

PROFESORSKÁ PŘEDNÁŠKA

NAVRHOVÁNÍ
SKLENĚNÝCH KONSTRUKCÍ

doc. Ing. MARTINA ELIÁŠOVÁ, CSc.

ČVUT



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague

Faculty of Civil Engineering



Navrhování skleněných konstrukcí

Design of glass structures

doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

2022

Summary

The lecture deals with the design of glass structures. In contemporary architecture, glass has an irreplaceable function due its transparency. This is highlighted in conjunction with slender steel elements. This combination of materials can be used for structural elements carrying self-weight and other permanent or variable loads as snow and wind loads. However, its new function in civil engineering is associated with a lack of knowledge and standards for design. The reliability and safety of these structures is a prerequisite for practical use due to the brittle fracture of glass. Therefore, the supporting structures are designed from laminated glass, where the individual glass plies are connected by an interlayer of polymer foil. The lecture summarizes the research conducted at the Czech Technical University in Prague, dealing with the laminated glass loaded out of the plane. The shear stiffness of the polymer interlayer is influenced by the temperature and load duration, which affect the response of laminated glass, especially stress redistribution and deformation. Furthermore, the issue of transverse and torsional stability of hybrid steel-glass beam with a bonded joint between steel flanges and a glass web, which has not yet been comprehensively investigated, is presented. Based on the performed experiments, the suitability to use buckling curves for the design of these beams, which are commonly used in the design of steel beams was proved. Furthermore, the possibility of using glass for structural elements loaded by compression is discussed. Two structures were considered in this research: columns of hollow cross-section made of laminated glass and pillars made of solid glass bricks. The performed experiments confirmed high load-bearing capacity of these attractive structural elements and sufficient residual load-bearing capacity after failure, which is the necessary prerequisite for reliable and safe design.

Souhrn

Přednáška se zabývá problematikou navrhování nosných konstrukcí ze skla. V současné architektuře má sklo své nezastupitelné místo, především díky transparentnosti, takže se ve spojení zejména s ocelí používá i na konstrukční prvky přenášející nejen zatížení vlastní tíhou, ale i zatížení sněhem, větrem a další proměnné či stálé zatížení. S jeho novou funkcí ve stavebnictví se však pojí nedostatek znalostí a normových podkladů pro návrh. Spolehlivost a bezpečnost těchto konstrukcí je vzhledem ke křehkému lomu skla nezbytným předpokladem pro využití v praxi. Proto jsou nosné konstrukce navrhovány z vrstveného skla, kdy jsou jednotlivé tabule spojeny mezivrstvou z polymerní fólie. V přednášce je shrnut výzkum, který byl proveden na ČVUT v Praze, zabývající se problematikou chování vrstveného skla zatíženého z roviny. Tuhost polymerní mezivrstvy je ovlivněna teplotou a délkou trvání zatížení, což ovlivňuje přerozdělení napětí po tloušťce souvrství stejně jako deformaci. Dále je prezentována problematika příčné a torzní stability hybridních nosníků ze skla a oceli průřezu I s lepeným spojem mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou, která dosud nebyla uceleně zkoumána. Na základě provedených experimentů byla prokázána možnost využít pro návrh těchto nosníků křivky vzpěrné pevnosti, které jsou běžně používány při návrhu ocelových nosníků. Dále je diskutována možnost využití skla na konstrukční prvky namáhané tlakem, ať už se jedná o sloupy uzavřeného průřezu z vrstveného skla nebo pilíře zděné z plných skleněných cihel. Provedené experimenty potvrdily nejen vysokou únosnost těchto atraktivních konstrukčních prvků, ale i dostatečnou zbytkovou únosnost po porušení, která je nezbytným předpokladem pro spolehlivý a bezpečný návrh.

Keywords:

Glass structure, laminated glass, polymer interlayer, shear stiffness, hybrid beam, lateral-torsional buckling, glass column, brick pillar, solid glass brick.

Klíčová slova:

Skleněné konstrukce, vrstvené sklo, polymerní mezivrstva, smyková tuhost, hybridní nosník, příčná a torzní stabilita, skleněný sloup, zděný pilíř, plná skleněná cihla.

Poděkování:

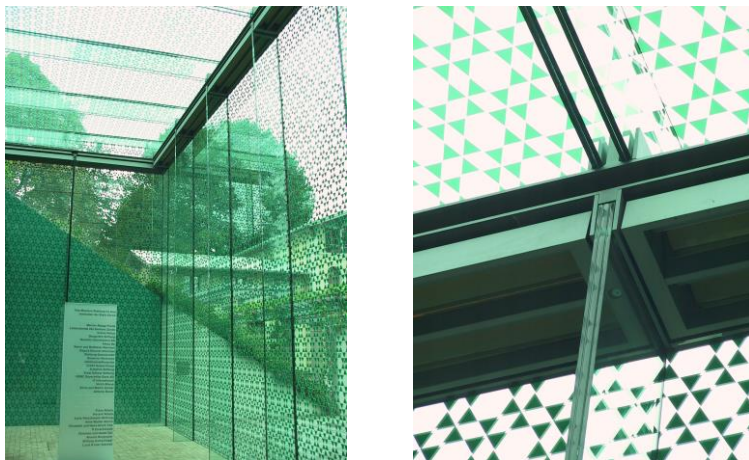
Výsledky uvedené v práci vznikly z velké části za pomoci mnou vedených studentů v doktorském studiu. Velké poděkování patří zejména M. Netušilovi, K. V. Machalické, I. Pravdové, R. Kalamarovi, T. Hánovi a J. Filovi. Výzkum byl finančně podpořen granty GAČR a MŠMT a firmami Vitrablok s.r.o., OGB s.r.o. a SIKA CZ s.r.o. V neposlední řadě patří rovněž poděkování pracovníkům EC FSv ČVUT a KÚ ČVUT za trpělivost a ochotu při provádění experimentů. Děkuji i všem ostatním, kteří mě v práci podporovali a podporují.

Obsah

1. Úvod	6
2. Smyková tuhost polymerních fólií v závislosti na čase a teplotě... 7	
2.1 Statické zkoušky polymerních fólií	9
2.2 Dynamické zkoušky polymerních fólií	12
2.3 Zkoušky čtyřbodovým ohybem	14
2.4 Vyhodnocení experimentů	16
3. Stabilita hybridního nosníku ze skla a oceli při ohybu	18
3.1 Únosnost hybridního nosníku.....	18
3.2 Zkoušky hybridních nosníků se ztrátou příčné a torzní stability	19
3.3 Analytické a numerické modely	21
4. Skleněný sloup uzavřeného průřezu	25
4.1 Skleněný sloup uzavřeného průřezu – 1. etapa	26
4.2 Skleněný sloup uzavřeného průřezu – 2. etapa	30
4.3 Odolnost skleněného sloupu na náraz	35
5. Sloup zděný z plných skleněných cihel	39
5.1 První etapa - zkoušky malých rozměrů	39
5.2 Druhá etapa – zkouška zděného pilíře.....	42
5.3 Návrhový model zděného pilíře	48
6. Závěr	50
7. Literatura	51

1. Úvod

Sklo je jedním z nejstarších materiálů, které člověk vyrábí a používá. Oblast jeho využití se v průběhu staletí měnila spolu s novými technologickými postupy a s rozvojem chemického průmyslu. Dnes se sklo používá i tam, kde to v minulosti nebylo možné. Oborem, který sklo představuje v nové funkci, je stavebnictví. Moderní architektura se vyznačuje důrazem na lehkost a transparentnost konstrukcí a proto se v současnosti funkce skla jako výplňového materiálu otvorů ve stavebnictví změnila na materiál používaný stále častěji i na nosné prvky. Typické je použití skla na velkoplošné fasády, zastřešení atrií, podlahy, zábradlí schodišť a další konstrukce, které přenášejí zatížení nejen od vlastní tíhy, ale také zatížení větrem, sněhem či užžitné zatížení, obr. 1.



Obr. 1: Museum Rietberg Zürich, [K. V. Machalická]

Sklo se na rozdíl od běžně používaných materiálů, které mohou dosáhnout plastické deformace, chová až do porušení křehkým lomem pružně. Nelze tedy počítat s jeho zplastizováním v oblasti lokálních špiček napětí a následnou redistribucí namáhání jako u oceli nebo hliníku. Obecně tak lze sklo zařadit mezi materiály, které nesplňují podmínky pro bezpečný návrh nosných konstrukcí s ohledem na náhlý kolaps bez předchozího varování. Návrh skleněných prvků tedy vyžaduje jiné pojetí spolehlivosti.

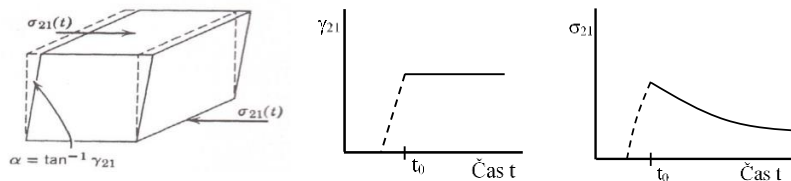
V současnosti je k dispozici norma ČSN EN 16612 „Sklo ve stavebnictví - Stanovení únosnosti příčně zatížených tabulí skla výpočtem“ [1] a ČSN EN 16613 „Sklo ve stavebnictví - Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo - Stanovení viskoelastických vlastností mezivrstvy“ [2], které nabyly účinnosti v roce 2020. Norma ČSN EN 16612 se týká pouze návrhu výplňových tabulí z monolitického nebo vrstveného skla, spadajících do třídy následků menší než CC1, tj. skla s plochou do 2,0 m², která jsou rovnoměrně zatížena a po obvodě prostě uložena. Norma ČSN EN 16613 uvádí zkušební postupy pro stanovení mechanických vlastností použitých mezivrstev, které jsou potřeba pro výpočet únosnosti vrstvených skel na základě zjednodušené metody. Použití těchto evropských norem pro nosné konstrukce s třídou následků CC1 a vyšší je nepřipustné. Pro předběžné návrhy nosných konstrukcí je možné využít řadu různých národních norem, jako je např. ÖNORM B 3716 „Glass in Building – Structural Glass Construction“, DIN 18008 „Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln“ či NEN 2608 „Vlaskglas voor gebouwen - Eisen en bepalingmethode“, které však nemusí být kompatibilní se soustavou evropských norem, mají různou úroveň spolehlivosti a vychází obvykle z národních zvyklostí. V praxi je tak návrh nosných prvků založen na zjednodušených postupech, numerických modelech, zkušenostech projektanta a zpravidla i na experimentálním ověření únosnosti.

Cílem návrhu nosných konstrukčních prvků ze skla je nejen dostatečná únosnost, ale i robustnost a zbytková únosnost, která zajistí, že konstrukce bude pro uživatele bezpečná i v případě porušení některé části či celého konstrukčního prvku. Z těchto důvodů se nosné skleněné konstrukce navrhuji z vrstveného skla, které se skládá ze dvou nebo více skleněných tabulí vzájemně spojených pomocí transparentní mezivrstvy (polymerní fólie).

2. Smyková tuhost polymerních fólií v závislosti na čase a teplotě

Vliv tuhosti polymerních fólií na únosnost a deformaci vrstveného skla při příčném zatížení je významný, ale hodnoty smykových modulů G těchto fólií za různých teplot a rychlostí zatěžování nejsou běžně k dispozici. Navíc jsou na trhu k dostání fólie od různých výrobců a s různým označením a tudíž i s různými vlastnostmi.

Polymerní folie lze zařadit mezi tzv. viskoelastické materiály, pro které je smykové napětí vyvolané smykovou deformací přímo úměrné modulu pružnosti, který ovšem závisí na čase. Tudíž lze dle [3] napsat $\sigma_{21}(t) = \gamma_{21} G(t)$ s grafickým znázorněním závislosti na obr. 2.



Obr. 2: Relaxační zkouška, [3]

Jestliže lze smykovou deformaci popsat spojitou funkcí $\gamma(t)$, pak dle [3] je možné využít Boltzmannův princip superpozice a napětí v čase popsat rovnicí:

$$\sigma_{21}(t) = \int_{-\infty}^t G(t-t') \dot{\gamma}_{21}(t') dt', \quad (1)$$

kde $G(t)$ je relaxační funkce.

Rovnice (1) umožňuje stanovit odezvu smykového napětí v čase, jestliže se smyková deformace mění harmonicky podle vztahu $\gamma = \gamma^0 \sin \omega t$. Odpovídající odezva smykového napětí v čase má dle [3] tvar:

$$\sigma = \gamma^0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t), \quad (2)$$

kde $G'(\omega)$ je energetický relaxační modul. Jedná se o napětí, které je ve stejné fázi s harmonicky se měnící smykovou deformací $\gamma(t)$ a určuje množství uchované energie během jednoho cyklu. $G''(\omega)$ je ztrátový relaxační modul. To je napětí, které je v protifázi s harmonicky se měnící smykovou deformací $\gamma(t)$ a určuje množství ztracené energie během jednoho cyklu. Ačkoliv lze $G'(\omega)$ a $G''(\omega)$ zjednodušeně analyticky stanovit, jsou jejich hodnoty ovlivněny okolní teplotou a chemickým složením polymerů.

Znalost experimentálně stanovených funkcí $G'(\omega)$ a $G''(\omega)$ pro vybrané polymery umožňuje přesné vyjádření jejich relaxační funkce [3] jako

$$G(t) = G_e + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left(\frac{G''}{\omega} \right) \cos \omega t d\omega, \quad (3)$$

kde G_e je zbytková tuhost pro $t \rightarrow \infty$, která je ovšem pro tyto polymery nulová. Pakliže pro uvažovaný polymer nejsou k dispozici údaje z experimentů, umožňuje dle [3] určit časovou závislost funkcí $G(t)$ a frekvenční závislost funkcí $G'(\omega), G''(\omega)$, pomocí modelu, který může hledané funkce vhodně aproximovat. Jedná se o Maxwellův model, viz obr. 3. Pomocí Maxwellova modelu lze popsat relaxační funkci polymeru.



Obr. 3: Maxwellův model, [4]

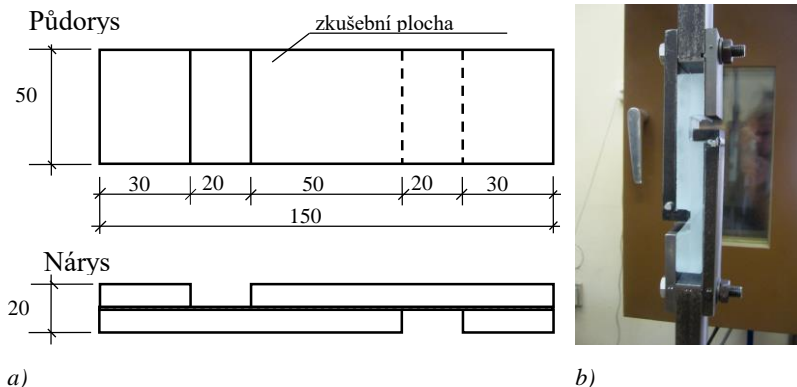
2.1 Statické zkoušky polymerních fólií

Cílem statických zatěžovacích zkoušek bylo zjištění časové závislosti modulu tuhosti fólie ve smyku na okolní teplotě. Zkoušky byly provedeny ve spolupráci s KÚ ČVUT pro 6 vybraných druhů polymerních fólií, které se v praxi běžně používají: Trosifol® BG R20 (značen dále jako Trosifol BG), Trosifol® Extra Strong (Trosifol ES), Evalam® 80/120 (EVA L), Evasafe® (EVA S), SentryGlas® 5000 (SG 5000), Krystalflex® PE399 (TPU KF) [5].

Zkoušky byly prováděny na zkušebních tělískách složených ze dvou destiček plaveného skla o jmenovité tloušťce 10 mm s rozměrem 50 x 150 mm. Destičky byly vzájemně spojeny transparentní fólií pokládanou vždy ve 2 vrstvách o celkové tloušťce 0,76 mm, resp. 1,52 mm. Po zkompletování a spojení jednotlivých vrstev byly do vzorku vyfrézovány drážky o šířce 20 mm pro uchycení upínacích kleští zkušebního přístroje. Zkušební plocha pro stanovení smykového modulu G mezivrstvy byla 50 x 50 mm, viz obr. 4a). Zkoušky byly provedeny na mechanickém zkoušecím stroji TIRATEST 100 kN vybaveném digitální měřicí jednotkou EDC 580.

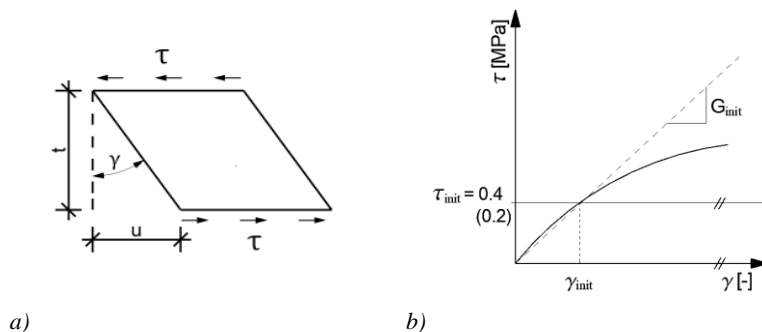
Zkušební tělesa byla zatěžována plynule do porušení, rychlost zatěžování byla řízena deformací. Vliv délky trvání zatížení byl simulován třemi různými rychlostmi – 2 mm/min, 0,5 mm/min a 0,125 mm/min. Zároveň byly experimenty prováděny při teplotě 0, 20, 40 a 60 °C tak, aby mohla být určena změna smykového modulu G polymerové fólie v rozsahu teplot, ve kterém jsou vrstvená skla používána. Pro teploty nad a pod 20°C

byla využita klimatická komora, do které bylo zkušební těleso umístěno i s upínacím zařízením.



Obr. 4: a) Tvar zkušebního tělesa, b) uspořádání zkoušky

Síla přenášená mezi skleněnými destičkami způsobila smykovou deformaci γ použité folie. Hodnotu této deformace lze vypočítat z posunu destiček u a tloušťky folie t , jak ukazuje obr. 5, podle rovnice (4). Účinky přidavného ohybového momentu plynoucí z excentricity působících sil e byly při výpočtu hodnot smykové deformace zanedbány.



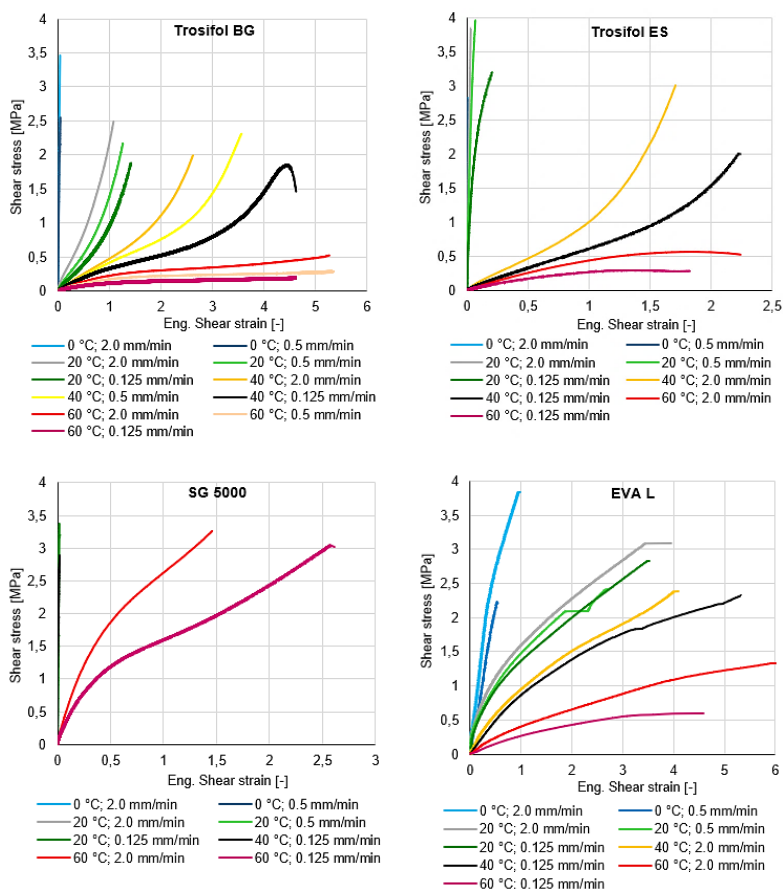
Obr. 5: a) Smyková deformace folie, b) závislost smykového napětí na smykové deformaci a počáteční smykový modul G_{init}

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{u}{t} \quad (4)$$

Počáteční smykový modul byl vzhledem k získaným nelineárním závislostem smykového napětí na smykové deformaci určen jako

průsečík kružnice o poloměru 0,4 MPa s odpovídající křivkou napětí – přetvoření [6]. Poloměr kružnice 0,4 MPa byl stejný pro všechny měřené folie s výjimkou těles s foliemi PVB a PVB ES zatěžovaných při 60 °C. V těchto případech byl poloměr uvažován hodnotou 0,2 MPa kvůli nízkým hodnotám dosaženého napětí.

Grafy na obr. 6 ukazují experimentálně stanovené závislosti smykového napětí τ na smykovém přetvoření γ pro reprezentativní vzorky s folií PVB (Trosifol BG R20), SentryGlas® (SG 5000) a Evalam® 80/120 (EVA L).



Obr. 6: Závislosti smykového napětí na smykovém přetvoření 4 folií získané ze statických zatěžovacích zkoušek

2.2 Dynamické zkoušky polymerních fólií

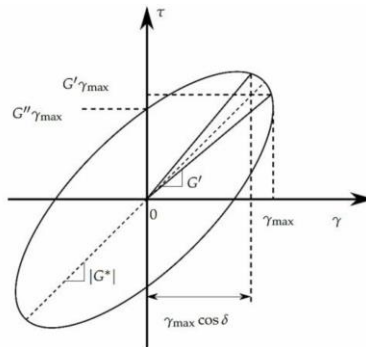
Na statické zkoušky navázaly dynamické zkoušky stejných fólií na zkušebních tělesech identických rozměrů, viz obr. 4. Experimenty probíhaly standardně pro všechny folie v teplotním rozmezí 25-50 °C, pro folii SentryGlas® byly zkoušky prováděny až do teploty 70 °C. Pro folie PVB, EVA a TPU byly zkoušky provedeny i za nízkých teplot, a to v rozmezí 20 až -5 °C. Teplota byla v klimatické komoře měřena teplotním čidlem Pt1000 a také přímo na vzorku dvěma čidly Pt100. Rozmezí testovacích frekvencí se pohybovalo v rozsahu 0,05 – 4,95 Hz. Výsledkem dynamických zkoušek jsou hodnoty komplexního modulu tuhosti folie ve smyku G^* a jeho reálná část G' i imaginární část G'' . Smyková deformace folie γ byla řízena podle následující rovnice

$$\gamma(t) = \gamma_{max} \cdot \sin \omega t, \quad (5)$$

kde γ_{max} je smyková deformace folie vyvolaná posuvem čelistí stroje MTS 500 o 0,2 mm. Smykové napětí lze vyjádřit jako

$$\tau(t) = G^*(\omega) \cdot \gamma(t) = \tau_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta). \quad (6)$$

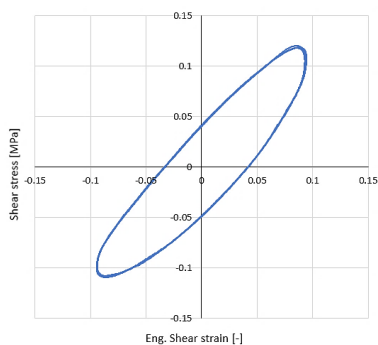
Tyto hodnoty lze zobrazit v grafické závislosti, kde výsledkem je hysterezní křivka, viz obr. 7. Z tohoto obrázku je patrné, že sklon osy symetrie hysterezní křivky určuje hodnotu dynamického smykového modulu G^* .



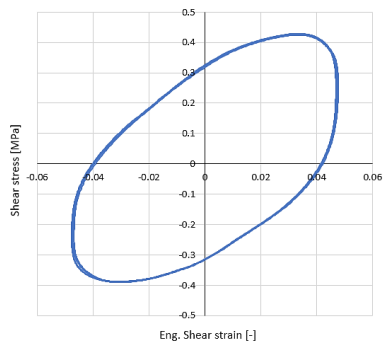
Obr. 7: Hysterezní křivka závislosti napětí na deformaci při dynamické zatěžovací zkoušce [7]

Pro γ_{max} je nutné, aby $\omega t = \pi/2$ poté $\tau = G' \gamma_{max}$, takže sklon přímky procházející počátkem souřadného systému a bodem, ve kterém je dosaženo maximální smykové deformace, udává hodnotu energetického modulu G' (storage modulus). Pro počátek zatěžovacího cyklu, tj. pro $t = 0$ je $\gamma = 0$, takže $\tau(0) = \gamma_{max} G''$, [7].

Vybrané hysterezní křivky 2 zkoušených fólií jsou ukázány v obr. 8. Závislost komplexního smykového modulu tuhosti fólie G^* na frekvenci f pro reprezentativní zkušební těleso je na obr. 9.

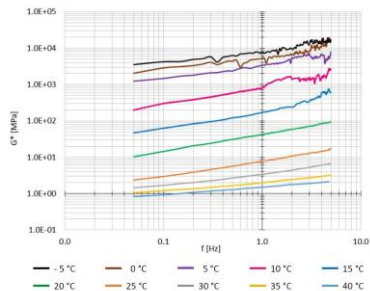


a) Trosifol BG

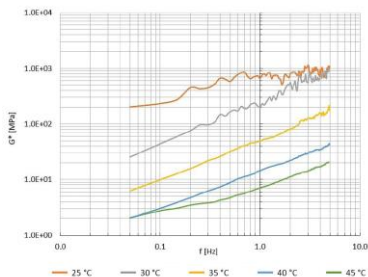


b) Trosifol ES

Obr. 8: Hysterezní křivky fólie Trosifol BG a Trosifol ES z dynamických zkoušek při teplotě 40°C a frekvenci zatížení 1 Hz



a) Trosifol BG

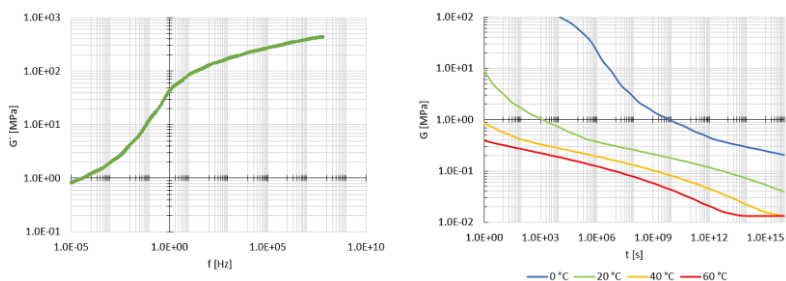


b) Trosifol ES

Obr. 9: Závislost komplexního smykového modulu tuhosti fólie G^* na frekvenci f

Jak lze očekávat, dynamický modul tuhosti fólie ve smyku G^* reaguje na teplotu a frekvenci zatěžovacího cyklu. Z výsledků je rovněž zřejmé, že při překročení teploty skelného přechodu T_g dojde k výrazné změně tohoto modulu. Důležitým poznatkem jsou rozdílné hodnoty G^* pro dvě folie se stejnou chemickouází. V praxi tedy nelze využít materiálových charakteristik fólií se stejným chemickým složením od různých výrobců, protože se jejich chování při zatížení může výrazně lišit.

Data z dynamických zkoušek byla dále vyhodnocena a pomocí analytických modelů byly sestaveny master křivky a relaxační funkce zkoumaných fólií, viz obr. 10.



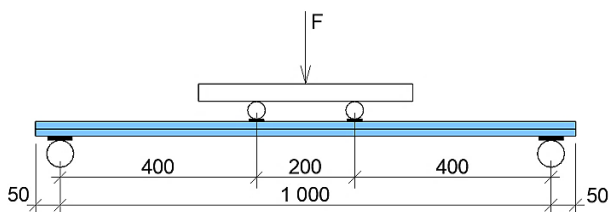
a) Smykový modul $G'(f, T = +20\text{ }^\circ\text{C})$

b) Relaxační funkce $G(t, T)$

Obr. 10: Výsledky analytického modelu pro fólii Trosifol BG

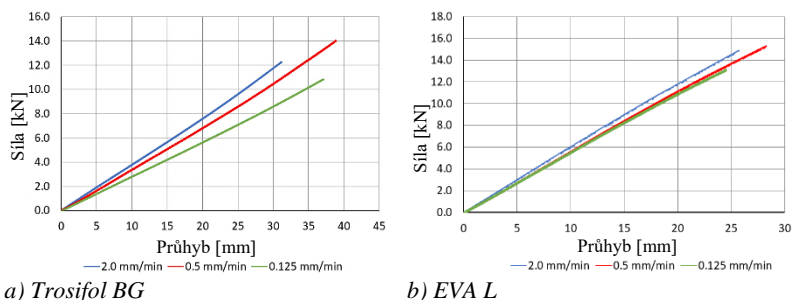
2.3 Zkoušky čtyřbodovým ohybem

K ověření získaných smykových modulů fólií z dynamických a statických zkoušek byly provedeny zkoušky panelů z vrstveného skla čtyřbodovým ohybem za pokojové teploty, viz obr. 11. Zkušební tělesa o rozměrech 360 x 1100 mm byla složena z vrstveného tepelně tvrzeného skla se skladbou 10 mm sklo + 0,76 mm fólie + 10 mm sklo.



Obr. 11: Uspořádání zkoušky – čtyřbodový ohyb

Celkem bylo zkoušeno 19 těles, u kterých se měnil typ fólie (Trosifol BG, EVA L, SG 5000) a rychlost zatěžování: 2,0 mm/min; 0,5 mm/min nebo 0,125 mm/min. Závislost síly na svislém průhybu je pro dvě vybrané fólie ukázán na obr. 12.

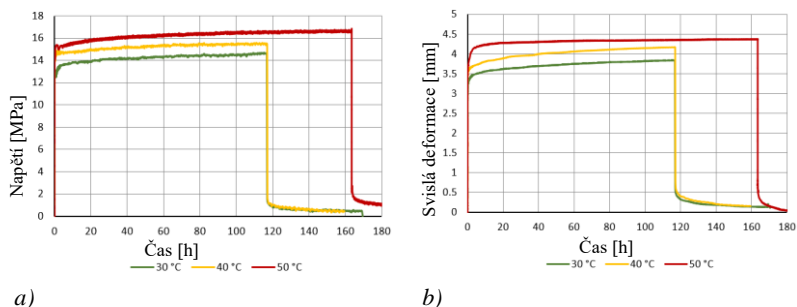


a) Trosifol BG

b) EVA L

Obr. 12: Závislost síly na svislé deformaci pro různé rychlosti zatížení

Následně byly provedeny dlouhodobé zkoušky pro stejné rozměry a uspořádání. Zkušební těleso bylo umístěno do klimatické komory a zatíženo stálým zatížením $F = 1,12$ kN, viz obr. 11. Celkem byly provedeny 3 zkoušky pro zkušební tělesa z vrstveného tepelně zpevněného skla pro 3 typy fólie (Trosifol BG, EVA L, SG 5000). Zkoušky probíhaly při teplotách v rozmezí $+30 - +60^{\circ}\text{C}$ po dobu 117 až 310 h. V průběhu zkoušek byla zaznamenávána svislá deformace a napětí pomocí tenzometrů, viz obr. 13.



a)

b)

Obr. 13: a) Fólie Trosifol BG: závislost napětí na čase, b) závislost svislé deformace na čase

2.4 Vyhodnocení experimentů

Porovnání statických a dynamických zkoušek pro vybrané fólie je uvedeno v tab. 1. Je zřejmé, že počáteční smykový modul $G_{init}(T)$ stanovený ze statických zkoušek odpovídá smykovému modulu $G(t = 10 \text{ s}, T)$ z dynamických zkoušek ve sledovaném teplotním rozsahu. Vyhodnocení dynamických zkoušek je časově náročné, a pokud nejsou k dispozici materiálové vlastnosti od výrobců, lze pomocí jednoduchých statických zkoušek stanovit smykový modul fólie pro požadovaný teplotní rozsah, který umožní bezpečný návrh běžných konstrukcí.

Tab. 1: Porovnání výsledků statických a dynamických zkoušek

Trosifol® BG R20 ($T_g = +26 \text{ °C}$)				
	Dynamické zkoušky	Statické zkoušky		
Tepłota [°C]	G (t = 10 s) [MPa]	G_{init} (2,0 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,5 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,125 mm/min) [MPa]
0	240,2	144,13	103,32	-
+20	3,27	1,71	1,09	0,80
+40	0,56	0,46	0,45	0,31
+60	0,32	0,27	0,15	0,12
Trosifol® Extra Strong ($T_g = +41 \text{ °C}$)				
	Dynamické zkoušky	Statické zkoušky		
Tepłota [°C]	G (t = 10 s) [MPa]	G_{init} (2,0 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,5 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,125 mm/min) [MPa]
0	2281,69	1887,94	1887,94	-
+20	224,77	225,47	105,23	61,31
+40	1,37	0,90	-	0,61
+60	1,10	0,47	-	0,37
Evalam® 80/120 ($T_g < 0 \text{ °C}$)				
	Dynamické zkoušky	Statické zkoušky		
Tepłota [°C]	G (t = 10 s) [MPa]	G_{init} (2,0 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,5 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,125 mm/min) [MPa]
0	6,61	7,46	6,52	-
+20	3,26	4,13	2,93	2,37
+40	1,57	0,98	-	0,84
+60	0,75	0,44	-	0,21
Evasafe® ($T_g = -28 \text{ °C}$)				
	Dynamické zkoušky	Statické zkoušky		
Tepłota [°C]	G (t = 10 s) [MPa]	G_{init} (2,0 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,5 mm/min) [MPa]	G_{init} (0,125 mm/min) [MPa]
0	10,79	13,26	13,28	-
+20	6,73	6,86	6,39	6,22
+40	2,94	3,43	-	3,09
+60	1,87	1,64	-	1,44

Shoda mezi krátkodobými moduly smykové relaxace danými vyhodnocením dynamických zkoušek a počátečními smykovými moduly ze statických zkoušek je patrná pro krátkodobé zatížení, tj. pro 10 s modul smykové relaxace $G(t = 10 \text{ s})$ pro teploty kolem nebo nad teplotou skelného přechodu T_g ($T \geq T_g$). Pro teploty nižší než T_g ($T < T_g$) poskytují statické zkoušky nižší, ale bezpečnou hodnotu tohoto smykového modulu.

V tab. 2 je uvedeno porovnání normálového napětí na tažené straně uprostřed rozpětí a svislá deformace ve stejném místě mezi analytickým modelem založeným na metodě EET (Enhanced Effective Thickness) [8], numerickým modelem a výsledky z provedených zkoušek čtyřbodovým ohybem, viz obr. 12. Vstupním parametrem pro numerický model byl počáteční smykový modul G_{mit} získaný ze statických zkoušek.

Tab. 2: Porovnání numerických a analytických výpočtů s experimenty

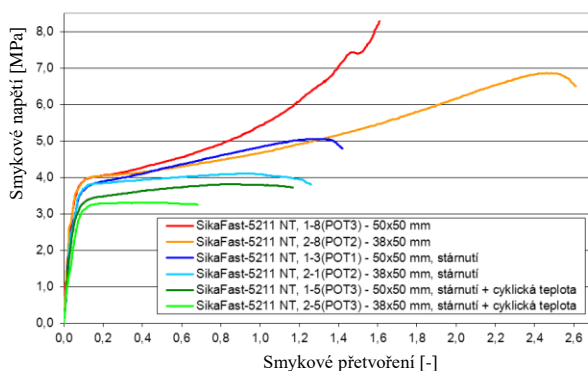
Měřená veličina	Analytický výpočet pomocí metody EET	Numerický výpočet RFEM 5	Výsledek experimentů
Trosifol BG			
Síla při porušení 13,1 kN			
Normálové napětí ve skle uprostřed rozpětí – tažená strana [MPa]	+152,2	+158,5	+167,3
Svislá deformace uprostřed rozpětí [mm]	34,3	34,4	37,0
EVA L			
Síla při porušení 15,4 kN			
Normálové napětí ve skle uprostřed rozpětí – tažená strana [MPa]	+144,1	+150,5	+143,1
Svislá deformace uprostřed rozpětí [mm]	27,0	27,2	26,6
SG 5000			
Force at breakage 21,0 kN			
Normálové napětí ve skle uprostřed rozpětí – tažená strana [MPa]	+161,6	+166,7	+162,2
Svislá deformace uprostřed rozpětí [mm]	22,0	22,3	23,9

Z tab. 2 je zřejmé, že hodnoty normálového napětí a svislé deformace tabule vrstveného skla získané na základě analytického a numerického

modelu dávají výsledky shodné s provedeným experimentem pro zkoušené typy fólií.

3. Stabilita hybridního nosníku ze skla a oceli při ohybu

V návaznosti na výzkum hybridních nosníků ze skla a oceli [9] byl na FSv ČVUT proveden výzkum zaměřený na ztrátu stability hybridních nosníků za ohybu. Na rozdíl od předchozích experimentů zaměřených na únosnost hybridních nosníků v ohybu bylo pro lepený spoj mezi sklem a ocelí vybráno dvousložkové akrylátové lepidlo SikaFast-5211 NT s vhodnějšími materiálovými vlastnostmi, které byly ověřeny tahovými zkouškami lepidla a smykovými zkouškami lepeného spoje včetně vlivu stárnutí lepidla, obr. 14.



Obr. 14: Závislost smykového napětí na přetvoření lepidla

Ze závislosti na obr. 14 je patrné, že při smykových zkouškách spoje vykazuje akrylátové lepidlo SikaFast-5211 NT poměrně velkou tuhost v počáteční fázi zatěžování, která se do 50 – 80 % jeho únosnosti nemění. Rovněž nedochází k výrazné změně chování lepeného spoje po vystavení stárnutí. Rozdíl však byl pozorován ve způsobu porušení těchto vzorků. Zatímco u vzorků, které stárnutí vystaveny nebyly, došlo ke koheznímu porušení lepené vrstvy nebo došlo ke kolapsu skla, u vzorky vystavených stárnutí došlo téměř vždy k adheznímu porušení.

3.1 Únosnost hybridního nosníku

Únosnost hybridních nosníků s akrylátovým lepidlem SikaFast-5211 NT byla ověřena pomocí experimentu na dvou zkušebních tělesech, viz

obr. 15. Hybridní nosník délky 4,25 m byl vyroben z ocelových pásnic třídy S235 o rozměrech 60 x 8 mm, které byly připevněny ke skleněnému pásu z jednovrstvého tepelně tvrzeného skla o tloušťce 19 mm a výšce 290 mm. Nosník byl prostě podepřen na rozpětí 4 m, namáhán dvojicí osamělých sil ve vzdálenosti 2,4 m až do porušení rychlostí 50 N/s. Ztrátě stability bylo bráněno příčným držením v místech vnášení zatížení. Souhrn výsledků je uveden v tab. 3.



Obr. 15: Uspořádání zkoušky

Tab. 3: Souhrn výsledků zkoušek únosnosti hybridních nosníků

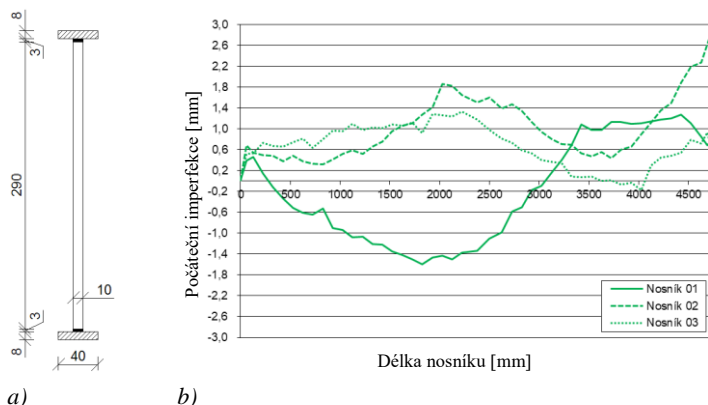
Číslo vzorku	Síla F_{\max} [kN]	Moment M_{\max} [kNm]	Napětí ve skle $\sigma_{t,\max}$ [MPa]	Max. průhyb [mm]	Způsob porušení
01	81,27	32,5	41,61	11,0	adheze
02	137,20	54,9	79,45	22,0	porušení skla

3.2 Zkoušky hybridních nosníků se ztrátou příčné a torzní stability

Hybridní nosníky o délce 4750 mm byly tvořeny pásnicemi o rozměrech 40 × 8 mm z oceli pevnostní třídy S235, ke kterým byla lepeným spojem o tloušťce 3 mm připojena skleněná stojina. Lepený spoj byl tvořen dvousložkovým akrylátovým lepidlem SikaFast-5215 NT. Na skleněnou stojinu bylo použito jednovrstvé tepelně tvrzené sklo tloušťky 10 mm a výšky 290 mm, obr. 16. Celkem byla vyrobena 3 zkušební tělesa [10].

Před provedením experimentů byly zaměřeny geometrické (globální i lokální) imperfekce nosníků pomocí laserového skenování. Pro měření byl použit panoramatický skener Surphaser 25HSX, kterým je možné zaměřit objekty ve vzdálenosti od 0,2 do 70 metrů s přesností menší než 1 mm. Počáteční imperfekce vodorovného řezu uprostřed výšky skleněné

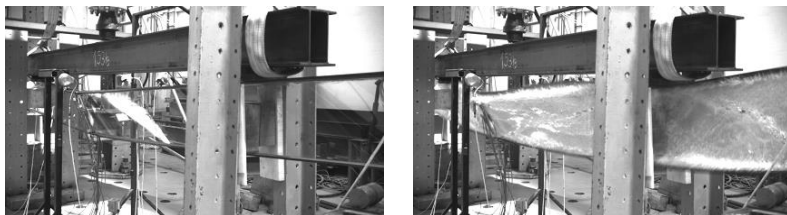
stojiny jsou znázorněny na obr. 16. Maximální imperfekce skleněné stojiny je menší než $3 \text{ mm} = L/1500$, kde L je délka nosníku.



Obr. 16: a) Hybridní nosník ze skla a oceli, b) počáteční imperfekce

Nosníky byly prostě podepřeny na rozpětí 4,5 m a zatěžovány dvojicí osamělých sil ve vzdálenosti 2,9 m až do porušení. Příčnému posunu a natáčení okolo podélné osy nosníku bylo bráněno v místech vnášení zatížení. V průběhu zkoušek byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí nosníku, příčný posun pánic a stojiny uprostřed rozpětí a u krajních podpor a natočení pánic vůči stojině uprostřed rozpětí nosníku a u krajních podpor. Na nosníku bylo dále osazeno 16 tenzometrů k nepřímému měření napětí.

Zkušební tělesa byla zatěžována až do kolapsu, ke kterému došlo porušením skleněné stojiny při dosažení pevnosti v tahu za ohybu v horní části skleněné stojiny uprostřed rozpětí v důsledku narůstající příčné deformace. Při všech zkouškách došlo ke ztrátě příčné a torzní stability nosníků, viz obr. 17.



Obr. 17: Nárůst příčné deformace v průběhu experimentu

Výsledky jsou shrnuty v tab. 4. Z porovnání je patrné, že při experimentech zaměřených na ztrátu příčné a torzní stability bylo u všech vzorků dosaženo maximálního tahového napětí $\sigma_{t,max}$ ve skle kolem 44 MPa. V porovnání s nosníkem 02 zajištěným proti ztrátě příčné a torzní stability, viz tab. 3, u kterého bylo dosaženo napětí ve skle 79 MPa, byla velikost normálového napětí ve skle o 44 % nižší.

Tab. 4: Souhrn výsledků zkoušek hybridních nosníků zaměřených na ztrátu stability

Číslo vzorku	síla F_{max} [kN]	moment M_{max} [kNm]	Příčný posun ¹ [mm]	Příčný posun ² [mm]	Max. průhyb [mm]	Napětí ve skle $\sigma_{t,max}$ [MPa]
03	50,35	20,14	11,3	89,5	16,4	42,75
04	48,79	19,52	10,0	50,7	14,3	41,53
05	50,35	20,14	11,3	89,5	16,4	42,75

¹ Příčný posun skla uprostřed rozpětí nosníku při dosažení max. síly F_{max} .

² Příčný posun skla uprostřed rozpětí nosníku při porušení.

3.3 Analytické a numerické modely

Pro návrh hybridních nosníků ze skla a oceli lze použít Möhlerovu metodu za předpokladu, že se lepený spoj mezi stojinou a pásnicemi chová lineárně. Pomocí této metody je možné určit rozdělení napětí po průřezu složeném z různých materiálů. Většina polymerních lepidel však má nelineární závislost smykového napětí na přetvoření, proto je třeba Möhlerovu metodu upravit [9]. Pro výpočet únosnosti hybridních nosníků je nutné vytvořit závislost smykového modulu lepidla na tahovém napětí ve skleněné stojině. Na základě této závislosti bylo ověřeno, že smykový modul akrylátového lepidla SikaFast-5215 NT je do hodnoty normálového napětí ve skle přibližně 47 MPa stejný. Lepený spoj je do této úrovně dostatečně tuhý, takže není třeba brát v úvahu nelineární chování lepidla pro stanovení únosnosti a kritického momentu hybridního nosníku.

Pružný kritický moment při ztrátě příčné a torzní stability prostého nosníku zatíženého koncovými momenty je možné spočítat podle následující rovnice, [11],

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} \right)}. \quad (7)$$

Výpočet kritického momentu byl proveden pro samotnou skleněnou stojinu hybridního nosníku. Sklo mělo následující parametry: výška $h = 290$ mm, délka $L = 2900$ mm a tloušťka $t = 10$ mm. Kritický moment pro samotnou skleněnou stojinu vychází $M_{cr} = 2,34$ kNm.

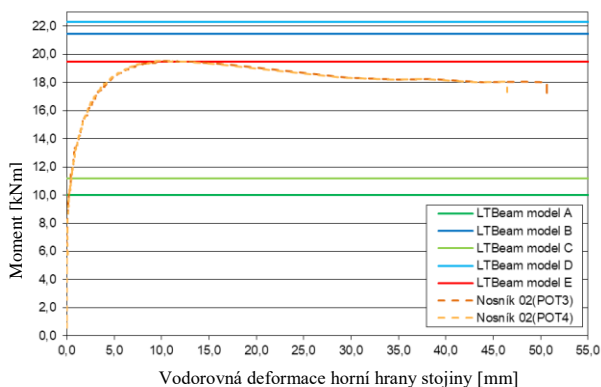
Kritický moment hybridního nosníku ze skla a oceli lze za předpokladu tuhého spoje mezi pásnicemi a stojinou spočítat podle následujícího vztahu

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2(EI_z)_{eff}}{L^2} \left((GI_t)_{eff} + \frac{\pi^2(EI_w)_{eff}}{L^2} \right)}, \quad (8)$$

kde $(EI_z)_{eff} = E_{glass} I_{z,glass} + E_{steel} I_{z,steel}$; $(GI_t)_{eff} = G_{glass} I_{t,glass} + G_{steel} I_{t,steel}$; $(EI_w)_{eff} = E_{glass} I_{w,glass} + E_{steel} I_{w,steel}$. $E_{glass} / E_{steel} =$ modul pružnosti skla / oceli; $G_{glass} / G_{steel} =$ je smykový modul skla / oceli a L je délka nosníku mezi příčně drženými body. Kritický moment pro hybridní sklo-ocelový nosník vychází $M_{cr} = 9,99$ kNm. Porovnáním velikostí kritických momentů je zřejmé, že ocelové pásnice mají významný vliv na odolnost nosníku proti ztrátě příčné a torzní stability. Přidáním ocelových pásnic ke skleněné stojině se zvýší kritický moment o 327 %.

Výpočet kritického momentu celého hybridního nosníku byl proveden ve výpočetním software LTBeam. Model nosníku o délce 4,75 m byl prostě podepřen s rozpětím 4,5 m, příčné podepření bylo umístěno v místech vnášení zatížení, jejichž vzdálenost byla 2,9 m, viz obr. 15. Nejprve byl vytvořen model A odpovídající ručnímu výpočtu. Jednalo se tedy pouze o střední část nosníku o délce 2900 mm, prostě podepřenou a zatíženou koncovými momenty. Příčnému posunu a natočení nosníku kolem vodorovné osy nosníku bylo bráněno na obou okrajích. Natočení kolem svislé osy nosníku bráněno nebylo. Kritický moment v programu LTBeam vyšel zcela shodně jako při ručním výpočtu, tedy $M_{cr} = 9,99$ kNm. Model B se oproti modelu A lišil pouze příčnými podporami. Na okrajích modelované části nosníku bylo bráněno nejen příčnému posunu a natočení kolem vodorovné osy nosníku, ale zabráněno bylo i natočení kolem svislé osy nosníku. Tím bylo dosaženo vyšší hodnoty kritického momentu $M_{cr} = 21,45$ kNm. Pokud porovnáme hodnoty kritických momentů spočtených pro oba popsané modely s hodnotami z experimentů, viz obr. 18, zjistíme, že skutečná hodnota kritického momentu zkoušeného hybridního nosníku je větší než u

modelu A, ale zároveň nižší než u modelu B. Způsobeno je to tím, že příčné podepření při experimentech nebylo ani zcela volné, ani tuhé v natočení kolem svislé osy nosníku.

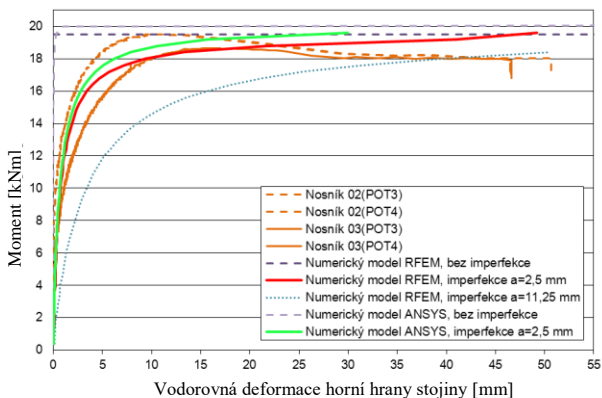


Obr. 18: Závislost momentu na vodorovné deformaci nosníku - srovnání experimentu s kritickými momenty spočtenými v programu LTBeam

Proto byl následně vytvořen model celého nosníku, kde byly vytvořeny 3 varianty pro různé typy příčného držení. V modelu C byly zvoleny příčné podpory bránící pouze příčnému posunu a natočení kolem vodorovné osy nosníku (stejně jako u modelu A) - $M_{cr} = 11,19$ kNm. Model D měl příčné podpory bránící příčnému posunu, natočení kolem vodorovné osy nosníku i natočení kolem svislé osy nosníku (souhlasně s modelem B) - $M_{cr} = 22,23$ kNm. Vzhledem k tomu, že příčné podepření při experimentech nebylo ani zcela volné, ani tuhé v natočení kolem svislé osy nosníku, byl vytvořen model odpovídající provedenímu experimentu hybridního nosníku 04. K vyladění modelu byly použity příčné posuny nosníku 04 naměřené při experimentu na okrajích a uprostřed rozpětí nosníku. Tuhost v natočení kolem svislé osy nosníku byla zvolena tak, aby model vykazoval příčné posuny odpovídající experimentu. Jedné příčné podpoře tak byla nastavena pro natočení kolem svislé osy nosníku pružina s tuhostí 150 kNm/rad, druhé podpoře pružina s tuhostí 75 kNm/rad. Výsledná hodnota kritického momentu je $M_{cr} = 19,45$ kNm, viz obr. 18.

Numerické modely byly vytvořeny ve výpočetním programu ANSYS 11.0 (3D prvky) a RFEM 5.05 (2D prvky). Nosník byl v obou případech

modelován s počátečními imperfekcemi ve tvaru sinusoidy s amplitudou 2,5 mm ($L/1800$), která odpovídala naměřené maximální počáteční imperfekci. Porovnání numerických modelů s experimentem je znázorněno na obr. 19.



Obr. 19: Závislost momentu na vodorovné deformace horní hrany skleněné stojiny - srovnání experimentů s hodnotami z modelů

Maximální ohybový moment hybridního nosníku ze skla a oceli ohroženého ztrátou příčné a torzní stability je možné stanovit následujícím vztahem

$$M_b = \chi_{LT} M_k, \quad (9)$$

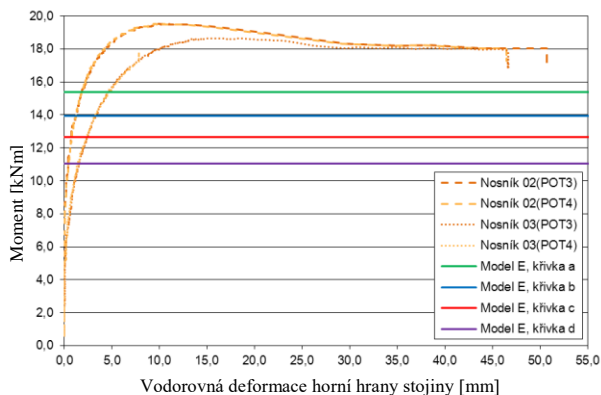
kde χ_{LT} je součinitel příčné a torzní stability a M_k je charakteristická hodnota momentu únosnosti v ohybu hybridního nosníku.

Návrhové postupy pro skleněné nosníky jsou v současné době založeny na křivkách vzpěrné pevnosti, které se používají při návrhu ocelových konstrukcí ke stanovení redukčního součinitele klopení. Pro bezpečný a spolehlivý návrh skleněných nosníků se doporučuje křivka vzpěrné pevnosti „c“ [12], [13]. Stejný přístup byl použit pro návrh hybridních nosníků. Pro zjištění hodnoty součinitele vzpěru χ_{LT} je nutné určit poměrnou štíhlost jako

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk,y}}{M_{cr}}}, \quad (10)$$

kde M_{cr} je kritický moment stanovený pro hybridní nosník.

Poměrná štíhlost byla stanovena na základě kritického momentu, který nejvíce odpovídal experimentům (software LTBeam, model E), jak je znázorněno na obr.18. Obr.20 ukazuje závislost momentu na vodorovném posunutí horního okraje skleněné stojiny. Graf ukazuje všechny vypočtené maximální momenty únosnosti v ohybu se ztrátou příčné a torzní stability hybridního nosníku pro každou křivku vzpěrné pevnosti.



Obr. 20: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skla - srovnání experimentů se spočtenými momenty únosnosti v ohybu

Při porovnání s výsledky experimentů je zřejmé, že křivku vzpěrné pevnosti "c", stejně jako u skleněného nosníku, lze použít pro konzervativní a bezpečný návrh hybridního nosníku ze skla a oceli s lepeným spojem. Všechny výsledky jsou platné pro dvousložkové akrylátové lepidlo SikaFast 5211 NT. Parametrická studie prokázala, že šířka ocelových pásnic má významný vliv na únosnost hybridního nosníku. V případě, že je nosník ohrožen ztrátou příčné a torzní stability, je vliv šířky pásnice znatelnější. Důvodem je zvětšující se poměr momentu setrvačnosti kolem osy z a plochy průřezu (I_z/A) při zvětšující se šířce ocelových pásnic. Tím roste i velikost kritického momentu a tedy i únosnost.

4. Skleněný sloup uzavřeného průřezu

Konstrukčních prvky ze skla namáhané ohybem jako jsou nosníky, výztužná žebra a zábradlí jsou poměrně časté. Naopak skleněné sloupy

namáhané tlakem jsou relativně vzácné, přestože pevnost skla v tlaku je násobně vyšší než jeho pevnost v tahu. Nedostatečné znalosti o chování skleněných sloupů při zatížení brání většímu využití těchto atraktivních konstrukčních prvků. Problémem je řešení detailů, protože jakékoliv excentricity mohou způsobit koncentraci napětí a přídavné momenty, které následně vedou k předčasnému porušení či selhání konstrukčního prvku. Nedostatečné jsou rovněž informace o globální a lokální ztrátě stability. Kromě samotné únosnosti je třeba, jako u všech nosných skleněných prvků, posoudit i zbytkovou únosnost v případě poškození či lokálního porušení. To znamená, že koncept návrhu by měl zohledňovat možnost alternativního přenosu zatížení tak, aby se zabránilo postupnému zhroucení konstrukce na základě kolapsu jednoho skleněného sloupu. První výsledky výzkumu tlačенých prvků ze skla lze najít v odborné literatuře, např. [14], [15], přesto je při realizacích chování sloupů vždy ověřeno experimentálně v měřítku 1:1.

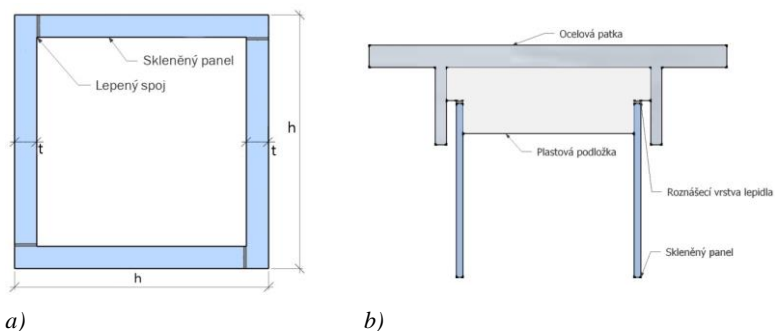
4.1 Skleněný sloup uzavřeného průřezu – 1. etapa

Předmětem experimentálního výzkumu provedeného na FSv ČVUT byl vývoj skleněného sloupu uzavřeného průřezu včetně konstrukčních detailů v uložení s možným budoucím využitím v praxi. Cílem bylo ověřit funkci, proveditelnost a únosnost sloupu ze skla pomocí experimentů a vytvořit metodiku pro bezpečný návrh pomocí analytických modelů s podporou numerické studie. Práce byla rozdělena do dvou etap – v první byla ověřena technologie výroby zkušebních těles malých rozměrů. V navazující druhé etapě bylo ověřeno chování sloupu v reálném měřítku při zatížení centrickým tlakem.

Zkušební tělesa v první etapě byla vyrobena z plaveného jednovrstvého skla o tloušťce 6 mm. Čtyři skleněné tabule o šířce 150 mm a délce 1750 mm byly slepeny do uzavřeného čtvercového průřezu, viz obr. 21a), pomocí akrylátového lepidla SikaFast-5211 NT. Zvláštní pozornost byla věnována detailu koncových částí skleněných sloupů. Pomocí plastových polyamidových podložek bylo jednak bráněno přímému kontaktu skla s ocelovou patkou a jednak byl zajištěn rovnoměrný přenos normálové síly do průřezu, viz obr. 21b).

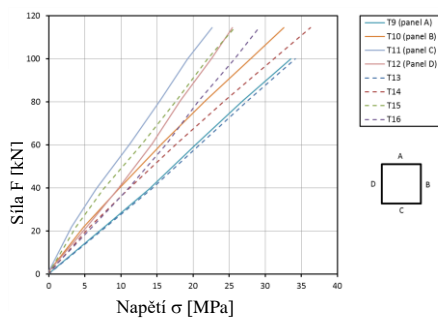
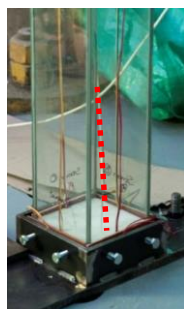
V průběhu zkoušek byl sloup plynule zatížen centrickou silou rychlostí 50 N/s do porušení vzorku, tj. do první trhliny ve skle. Po objevení první trhliny ve skle bylo zkušební těleso zatěžováno do kolapsu, aby mohla

být určena zbytková únosnost sloupu. K nepřímému měření napětí bylo použito celkem 16 tenzometrů. V průběhu zkoušky byla rovněž zaznamenávána působící svislá síla a vodorovná deformace uprostřed sloupu pomocí 4 snímačů dráhy. Zatížení bylo do skleněných vzorků vnášeno pomocí ložiska přes ocelovou patku, ve které byl sloup ustaven a vyrovnán.



Obr. 21: a) Příčný řez sloupem, b) uložení sloupu

K prvnímu porušení došlo u všech zkušebních těles při působení tlakové síly kolem $N_{f,1} = 72$ kN, viz tab. 5. Svislé trhliny, které byly pozorovány vždy ve spodní části sloupu, lze vysvětlit působením příčného tahu. Průběh napětí uprostřed výšky sloupu S 1.01 v závislosti na zatížení je naznačen na obr. 22b). Z grafu je patrné, že napětí získaná z vnitřních i vnějších tenzometrů na příslušných stěnách průřezu jsou téměř symetrická.



Obr. 22: Vzorek S 1.01: a) znázornění první trhliny, b) závislost napětí na síle

Dalším zatěžováním po dosažení únosnosti sloupu docházelo k postupnému šíření trhlin. Směr trhlin byl opět svislý a celkový kolaps sloupu S1.01 nastal při síle $N_{f,max} = 117,5$ kN, což je zhruba $1,63 \times N_{f,1}$. Souhrn výsledků pro 3 zkušební tělesa je uveden v tab. 5. Naměřená data dokazují dvojosé vybočení z hlavních rovin xz a yz i přes to, že zkušební tělesa byla zatěžována jen svislou silou. Dodatečný ohyb nastával kolem hlavních os vlivem počátečních imperfekcí, [16].

Tab. 5: Souhrn výsledků zkoušek skleněných sloupů – 1. etapa

Vzorek	Únosnost sloupů			Zbytková únosnost			ΔN
	$N_{f,1}$	w_x	w_y	$N_{f,max}$	$w_{x,max}$	$w_{y,max}$	
	[kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[mm]	
S 1.01	72	0,20	0,15	117,5	0,65	0,19	38,7
S 1.02	72	0,59	0,22	95	0,46	0,41	24,2
S 1.03	75	0,18	0,17	168	6,00	0,40	55,4

Zbytková únosnost ΔN je pak vyjádřena v procentech a vypočtena podle následující rovnice

$$\Delta N = 100 \cdot \frac{(N_{f,max} - N_{f,1})}{N_{f,1}} \quad (11)$$

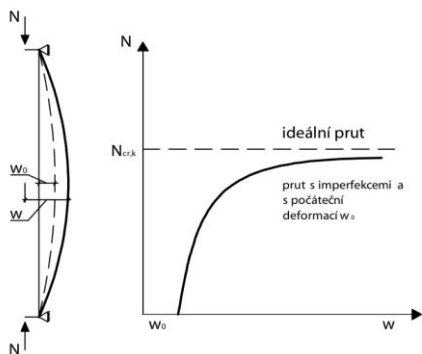
Analytický model pro výpočet napětí vychází při zatížení excentrickým tlakem ze stability přímého prutu [17]. Chování prutu z jednovrstvého skla může být popsáno za použití diferenciální rovnice druhého řádu (12) pro prut o délce L s kloubovým uložením konců, zatíženém osovou silou N , s počáteční imperfekcí w_0 ve tvaru jedné sinusové půlvlny a se zatížením působícím s excentricitou e , viz obr. 23.

$$EIw(x)'' + N \cdot \left[w_0 \sin \frac{\pi x}{L} + e + w(x) \right] = 0. \quad (12)$$

Kritická (Eulerova) síla je pak definována jako

$$N_{cr,k} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}, \quad (13)$$

kde L_k je vzpěrná délka, I je moment setrvačnosti uzavřeného průřezu.



Obr. 23: Excentricky zatížený tlačný prut s počáteční imperfekcí w_0

Maximální deformace je dána rovnicí

$$w = \frac{e}{\cos\left(L_k/2 \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{cr,k}}}\right)} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr,k}}}, \quad (14)$$

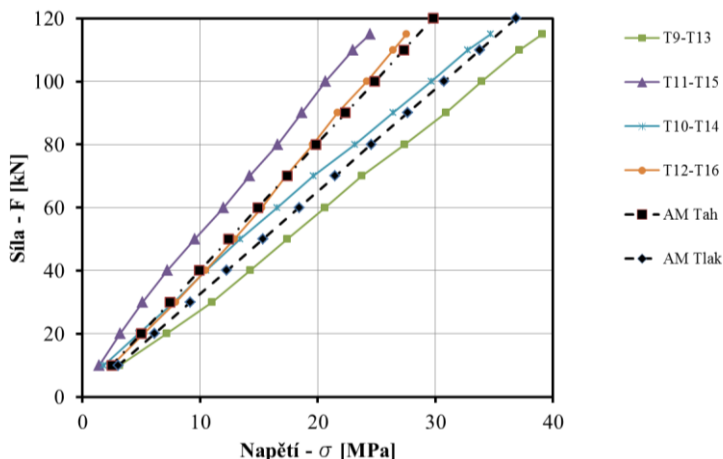
maximální napětí, na povrchu může být stanoveno jako

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A_c} \pm \frac{N}{W} \left(\frac{e}{\cos\left(L_k/2 \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{cr,k}}}\right)} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr,k}}} \right), \quad (15)$$

kde A_c je plocha skleněného sloupu, W je průřezový modul celého průřezu.

Maximální deformace w byla v analytickém modelu vypočtena na základě předem stanovených imperfekcí $w_{0,1} = L / 400$ a $w_{0,2} = L / 2500$, které zohledňují nepřesnosti vyrobení sloupu a nepřesnosti dílčích skleněných panelů vzniklé při výrobě. Celková vodorovná deformace w_0 je dána prostým součtem dílčích deformací $w_{0,1}$ a $w_{0,2}$. Takto sestavený analytický model byl použit pro porovnání s výsledky z experimentů. Pro toto posouzení byly vybrány všechny vzorky. V následujícím obr. 24 jsou zobrazeny hodnoty hlavních napětí σ ve středním průřezu v závislosti na vnesené síle N . Křivky označené jako AM_{tah} jsou hodnoty normálového napětí snižené o ohybový účinek na tažené straně podle rovnice (15) a křivky označené jako AM_{tlak} jsou hodnoty normálového napětí zvýšené o ohybový účinek na tlačené straně

sloupu. Z porovnání je patrné, že tento zjednodušený analytický model dobře koresponduje s výsledky získanými z experimentů.

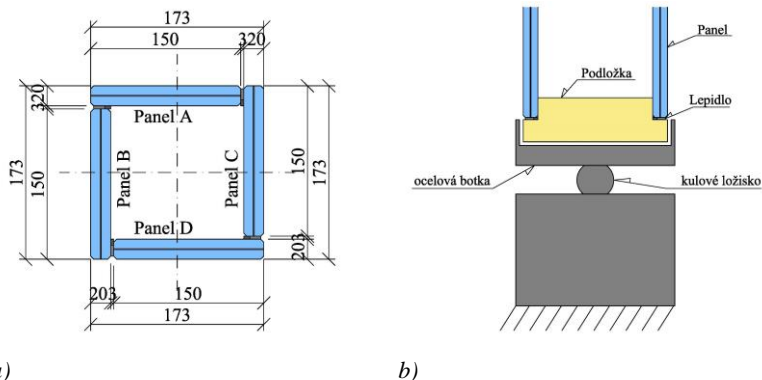


Obr. 24: Porovnání analytického modelu s experimenty v hlavním směru vybočení, sloup S 1.01

4.2 Skleněný sloup uzavřeného průřezu – 2. etapa

Navazující druhá etapa byla zaměřena na ověření chování sloupu reálných rozměrů při zatížení centrickým tlakem. Celkem bylo vyrobeno 5 zkušebních těles, 3 zkušební tělesa byla použita pro ověření únosnosti a zbytkové únosnosti, 2 zkušební tělesa byla vystavena kyvadlové zkoušce s cílem stanovit odolnost konstrukčního prvku při nárazu.

Všechna zkušební tělesa byla sestavena ze stejného materiálu a stejných rozměrů, viz obr. 25. Skleněné panely byly z vrstveného plaveného skla o tloušťce 2x10 mm s PVB fólií. Celková šířka jednotlivých panelů byla 150 mm. Délka $L = 3000$ mm byla volena tak, aby bylo možné splnit výrobní poměr, tedy cca 1:20 a zároveň se dosáhlo co možná nejtíhlejšího průřezu. Skleněné panely byly opět spojovány v rozích pomocí dvousložkového akrylátového lepidla SikaFast-5215 NT. Rozdíl oproti předešlému použitému lepidlu SikaFast-5211 NT je pouze v době zpracování směsi po smíchání složek lepidla.



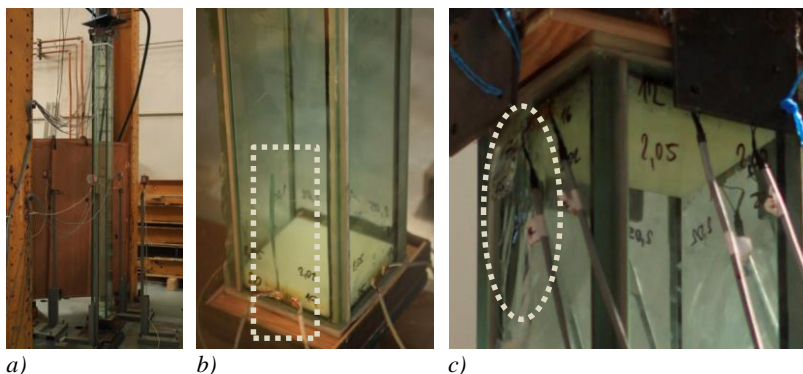
a) b)
 Obr. 25: a) Skleněný sloup II. etapa: průřez sloupu, b) schéma uložení sloupu při experimentu

Před sestavením zkušebních těles byly změřeny reálné rozměry dílčích skleněných panelů, tloušťka t_{real} , šířka h_{real} a délka L_{real} . Pro stanovení globálních i lokálních imperfekcí skleněného sloupu byl použit panoramatický skener Surphaser 25HSX.

Zkušební tělesa byla kontinuálně zatěžována osovým tlakem až do porušení. Každé zkušební těleso bylo osazeno vždy na vnější straně dvaceti tenzometry. V krajních průřezech (v hlavě a patě sloupu) byly použity tenzometry různicového typu a v průřezu uprostřed výšky sloupu byly použity jednosměrné tenzometry osazené svise. Posun středního průřezu z roviny byl měřen pomocí čtyř snímačů dráhy. Rychlost zatěžování byla konstantní 200 N / s.

Průběh experimentů byl shodný s první etapou. V případě zkušebního tělesa S 2.01 se vytvořila první svislá prasklina ve spodní části panelu D při síle $N_{f,1} = 580$ kN. Vznik první trhliny znamenal dosažení únosnosti sloupu. Dalším přitěžováním došlo k postupnému rozvoji trhlin ve spodní části, v pozdější fázi zatěžování vznikly trhliny i ve vrchní části téhož panelu. Při síle $N_{f,2} = 735$ kN se ve spodní části delaminoval panel B. Delaminace probíhala postupným odštěpováním vnějšího skleněného panelu od PVB folie, viz obr. 26. Kolaps sloupu S 2.01 nastal při síle $N_{f,max} = 840$ kN. Mechanismus kolapsu byl náhlý, došlo k rozdrčení stěn v patě sloupu. U zkušebního tělesa S 2.04 nedošlo ke vzniku trhliny ve skle v průběhu zatěžování, sloup dosáhl únosnosti současně

s celkovým kolapsem. Kolaps sloupu nastal při síle $N_{f,1} = N_{f,max} = 860$ kN. Porušení sloupu S2.05 bylo náhlé, vyvolané rozpadem plastové podložky a deformací ocelové patky ve spodní části. První trhлина se vytvořila na panelu C opět ve spodní části při síle $N_{f,1} = 180$ kN. Výsledky experimentů jsou shrnuty v tab. 6, [18].



Obr. 26: Zkušební těleso S 2.01 – a) uspořádání zkoušky, b) delaminace panelu B, c) rozvoj trhlin v hlavě sloupu - vpravo

Tab. 6: Souhrn výsledků zkoušek skleněných sloupů – 2. etapa

Vzorek	Únosnost	Deformace při síle $N_{f,1}$		Kolaps	Deformace		Zbytková únosnost
	$N_{f,1}$ [kN]	$w_{x,1}$ [mm]	$w_{y,1}$ [mm]	$N_{f,max}$ [kN]	$w_{x,max}$ [mm]	$w_{y,max}$ [mm]	$\Delta N = N_{f,max} - N_{f,1}$ [kN]
S 2.01	500	3,3	0,8	840	3,5	1,0	340
S 2.04	860	2,0	3,7	860	2,0	3,7	0
S 2.05	180	1,9	1,9	460	6,8	4,9	280

Z tab. 6 je patrné, že sloup vykazuje dostatečnou zbytkovou únosnost bez ohledu na to, při jakém zatížení dojde k prvnímu porušení skla.

Analytický model, který byl použit k vyhodnocení první etapy experimentů pro zkušební tělesa z jednovrstvého skla, bylo nutné upravit tak, aby se zohlednil vliv mezivrstvy mezi skleněnými tabulemi v souvrství. V tomto případě byl zaveden součinitel přenosu smyku ω , který se pohybuje v intervalu $\langle 0;1 \rangle$, kde 0 představuje nulové smykové působení (tabule po sobě kloužou) a 1 představuje dokonalé spojení jednotlivých skleněných tabulí. Do výpočtu byl zjednodušeně zaveden

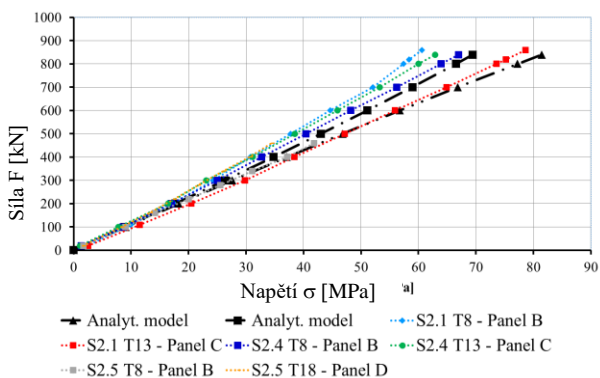
součinitel přenosu smyku roven $\omega = 0,5$. Pomocí součinitele přenosu smykových sil ω se vrstvené sklo převádí na sklo monolitické, které má tloušťku rovnou náhradní efektivní tloušťce, [1]. Efektivní tloušťka je vypočtena zvlášť pro výpočet vodorovných deformací, $t_{eff,w}$, podle rovnice (16) a zvlášť pro výpočet ohybových napětí ve středním průřezu, $t_{eff,\sigma}$, podle rovnice (17), [1],

$$t_{eff,w} = \sqrt[3]{\sum_i t_i^3 + 12\omega(\sum_i t_i t_{m,i}^2)}, \quad (16)$$

$$t_{eff,\sigma} = \sqrt{\frac{(t_{eff,w})^3}{(t_i + 2\omega t_{m,i})}}, \quad (17)$$

kde t_i je tloušťka dílčích vrstev, $t_{m,i}$ je vzdálenost těžišť.

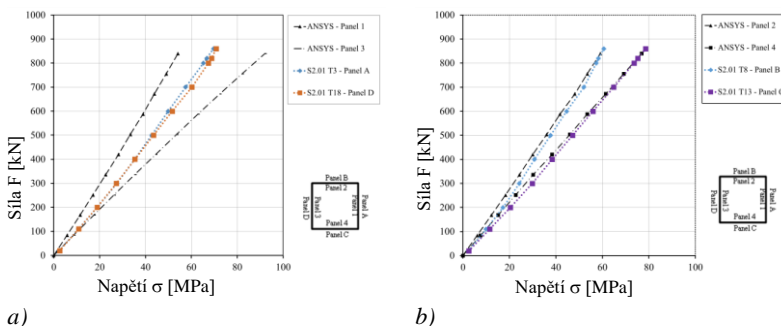
Maximální deformace w byla v analytickém modelu vypočtena na základě předem změřených imperfekcí $w_{0,1} = 0,5$ mm a $w_{0,2} = L / 2000$, které zohledňují nepřesnosti z výroby sloupu a nepřesnosti vlivem umístění sloupu do experimentálního zařízení. Porovnání výsledků z analytického modelu s experimentem je znázorněno na obr. 27.



Obr. 27: závislost napětí na síle – hlavní směr vybočení sloupu

Numerický model, který byl vytvořen v programu ANSYS, byl ověřen pomocí výsledků získaných v průběhu experimentů. Následně byl model použit pro parametrickou studii. Na obr. 28 jsou zobrazeny hodnoty svislých napětí změřených ve střední části sloupu. Na obrázku 28a) je vykresleno napětí získané z tenzometrů T3 (panel A) a T18 (panel D).

Na obr. 28b) je vykreslen průběh napětí z tenzometrů T8 (panel B) a T13 (panel C). Numerický model je více ovlivněn kladnými a zápornými přírůstky napětí od momentu vzniklého excentrickým působením síly. Průměrná absolutní odchylka v tomto směru pro odpovídající panely v numerickém modelu, tj. Panel A k Panelu 1 (numerický model), Panel D k Panelu 3, je 28% respektive 22%. Odchylka je určena pro sílu $N = 550$ kN. Výsledky z numerického modelu zobrazené na obrázku 28b) dobře kopírují průběh chování sloupu ve směru kolmém na hlavní směr vybočení. Téměř shodný průběh je pozorován až do celkového kolapsu konstrukce. Průměrná absolutní odchylka v tomto směru pro korespondující panely, tj. Panel A k Panelu 1, Panel D k Panelu 3, je 6,8% respektive 4,6%. Odchylka je určena opět pro sílu $N = 550$ kN.



Obr. 28: Porovnání svišlých napětí ve středním průřezu s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

Na základě ověřeného numerického modelu byla provedena parametrická studie. Hlavním cílem bylo stanovení únosnosti skleněných sloupů v závislosti na rozdílných průřezových charakteristikách, které svými rozměry lze aplikovat ve stavební praxi. Celkem bylo ověřeno 16 různých rozměrů průřezu sloupu. Proměnnými veličinami v parametrické studii byla tloušťka skleněné stěny 20 mm a 30 mm, šířka sloupu v rozmezí 150 mm až 350 mm a výška sloupu od 3,0 m do 4,0 m.

Celková únosnost dílčích vzorků byla stanovena podle pevnosti plaveného skla v tahu. Na základě provedených experimentů vyplývá, že pevnost skla v tahu byla vyčerpána při dosažení hodnoty $f_g = 30$ MPa. Tato hodnota napětí se stala určující mezí pro výpočet únosnosti skleněného sloupu. Výsledná únosnost modelů se v parametrické studii

pohybovala od $N_{f,min} = 450$ kN do $N_{f,max} = 650$ kN, viz souhrn v tab. 7. Nejvíce je únosnost skleněného sloupu ovlivněna poměrem šířky a tloušťky skleněného panelu. Je to dáno především okrajovými podmínkami, zejména způsobem uložení a velikostí podložky.

Tab. 7: Souhrn výsledků parametrické studie

	Skupina I				Skupina II			
	Vz. 01	Vz. 02	Vz. 03	Vz. 04	Vz. 05	Vz. 06	Vz. 07	Vz. 08
t_{sklo} [mm]	20	20	20	20	20	20	20	20
h_{sklo} [mm]	150	200	250	300	150	200	250	300
L_{sklo} [mm]	3000	3000	3000	3000	3500	3500	3500	3500
$N_{f,I}$ [kN]	500	475	550	650	500	475	550	650
	Skupina III				Skupina IV			
	Vz. 09	Vz. 10	Vz. 11	Vz. 12	Vz. 13	Vz. 14	Vz. 15	Vz. 16
t_{sklo} [mm]	30	30	30	30	30	30	30	30
h_{sklo} [mm]	150	200	250	300	200	250	300	350
L_{sklo} [mm]	3500	3500	3500	3500	4000	4000	4000	4000
$N_{f,I}$ [kN]	650	475	475	550	450	450	600	650

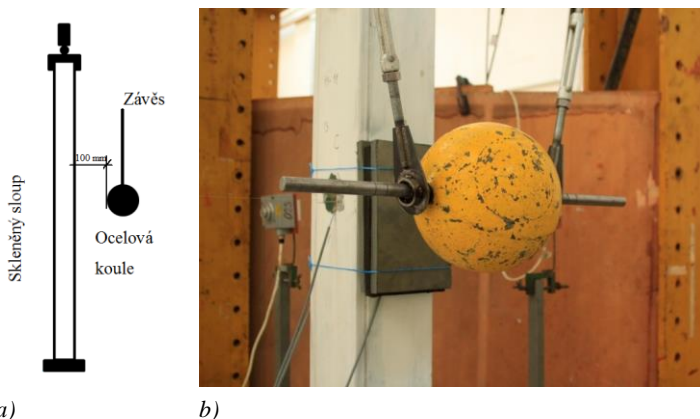
Použitím jiného druhu skla, např. tepelně tvrzeného, by únosnost sloupu dosahovala vyšších hodnot, ale z hlediska bezpečnosti by po vytvoření trhliny došlo k porušení jedné tabule souvrství a tím ke snížení zbytkové únosnosti sloupu. Optimální variantou pro zvýšení únosnosti a zachování bezpečného chování je využití tepelně zpevněného skla, které se porušuje stejným způsobem jako plavené sklo. Nevýhodou toho typu skla je cena vzhledem k technologickému procesu výroby.

4.3 Odolnost skleněného sloupu na náraz

Kyvadlová zkouška si klade za cíl ověření chování reálného skleněného sloupu v případě nehodové situace, především jeho odolnost a zbytkovou únosnost. Experiment byl navržen tak, aby simuloval náraz v nejnepříznivějším průřezu, tj. uprostřed výšky sloupu. Celkem bylo experimentálně ověřeno chování při zatížení na dvou zkušebních tělesech (S2.02, S2.03)

Při zkouškách byla použita ocelová koule o hmotnosti 51 kg a průměru 230 mm. Koule byla zavěšena na ocelových lanech. Délka závěsu činila 3170 mm a konečná pozice koule byla v úrovni středního průřezu sloupu.

Vzhledem k ukotvení závěsů, bylo těleso koule v klidové poloze vzdáleno 100 mm od povrchu skleněného sloupu. Schéma zkoušky nárazu je vidět na obr. 29.

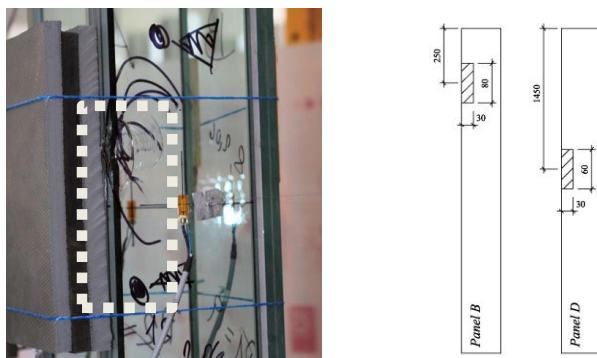


Obr. 29: a) Schéma kyvadlové zkoušky, b) uspořádání zkoušky

V první sérii byly použity pryžové podložky, které byly umístěny v místě dopadu koule, viz obr. 29b), s cílem simulovat náraz měkkým předmětem. Ve druhé sérii byly provedeny kyvadlové zkoušky bez pryžové podložky.

Test zkušebního tělesa S2.02 byl rozdělen na tři kroky. V první části bylo těleso zatíženo centrickou tlakovou silou $N_1 = 400$ kN. Cílem bylo ověření chování sloupu při zatížení a ověření celkové stability. V průběhu zatěžování nebyly pozorovány trhliny ani jejich rozvoj. Rychlost zatěžování byla 200 N/s. Po dosažení síly N_1 byl sloup odtížen na minimální hodnotu $N_2 = 10$ kN. Po odtížení na N_2 následovalo opětovné zatížení na sílu $N_3 = 150$ kN po dobu 10 minut, potom byl proveden test nárazem. Ve druhém kroku byl skleněný sloup postupně vystaven nárazům ocelové koule z různé vodorovné vzdálenosti (660 mm, 1010 mm, 1300 mm, 1450 mm), v místě dopadu byla na sloup připevněna pružná podložka. Žádný z nárazů nezpůsobil makroskopické (lidským okem viditelné) porušení skleněného sloupu. Po provedení zkoušky nárazem bylo ve třetím kroku zkušební těleso zatěžováno plynule osovou silou až do porušení. Rychlost zatěžování byla na 200 N/s. K prvnímu porušení došlo ve spodní části zkušební tělesa, kde se objevila trhlina při síle $N_{f,1} = 630$ kN. Kolaps tělesa nastal při síle $N_{f,max} = 780$ kN.

Zkušební těleso S2.03 bylo před zkouškou nárazem záměrně poškozeno ve dvou místech. Místa byla vybrána tak, aby porušení bylo v kritických průřezech, tedy v krajním průřezu a v průřezu uprostřed výšky sloupu, viz obr. 30b). Cílem tohoto porušení je simulace nehodové situace, např. při nešetřném stěhování vnitřního vybavení budov. První porušené místo bylo ve vrchní části sloupu při okraji na panelu B. Porušení o rozměrech 30 x 80 mm bylo na vnějším skleněném panelu dvouvrstvého skla ve vzdálenosti 250 mm od hlavy sloupu. Druhé poškození vnějšího panelu v souvrství bylo ve střední části sloupu při okraji panelu D v ploše 60 x 30 mm ve vzdálenosti 1500 mm od hlavy sloupu, viz obr. 30a).

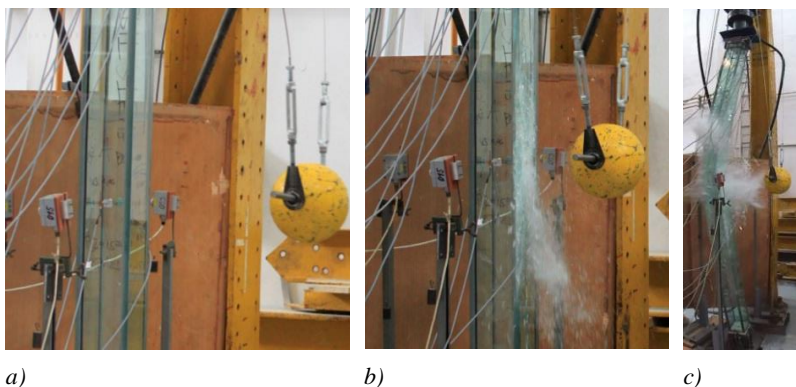


a)

b)

Obr. 30: a) Porušení uprostřed výšky sloupu, b) schématické znázornění počátečních poruch

Na rozdíl od tělesa S 2.02 byla nárazová zkouška tělesa S 2.03 zjednodušena. V prvním kroku bylo těleso zatíženo na sílu $N_1 = 150$ kN. Rychlost zatěžování byla opět 200 N/s. Po dosažení síly N_1 byla tato síla udržována po dobu min. 10 minut tak, aby bylo možné provést zkoušku nárazem. Náraz měkkého tělesa byl opět simulován pomocí pryžové podložky v místě dopadu ocelové koule. Celkem 4 nárazy ze vzdáleností 750 mm a 1500 mm nezpůsobily okem viditelné poškození. Další čtyři nárazy ocelovou koulí byly provedeny po odstranění pryžové podložky ze vzdáleností 750 mm a 1500 mm, opět bez viditelného poškození tělesa. K porušení stěny sloupu v místě nárazu došlo až při dopadu ocelové koule ze vzdálenosti 1700 mm, viz obr. 31.



Obr. 31: a) Simulace nárazu bez pružných podložek, b) náraz ocelové koule ze vzdálenosti 1700 mm, c) kolaps sloupu

Po provedení zkoušky nárazem bylo poškozené zkušební těleso zatěžováno rychlostí 200 N/s do porušení. Kolaps sloupu nastal při síle $N_{f,max} = 630$ kN. V průběhu zatěžování docházelo k postupnému dotlačování lepené mezivrstvy v patě sloupu. Další přitěžování bylo provázáno rozvojem trhlin v místě nárazu ocelové koule. Celkový kolaps sloupu nastal náhle ztrátou stability, sloup vybočil a zlomil se uprostřed výšky. Mechanismus porušení sloupu je vidět na obr. 31c), [18]

Výzkum zaměřený na ztrátu stability skleněných sloupů z jednovrstvého a vrstveného skla prokázal významný vliv počátečních imperfekcí, které jsou v případě skleněných nosníků nezanedbatelné. Experimenty prokázaly, že skleněné sloupy vykazují dostatečnou únosnost do prvního porušení, které však nevede ke kolapsu konstrukčního prvku. Zároveň byla prokázána i vysoká zbytková únosnost, tj. schopnost přenášet zatížení i po vzniku první trhliny ze skla, jako nezbytný předpoklad pro návrh spolehlivých a bezpečných konstrukcí. Rovněž lze konstatovat, že pro návrh skleněných sloupů je vhodné plavené vrstvené sklo, které se rozbíjí ve velkých střepích a proto vykazuje dostatečnou zbytkovou únosnost. Z tohoto důvodu by bylo nevhodné použití tepelně tvrzeného skla, které se při porušení rozbíjí na malé kousky skla. Bylo prokázáno, že výše popsany analytický model dostatečně výstižně popisuje chování prvků ze skla namáhaných tlakem a je vhodným nástrojem pro předběžné návrhy. Nicméně v praxi je třeba ověřit chování sloupů a vhodnost detailů experimentálně.

5. Sloup zděný z plných skleněných cihel

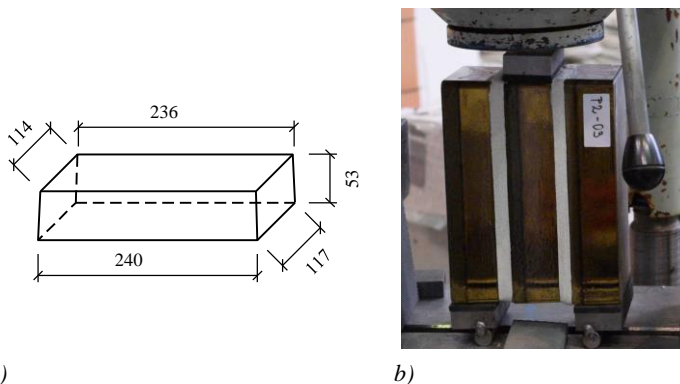
V rámci smluvního výzkumu s firmou Vitrablok s.r.o. byl na FSv ČVUT proveden rozsáhlý experimentální výzkum zaměřený na nosné zdivo z plných skleněných cihel. V první etapě byla pozornost věnována výběru vhodného spojovacího materiálu s dostatečnou přilnavostí k substrátu (skleněná cihla). Na zkušebních tělesech malých rozměrů byla zkoušena pevnost zdiva ve smyku a v tahu. Souběžně byly provedeny experimenty ke stanovení materiálových vlastností jak skleněných cihel, tak spojovacího materiálu (malty). Ve druhé etapě bylo ověřováno zdivo na pilířích malých rozměrů a na sloupech o výšce 3,0 m.

5.1 První etapa - zkoušky malých rozměrů

Jednou z rozhodujících vlastností zdiva je jeho smyková pevnost, která závisí v případě zdiva z plných skleněných cihel především na adhezi, tedy na přilnavosti použité malty (nebo jiného materiálu) ke skleněným cihlám. První sada experimentů byla zaměřena na určení vlivu použitého spojovacího materiálu (malty nebo polymeru), úpravy povrchu cihel a tloušťky spáry na pevnost zdiva ze skleněných cihel ve smyku. Zkušební tělesa byla vyrobena ze skleněných cihel, které jsou kónického tvaru, viz obr. 32a). Celkem bylo vyzkoušeno 8 druhů spojovacích materiálů, dva druhy úpravy cihel a několik tlouštěk spár v rozmezí 1 mm – 16 mm, které byly definovány pomocí plastových distančních křížků. Jako spojovací materiály byly použity různé druhy malt od běžných malt pro zdění kamenného zdiva až po speciální malty s přísadami na bázi latexu, které jsou určeny pro spojování skleněných konstrukcí. Kromě malt byly použity rovněž dva druhy lepidla na dlažbu a jeden druh epoxidové pryskyřice. Zkoušky byly provedeny pro hladký povrch bez úpravy a pro povrch zdrsňený velmi jemným pískováním. Mezi výrobou zkušebních těles a provedením experimentů byla technologická přestávka 28 dní, aby bylo dosaženo dostatečné pevnosti malty. Po celou dobu skladování byla sledována teplota okolního vzduchu, [19].

Zkušební tělesa vyrobená ze tří plných skleněných cihel byla zkoušena ve zkušebním stroji MTS 100 kN. Jednalo se o protlačovací zkoušku, kdy dvě krajní cihly byly uloženy na ocelových deskách a střední cihla byla namáhána tlakem tak, aby spáry mezi cihlami byly namáhány smykem, viz obr. 32b). Tlaková síla působila na zkušební těleso prostřednictvím kulového kloubu umístěného uprostřed horní ocelové tlačné desky. Krajní

cihly byly uloženy přes ocelové desky na válcové podpory o průměru 20 mm. Mezi ocelové desky a skleněné cihly byly vloženy pryžové podložky tloušťky 5 mm, aby bylo zabráněno přímému kontaktu mezi sklem a deskou, který by mohl vést k lokálnímu namáhání skleněné cihly. Ve vybraných případech byla navíc tělesa osazena snímači dráhy k měření vzájemného posunu cihel.



Obr. 32: a) Rozměry skleněných cihel, b) Uspořádání zkoušky ve smyku

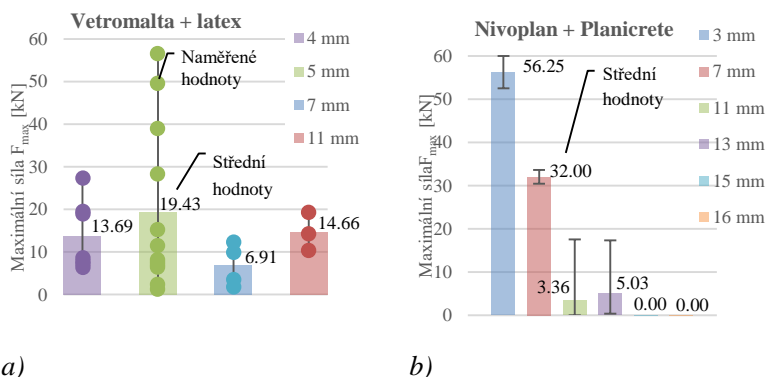
Většina zkoušených těles vykazovala adhezní porušení (ztráta přilnavosti spojovacího materiálu k povrchu). Vliv úpravy povrchu pískováním skla byl významný, zkušební tělesa dosahovala větší pevnosti ve smyku v lepené spáře. Nevýhodou je nežádoucí estetický efekt.

Výsledky zkoušek z těles vyrobených z klasických malt se od sebe při stejné tloušťce spár a stejné úpravě povrchu nijak výrazně nelišily, stejně tak lepidla na dlažbu se chovala podobně jako klasické malty. Malty se speciálními přísadami pro lepší přilnutí ke sklu dosahovaly několikanásobně vyšších pevností. Tělesa z epoxidové pryskyřice byla zkoušena pouze s malou tloušťkou spár a naměřené hodnoty byly přibližně shodné s pevností lepidla na dlažbu. Na základě naměřených dat bylo rozhodnuto o zaměření dalšího výzkumu na lepidla na dlažbu a malty se speciálními přísadami, aby bylo možné používat hladké cihly a dodržet běžnou tloušťku spár klasického zdiva.

Při práci se zvolenými materiály byl zjištěn významný vliv poměru suché směsi, vody a případně latexové příměsi na dobu zpracovatelnosti směsi a tím pádem i na kvalitu spoje – čím sušší je směs, tím horší je přilnavost

k povrchu. Při používání latexové příměsi se jako nejvhodnější ukázal poměr 1,92 kg suché směsi : 0,2 l vody : 0,2 l Planicretu. Při tomto poměru nebyla směs po smíšení příliš tekutá a zároveň byla použitelná ještě přibližně hodinu od smíchání. Tento poměr byl používán při následujících experimentech (zkoušky těles v tlaku, zkoušky pilířů).

Pro polymerní lepidla je tloušťka spáry zásadním parametrem ovlivňujícím pevnost spoje. Tento jev se projevil i v případě lepidel na dlažbu a malt se speciálními přísadami, které jsou právě na bázi polymerů. Závislost pevnosti na tloušťce je výrazná, například pro lepidlo na dlažbu byla pevnost při poloviční tloušťce přibližně desetkrát vyšší a při desetkrát menší tloušťce dokonce padesátkrát vyšší. Podobný efekt, i když ne tak výrazný, se projevoval i v případě malt s přísadami, viz obr. 33.

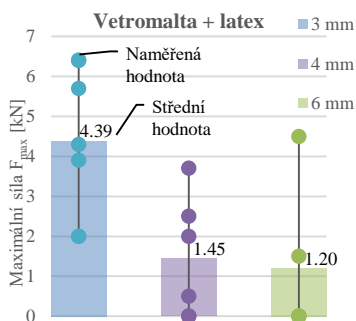


Obr. 33: Srovnání maximální síly při porušení pro různé tloušťky spojovacího materiálu – a) Vetromalta + latex, b) Nivoplan + Planicrete

Pro vybrané spojovací materiály byly dále provedeny zkoušky adheze pro různé tloušťky (3, 4, 6 a 10 mm). Tělesa tvořená dvěma spojenými cihlami byla umístěna do zkušebního stroje tak, že horní cihla byla na krajích uložena přes gumové podložky, viz obr. 34a), na ocelové podpory a do spodní cihly se přes nosník rovnoměrně roznášela působící tlaková síla. Tímto způsobem byla spára namáhána tahem. Stejně jako u zkoušek ve smyku se projevil vliv tloušťky spáry na pevnost, resp. adhezi spojovacího materiálu k povrchu skleněné cihly, viz obr. 34b).



a)



b)

Obr. 34:a) Uspořádání zkoušky adheze, b) vyhodnocení zkoušky pro spojovací materiál Vetromalta + Planicrete

K získání materiálových vlastností byly pro vybrané spojovací materiály (Vetromalta + latex, Nivoplan + Planicrete) provedeny zkoušky pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Dále byla stanovena pevnost skleněné cihly v tahu za ohybu, tab. 8, a v tlaku.

Tab. 8: Souhrn výsledků zkoušek skleněných cihel v tahu za ohybu

Číslo tělesa	Průřezový modul W [mm ³]	Síla při porušení F_{\max} [kN]	Napětí při porušení σ_{\max} [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
H-01	54354	74,669	65,01	74,49
H-02	49157	81,268	79,31	82,61
H-03	47249	71,848	70,44	89,49
H-04	64250	82,193	60,62	63,05
H-05	52049	59,958	56,20	76,02
H-06	56023	64,275	55,01	69,14
Průměrné hodnoty			64,43	75,80

5.2 Druhá etapa – zkouška zděného pilíře

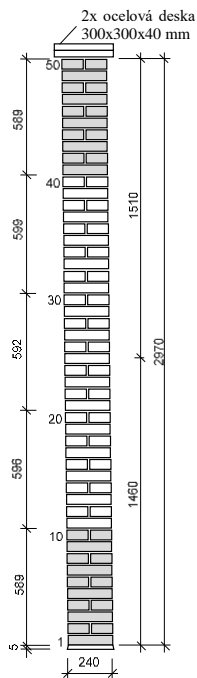
Cílem zkoušky bylo stanovit únosnost pilíře vyzděného z plných skleněných cihel při namáhání centrickým tlakem, excentrickým tlakem a odolnost pilíře při nehodové situaci, která byla simulována nárazem měkkého a tvrdého tělesa na pilíř v polovině jeho výšky. Celkem byly vyzděny dva pilíře o výšce 3 m, která odpovídá běžné konstrukční výšce

podlaží. Na pilíř byly použity cihly stejných vlastností a rozměrů jako v předcházejících experimentech. Pro spojení cihel byla použita malta Vetromalta s přísadou Planicrete.

Zkušební tělesa (zděný pilíř) byla vyžděna v Experimentálním centru FSV ČVUT, aby nedošlo k poškození při přepravě. Půdorys pilíře byl čtvercový o rozměrech 240 x 240 mm. Každá vrstva byla tvořena dvojicí cihel vedle sebe a jednotlivé vrstvy byly vůči sobě pootočeny o 90° tak, aby bylo zajištěno provázání zdiva. První vrstva byla uložena do maltového lože tloušťky 5 mm na podlahu zkušebny. Ložné spáry byly s ohledem na předchozí experimenty zvoleny o tloušťce 8 mm. Pro zajištění jejich stejné tloušťky byly použity distanční křížky, které byly před vytvrdnutím malty odstraněny a otvory po nich byly vyplněny maltou. Výsledná výška sloupu od podlahy po horní hranu cihly poslední vrstvy byla 2970 mm pro experiment 01, obr. 35a), a 2998 mm pro experiment 02. Na horní vrstvu cihel byla do maltového lože uložena ocelová deska o rozměrech 300 x 300 x 40 mm. Na tuto desku byla uložena další ocelová deska stejných rozměrů, do které byl přes kulový kloub opřen hydraulický zatěžovací válec, obr. 35b).

K zatěžování byl použit elektrohydraulický zatěžovací stroj INOVA EU 2000D se silovým válcem o maximálním zatížení 2500 kN, k měření působící síly byl užit siloměr o maximální hodnotě měřené síly 2000 kN. Deformace byly měřeny potenciometrickými snímači dráhy a napětí nepřímo pomocí tenzometrů.

Zatěžování pilíře centrickým tlakem při experimentu 01 bylo řízeno silou. Zkouška byla rozdělena na tři fáze – zatěžování prostým centrickým tlakem, náraz měkkým tělesem a náraz tvrdým tělesem. Nejprve byl pilíř zatížen na sílu 2000 kN, poté došlo k odtížení na nenulovou hodnotu (hodnoty 200, 100 a 50 kN) a provedení zkoušky nárazem pomocí koženého vaku vyplněného skleněnými kuličkami, které simulovaly náraz měkkého břemene. Protože nedošlo k poškození zkušebního tělesa, byla provedena zkouška nárazem tvrdého tělesa, kterou simulovala ocelová koule o hmotnosti 51 kg a průměru 230 mm.



a)

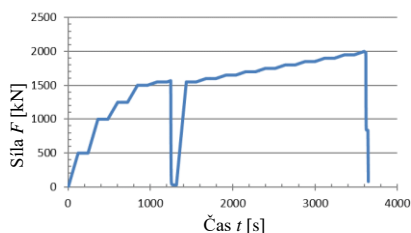
b)

Obr. 35: a) Rozměry pilíře pro experiment 01, b) Uspořádání zkoušky

Během první fáze byl pilíř zatěžován postupně po krocích, viz obr 36. Po dosažení předepsaného zatížení byla síla v každém kroku držena na konstantní hodnotě po dobu dvou minut. Po uplynutí této doby následovalo plynulé přitížení na další krok. Zatěžovací krok byl 500 kN do síly 1000 kN, 250 kN do síly 1500 kN a 100 kN do síly 2000 kN.

Při síle 1325 kN byla zaznamenána první prasklina ve skleněné cihle uprostřed výšky sloupu, malta ve spárách zůstala neporušená. Při dosažení síly 1396 kN došlo k prolomení roznášecího válce kulovým kloubem, který byl umístěn mezi roznášecí desku a zatěžovací válec, proto byla zkouška přerušena. Po přerušení zkoušky byl celý pilíř prohlédnut a vzhledem k tomu, že byla nalezena pouze jedna popraskaná cihla, malta byla neporušena, sloup byl celistvý bez dalšího viditelného poškození, byla zkouška s upraveným roznášecím přípravkem opakována. Zatěžování zděného pilíře probíhalo stejným způsobem, tj.

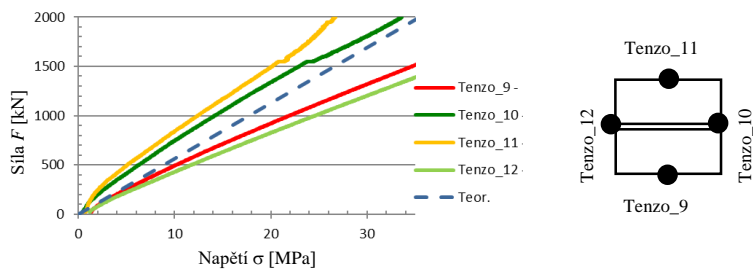
po krocích s konstantním držením síly po dobu 2 minut, viz obr 36. Zkouška byla ukončena při dosažení síly 2000 kN, tj. při dosažení maximálního rozsahu siloměru.



Obr. 36: Průběh zatěžování zděného pilíře -

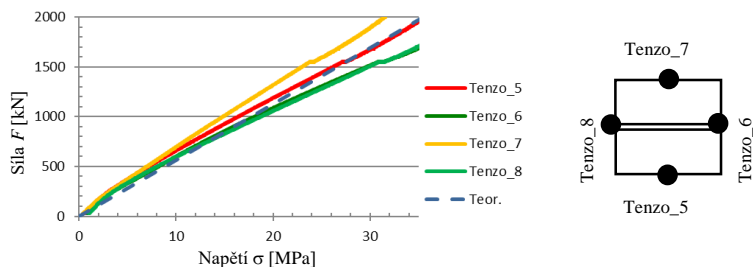
Další poškození nastalo u zkušebního tělesa při silách 1560, 1670 a 1940 kN. Praskliny měly vertikální směr a pravděpodobně vznikly vlivem příčného tahu vznikajícího rozdílnými deformacemi cihel a malty v příčném směru. Žádná z prasklin neměla vliv na ztrátu integrity cihel ani na celkovou stabilitu pilíře. V průběhu experimentu byly zaznamenávány vodorovné deformace, svislá napětí a působící síla. Vodorovné deformace byly měřeny ve třech výškových úrovních pro dva na sebe kolmé směry. Maximální vodorovné deformace 1,39 mm bylo dosaženo ve směru osy z v horní třetině výšky zkušebního tělesa. V témže místě v kolmém směru byla naměřena vodorovná deformace 1,35 mm. Výslednice těchto deformací vychází 1,94 mm, což odpovídá přibližně 1/1530 výšky pilíře. Naměřená deformace byla zanedbatelná.

Napětí pro homogenní čtvercový průřez o rozměrech 240 x 240 mm lze vypočítat jako podíl působící síly k průřezové ploše. V tomto případě se vypočtené napětí při maximální síle 2000 kN rovná 34,7 MPa. Naměřené hodnoty z tenzometrů se od vypočteného napětí lišily v rozpětí od 3 do 43 %. Jak je patrné z grafu na obr. 37, ve směru osy y bylo zatížení v horní čtvrtině pilíře vnášeno bez excentricity. Oproti tomu na hodnotách osy z, tenzometry 10 a 12, je patrná odchylka, která naznačuje vliv ohybu, obr. 37.



Obr. 37: Svislé tlakové napětí v horní čtvrtině pilíře

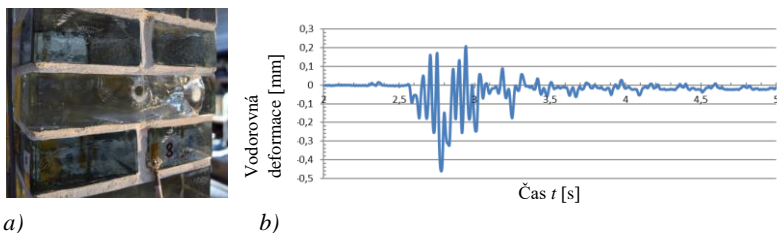
Srovnání napětí naměřeného pomocí tenzometrů s teoretickou hodnotou napětí uprostřed výšky pilíře je znázorněno na obr. 38.



Obr. 38: Svislé tlakové napětí uprostřed výšky pilíře

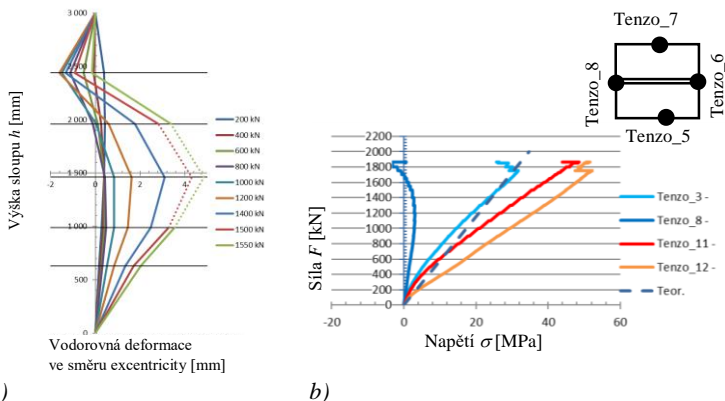
Zkušební těleso bylo po zkoušce na únosnost vystaveno zkoušce nárazem měkkým tělesem, které bylo simulováno plátěným vakem o hmotnosti 50 kg plněným tvrzenými skleněnými kuličkami o průměru 3 mm. Velikost nárazové energie se lišila výškou pádu tělesa – 200 a 400 mm. Náraz měkkého tělesa nezpůsobil okem viditelné poškození pilíře ani lokální poškození cihel nebo malty. V případě nárazu tvrdého předmětu, ocelové koule o hmotnosti 51 kg z různých výšek dopadu nárazového tělesa, došlo k lokálnímu poškození skleněných cihel, viz obr. 39a). Zděný pilíř byl při nárazu zatížen silou 50 kN. Deformace pilíře po nárazu je znázorněna na obr. 39b). Kromě lokálního porušení nedošlo k destrukci pilíře (experiment 01), který byl následně rozdělen na dvě části zkušební samostatně ve zkušebním zařízení schopném vyvinout zatížení 4000 kN. První část pilíře se porušila při dosažení síly 2000 kN, významný rozvoj trhlin nastal při síle 2500 kN. Zkušební těleso bylo nadále schopno

přenášet zatažení, maximální síly bylo dosaženo při zatížení 2760kN, kdy byla zkouška ukončena. V případě druhé části zkušebního tělesa bylo dosaženo maximální síly 1750 kN. Nižší únosnost této části pilíře z experimentu 01 byla pravděpodobně způsobena počátečním poškozením ze zkoušky nárazem.



Obr. 39: a) Lokální porušení skleněné cihly v místě nárazu, b) Průběh vodorovné deformace ve směru nárazu uprostřed výšky (výška pádu ocelové koule 600 mm)

Druhé zkušební těleso, experiment 02, bylo zatěžováno excentricky působící tlakovou silou. Působíště zatížení bylo ve vzdálenosti 40 mm od svislé osy pilíře. Zkouška byla řízena silou rychlostí 100 kN/min po krocích, mezi kterými byla přestávka 2 minuty, při které byla udržována konstantní síla. První prasklina se objevila při síle 1450 kN, kdy došlo k lokálnímu porušení na spodním okraji jedné z cihel uprostřed výšky. Toto porušení mohlo být způsobeno nečistotou v mikrostruktuře skla, která vznikla při výrobě cihly. Obdobný způsob porušení se vyskytl i při síle 1600 kN. Naopak porušení typické pro předchozí experimenty bylo zaznamenáno při síle 1650 kN. Kolaps nastal při maximální dosažené síle 1864 kN. Se zvyšujícím zatížením narůstala deformace pilíře, viz obr. 40a), a zvyšovalo se napětí na tlačené straně pilíře. Po překročení tlakové pevnosti cihel došlo k jejich drcení přibližně uprostřed výšky pilíře, čímž se ještě více zvětšila deformace. Následně došlo ke kolapsu pilíře. Průběh napětí v závislosti na síle uprostřed výšky je znázorněn na obr. 40b). Z grafu je vidět výrazné vybočení pilíře ve srovnání s centricky tlačným zkušebním tělesem, viz obr. 38.



Obr. 40: Experiment 02 - a) Vodorovná deformace pilíře ve směru excentricity zatížení, b) Závislost napětí na síle uprostřed výšky pilíře

Provedené experimenty zděných pilířů z plných cihel prokázaly dostatečnou únosnost, tj. do prvního porušení, které však neznamenalo kolaps zkušebního tělesa. Následným přitížením docházelo k nárůstu počtu popraskaných skleněných cihel. Zbytková únosnost i v případě excentricky zatíženého pilíře zaručuje spolehlivost a bezpečnost navrženého konstrukčního prvku.

5.3 Návrhový model zděného pilíře

Navrhováním zdiva se zabývá norma ČSN EN 1996-1-1 [20]. Tato norma explicitně nepředpokládá pro zdivo použití skleněných cihel, avšak připouští použití stejných zásad a aplikačních pravidel i pro jiné druhy materiálů. Z toho vyplývá, že obecně je možné tuto normu pro návrh zdiva ze skleněných cihel použít. Pro předběžný návrh zděných pilířů ze skleněných cihel lze použít následující návrhový postup.

Dle ČSN EN 1996-1-1 [20] jsou zdicí prvky (cihly) řazeny buď do kategorie I nebo do kategorie II. Kategorii zdicích prvků určuje výrobce podle pravděpodobnosti, s jakou zdicí prvek nedosáhne deklarované pevnosti. Pokud je tato pravděpodobnost menší než 5 %, potom je zdicí prvek zařazen do kategorie I, v ostatních případech do kategorie II. . Dále se zdicí prvky zařídují do skupin 1 až 4 podle velikosti a orientace děr a dutin. Zařídění opět provádí výrobce. V případě zkoušených plných skleněných cihel doporučujeme zařídění

do kategorie I a skupiny 1. Charakteristickou pevnost zdiva lze stanovit podle vztahu (18) určeného pro zdivo zhotovené z obyčejné malty (tj. ne pro zdivo s tenkými spárami).

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}, \quad (18)$$

kde f_b je normalizovaná pevnost zdících prvků v tlaku; f_m je pevnost malty v tlaku; K je součinitel závislý na druhu zdících prvků a malty. Hodnota součinitele K není pro skleněné zdící prvky normou definována, norma však definuje hodnotu pro cihly z umělého kamene, jejichž vlastnosti jsou srovnatelné se skleněnými cihlami, je proto možné doporučit hodnotu $K = 0,45$. Charakteristická únosnost se vypočte jako

$$N_{R,k} = \Phi \cdot A \cdot f_k, \quad (19)$$

kde A je plocha zdiva, Φ je součinitel zohledňující excentricitu zatížení, která může nastat vlivem ohybového momentu způsobeného výstředností zatížení stropů v podporách, dále výstřednost od vodorovného zatížení, výstřednost od dotvarování nebo počáteční výstřednost.

Srovnávací výpočet byl proveden pro zkoušený zděný pilíř o výšce 3 m čtvercového průřezu 240 x 240 mm. Pevnost malty byla uvažována podle technického listu výrobce $f_m = 10$ MPa. Při kontrolních zkouškách byla v laboratořích FSv naměřena hodnota 25,97 MPa. Pevnost zdících prvků v tlaku byla uvažována hodnotou $f_b = 109,2$ MPa. Součinitel excentricity byl uvažován jako $\Phi = 1$. Vypočtená únosnost $N_{R,k} = 1391$ kN představuje charakteristickou hodnotu únosnosti v prostém tlaku, tj. bez započtení součinitelů spolehlivosti a bez zahrnutí vlivu vzpěru. Při experimentu byla naměřena síla při vzniku první praskliny ve skleněné cihle 1325 kN resp. 1450 kN. Porovnáním naměřených a vypočtených hodnot je vidět, že postup uvedený v normě předpovídá zatížení při vzniku první praskliny. Pro použití při návrhu konstrukce se tato hodnota snižuje s ohledem na možný rozptyl materiálových vlastností, zjednodušení v návrhovém modelu, náhodnou excentricitu zatížení a další vlivy, které není možné přímo zohlednit, pomocí součinitele spolehlivosti materiálu γ_M .

6. Závěr

Sklo se ve stavebnictví používá po staletí jako výplň stavebních otvorů, teprve v posledních 20 až 30 letech se začalo používat i na nosné konstrukční prvky. Ve srovnání s tradičními materiály jako je dřevo nebo ocel má sklo nízkou tahovou pevnost a porušuje se křehkým lomem bez předchozího varování. Z tohoto hlediska tedy není nejvhodnějším stavebním materiálem, přesto má v současné architektuře své nezastupitelné místo. I do budoucna lze předpokládat, že v omezené míře najde své uplatnění. V současnosti brání většímu využití dostatečné znalosti o chování konstrukčních prvků ze skla, nedostatek předpisů a normativních podkladů.

Přednáška shrnuje výzkum nosných konstrukcí ze skla, který byl proveden v posledních letech na ČVUT v Praze. První část se věnuje popisu chování vrstvených konstrukcí ze skla při zatížení kolmo k povrchu se zaměřením na viskoelastické vlastnosti fólií, které se používají jako vložená mezivrstva u vrstvených skel, a dopad těchto vlastností na přenos zatížení.

Druhá část přednášky se zabývá experimentálním výzkumem nosných konstrukčních prvků. Jsou zde shrnuty výsledky experimentů zabývajících se příčnou a torzní stabilitou hybridních nosníků ze skla a oceli, které mohou najít své uplatnění jako podpurný konstrukční prvek střešních či stropních desek nebo jako výztužná žebra skleněných fasád. Další část je věnována výzkumu tlačných prvků ze skla – centricky namáhaného sloupu uzavřeného průřezu a zděného pilíře z plných skleněných cihel.

Přestože se výzkumem nosných konstrukcí ze skla zabývá řada evropských univerzit, stále není tato oblast dostatečně prozkoumána. Při realizacích se tak projektanti setkávají s nedostatkem informací, zejména ohledně chování nosníků, sloupů či stěn včetně ztráty stability, navrhování detailů a spojů. Tyto oblasti zatím plně nepokryje ani připravovaná evropská norma prCEN/TS 19100:2020 Design of glass structures. Návrh v současnosti realizovaných konstrukcí tak vychází z nejnovějších poznatků, numerických modelů a experimentálního ověření konstrukcí v reálném měřítku, což vede k vysokým nákladům a jejich omezenému rozšíření.

7. Literatura

- [01] ČSN EN 16612 Sklo ve stavebnictví - Stanovení únosnosti příčně zatížených tabulí skla výpočtem, ÚNMZ, 2020.
- [02] ČSN EN 16613 Sklo ve stavebnictví - Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo - Stanovení viskoelastických vlastností mezivrstvy, ÚNMZ, 2020.
- [03] Ferry, J.: *Viscoelastic properties of polymers*, John Wiley & Sons, 1980, p. 641. ISBN 0-471-04894-1.
- [04] Brinson, H.F., Brinson, L.C.: *Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction*. Springer Science, 2015, ISBN 978-1-4899-7485-3.
- [05] Hána, T.; Vokáč, M.; Eliášová, M.; Machalická, K.V.: *Experimental investigation of temperature and loading rate effects on the initial shear stiffness of polymeric interlayers*. Engineering Structures. 2020, 223, ISSN 0141-0296.
- [06] Hána, T.; Eliášová, M.; Machalická, K.V.; Vokáč, M.: *Stanovení smykového modulu folií PVB a EVA v závislosti na teplotě a rychlosti zatížení*. TZBinfo. 2018, 20(30.04.2018), ISSN 1801-4399.
- [07] LAKES, Roderic S. *Viscoelastic materials*. New York: Cambridge University Press, 2009. ISBN-13 978-0-521-88568-3.
- [08] Galuppi, L. et al.: *Practical expressions for the design of laminated glass*, Comp Part B, no. 45, pp. 1677–1688, 2013.
- [09] Netušil, M., Eliášová, M.: *Design and evaluation of bonded composite glass beams*. ICE Proceed-ings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings. 2015, 168(7), p. 490-499.
- [10] Eliášová, M.; Pravdová, I.: *Lateral torsional buckling of hybrid steel-glass beams*. In: Proceedings of the International Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2019). Leiden: CRC Press/Balkema, 2019. p. 379-387. ISBN 9780367335038.
- [11] Trahair, N.S., Bradford, M. ., Nethercot, D.A., Gardnesr, L.: *The behaviour and design of steel structures to EC3*. Taylor & Francis, 2008. ISBN 978-0-415-41865-2.
- [12] Feldmann, M., Kasper, R. et al.: *Guidance for European structural design of glass components: support to the implementation*,

harmonization and further development of the Eurocodes.
Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
ISBN 978-92-79-35094-8.

- [13] Liuble, A., Crisinel, M.: *Stability of Load Carrying Elements of Glass.* In: EU COST C13 Glass and interactive Building Envelopes – Final Report. 2007. s. 195 – 208. Volume 1. ISBN 978-1-58603-709-3.
- [14] Luible A., Crisinel M.: *Buckling strength of glass elements in compression.* Structural Engineering International. 2004, 120-125
- [15] Oikonomopoulou F., van den Broek E.A.M. et al: *Design and experimental testing of the bundled glass column.* Glass Structures & Engineering volume 2, 2017, p. 183–200, ISSN 2363-5142.
- [16] Kalamar, R., Bedon, Ch., Eliášová, M.: *Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns.* Engineering Structures. 2016, 113, 1-15. ISSN 0141-0296.
- [17] Bažant Z., Cedolin L.: *Stability of structures, Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories.* 2010, ISBN-13 978-981-4317-02-3.
- [18] Kalamar, R., Bedon, Ch., Eliášová, M.: *Assessing the structural behaviour of square hollow glass columns.* Engineering Structures. 2017,(143), 127-140. ISSN 0141-0296.
- [19] Fíla, J.; Eliášová, M.; Sokol, Z.: *Experimental investigation of mortar mechanical properties for glass brick masonry.* Glass Structures & Engineering. 2019, 4(1), 127-141. ISSN 2363-5142.
- [20] [44] ČSN EN 1996-1-1+A1. *Navrhování zděných konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce.* 1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

Martina Eliášová

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

narozena: 8. 3. 1964 v Praze

Vzdělání

- 1984 – 1988 Ing. v oboru Pozemní stavby (podle individuálního studijního plánu s rozšířeným obsahem i rozsahem studia se zaměřením na konstrukční soustavy – komplexní technicko – fyzikální analýza), FSv ČVUT v Praze
- 1994 CSc. v oboru Teorie a konstrukce inženýrských staveb, disertační práce: Tuhoplasticitní analýza ocelových desek s konstrukční ortotropií, Kloknerův ústav ČVUT v Praze
- 2014 doc. v oboru Teorie stavebních konstrukcí a materiálů, habilitační práce: Hybridní nosníky z oceli a skla, FSv ČVUT v Praze

Zaměstnání

- 1988 - 1991 vědecký aspirant ve vědním oboru "Teorie a konstrukce inženýrských staveb", KÚ ČVUT
- 1991 - 1995 odborný pracovník v oddělení konstrukcí, KÚ ČVUT
- 1995 - 2014 odborný asistent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí, FSv ČVUT v Praze
- 2014 – dosud docent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí, FSv ČVUT v Praze

Zahraníční stáž

- 1997 3 měsíční stáž na Universidade de Coimbra, Portugal – Tempus projekt
- 2004 1 měsíc stáž na Faculté ENAC, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Switzerland, v rámci COST Action C13 “Glass and interactive building envelopes”

Pedagogická činnost

- Přednášky: Navrhování nosných konstrukcí – ocelové a dřevěné konstrukce (bakalářské studium)
Ocelové konstrukce 2 (magisterské studium)

Nosné konstrukce ze skla (bakalářské studium)
Navrhování skleněných konstrukcí (magisterské studium)
Glass structures

Další: Skleněné konstrukce (doktorské studium)
obhájené disertační práce - 6, doktorandi po SSZ - 3,
od roku 1997 diplomové práce – 120, bakalářské práce - 92,
vedení projektů a cvičení.
2013, 2015 týdenní výukový pobyt na Civil Engineering
Department, Univesidade de Coimbra, Portugal v rámci
European Erasmus Mundus Master Course, přednášky
„Advanced design of glass structures“.
2014, 2017 týdenní výukový pobyt na Steel Structures and
structural mechanics, Civil Engineering Faculty,
'Politehnica' University of Timisoara, Rumunsko, v rámci
European Erasmus Mundus Master Course, přednášky
„Advanced design of glass structures“.

Oblasti výzkumu

Nosné konstrukce ze skla, stabilita konstrukčních skleněných prvků namáhaných tlakem a ohybem, hybridní nosníky ze skla a oceli, lepené spoje konstrukcí ze skla, visko-elastické vlastnosti polymerních fólií vrstvených skel.

Členství v organizacích a komisích

Členka za ČR v CEN TC250/WG3 „Structural Glass“ 2012 -2016, CEN
TC250/SC11 Structural Glass; 2016 - dosud
Členka Management committee za ČR - European action COST Action
C13 “Glass and Interactive Building Envelopes” 2000 - 2005
Členka Management committee za ČR – European COST Action TU0905
“Structural Glass- Novel Design Methods and Next generation
Products”, 2010 – 2014
MC substitute, členka za ČR – COST Action TU1403, Adaptive facade
systems, 2014 - 2019.
MC Substitute, členka COST Action COST Action CA18120 - Reliable
roadmap for certification of bonded primary structures; 2018 – 2022
Členka redakční rady odborného časopisu Glass Structures &
Engineering (ISSN 2363-5142, Springer), 2016 – dosud.

Členka redakční rady odborného časopisu Architecture, Structures and Construction (ISSN 2730-9886, Springer), 2021 - dosud
WTA Česká republika - Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky, 2019 - dosud

Řešitel či spoluřešitel externích grantů

GAČR č. 18-10907S „Mechanické vlastnosti polymerních lepených spojů pro aplikace ve stavebnictví s ohledem na působení okolního prostředí a stárnutí“ – řešitelka (2018-2020)

GAČR č. 14-17950S „Spolupůsobení skleněných desek spojených polymerní vrstvou“ – řešitelka (2014 – 2016)

grant MŠMT v programu COST č. LD11037 „Experimentální a numerická analýza kompozitních konstrukcí ze skla“ – řešitelka (2011 – 2013)

GAČR 19-15326S Návrh a pokročilé modelování skleněných konstrukcí odolných proti násilnému vniknutí a průstřelu – spoluřešitelka (2019-2021)

TACR TH03010175 Skrytý kotevní bod pro vrstvené skleněné konstrukce - spoluřešitelka (2018 – 2020)

GAČR 16-17461S Dynamické materiálové vlastnosti viskoelastických fólií používaných ve vrstvených sklech - spoluřešitelka (2016 – 2018)

GAČR 16-14770S Pokročilé počítačové a experimentální modelování konstrukcí z laminovaného skla zatížených nízko rychlostním rázem - spoluřešitelka (2016 – 2018)

COST LD15078 Pokročilá analýza lepených spojů pro lehké obvodové pláště - Inovativní řešení pro připojení vnějších prvků adaptabilní fasády - spoluřešitelka (2015 – 2017)

Vybrané publikace

Hána, T.; Vokáč, M.; Eliášová, M.; Vokáč Machalická, K.: Experimental investigation of temperature and loading rate effects on the initial shear stiffness of polymeric interlayers. Engineering Structures. 2020, 223 ISSN 0141-0296.

Fíla, J., Eliášová, M., Sokol, Z.: Experimental investigation of mortar mechanical properties for glass brick masonry. Glass Structures & Engineering. 2019, 4(1), 1-15. ISSN 2363-5150.

- Eliášová, M.; Pravdová, I.: Lateral torsional buckling of hybrid steel–glass beams. In: Proceedings of the International Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2019). Leiden: CRC Press/Balkema, 2019. p. 379-387. ISBN 9780367335038.
- Machalická, K., Eliášová, M.: Adhesive joints in glass structures: effects of various materials in the connection, thickness of the adhesive layer, and ageing. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2017, 72s. 10-22. ISSN 0143-7496.
- Kalamar, R., Bedon, Ch., Eliášová, M.: Assessing the structural behaviour of square hollow glass columns. Engineering Structures. 2017, 0(143), s. 127-140. ISSN 0141-0296.
- Kalamar, R., Bedon, Ch., Eliášová, M.: Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns. Engineering Structures. 2016, 113s. 1-15. ISSN 0141-0296.
- Netušil, M. Eliášová, M.: Design and evaluation of bonded composite glass beams. ICE Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings. 2015, 168(7), s. 490-499. ISSN 0965-0911.

Uplatnění v praxi

Prodej licence na užitný vzor CZ 22142, CZ 22143 (Hybridní nosník ze skla a oceli) firmě OGB s.r.o., licenční smlouva je vedena na FSv ČVUT pod č. 1117000134.

Spoluautorka celkem 6 užitných vzorů.

Ohlasy prací a další vybrané aktivity

Citace prací v databázi WoS 163 (bez autocitací), $h = 7$; v databázi Scopus 211 (bez autocitací), $h = 9$.

2x vypracování posudku pro FWO Vlaanderen (Research Foundation - Flanders), 1x vypracování posudku pro Swiss National Science Foundation.

Členka organizačního výboru konference 4x Challenging Glass - Conference on the Architectural and Structural Application of Glass, 3x ICSA - International Conference on Structures and Architecture.

17 recenzí článků v impaktovaném časopise.

Oponentka disertační práce TU Ostrava a TU Bratislava.