

MODELOVANIE VYSTUŽENÝCH SKLENÝCH NOSNÍKOV V MKP

FEM MODELING OF THE REINFORCED GLASS BEAMS

Miloš Slivanský¹

Abstrakt

Navrhovanie nosných konštrukcií zo skla je ešte aj v súčasnosti nedostatočne rozpracovaná oblasť. Intenzívny experimentálny a teoretický výskum je preto pre rozvoj v oblasti navrhovania moderných sklených konštrukcií rozhodujúci. Tento príspevok sa zaoberá aplikáciou skla (ako konštrukčného materiálu) pri návrhu nosných prvkov. Prezentované údaje sú zamerané predovšetkým na porovnanie výsledkov experimentálneho a teoretického výskumu z pohľadu totálnej a zvyškovej odolnosti vystužených sklených nosníkov.

Kľúčové slová

Sklo, vrstvené sklo, nosníky, trhlina, krehký lom, výstuž, zvyšková odolnosť, MKP analýza.

Abstract

The designing with glass is still an under – developed area. Intensive theoretical and experimental research is therefore essential for ensuring the reliability and efficiency of modern structural glass systems. The paper deals with application of structural glass in design of loadbearing glass elements. The main objective of the presented work is to compare experimental and theoretical research (FEM-analysis) of the loadbearing capacity and post-breakage behavior of the reinforced glass beams.

Keywords

Structural glass, laminated glass, beams, crack, fracture, reinforcement, post-breakage structural capacity, FEM analysis.

1 Experimentálny výskum

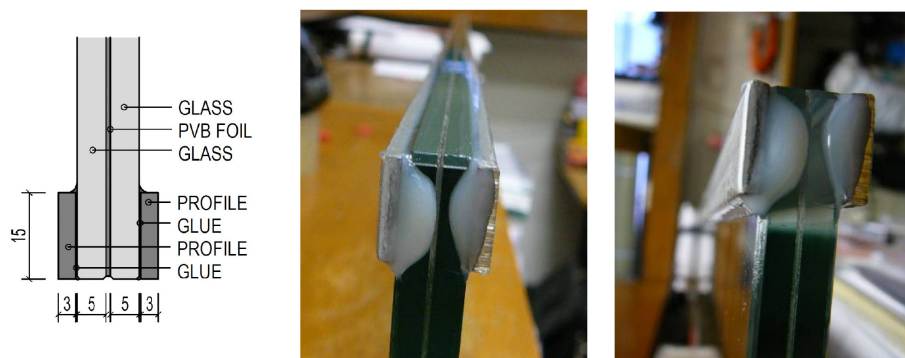
Skúšky vystužených nosníkov z plaveného skla sa zamerali na skúmanie charakteru porušovania z pohľadu zvýšenia odolnosti spolupôsobením skla s kovovými materiálmi a tiež z pohľadu zabezpečenia zvyškovej odolnosti porušeného skleneného prvku.

1.1 Skúšobné vzorky

Skúšobné vzorky sklených nosníkov mali rozmery 1500 x 130mm a na ich výrobu boli použité tabule vrstveného nekaleného skla s hrúbkou 5mm, ktoré boli vzájomne spojené PVB fóliou s hrúbkou 0,76mm. Ako výstužný profil sa použil nerezový pásový materiál kvality EN 1.430. Strihaná pásovina s prierezom 15 x 3mm bola nalepená na obidva povrchy sklenej tabule pozdĺž celého nosníka na jednom jeho okraji (pri zaťažení

¹ Miloš Slivanský, Ing., PhD., STU Bratislava, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, milos.slivansky@stuba.sk

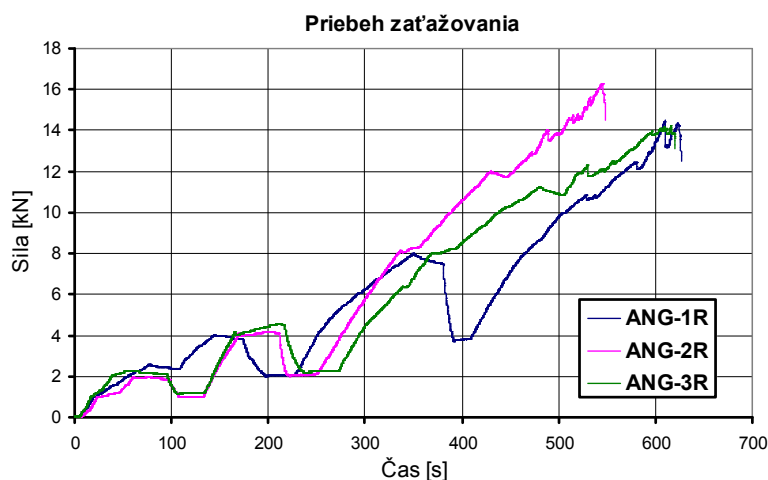
na ťahanom okraji). Detail nosníka s nalepenou výstužnou páskou ilustruje obr. 1. Na lepenie výstužnej pásky sa použilo dvojzložkové epoxidové lepidlo Loctite Hysol 9466.



Obr. 1: Nalepená výstužná pásovina (detail), schéma a skutočné prevedenie

1.2 Zaťažovanie nosníkov

Skúšobné vzorky všetkých typov nosníkov boli overované 4 – bodovou ohybovou skúškou. Pre tento účel bola navrhnutá a vyrobená skúšobná zaťažovacia zostava, ktorá bola osadená v stacionárnom hydraulickom lise ZDMU 30 s maximálnou zaťažovacou silou 100kN. Pri zaťažovaní vzoriek bol nárast zaťažovacej sily v čase približne lineárny a rýchlosť zaťažovania približne konštantná. Zaťažovaniu vzorky do porušenia predchádzalo niekoľko zaťažovacích cyklov (zaťaženie – konštantná úroveň zaťaženia – odľahčenie). Priebeh zaťažovacej skúšky ako nárast zaťažovacej sily hydraulického lisu P v čase ilustruje obr. 2.



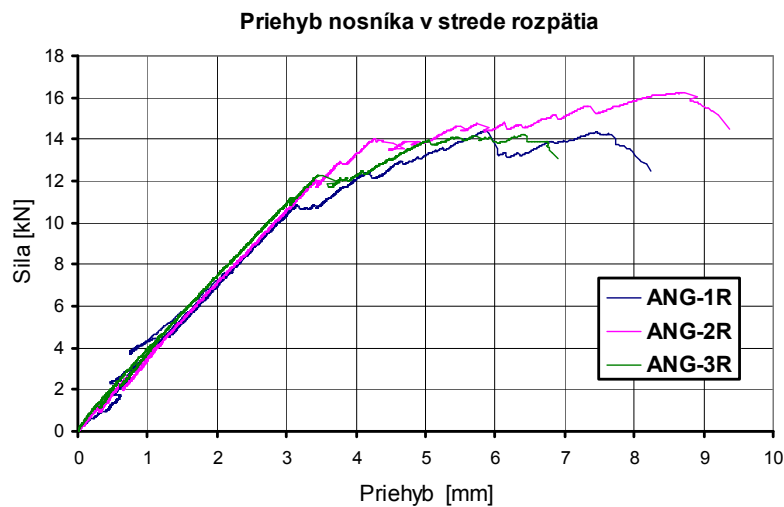
Obr. 2 – Priebeh zaťažovania vystužených sklenených nosníkov

1.3 Deformácia a ohybová odolnosť nosníkov

Porovnanie dosiahnutých výsledkov zvislých priehybov uprostred rozpätia pre jednotlivé skúšobné vzorky ANG-R uvádza obr. 3. Z výsledkov meraní vyplýva, že závislosť medzi zaťažením a zvislým priehybom skúšobnej vzorky je do určitej hladiny namáhania takmer ideálne lineárna.

K nelineárnemu nárastu zvislej deformácie dochádza až od okamihu, kedy začnú v sklenej časti nosníka vznikať ťahové trhliny. Postupným zväčšovaním rozsahu poškodenia nosníka výrazne narastá jeho zvislá deformácia. Kumulovanie poškodenia

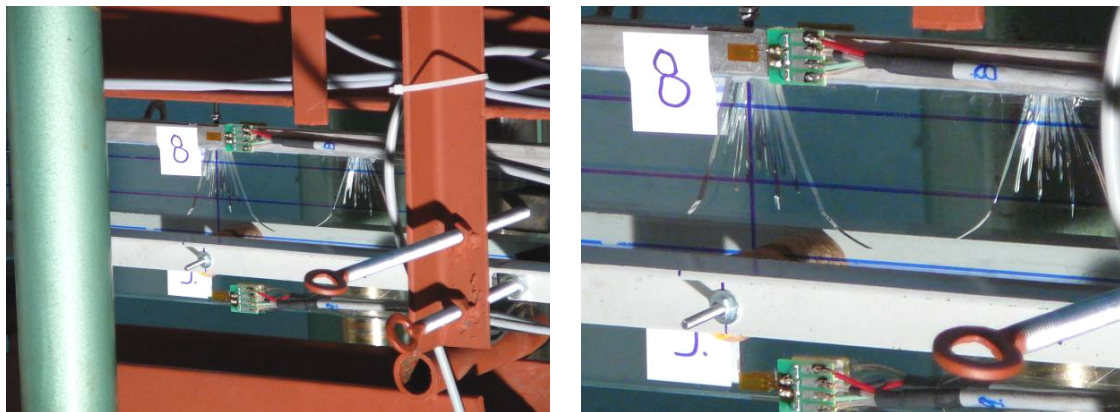
sklenej časti a vznik ďalších (nových) trhlín sa na grafoch závislosti $P - w$ prejavuje viac či menej výrazným pílovitým priebehom v nelineárnej oblasti pôsobenia nosníka.



Obr. 3 – Grafy závislosti $P - w$ vystužených sklenených nosníkov

Pri všetkých skúšobných vzorkách nastalo počiatočné porušenie nosníka vznikom trhliny na jeho ťahanom okraji. Počiatočná trhlina mala mierne rozvetvený tvar a bola orientovaná kolmo na okraj nosníka (obr. 4). Trhlina vznikla v oboch vrstvách skla v približne rovnakom reze takmer súčasne alebo s určitým malým časovým posunom.

V prevažnej väčšine prípadov vznikli počiatočné ťahové trhliny v oblasti maximálneho ohybového momentu a ich rozvoj bol obmedzený. Pri ďalšom zaťažovaní bol nosník schopný prenášať narastajúce zaťaženie a postupne dochádzalo k vzniku nových a vetveniu jestvujúcich trhlín. Dĺžka všetkých trhlín bola obmedzená do približne 3/5 celkovej výšky prierezu nosníka a trhliny boli zväčša orientované kolmo na os nosníka.

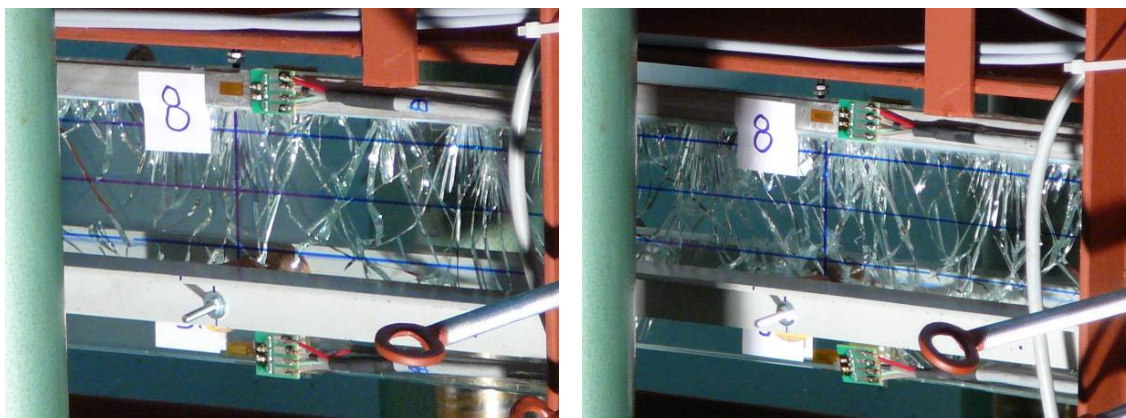


Obr. 4 – Počiatočné trhliny na ťahanom okraji nosníka, celkový pohľad a detail

Pri ďalšom náraste zaťaženia dochádzalo k rozvoju trhlín a trhliny sa postupne rozšírili až k tlačenej strane (obr. 5). Nasledoval finálny kolaps, keď tlačenej oblasti nosníka čiastočne vybočila a „explodovala“. Poškodený nosník nebol schopný prenášať akékoľvek zaťaženie. Okrajové časti nosníka zostali kompaktné.

Porovnaním výsledkov skúšok nevystužených nosníkov a vystužených nosníkov z plaveného skla možno jednoznačne konštatovať, že vystužené nosníky dosahujú niekoľkonásobne (2,5 až 4 – násobne) vyššie hodnoty výslednej odolnosti pri totálnom

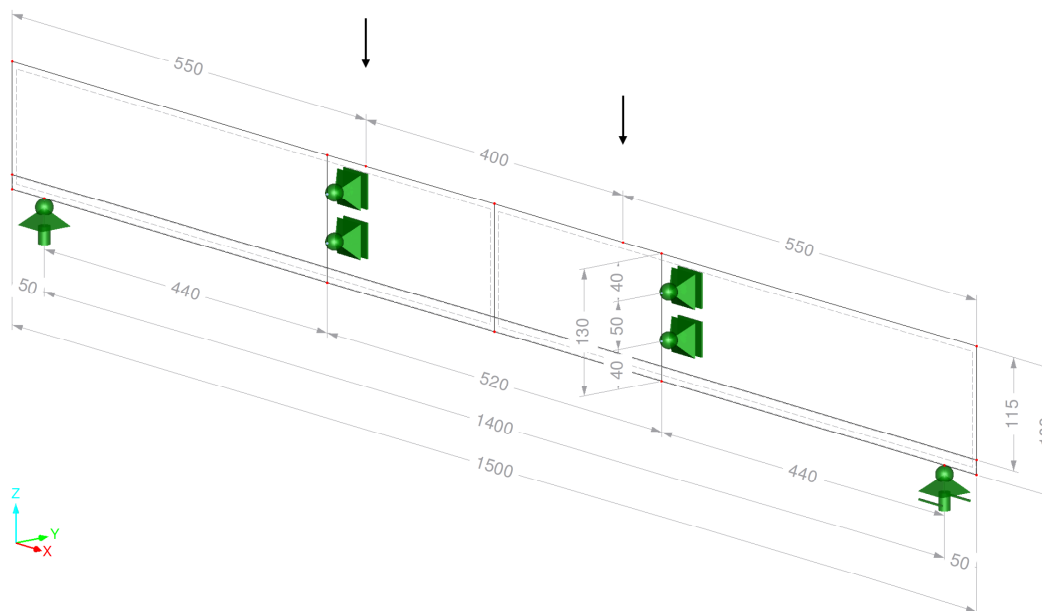
porušení nosníka, pričom pôvodný krehký charakter porušenia sa pri vystužených nosníkoch zmenil na plastický. Plastický charakter porušovania vystužených nosníkov sa prejavuje postupným poklesom ohybovej tuhosti a nárastom deformácií nosníka vplyvom trhlin v sklenej časti a tiež vplyvom plastizácie materiálu výstužnej pásky.



Obr. 5 – Nepravidelný rozvoj trhlin pred totálnym porušením

2 Výpočty MKP

Pri výpočtoch MKP bolo v programe RFEM 4 zostavených viacero výpočtových modelov. Výpočtové úlohy sa venovali možnostiam využitia MKP pri modelovaní vystužených sklenených nosníkov. Pôsobenie nosníkov sa skúmalo jednak z hľadiska rozsahu poškodenia sklenej časti (bez trhliny, jedna trhlina, viacero trhlín) a jednak z hľadiska oblasti pôsobenia materiálu výstuže (lineárna a nelineárna závislosť $\sigma - \epsilon$). Vo všetkých prípadoch bola použitá rovnaká geometria a okrajové podmienky nosníka.



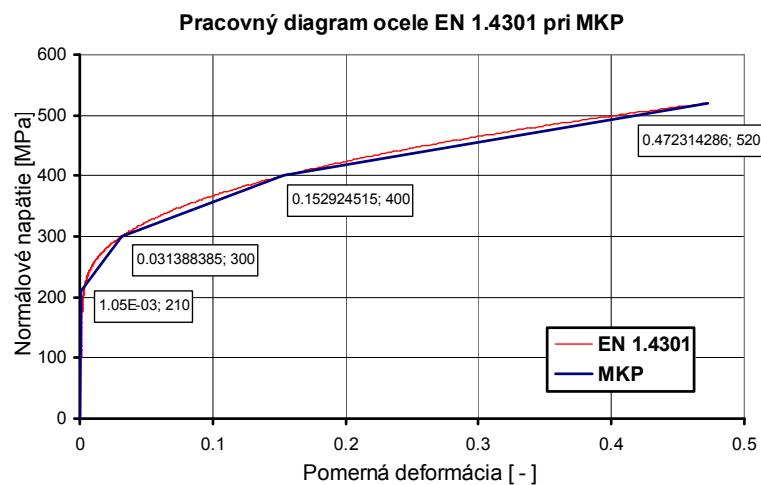
Obr. 6 – 2d model nosníka ANG-R v MKP

Mechanické vlastnosti použitých materiálov sú uvedené v tab. 1.

Vlastnosť	Jednotka	Sklo ANG	PVB fólia	Nerez
Youngov modul pružnosti	MPa	70 000	3,00	200 000
Modul pružnosti v šmyku	MPa	28 000	1,00	76 900
Poissonovo číslo	-	0,23	0,49	0,30

Tab. 1 - Materiálové charakteristiky (lineárny materiálový model)

Nelineárny materiálový model nerezovej ocele EN 1.4301 využíva zjednodušený normový pracovný diagram podľa EN 1993-1-4: 2006 (E). Pôvodná spojitá závislosť $\sigma - \varepsilon$ bola pri výpočte MKP nahradená polygonálnou závislosťou (obr. 7). Prvá lineárna vetva, t.j. namáhanie normálovým napätím po medzu klzu $f_y = 210\text{MPa}$, má sklon zodpovedajúci modulu pružnosti $E_s = 200\text{GPa}$.

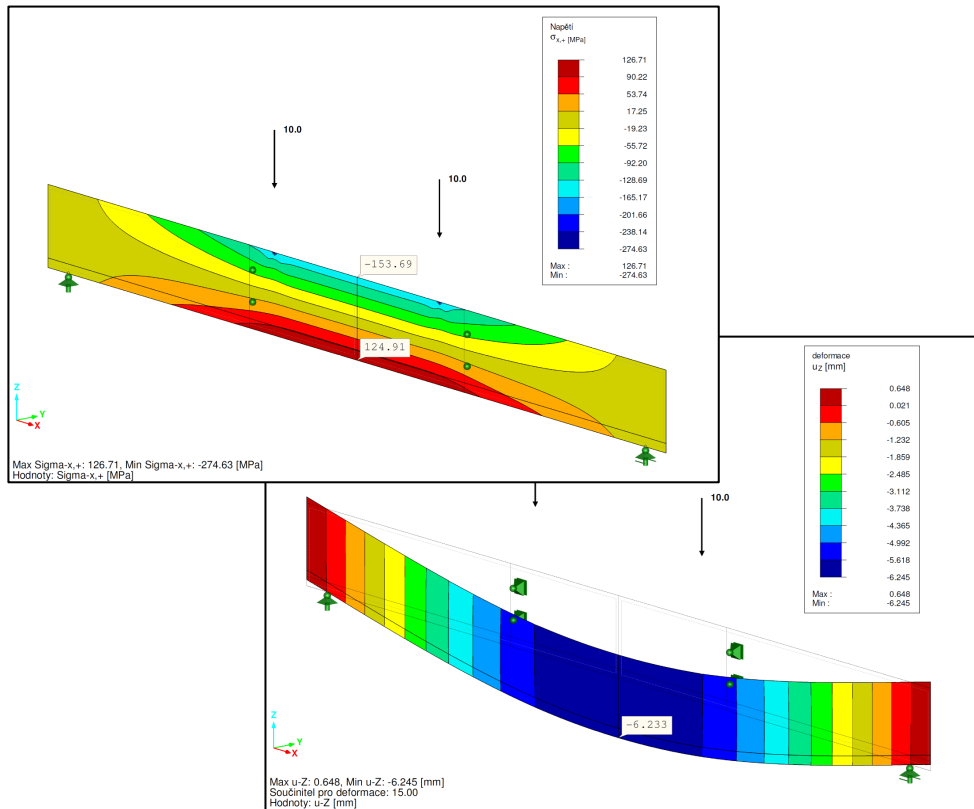


Obr. 7 – Graf závislosti $\sigma - \varepsilon$ nerezovej ocele 1.4301 použitý pri nelineárnom výpočte MKP

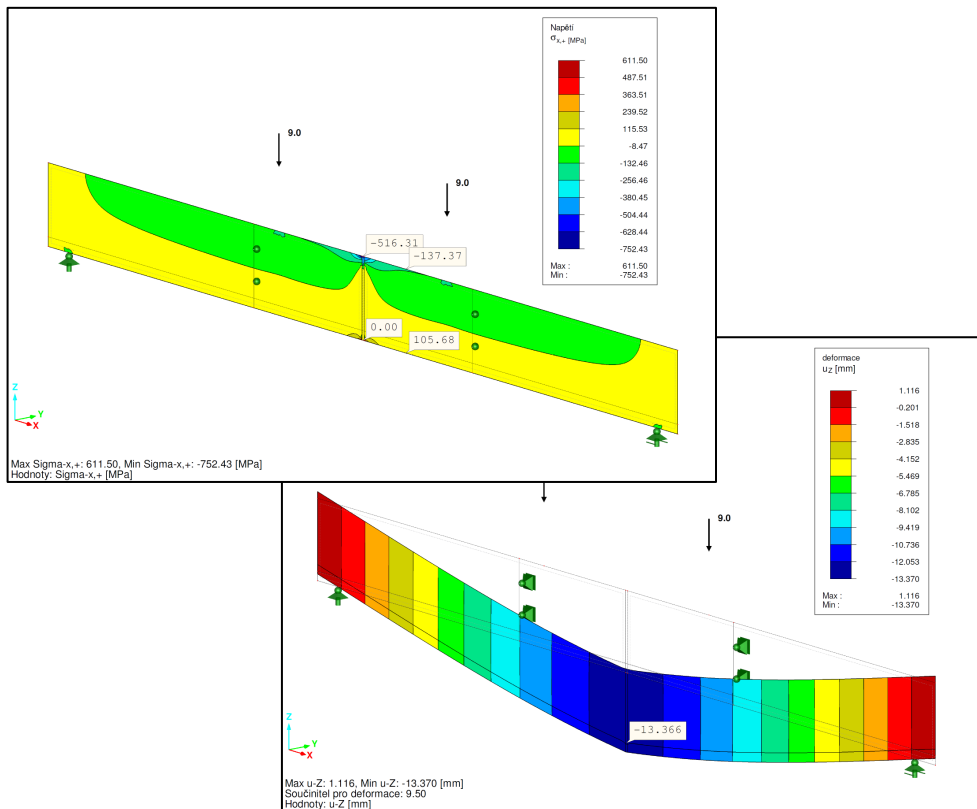
Pri modelovaní nosníka plošnými prvkami bola vrstevnatosť sklenej časti (5mm sklo + 0,76mm PVB fólia + 5mm sklo) zanedbaná, vrstvené sklo sa nahradilo plošným prvkom s hrúbkou 10mm a dvojica výstužných profilov prierezu 15 x 3mm plošným prvkom s celkovou hrúbkou 6mm. Obidva plošné prvky ležali v spoločnej strednicovej rovine.

Pri nosníkoch poškodených ťahovou trhlinou, resp. trhlinami, bola trhlina modelovaná ako vymedzená plošná oblasť so šírkou 5mm a nelineárnym pracovným diagramom materiálu. Pri normálovom napätí viac ako 1MPa došlo k „pretrhnutiu“ a ťahové oblasti boli z prenosu síl ďalej vylúčené. Pri tlakovom namáhaní sa materiál správal lineárne pružne bez obmedzenia. Pri všetkých modeloch bola použitá pravidelná štvorcová sieť s maximálnou veľkosťou elementu 5 x 5mm.

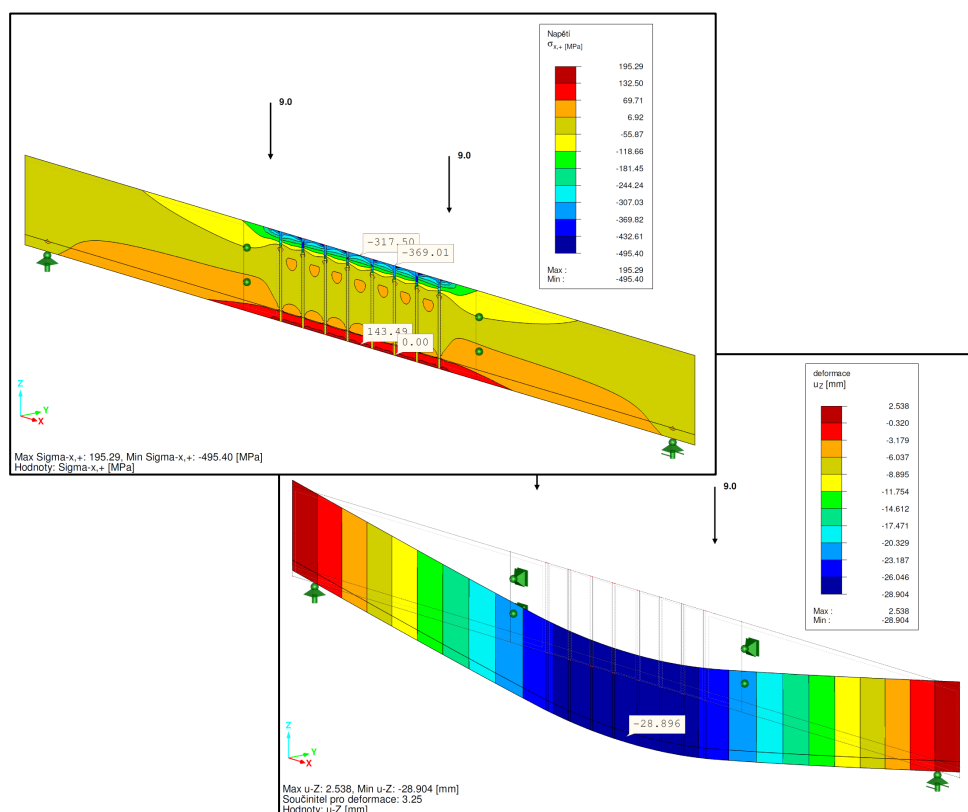
Vyhodnotenie výpočtov sa vzhľadom na merané veličiny zameralo najmä na porovnanie zvislých priehybov U_z , normálových napätí σ_x , resp. σ_x a vzdialeností neutrálnej osi x . Uvedené veličiny boli vyhodnocované v charakteristických rezoch nosníka pre niekoľko úrovní zaťažovacej sily na lise P . Pre ilustráciu výsledkov a použitých modelov MKP sú na nasledujúcich obrázkoch uvedené vybrané grafické výstupy z programu RFEM 4.



Obr. 8 – Normálové napätie σ_{σ_x} v sklenej časti a zvislý priehyb U_z pri zaťažení $P = 20\text{kN}$ (nosník bez trhliny)

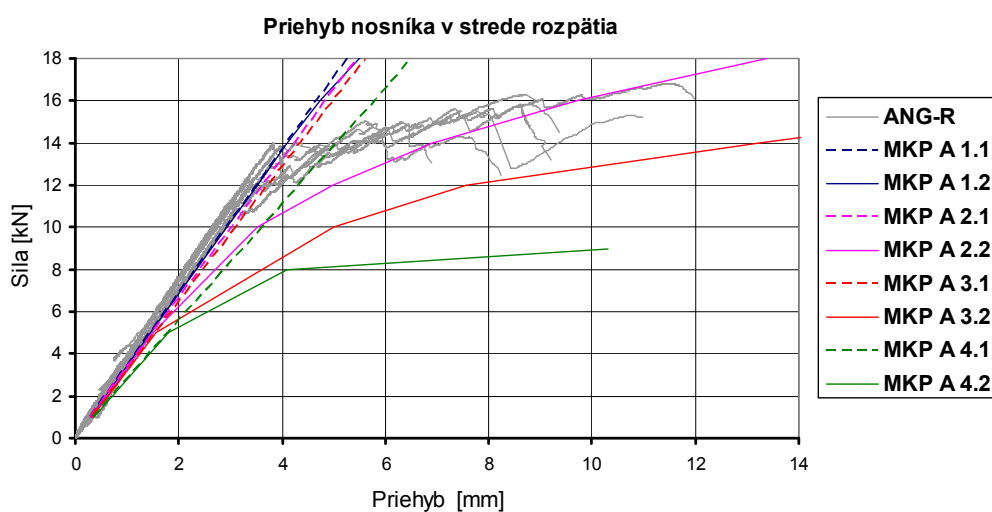


Obr. 9 – Normálové napätie σ_{σ_x} v sklenej časti a zvislý priehyb U_z pri zaťažení $P = 18\text{kN}$ (jedna trhlina)



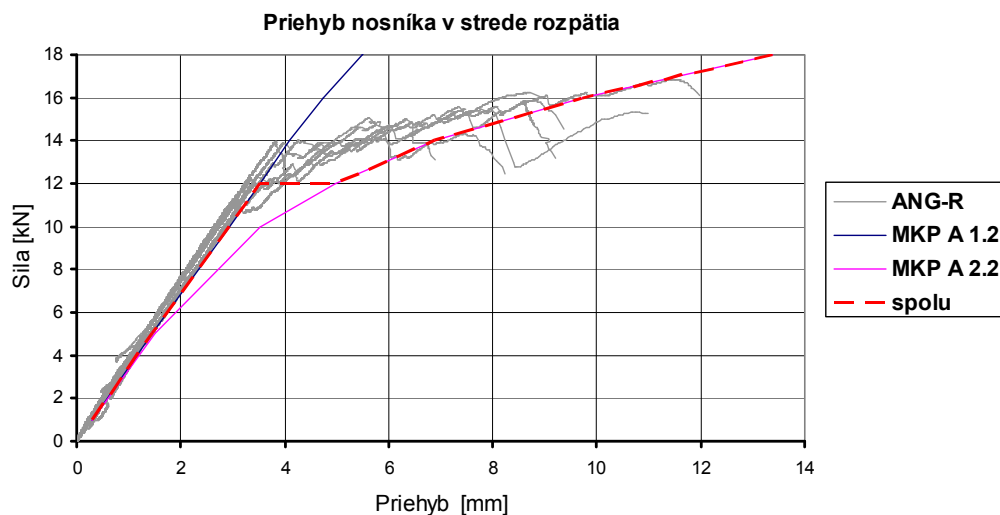
Obr. 10 – Normálové napätie σ_{σ_x} v sklenej časti a zvislý priehyb U_z pri zaťažení $P = 18\text{kN}$ (8 x trhlina)

Na základe výsledkov MKP možno konštatovať, že rozsah poškodenia výrazne neovplyvňuje výslednú ohybovú tuhosť nosníka iba v prípade (čiarkované priebehy vykazujú malý vzájomný rozptyl), že je splnený predpoklad neobmedzeného pružného pôsobenia materiálu výstuže (obr. 11, modely A 1.1 až A 4.1). Pri nelineárnom materiálovom modeli výstuže sa vplyv rozsahu poškodenia sklenej časti trhlinami prejavuje veľmi výrazne. V mieste trhliny dochádza ku plastizácii výstuže. V splastizovanom priereze má vystužený nosník veľmi malú ohybovú tuhosť a narastá zvislý priehyb.



Obr. 11 – Graf závislosti $P - U_z$ vystužených sklenených nosníkov, porovnanie výsledkov MKP

Výpočty MKP preukázali, že výrazný pokles ohybovej tuhosti vystuženého nosníka, aký bol zaznamenaný pri experimentálnom meraní, nie je možné dosiahnuť výlučne poškodením sklenej časti ťahovou trhlinou (v akomkoľvek rozsahu – jedna trhlina, 8 x trhlina až kontinuálne poškodenie nosníka). Po vzniku trhlín muselo v experimente teda dochádzať k čiastočnej plastizácii výstužnej pásky, pretože inak by pretvárný charakter závislosti $P - w$ s takmer horizontálnou vetvou nebol možný (obr. 3 a obr. 12). Pretože pred počiatočným porušením nosníka pôsobí výstuž skoro vždy v pružnej oblasti, je celková zhoda teoretických výsledkov a experimentálnych meraní na nosníku bez trhlín veľmi dobrá.



Obr. 12 – Graf závislosti $P - U_z$ nosníkov ANG-R, porovnanie výsledkov MKP a prepojenie závislostí pri vzniku trhliny

Výslednú teoretickú závislosť $P - U_z$ treba chápať ako kombináciu výsledkov na neporušenom a porušenom nosníku, pričom platnosť oboch závislostí je obmedzená okamihom porušenia nosníka trhlinou. Pri vzniku trhliny dochádza pri konštantnom zaťažení k nárastu prieťahu z dôvodu porušenia sklenej časti a z dôvodu plastizácie výstuže. Ak je po vzniku trhliny výstuž v pružnom stave, je nárast prieťahu minimálny. Ak po vzniku trhliny dôjde k plastizácii výstuže, prieťah začína narastať výrazne. V takomto prípade je prechodová oblasť (nárast prieťahu bez zvýšenia zaťaženia) medzi oboma závislosťami výrazná (obr. 12).

3 Záver

Vykonalé teoretické výpočty umožnili pochopenie problematiky pôsobenia vystužených sklenených nosníkov komplexnejšie a poukázali na súvislosti, ktoré by pri jednoduchej analýze a interpretácii meraných údajov zostali pravdepodobne skryté. Odchýlky medzi výsledkami výpočtu MKP a nameranými údajmi sú v najväčšej miere spôsobené faktom, že mechanické vlastnosti materiálu výstužnej pásky boli uvažované s normovými hodnotami. Po podrobnej analýze grafov závislostí $P - w$ z experimentálnych meraní možno však konštatovať, že skutočná oblasť lineárneho pôsobenia výstuže bola pravdepodobne vyššia ako normová (dohodnutá) medza klzu $f_y = 210\text{MPa}$. Použité výpočtové metódy sú napriek tomu obecné použiteľné pri návrhu vystužených sklenených nosníkov a dosiahnuté výsledky predstavujú hodnoty na strane bezpečnej.

Literatúra

- [1] Slivanský, M.: *Experimental and theoretical verification of the resistance of glass beams. Dissertation work SvF - 3237 - 3702*, Civil Engineering, SUT Bratislava 2010
- [2] Louter, C.: *Adhesively bonded reinforced glass beams*, HERON Vol. 52, No. 1/2, 2007
- [3] Ølgaard, A. B., Nielsen, J. H., Olesen, J. F., Stang, H.: *Properties of an Adhesive for Structural Glass Applications*, Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, 2008