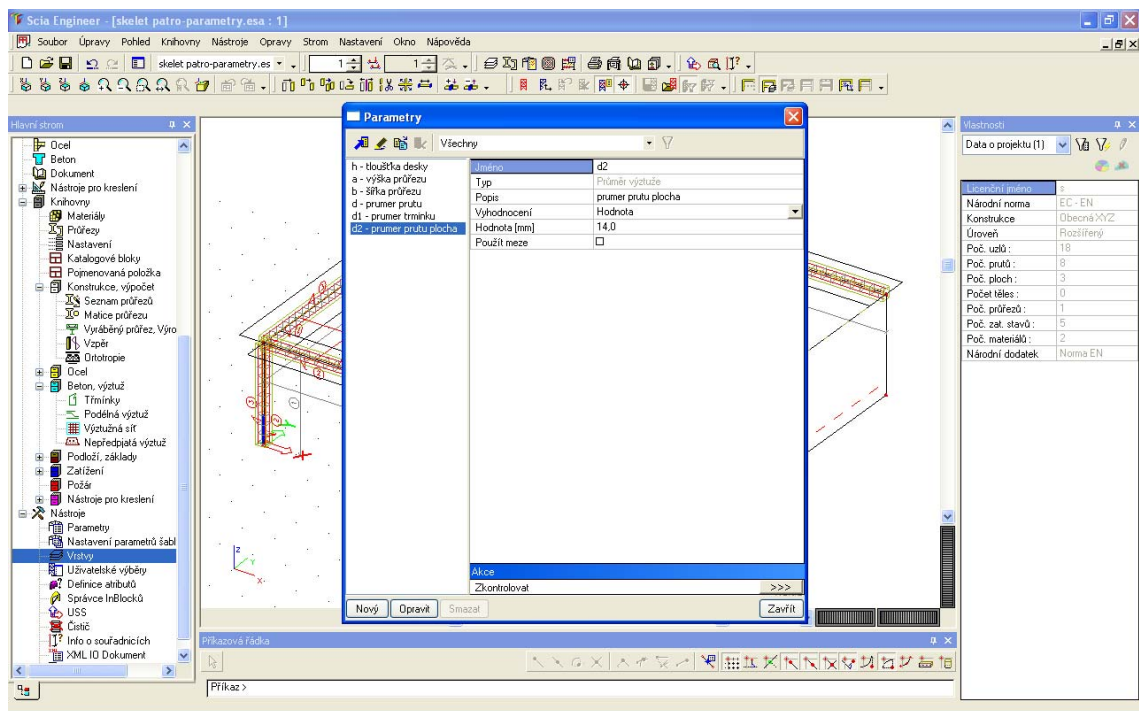
V programu Scia Engineer máme téměř vždy tři možnosti, kterak vybrat úkon či položku. Buď můžeme využít hlavního menu v horní liště okna nebo akční tlačítka s grafickým znázorněním dané akce pod lištou hlavního menu, ale dle referencí nejpoužívanější způsob vybrání uživateli zvolené akce je přes strom nabídek, který se v našem případě nachází v levé části obrazovky. V následujících částech, když nebude řečeno jinak, bude postup vysvětlen právě s pomocí stromu nabídek.

Již na začátku je nutné označit křížkem [**parametry**] v položce [**funkcionalita**] po kliknutí na ikonu [**projekt**] ve stromu nabídek. Výběr je nutné potvrdit stiskem tlačítka [**OK**] (obr. 3-11). Toto zaškrtnutí nám umožní použití parametrů v projektu. Následuje samotná definice parametrů, kde ze stromové nabídky vybereme položku [**nástroje**], [**parametry**] a kliknutím na tlačítko [**nové**] definujeme parametry, které budeme používat (obr. 3-12). Významnou položkou při definování parametrů je typ parametru, který je velmi důležitý pro správné použití parametrů. Nemůže být například použito typu délka místo délka průřezu, když chceme dát jako parametr některý rozměr definovaný v řezu. Daný parametr se nám při definici průřezu totiž vůbec nezobrazí, i když jsme si jisti jeho vytvořením.





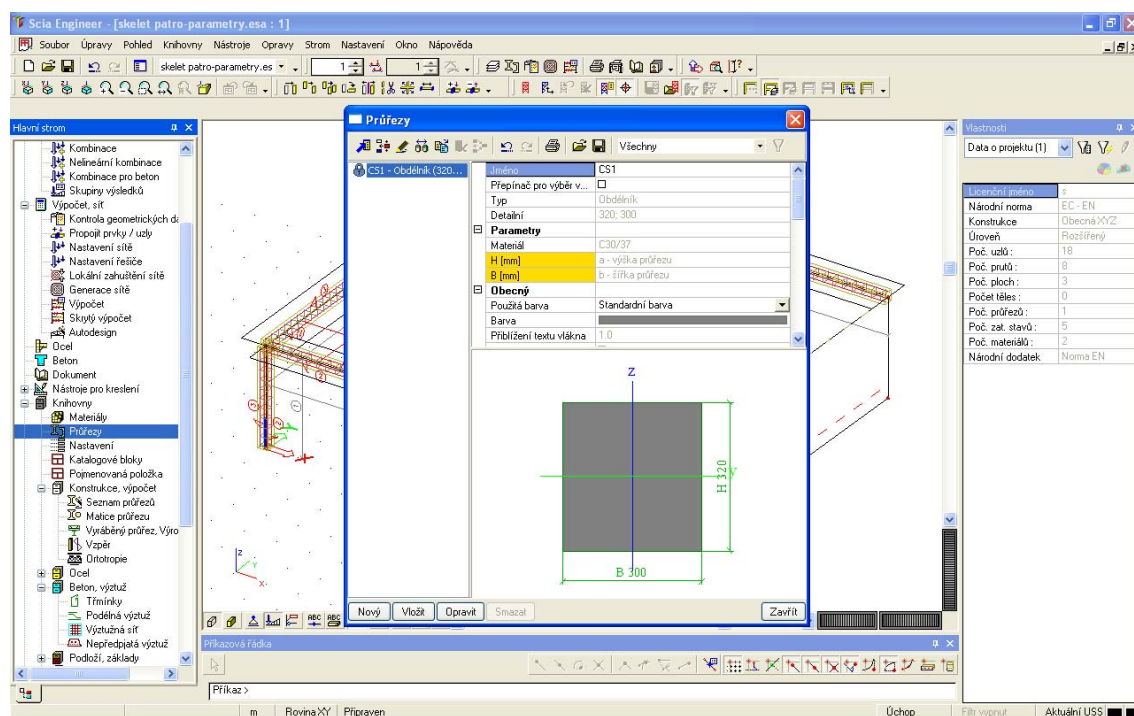
Obr. 3-11: Zavedení parametrů do projektu



Obr. 3-12: Definice jednotlivých parametrů

Po definování parametrů a zvolení správné specifikace parametrů můžeme začít již přebudovávat model skutečného provedení na model parametrický. V první řadě změníme příčné řezy prutových prvků. V modelu skutečného provedení se nám objevily tři různé typy průřezů prutových prvků. Čtvercový o hraně 400 mm, kruhový o průměru 500 mm pro sloupy a obdélníkový o rozměrech 470x400 mm pro ztužující žebra. Nově bude průřez jen jeden o hranách s rozměry a,b, který bude použit pro žebra i pro sloupy. Nejdříve vytvoříme parametrické průřezy a pak je přiřadíme již vymodelovaným prvkům. Popis, kterak udělat tyto úkony, je následující: rozvineme ze stromu nabídek položku [knihovna] a kliknutím na [průřezy] se nám otevře okno, kde můžeme definovat průřezy. Vybereme v dolní části aktivního okna položku [nový] a vytvoříme nový průřez. Důležité je zvolit pro rozměry H a B správné parametry, aby se nám později mohl při optimalizaci průřez měnit (obr. 3-13). Po uložení průřezu stačí okno průřezy zavřít. Následuje výběr prvků, označením (výběrem myší) nebo je možné, pro tento případ však poněkud složitější varianta, vytvořením skupiny prvků. V pravé části obrazovky, kde se nachází okno vlastnosti, už pak stačí vybrat pro tyto prvky nově vytvořený průřez.

Obdobně lze přiřadit parametr tloušťka desky všem plošným konstrukcím, tedy oběma stěnám i desce. Stačí pouze označit myší vybrané konstrukce a v okně vlastnosti vybrat parametr h u položky [tloušťka]. Po tomto úkonu už je konstrukce z hlediska rozměrů a průřezů parametrizovaná. Nyní bude následovat parametrické vyztužení prvků.

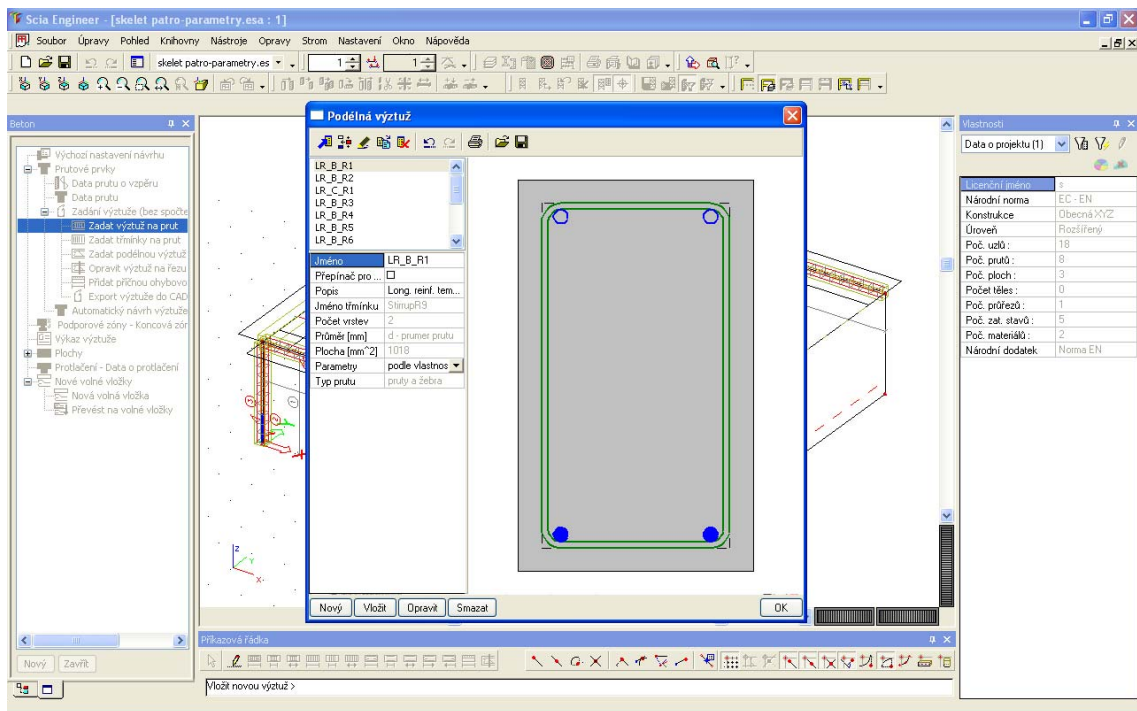


Obr. 3-13: Vytvoření nového parametrického průřezu

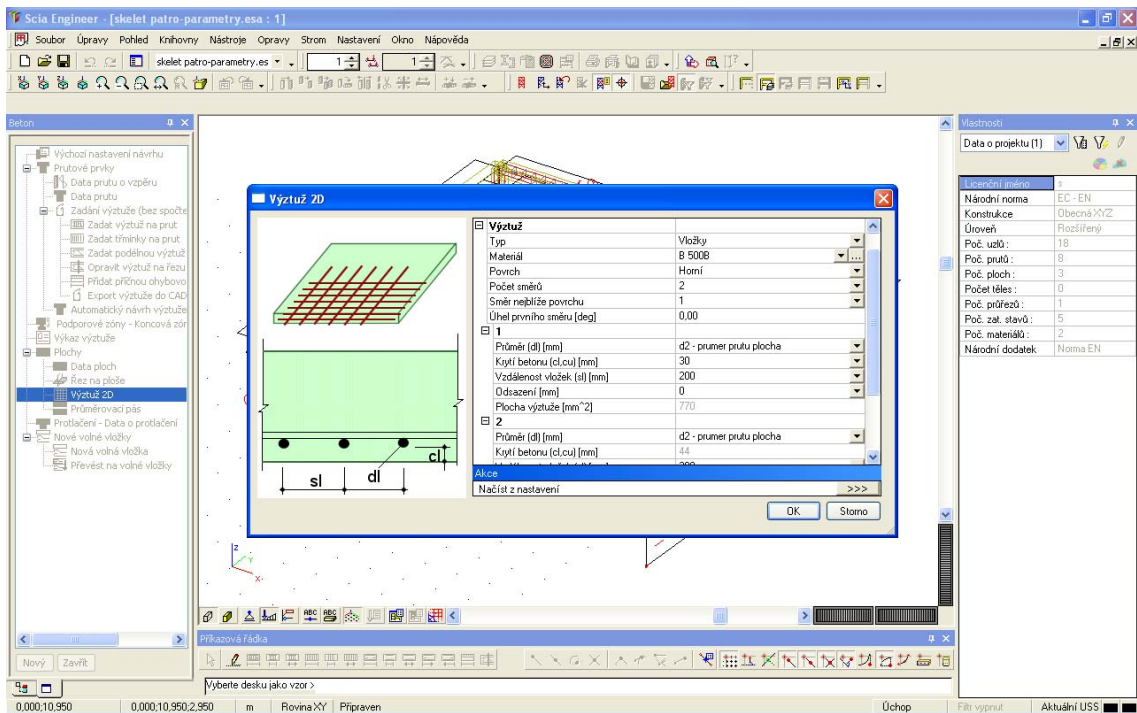
Pro parametrické vyztužení prvků se jeví jako nejlepší varianta vytvoření šablony vyztužení, kde budou dané parametry, tedy průměr podélné výztuže a třmínků začleněny. Toto se může udělat následujícím způsobem, kdy se ze záložky [**beton**] ze stromové nabídky rozvine nabídka [**prutové prvky**] a [**zadání výztuže**] kde se nachází [**zadat výztuž na prut**]. Po poklepu na poslední jmenovanou záložku je nutné vybrat prvek nebo jeho část, kterou budeme chtít vyztužit. Následně se objeví okno (obr. 3-14), kde už můžeme vybrat šablonu vyztužení a upravit jí vybráním položky [**opravit**] a pro průměr výztuže v šabloně nastavíme parametr  $d$  a parametr  $d_1$  pro průměr třmínků. Parametry můžeme také nastavit nebo zkontrolovat díky okně vlastnosti, kdy po vybrání výztuže na prvku lze editovat spousty položek včetně průměru výztuže a třmínků. Zmíněný postup vyztužování prutových prvků provedeme pro všechny sloupy i všechna žebra.

Vyztužení stropu a stěn se nebude odehrávat přes šablony výztuže, nýbrž do každé plošné konstrukce se umístí při horním a dolním povrchu a do dvou na sebe kolmých směrů výztužné vložky. Existuje i možnost použít jako výztuž síť, ale v našem případě jsme zvolili právě vložky. Jejich zavedení do modelu je vcelku jednoduché. Stačí přes stromovou nabídku a opět ze záložky [**beton**] rozvinout tentokrát [**plochy**], kde se nachází akční tlačítko [**výztuž 2D**]. Po kliknutí na zmíněné tlačítko budeme vyzváni k vybrání plochy, do které budeme chtít výztuž aplikovat. Po vybrání konstrukce, například stropu, se objeví okno pro nastavení vyztužení daného prvku. V tomto okně si lze vybrat právě typ vyztužení (síť, vložky). Stejně tak je zde možné upravit nastavení vyztužení jako je krytí, použitý materiál nebo úhel odklonu (obr. 3-15). Pro náš návrh je velmi důležité nastavit v kolonce [**průměr**] parametr  $d_2$ , který nám, jak je výše patrné z výpisu hodnot a popisu parametrů, určuje průměr výztuže v plošných prvcích. Zjednodušíme si kvůli výpočtu a názornosti příkladu jednotný parametr pro oba směry i pro horní a dolní povrch pro stěny i strop.

Tímto bychom měli mít implementované všechny parametry, které jsme si zvolili, že nám půjdou do procesu optimalizace. Velmi vřele se doporučuje kontrola, zda jsou parametry na všech místech, kde je chceme mít. Ať už z hlediska úplnosti, tak i z hlediska korektnosti, abychom z optimalizace získávali smysluplná řešení. Kontrola začlenění všech parametrů do projektu může být provedena například tak, že se vrátíme přes stromovou nabídku a záložku [**nástroje**] do položky [**parametr**]. Oproti stejnému postupu zmíněnému o několik stránek výše nelze začleněné parametry odstranit pomocí tlačítka [**smazat**], respektive je tlačítko šedé a není možné jej stisknout. Kontrola správného začlenění parametrů do modelu je nejspíše nejlépe vidět v okně vlastnosti při výběru jednotlivých komponent modelu (prutový prvek, plošný prvek, výztuž prutu, výztuž plošných konstrukcí).



Obr. 3-14: Výběr šablony pro vyztužení prutových prvků



Obr. 3-15: Nastavení výztuže pro plošné prvky

Samotný model ale nestačí pro komunikaci s aplikací pro optimalizování. Nutností je vytvoření tzv. XML<sup>5</sup> souboru či souborů, ve kterých budou vstupy a výstupy, které budeme chtít ovlivnit nebo získat z naší optimalizace. Tento typ souboru je jeden z možných dokumentů, které se dají v programu Scia Engineer 2010 vytvořit. Doporučuje se udělat dva tyto dokumenty, jeden s potřebnými vstupy, v našem případě s parametry, a druhý s výstupy, které nám budou definovat cílovou funkci nebo které přímo cílovou funkcí či omezením jsou.

Postup, jakým tyto dokumenty vytvoříme není složitý. Nejprve je, nejlépe opět ze stromové nabídky, nutno rozvinout záložku [**nástroje**] a zde vyhledat a otevřít položku [**XML IO Dokument**]. Otevře se nám okno, ve kterém je možné vytvořit jednotlivé dokumenty a do nich ukládat potřebná data, která budeme k optimalizaci potřebovat. V levé horní části obrazovky máme malé okno, které nás informuje o xml dokumentech. Zde se po kliknutí na tři tečky otevře podokno, kde můžeme přes tlačítko [**nový**] vytvořit a pojmenovat xml dokumenty. V našem případě jsme zvolili pro dokument s vstupy název In a s výstupy Out (obr. 3-16). Toto podokno je pak nutno zavřít, abychom mohli vkládat data do dokumentů. Do vstupního dokumentu vložíme nadefinované parametry a do výstupního dokumentu pak vložíme posudek sloupů a žeber na mezní stav únosnosti a použitelnosti, výkaz materiálu, výkaz výztuže, průhyb stropní konstrukce a nutné přídavné plochy. Výstupní data volíme taková, aby nám korespondovala s naším záměrem optimalizace ceny konstrukce, do kterého vstoupí cena výztuže a cena betonu. Proto potřebujeme výkaz výztuže, respektive výkaz materiálu. Výkaz výztuže pro plošné konstrukce je nutno ovšem zadat vhodnou rovnicí přímo do optimalizační aplikace, jelikož zatím výkaz 2D výztuže nadefinovaný v .xml souboru není schopný správné odezvy při optimalizaci. Posudek na mezní stavy bude sloužit jako omezující podmínka pro optimalizaci, aby nám nevycházela řešení, která nebudou vyhovovat z hlediska norem, únosnosti a použitelnosti. Jako omezující podmínka bude sloužit i průhyb, respektive jeho mezní hodnota a také přídavné nutné plochy 2D výztuže.

Data do dokumentu vložíme pomocí tlačítka [**nový**]. Po otevření nového okna postupně vybereme data, která chceme, aby dokument obsahoval (obr. 3-17). Pozor bychom měli dávat hlavně na to, abychom data vkládali do správného dokumentu. Dříve bylo nutné tyto dokumenty exportovat. Dnes už tomu tak není. Postačí, abychom po zavření okna s xml dokumenty celý projekt uložili. Samozřejmě neuložení projektu znamená, že při zavolání daného .esa souboru v aplikaci pro optimalizaci se nenajdou příslušné .xml soubory. Nyní už končí práce s modelem, neboli práce se souborem .esa, a můžeme se vrhnout na aplikaci EOT, která je optimalizačním nástrojem pro statický software Scia Engineer 2010.

---

<sup>5</sup> XML – zkratka Extensible Markup Language (v češtině: rozšiřitelný značkovací jazyk), jazyk, který je určen především pro výměnu dat mezi aplikacemi a pro publikování dokumentů.

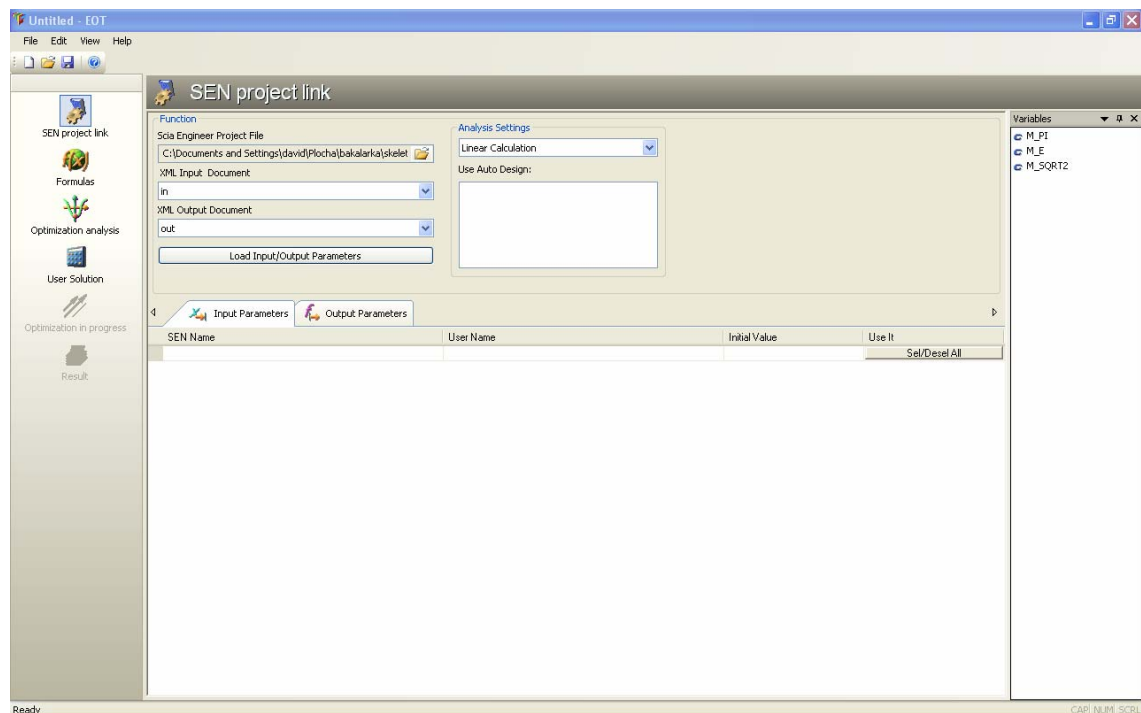




## 3.6 EOT

Optimalizace ve statických programech není úplnou novinkou. Většinou je ale zabudována jako automatický návrh a používá pouze jednoduché metody, díky kterým se vybírá vhodný profil či průřez z dostupných knihoven uvnitř programu. Podobný algoritmus mají zabudované i programy Scia. Ovšem až od verze Scia Engineer 2010 můžeme využívat samostatnou optimalizační aplikaci EOT-(Scia) Engineer Optimization Toolbox. Aplikace je stále ve vývoji, ale už teď nabízí využití pěti optimalizačních metod. Tyto metody jsou: metoda sekvenčního kvadratického programování-SQP, rozšířené simulované žíhání, diferenciální evoluce, Nelder-Mead strategie a metoda zlatého řezu. Pro každou z těchto metod jsou připraveny parametry, kterými je možno upravit ten který algoritmus. Pro náš případ jsme jako optimalizační metodu vybrali metodu rozšířeného simulovaného žíhání, popsanou ve stejnojmenné podkapitole této práce. Důvodů, proč zvolit zrovna tuto metodu, bylo hned několik. Rozšířené simulované žíhání je nejrobustnější z metod, které se v aplikaci EOT nachází. Pozitivem také je, že kombinuje výhody heuristik a genetických algoritmů. Pro naši optimalizaci, kde cílová funkce je multimodální (má více optimálních řešení) a soubor parametrů není spojitý, ale diskrétní, byla volba metody tedy vcelku jednoznačná. V další části si představíme podrobněji prostředí EOT, respektive na našem příkladu si ukážeme postup zadávání dat do této aplikace pro proces optimalizace.

Jak už bylo zmíněno, EOT je samostatná aplikace, která se nespouští z modelového prostředí. Je nutné nejdříve najít spustitelný soubor EOT.exe, který se ale obvykle nachází v adresáři, kam jsme nainstalovali celý statický software Scia Engineer 2010. Po spuštění tohoto souboru se nám otevře okno s anglickým, ale intuitivním prostředím (obr. 3-18).

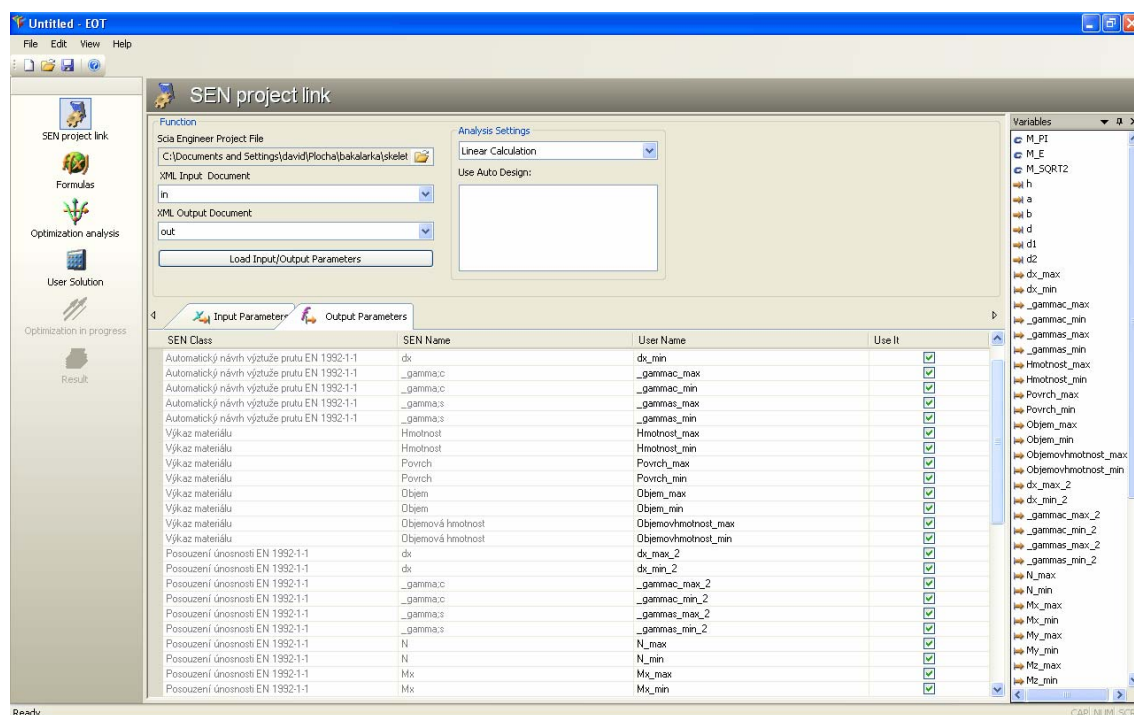


Obr. 3-18: Prostředí aplikace EOT

Na pravé straně zobrazeného okna je lišta s nabídkami, na levé přehled proměnných a uprostřed hlavní pracovní plocha. Jako první musíme načíst soubor, ve kterém je náš parametrizovaný model. Stačí rozvinout ikonu s vyobrazenou složka, a vyhledat patřičný .esa soubor. Po tomto kroku se v kolonkách pro XML soubory objeví nabídka dokumentů, které jsme vytvořili podle pokynů v předešlé podkapitole. K našemu souboru s modelem, jsme vytvořili dva dokumenty. Vstupní a výstupní. Zde se ukazuje prozíravost v pojmenovávání, jelikož jsme dokumentům přiřadili jména In pro vstupní a Out pro výstupní. Tímto je téměř nemožné soubory zaměnit při přiřazování Input XML dokumentu a Output XML dokumentu, jak nám ukládá aplikace EOT. Druhým krokem tedy je přiřazení správných vstupních a výstupních dokumentů.

Ze vstupního dokumentu máme hodnoty, pomocí kterých jsme provedli parametrizaci modelu. Pro připomenutí - parametry jsou rozměry příčných průřezů prutových prvků, tloušťka plošných konstrukcí, průměr podélné výztuže, průměr třmínků a průměr výztuže plošných konstrukcí. Každý parametr je možné odškrtnout, což znamená, že parametr použitý v modelu nemusí být v procesu optimalizace.

Výstupních parametrů se vyhodnotí velká spousta v závislosti na datech, která jsme přiřadili do výstupního .xml dokumentu (obr. 3-19). Například výkaz materiálu obsahuje kromě objemu betonu i plochy betonových prvků a další pro naši optimalizaci nepotřebná data. Stejným způsobem, jakým je možno eliminovat počet parametrů na vstupu, je možné odstranit nepotřebná data ve výstupních parametrech.



Obr. 3-19: Výstupní parametry v aplikaci EOT



## Výstupní parametry a jejich popis

### 1) Objem\_max

Vypočte objem betonu v celé konstrukci včetně plošných konstrukcí.

Pozn.: Důležité je, aby při zadávání dat do .xml souborů byla ve výkazu materiálu zaškrtnuta položka materiál, nikoliv pouze průřez, kde by tento parametr určoval pouze objem prutových prvků a ne plošných, což je pro celkový objem rozhodující.

### 2) Uz\_min

Určí maximální průhyb na desce. Jeho hodnota je ovšem záporná, jelikož je průhyb proti směru globální osy z. Pro posouzení se porovná tato hodnota s 1/500 rozpětí pole desky, což je konzervativní hodnota průhybu. V našem případě, kdy je rozpětí jednoho pole přibližně 5 metrů, se omezující hodnota průhybu nastavila na 10 mm.

### 3) Posouzenvyp\_max

Posouzení, neboli *unit checky*, na mezní stav únosnosti a použitelnosti. Vyhovující je tehdy, když je v rozmezí hodnot 0 a 1, přičemž krajní hodnoty do intervalu patří

### 4) Celkovvha\_max

Váha výztuže pro prutové prvky včetně třmínků. Váhu výztuže pro plošné prvky určíme pomocí externí funkce, kterou určíme po výčtu výstupních parametrů.

### 5-8) Ar1\_max, Ar2\_max, Ar1\_max\_2, Ar2\_max\_2

Nutná přídavná plocha výztuže k parametricky zadané výztuži v plošných prvcích. Hodnoty jsou pro dva na sebe kolmé směry a pro horní a dolní povrch. Nejpříznivější by bylo, kdyby byly tyto hodnoty nulové, což by znamenalo, že výztuž parametrická pokrývá plně účinky mezního stavu únosnosti i použitelnosti (trhlinky). Ovšem zajisté není nutné, aby se zvětšoval průměr výztuže pro všechny plošné prvky v obou směrech a horním i dolním povrchu, kdyby byla nutná přídavná plocha například 35 mm<sup>2</sup>. Při pohledu na konstrukci a při vyztužení modelu skutečného provedení je jasné, že nevyhovuje pouze velmi malá lokální část plošného prvku. Z toho důvodu byla nastavena omezující podmínka, při jejímž překročení navrhované řešení nevyhoví, právě na hodnotu 35 mm<sup>2</sup>.

Naším cílem, nebo lépe řečeno naší cílovou funkcí je cena, která se skládá z ceny betonu a ceny výztuže. Pro tyto případy, kdy některá proměnná, která by měla vstupovat do procesu optimalizace se nenalézá v proměnných pro výstup, je možno tyto proměnné zadávat ručně pomocí matematických operací. Musíme ovšem přejít ze záložky [SEN project link] do záložky [formulas], kde, jak název napovídá, si naformulujeme další proměnné. Pro optimalizaci bude potřeba posouzení prvků, přídavné výztuže a průhybu jako omezujících podmínek a cena jako cílová funkce. Posouzení prvků je již ve výstupech nadefinováno. Ovšem cena ve výstupních parametrech chybí. Pro celkovou cenu je nutné vynásobit hmotnost veškeré výztuže v modelu a veškerého materiálu jednotkovými cenami. Celkový objem betonu je přímo ve výstupních parametrech z .xml dokumentu, naopak k hmotnosti výztuže pro prutové prvky je nutno nadefinovat a připočíst váhu výztuže v plošných prvcích, jejíž formulaci a výpočet si následně vysvětlíme.

Pro výpočet budou nutné následující vstupní hodnoty:

Rozměry stropní desky: 11800x10950 mm

Rozměry krajní stěny: 10950x2950 mm

Rozměry středové stěny: 4300x2950 mm

Vzdálenost vložek od sebe: 200 mm

Objemová hmotnost oceli: 7850 kg/m<sup>3</sup>

Výpočet hmotnosti výztuže bude přes výpočet celkové délky vložek pro tu kterou konstrukci.

Stropní deska:

$$\text{Délka}_1 = 11,8 \cdot 10,95 \cdot 2 \cdot 2 / 0,2 = \underline{2584,2 \text{ m}}$$

Krajní stěna:

$$\text{Délka}_2 = 10,95 \cdot 2,95 \cdot 2 \cdot 2 / 0,2 = \underline{646,1 \text{ m}}$$

Středová stěna:

$$\text{Délka}_3 = 4,30 \cdot 2,95 \cdot 2 \cdot 2 / 0,2 = \underline{253,7 \text{ m}}$$

Celková délka:

$$\text{Délka}_c = \text{Délka}_1 + \text{Délka}_2 + \text{Délka}_3 = 2584,2 + 646,1 + 253,7 = \underline{3484 \text{ m}}$$

Váha výztuže plošných prvků:

$$\text{VahaVyz} = \text{Délka}_c \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho_{\text{ocel}} / 4$$

$$\text{VahaVyz} = 3484 \cdot 3,14 \cdot d^2 \cdot 7850 / 4$$

$$\text{VahaVyz} = \underline{21567000 \cdot d^2}$$

Matematickými úpravami jednoduchých rovnic jsme se dostali k hmotnosti ocelových vložek v desce a dvou stěnách. Jediná neznámá v dané rovnici je průměr vložek, což je ovšem náš parametr. Už tedy chybí pouze definovat rovnici, která by popisovala celkovou cenu konstrukce. Tato suma, jak víme z předešlých odstavců, bude složena z ceny hlavních materiálů, tedy z ceny použitého betonu a oceli. Uvažujeme cenu materiálů podle nabídky na trhu v roce 2010, pro beton 1850 Kč/m<sup>3</sup> a cenu oceli 20 Kč/kg. Výsledná rovnice ceny má tedy tvar:

$$\text{cena} = (\text{Objem}_{\text{max}} \cdot 1850) + ((\text{VahaVyz} + \text{Celkovvha}_{\text{max}}) \cdot 20)$$

Po zavedení potřebných parametrů je na řadě záložka [**Optimization analysis**]. Tato záložka má dva oddíly. V prvním oddíle [**Independent variables**] si zadáme meze pro jednotlivé vstupní parametry. Důležité na rozmyšlení jsou nejen meze, ale také jestli mezi minimem a maximem pro parametry se bude hodnota pohybovat krokově nebo nikoliv. V našem případě se budou všechny parametry pohybovat po krocích. Postup je i výstižnější vzhledem k realitě. Bylo by krajně nepraktické uvažovat rozměry betonových dílců s přesností na milimetry. Například těžko se setkáme s výškou desky 207 mm. Meze pro jednotlivé parametry a hodnoty kroku jsou ukázány v přehledu.

### Hodnoty kroků a limitních hodnot pro jednotlivé parametry

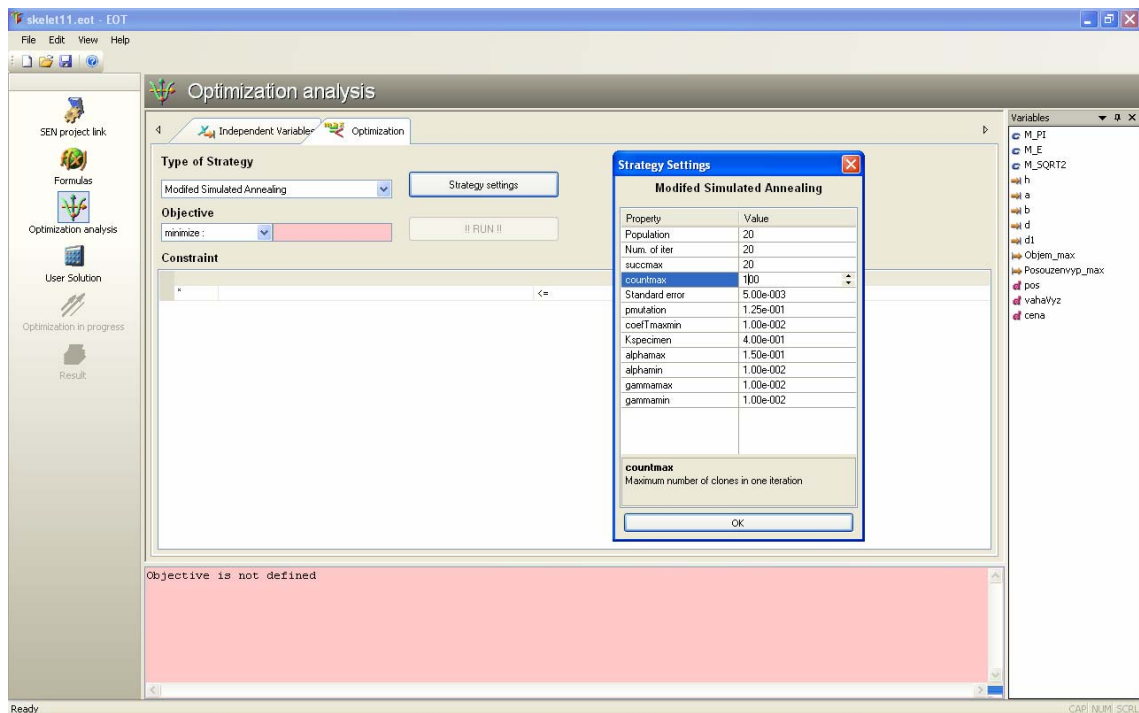
Parametr	Minimum	Maximum	Krok
h – Tloušťka desky	150 mm	300 mm	10 mm
a – Výška průřezu	250 mm	400 mm	10 mm
b – Šířka průřezu	250 mm	400 mm	10 mm
d – Průměr výztuže pruty	16 mm	32 mm	2 mm
d1 – Průměr třmínku	6 mm	12 mm	2 mm
d2 – Průměr výztuže plochy	10 mm	18 mm	2 mm

Druhý oddíl [**optimization**] se zabývá vlastním nastavením metody. Už v úvodu kapitoly bylo řečeno, že na výběr je z pěti optimalizačních metod. Důležité je vybrat si nejužitečnější metodu pro daný optimalizační problém. Výběr se provede po rozvinutí nabídky [**type of strategy**]. Neméně důležité jako nastavení mezi parametrů je nastavení samotné metody, které nalezneme v záložce [**Strategy settings**] (obr. 3-20). Rozšířené simulované žíhání má možnost nastavit hned 12 prvků, které mají vliv nejen na čas optimalizačního procesu, ale i například na úspěšnost metody. Přednastaveny jsou hodnoty z výpisu níže, které také byly použity v našem případě.

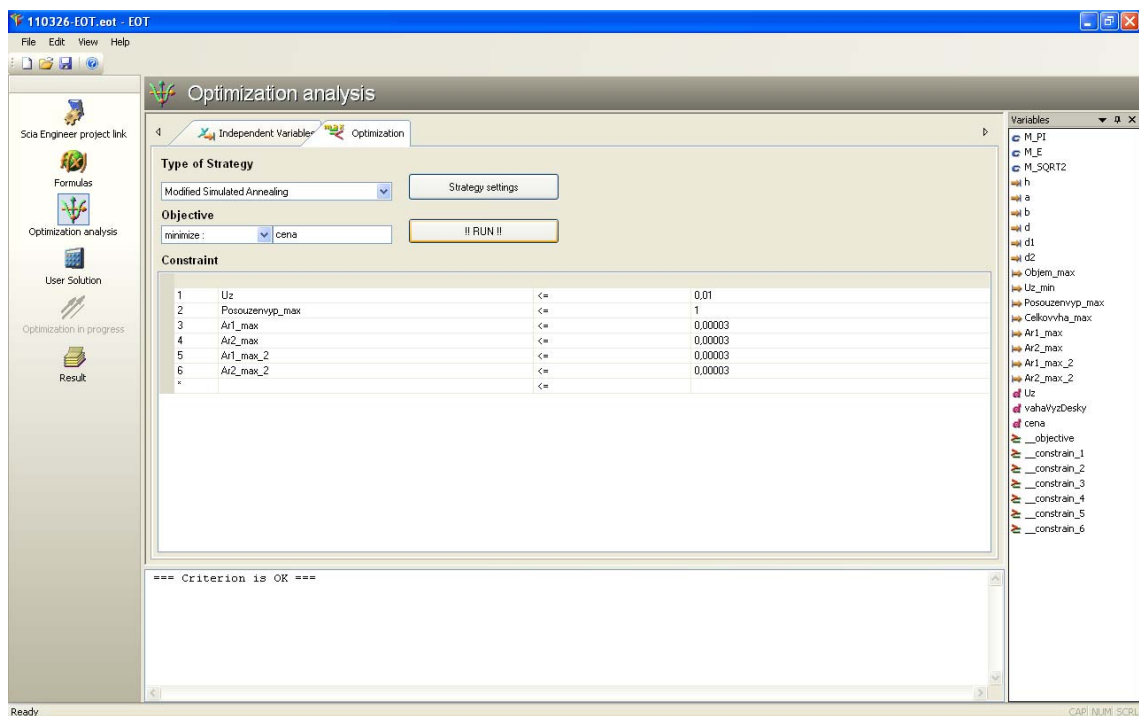
### Hodnoty proměnných v nastavení optimalizační metody

<u>Proměnná</u>	<u>Popis</u>	<u>Hodnota</u>
Population	Velikost populace	20
Num. of iter	Počet iterací	20
succmax	Max. počet úspěšných klonů za iteraci	30
countmax	Maximální počet klonů v iteraci	300
Standart error	Relativní chyba pro parametry bez kroku	0,005
pmutation	Pravděpodobnost mutace	0,125
coefTmaxmin	Poměr minimální teploty k maximální	0,01
Kspecimen	Pravděpodobnost přijetí horšího řešení	0,4
alphamax	Maximální penalizace omezení	0,15
alphamin	Minimální penalizace omezení	0,01
gammamax	Maximální penalizace omezení	0,01
gammamin	Minimální penalizace omezení	0,01

Po potvrzení nastavených hodnot stiskem tlačítka [**OK**] si musíme zvolit jaký hledáme extrém a čeho. Pod nápisem [**Objective**] máme na výběr, zda budeme minimalizovat či maximalizovat funkci. My budeme minimalizovat proměnnou cenu. Chybí už pouze zadat omezující podmínky, kterými jsou posudek prutových konstrukcí, průhyb a přídavná plocha a jejich přípustné hodnoty zmíněné při výpisu výstupních parametrů. Po definici těchto posledních hodnot už nebrání nic spuštění optimalizace kliknutím na výmluvně nazvané tlačítko [**RUN!!!**] (obr. 3-21).



Obr. 3-20: Nastavení zvolené optimalizační metody



Obr. 3-21: Nastavení omezujících podmínek a cílové funkce

## 4 VÝSLEDKY

V této části si ukážeme, zda hodnoty které nám vyšly pomocí optimalizačního toolboxu EOT jsou v souladu s modelem a zda opravdu splňují podmínky pro mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Uvidíme, jestli pomocí optimalizace v porovnání s modelem skutečného provedení lze ušetřit část materiálu, ať už betonu nebo oceli, a tím i ušetřit tolik potřebné finance. Zajímavé také bude sledovat, který parametr nejvíce ovlivňuje cílovou funkci nebo který parametr nejvíce ovlivňuje splnění či nesplnění okrajových podmínek.

### 4.1 Výsledky dosažené optimalizací

V předchozí části jsme si ukázali, kterak zadat hodnoty do EOT a zároveň jsme si řekli, jaké hodnoty parametrů či jaké hodnoty proměnných v optimalizační metodě použijeme pro naši optimalizaci. Nyní se podíváme jaké hodnoty a výsledky nám aplikace nabízí.

Další z mnoha výhod optimalizace pomocí EOT je, že uživatel nemusí čekat na plné dokončení optimalizace. Když se například ukazuje, že nalezená optima pro jednotlivé iterace jsou pořád stejná nebo pro nás dostačující můžeme optimalizaci ukončit či pozastavit. Dlužno poznamenat, že toto jsme využili i v našem případě, kdy byla optimalizace zastavena po dokončení sedmé iterace (pořadové číslo iterace je ale 6). Během optimalizace bylo vygenerováno dohromady 310 řešení.

Nyní si ukážeme vlastní výsledky optimalizace tedy soubor parametrů a závislých hodnot. V tabulce tab. 4-1 je nejlepších 20 řešení i s použitými parametry, hodnotami posouzení prutových prvků, maximem nutné přídavné výztuže pro plošné prvky, průhybem a výslednou cenou. Samozřejmě, že všechna tato řešení jsou přípustná, jinak řečeno, všechna řešení vyhovují zadaným omezujícím podmínkám.

<b>Optimální řešení - výstup z aplikace EOT</b>									
<b>h</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>d</b>	<b>d1</b>	<b>d2</b>	<b>Posouzení</b>	<b>Uz</b>	<b>Ar_max</b>	<b>cena</b>
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[mm <sup>2</sup> ]	[Kč]
0,15	0,28	0,28	0,024	0,008	0,012	0,6671	0,00586	35	<b>133306</b>
0,15	0,27	0,37	0,028	0,006	0,012	0,9202	0,00536	0	<b>139705</b>
0,16	0,36	0,26	0,026	0,008	0,012	0,6496	0,00460	0	<b>140618</b>
0,16	0,34	0,35	0,026	0,006	0,012	0,8983	0,00420	0	<b>142173</b>
0,16	0,35	0,28	0,028	0,006	0,012	0,7168	0,00454	0	<b>142800</b>
0,17	0,30	0,33	0,026	0,006	0,012	0,7673	0,00425	0	<b>143449</b>
0,15	0,28	0,29	0,032	0,006	0,012	0,6035	0,00578	25	<b>143736</b>
0,17	0,34	0,30	0,026	0,006	0,012	0,6792	0,00407	0	<b>143769</b>
0,18	0,27	0,32	0,026	0,006	0,012	0,7067	0,00416	15	<b>145439</b>
0,15	0,29	0,29	0,032	0,012	0,012	0,4933	0,00565	20	<b>146932</b>
0,20	0,25	0,32	0,022	0,008	0,012	0,7000	0,00359	25	<b>147315</b>
0,19	0,34	0,30	0,024	0,006	0,012	0,6813	0,00339	0	<b>147782</b>
0,19	0,33	0,32	0,022	0,010	0,012	0,8009	0,00337	0	<b>147861</b>
0,18	0,34	0,30	0,028	0,006	0,012	0,6333	0,00371	0	<b>149618</b>
0,20	0,32	0,33	0,022	0,008	0,012	0,8423	0,00312	0	<b>149962</b>
0,20	0,29	0,26	0,026	0,006	0,012	0,5067	0,00356	31	<b>150835</b>
0,20	0,40	0,32	0,022	0,008	0,012	0,8319	0,00274	0	<b>152303</b>
0,20	0,36	0,26	0,026	0,006	0,012	0,6388	0,00317	10	<b>152655</b>
0,19	0,38	0,29	0,028	0,006	0,012	0,6486	0,00321	0	<b>153664</b>
0,22	0,29	0,28	0,022	0,010	0,012	0,5383	0,00294	28	<b>154880</b>

**tab. 4-1:** Výpis optimálních řešení z aplikace EOT

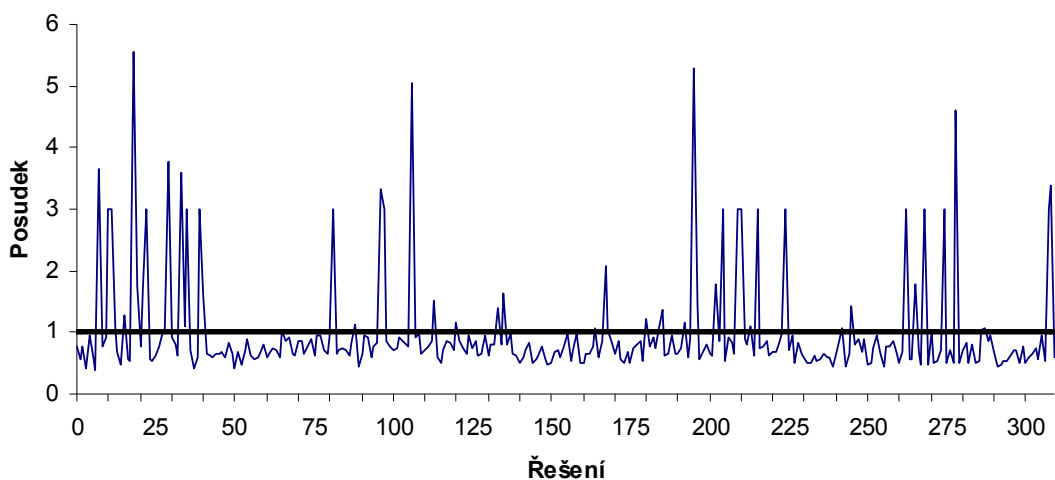
Z tabulky lze vyčíst, že patrně největší závislost má cílová funkce, tj. cena, na parametru průměru výztuže a to zvláště u vložek v plochách, který se v nejlepších dvaceti řešení nezměnil a zůstává na hodnotě 12 mm. Vzhledem k faktu, že minimální hodnota parametru d2 pro průměr výztuže plošných prvků byla v aplikaci EOT před spuštěním optimalizace nastavena na hodnotu 10 mm, lze se také domnívat, že minimální hodnota parametru narazila na některou z omezujících podmínek. Podrobný výpis z optimalizace, který uvádí hodnoty, co jsou v tabulce výše, ovšem pro všech 310 řešení, nám v domněnce dává za pravdu. Při hodnotě parametru 10 mm nejsou splněny omezující podmínky přídavné výztuže. Pro ilustraci některá řešení s tímto parametrem jsou v tabulce tab. 4-2. Vybrány jsou ta řešení, která by jinak splňovala další omezující podmínky, kterými jsou průhyb a posouzení prutových konstrukcí na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti.

Nevyhovující řešení - výstup z aplikace EOT									
h	a	b	d	d1	d2	Posouzení	Uz	Ar_max	cena
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[mm <sup>2</sup> ]	[Kč]
0,15	0,33	0,25	0,022	0,010	0,010	0,7272	0,00552	167	113588
0,15	0,32	0,27	0,022	0,010	0,010	0,7004	0,00545	156	113965
0,15	0,35	0,25	0,022	0,010	0,010	0,7240	0,00531	156	114171
0,15	0,28	0,28	0,028	0,006	0,010	0,6164	0,00586	174	118650
0,15	0,30	0,33	0,026	0,008	0,010	0,8132	0,00523	125	118855
0,15	0,29	0,33	0,026	0,010	0,010	0,7728	0,00535	132	119546
0,15	0,27	0,37	0,028	0,006	0,010	0,9202	0,00536	122	120726
0,15	0,29	0,33	0,026	0,012	0,010	0,7326	0,00535	132	120793
0,18	0,27	0,31	0,020	0,010	0,010	0,9144	0,00421	138	121196
0,15	0,28	0,38	0,028	0,006	0,010	0,9688	0,00516	113	121357
0,15	0,28	0,28	0,030	0,006	0,010	0,6139	0,00586	174	121471
0,18	0,27	0,32	0,020	0,010	0,010	0,9896	0,00416	134	121484
0,15	0,30	0,34	0,026	0,012	0,010	0,7826	0,00516	119	121521
0,16	0,32	0,28	0,028	0,006	0,010	0,6609	0,00482	131	122986
0,20	0,32	0,25	0,018	0,006	0,010	0,7725	0,00343	146	123770
0,15	0,35	0,35	0,026	0,012	0,010	0,8194	0,00455	92	123910
0,16	0,28	0,37	0,028	0,006	0,010	0,8802	0,00470	112	124309
0,17	0,32	0,29	0,028	0,006	0,010	0,6146	0,00430	125	126516
0,17	0,25	0,28	0,028	0,012	0,010	0,6209	0,00503	157	126849
0,18	0,33	0,32	0,022	0,012	0,010	0,8049	0,00368	113	127001

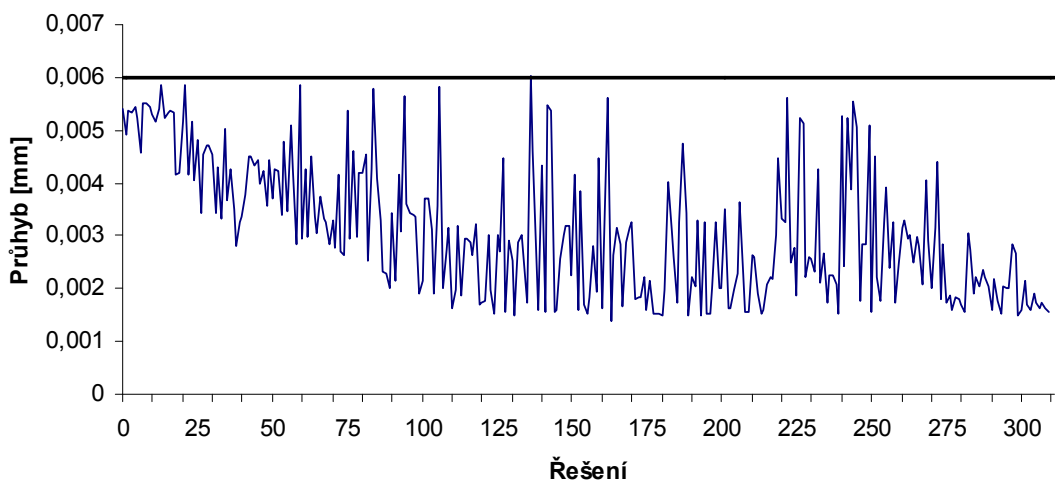
tab. 4-2: Vybraná nevyhovující řešení z aplikace EOT

Ve výpisu vybraných nevyhovujících řešení jsme uvažovali, že jediná podmínka, kterou daná řešení nesplňují, je posudek plošných prvků na mezní stav únosnosti a použitelnosti (trhlinky) pomocí přídavné výztuže. Ovšem to byl jen předpoklad. V následujících grafech si ukážeme, jak je to s dalšími podmínkami a sice s posudkem prutových konstrukcí a s průhybem desky. Jak je vidět na grafu (obr. 4-1), ne všechna generovaná řešení splňují takzvaný *unit check*, tedy jednotkový posudek konstrukce či jejích prvků. Konkrétně z 310 řešení splňuje danou podmínku 255 řešení. Ostatní řešení svými posudky přesahují přípustnou hodnotu 1. Ve Scia Engineer si můžeme zvolit hodnotu, která bude říkat, že konstrukce překročila povolený limit. Tato hodnota je nastavena na číslo 3, ale je jen u některého z dílčích posudků. V našem případě se jedná o posudek na mezní stav únosnosti. To vysvětluje, proč je na grafu při překročení jednotkového posudku poměrně častá hodnota 3.

Pro posouzení průhybů plošných konstrukcí byla zvolena poměrně přísná hodnota 10 mm. Daným posouzením ale projdou všechna řešení, kdy se maximální průhyb pohyboval kolem 6 mm. Tato omezující podmínka tedy nemá žádný vliv na optimalizaci a výsledky z ní plynoucí. Splnění limitního průhybu pro všechna řešení je graficky znázorněno na grafu obr. 4-2.



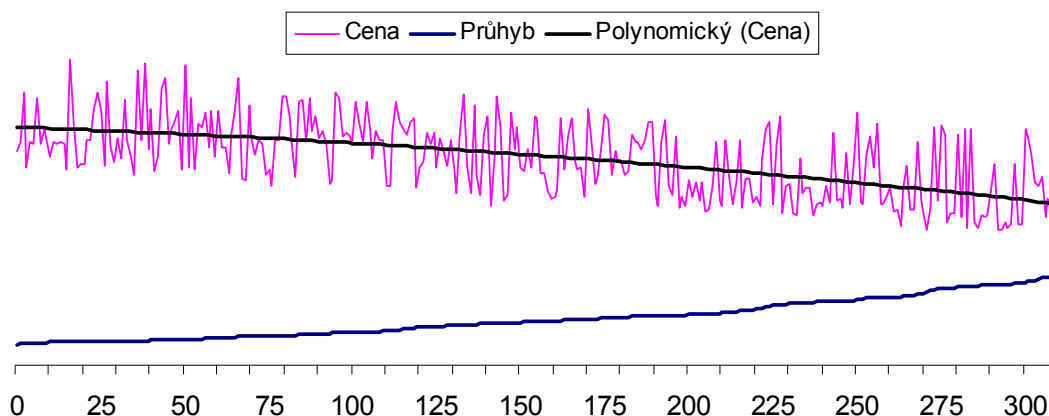
**Obr. 4-1:** Graf posudků prutových konstrukcí pro jednotlivá řešení



**Obr. 4-2:** Graf průhybů vůči limitní hodnotě pro řešení srovnaná dle ceny

Vypovídající hodnotu má průhyb například v porovnání s cenou, jak je vidět na grafu (obr. 4-3). Řešení nejsou postupně tak, jak byla generována. Průhyb, respektive křivka jeho hodnot, má totiž stoupající tendenci a je jasné, že čísla řešení jsou přeházená a x-ová souřadnice následujícího grafu má pouze nést informaci o počtu řešení. K jednotlivým průhybům je přiřazena celková cena tak, jak vyšla z aplikace EOT. Graf ceny při stoupající hodnotě průhybu značně osciluje. Když ale proložíme grafem ceny polynomicou spojnicí trendu, můžeme jasně vidět nepřímou úměru mezi cenou a průhybem. Roste-li průhyb, klesá cena a naopak. To znamená, že pokud bychom chtěli nebo dokonce potřebovali tužší konstrukci, musíme si připlatit.





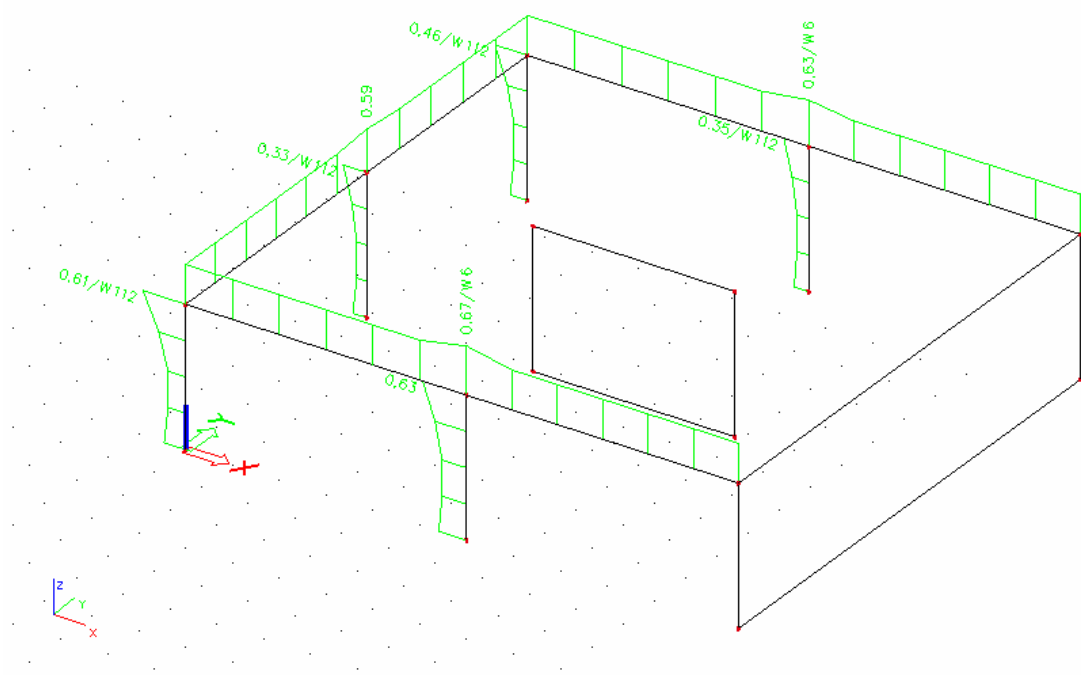
**Obr. 4-3:** Graf závislosti průhybu na ceně konstrukce

## 4.2 Kontrola a porovnání výsledků

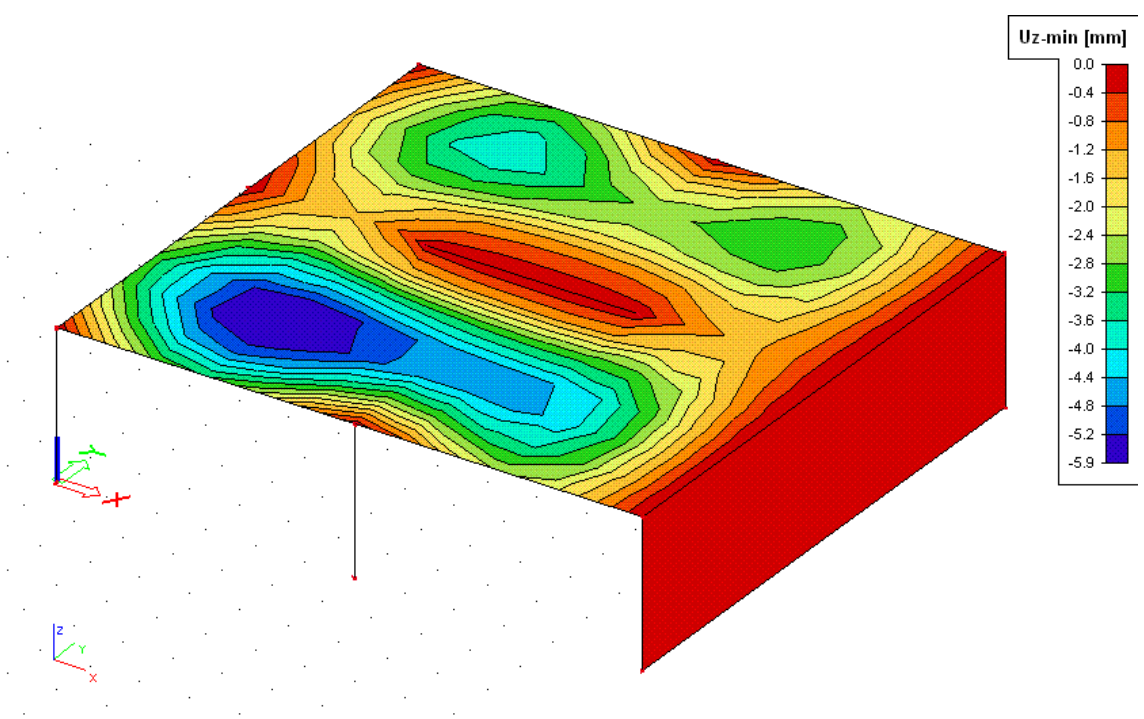
Staré přísloví říká: „Důvěřuj, ale prověřuj“. Proto nebude na škodu vzít výsledky z optimalizace a ještě jednou s nimi manuálně projít posouzení ve Scia Engineeru. Jak bylo uvedeno už v kapitole Modely, zabývali jsme se posouzením při kombinaci pro mezní stav únosnosti a použitelnosti. Kontrolovat budeme posudky pro nejvýhodnější sadu parametrů z hlediska ceny, která nám vyšla z optimalizace. Postupně tedy graficky ukážeme posouzení prutových prvků na oba mezní stavy. Při zavedení třídy výsledků je možné mít pouze jeden posudek zahrnující oba zmíněné stavy. Dále si zkontrolujeme průhyb na desce a také to, zda jsou na plošných prvcích dodrženy podmínky přidavné výztuže (ukázáno bude vyztužení v tom směru a povrchu, který prokazoval nejhorší výsledky). Jako poslední obrázek pak bude sloužit vyztužená konstrukce s pruty na svých místech a s nejvýhodnějšími parametry. Po nezbytné kontrole výsledku si následně ukážeme, jestli nám optimalizace byla užitečná z hlediska ceny, respektive z hlediska rozdílů ceny parametrického optimalizovaného modelu a modelu skutečného provedení. Pro připomenutí si uvedeme první z nabízených optimálních řešení, při kterém jsme dostali nejlevnější cenu konstrukce.

### Nejvýhodnější parametry z aplikace EOT

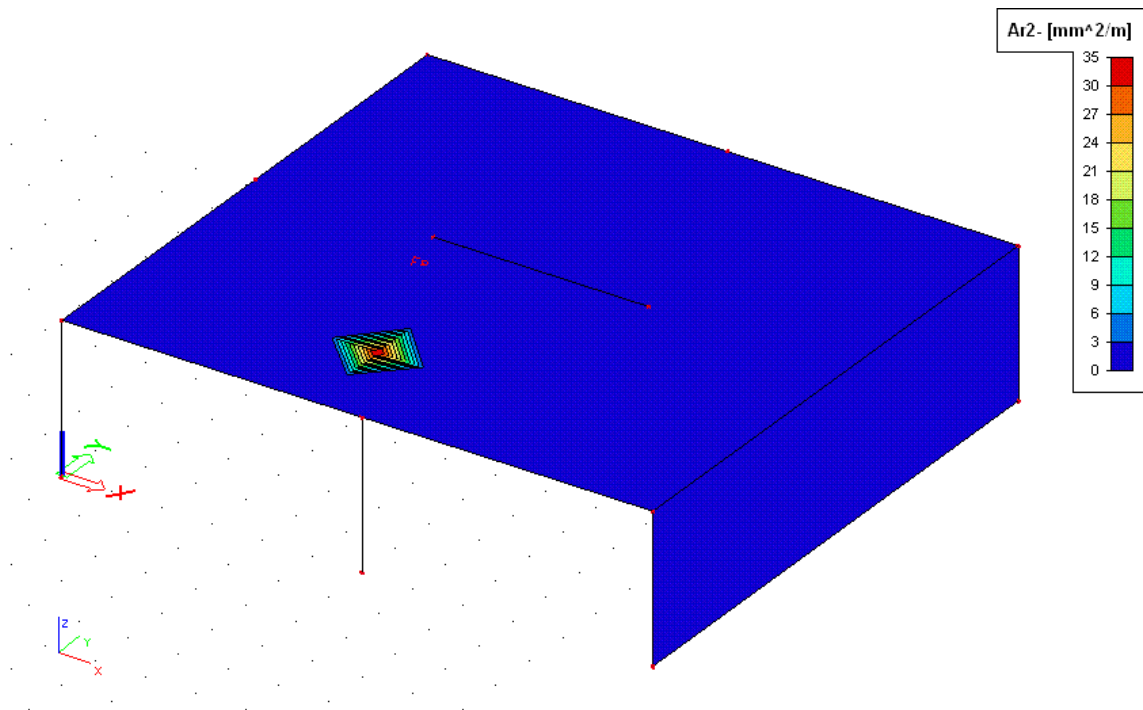
$h = 150 \text{ mm}; a = 280 \text{ mm}; b = 280 \text{ mm}; d = 24 \text{ mm}; d_1 = 8 \text{ mm}; d_2 = 12 \text{ mm}$



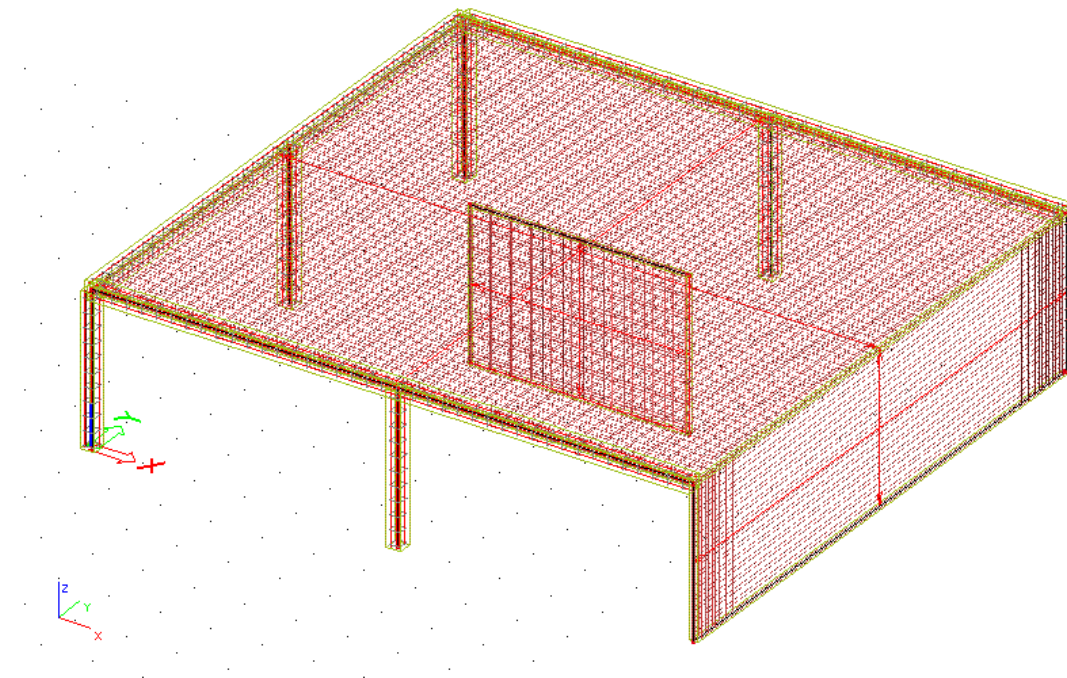
**Obr. 4-4:** Kontrola průběhu unit checků při parametrech z optimalizace



**Obr. 5-6:** Vykreslení přemístění uzlů Uz na deskových konstrukcích



**Obr. 7-8:** Maximální přídavná výztuž plošných konstrukcí



**Obr. 9-10:** Skutečná optimalizovaná výztuž v konstrukci

V modelu skutečného provedení, jak se můžeme přesvědčit ve stejnojmenné podkapitole, byla spotřeba betonu vypočtena na 46, 386 m<sup>3</sup>. Cena použitého betonu v konstrukci je tedy po vynásobení cenou 1850 Kč/m<sup>3</sup> rovna 85814 Kč. Ještě si spočítáme cenu výztuže. Výkaz výztuže ukazuje hmotnost 325,81 kg pro hmotnost výztuže prutů a 5088,68 kg pro výztuž ploch. Když hmotnosti vyztužení sečteme a vynásobíme cenou 20 Kč/kg vyjde nám celková cena armatury 108 290 Kč. Nyní jen ceny výztuže a betonu sečteme, abychom mohli porovnat výslednou cenu. Celková cena modelu skutečného provedení vyjde 194 104 Kč. Nyní provedeme porovnání cen našeho optimalizovaného modelu a modelu skutečného provedení. V následující tabulce (tab. 4-3) bude výčet 20 optimálních řešení, která jsou uvedena i v předešlé podkapitole a jejich srovnání s výše uvedenou cenou.

<b>Porovnání ceny konstrukce</b>			
<b>Optimalizovaný model</b>	<b>Model skutečného provedení</b>	<b>Ušetřeno v %</b>	<b>Ušetřeno v Kč</b>
133306	194104	31,32	<b>60798</b>
139705	194104	28,03	<b>54399</b>
140618	194104	27,56	<b>53486</b>
142173	194104	26,75	<b>51931</b>
142800	194104	26,43	<b>51304</b>
143449	194104	26,10	<b>50655</b>
143736	194104	25,95	<b>50368</b>
143769	194104	25,93	<b>50335</b>
145439	194104	25,07	<b>48665</b>
146932	194104	24,30	<b>47172</b>
147315	194104	24,11	<b>46789</b>
147782	194104	23,86	<b>46322</b>
147861	194104	23,82	<b>46243</b>
149618	194104	22,92	<b>44486</b>
149962	194104	22,74	<b>44142</b>
150835	194104	22,29	<b>43269</b>
152303	194104	21,54	<b>41801</b>
152655	194104	21,35	<b>41449</b>
153664	194104	20,83	<b>40440</b>
154880	194104	20,21	<b>39224</b>

**tab. 4-3:** Porovnání cen optimalizovaného modelu a modelu skutečného provedení

Jak je vidět jasně z předešlé tabulky, všech dvacet řešení z optimalizačního toolboxu EOT by nám ušetřila nemalou částku peněz. Navíc, když vezmeme v potaz, že jsme optimalizovali pouze jedno patro a zmíněný objekt má pater pět. V takovém případě bychom ušetřili až tři sta tisíc korun. Dále bychom mohli začlenit více parametrů, například pro oblasti vyztužení plošných prvků, abychom neměli pokrytá místa s mnohem menšími momenty jedním průřezem. Avšak i bez těchto úvah je přínos optimalizace patrný na první pohled.

## 5 ZÁVĚR

V době, kdy počítače vládnu světu a kdy se téměř žádná profese nejen ve stavebnictví bez výpočetní techniky neobejde, stojí určitě za povšimnutí nevyužívání těchto strojů v době pracovního klidu. Počítače velmi rychle stárnou a ztrácejí hodnotu, tak proč nevyužívat jejich potenciál naplno? Jednou z možností, kterak využít tohoto mrtvého času počítačů, je optimalizace. Zvláště pak v projekčních a statických kancelářích by daný proces našel uplatnění. Ve statickém softwaru Scia Engineer 2010 existuje aplikace, která právě spojuje statiku a optimalizaci. Pojem optimalizace už není jen záležitostí automatických návrhů, ale může posloužit jako mocný nástroj projektanta k vytvoření úsporného návrhu konstrukce. A nebudeme si nic nalhávat, o peníze jde dnes až v první řadě.

V této práci byly názorně ukázány možnosti optimalizačního procesu ve spolupráci s aplikací EOT, jež je součástí výše zmiňovaného softwaru. Na vybraném patře železobetonového skeletu bylo ukázáno, že už při optimalizaci, kde jsou parametry výška průřezu plošných konstrukcí, rozměry, respektive průřezy, prutových prvků a průměry podélné výztuže, třmínků a výztuže v plochách, lze dosáhnout nezanedbatelných úspor. Pouze na jednom patru lze ušetřit díky optimalizaci až šedesát tisíc korun. Když bychom brali v úvahu objekt, který má pater pět či více, rázem jsme se s úsporami dostali hravě přes tři sta tisíc korun.

Optimalizační aplikace EOT je teprve ve vývoji, ale už nyní v sobě obsahuje pět optimalizačních metod, které mají různé parametry a hodí se na širokou škálu optimalizačních problémů ve stavebnictví. I když je optimalizační aplikace nástroj velmi mocný, stále zůstává hlavní úloha na projektantovi. On je totiž ten, který vybírá a definuje cílovou funkci. On je ten, který dle zkušeností určuje extrémy použitých parametrů, proměnné pro optimalizační metodu nebo omezující podmínky. Nezastupitelnou pozici projektant také má ve střízlivém ohodnocení výsledků z optimalizace a eventuálním výběru z možných řešení. Toto všechno má také velký vliv na výsledný čas optimalizace. Při rozumném nastavení hodnot nebo při rozdělení optimalizačního problému na paralelní výpočet na více počítačích by výsledný čas nepředstavoval mrtvý čas výpočetní techniky.

Do budoucna by se mohlo více využívat právě paralelních výpočtů pro optimalizaci. Paralelizace je rychlejší, jistější a v neposlední řadě méně nákladnější, než si pořídit „dělo“ na poli výpočetní techniky, které by bylo schopno vypočítat i velmi náročné optimalizační problémy. Jistě zajímavé by bylo rozšířit pole působnosti o konstrukce z oceli, dřeva nebo jiných materiálů a pokusit se je optimalizovat

Vezmeme-li v potaz přímo optimalizace železobetonových konstrukcí, určitě by bylo v dalším pokračování výhodné pokusit se o paralelní výpočty a optimalizaci větších a komplexnějších úloh. To v sobě skrývá i zavedení více parametrů pro optimalizaci, abychom se ještě více přiblížili reálnému návrhu železobetonových konstrukcí. Zajisté by se optimalizace využila pro návrhy mostů nebo různých skořepin a nejen pro výstavbu skeletových konstrukcí.

# LITERATURA

- [1] Wikimedia Foundation, Optimalizace (matematika)  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Optimalizace\\_\(matematika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Optimalizace_(matematika)) [cit. 6.3.2010]
- [2] Economia a.s., IHned.cz, Digi a věda, *Google oživuje antický svět*, 2008  
<http://digiweb.ihned.cz/c1-30459080-google-ozivuje-anticky-svet> [cit. 6.3.2010]
- [3] Hans-Jürgen Günther, *Aquädukt*  
<http://www.latein-pagina.de/pics> [cit. 7.3.2010]
- [4] Margoldová, J., *Z historie užití betonu*, Beton v architektuře, příloha časopisu Beton, 2005  
<http://www.e-architekt.cz/index.php?KatId=1&PIId=1381> [cit. 14.3.2010]
- [5] Procházka, J., Štěpánek, P., Kohoutková, A., Krátký, J., Vašková, J. *Navrhování betonových konstrukcí I*. Praha, 2005.
- [6] Agora SA, *Le Courbusier – ojciec brutalizmu*, Gazeta.pl, 2010  
[http://bryla.gazetadom.pl/bryla/1,85298,7667353,Le\\_Corbusier\\_\\_\\_ojciec\\_brutalizmu.html](http://bryla.gazetadom.pl/bryla/1,85298,7667353,Le_Corbusier___ojciec_brutalizmu.html)  
[cit. 20.3.2010]
- [7] Technor, *Náhrady normy (730035) ČSN 73 0035*, 2010  
[http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/31020-nahrady-\(730035\)-CSN-73-0035.html](http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/31020-nahrady-(730035)-CSN-73-0035.html) [cit. 2.4.2010]
- [8] SCIA GROUP nv, Scientific Application Group, *Novinky verze FEAT 2000 – 3.0*, 2003  
[http://www.scia.cz/produkty/feat/produkty\\_feat\\_novinky.htm](http://www.scia.cz/produkty/feat/produkty_feat_novinky.htm) [cit. 2.4.2010]
- [9] Steven, G., *Product and system optimization in engineering simulation*, FEnet Newsletter, January 2003
- [10] Bittnar, Z., Lepš, M. *Víceparametrická optimalizace konstrukcí*, Praha, 2006
- [11] Rohan, E., *Moderní metody optimalizace mechanických soustav*, kurz ÚCV/KME – ZČU, 2006  
[http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/ok/f\\_predn-stropt-06.pdf](http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/ok/f_predn-stropt-06.pdf) [cit. 6.4.2010]
- [12] Habidalla, H., *Umělá inteligence*, Přírodovědecká fakulta Ostravské univerzity, 2004  
<http://www.volny.cz/habidalla/publ/umint.pdf> [cit. 12.4.2010]
- [13] Majer, P., *Moderní metody rozvrhování práce*, Disertační práce, 2002  
[http://majer.czweb.org/scheduling/30Metody\\_reseni.doc](http://majer.czweb.org/scheduling/30Metody_reseni.doc) [cit. 12.4.2010]
- [14] Kalátová, E., Dobiáš, J., *Evoluční algoritmy*, Fakulta aplikovaných věd ZCU, 2004  
[http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/gen\\_alg2/E\\_alg.htm](http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/gen_alg2/E_alg.htm) [cit. 12.4.2010]
- [15] Wikimedia Foundation, Ant colony optimization  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ant\\_colony\\_optimization](http://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization) [cit. 16.4.2010]
- [16] Pospíchal, J., *Simulované žihanie*, přednášky Evoluční algoritmy, Ústav aplikovanéj informatiky, 2010  
[ftp://math.chof.stuba.sk/pub/vlado/Evol\\_alg\\_MFF/CHAPT6.pdf](ftp://math.chof.stuba.sk/pub/vlado/Evol_alg_MFF/CHAPT6.pdf) [cit. 12.4.2010]

- [17] Pospíchal, J., *Genetický algoritmus*, přednášky Evoluční algoritmy, Ústav aplikované informatiky, 2010  
[ftp://math.chtf.stuba.sk/pub/vlado/Evol\\_alg\\_MFF/CHAPT4.pdf](ftp://math.chtf.stuba.sk/pub/vlado/Evol_alg_MFF/CHAPT4.pdf) [cit. 18.4.2010]
- [18] Lepš, M., *Optimalizace železobetonového spojitého nosníku*, Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2000
- [19] Kvasnička, V., Augmented simulated annealing adaption of feed-forward neural networks, *Neural Network World*, 3

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Fotodokumentace stavby</b>	<b>53</b>
<b>B</b>	<b>Výkazy výztuže a materiálu</b>	<b>55</b>
B.1	Výkaz výztuže prutových prvků pro model skutečného provedení.....	55
B.2	Výkaz výztuže deskových prvků pro model skutečného provedení.....	56
B.3	Výkaz materiálu pro model skutečného provedení.....	56



## A FOTODOKUMENTACE STAVBY



Pohled na jižní fasádu



Jihovýchodní pohled



Severní strana objektu, vjezd do garáží



Pohled na severní fasádu se zaobleným balkónem

# B VÝKAZY VÝZTUŽE A MATERIÁLU

## B.1 Výkaz výztuže prutových prvků pro model skutečného provedení

1. Výkaz výztuže							
Výkaz výztuže							
Prvek	Číslo položky	Průměr [mm]	Materiál	Délka [m]	Počet vložek	B 500B délka [m]	B 500B tíha [kg]
B1	18	8	B 500B	1,85	11	20,35	8,03
B1	47	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B1	48	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B2	4	8	B 500B	1,486	11	16,343	6,45
B2	49	12	B 500B	2,95	6	17,7	15,71
B5	12	8	B 500B	1,85	11	20,35	8,03
B5	50	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B5	51	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B6	15	8	B 500B	1,85	11	20,35	8,03
B6	52	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B6	53	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B7	46	8	B 500B	1,85	11	20,35	8,03
B7	78	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B7	79	16	B 500B	2,95	2	5,9	9,31
B9	21	6	B 500B	2,01	37	74,37	16,51
B9	56	10	B 500B	10,95	2	21,9	13,5
B9	57	10	B 500B	10,95	2	21,9	13,5
B9	58	10	B 500B	3,629	2	7,257	4,47
B9	59	12	B 500B	1,782	1	1,782	1,58
B9	60	10	B 500B	3,346	2	6,693	4,13
B9	61	12	B 500B	1,521	1	1,521	1,35
B9	62	12	B 500B	4,411	1	4,411	3,92
B8	29	6	B 500B	2,01	40	80,4	17,85
B8	63	10	B 500B	11,8	2	23,6	14,55
B8	64	10	B 500B	11,8	2	23,6	14,55
B8	65	12	B 500B	3,578	2	7,157	6,35
B8	66	12	B 500B	3,309	1	3,309	2,94
B8	67	12	B 500B	3,822	2	7,643	6,79
B8	68	12	B 500B	1,513	1	1,513	1,34
B8	69	12	B 500B	3,322	1	3,322	2,95
B8	70	12	B 500B	0,757	2	1,513	1,34
B9	38	6	B 500B	2,01	40	80,4	17,85
B9	71	10	B 500B	11,8	2	23,6	14,55
B9	72	10	B 500B	11,8	2	23,6	14,55
B9	73	14	B 500B	3,578	2	7,157	8,65
B9	74	12	B 500B	3,822	1	3,822	3,39
B9	75	14	B 500B	1,77	2	3,539	4,28
B9	76	12	B 500B	4,861	1	4,861	4,32

B9	77	14	B 500B	0,757	2	1,513	1,83
			8			97,743	38,57
			16			47,2	74,5
			12			58,553	51,98
			6			235,17	52,2
			10			152,15	93,81
			14			12,209	14,75
			Celkem pro materiál			603,025	325,81
			Celkem			603,025	325,81

## B.2 Výkaz výztuže deskových prvků pro model skutečného provedení

2. Výztuž 2D									
Jméno	Typ	Materiál	Povrch	Průměr (dl) [mm]	Vzdálenost vložek (sl) [mm]	Krytí betonu (cl,cu) [mm]	Odsazení [mm]	Plocha výztuže [mm <sup>2</sup> ]	Celková váha [kg]
Plocha		Sít'		Počet směrů	Průměr (dl) [mm]	Vzdálenost vložek (sl) [mm]	Krytí betonu (cl,cu) [mm]	Odsazení [mm]	Plocha výztuže [mm <sup>2</sup> ]
RR1	Vložky	B 500B	Spodní	8	250	38	0	201	40,15
S3				2	8	250	30	0	201
RR2	Vložky	B 500B	Horní	8	250	38	0	201	40,15
S3				2	8	250	30	0	201
RR3	Vložky	B 500B	Spodní	12	150	42	0	754	1543,2
S4				2	12	150	30	0	754
RR4	Vložky	B 500B	Horní	14	100	44	0	1539	3143,1
S4				2	14	100	30	0	1539
RR5	Vložky	B 500B	Horní	10	250	40	0	314	161,04
S2				2	10	250	30	0	314
RR6	Vložky	B 500B	Spodní	10	250	40	0	314	161,04
S2				2	10	250	30	0	314

## B.3 Výkaz materiálu pro model skutečného provedení

Materiál	Hmotnost [kg]	Povrch [m <sup>2</sup> ]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Objem [m <sup>3</sup> ]
C30/37	115965,53	83,631	2500	4,64E+01