

**Slovenská technická univerzita v Bratislave
Stavebná fakulta**

Ing. Martin Štiglic

Autoreferát dizertačnej práce

Optimálny návrh konštrukcií s uvažovaním jednostranných väzieb

na získanie akademického titulu philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

5.1.7. Aplikovaná mechanika

Bratislava, jún 2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing Martin Štiglic**
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta STU BA
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Jozef Dický, PhD**
Stavebná fakulta STU BA
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Milan Žmindák, CSc.**
Katedra aplikovanej mechaniky
Strojnícka fakulta ŽU
Univerzitná 1
010 26 Žilina

doc. Ing. Eva Kormaníková, PhD.
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta TU
Vysokoškolská 4
042 00

doc. Ing. Jiří Kala, CSc.
Ústav stavební mechaniky
Fakulta stavební VUT Brno
Veveří 3310/95
602 00 Brno, Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa konáoh.

na

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah

Úvod.....	3
Ciele záverečnej práce	4
Optimalizácia	4
Atribúty dobrého algoritmu	5
Jednostranná väzba.....	6
Kontakt uzol k ploche	7
Kontakt plocha k ploche	7
Kontakt interakcie telies	7
Interakcia konštrukcie a podložia	7
Model A	8
Model B	10
Model C	12
Model D	13
Interakcia telies pri rázovom zaťažení.....	17
Porovnanie JH2 modelu pre sklo	17
Porovnanie siete pre šírenie trhlín.....	17
Parametrická štúdia 2D modelu vrstveného skla	18
Optimalizácia vrstveného skla	20
Záver.....	23
Literatúra.....	25

Úvod

V polovici dvadsiateho storočia sa s rozvojom výpočtovej techniky začali riešiť zložité optimalizačné úlohy a začal sa výskum v oblasti nových postupov a metód. Spojením optimalizačných algoritmov a metódy konečných prvkov je možné vytvoriť virtuálny prototyp a skúmať vplyv parametrov výrobku a optimalizovať ich pre čo najlepší návrh.

Jedným z problémov týkajúcich sa jednostrannej väzby je interakcia konštrukcie s podložím napr. v prípade prepadnutia podložia. Táto situácia môže nastať kdekoľvek na svete, kde sa v banských podzemných priestoroch ukončila banská činnosť. V prípade zosuvu alebo poklesu podložia ostane pod základovou konštrukciou diera, ktorá môže poškodiť celú stavbu. Úlohou štúdie je preskúmať možnosti modelovania interakcie podložia a konštrukcie pomocou kontaktných prvkov, porovnať kontaktné prvky, kontaktné algoritmy a ich nastavenia pri optimalizácii, zistiť vplyv prepadnutia plochy pod jednotlivými opornými stĺpmi a následne optimalizovať základovú dosku pre najhorší prípad. Metodickým cieľom je riešenie danej problematiky v komerčnom softvéri ANSYS, ktorý má implementované optimalizačné metódy a taktiež umožňuje modelovať jednostrannú väzbu pomocou kontaktných prvkov.

Ďalším problémom v stavebníctve, ktorý sa týka jednostrannej väzby je interakcia telies pri rázovom zaťažení. Na budovách obchodných centier či bánk čoraz častejšie nachádzame viac sklenených plôch ako muriva. Veľké sklenené plochy sú trendom modernej architektúry a stali sa symbolom budúcnosti, pokroku a rozvoja. Dôležitou oblasťou pri návrhu sklenenej fasády je dimenzovanie skiel proti nárazom úlomkov dreva a kameňov pri víchrici alebo striel zo zbraní. Je nutné navrhnuť také riešenia, ktoré by minimalizovali alebo eliminovali možnosť ohroziť ľudí. Úlohou je preskúmať možnosti modelovania skla a šírenia trhlín v skle. Cieľom tejto časti práce je skúmať vplyv zloženia vrstveného skla, navrhnuť riešenie skladby a optimalizovať pre odolnosť voči nárazu projektilu, tak aby bolo riziko poranenia osoby za sklom minimálne. Problematika je riešená v komerčnom softvéri ANSYS, AUTODYN. V ANSYS Workbench bol použitý modul Explicit Dynamic, ktorý je určený pre riešenie úloh pomocou explicitnej integrácie. Softvér AUTODYN bol použitý na pokročilé modelovanie pomocou metódy SPH.

Ciele záverečnej práce

Hlavné ciele dizertačnej práce vyplývajú z úloh obsiahnutých v grantovom projekte VEGA 1/1186/12 Optimálny návrh konštrukcií z hľadiska analýzy porúch stavieb a stavebných konštrukcií s dôrazom na aspekty spoľahlivosti a životnosti konštrukcií (zodp. riešiteľ O. Ivánková), školiteľ i doktorand sú spoluriešiteľmi tohto projektu.

Vychádzajúc z priestorových, kapacitných aj finančných možností projektu sa doktorand vo svojej práci sústreďí hlavne na tieto ciele:

- Spracovanie prehľadu najnovších trendov v oblasti numerických metód a postupov pri optimalizácii návrhu konštrukčných prvkov s dôrazom na vplyv jednostranných geometrických väzieb pri statickom zaťažení konštrukcie.
- Tvorba modelov pre numerický experiment konštrukcií vytvorených z kompozitných materiálov. Pre zvolený typ konštrukcie bude snaha vytvoriť dva modely:
 - komplexný model, založený pravdepodobne na priestorovej variante metódy konečných prvkov, umožňujúci riešenie napätosti a pretvorenia konštrukcií s uvážením jednostranných väzieb,
 - jednoduchý model, založený na rovinnej variante metódy konečných prvkov, umožňujúci zjednodušené riešenie napätosti a pretvorenia konštrukcií s uvážením jednostranných väzieb.
- Optimalizačná štúdia, analýza a porovnanie výsledkov dosiahnutých pri návrhu zvolených konštrukcií pomocou obidvoch modelov s cieľom formulovať odporúčania pre inžinierov v praxi.
- Citlivostná analýza jednotlivých návrhových premenných v optimalizačnom procese s cieľom získať presnejší vplyv neistôt pri návrhu konštrukcií a dôrazom na aspekty ich spoľahlivosti a životnosti.

Optimalizácia

Cieľom optimalizácie je maximalizovať účinnosť konštrukcie alebo konštrukčného prvku. Optimálny návrh konštrukcie môže byť ovplyvnený limitmi materiálu, dopadom na životné prostredie a technologickou konkurenciou, ktorá vyžaduje aby konštrukcia bola čo najúčinnnejšia a čo najlacnejšia. Pod pojmom optimálny návrh si možno predstaviť najlepší

možný návrh, ktorý spĺňa predpísané kritéria. Cieľom inžinierov z praxe je zlepšiť produktivitu a vylepšiť parametre návrhu. S nástupom výkonnej výpočtovej techniky sa v oblasti stavebníctva a strojárstva riešia stále väčšie a zložitejšie konštrukčné systémy. Potenciálom je vytvoriť automatizovaný nástroj pre inžinierov z praxe v rôznych oblastiach napr. letecký, stavebný, strojársky priemysel.

Optimalizácia návrhu v praktických úlohách úzko súvisí s matematikou, pretože základom optimalizačných metód sú techniky matematického programovania napr. aplikácia stochastického programovania, celočíselného programovania, geometrické programovanie alebo dynamické programovanie, ktoré sú opísané v [1], [2].

Dôležitým krokom pri riešení optimalizačnej úlohy je prepis optimalizačného problému do matematickej formulácie. V prípade zlej formulácie matematického zápisu bude výsledok s veľkou pravdepodobnosťou nevhodný. Napr. ak sa zabudne na nejaké kritické ohraničenie, tak s veľkou pravdepodobnosťou bude v optimálnom mieste toto ohraničenie porušené. Preto sa musí klásť veľký dôraz pri formulovaní optimalizačného problému.

Matematický zápis optimalizačnej úlohy [3,4] je nasledovný

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$$g_i(\mathbf{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, n_g \quad (2)$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, n_h \quad (3)$$

Každá optimalizačná úloha sa skladá z nasledujúcich troch skupín komponentov:

- Optimalizačné premenné, nazývané návrhové parametre a označované ako vektor $\mathbf{x}$
- Hodnotiaca funkcia, tiež nazývaná ako účelová funkcia, označuje sa $f(\mathbf{x})$
- Ohraničenia v podobe rovníc alebo nerovníc označované ako $h_j(\mathbf{x})$, $g_i(\mathbf{x})$

Optimalizačné premenné môžu byť spojité alebo diskrétne [5], [36]. V závislosti od typu premenných a funkcií, dostávame spojité alebo diskrétne premenné, diferenčné alebo nediferenčné úlohy.

Reálne úlohy sú zvyčajne dosť zložité a každá aplikácia má svoje vlastné požiadavky, simulačné metódy a musí splniť ohraničenia. Optimalizačné metódy sa vyvíjali posledné desaťročia [9], [10], [11], [12]. Veľa neodborníkov začína používať túto metodiku vo svojej bežnej práci a stále rastie túžba riešiť zložitejšie a veľké úlohy. Tieto úvahy nariaďujú použitie teórie a numericky spoľahlivých algoritmov. Ich použitie môže odstrániť neistotu ohľadom správania sa algoritmu a dovoľuje používateľovi sústrediť sa na ich použitie. Teoretické algoritmy sú výpočtovo náročnejšie ale sú efektívnejšie pri dlhších výpočtoch.

Atribúty dobrého algoritmu

Dobry algoritmus pre praktické aplikácie by mal mať nasledujúce atribúty [6], [36]:

1. Robustnosť - algoritmus musí konvergovať k bodu lokálneho minima z akéhokoľvek začiatočného odhadu.
2. Všeobecnosť - algoritmus musí byť schopný spracovať ohraničenia v podobe rovníc aj nerovníc.
3. Presnosť - algoritmus musí byť schopný konvergovať k optimálnemu bodu podľa potrieb.
4. Jednoduchý na použitie - implementácia algoritmu musí taká, že vyžaduje čo najmenej vstupov pre použitie algoritmu skúseným ale aj neskúseným užívateľom.

5. Efektívnosť - algoritmus musí rýchlo konvergovať, musí byť schopný efektívne spracovať lineárne ohraničenia. Mal by byť schopný využívať riedku štruktúru funkcie úlohy, najmä pre veľké úlohy.

Optimalizačné metódy použité v práci sú zhrnuté v tab. 1 a ich využitie v tab. 2.

Tab. 1 Optimalizačné metódy v module Design Explorer [38]

Metóda	Popis	Optimalizácia cez plochu odozvy	Priama optimalizácia
Screening	Vzorkovanie Shifted-Hammersley	✓	✓
NLPQL	Nelineárne programovanie pomocou kvadratického Lagrangianu	✓	✓
MISQP	Zmiešané-celočíselné Sekvenčné kvadratické programovanie	✓	✓
MOGA	Genetický algoritmus s viacerými účelovými funkciami	✓	✓

Tab. 2 Využitie optimalizačných metód [38]

	Screening	First Order	NLPQL	MISQP	MOGA
Jedna cieľová funkcia	✓	✓	✓	✓	✓
Viac cieľových funkcií	✓				✓
Lokálne hľadanie		✓	✓	✓	
Globálne hľadanie	✓				✓
Diskrétné hodnoty	✓			✓	✓
Výrobné hodnoty	✓			✓	✓
Vzťah medzi parametrami	✓		✓	✓	✓

Jednostranná väzba

Kontakt medzi dvoma telesami je zvyčajne modelovaný ako úplná väzba, v ktorej sú predpísané posuny a/alebo sily v niektorých častiach telesa. V niektorých inžinierskych aplikáciách je tento princíp postačujúci, ale nedostačujúci v prípadoch, keď dochádza v mieste kontaktu k odlepeniu, čiže kontakt sa stáva neaktívny. Vo všeobecnosti je v týchto prípadoch nutné stanoviť podmienky pre jednostrannú väzbu (napr. vzájomnú penetráciu), ktoré sú súčasťou riešenia, pretože oblasť odlepenia/prieniku kontaktnej plochy je neznáma. Podmienka pre zistenie stavu kontaktu [42] je daná nasledovne

$$g_N > 0, \quad \text{bez kontaktu} \quad (4)$$

$$g_N = 0, \quad \text{kontakt} \quad (5)$$

$$g_N < 0, \quad \text{penetrácia} \quad (6)$$

Zaoberali sme sa modelovaním interakcie medzi jedným alebo viacerými telesami, ktoré prichádzajú navzájom do kontaktu. Tieto kontaktné úlohy patria medzi najťažšie pri modelovaní pomocou MKP a zhrnieme tu len niektoré prístupy, ktoré sa v praxi ukázali ako úspešné. Vo všeobecnosti proces diskretizácie pomocou konečných prvkov vedie k plochám, ktoré nie sú hladké a preto keď nastanú veľké šmyky/posuny, prechod z jedného elementu do ďalšieho vedie k nespojitosti v odozve – a v prechodových aplikáciách tiež môže vyvolať

stále fyzikálne nespojitosti [13], [14]. Pre kvázi statické odozvy ako nespojitosť vedie k ťažkostiam pri definovaní jednoznačného riešenia a tu môžu byť užitočné metódy multi-povrchovej plasticity.

Riešenie kontaktnej úlohy obsahuje:

- Použitie vyhľadávacieho algoritmu na identifikovanie bodov na hraničných segmentoch, ktoré vzájomne spolupôsobia s inými na inom hraničnom segmente.
- Vkládanie príslušných podmienok, aby sa zabránilo prieniku a správne prenosu posunov medzi telesami.

Kontakt uzol k ploche

Kontaktný algoritmus uzol k ploche [38] zabezpečuje kontakt, ak uzol jedného telesa preniká do cieľovej plochy druhého telesa. Je to najrýchlejší algoritmus, pretože je asymetrický. Uvažuje sa iba so spracovaním kontaktných uzlov, ktoré majú vplyv na cieľovú plochu. Je robustný v úlohách s malou kontaktnou plochou, ktorá je vopred známa.

Kontakt plocha k ploche

Kontaktný algoritmus plocha k ploche [38] zabezpečuje kontakt, ak plocha jedného telesa preniká do plochy druhého telesa. Ide o plne symetrický typ kontaktu, ktorý vyžaduje definíciu kontaktnej a cieľovej plochy pre určenie častí plôch, ktoré sa budú dotýkať. Je vhodný v prípadoch, ak dochádza k posunutiu telesa na plochu.

Detekčné body kontaktu sú integračné body a sú to buď uzlové body elementu, alebo Gaussove body elementu. Pri výpočte sa bráni prieniku integračných bodov kontaktného elementu do cieľovej plochy, ale cieľová plocha môže preniknúť do kontaktnej plochy. Vo všeobecnosti sa odporúča použitie Gaussových bodov, pretože dávajú presnejšie riešenie.

Kontakt interakcie telies

Kontaktý algoritmus jednej plochy zabezpečuje kontakt, keď sa vonkajšia plocha jedného telesa dotýka vonkajšej plochy druhého telesa. Tento typ kontaktu je najvšeobecnejší, pretože program automaticky nájde všetky vonkajšie plochy modelu a zistí, či na nich nastal prienik. Pretože obsahuje všetky vonkajšie plochy, nepotrebuje definíciu kontaktnej a cieľovej plochy. V každom časovom kroku je každý uzol plochy kontrolovaný, či nedošlo k prieniku do plochy. Tento typ kontaktu je dobre použiteľný v prípadoch, keď dochádza k veľkým deformáciám telies a nemožno presne určiť miesto dotyku.

Interakcia konštrukcie a podlažia

Pre optimalizáciu interakcie konštrukcie a podlažia boli vytvorené štyri modely – A, B, C, D.

- Model A je zameraný na interakciu dosky, ktorá je uložená na pružnom podlaží. Počas optimalizačného procesu, v ktorom sa menia hrúbky dosky v deviatich bodoch sa skúma vplyv dvoch typov kontaktu – uzol-plocha a plocha-plocha na výsledné parametre.
- Model B je zameraný na vplyv okrajových podmienok pri uložení dosky – votknutie, klb, jednostranná väzba. Počas optimalizačného procesu sa skúmajú výstupné parametre pri zmene 23 hrúbok pre každý typ okrajovej podmienky.
- Model C je zameraný na interakciu dosky a pružného podlažia, ktoré je zložené z dvoch typov materiálu. Počas optimalizácie sa skúma vplyv šmyku kontaktného prvku na výsledné parametre.
- Model D rieši trojpodlažnú budovu uloženú na pružnom podlaží dvomi spôsobmi. Ako prvé sa berie do úvahy iba základová doska a zaťaženie z konštrukcie sa modeluje ako sila pôsobiaca v mieste stĺpov. V tomto prípade sa optimalizuje hrúbka

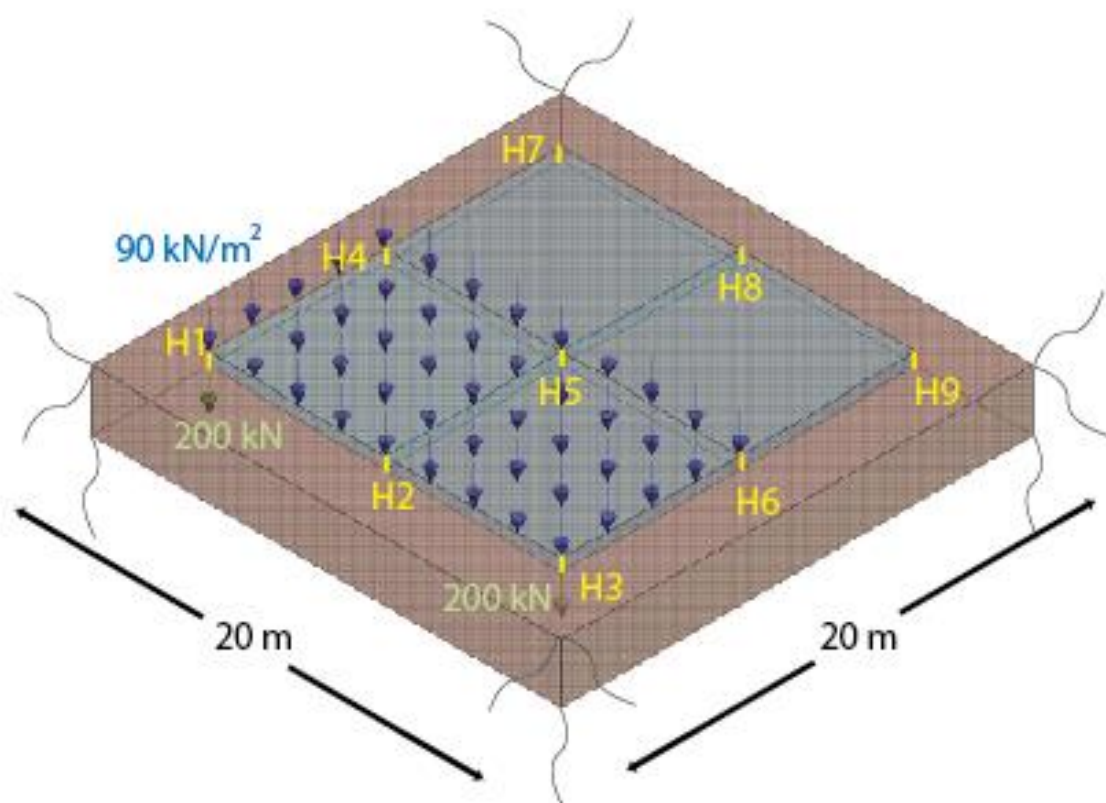
dosky v miestach pod stĺpmi tak, aby nedošlo k porušeniu betónu v ťahu a teda k vzniku trhlín. V druhom prípade sa modeluje celá konštrukcia a skúma sa vplyv poklesu podlažia v miestach stĺpov. Pre najkritickejší prípad sa optimalizuje hrúbka dosky.

Model A

Skúmala sa s doska s rozmermi $6 \times 6 \times 0,2 \text{ m}$ uložená na pružnom podloží s rozmermi $20 \times 20 \times 5 \text{ m}$. Cieľom bolo porovnať dva typy kontaktu: uzol-plocha a plocha-plocha a ich vplyv na výsledné parametre počas optimalizačného procesu.

Tab. 3 Materiálové charakteristiky

	Youngov modul pružnosti (MPa)	Poissonove číslo
Podložie	60	0,3
Doska	30×10^3	0,2



Obr. 1 Model s hrúbkami optimalizácie

Matematická formulácia optimalizačnej úlohy, podľa ktorej sa nastavili vstupy v ANSYS-e.

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) & \quad (7) \\ 0.05 \text{ m} \leq h_i & \leq 0.20 \text{ m} \quad i = 1, \dots, 9 & (8) \\ \sigma(\mathbf{x}) & \leq 30 \text{ MPa} & (9) \\ p_n(\mathbf{x}) & \leq 2 \text{ mm} & (10) \\ g_n(\mathbf{x}) & \leq 2 \text{ mm}, & (11) \end{aligned}$$

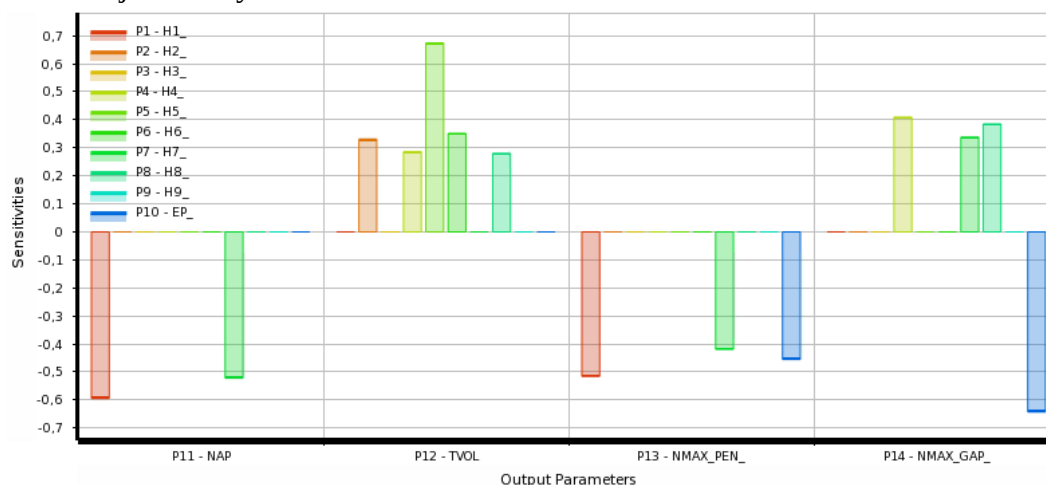
Účelovou funkciou bol objem dosky, ktorý sa mal minimalizovať. Návrhovými parametrami boli hrúbky dosky v deviatich bodoch (H1 – H9) obr.1. Ohraničenia pre optimalizáciu boli nastavené podľa rovníc (7) – (11). Bola použitá optimalizačná metóda prvého rádu.

V tab. 4 je uvedené percentuálne zlepšenie oproti pôvodnému objemu dosky. Objemy po optimalizácii sú podobné a líšia sa na desatinnom mieste. Vo oboch prípadoch bol objem po optimalizácii približne tretinový. Ušetrili by sa dve tretiny celkového objemu materiálu použitého pre dosku.

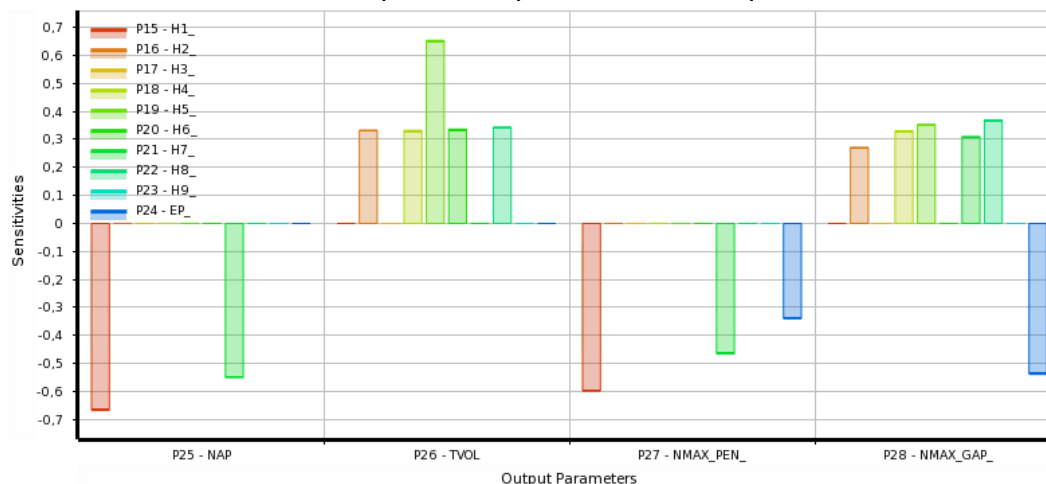
Tab. 4 Zmena objemu dosky po optimalizácii

	Objem po optimalizácii pre daný typ kontaktu	
Pôvodný objem (m ³)	Uzol - plocha	Plocha - plocha
7,2	2,48	2,55
100 %	34,4 %	35,4 %

Grafy citlivosti (Obr. a Obr.) znázorňujú vplyv vstupných parametrov na napätie, penetráciu, odlepenie a objem dosky.



Obr. 2 Graf citlivosti pre kontakt uzol - plocha



Obr. 3 Graf citlivosti pre kontakt pocha - plocha

Z grafu citlivostnej vidieť, že na napätie má najväčší vplyv hrúbka H1 a H7, na objem H2, H4, H5, H6, H8. Modul pružnosti podložia má vplyv na odlepenie dosky od podložia a penetráciu dosky do elementov podložia. Pri všetkých prípadoch sa ekvivalentné napätie (Von Mises) na doske pohybovalo tesne pod 30 MPa čo bola max. stanovená hodnota pre napätie v tlaku. Je zrejmé, že napätie v tlaku by bolo niekoľkonásobne prekročené avšak optimalizáciou objemu nám nešlo iba o zníženie objemu dosky ale optimalizáciu tuhosti

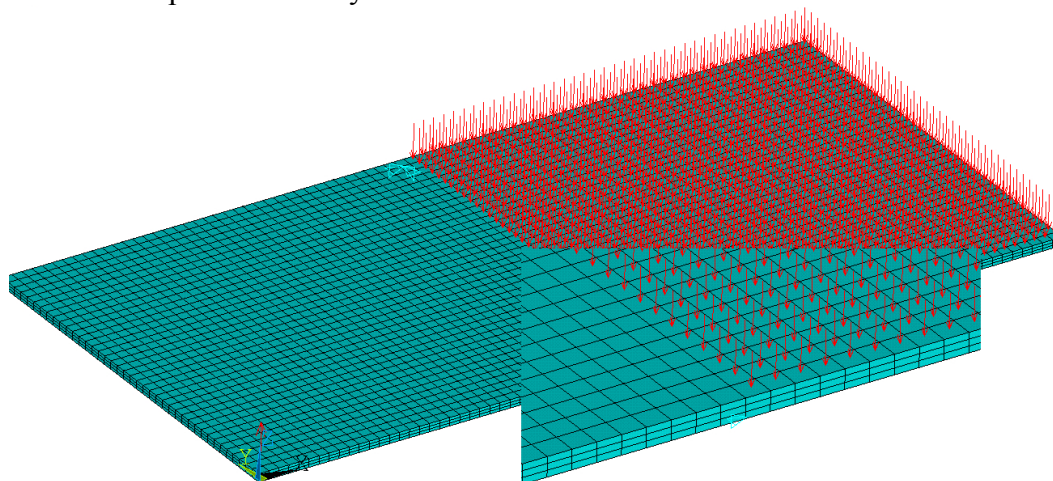
dosky. Miesta, v ktorých bolo prekročené max. napätia v ťahu zobrazujú problémové miesta, v ktorých sa inžinier musí zamerať na zvýšenie tuhosti pomocou výstuže. Optimalizačnou metódou Screening a s uvážením zmeny tuhosti podložia sa vypočítali pre každý typ kontaktu traja kandidáti pre optimálne riešenie (tab. 5).

Tab. 5 Kandidáti na optimálne riešenie

	Uzol - plocha			Plocha - plocha		
	Kandidát 1	Kandidát 2	Kandidát 3	Kandidát 1	Kandidát 2	Kandidát 3
P2 - H2__	0,058	0,124	0,060	0,103	0,077	0,170
P3 - H3__	0,174	0,103	0,105	0,116	0,063	0,190
P4 - H4__	0,083	0,071	0,093	0,172	0,059	0,173
P5 - H5__	0,085	0,091	0,131	0,055	0,171	0,150
P6 - H6__	0,057	0,099	0,106	0,054	0,111	0,098
P7 - H7__	0,131	0,144	0,128	0,187	0,177	0,166
P8 - H8__	0,109	0,083	0,055	0,064	0,144	0,135
P9 - H9__	0,094	0,055	0,077	0,069	0,125	0,117
P10 - EP__	65037,2	53354,8	72749,9	66284,8	70254,6	68950,2
P11 - NAP	28916,1	28255,7	28916,4	29467,7	28069,9	29025,7
P12 - TVOL	3,45	3,63	3,63	3,47	4,54	5,42
P13 - NMAX_PEN__	0,0013	0,0014	0,0012	0,0069	0,0069	0,0067
P14 - NMAX_GAP__	0,0001	0,0002	0,0001	0,0004	0,0002	0,0004

Model B

Na doske rozmerov $12 \times 6 \times 0,2 \text{ m}$ obr. 4 sa po obvodu uvažovali tri typy uloženia – votknutie, klbové uloženie a uloženie na báze jednostrannej väzby. Stred dosky bol vo všetkých prípadoch klbovo uložený. Cieľom bolo zistiť vplyv okrajovej podmienky a vstupných parametrov optimalizačnej metódy na výstupné parametre počas optimalizačného procesu. Pri výpočte bola braná do úvahy vlastná tiaž dosky a zaťaženie 17 kN/m^2 bolo aplikované iba na polovicu dosky.



Obr. 4 Model dosky so zaťažením

Matematická formulácia optimalizačnej úlohy je nasledovná:

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (12)$$

$$0.08 \text{ m} \leq h_i \leq 0.15 \text{ m} \quad i = 1, \dots, 23 \quad (13)$$

$$\sigma(x) \leq 20 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$w(x) \leq 24 \text{ mm} \quad (15)$$

Pri pohľade do tab. 6 vidno, že najmenší objem dosky dosiahneme pri votknutí dosky a približne rovnaký aj pri použití jednostrannej väzby, avšak pri pohľade do tab. 7 vidíme, že pri takmer rovnakom objeme dosky, sa pri votknutí pohybujeme blízko hodnoty maximálneho povoleného napätia na doske stanoveného pre optimalizáciu, avšak pri jednostrannej väzbe ostáva dosť veľká rezerva pre napätie. Pri takmer rovnakom objeme dosahujeme pri jednostrannej väzbe hodnoty blízke dovolenému priehybu dosky a pri votknutí ostáva rezerva pre priehyb dosky.

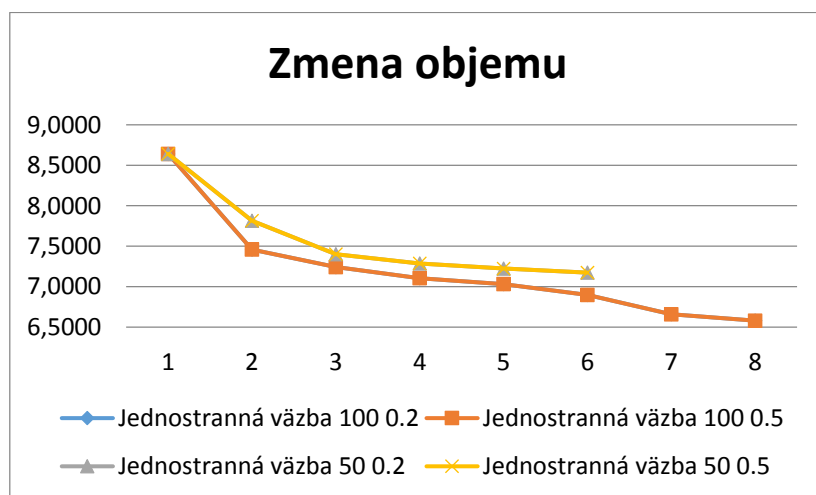
Tab. 6 Objem dosky

		$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD
		100	0.2	100	0.5	50	0.2	50	0.5
Votknutie	m ³	6,558		6,436		7,018		7,018	
Kĺb	m ³	7,331		7,331		7,342		7,342	
Jednostranná v.	m ³	6,581		6,580		7,174		7,174	

Tab. 7 Ekvivalentné napätie v doske

		$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD	$s_{\max}$	ΔD
		100	0.2	100	0.5	50	0.2	50	0.5
Votknutie	kPa	19986		19995		19152		19152	
Kĺb	kPa	17973		17972		18409		18409	
Jednostranná v.	kPa	15903		15910		15111		15111	

V oboch prípadoch sa počas optimalizácie vykonalo 75 iterácií a boli vybrané štyri vzorky. Na obr. 5 je znázornená zmena objemu v jednotlivých iteráciách pre rôzne smery a dĺžky kroku hľadania.



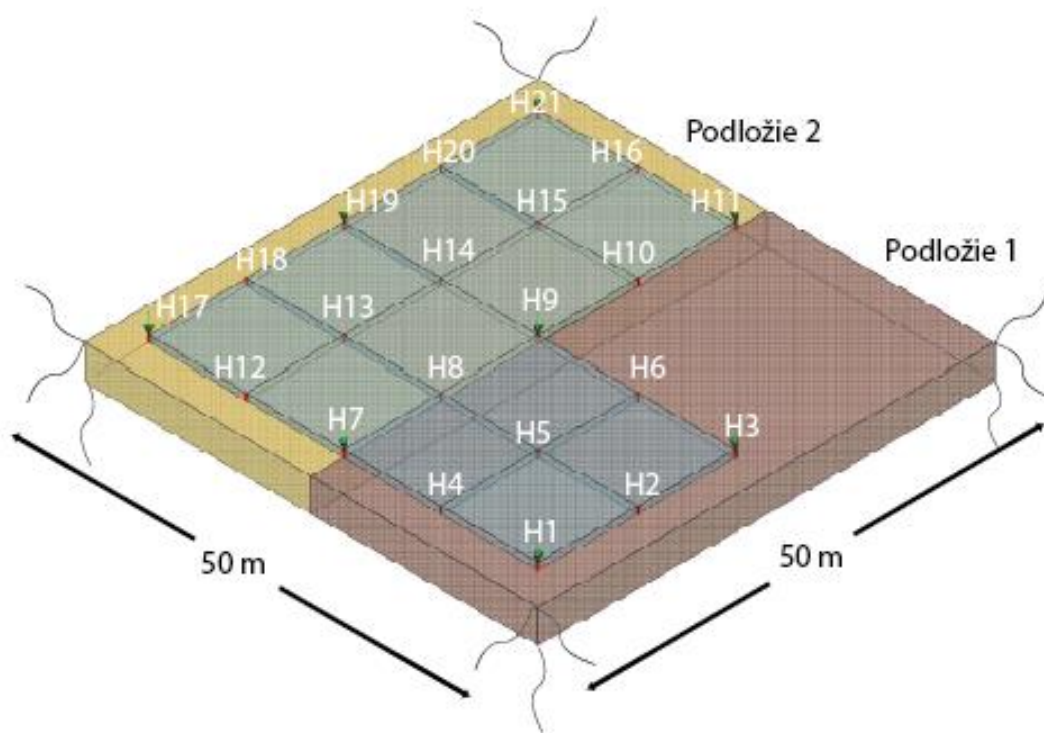
Obr. 5 Priebeh zmeny objemu v iteráciách

Pri jednostrannej väzbe sa dosahuje malý objem s rezervou pre napätie, ale priehyb sa pohybuje na hrane dovoleného priehybu. Pri votknutí je objem podobný ako pri jednostrannej väzbe, priehyb je malý, ale napätie sa pohybuje na hranici maximálneho povoleného napätia. Pri kĺbovom uložení by sa tiež dosiahlo zmenšenie objemu, ale nie také výrazné, ako v predošlých prípadoch. Objem dosky v optimalizačnej metóde závisel hlavne od kroku

hľadania s_{max} .

Model C

Uvažovalo sa so základovou doskou v tvare L s rozmermi 24 x 24 x 0.2 m, ktorá je uložená na pružnom podloží s rozmermi 50 x 50 x 5 m a skladá sa z dvoch rôznych typov obr. 6. Cieľom bolo porovnať kontakt so šmykom a kontakt bez šmyku a vplyv na výstupné parametre pri optimalizačnom procese. Okrajové podmienky boli aplikované na tri uzly, jeden mal fixované posuny v smere osi X a Y, druhý iba posun v smere osi X a tretí posun v smere osi Y. Doska bola zatážaná vlastnou tiažou a silami. Podložie bolo po obvode a na spodnej strane uchytené vo všetkých smeroch.



Obr. 6 Model dosky a podložia s optimalizačnými hrúbkami

Tab. 8 Materiálové charakteristiky

	Youngov modul (MPa)	Poissonove číslo
Podložie 1	30	0,35
Podložie 2	80	0,3
Doska	30×10^3	0,2

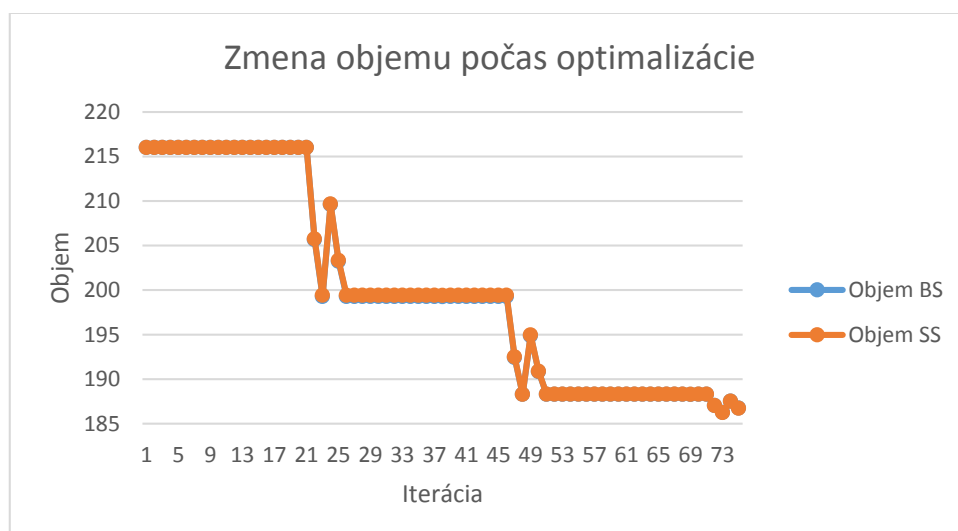
Matematická formulácia optimalizačnej úlohy je nasledovná:

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (16)$$

$$0.40 \text{ m} \leq h_i \leq 0.50 \text{ m} \quad i = 1, \dots, 21 \quad (27)$$

$$\sigma(\mathbf{x}) \leq 30 \text{ MPa} \quad (38)$$

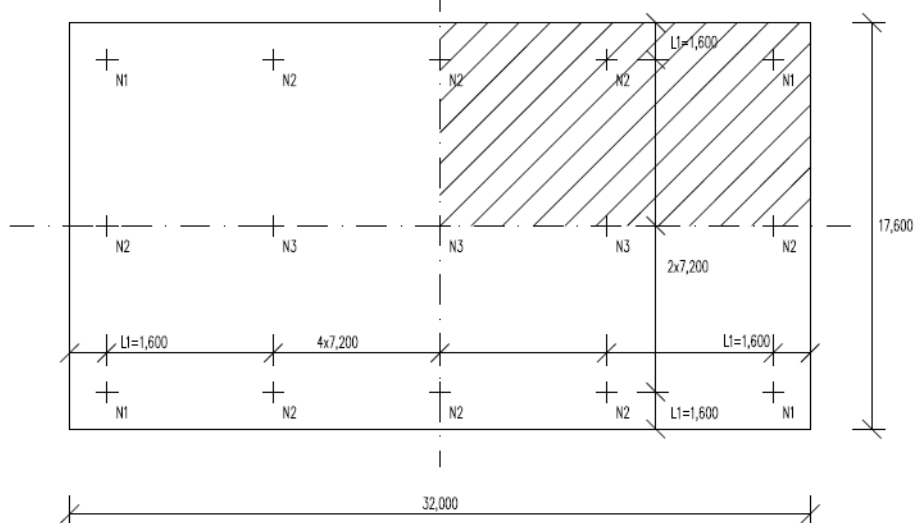
Optimalizované objemy pre prípad so/bez šmyku boli skoro rovnaké a rozdiel medzi maximálnymi ekvivalentnými napätiami bol minimálny. Oproti pôvodnému objemu sme dosiahli uspor približne 14 % materiálu (obr. 7).



Obr. 7 Priebeh zmeny objemu v iteračnom procese

Model D

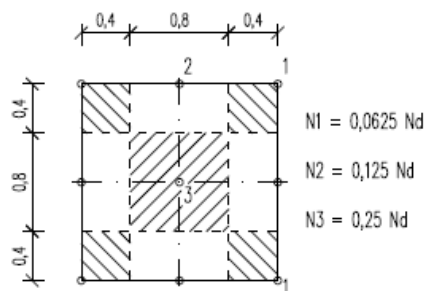
Riešila sa trojpodlažná konštrukcia postavená na doske (obr. 8) s rozmermi 32 x 17,6 x 0,72 m, ktorá bola uložená na pružnom podloží s rozmermi 42 x 27,6 x 5 m. Zostavili sa dva varianty riešenia. V prvom (Variant A) sa optimalizovala doska tak, aby nedošlo k porušeniu materiálu a vzniku trhlín. Zaťaženie z konštrukcie a vlastná tiaž sa preniesli na dosku cez sily pôsobiace v mieste stĺpu. V druhom prípade (Variant B) sa uvažovalo s celou konštrukciou a optimalizovala sa doska v miestach stĺpov pri prepadnutí podložia.



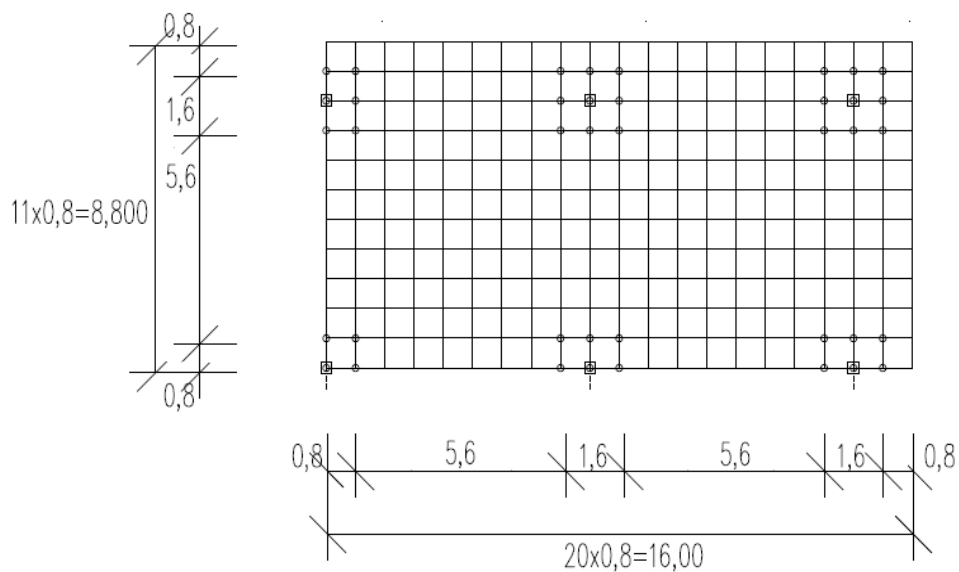
Obr. 8 Pôdorys dosky

Variant A

V tomto prípade sa do výpočtu brala iba základová doska a zaťaženie z konštrukcie bolo prenesené cez sily do uzlov dosky obr. 9. Pre jednoduchosť a rýchlosť výpočtu sa použila symetria a modelovala sa iba štvrtina dosky (obr. 10).



Obr. 9 Rozloženie zaťaženia do uzlov



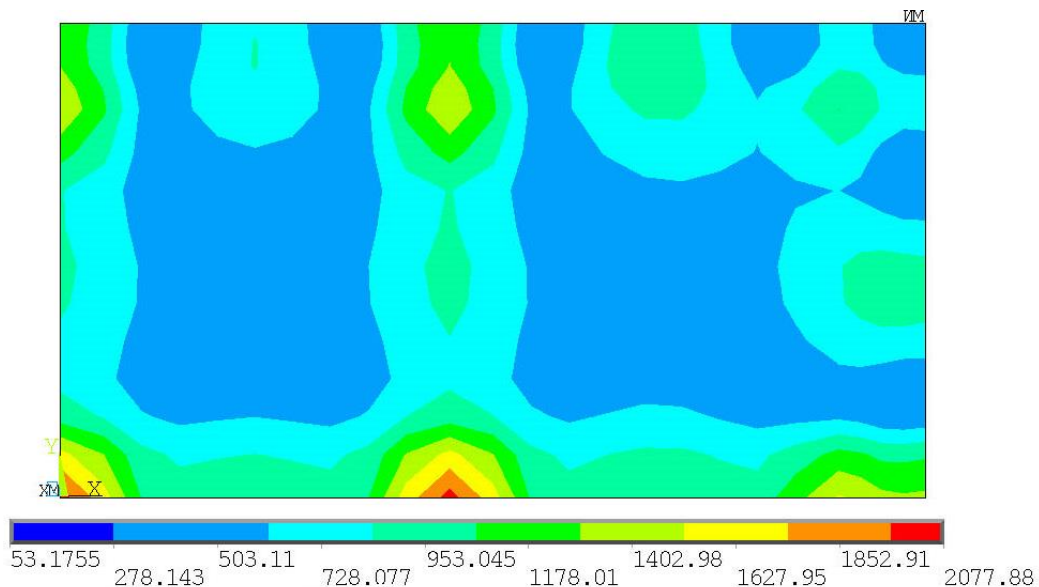
Obr. 1 Štvrtina dosky

Optimalizovala sa hrúbka dosky s ohraničením pre maximálne napätie v ťahu, ktoré nesmelo prekročiť $2,2 \text{ MPa}$, čím sa zabránilo porušeniu betónu ťahom. Hrúbky v stanovených bodoch po optimalizačnom procese sú uvedené v tab. 9 a napätie je zobrazené na obr. 10.

Tab. 9 Optimalizované hrúbky

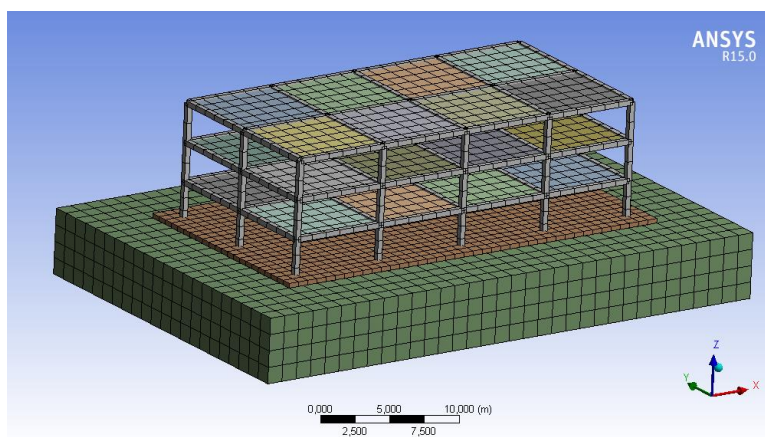
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
Hrúbka [m]	1.000	0.994	0.995	0.998	0.998	0.991	0.994	0.998	0.999

	H10	H11	H12	H13	H14				
Hrúbka [m]	0.998	0.998	0.999	0.998	0.996				



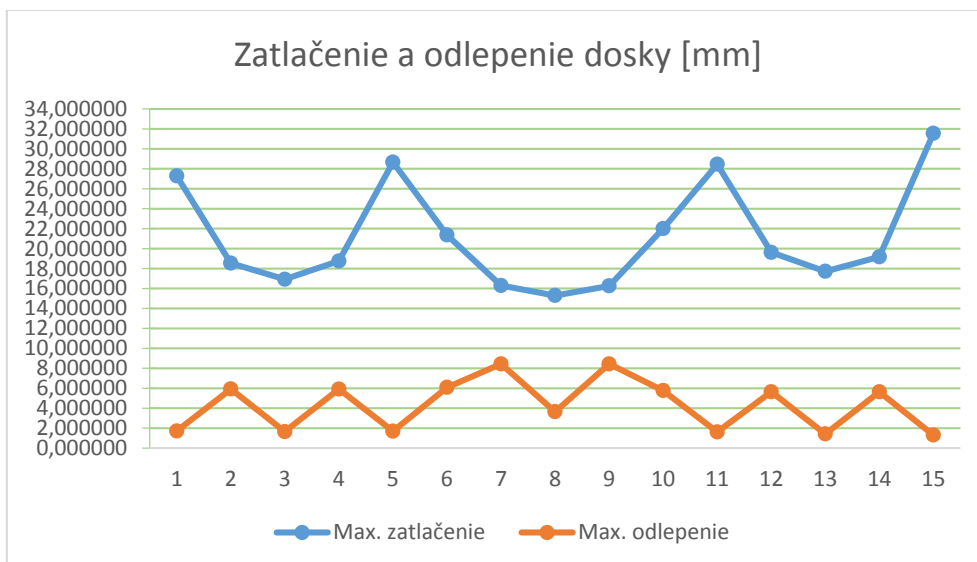
Obr. 10 Napätie na doske po optimalizácii

Variant B

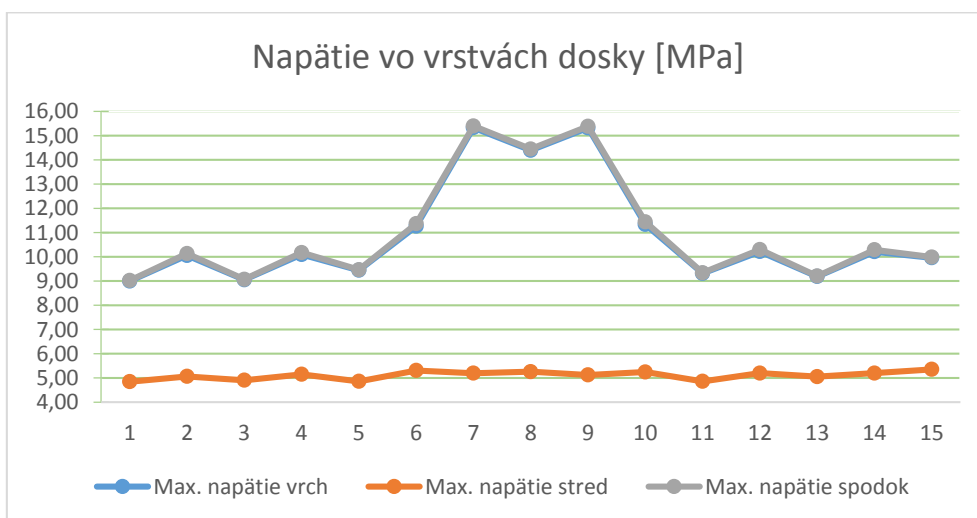


Obr. 11 Model celej konštrukcie

Náhly pokles podlažia (napr. pri prepadnutí šachty v poddolovanom území) môže nastať v ľubovoľnom mieste pod základovou doskou. V štúdií sa zameralo na prepadnutie podlažia štvorcovej plochy $3,2 \times 3,2 \text{ m}$ v miestach, kde sa stĺpy konštrukcie spájajú so základovou doskou. Pre každé miesto pod stĺpom sa skúmalo maximálne zatlačenie/odlepenie dosky a maximálne napätia vo vrstvách dosky (vrch, stred, spodok dosky). Výsledky sú znázornené na grafoch na obr. 12 a obr. 13.

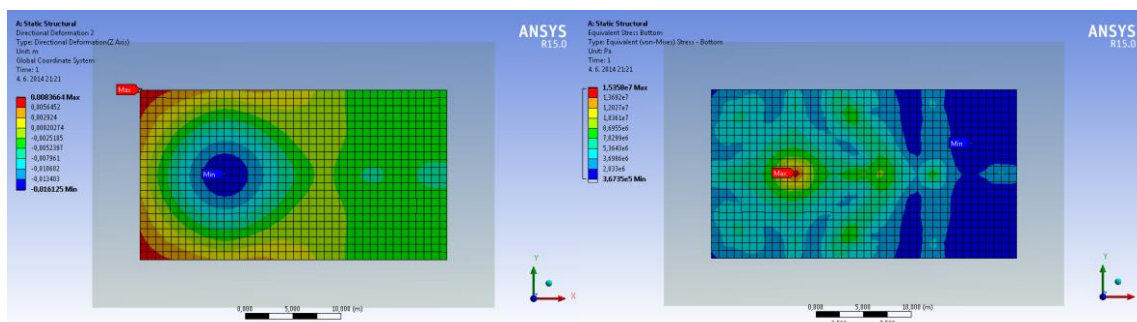


Obr. 12 Zatlačenie a odlepenie dosky pod jednotlivými stĺpami



Obr. 13 Ekvivalentné napätie v miestach pod stĺpami

Optimalizovala sa hrúbka základovej dosky tak, aby sa minimalizoval jej objem a bola splnená podmienka pre maximálne napätie v ťahu. Pri uvažovanej hrúbke 0,7 m by došlo k veľkému poškodeniu. Optimalizačnou analýzou sa zistilo, že pre kritický prípad prepadnutia podložia je ideálna hrúbka dosky 2,46 m. Pri tejto hodnote sa napätie na spodnej strane dosky pohybuje na hranici 2,2 MPa.



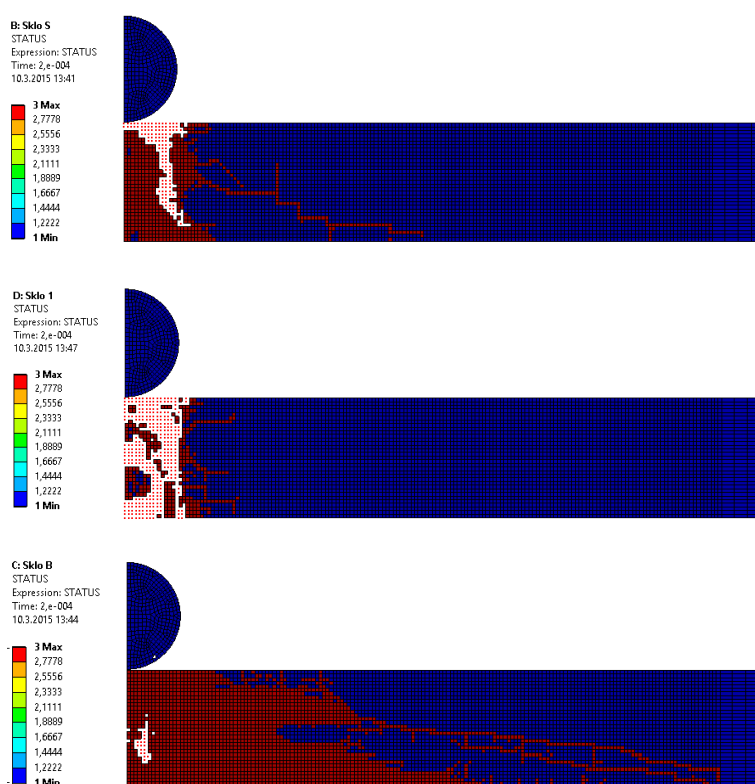
Obr. 14 Priehyb a max. ekvivalentné napätie po optimalizácii

Interakcia telies pri rázovom zat'ážení

Porovnanie JH2 modelu pre sklo

Pre tri materiálové modely skla sa testoval vplyv parametrov JH2 modelu, ktorý je vhodný pre modelovanie krehkých materiálov, ako napr. keramika a sklo. Jednotlivé modely sa od seba odlišovali štyrmi parametrami - Fracture Strength Constant B, Fracture Strength Exponent m, Damage Constant D1 a Hydrodynamic Tensile Limit.

Vytvoril sa 2D osovo symetrický model ocelevej gule s priemerom 9 mm a skla s hrúbkou 10 mm a dĺžkou 300 mm. Sklo bolo po obvode pevne uchytené a rýchlosť ocelevej guľičky bola nastavená na 300 m/s. Pomocou numerického výpočtu sa sledoval vplyv parametrov, ktoré ovplyvňujú šírenie trhlín v skle. Na obr. 15 sú porovnané všetky tri modely v nedeformovanom tvare, ktorý sa zvolil kvôli lepšej interpretácii šírenia trhlín a vypadávaní elementov.

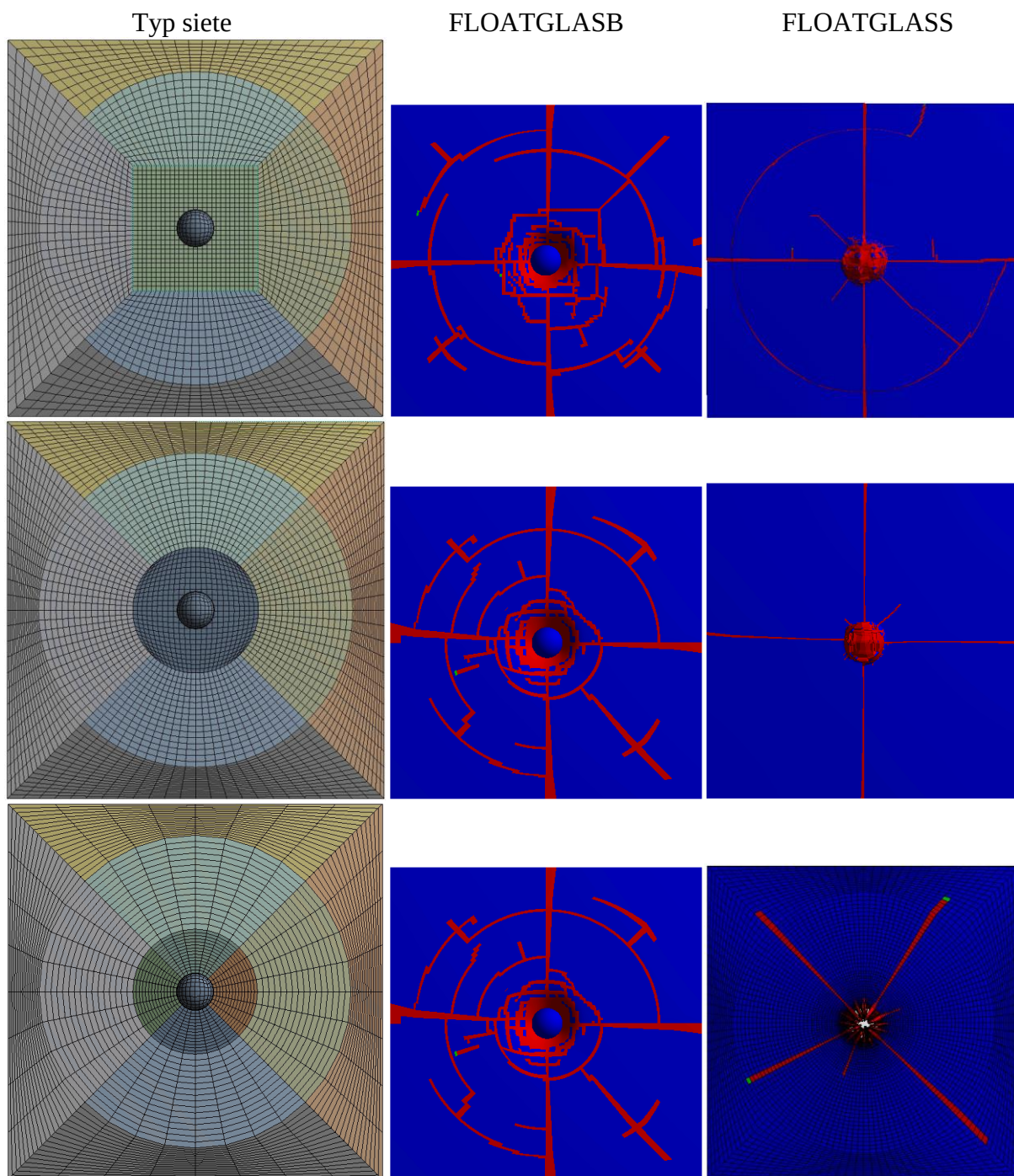


Obr. 15 Priebeh šírenia trhlín v JH modeli skla

Odstránením elementov sa zo systému stráca energia a preto boli do ďalších analýz zvolené materiály FLOATGLASB a FLOATGLASS.

Porovnanie siete pre šírenie trhlín

V tejto časti sme sa zamerali na vplyv siete pri šírení trhlín v dvoch modeloch skla FLOATGLASB a FLOATGLASS. Pre každý model skla sa vytvorili tri modely sklenenej tabule s rozmermi 600x600x30mm, ktoré sa líšili tvarom a spôsobom delenia v mieste nárazu. Sklenená tabuľa bola po obvode pevne uchytená a rýchlosť nárazu ocelevej guľičky bola 200 m/s. Numerickou simuláciou sa skúmalo, aký vplyv na šírenie trhlín v materiáli Johnson Holmquist Continuous má spôsob delenia v mieste nárazu a veľkosť elementu. Porovnanie šírenia trhlín v oboch typoch skla je obr. 16.



Obr. 16 Šírenie trhlín pre rôzne siete

Z obrázkov je vidieť, že pri použití FLOATGLASB sa šíria trhliny rýchlejšie a približujú sa k reálnemu správaniu. Pri použití FLOATGLASS dochádza k menšej deformácii a pomalšiemu šíreniu trhlín v skle. V prípade rýchlych dynamických dejov je deformácia veľmi rýchla a dochádza k poškodeniu skla iba v mieste a tesnom okolí nárazu a preto je vhodné použiť FLOATGLASS. Pri porovnaní typu siete v mieste nárazu je vidieť rozdiely v rýchlosti šírenia trhlín.

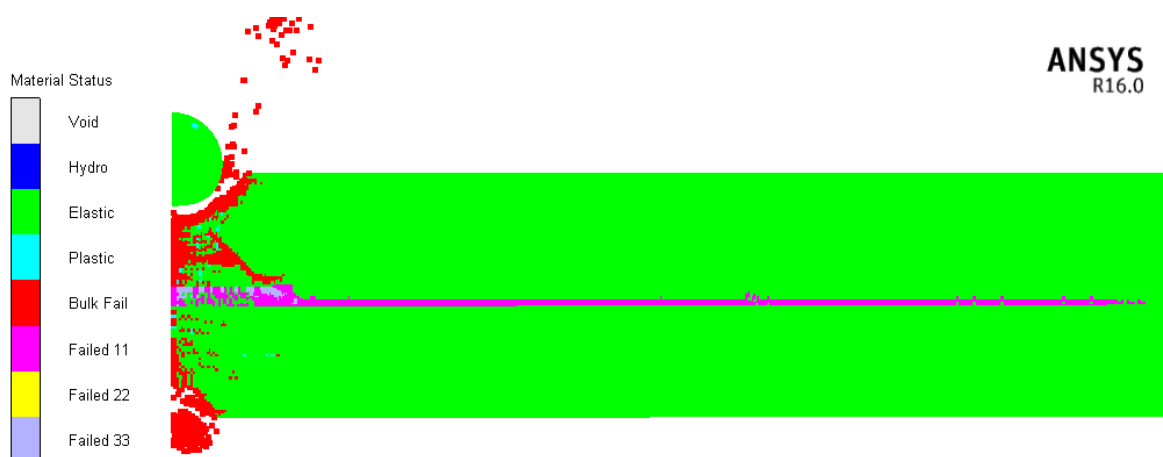
Parametrická štúdia 2D modelu vrstveného skla

Parametrická štúdia bola zameraná na použitie bezsietovej metódy SPH pre náraz ocelevej guľičky s priemerom 9 mm rýchlosťou 300 m/s do vrstveného skla. Základné zloženie skiel

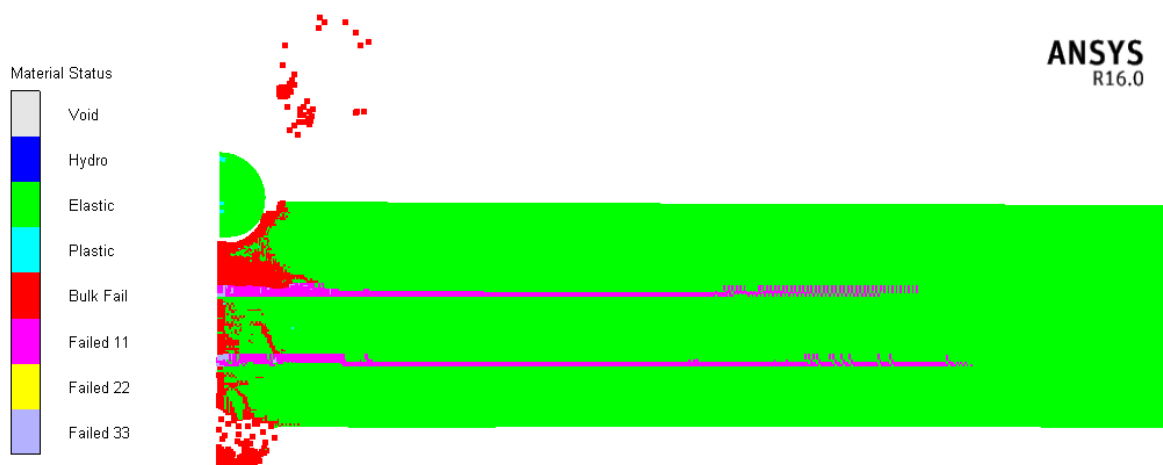
bolo: 10.10.1, 10.10.4, 10.10.10.4.4, kde 10 je hrúbka sklenenej tabule v mm a ďalšie čísla označujú počet fólií PVB s hrúbkou 0,38 mm. Pri posledných dvoch typoch vrstveného skla sa skúmal aj vplyv vrstvenia t.j. celková hrúbka skla sa rozložila do viacerých vrstiev skla s menšou hrúbkou a celkový počet PVB fólií bol rozdelený medzi jednotlivé vrstvy skla. Týmto spôsobom nám vznikli vrstvené sklá: 8.6.6.2.2, 4.4.4.4.4.1.1.1.1. 6.6.6.6.6.2.2.2.2



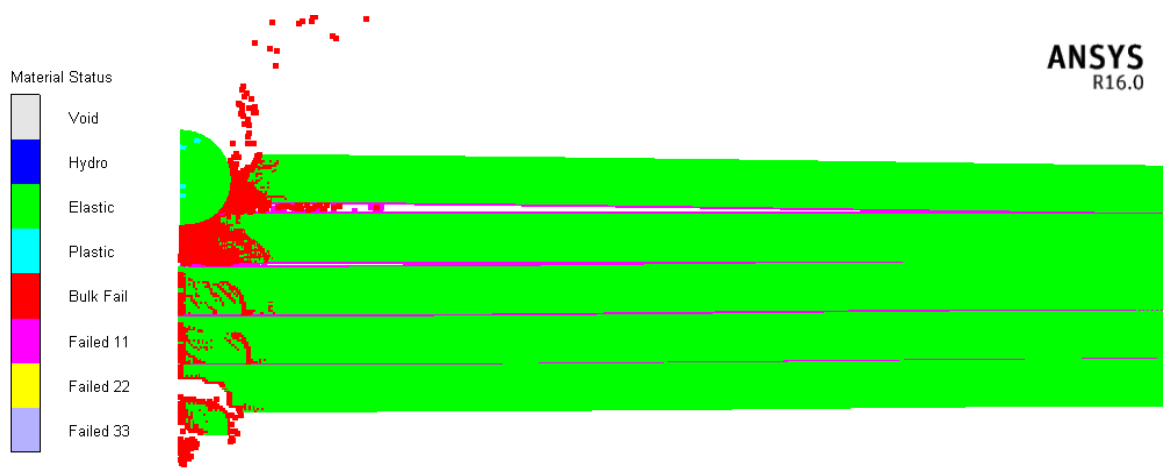
Obr. 17 Porušenie materiálov skla 10.10.1



Obr. 18 Porušenie materiálov skla 10.10.4



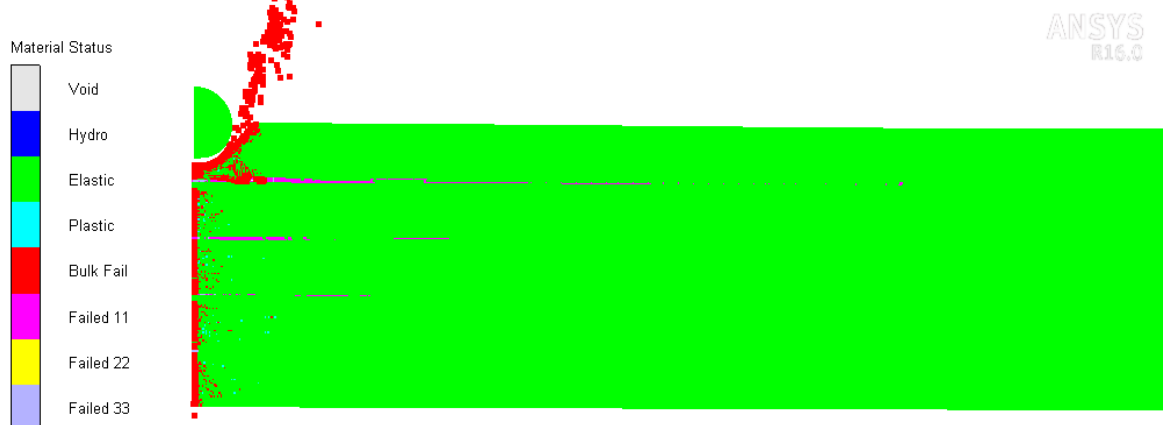
Obr. 19 Porušenie materiálov skla 8.6.6.2.2



Obr. 20 Porušenie materiálov skla 4.4.4.4.1.1.1



Obr. 21 Porušenie materiálov skla 10.10.10.4.4



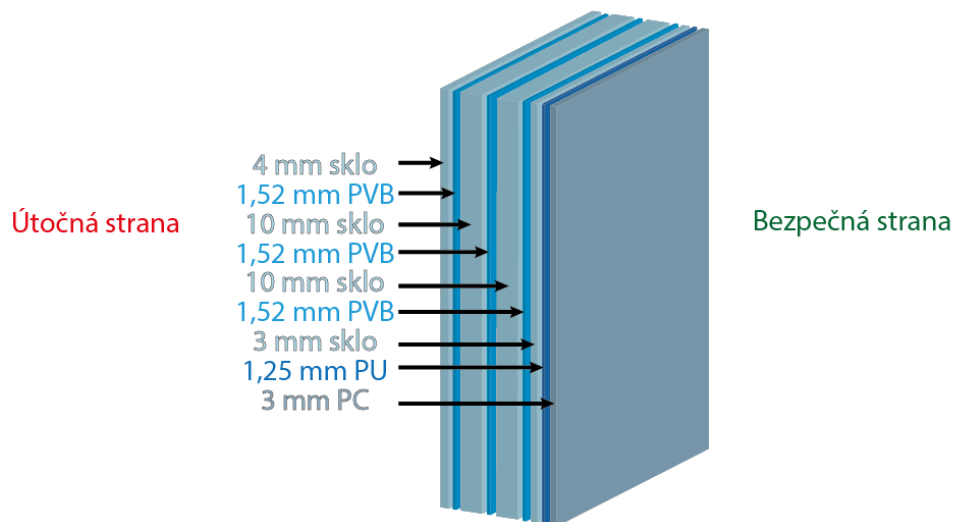
Obr. 22 Porušenie materiálov skla 6.6.6.6.2.2.2.2

Z obr. 17 – obr. 22 je vidno, že metóda SPH umožňuje reálnejšie modelovanie porušenia skla, pretože pri výpočtoch dochádza k odlietavaniu častíc. Pri vrstvení skla sa vyššia pevnosť a odolnosť dosiahne zväčšením hrúbky skla a pridaním počtu PVB fólií. Delením celkovej hrúbky skla do viacerých vrstiev a rozloženie počtu PVB fólií medzi vrstvy nemá výrazný vplyv na celkovú odolnosť.

Optimalizácia vrstveného skla

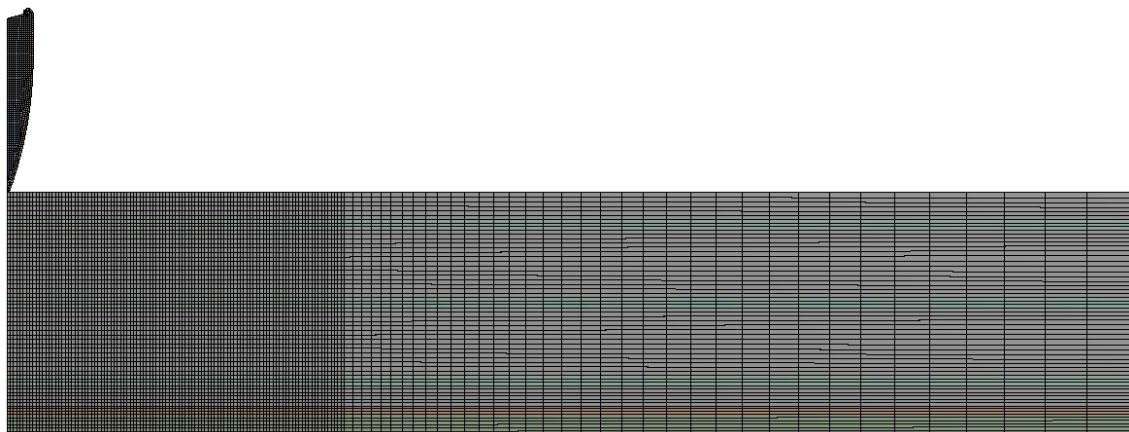
V tejto časti je opísaná optimalizácia vrstveného skla FAK47B-35-XH, ktoré vyrába spoločnosť Hingwah Glass Industry Co. [50]. Ide o vrstvené sklo zložené z plaveného skla

(Float), polyvinyl butyralovej (PVB) a polyuretánovej fólie, polykarbónatu. Rozmery a zloženia vrstiev sú na obr. 23.



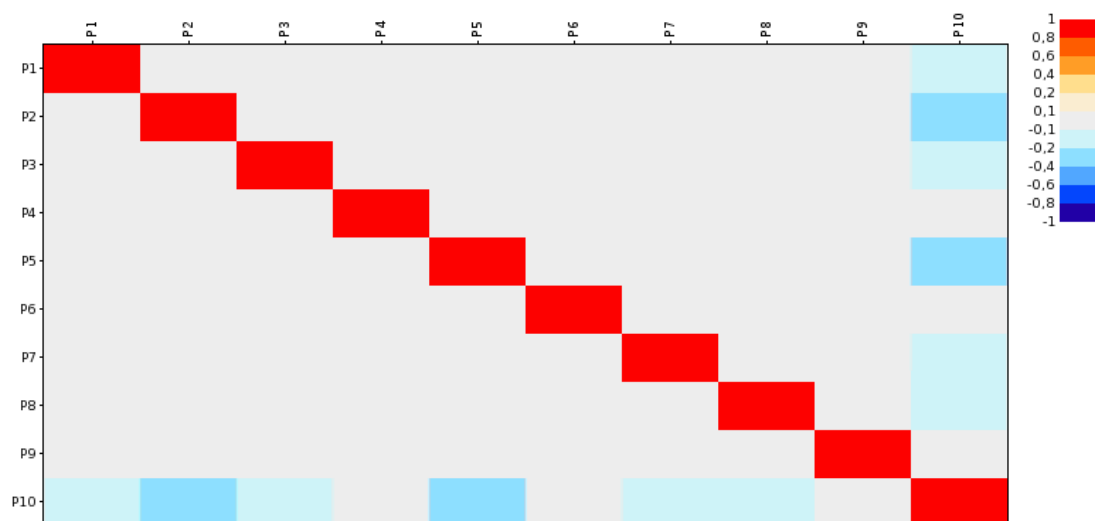
Obr. 23 Zloženie vrstveného skla

Pre zložitosť výpočtu sa modeloval a optimalizoval iba náraz prvej strely. Vytvoril sa 2D osovo symetrický model, ktorý bol neskôr použitý aj pri optimalizácii. Náboj bol delený na elementy veľkosti 0,3 mm a sklo bolo delené na elementy s veľkosťou 0,3 mm a sieť bola pravidelná. Projektilu bola nastavená začiatková rýchlosť 720 m/s a sklo bolo pevne uchytené na konci.



Obr. 24 Sieť matematického modelu

Korelačnou analýzou sa skúmala závislosť hrúbky každej vrstvy (P1 - P9) s porušením poslednej polykarbonátovej vrstvy (P10). Vygenerovalo sa 100 vzoriek a pre vyhodnotenie sa použil Spermanov korelačný koeficient. Na obr. 25 je grafická reprezentácia korelačnej matice, z ktorej vidieť závislosť medzi jednotlivými parametrami. Hodnota korelačného koeficientu sa pohybuje v intervale $(-1,1)$, kde obe hranice indikujú silnú pozitívnu/negatívnu závislosť medzi parametrami. Ak sa hodnota pohybuje blízko 0, tak medzi parametrami je malá/žiadna závislosť.



Obr. 25 Korelačná matica

Cieľom optimalizácie bolo nájsť také hrúbky prvých siedmich vrstiev, aby posledná polykarbonátová vrstva skla bola deformovaná elasticky a súčet týchto hrúbok nepresiahol hodnotu 35 mm. Pri optimalizácii sa uvažovalo so spojenými a výrobnými vstupnými parametrami (tab. 10 (hrúbky vrstiev)). Cieľovou funkciou bolo poškodenie poslednej polykarbonátovej vrstvy skla.

Tab. 10 Vstupné parametre

Vrstva	Označenie	Spodná hranica	Horná hranica	Výrobné hrúbky
1	H1	2	8	2,3,4,5,6,8
2	H2	0,76	1,52	0,76;1,14;1,52
3	H3	6	15	6,8,10,12,15
4	H4	0,76	1,52	0,76;1,14;1,52
5	H5	6	15	6,8,10,12,15
6	H6	0,76	1,52	0,76;1,14;1,52
7	H7	2	6	2,3,4,5,6,8

Pri optimalizácii boli použité dva prístupy a to optimalizácia pomocou plochy odozvy a priama optimalizácia. Pri každom z nich boli použité dve optimalizačné metódy Screening a MOGA. Výsledky boli podobné a preto sú nižšie v tab. 11 – tab. 12 uvedené výsledky pre optimalizačnú metódu Screening.

Tab. 11 Optimálne vstupné parametre – Optimalizácia cez plochu odozvy

Vrstva	Označenie	Pôvodný	Kandidát 1	Kandidát 2	Kandidát 3
1	H1	4	6	6	6
2	H2	1,52	1,14	0,76	1,14
3	H3	10	10	8	12
4	H4	1,52	1,14	0,76	0,76
5	H5	10	12	15	12
6	H6	1,52	1,52	1,14	0,76
7	H7	3	4	4	3
	CH	31,56	35,8	35,66	35,66
	STAT 2	1	1,11	1,13	1,14
	STAT 2 ver.	1	2	1	1

Tab. 12 Optimálne vstupné parametre – Priama optimalizácia

Vrstva	Označenie	Pôvodný	Kandidát 1	Kandidát 2	Kandidát 3
1	H1	4	5	5	6
2	H2	1,52	0,76	0,76	0,76
3	H3	10	10	10	6
4	H4	1,52	0,76	0,76	1,14
5	H5	10	12	12	15
6	H6	1,52	1,52	1,14	1,14
7	H7	3	2	6	3
	CH	31,56	32,04	35,66	33,04
	STAT 2	1	1	1	1

V ďalšom prípade sme sa zamerali na zmenšenie súčtu hrúbky prvých siedmich vrstiev tak, aby stav poslednej polykarbonátovej vrstvy bol porušený max. elastickou deformáciou (STATUS = 1) tab. 13

Tab. 13 Optimálne vstupné parametre metódy Screening

Vrstva	Označenie	Pôvodný	Kandidát 1	Kandidát 2	Kandidát 3
1	H1	4	5	3	4
2	H2	1,52	0,76	1,52	1,52
3	H3	10	10	10	12
4	H4	1,52	1,14	0,76	1,14
5	H5	10	8	12	10
6	H6	1,52	1,14	1,14	1,52
7	H7	3	3	2	2
	CH	31,56	29,04	30,42	32,18
	STAT 2	1	1	1	1

Záver

Úlohou optimalizácie bolo minimalizovať účelovú funkciu (objem konštrukcie) pri splnení stanovených ohrazení. Optimalizovaním stanovených hrúbok dosky sa nám podarilo redukovať jej objem, čo v skutočnosti znamená úsporu materiálu, ktorá môže viesť k zníženiu stavebných nákladov. Zmenou hrúbky dosky sa mení aj jej tuhosť a miesta, v ktorých napätie v ťahu prekračuje max. hodnoty, signalizujú potrebu dodatočnej výstuže, aby sa zabránilo porušeniu konštrukcie. V skutočnosti je veľmi ťažké vytvoriť konštrukciu s teoreticky získanou topológiou hrúbok, ale optimalizačná analýza poskytuje hraničné hodnoty a je na inžinierovi, či sa k daným rozmerom v istej miere priblíži bez toho, aby narušil technické možnosti výstavby.

Cieľom tejto časti bolo aj preveriť možnosti použitého softvéru na riešenie opísanej nelineárnej úlohy s jednostrannou väzbou. Dosiahnuté výsledky optimalizácie nemožno generalizovať a bolo by potrebné porovnanie s experimentálnym meraním. Môžeme však konštatovať, že uvedený softvér umožňuje dostatočne precízne modelovať jednostranné väzby v kontaktných úlohách.

Z poznatkov dosiahnutých pri vypracovaní práce a uvedených výsledkov možno vyvodit' nasledujúce závery a odporúčania:

- Pri modelovaní interakcie konštrukcie a podložia sa uvažuje s miernym ohybom dosky

- a preto je potrebné pri použití elementu SOLID185 nastaviť KEYOPT(2) = 2.
- Je nutné rozdeliť hrúbku dosky minimálne na tri elementy, pretože delenie na jeden element robí dosku veľmi tuhú a potláča ohybový moment dosky.
 - Pri použití kontaktných algoritmov, ktoré počítajú s tuhosťou kontaktu sa ukázalo ako najvhodnejšie použiť tuhosť kontaktu FKN = 0,1
 - Pre nulové penetrácie je vhodné použiť algoritmy Lagrange&penalty a Normal Lagrange namiesto nastavenia vysokej tuhosti, ktorá vedie k oscilácii a nekonvergencii riešenia.
 - Pri skúmaní typu kontaktu sa ukázalo, že kontakt uzol-plocha a plocha-plocha dosahujú podobné výsledky pre hodnoty napätí dosky a aj rozdiel objemov po optimalizácii bol iba 1%. Pri použití kontaktu uzol-plocha bolo potrebných menej iterácií, ako pri kontakte plocha-plocha. Z hľadiska rýchleho a prvotného optimálneho návrhu je možné použiť kontakt uzol-plocha a následne pre spresnenie riešenia použiť kontakt plocha-plocha.
 - Tuhosť podložia má vplyv na odlepenie a penetráciu dosky
 - Pri použití optimalizačnej metódy prvého rádu je vhodné použiť nastavenie pre veľkosť kroku hľadania $s_{\max} = 100$ a smer hľadania $\Delta D = 0,2$.
 - Pri porovnaní jednostrannej väzby s votknutím a kĺbovým uložením možno konštatovať, že optimalizovaný objem je podobný optimalizovanému objemu pre dokonalé votknutie. Pri porovnaní priechybov dáva jednostranná väzba najväčší priechýb dosky, ale najmenšie napätie.
 - Koeficient šmyku pri kontakte plocha-plocha nemá výrazný vplyv na objem pri optimalizácii
 - Najkritickejšie miesta pri trojpodlažnej budove sú miesta pod vnútornými stĺpmi, je potrebné venovať pozornosť vzniku trhlín a opatriť tieto miesta výstužou. V prípade náhleho poklesu podložia sa pomocou optimalizácie zistilo, že v kritických miestach treba uvažovať asi s trojnásobnou hrúbkou dosky. To platí v prípade použitia prostého betónu a je možné túto hrúbku redukovať výstužou.
 - Optimalizácia je užitočný nástroj pri hľadaní kritických miest, v ktorých je potrebné tuhosť dosky zvýšiť výstužou.

V druhej časti sme sa zamerali na interakciu telies pri rázovom zaťažení. Pri modelovaní rýchlych dynamických dejov je dôležité vybrať správny materiál pre model a definovať potrebné parametre. Ako prvé sme sa zamerali na šírenie trhlín pozdĺž hrúbky sklenenej tabule v troch modeloch skla. Pre ďalšiu analýzu sme vybrali FLOATGASB a FLOATGLASS a skúmali sme šírenie trhlín v 3D modeli sklenenej tabule. Taktiež sa skúmal aj vplyv siete a veľkosť elementu pri delení na konečné prvky. Pri modelovaní prerazenia bezpečnostného skla oceľovou guľčkou sa použila metóda SPH, ktorá je vhodná na simuláciu krehkých materiálov. Použitím získaných výsledkov sa simuloval náraz strely do vrstveného skla, ktoré sa skladalo z deviatich vrstiev. Pri pôvodnom zložení skla by nedošlo k trvalému poškodeniu zadnej polykarbonátovej vrstvy. Preto sme sa rozhodli optimalizovať prvých sedem vrstiev zložených zo skla a PVB fólie. Pri optimalizácii sme použili dva prístupy a to optimalizáciu pomocou plochy odozvy a priamu optimalizáciu. Pri každom type sa použili aj dve optimalizačné metódy Screening a MOGA. Pri prvotných optimalizáciách bol účelovou funkciou stav poslednej polykarbonátovej vrstvy (STATUS) a neskôr súčet prvých siedmich vrstiev.

Z poznatkov dosiahnutých pri vypracovaní práce a uvedených výsledkov možno vyvodit nasledujúce závery a odporúčania:

- Pri modelovaní rýchlych dynamických dejov je potrebné zvoliť vhodnú veľkosť elementu, čím jemnejšia sieť tým lepšie modelovanie priebehu porušenia skla.
- Pre modelovanie skla je vhodné použiť metódu SPH, ktorá prekoná problémy pri deformáciách elementov v Lagrangeovskej sieti.
- Redukciou faktoru časového kroku možno zabrániť nekorektnému správaniu elementov – rozstreleniu elementu
- Počas výpočtu je vhodné ošetriť aj kontrolu energetickej chyby. Pri Lagrangeovej sieti v dôsledku veľkých deformácií je vhodné nastaviť vyššiu hodnotu napr. 30%
- Pre rýchle dynamické deje je vhodné vytvoriť kvalitnú sieť použitím pravidelných štvoruholníkových elementov.
- Pri optimalizácii v softvéri ANSYS nie je možné použiť SPH metódu.
- ANSYS ponúka dva postupy optimalizácie – cez plochu odozvy a priamo. Optimalizácia cez plochu odozvy je vhodná na rýchle prvotné určenie vstupných parametrov, avšak odporúčam overiť vybrané optimálne vzorky priamym riešením. Taktiež by bolo vhodné spustiť ešte optimalizáciu, v ktorej by sa použila gradientná metóda na spresnenie lokálneho minima. Nevýhodou tohto prístupu môže byť nepresnosť výsledkov pri nedostatočnej aproximácii plochy odozvy. V prípade, že výpočet modelu nie je časovo náročný, je vhodnejšie použiť priamu optimalizáciu a každú vzorku vypočítať samostatne.
- Použité metódy - Screening a MOGA dávajú podobné výsledky a je iba na inžinierovi, ktorú z nich si zvolí pre prvotný návrh.
- Pri optimalizácii vrstveného skla zloženého z deviatich vrstiev má podľa korelačnej analýzy najväčší vplyv na porušenie poslednej polykarbonátovej vrstvy piata vrstva skla.
- Pri optimalizácii dochádza hlavne k redukcii hrúbky PVB fólie, ktorej hlavnou úlohou je udržať úlomky skla. Z toho vyplýva, že pre pohltienie kinetickej energie strely má najväčší vplyv hrúbka skla.
- Oproti pôvodnému zloženiu skla sme dosiahli minimálnu redukciiu hrúbky prvých siedmich vrstiev. Tá bola okolo 2 mm a preto možno konštatovať, že pri danom návrhu nie je priestor pre zmenšenie hrúbky sklenenej vrstvy, ale je variabilita pri počte PVB fólií.

Z uvedených výsledkov a postupov možno konštatovať, že ANSYS umožňuje precízne modelovanie jednostrannej väzby pri statických úlohách, ako aj v úlohách s rázovým zaťažením. Pri správnom odladení modelov a porovnaním s experimentálnymi meraniami poskytuje alternatívny nástroj pre vedecký výskum, ktorý môže nahradiť drahé, časovo náročné a niekedy nebezpečné experimenty. Dokáže poskytnúť komplexné informácie, ktoré sú v skutočnosti ťažko merateľné alebo pozorovateľné.

Literatúra

- [1.] Christodoulos A. Floudas, Panos M. Pardalos, „Encyclopedia of Optimization“, Springer Science & Business Media, 2008, 4626 s., ISBN: 9780387747590
- [2.] Cairolì R., Dalang R. C., „Sequential Stochastic Optimization“, John Wiley & Sons, 2011, 352 s., ISBN 0471577545
- [3.] Raphael T. Haftka, Zafer Gürdal, M.P. Kamat, „Elements of Structural Optimization“, Springer Science & Business Media, 2013, 402 s., ISBN: 978940157864
- [4.] Kirsch U., „Structural Optimization“, Springer Science & Business Media, 2012, 302 s., ISBN: 9783540559191
- [5.] Spillers W. R., MacBain K. M., „Structural Optimization“, Springer Science & Business Media, 2012, 302 s., ISBN: 9783540559191
- [6.] Ravindran A., Ragsdell K. M., Reklaitis G. V., „ENGINEERING OPTIMIZATION Methods and Applications“, John Wiley & Sons, 2006, 667 s., ISBN: 9780471558149

- [7.] Qing Quan Liang, „Performance-Based Optimization of Structures“, CRC Press, 2005, 280 s., ISBN: 0-203-33471
- [8.] Griva I., Nash S. G., Sofer A., „Linear and Nonlinear Optimization“, SIAM, 2009, 742 s., ISBN: 780898716610
- [9.] Banichuk N.V., Neittaanmäki P., „Structural Optimization with Uncertainties“, Springer Science & Business Media, 2009, 233 s., ISBN: 9789048125173
- [10.] Makoto Ohsaki, „Optimization of Finite Dimensional Structures“, CRC Press, 2010, 439 s., ISBN: 9781439820049
- [11.] Tsompanakis Y., Lagaros N. D., Papadrakakis M., „Structural Design Optimization Considering Uncertainties“, CRC Press, 2008, 656 s., ISBN: 9780203938522
- [12.] Abraham A., Goldberg R., „Evolutionary Multiobjective Optimization“, Springer Science & Business Media, 2006, 302 s., ISBN: 1852337877
- [13.] Wriggers P., Laursen T. A., „Computational Contact Mechanics“, Springer, 2008, 255 s., ISBN: 9783211772973
- [14.] Zavarise G., Wriggers P., „Trends in Computational Contact Mechanics“, Springer Science & Business Media, 2011, 354 s., ISBN: 978364221668
- [15.] Laursen T. A., „Computational Contact and Impact Mechanics“, Springer Science & Business Media, 2002, 454 s., ISBN: 3540429069
- [16.] G. Björkman, A. Klarbring, B. Sjödin, T. Larsson and M. Rönqvist, “Sequential Quadratic Programming for Non-Linear Elastic Contact Problems”, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 38, 137-165, (1995).
- [17.] R.A.M. Silveira, Analysis of Slender Structural Elements under Unilateral Contact Constraints, D.Sc. Thesis, Catholic University, PUC-Rio (in Portuguese), (1995).
- [18.] A. A. Khathlan, ”Large-Deformation Analysis of Plates on Unilateral Elastic Foundation.”, J. Eng. Mech., 0733-9399, (1994)
- [19.] Strömberg N. and Klarbring A., Topology optimization of structures in unilateral contact, Structural and multidisciplinary optimization, 2010, s. 57-64.
- [20.] Silveira R. A. M., Pereira W. L. Goncalves A, P. B., Constrained and Unconstrained Optimization Formulations for Structural Elements in Unilateral Contact with an Elastic Foundation, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Volume 2008, Article ID 786520
- [21.] Christie D.G. An investigation of cracks and stress waves in glass and plastics by high-speed photography. Trans Soc Glass Tech 1952;36: 74e89.
- [22.] Rader D. On the dynamics of crack growth in glass. Exp Mech 1967;7(4):160e7.
- [23.] Glenn LA. The fracture of a glass half-space by projectile impact. J Mech Phys Solids 1976;24:93e106.
- [24.] Schardin H. Physikalische Vorgänge bei hohen Belastungen und Belastungsgeschwindigkeiten [Physical processes at high loadings and loading rates]. Scripts Ger Acad Aeronautical Res 1939;40:21e68.
- [25.] Schardin H. Results of cinematographic investigation of the fracture process in glass. Glastechnische Berichte (Glass Sci Technol) 1950;23.
- [26.] Senf H, Strassburger E, Rothenhäusler H. Stress wave induced damage and fracture in impacted glasses. J Phys IV Colloq C8 1994:741e6.
- [27.] Strassburger E, Patel P, McCauley JW, Templeton DW. High-speed photographic study of wave and fracture propagation in fused silica. In: Proc. 22nd int. symp. ballistics. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.; 2005. pp. 761e8.

- [28.] Senf H, Strassburger E, Rothenhäusler H. A study of damage during impact in ZERODUR. J Phys IV Colloq C3 1997;7:1015e20.
- [29.] Bourne NK, Rosenberg Z, Field JE. High-speed photography of compressive failure waves in glasses. J Appl Phys 1995;78(6):3736e9.
- [30.] Anderson Jr CE, Orphal DL, Behner T, Templeton DW. Failure and penetration response of borosilicate glass during short-rod impact. Int J Impact Eng 2008;36(6):789e98.
- [31.] Anderson Jr CE, Holmquist TJ. Application of a computational glass model to compute propagation of failure from ballistic impact of borosilicate glass targets. Int J Impact Eng 2013;56:2e11.
- [32.] Strassburger E, Patel P, McCauley JW, Templeton DW. Wave propagation and impact damage in transparent laminates. In: Proc. of the 23rd int. symp. on ballistics, Tarragona, Spain; 2007. pp. 1381e8.
- [33.] Bless S, Chen T. Impact damage in layered glass. Int J Fract 2010;162:151e8.
- [34.] Grujicic M, Pandurangan B, Bell WC, Coutis N, Cheeseman BA, Fountzoulas C, Patel P, Templeton DW, Bishnoi KD. An improved mechanical material model for ballistic soda-lime glass. J Mater Eng Perform 2009;18:1012e28. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-008-9343-0>.
- [35.] Grujicic M, Pandurangan B, Coutis N. A computational investigation of the multi-hit ballistic-protection performance of laminated transparent armor systems. J Mater Eng Perform 2012;21:837e48. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-011-0004-3>.
- [36.] ARORA, J. Optimization of Structural and Mechanical Systems, World Scientific Pub. Co. Inc, 2007, 595 s. ISBN 9812569626
- [37.] Christensen, P. W. – Klarbring, A. An Introduction to Structural Optimization. Springer 2009, 214 s. ISBN 978-1-4020-8666-3
- [38.] ANSYS Help, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications (ANSYS manual)
- [39.] KIKUCHI, N. – ODEN, J. T. Contact Problems in Elasticit. Philadelphia : SIAM, 1995, 495 s. ISBN: 0898714680
- [40.] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., „The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics“, Elsevier, 2005, 631 s., ISBN: 0750663219
- [41.] G. R. Liu, M. B. Liu: Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method, World Scientific 2003, 470 s., ISBN 9812384561
- [42.] P. Wriggers, Nonlinear Finite Element Methods. Springer Science & Business Media, 2008, 559 strán, ISBN: 9783540710004
- [43.] J. Buchar - J.Voldřich, Terminální balistika, Praha: Academia 2003, 340 s., ISBN 8020012222
- [44.] Jendželovský, N. Modelovanie základových konštrukcií v MKP. Bratislava 2009, 94 s. ISBN 978-80-227-3025-9
- [45.] J. Králik, Safety and reliability of nuclear power buildings in Slovakia, STU Bratislava, 2009, 307 s., ISBN: 9788022731126
- [46.] Ravinger J., Psotný M., Analýza konštrukcií : Nelineárne úlohy, Bratislava, STU v Bratislave, 2007, ISBN 978-80-227-2713-6
- [47.] M. Sokol – K. Tvrdá, Dynamika stavebných konštrukcií. STU Bratislava, 2011, 214 s., ISBN: 9788022735872

- [48.] Š. Popovič, Výroba a zpracování plochého skla. Grada, 2009, 256 strán, ISBN: 9788024731544
- [49.] Holmquist T. J. & Johnson G. R. & Grady D. E. & Lopatin C. M. & Hertel E. S. (1995) Hight strain rate properties and constitutive modeling of glass, 15th International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel 1995
- [50.] <http://www.xh-glass.com/product-1-2-building-bullet-proof-glass-en/156282>

AFC Publikované příspěvky na zahraničních vědeckých konferencích

Počet záznamov: 7

- Optimálny návrh hrúbky základovej dosky s uvažovaním jednostrannej väzby**
Štiglic, Martin
- AFC1. Optimálny návrh hrúbky základovej dosky s uvažovaním jednostrannej väzby. In *Juniorstav 2014 [elektronický zdroj] : 16. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodní účastí, Brno, ČR, 30.1.2014*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014, s. 5.
- Deterministic and Probabilistic Analysis of the Foundation Plate with Unilateral Bonds**
Štiglic, Martin - Dický, Jozef
- AFC 2. Deterministic and Probabilistic Analysis of the Foundation Plate with Unilateral Bonds. In 13th International scientific conference VSU' 2013. Volume 1 : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 6.-7.6.2013. Sofia: L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2013, s. 38--43.
- Optimálny návrh dosky s uvažovaním jednostrannej väzby**
Štiglic, Martin - Dický, Jozef
- AFC 3. Optimálny návrh dosky s uvažovaním jednostrannej väzby. In *Juniorstav 2013 [elektronický zdroj] : 15. odborná konferencia doktorského studia s mezinárodní účastí. VUT, Brno, 7.2.2013*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, s. 4. ISBN 978-80-214-4670-0.
- Foundation Plate Optimization with Consideration of Unilateral Bonds**
Štiglic, Martin - Dický, Jozef
- AFC 4. Foundation Plate Optimization with Consideration of Unilateral Bonds. In 13th International scientific conference VSU' 2013. Volume 1 : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 6.-7.6.2013. Sofia: L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2013, s. 44--49.
- Analysis of Aircraft Impact to The Steel Structure WDI**
Jendželovský, Norbert - Štiglic, Martin - Tvrďá, Katarína
- AFC 5. Analysis of Aircraft Impact to The Steel Structure WDI. In *12th International scientific conference VSU'2012. Vol. 1 : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 7.-8.6.2012*. Sofia: L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2012, s. 191-194.
- Analysis of 3-D Lattice Plate Using FEM**
Štiglic, Martin - Tvrďá, Katarína
- AFC 6. Analysis of 3-D Lattice Plate Using FEM. In *20th SVS FEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2012 [elektronický zdroj] : Přerov, Czech Republic, 17.-19.10.2012*. Brno: SVS FEM s.r.o, 2012, ISBN 978-80-260-2722-5.
- Probabilistic analysis of 3-D lattice plate**
Štiglic, Martin - Tvrďá, Katarína
- AFC 7. Probabilistic analysis of 3-D lattice plate. In *11th International Scientific*

Conference VSU' 2011. Volume 1 : Sofia, Bulgaria, 2.-3.6.2011. Sofia:
L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2011, s. 202--207.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Počet záznamov: 5

- Pravdepodobnostná analýza nárazu projektilu**
Štiglic, Martin
- AFD1. Pravdepodobnostná analýza nárazu projektilu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : Proceedings of 12th International Conference. Bratislava, SR, 16.-17.10.2014*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, s. 6. ISBN 978-80-227-4259-7.
- Design Optimization of Foundation Slab in Interaction with Subsoil**
Štiglic, Martin
- AFD 2. Design Optimization of Foundation Slab in Interaction with Subsoil. In *22nd SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2014 [elektronický zdroj] : Jasná, SR, 25.-27.6.2014*. Brno: SVS FEM, 2014, s. 134--138. ISBN 978-80-905525-1-7.
- Vplyv okrajových podmienok pri optimálnom návrhu konštrukcie**
Štiglic, Martin
- AFD 3. Vplyv okrajových podmienok pri optimálnom návrhu konštrukcie. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 23rd Annual PhD student conference. Bratislava, SR, 30.10.2013*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 132--138. ISBN 978-80-227-4102-6.
- Optimalizácia dosky s uvážením jednostrannej väzby**
Štiglic, Martin - Dický, Jozef
- AFD 4. Optimalizácia dosky s uvážením jednostrannej väzby. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 22nd Annual PhD Student Conference. Bratislava SR, 15.11.2012*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012, s. 146--151. ISBN 978-80-227-3853-8.
- Space Truss Optimization in Software ANSYS**
Štiglic, Martin - Tvrďá, Katarína
- AFD 5. Space Truss Optimization in Software ANSYS. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings : 9th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, 20.-21.10.2011*. Bratislava: STU v Bratislave, 2011, s. 149--152. ISBN 978-80-227-3572-8.

Publikované skriptá

MKP v statike a dynamike konštrukcií (Analýza konštrukcií)

Norbert JENDŽELOVSKÝ, Prof. Ing. PhD, Martin ŠTIGLIC, Ing., Katarína TVRDÁ, Ing., PhD, STU Bratislava, Stavebná fakulta 2015