



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

SKLENĚNÝ SLOUP UZAVŘENÉHO PRŮŘEZU NAMÁHANÝ CENTRICKÝM TLAKEM

Glass column with hollow cross-section subjected to axial force

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Roman Kalamar

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

Čestné prohlášení

Jméno doktoranda: Ing. Roman Kalamar

Název disertační práce: Skleněný sloup uzavřeného průřezu namáhaný centrickým tlakem

Prohlašuji, že jsem předloženou doktorskou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martiny Eliášové, CSc. a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem a etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 25. 1. 2019

Podpis.....

Poděkování:

Práce, kterou si Vám dovoluji předložit, vznikla v letech 2012 – 2019 v rámci prezenčního a kombinovaného studia a je shrnutím rozsáhlého výzkumu, za jehož průběh a odborné vedení děkuji zejména své školitelce doc. Ing. Martině Eliášové, CSc.

Výzkum byl dále podpořen společností SIPRAL, a.s. Zejména si vážím odborné konzultace a děkuji za ni Ing. Martinu Fučíkovi. Velice si cením jeho osobního přístupu v začátcích celého projektu, při výrobě zkušebních těles a později i při zajištění zkušebních těles.

Dále bych rád poděkoval celé firmě SIKA CZ, s.r.o. a zvláště pak Ing. Jiřímu Rumlovi, jehož osobní podpora a zaškolení v oblasti technologií lepidel vedlo k více než uspokojivým výsledkům. Zejména si cením jeho vlastní invence a zkušeností, o které se velmi ochotně podělil při zhotovování prvních zkušebních těles.

V neposlední řadě mnohokrát děkuji všem svým kolegům a přátelům z katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, kteří věnovali svůj čas a pomocnou ruku při výrobě skleněných sloupů, jmenovitě bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Svobodovi, Ing. Jiřímu Ilčíkovi.

Rád bych poděkoval Experimentálnímu centru a všem jejích pracovníkům, kteří byli vždy nápomocni se zajištěním a provedením důležité části této disertační práce, tedy s experimentálním ověřením chování centricky zatíženého sloupu v tlaku.

ABSTRAKT

V současné architektuře se výrazně uplatňuje sklo, které se nově používá i na nosné prvky a konstrukce. Pro navrhování těchto konstrukcí je zapotřebí dostatek informací o jejich chování při zatížení. Přitom je nutné uvážit, že oproti dosavadním materiálům běžně používaným na nosné konstrukce má sklo sice dostačující pevnost v tlaku, ale již ne v tahu a navíc je křehké, takže k jeho porušení dochází náhle bez viditelné deformace a tudíž i bez varování. Skleněné konstrukce se proto často kombinují s jinými materiály tak, aby byly co nejlépe využity vlastnosti každého z nich.

Pro navrhování nosných skleněných či hybridních konstrukcí dosud nejsou k dispozici žádné předpisy a pravidla, tudíž se vychází z výsledků nepříliš rozsáhlých výzkumů. K dispozici jsou pouze předpisy či tabulky pro základní konstrukční případy, např.: tepelně izolační skla.

Novým architektonickým prvkem je skleněný sloup, který využívá nejvýznamnější přednosti skla, tedy transparentnost. Skleněný sloup je složený pouze ze skleněných tabulí do uzavřeného čtvercového průřezu s využitím nejnovějších typů lepidel. Chování reálného sloupu je popsáno v následující disertační práci a ověřeno pomocí numerických modelů v programu ANSYS a pomocí analytického modelu.

Klíčová slova: sklo, sloup, ztráta stability, návrhové přístupy, lepidlo, numerický model, experimentální ověření, náraz, analytický model

Introduction

The current architecture is significantly marked with glass that is newly used for carrier elements and structures. The design of these structures requires a sufficient amount of information concerning their behaviour under load. It must be considered that, in comparison with support structure materials used until now, glass is sufficiently durable in compression but not in tension and it is also fragile. As a result, failure occurs suddenly without visible deformation and thus without warning. Glass structures are therefore usually combined with other materials so as to make the best use of each of their features.

So far there are no rules or regulations available for designing glass or hybrid carrier structures so it is mostly based on results of not very extensive research. There are only regulations and tables for the purposes of basic design cases, e.g. heat insulating glass.

The glass column represents a new architectural element, which takes advantage of the most significant benefit of glass, i.e. transparency. The glass column is composed merely of glass sheets which form an enclosed square cross-section and are glued together with the latest types of adhesives. The behaviour of the real column is described in the following dissertation work and verified with numerical models in ANSYS as well as the analytical model.

Key words: glass, column, loss of stability, design approaches, glue, numerical model, experimental verification of glass column, impact, analytical model

ZÁKLADNÍ PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ:	8
1. ÚVOD	10
2. SKLO V ARCHITEKTUŘE A STAVEBNICTVÍ	10
2.1. VÝROBA PLOCHÉHO SKLA	10
2.2. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI PLAVENÉHO SKLA	11
2.3. OPTICKÉ VLASTNOSTI.....	13
2.4. DRUHY SKEL VE STAVEBNICTVÍ	13
2.4.1. <i>Plavené sklo</i>	13
2.4.2. <i>Tepelně tvrzené (kalené) sklo</i>	13
2.4.3. <i>Tepelně zpevněné sklo</i>	14
2.4.4. <i>Chemicky tvrzené sklo</i>	15
2.4.5. <i>Vrstvené sklo</i>	15
3. SKLENĚNÉ SLOUPY	17
3.1. KRUHOVÝ SLOUP Z VRSTVÉHO SKLA	17
3.2. SKLENĚNÉ SLOUPY VE TVARU KŘÍŽE	18
3.3. SKLENĚNÉ SLOUPY VE TVARU KŘÍŽE V NORDBORGU.....	19
3.3.1. <i>Architektonický koncept</i>	20
3.3.2. <i>Konstrukce skleněných sloupů</i>	20
3.3.3. <i>Statický výpočet sloupů</i>	21
3.3.4. <i>Zkušební tělesa v reálné velikosti</i>	21
3.3.5. <i>Závěr</i>	22
3.4. SKLENĚNÉ SLOUPY OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU	23
3.5. SLOŽENÉ SKLENĚNÉ SLOUPY	31
3.6. HYBRIDNÍ SKLENĚNÉ SLOUPY	33
3.6.1. <i>Návrh sklo – ocelového sloupu</i>	34
4. CENTRICKY ZATÍŽENÝ SLOUP ZE SKLA	40
4.1. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	40
4.2. METODA POUŽITÁ K DOSAŽENÍ CÍLE	40
4.3. UPLATNĚNÍ SKLENĚNÝCH SLOUPŮ V PRAXI.....	40
4.4. DÍLČÍ ETAPY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	40
5. SPOJOVÁNÍ NOSNÝCH KONSTRUKCÍ ZE SKLA	42
5.1. LEPENÉ SPOJE	42
5.2. MECHANISMY PORUŠENÍ.....	43
5.3. PŘÍPRAVA POVRCHŮ LEPENÝCH MATERIÁLŮ	43
5.4. ŽIVOTNOST A TRVANLIVOST LEPENÝCH SPOJŮ	44
5.4.1. <i>Dynamické zatížení</i>	44
5.4.2. <i>Zatížení teplotou</i>	44

5.4.3.	<i>Vlhkost a chemické látky</i>	45
5.4.4.	<i>UV záření</i>	46
5.5.	EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM LEPENÉHO SMYKOVÉHO SPOJE.....	46
5.6.	NUMERICKÝ MODEL LEPENÉHO SPOJE.....	47
5.6.1.	<i>Materiálové vlastnosti</i>	47
5.6.2.	<i>Kontakty</i>	48
5.6.3.	<i>Sít' MKP</i>	48
5.6.4.	<i>Nastavení výpočtu</i>	48
5.6.5.	<i>Analýza výsledků</i>	50
5.7.	ZHODNOCENÍ NUMERICKÉ ANALÝZY SPOJE	52
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ETAPA I	53
6.1.	SKLENĚNÝ SLOUP UZAVŘENÉHO PRŮŘEZU.....	53
6.2.	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	54
6.2.1.	<i>Zaměření imperfekcí dílčích panelů</i>	54
6.2.2.	<i>Značení vzorků a dílčích panelů</i>	54
6.2.3.	<i>Výroba zkušebních těles</i>	55
6.3.	PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ.....	57
6.4.	ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.02.....	58
6.5.	ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.01.....	60
6.6.	ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.03.....	61
6.7.	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ I. ETAPY.....	63
6.8.	ANALYTICKÝ MODEL.....	63
6.9.	NUMERICKÝ MODEL SKLENĚNÉHO SLOUPU.....	66
6.9.1.	<i>Předběžný numerický 3D model a porovnání výsledků s experimenty</i>	66
6.9.2.	<i>Zjednodušený 2D model a porovnání výsledků s experimenty</i>	69
6.10.	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ I. ETAPY EXPERIMENTŮ.....	71
7.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - ETAPA II	73
7.1.	ÚVOD.....	73
7.2.	POPIS ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	73
7.3.	MĚŘENÍ POČÁTEČNÍCH IMPERFEKČÍ.....	74
7.3.1.	<i>Předběžné měření zkušebních těles</i>	74
7.3.2.	<i>Měření vzorku optickým skenováním</i>	75
7.4.	VÝROBA SKLENĚNÝCH VZORKŮ.....	77
7.5.	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ÚNOSNOSTI SLOUPŮ II. ETAPY.....	79
7.6.	PRŮBĚH JEDNOTLIVÝCH EXPERIMENTŮ – ETAPA II.....	81
7.6.1.	<i>Zkušební těleso S 2.01</i>	81
7.6.2.	<i>Zkušební těleso S 2.04</i>	83
7.6.3.	<i>Zkušební těleso S 2.05</i>	84
7.7.	ANALYTICKÝ MODEL.....	86

7.7.1.	<i>Výpočet napětí v polovině výšky sloupu</i>	86
7.7.1.	<i>Výpočet napětí v patě</i>	89
7.8.	NUMERICKÝ MODEL 3D	93
7.9.	POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO MODELU S EXPERIMENTY.....	96
7.10.	ZÁVĚR NUMERICKÉ ANALÝZY A VALIDACE MODELU S VYUŽITÍM 3D PRVKŮ	99
7.11.	PARAMETRICKÁ STUDIE.....	100
7.12.	ZÁVĚR PARAMETRICKÉ STUDIE	105
8.	KYVADLOVÁ ZKOUŠKA	106
8.1.1.	<i>Analýza podložek</i>	107
8.1.2.	<i>Zkušební těleso S 2.02</i>	109
8.1.3.	<i>Zkušební těleso S 2.03</i>	111
9.	ZÁVĚR	114
9.1.	HLAVNÍ DOSAŽENÉ CÍLE	115
9.2.	HODNOTNÉ VÝSTUPY	115
9.3.	DOPORUČENÍ BUDOUCÍHO VÝZKUMU.....	116
10.	LITERATURA	117
11.	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	119
12.	PŘÍLOHY	121
12.1.	PŘÍLOHA 1	121
13.	SEZNAM OBRÁZKŮ	123
	SEZNAM TABULEK	127

ZÁKLADNÍ PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ:

T_s	<i>bod tavení skla</i>
α_t	<i>součinitel teplotní roztažnosti</i>
ρ	<i>objemová hmotnost skla</i>
E_{glass}	<i>Youngův modul pružnosti</i>
ν	<i>Poissonův součinitel</i>
σ_{cr}	<i>kritické napětí</i>
σ	<i>normálové napětí</i>
I_t	<i>St. Venantova torzní konstanta pro křížový průřez</i>
I	<i>moment setrvačnosti</i>
G	<i>smykový modul</i>
N_{cr}	<i>Eulerovo kritické břemeno</i>
λ_k	<i>geometrická štíhlost</i>
A	<i>plocha průřezu</i>
w	<i>maximální vodorovná deformace</i>
t_{PVB}	<i>tloušťka polymerní folie</i>
G_{PVB}	<i>smykový modul polymerní folie</i>
h_i	<i>výška skleněného panelu</i>
b_i	<i>šířka skleněného panelu</i>
t_i	<i>tloušťka skleněného panelu</i>
$f_{g,k}$	<i>charakteristická pevnosti skla v tahu</i>
$f_{g,d}$	<i>návrhová pevnost skla v tahu</i>
χ	<i>součinitel vzpěrnosti</i>
ω	<i>koeficient přenosu smyku</i>
N_{Ed}	<i>návrhová hodnota zatížení</i>
N_{Rd}	<i>návrhová hodnota únosnosti</i>
E_{glue}	<i>Youngův modul pružnosti lepidla</i>
ν_{glue}	<i>Poissonův součinitel lepidla</i>
$f_{t,\text{glue}}$	<i>mez kluzu lepidla</i>
$E_{\text{tan,glue}}$	<i>tangenciální modul pružnosti lepidla</i>
τ	<i>napětí na smykové ploše</i>
$\tan \gamma$	<i>poměrná smyková deformace</i>
$N_{f,1}$	<i>maximální síla působící při porušení</i>
$N_{f,\text{max}}$	<i>maximální síla působící při kolapsu</i>
ΔN	<i>zbytková únosnost</i>

E_{PAD}	<i>Youngův modul pružnosti plastové podložky</i>
ν_{PAD}	<i>Poissonův součinitel plastové podložky</i>
w_{PAD}	<i>průhyb plastové podložky</i>
d	<i>tloušťka plastové podložky</i>
b_{PAD}	<i>půdorysná šířka plastové podložky</i>
AM	<i>analytický model</i>
NM	<i>numerický model</i>
σ_M	<i>napětí vyvozené ohybem</i>
σ_1	<i>normálové napětí zvýšené o účinek ohybového momentu</i>
σ_2	<i>normálové napětí snižené o účinek ohybového momentu</i>
$\sigma_{m,loc}$	<i>lokální napětí vyvozené ohybem</i>
$\sigma_{y,loc}$	<i>kontaktní napětí</i>
$t_{m,j}$	<i>vzdálenost těžišť dílčích vrstev skleněného panelu</i>
h_1	<i>výška panelu</i>
$t_{eff,w(\sigma)}$	<i>efektivní tloušťka skleněného panelu</i>
$A_{eff,w(\sigma)}$	<i>plocha jednoho panelu</i>
$I_{y,l,eff,w(\sigma)}$	<i>moment setrvačnosti dílčího panelu</i>
$I_{y,eff,w(\sigma)}$	<i>moment setrvačnosti celého průřezu</i>
β	<i>součinitel pro desky po obvodě kloubově podepřené</i>
q	<i>přepočtené plošné zatížení</i>
δ	<i>úhel vyjádřený průhybem desky a půdorysné šířky plastové podložky</i>
A_c	<i>kontaktní plocha lepidla</i>
$h_{c,1}$	<i>kontaktní výška</i>
$t_{c,1}$	<i>kontaktní šířka</i>
E_{Al}	<i>Youngův modul pružnosti hliníku</i>

1. ÚVOD

Sklo je jedním z nejstarších materiálů, které člověk využívá. Způsoby a oblasti, ve kterých se tento materiál používal, se v průběhu historie měnily spolu s novými technologickými postupy a rozvojem průmyslu. V současné době se sklo využívá i tam, kde to v minulosti nebylo možné. Oborem, který sklo představuje v nové funkci je architektura a stavitelství [1].

Architektura se stejně jako všechna odvětví lidské činnosti vyvíjí a s novými postupy se mění i požadavky a potřeby, zvláště pak u staveb. V několika uplynulých letech zaznamenaly skleněné konstrukce velký úspěch a to především mezi architekty a stavebníky. Skleněné konstrukce působí svou lehkostí, transparentností a vzdušností pozitivním dojmem. S ohledem na požadavky moderního pojetí architektury je sklo stále častěji používáno i na nosné prvky či celé konstrukce. Sklo již nemá pouze výplňovou funkci stavebních otvorů, ale podílí se na přenosu zatížení, jako je např. sníh, stálé či proměnné zatížení. V konstrukci se skleněné nosné prvky používají obvykle v kombinaci s jinými materiály, nejčastěji s ocelí.

Pro bezpečný návrh konstrukce ze skla však stále chybí potřebné znalosti a normativní předpisy a proto je každé použití nového nosného prvku ze skla zpravidla doprovázeno sérií experimentů a studiem jeho chování [2].

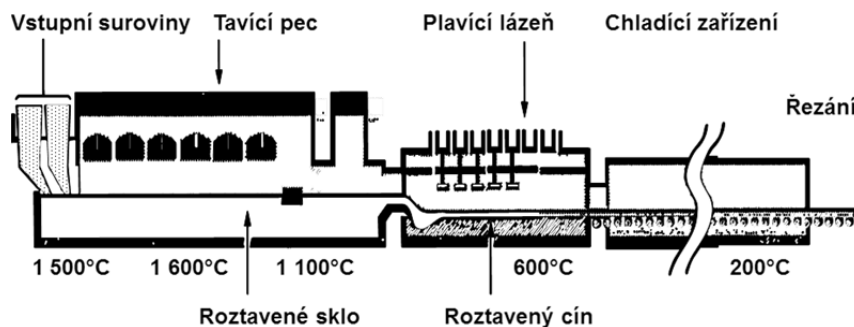
2. SKLO V ARCHITEKTUŘE A STAVEBNICTVÍ

2.1. VÝROBA PLOCHÉHO SKLA

Výroba plochého skla je historicky jednou z nejsložitějších technologií, která svým zvládnutím byla a je měřítkem vyspělosti společnosti.

Moderní výroba plaveného skla je sofistikovanou výrobní metodou, jež má vysoké požadavky na použité materiály sklářské tavící technologie a cínové plavící lázně, na strojní zařízení, na jeho spolehlivost a odolnost vůči extrémním podmínkám a současně vysokou úroveň logistiky.

Nejstarší nálezy skla se dochovaly v oblasti dnešní Sýrie z období 5. tisíciletí př. n. l. Objevy v Egyptě jsou poněkud mladší a jejich stáří se datuje do doby přibližně 3500 let před naším letopočtem. Výroba plochého skla má historii méně dlouhou. Za nejstarší způsob ruční výroby plochého skla je považováno lití skloviny do ploché formy a její uhlazení do tvaru desky. Další technologickým krokem představuje sklářská píšťala pro ruční výrobu. Významným posunem ve zpracování a výrobě plochého skla byl Fourcaultův způsob tažení, který se stal odrazovým můstkem pro zdokonalování a vývoj nových technologií. V současné době se k výrobě plochého skla používá metoda nepřetržitého lití a plavení skla. Metoda spočívá v kontinuálním dodávání základních materiálů do tavící pece. Základní materiál se při teplotě 600°C mění na sklovinu, která plave na hladině roztaveného cínu. Po vytvarování pásu prochází sklovina chladicí pecí, za kterou následuje ořezávání okrajů a dělení pásu na základní výstupní formáty [3]. Celý proces výroby je naznačen na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Schéma výroby plaveného skla [3].

2.2. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI PLAGENÉHO SKLA

Nejběžněji používaným druhem skla ve stavebnictví je sodnovápenaté křemičité sklo. Pro speciální případy (např. tepelně odolné sklo, tvrzené sklo) lze využít i borokřemičité sklo. Sklo, na rozdíl od oceli, nepodléhá korozi. V porovnání s běžnými stavebními materiály (např. ocel) sklo nemá pravidelnou krystalickou mřížku, ale pouze nepravidelnou síť složenou z atomů kyslíku, křemíku, sodíku a alkalických částí mezi nimi. Chemické složení skla má významný vliv na viskozitu, bod tavení T_s a na koeficient tepelné roztažnosti α_t , viz Tab. 2.1. Zatímco bod tavení je pro běžný oxid křemičitý 1710°C , lze tuto hodnotu snížit přidáním alkaloidů na rozmezí $1300 - 1600^\circ\text{C}$. Koeficient tepelné roztažnosti pro čisté křemičité sklo je $\alpha_t = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, u sodno-křemičitého skla je tento koeficient $\alpha_t = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [4].

Tab. 2.1: Dílčí zastoupení chemických prvků v plaveném skle

Název prvků		Sodnovápenato křemičité sklo	Borokřemičité sklo
Křemičitý písek	SiO_2	69 – 74 %	70 – 87 %
Oxid vápenatý	CaO	5 – 14 %	-
Soda	Na_2O	10 – 16 %	0 – 8 %
Oxid boritý	B_2O_3	-	7 – 15 %
Oxid draselný	K_2O	-	0 – 8 %
Oxid hořečnatý	MgO	0 – 6 %	-
Oxid hlinitý	Al_2O_3	0 – 3 %	0 – 8 %
Další příměsi		0 – 5 %	0 – 8 %

Sklo je křehký materiál a porušuje se vždy křehkým lomem. Lom nastává náhle a bez předchozího varování. Nelze tedy uvažovat s redistribucí lokálních špiček vlivem plastifikace materiálu, jako je tomu např. u oceli. Tento fakt klade vysoké nároky na návrh a provedení dílčích detailů v konstrukci nebo jednotlivých stavebních prvků ze skla. Základní materiálové vlastnosti plaveného skla jsou shrnuty v Tab. 2.2.

Teoretická pevnost skla v tahu, která je vypočtena na základě pevnosti dílčích vazeb molekul, dosahuje až 100 MPa. Experimenty však prokázaly, že skutečná pevnost plavené skla v tahu dosahuje vysokého rozptylu a to v rozmezí 30 – 80 MPa. Tento rozdíl je dán mnoha faktory. Nejvýznamnějšími faktory, které ovlivňují pevnost skla v tahu, jsou mikro a makro trhliny, které nejsou pouhým okem vidět. Trhliny mohou vzniknout již během výroby, při transportu, instalaci či údržbě nebo úmyslném poškození povrchu skleněného prvku.

Pevnost skla v tahu se mění v čase, neboť se mění s délkou působení zatížení. Obecně platí, že pevnost klesá s delší dobou působení zatížení. Při návrhu detailů či celé konstrukce je nutné uvážit a vyšetřit veškeré problémy související s rozvojem trhlin v tažených oblastech.

Dalšími faktory, které ovlivňují rozvoj trhlin, jsou rozměry instalovaného dílce a vlhkost prostředí. Při vyšší vlhkosti prostředí dochází k rychlejšímu šíření trhlin, viz Tab. 2.3.

Tab. 2.2: Materiálové vlastnosti plaveného skla [2]

			Sodnovápenaté křemičité- sklo	Borokřemičité sklo
Objem	ρ	kg/m ³	2 500	2 200 – 2 500
Tvrдость	$HK_{0,1/20}$	GPa	6	4,5 – 6
Youngův mod. pruž.	E	MPa	70 00	60 000 – 70 000
Poissonův součinitel	ν	-	0,23*	0,2
Součinitel teplotní roztáženosti	α_T	10 ⁻⁶ K ⁻¹	9	Tř 1: 3,1 – 4,0 Tř 2: 4,1 – 5,0 Tř 3: 5,1 – 6,0
Specifická teplotní kapacita	c_p	J.kg ⁻¹ K ⁻¹	720	800
Konduktance	λ	W.m ⁻¹ K ⁻¹	1	1
Emisivita	ε	-	0,837	0,837

* - v EN 572-1:2004 je uvedeno 0,2. Běžně se používají hodnoty v rozmezí 0,22 – 0,24.

Tab. 2.3: Závislost pevnosti skla na délce trvání zatížení [5]

Pevnost skla v tahu	Typ zatížení	Délka trvání zatížení
45 MPa	krátkodobé zatížení	10 sekund
25 MPa	dlouhodobé zatížení	Cca 50 dnů

2.3. OPTICKÉ VLASTNOSTI

Sklo lze definovat jako viskoelastický materiál, který je tuhý při pokojové teplotě, ale při přechodu na teplotu 580° C se stává tekutým. Absence krystalické mřížky způsobuje, že světelné paprsky mohou sklem procházet bez omezení, což vede k dobré průhlednosti a průsvitnosti skla v budovách.

Nesporně další optickou výhodou skla je schopnost dvojlomu. Dvojlom lze pozorovat v polarizovaném světle a této vlastností můžeme s výhodou využít při vyšetřování napjatosti ve skleněných prvcích pomocí fotoelasticimetrické metody [4].

2.4. DRUHY SKEL VE STAVEBNICTVÍ

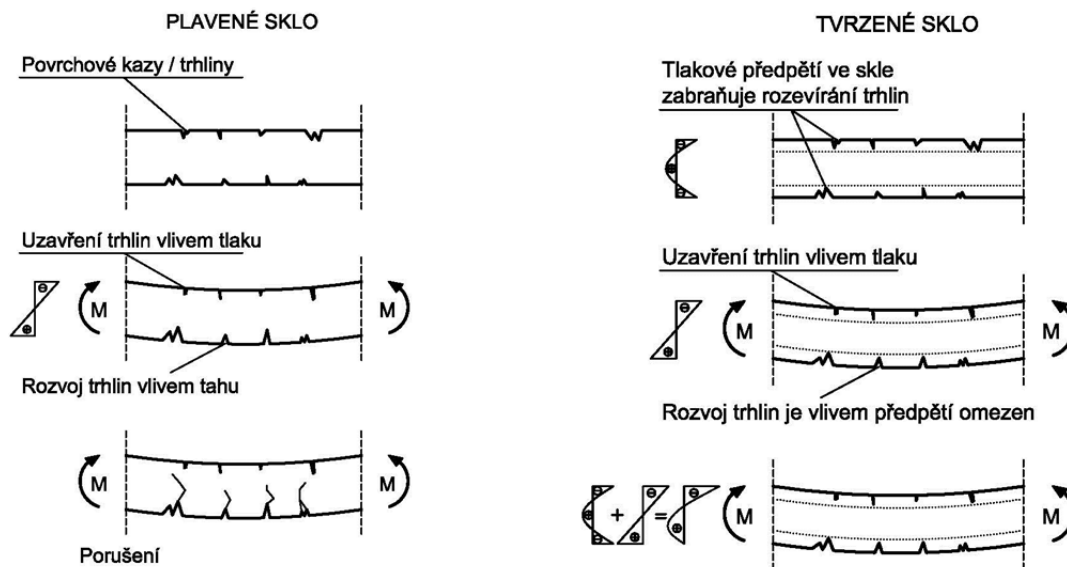
2.4.1. *Plavené sklo*

Plavené sklo je nejrozšířenějším typem skla ve stavebnictví. Tento druh skla již dále není tepelně upravován. Způsob výroby byl poprvé vyvinut Pilkingtonem roku 1952 [3]. Vzhledem ke způsobu výroby má plavené sklo nejnižší pevnost v tahu ze všech druhů používaných stavebních skel. Výhodou však je možnost vrtání otvorů nebo dělení skleněných tabulí přímo na stavbě. Běžně vyráběné tloušťky plochého skla jsou 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 a 19 mm s maximálním rozměrem tabule 3,2 x 6,0m. Rozměrové možnosti jsou dány výrobní linkou, ale především přepravou ze sklárny na staveniště.

Plavené sklo se při porušení tříští na velké střepy s velmi ostrou hranou. Velikost střepů i samotná hrana může být velmi nebezpečná pro uživatele, zejména pokud se jedná o zasklení střešních konstrukcí (obecně horizontální poloha) nad uživatelsky exponovaným prostorem. V průběhu navrhování konstrukcí z plaveného skla byly vyvinuty technologické postupy tak, aby byla zvýšena bezpečnosti při užití plaveného skla. Jednou z metod je upnutí skleněné tabule v rámu. Při porušení nedochází k odpadávání střepů a konstrukce si tak zachovává zbytkovou únosnost. Materiálové vlastnosti plaveného skla jsou uvedeny v tab. 1.2 [5].

2.4.2. *Tepelně tvrzené (kalené) sklo*

Tepelně tvrzené sklo se vytváří dodatečným temperováním plaveného skla na teplotu okolo 680°C a následným prudkým ochlazením obou povrchů tabule skla. Ochlazení se provádí zpravidla studeným proudem vzduchu. Ideou tepelně tvrzeného skla je vytvoření rozdílného gradientu napětí po tloušťce, přičemž při povrchu se vytváří tlakové napětí a v jádru průřezu je napětí tahové. Tlakové napětí při povrchu je s výhodou využito při návrhu nosných skleněných prvků [6]. Rozvoj trhlin při povrchu je zabráněno až do maximálního využití tlakového napětí při povrchu, viz Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Porovnání chování plaveného skla s tepelně tvrzeným sklem [7].

Vlivem povrchového napětí má tepelně tvrzené sklo větší pevnost v tahu, běžně 90-150 MPa. Před procesem chlazení je tak důležité provést mechanické opracování tabule skla, jako je vrtání otvorů a opracování hran, poté již nebude možné do tabulí zasahovat. Při porušení dochází k náhlé změně vnitřního gradientu napětí v celé ploše tabule, výsledkem je její porušení. Skleněná tabule se rozšpeje na velké množství malých úlomků, což má za následek nulovou zbytkovou únosnost. Tento jev lze částečně eliminovat použitím vrstveného (laminovaného) skla.

Další nevýhodou tvrzeného skla jsou větší počáteční imperfekce (zvlnění je dáno procesem výroby při pojíždění tabule po válcích, poklesy hran apod.), které vznikají v technologickém postupu. Velikost zakřivení má tvar sinusoidy a pro tvrzené sklo může dosahovat hodnoty až $L / 300$. V porovnání s plaveným sklem, kde jsou imperfekce zanedbatelné ($L / 2500$), se jedná o vysokou hodnotu [7].

2.4.3. Tepelně zpevněné sklo

Tepelně zpevněná skla vznikají stejným technologickým procesem jako tepelně tvrzená skla, ale úroveň vnášeného předpětí je nižší. Hodnoty napětí se pohybují v rozmezí od 35 MPa do 55 MPa.

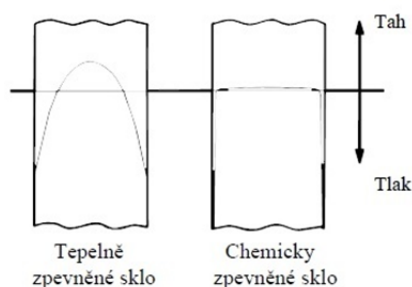
Dalším rozdílem oproti tvrzeným sklům je způsob porušení. Částečně zpevněné sklo má stejný způsob porušení jako plavená skla, tj. na velké kusy střepů.

Rovněž před procesem částečného tvrzení musí být provedeno veškeré mechanické opracování tabule (vrtání, úprava hran, řezání, apod.). Vzhledem k pomalejší výrobě jsou tato skla ve srovnání s tepelně tvrzenými skly dražší [7].

2.4.4. *Chemicky tvrzené sklo*

Chemický proces úpravy pevnosti skla je alternativním postupem, k tepelně upraveným sklům. Ve stavební praxi je užití chemicky tvrzeného skla velmi ojedinělé, pouze v případech, kde nelze využít skla tepelně tvrzená.

Proces chemického tvrzení spočívá v namáčení tabulí plaveného skla do elektrolytické lázně, ve které jsou ionty sodíku na povrchu tabule vyměňovány za ionty draslíku. Ionty draslíku jsou o 30% větší a tím vytvářejí ve vnější vrstvě tlakové napětí, viz Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Porovnání chování plaveného skla s tepelně tvrzeným sklem [7].

Tloušťka povrchového napětí je u chemicky tvrzeného skla výrazně slabší a proto i náchylnější k porušení. Výhodou je ale absence počátečních imperfekcí skleněného panelu, které vznikají během procesu tepelné úpravy. Deformace chemicky tvrzeného skla tak zůstávají srovnatelné s počátečními deformacemi plaveného skla [7].

2.4.5. *Vrstvené sklo*

Vrstvené neboli laminované sklo se skládá ze dvou nebo více tabulí skla, přičemž lze kombinovat jak druh použitého skla (plavené, tepelně tvrzené, tepelně zpevněné, chemicky tvrzené), tak i dílčí tloušťky jednotlivých tabulí. Obvykle se pro spojení skleněných tabulí používají folie PVB (polyvinylbutyal) se základní tloušťkou 0,38 mm, folie EVA (ethylenvinylacetát) či litá pryskyřice mezi tabule. Různými kombinacemi druhů skel lze docílit bezpečnostních tabulí odolných proti mechanickému poškození po dobu nezbytně nutnou (např. vandalismus, pád osoby apod.) či požárně odolných tabulí.

Proces výroby vrstveného skla lze obecně rozdělit na dva postupy. V prvním případě se folie a tabule skla skládají na sebe, předehejí se na 70°C a poté se slisují mezi válci, kde dojde k vytlačení přebytečného vzduchu. Poté jsou tabule umístěny do autoklávu, kde jsou při teplotě 140°C a tlaku 0,8MPa vrstveny.

Druhou možností je využití lité pryskyřice, která vyplní předem definovanou mezeru vertikálně umístěných tabulí skla.

Výhodou je, že vrstvené sklo poskytuje vyšší míru bezpečnosti, neboť při porušení střepy zpravidla ulpívají na folii [7], [8]. Způsoby porušení plaveného, tepelně zpevněného a tepelně tvrzeného skla je znázorněn na Obr. 2.4.



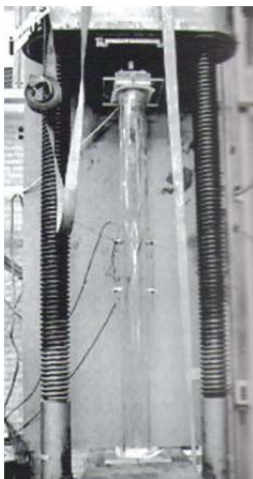
Obr. 2.4: Porušení vrstvených skel různého druhu [8].

3. SKLENĚNÉ SLOUPY

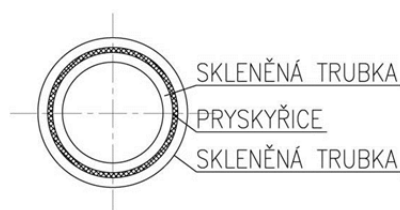
Kombinace vysoké pevnosti skla v tlaku a vývoj moderní architektury v oblasti skleněných konstrukcí vyústil ve zvýšený zájem o nosné skleněné sloupy. V moderním stavitelství zaměřeném na skleněné konstrukce je kladen důraz na dva faktory - první faktor se zaměřuje na složitosti výroby dílčího nosného prvku a druhý na celkovou praktičnost realizace nosného prvku.

3.1. KRUHOVÝ SLOUP Z VRSTVĚHO SKLA

Skleněný vrstvený sloup podle Obr. 3.1 a Obr. 3.2, byl navržen výzkumným týmem v průběhu několika let v laboratořích ZAPPI, Nizozemsko. Návrh byl převzat od Schotta Rohrglase. Schottův původní návrh sloupu využíval pouze vnitřní skleněnou trubku k přenosu svislého zatížení, přičemž vnější dělené půl trubky byly navrženy pouze k ochraně vnitřní nosné trubky (princip skořápky). Nový návrh sloupu z laboratoře ZAPPI využívá k přenosu zatížení vnitřní i vnější skleněnou trubku, přičemž obě skleněné trubky jsou spojeny litou pryskyřicí.



Obr. 3.1: Test skleněného sloupu



Obr. 3.2: Průřez vrstveného sloupu, [9]

Sloup byl od prvopočátku navržen plně transparentní, s dostatečnou únosností a zbytkovou únosností při porušení. Rozsáhlé experimenty naznačily, že sloup ze skleněných vrstvených trubek dosahuje velmi dobrých výsledků. Test v tlaku prokázal bezpečné graduující a kontrolované porušování, které splňovalo představu a filozofii výzkumného centra ZAPPI. Tato filozofie spočívá v navrhování prvků, které nejsou zbytečně předimenzované, ale přitom dosahují stejné bezpečnosti a únosnosti jako ostatní prvky z tradičních materiálů, které se běžně využívají pro přenos tlakové osové síly.

Koncept návrhu sloupu spočívá v laminaci dvou skleněných trubek vsazených do sebe a navzájem spojených speciální pryskyřicí. Výroba tohoto sloupu byla založena na osazení vnitřní skleněné trubky s poloměrem r_1 do vnější skleněné trubky s poloměrem r_2 ($r_1 < r_2$). Prostor mezi trubkami (0,8 – 2,0 mm) byl pomalu vyplňován tekutou pryskyřicí. Po tomto procesu a vytvrzení pojiva byl sloup připraven pro testování a následně pro osazení do konstrukce.

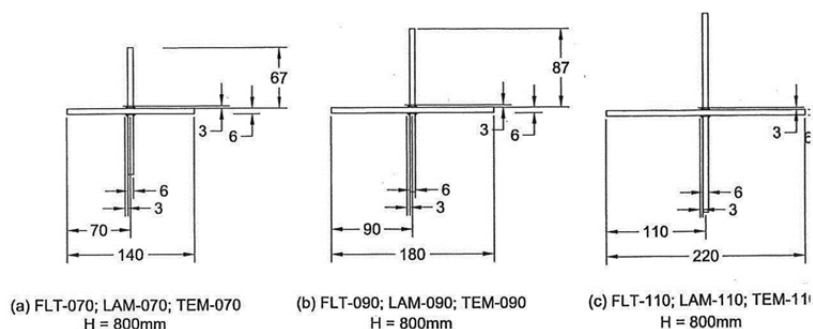
Transparentnost sloupu byla dosažena použitím dvou bezešvých skleněných trubek s rozdílným průměrem a plně transparentní pryskyřici (epoxidem). Další kritérium bylo splněno vhodným návrhem profilů trubek. Obě navržené trubky byly dostatečné únosné pro přenos zatížení.

Bezpečné porušení znamená, že se prvek během zvyšování zatížení postupně a viditelně porušuje (postupný rozvoj trhlin) a deformuje, než dojde k celkovému kolapsu. Bezpečné porušování zajišťovala pryskyřice, která držela vzniklé střepy pohromadě a zároveň v případě trhlin byla schopná přerozdělit napětí. Nedocházelo tak k odpadávání střepů od sloupu. Takto byla zajištěna zbytková únosnost, tj. únosnost od vzniku první trhliny do kolapsu sloupu. Tento koncept nosných skleněných tlačných prvků poskytuje v případě porušení dostatek času k evakuaci osob.

3.2. SKLENĚNÉ SLOUPY VE TVARU KŘÍŽE

Experiment publikovaný Dr. Mauro Overendem v roce 2005 si kladl za cíl představit a popsat chování skleněného sloupu ve tvaru kříže, který byl zatěžován centrickým tlakem.

Experimentální vzorky sloupů ve tvaru kříže se skládaly ze skleněných tabulí vysokých 800 mm. Jedna z tabulí byla vždy průběžná a k ní byly přilepeny z obou stran další skleněné tabule o poloviční šířce, viz Obr. 3.3. Celkem byla vyrobena tři zkušební tělesa o výšce 800 mm a šířce 140 mm, 180 mm, 220 mm.



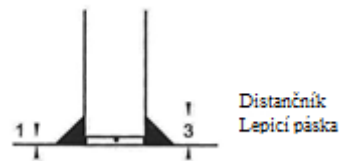
Obr. 3.3: Schéma průřezů křížového sloupu, [10]

Na vzpěrnou únosnost sloupu má přímý vliv druh skla. V praxi by byl sloup vyroben z tepelně tvrzeného nebo tepelně zpevněného vrstveného skla s ohledem na zbytkovou únosnost. Pro jednoduchost byly sloupy vyrobeny z jednovrstvého plaveného skla.

V případě použití vrstveného skla lze předpokládat vyšší odolnost sloupu proti nárazu. Vzniklé střepy, díky adhezi ulpí na mezivrstvě a konstrukční prvek dosáhne vyšší zbytkové únosnosti.

Dalším významným rozhodnutím byl výběr tvaru spoje jednotlivých částí, které tvořily tvar kříže. Jako nejvýhodnější spoj byl vybrán lepený přípoj po výšce sloupu, obr. 3.4. Na rozdíl od klasického šroubovaného spoje lepený spoj přenáší napětí rovnoměrně po celé délce spoje. Pro šroubovaný spoj je naopak typický vznik lokálních špiček napětí, které jsou obecně pro skleněné konstrukce nevhodné. Na spoj bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo, které bylo vybráno z několika důvodů. Hlavním důvodem byla tloušťka lepidla, která se může pohybovat v rozmezí 0,5 – 2 mm. Lepidlo také

v dostatečné míře vyrovnalo nerovnosti na povrchu skleněných panelů a mělo dostatečně dlouhou dobu na zpracování a osazení panelů do potřebné polohy.



obr. 3.4: Schéma lepeného spoje, [10]

K porušení zkušebních těles sloupů docházelo nejčastěji rozdrčením, tj. vysokým tlakovým namáháním, nebo ztrátou stability sloupu. Kritické napětí v sloupu s křížovým průřezem lze vyjádřit pomocí rovnice

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_0} \left(GI_t + \frac{4\pi^2 E C_w}{l^2} \right). \quad (3.1)$$

Příčemž I_t je St. Venantova torzní konstanta, která je dána rovnicí

$$I_t = \frac{4 \cdot b t^3}{3}. \quad (3.2)$$

I_0 je moment setrvačnosti křížového průřezu ke středu smyku, tj. těžišti průřezu

$$I_0 = \frac{4 \cdot b^3 t}{3}. \quad (3.3)$$

G je smykový modul pružnosti,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (3.4)$$

kde E je modul pružnosti $E = 70$ GPa, t - tloušťka panelu, b - šířka ramene.

Součinitel ν je Poissonův součinitel rovnající se hodnotě $\nu = 0,22$ a C_w je součinitel deplanace průřezu dle [11].

Navzdory nízké torzní tuhosti dosahuje sloup ve tvaru kříže poměrně vysoké únosnosti, je však nutné věnovat velkou pozornost detailu uložení sloupu v patě a v místě vnášení zatížení. Ve většině případů docházelo k porušení rotací sloupů na v místě uložení.

V počáteční fázi experimentu bylo vyřešeno několik montážních problémů, zvláště pak výběr vhodného lepidla a jeho zpracování a technologický postup sestavování sloupů [10].

3.3. SKLENĚNÉ SLOUPY VE TVARU KŘÍŽE V NORDBORGU

I malé projekty mohou významně přispět k pochopení toho, jak může být sklo použito v architektonickém návrhu nosných konstrukčních prvků. Během jednoho takového projektu byla postavena recepce se skleněnými sloupy průřezu kříže a se skleněnými portály s rámovými rohy namáhanými ohybem.

K dosažení maximální průhlednosti konstrukce byly skleněné sloupy navrženy tak, aby podporovaly plně transparentní skleněnou střechu. Před samotnou instalací byly provedeny experimenty, které měly určit únosnost sloupů a posoudit robustnost skleněných konstrukcí. Tyto zkoušky přinesly důležitý pohled na chování skla před jejich užitím v nosných konstrukcích. Důvěra v užití skla pro nosné

konstrukce postupnými krůčky roste na základě zkušeností získaných z projektování a výstavby drobných staveb. V rámci rekonstrukce sídla průmyslové společnosti v Nordborg Dánsku byla nová recepce budovy postavena s důrazem na maximální transparentnost.

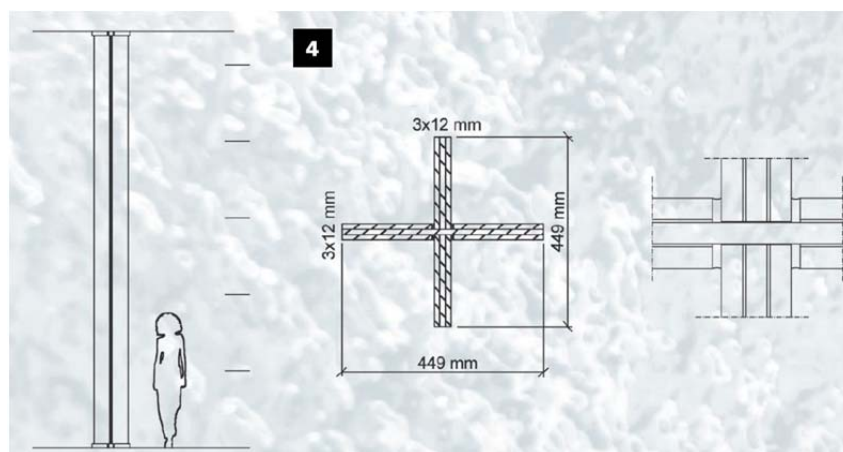
Střecha budovy s recepcí je podporována skleněnými sloupy křížového průřezu, prosklená fasáda umožňuje ničím nerušený výhled do okolí, Obr. 3.8

3.3.1. *Architektonický koncept*

Architektonickým konceptem budovy s recepcí bylo vytvořit nosnou konstrukci s rámovými příčnými vazbami, kterým se překlene jak prostor recepce, tak malý kruhový sál / kino. Návrh byl zaměřen na maximální transparentnost, čímž došlo ke zvýšení osvětlení prostorů přirozeným denním světlem a současně přiléhající bazén v exteriéru vytvoří žádoucí architektonický odlesk ve skleněné fasádě. Vzhledem k rozponu střešní konstrukce byly navrženy dvě řady skleněných sloupů. První variantou byly skleněné sloupy s kruhovým průřezem, ale poté byl tento návrh změněn na sloupy ve tvaru kříže. Důvodem této změny byla technologie výroby vrstvených kruhových sloupů. Nosnou konstrukci přední části budovy tvoří čtyři skleněné rámy navržené z vrstveného skla.

3.3.2. *Konstrukce skleněných sloupů*

Skleněné sloupy jsou přibližně 5,5 m vysoké o průřezu ve tvaru kříže s rozměrem 449×449 mm. Každé rameno kříže tvoří vrstvené sklo ze 3 vrstev o tl. 12 mm s mezivrstvou PVB folie o tl. 1,52 mm. Jedno rameno má průběžný skleněný střední panel a zbývající dvě části jsou k němu přilepeny po celé délce tuhým lepidlem, viz Obr. 3.5. Dodatečně vzniklé mezery 5 mm na každé straně přilepených ramen byly vyplněny transparentním silikonem. Velká pozornost byla věnována uložení skleněných sloupů. V těchto místech bylo důsledně zamezeno vnášení ohybového momentu. Konce sloupu byly uloženy do ocelových botek. Aby nedošlo ke kontaktu oceli a skla, byly do meziprostoru vloženy neoprenové pásy o tloušťce 10 mm.



Obr. 3.5: Průřez a detail styku spoje [12]

3.3.3. *Statický výpočet sloupů*

Statické výpočty zahrnovaly tyto případy:

A. Mezní stav únosnosti byl ověřen pro průřez složený pouze z jednovrstvého plaveného skla tl. 12mm, za předpokladu, že vnější vrstvy nepřispívají k celkové únosnosti sloupu. Návrhová hodnota zatížení byla uvažována 250kN.

B. Nehodový případ, ve kterém dojde k porušení jednoho ramene a zbylá tři ramena tvoří pouze dvouvrstvé skleněné tabule tl. 12mm. Vlivem porušení dochází k nesymetrii průřezu a excentrickému působení tlakové síly.

C. Další nehodový případ předpokládal působení soustředěného zatížení 0,7 kN na okraji průběžného ramene. Ke zvýšení bezpečnosti byla střešní konstrukce navržena tak, aby se působící síly přerozdělily do ostatních sloupů v případě, že by byl jeden ze sloupů odstraněn.

Výpočty prokázaly dostatečnou únosnost skleněných sloupů. V experimentu byl zahrnut účinek dynamického nárazu (např. náraz osoby do sloupu, viz Obr. 3.6).



Obr. 3.6: Soustředěné břemeno na konci průběžného ramene [12]

3.3.4. *Zkušební tělesa v reálné velikosti*

Zkušební těleso v měřítku 1:1 bylo zkoušeno na Technické univerzitě v Kodani v Dánsku. Sloup byl položen do horizontální polohy (podporován v 1/5 rozpětí) a podroben následujícím typům zatížení:

- Zatížení normálovou silou 250 kN po dobu 1 hodiny. Po tomto testu byly odstraněny ocelové botky a zkontrolovány neoprenové pásy.
- Sloup byl poté vystaven měkkému a tvrdému dopadu tělesa a současně byl zatížen normálovou silou 190 kN, porušený sloup je vidět na Obr. 3.7.
- Po testu dopadu tělesa byl sloup zatížen až do kolapsu.

Kolaps nastal dosažením normálové síle 575 kN ztrátou stability sloupu. Závěrem bylo konstatováno, že vrstvený křížový sloup má dostatečnou odolnost proti nárazu předmětu a že má i dostatečnou zbytkovou únosnost.



Obr. 3.7: Sloup v závěrečné fázi zkoušky [12]



Obr. 3.8: Skutečné provedení skleněných sloupů [12]

3.3.5. Závěr

Recepce budovy byla otevřena v roce 2006. Sloupy, skleněná fasáda i skleněné rámy plní svojí statickou funkci a to i při působení vnějších podmínek. Jediným problémem se zdá být to, že hmyz má tendenci uvíznout v malém prostoru mezi skleněnými deskami v místě rámového rohu, kde jsou skleněné panely přeplátovány [12], viz Obr. 3.9.



Obr. 3.9: Hmyz, jenž uvízl v mezeře plátového spoje [12]

3.4. SKLENĚNÉ SLOUPY OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU

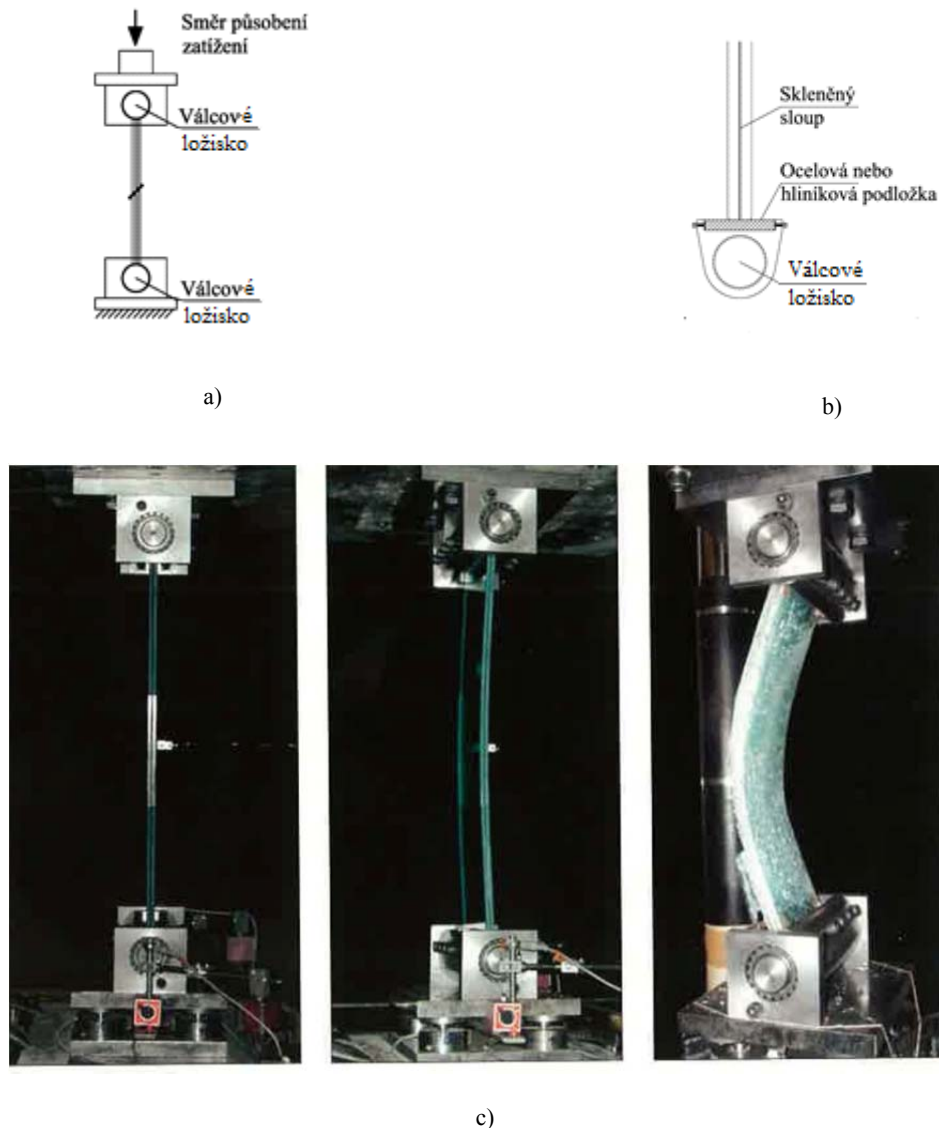
Již v roce 2004 proběhly první výzkumy zaměřené na ztrátu stability sloupů ve tvaru jednoduchého obdélníkového průřezu, kdy tloušťka průřezu je výrazně menší než výška průřezu. Výzkum proběhl na univerzitě EPFL, Lausanne ve Švýcarsku.

Hlavním cílem této studie bylo vytvoření numerického a analytického modelu, který byl porovnán s provedenými experimenty [13]. Zkušební tělesa se lišila rozdílným průřezem, délkou sloupů a počtem vrstev. Jednovrstvé vzorky měly nominální tloušťku 8 mm a 10 mm, vícevrstvé vzorky měly nominální tloušťku 2x 8 mm a 2x 10 mm, PVB folie měla vždy stejnou tloušťku 1,52 mm. U všech těles byla stejná výška průřezu, tedy 200 mm, výška sloupů byla proměnná od 350 mm do 1600 mm. Celkem bylo vyrobeno 80 zkušebních těles z tepelně tvrzeného a tepelně zpevněného skla. Zatěžování bylo prováděno pomocí kontrolované síly nebo pomocí kontrolovaných posunů. Experimenty byly provedeny za různých teplot z důvodu použití PVB folie, která výrazně mění své vlastnosti v závislosti na teplotě [14]. Visko-elastická transparentní PVB folie zajišťuje smykové spojení dílčích panelů. Smykový modul spoje byl v rozmezí 0,01 a 10 N/mm².

Počáteční geometrické imperfekce plaveného skla jsou způsobeny rozdílnou teplotou při ochlazování a pohybem skleněných tabulí po válcích při výrobě. Velikost počátečních deformací u plaveného skla je rovna $L / 2500$, kde L je délka skleněné tabule. Oproti plavenému sklu má tepelně zpevněné a tvrzené sklo vyšší počáteční deformace a to ve tvaru sinusoidy s velikostí $L / 300$.

Okrajové podmínky sloupů byly uzpůsobeny tak, aby maximálně reprezentovaly ideální kloub. Z tohoto důvodu byly kraje sloupů uloženy na válcová ložiska tak, aby ve směru měkké osy bylo umožněno pootáčení a docházelo k minimálnímu tření, viz Obr. 3.10a). Podpora se skládala ze dvou částí. První část tvořilo válcové ložisko z oceli. Druhá část byla tvořena podložkou z oceli nebo

hliníku, které jsou běžně užívané pro spojování, viz Obr. 3.10b). Průběh experimentu je vidět na Obr. 3.10c).



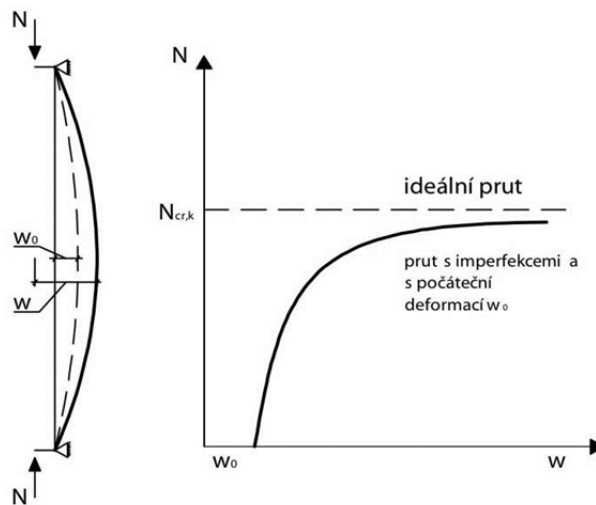
Obr. 3.10: a) Okrajové podmínky sloupu, b) detail válcové podložky, c) fotografie ze záznamu zkoušky [13]

Ačkoliv je ve stavební praxi běžné zamezit přímému kontaktu skleněného prvku a oceli pomocí plastových podložek, neoprenových ložisek apod., s ohledem na možný vznik lokálních špiček napětí ve skle, autoři experimentu se rozhodli skleněné sloupy uložit přímo na ocelové či hliníkové podložky. Důvodem jsou nedostatečné únosnosti plastových podložek.

Během experimentů se ukázalo, že při tlušťce skleněného sloupu 10 mm docházelo k plastickým deformacím jak u ocelové, tak i u hliníkové podložky. Lokální špičky napětí byly omezeny pomocí zkosení hran skleněných panelů.

Jednovrstvý štíhlý skleněný o délce L s kloubovými okrajovými podmínkami při působení normálové síly N s excentricitou e lze popsat pomocí rovnice druhého řádu. Počáteční deformaci lze uvažovat

zjednodušeně ve tvaru jedné sinusové vlny o velikosti w_0 , viz rovnice (3.5). Excentricky zatížený tlačená prut s počáteční deformací je vidět na Obr. 3.11.



Obr. 3.11: Excentricky zatížený tlačená prut s počáteční deformací [13]

$$EIw(x)'' + N \left[w_0 \sin \frac{\pi x}{L} + e + w(x) \right] = 0. \quad (3.5)$$

Řešením pro elastické kritické zatížení ideálního prutu je dáno vztahem (3.6)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}, \quad (3.6)$$

kde:

I je moment setrvačnosti pro skleněný obdélníkový průřez a je dán vztahem (3.7),

b je výška průřezu,

t je tloušťka průřezu,

E je modul pružnosti pro sklo ($E = 70\,000$ MPa),

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (3.7)$$

a geometrická štíhlost je definována jako

$$\lambda_k = \pi \sqrt{\frac{EA}{N_{cr}}}, \quad (3.8)$$

kde

A je plocha,

N_{cr} je Kritická (Eulerova) síla dle vztahu (3.9)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.9)$$

a maximální deformace je dána podle

$$w = \frac{e}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{N}{N_{cr}}}\right)} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}. \quad (3.10)$$

Normálová napětí při krajních vláknech lze vypočítat pomocí rovnice (3.11) jako

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{N}{W} \left[\frac{e}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{N}{N_{cr}}}\right)} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \right]. \quad (3.11)$$

U vícevrstvého skla je nutné zohlednit i mezivrstvu tvořenou polymerní fólií. V případě výzkumu prováděného na EPFL v Lausanne ve Švýcarsku byla PVB folie zahrnuta do výpočtů pomocí efektivního průřezu I_s . Analytické řešení bylo popsáno pomocí „sendvičové teorie“, [14]. Kritickou sílu pro „sendvičovou“ konstrukci, viz Obr. 3.12, lze vyjádřit pomocí rovnice (3.12)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(1 + \alpha + \pi^2\alpha\beta) EI_s}{1 + \pi^2\beta} \frac{1}{L^2}, \quad (3.12)$$

kde:

t_{PVB} je tloušťka polymerní folie,

G_{PVB} je smykový modul polymerní folie.

$$\alpha = \frac{I_1 + I_2}{I_s} \quad (3.13)$$

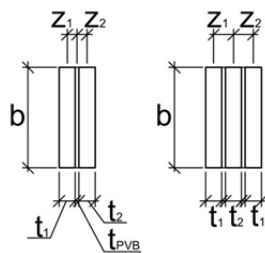
$$\beta = \frac{t_{PVB}}{G_{PVB}b(z_1 + z_2)} \frac{EI_s}{L^2} \quad (3.14)$$

$$I_s = b(t_1 z_1^2 + t_2 z_2^2) \quad (3.15)$$

$$I_i = \frac{bt_i^3}{12}. \quad (3.16)$$

Pro předběžný návrh skleněného sloupu lze použít metodu efektivní tloušťky, t_{eff} , viz rovnice (3.17).

$$t_{eff} = \sqrt[3]{\frac{12I_s(1 + \alpha + \pi^2\alpha\beta)}{b(1 + \pi^2\beta)}}. \quad (3.17)$$



Obr. 3.12: Průřez vrstveného skla

Výslednou geometrickou štíhlost lze stanovit podle rovnice (3.18)

$$\lambda_K = \frac{L}{\sqrt{\frac{I_S}{A} \frac{1 + \alpha + \pi^2 \alpha \beta}{1 + \pi^2 \beta}}}. \quad (3.18)$$

Ačkoliv má sklo vysokou pevnost v tlaku, řádově 400-600 MPa, u tlačeneho skleněného prutu je pro únosnost vždy rozhodující pevnost v tahu. Místo porušení může nastat kdekoli po celém povrchu skla na tažené straně průřezu, celkové napětí nesmí překročit stanovenou pevnost skla v tahu.

Analytický model obecně vychází z počáteční deformace, tloušťky skleněných panelů a zejména ze smykového působení PVB folie u vrstveného průřezu. Oproti tradičním materiálům jako je ocel či dřevo, nastává porušení náhle a to v oblastech, kde byla dosažena maximální pevnost skla v tahu. Tepelně zpevněná a tvrzená skla mají vyšší pevnost v tahu a to díky vnesenému předpětí při procesu provádění [13].

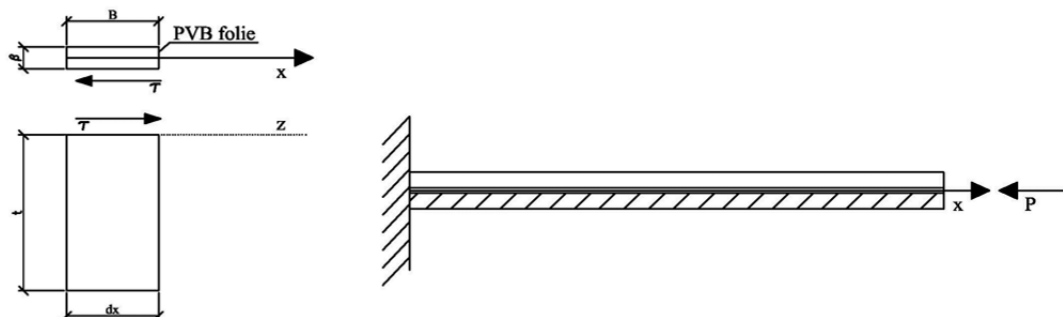
Podrobnější spolupůsobení vrstveného skla s PVB folií je uvedeno v práci Paola Foraboschi [15], jehož analytický model vychází z jednorozměrných vrstvených skleněných prvků a matematický model je zjednodušen na konzoli o délce L . Výsledky dosažené tímto modelem platí i pro prostě podepřený skleněný sloup o délce $2L$. Po účely tohoto modelu byl zvolen obdélníkový průřez složený ze dvou skleněných panelů. Šířka skleněných panelů byla označena písmenem B a tloušťka t . Mezivrstva, tedy PVB fólie, je označena šířkou B a tloušťka folie byla označena β .

Výsledkem analytického modelu bylo stanovení kritické síly N_{cr} . Síla N působí na volný konec jednostranně vetknuté konzoly a to v ose průřezu. Počáteční směr vybočení byl v modelu označen jako funkce $v(x)$ a funkce $u(x)$ označovala posuny ve směru průřezu, tedy v ose x . Smykové napětí v rozhraní mezi PVB folií a skleněným panelem je označeno jako τ_i . Smykové působení PVB folie je popsáno pohybem bočních panelů. Vzhledem k symetričnosti průřezu byl průřez rozdělen na dvě vrstvy, které mohou být uvažovány odděleně. Analytický model se týká spodní vrstvy, viz Obr. 3.13.

První kritický tvar vybočení musí respektovat následující okrajové podmínky:

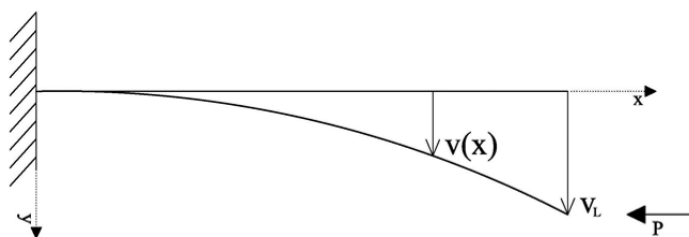
$$v(0) = 0 \qquad v(L) = v_L \qquad (3.19)$$

$$\frac{dv(0)}{dx} = 0 \qquad \frac{d^2v(L)}{dx^2} = 0 \qquad (3.20)$$



Obr. 3.13: Jednostranně vetknutý sloup zatížený osovou silou [15]

Tuhost folie má významný vliv na tvar vybočení. Kritické tvary se pohybují mezi křivkou definovanou funkcí $\cos(x)$ a polygonálním tvarem vybočení. V provedeném výzkumu se předpokládá, že skutečný tvar vybočení se blíží spíše polygonálnímu tvaru, viz rovnice (3.21), než tvaru definovanému funkcí $\cos(x)$. Tvar vybočení je vidět na Obr. 3.14.



Obr. 3.14: Kritický tvar vybočení

$$v(x) = -\frac{v_L}{2L}x^3 + \frac{3v_L}{2L^2}x^2 \qquad (3.21)$$

Kritickou sílu lze stanovit na jednotku šířky pomocí rovnice 3.22, ve které jsou zahrnuty účinky smykového modulu PVB folie, který závisí na teplotě.

$$\frac{P_{cr}}{B} = \frac{Et^3}{2L^2} + \frac{2tG_{PVB}}{\beta^2\sqrt{H}} \left[\Psi' \left(e^{\sqrt[2]{H}L} - 1 \right) - \Omega' \left(e^{\sqrt[2]{H}L} - 1 \right) - \frac{LZ'}{\sqrt[2]{H}} \right], \qquad (3.22)$$

kde H je stanoveno podle rovnice (3.23) [15]

$$H = \frac{2 \cdot G_{PVB}}{\beta \cdot E \cdot t}, \qquad (3.23)$$

$$\Psi = \frac{Ze^{-2\sqrt{HL}}}{H(e^{2\sqrt{HL}} + e^{-2\sqrt{HL}})}, \quad (3.24)$$

$$\Omega = \frac{Ze^{2\sqrt{HL}}}{H(e^{2\sqrt{HL}} + e^{-2\sqrt{HL}})}. \quad (3.25)$$

Jelikož je sklo křehký materiál, který se chová pružně až do porušení, představuje kritické zatížení horní hranici, ke které se asymptoticky vnější zatížení přibližuje. Stanovení kritického zatížení je základní informací pro určení celkové únosnosti skleněného sloupu.

V běžné stavební praxi je hojně využíváno posuzování podle mezních stavů, např. podle Eurokódů pro ocelové konstrukce, dřevěné konstrukce a jiné. Pro posouzení skleněného sloupu v souladu s koncepcí mezních stavů je třeba splnit několik podmínek, aby byla zaručena odpovídající úroveň únosnosti a trvanlivosti. Na základě těchto úvah Amadio a Ch. Bedon [16] navrhli analytický model, který stanovuje maximální osově zatížení, vycházející z maximální tahové pevnosti skla sloupu v průřezu ve středu výšky sloupu. Tento model vychází z experimentálního výzkumu provedeného Luiblem (2004) [13].

Je obecně známo, že posouzení štíhlého tlačeného sloupu je splněno, jestliže návrhové zatížení N_{Ed} nepřekročí únosnost sloupu danou $N_{b,Rd}$, viz rovnice (3.26).

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (3.26)$$

Únosnost sloupu $N_{b,Rd}$ lze vyjádřit pomocí rovnice (3.27).

$$N_{b,R} = \chi A f_{g,d}, \quad (3.27)$$

kde

A - plocha průřezu,

h – výška průřezu,

t – tloušťka průřezu,

$f_{g,d}$ – návrhová pevnost skla v tahu.

Součinitel vzpěrnosti χ lze vyjádřit pomocí rovnice (3.28) a jeho velikost je menší než jedna.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \Phi^2}}, \quad (3.28)$$

kde

Φ je hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti (3.29)

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{imp}(\lambda - \alpha_0) + \lambda^2]. \quad (3.29)$$

Poměrnou štíhlost λ lze vypočítat pomocí rovnice (3.30), která je závislá na ploše průřezu, charakteristické pevnosti skla v tahu a Eulerově kritickém břemenu N_{cr} .

$$\lambda = \sqrt{\frac{Af_{g,k}}{N_{cr}}}, \quad (3.30)$$

kde

N_{cr} je kritické (Eulerovo) břemeno,

$f_{g,k}$ je charakteristická pevnost skla v tahu.

Vzorce uvedené výše jsou obecně platné i pro ostatní materiály a z tohoto důvodu plyne i určitá výhoda pro předběžnou kontrolu stability jednovrstvých skleněných sloupů.

V případě vrstveného skleněného sloupu složeného ze dvou panelů spojených folií je nutné, jak již bylo napsáno výše, zohlednit smykové působení mezi sklem a folií. V tomto analytickém přístupu byl též zohledněn smykový modul folie, který byl značen G_{int} a dále pak Youngův modul pružnosti E_{int} . Dále byla zavedena náhradní efektivní tloušťka $t_{eq,w}$ podle vzorce (3.31) pro dvouvrstvý průřez.

$$t_{eq,w} = \sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3 + 12\Gamma_b I_s}, \quad (3.31)$$

kde

Γ_b – je koeficient přenosu smyku, který byl navržen pro zjednodušenou analýzu sendvičových nosníků a který lze vypočítat podle rovnice (3.32) jako

$$\Gamma_b = \frac{1}{1 + \pi^2 \frac{E t_1 t_2 t_{int}}{(t_1 + t_2) G_{int} L_0^2}}, \quad (3.32)$$

I_s – je statický moment setrvačnosti, který lze pro dvouvrstvý průřez vyjádřit pomocí vzorce (3.33)

$$I_s = t_1(0,5t_1 + 0,5t_{int})^2 + t_2(0,5t_2 + 0,5t_{int})^2. \quad (3.33)$$

V případě, že bude sloup navržen ze tří skleněných panelů, pak efektivní tloušťka bude vypočtena podle rovnice (3.34). Přičemž je uvažováno, že vnější skleněné panely mají shodnou tloušťku t_l .

$$t_{eq,w} = \sqrt[3]{2t_l^3 + t_2^3 + 12\Gamma_b I_s}, \quad (3.34)$$

kde

$$\Gamma_b = \frac{1}{1 + \pi^2 \frac{E t_l t_{int}}{4G_{int} L_0^2}}, \quad (3.35)$$

$$I_s = t_l(0,5t_l + 0,5t_2 + t_{int})^2. \quad (3.36)$$

Z výše uvedených rovnic je patrné, že výpočty založené na ekvivalentní tloušťce závisí výhradně na předpokládané hodnotě součinitele přenosu smyku Γ_b , který leží v intervalu od 0 do 1, přičemž nula reprezentuje nulové smykové spojení a jedna reprezentuje „monolitický“ stav, tedy pevné spojení.

Vzhledem k vysoké míře závislosti smykového modulu fólie na čase, teplotě a délce působení zatížení, je nutné volit smykový modul G_{int} tak, aby nejlépe odpovídal dané návrhové situaci. Nesprávný odhad by mohl vést k nepřesným a nebezpečným výsledkům.

Vzpernostní součinitel χ , definovaný rovnicí (3.28), zohledňuje vliv imperfekcí, které jsou zavedeny pomocí faktorů α_{imp} a α_0 . Koeficient α_0 určuje rozsah poměrné štíhlosti λ , přičemž poměrná štíhlost je menší nebo rovna koeficientu α_0 v případech, u nichž vzpěr nemá vliv na únosnost daného konstrukčního prvku. Zároveň, koeficient α_{imp} bere v úvahu působení síly a počátečního zakřivení w_0 , zbytkové napětí a excentricitu.

Podobně jako u ocelových konstrukcí, které se řídí příslušnou návrhovou normou EN 1993-1-1, lze využít podobný přístup i u skleněných konstrukcí a stanovit tak hodnoty obou koeficientů α_{imp} a α_0 . Autoři článku využili poznatků z výzkumu Feldmanna a Langoshe [17], [18], jenž zahrnoval výsledky experimentů z celkem 12 jednovrstvých tepelně tvrzených a tepelně zpevněných skleněných sloupů. Z výsledků testů byly odvozeny hodnoty koeficientů $\alpha_{imp} = 0,43$ a $\alpha_0 = 0,89$, které definovaly křivky vzpernosti pro sloupy z jednovrstvého tepelně tvrzeného a tepelně zpevněného skla. Koeficient α_{imp} lze vypočítat podle rovnice (3.37)

$$\alpha_{imp} = \frac{w_0}{L_0} \sqrt{3\pi} \sqrt{\frac{E}{f_{g,k}}}, \quad (3.37)$$

kde

$f_{g,k}$ je charakteristická pevnost skla v tahu,

$w_0 = L_0 / 400$ je počáteční imperfekce skleněné tabule sloupu.

3.5. SLOŽENÉ SKLENĚNÉ SLOUPY

Experimenty uvedené v předchozích kapitolách byly zaměřeny na základní druhy průřezů, tedy sloupy z jedno nebo vícevrstvé skleněné tabule, u kterých byla vždy rozhodující ztráta stability v jednom směru. Alternativní metodou, jak zvýšit únosnost, je vytváření prostorových průřezů, např. průřez ve tvaru kříže, uzavřený obdélníkový nebo čtvercový průřez, uzavřený vrstvený průřez složený z dutých trubek apod. V tomto příspěvku se autoři výzkumu, který byl proveden na Technické univerzitě v Delftu, zaměřili na složení více skleněných tyčí plného průřezu do jednoho celkového průřezu, viz Obr. 3.15a)[19].

Koncept skleněného sloupu je jednoduchý a efektivní z hlediska výroby. N-násobek skleněných tyčí je slepen do jednoho celku pomocí transparentního lepidla. Skleněné tyče byly vybrány z typových řad společnosti DURAN. Jedním z důležitých faktorů pro volbu průřezu tyčí byla vyšší tuhost v kroucení

tyče ve srovnání s obdélníkovým průřezem. Maximální délka tyčí byla 1500 mm o průřezu 22 mm. Jádru průřezu tvořila dutá skleněná tyč CONTURAX s vnitřním průměrem 17 mm a vnějšími žlábků, viz Obr. 3.15b). Do žlábků poté byly přilepeny skleněné tyče.



Obr. 3.15: Skleněný sloup složený z násobného množství tyčí, a) průřez experimentálního vzorku složeného ze šesti tyčí, b) jádro experimentálního prvku, CONTURAX [20]

Klíčovým prvkem, pro zajištění celistvosti průřezu je výběr vhodného lepidla, které vyplňuje spáry mezi skleněným jádrem a skleněnými tyčemi. Drážky ve skleněném jádru jsou připraveny již během výroby a mají dostatečnou styčnou plochu. Na materiálových vlastnostech vybraného lepidla, zejména na přilnavosti (adhesi) ke sklu, pak závisí míra spolupůsobení tyčí při namáhání tlakem s ohledem na možnou ztrátu stability [21].

Autoři vybrali pro svůj experiment akrylátové lepidlo Delo Photobond 4468, které splňuje požadavky na strukturální pevnost a zároveň je bezbarvé. Jedná se o jednosložkové lepidlo vytvrzované pomocí UV záření.

Uložení skleněného sloupu v hlavě a patě bylo zajištěna pomocí hliníkové podložky. Vzhledem ke shodnému modulu pružnosti, ($E_{al} = 70$ GPa), lze použít sklo a hliník v přímém kontaktu. Hliníková podložka představovala ideální mezičlánek mezi skleněným dříkem a ocelovými svorkami testovacího zařízení. Poddajná podložka přenáší zatížení do skleněného dříku rovnoměrně, nevznikají problematické lokální špičky napětí, které mohou vést k částečnému porušení.

Během tohoto experimentu bylo zkoušeno celkem 24 zkušebních těles o různé délce, rozdělení vzorků je uvedeno v Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Rozdělení vzorků

Počet prutů	Moment setrvačnosti [mm ⁴]	Délka [mm]	Počet vzorků [ks]
6xØ22+jádro	643 170	500	3
3xØ22	126 464	470	12
6xØ22+jádro	643 170	1500	3
6xØ22+jádro	643 170	2400	3
6xØ22+jádro	643 170	2400	3

Maximálních sil, kterých bylo dosaženo, jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 3.2.

Tab. 3.2: Výsledky experimentů

Číslo vzorku	Délka [mm]	F_{max} [kN]	σ [MPa]	
A ₁	1	500	1009,9	468
	2	500	1320,2	517
	3	500	1320,0	517
B ₁	1	1500	331,0	129,7
	2	1500	389,4	152,57
	3	1500	508,8	199,36
B ₂	1	2400	63,0	24,7
	2	2400	75,0	29,4
	3	2400	90,9	35,3
C ₁	1	2400	69,0	27,0
	2	2400	64,4	25,2
	3	2400	62,7	24,6

Výsledky těchto experimentů ukazují, že složené průřezy mohou být využívány pro nosné konstrukce, zejména pak pro konstrukce zatížené osovým tlakem. Okrajové podmínky uložení sloupů mají významný vliv na celkovou únosnost sloupů.

3.6. HYBRIDNÍ SKLENĚNÉ SLOUPY

Konstrukční ocel je materiál, který umožňuje použití štíhlých sloupů, ale při návrhu je třeba zohlednit možnou ztrátu stability vybočenému prvku. Hybridní sloup složený s ocelové tyče z vysoko-pevností oceli a ztužujících skleněných panelů představuje jeden z možných způsobů, jak docílit zvýšení únosnosti. Důležitým detailem u tohoto druhu konstrukce je spoj skleněného výztužného žebra a ocelové tyče. Tento detail musí být navržen tak, aby nedošlo ke kontaktu mezi sklem a ocelovou částí z důvodu vzniku lokálních špiček napětí.

Obecně je sklo velmi křehký materiál a při návrhu konstrukcí je nutné tuto skutečnost začlenit do celkového návrhu konstrukce či dílčího nosného prvku.

Konstrukční ocel dovoluje použití štíhlých sloupů, ale ztráta stability těchto sloupů bude vždy rozhodující při určování únosnosti. Pokud je ale štíhlost sloupu snížena, lze dosáhnout vyšší hodnoty únosnosti.

Vzhledem k optickým vlastnostem skla a jeho využití v architektuře jej lze využít i pro zesílení štíhlých ocelových sloupů a celkově tak zvýšit jejich únosnost. Jedná se tedy o kompozitní sklo – ocelové sloupy. Již dříve provedené výzkumy dokazují, že i lokálně připojené skleněné panely ke štíhlému ocelovému sloupu významně zvýší únosnost sloupu.

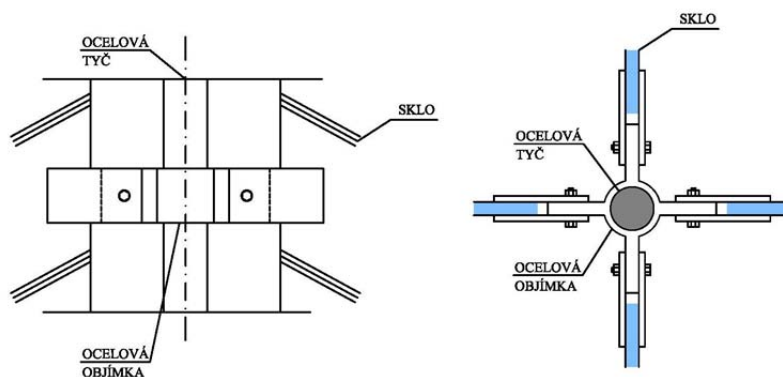
Využitím vysoko-pevnostních tříd ocelí lze únosnost ještě zvýšit. Zvláštní pozornost byla věnována i nehodovým situacím, kdy byl odstraněn jeden nebo více skleněných panelů v průřezu sloupu.

3.6.1. *Návrh sklo – ocelového sloupu*

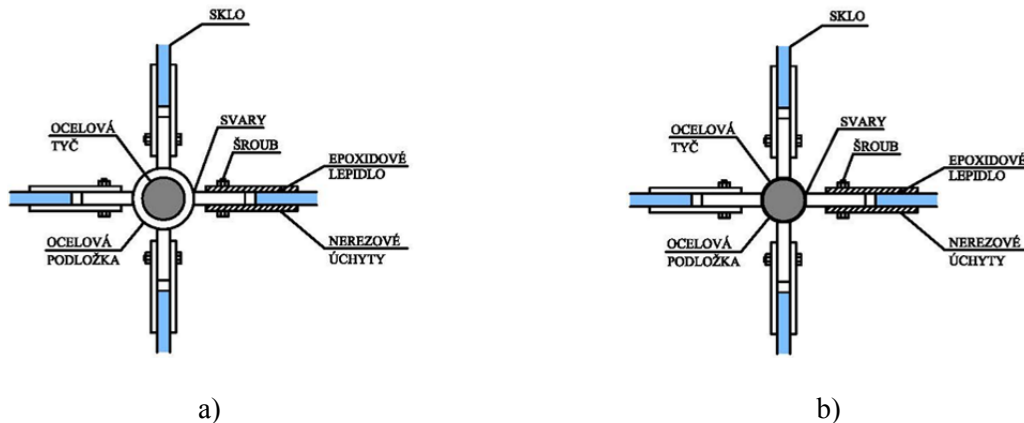
Jak již bylo popsáno výše, pro sloupy lze využít vysoko-pevnostní oceli a tudíž je třeba méně materiálu pro dosažení stejné hodnoty únosnosti při porovnání se sloupem z běžné konstrukční oceli. Nicméně sloupy z vysoko-pevnostní oceli mají mnohem vyšší štíhlost a tudíž dříve dosahují ztráty stability. Aby bylo možné plně využít potenciálu materiálu z vysoko-pevnostních ocelí, je nutné snížit celkovou štíhlost tyče přidáním skleněných panelů. Pro předběžné výpočty sklo-ocelového sloupu byly v tomto případě použity postupy uvedené v NEN-EN-1993-1-1 [21], výsledky experimentů byly použity pro kalibraci numerického modelu.

Celkový návrh sklo – ocelového sloupu je vidět na Obr. 3.17. Sklo - ocelový sloup se skládá z vysoko-pevnostní ocelové tyče zesílené pomocí čtyř skleněných panelů ve tvaru kříže. Panely jsou k tyči připojeny pomocí ocelových spojek. Spojky jsou připojeny šroubovaným spojem k ocelové objímce. Celková délka skleněných panelů je kratší než celková délka ocelové tyče. Panely jsou tak odděleny od podlahy a stropní desky, ocelové objímky jsou vidět na Obr. 3.16.

Skleněné panely jsou navrženy z tepelně zpevněného skla. Tento druh skla má vyšší hodnotu pevnosti než běžné plavené sklo, ale současně má vyšší zbytkovou únosnost než tvrzené sklo. Skleněné panely byly ke spojkám z nerezavé oceli připojeny pomocí dvousložkové pryskyřice typu 3M Scotch-Welt 9323 B / A. Lepená plocha je $30 \times 35 \text{ mm}^2$ a nominální tloušťka lepené vrstvy je 0,5 mm. Takto připevněné spojky jsou poté mechanicky připojeny (pomocí šroubů) k ocelovým objímkám pomocí krátkého ocelového plechu. Plech je k objímkám přivařen. Na spodní a horní objímky jsou připojeny všechny čtyři panely. Vnitřní objímky spojují pouze dva panely a to kolmo k sobě. Jelikož je umožněno vnitřním objímkám prokluzu vzhledem k tyči, mohou také rotovat o 180° vzhledem k předchozí objímce, viz Obr. 3.16.



Obr. 3.16: Detail ocelové objímky



Obr. 3.17: Průřezy se dvěma nebo čtyřmi připojeními panely, a) spodní průřez, b) horní průřez,

Ocelová tyč byla navržena z produktové řady tyčí Dywidag typu St 950 / 1050. Průměr tyče je 32 mm o délce 3600 mm z oceli S700 [23].

Vzdálenost objímek byla navržena 150 mm. S touto vzdáleností bylo uvažováno při výpočtu ztráty stability ocelové tyče, k vybočení tyče dojde pouze mezi objímkami.

Posouzení ocelové tyče lze provést podle následující rovnice (3.37)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (3.37)$$

kde

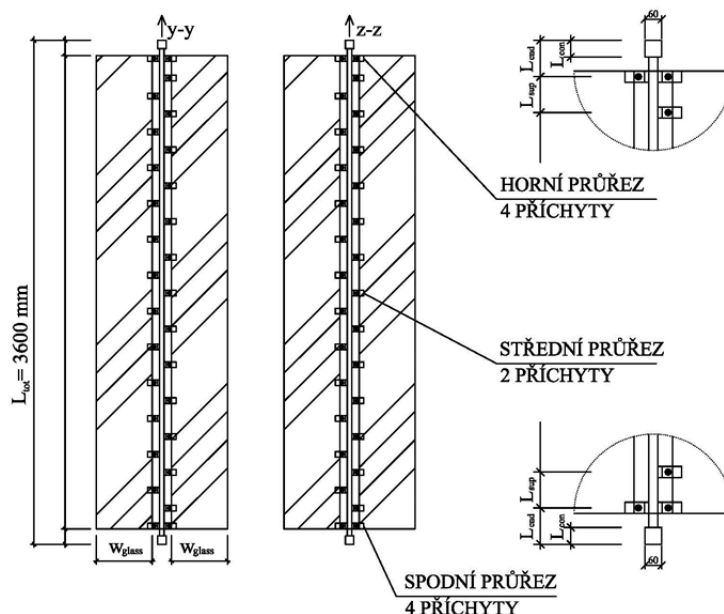
N_{Ed} je návrhová hodnota zatížení [kN],

$N_{b,Rd}$ je návrhová hodnota únosnosti [kN] stanovená pro osovou sílu zahrnující redukční faktor χ . (Prostá únosnost v tlaku ocelové tyče je $804 \text{ mm}^2 \times 950 \text{ N/mm}^2 \times 10^{-3} = 764 \text{ kN}$) [24].

Podle NEN-EN-1993-1-1 je hodnota $\chi = 0,936$ a výsledná hodnota únosnosti $N_{b,Rd} = 715 \text{ kN}$.

Numerický model byl vytvořen pomocí metody konečných prvků. Materiálové vlastnosti oceli byly získány z tahových a tlakových zkoušek, viz Obr. 3.19. V numerickém modelu byl pro ocel použit zjednodušený bi-lineární pracovní diagram. Celková délka je L_{tot} je 3600 mm, viz Obr. 3.18.

Ztrátu stability sloupu lze očekávat ve dvou rozdílných tvarech vybočení. První tvar vybočení je lokálním vybočením ocelové tyče mezi objímkami. Druhý tvar vybočení lze předpokládat jako celkovou ztrátou stability sloupu.



Obr. 3.18: Sklo – ocelový sloup

V numerickém modelu byly zohledněny materiálové a geometrické imperfekce a dále byly uvažovány čtyři návrhové situace, které zohledňují různé způsoby porušení výztužných panelů:

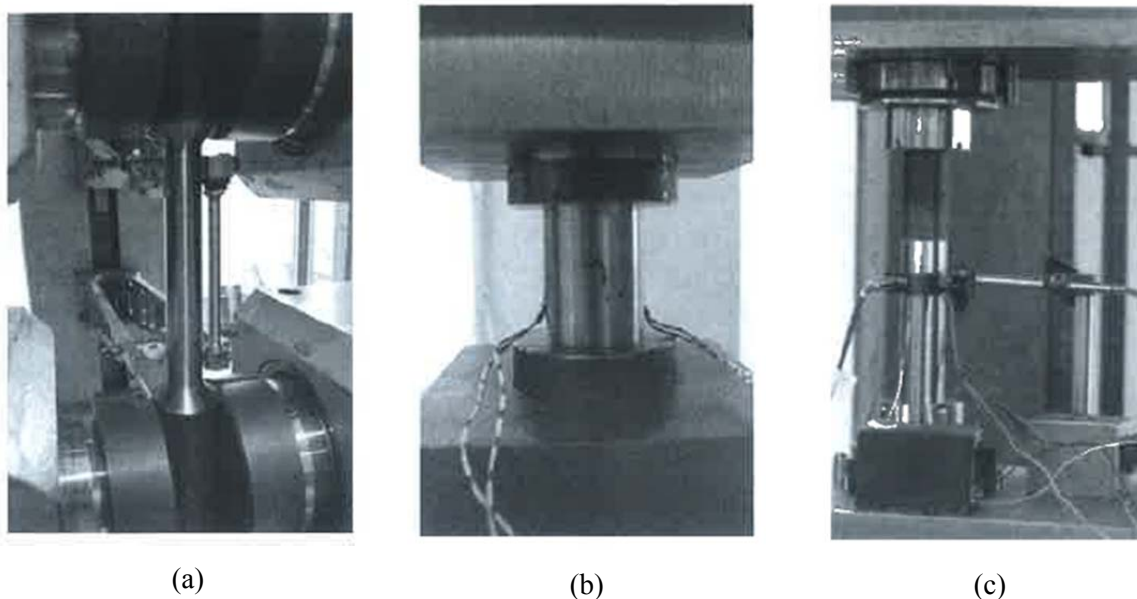
- čtyři skleněné panely;
- tři skleněné panely;
- dva skleněné panely umístěny vzájemně kolmo;
- dva skleněné panely umístěny paralelně.

Maximální amplituda imperfekce bylo uvažováno jako $e^* = L_{tot} / 1000 = 3,6$ mm.

V Tab. 3.3 jsou uvedeny celkové hodnoty únosnosti N_{ult} a maximální velikost hlavních napětí σ_I (tah).

Tab. 3.3: Výsledky z GMNIA

Ocelová tyč podepřená:	Sklo-ocelový sloup			
	Kloub - kloub		vetknutí – vetknutí	
	N_{ult} [kN]	σ_I [MPa]	N_{ult} [kN]	σ_I [MPa]
Čtyři panely	470	7,2	591	16,1
Tři panely	470	7,5	551	25,5
Dva na sebe kolmé panely	281	6,2	530	8,4
Dva paralelní panely	11	21,1	42	38,5



Obr. 3.19: Test vzorků: a) test v tahu, b) test v prostém tlaku, c) test se ztrátou stability

Pro celkové porovnání byla provedena zkouška i nevyztužené ocelové tyče. Přehled provedených testů je naznačen v Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Přehled provedených testů

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Počet panelů	4	3	2	0
L_{tot}	3600 mm	3600 mm	3600 mm	3600 mm
L_{sup}	142 mm	142 mm	142 – 284 mm	-
L_{end}	100 mm	100 mm	100 mm	-
L_{con}	55 mm	55 mm	55 mm	55 mm
W_{glass}	400 mm	400 mm	400 mm	-
w_{glass}	10 mm	10 mm	10 mm	-

Zatížení bylo vnášeno rychlostí 0,2 mm / min. Zatěžovací síla byla při hodnotě 300 kN a 400 kN držena po dobu 5 minut z důvodů dotvarování mezi všemi komponenty. Na hodnotě 525 kN byl test přerušen, aby sloup mohl být přestavěn a opakovaně použit.

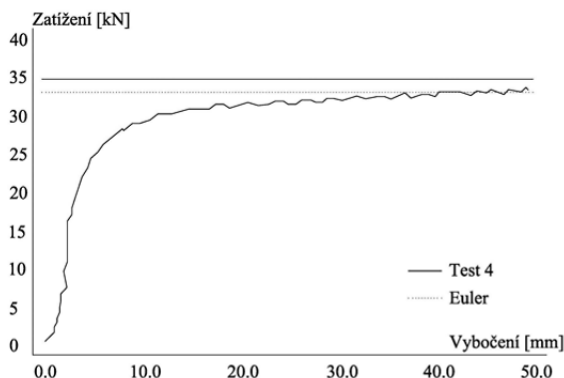
Hlavní experiment dále pokračoval odmontováním jednoho skleněného panelu. Postup zatěžování byl stejný jako v případě testu 1. Zatížení rostlo lineárně do síly 499 kN, kdy došlo u druhé příložky od horního okraje k tvorbě trhlin ve skleněném panelu, viz Obr. 3.20. Síla v tomto okamžiku poklesla na hodnotu 480 kN a zkouška byla přerušena.



Obr. 3.20: Pohled na lokální porušení skleněného panelu

Test sloupu se třemi a dvěma skleněnými panely byl opět identický s předešlými testy. Zatížení síly bylo kontinuální do síly 314 kN, kdy došlo k výraznému porušení skleněného panelu na několika místech. Lze předpokládat, že panel již nemá zbytkovou únosnost a proto není příčnou podporou pro ocelovou tyč. Sloup byl zatěžován až do síly 520 kN.

Zkouška ocelové tyče probíhala plynule se zatěžováním o rychlosti 0,002 mm / min do ztráty stability ocelové tyče vybočením. Na Obr. 3.21 je vidět závislost zatěžovací síly na posunu průřezu uprostřed rozpětí. Mezi silou 20 kN a 30 kN začala samostatná ocelová tyč ztrácet stabilitu vybočením. Při síle 35 kN, blízké hodnotě Eulerova kritického břemene, ztratila ocelová tyč stabilitu.



Obr. 3.21: Pracovní diagram síly na posunu samostatné tyče, test 4

Numerický model byl ověřen pomocí závislosti síly na deformaci, které byly získány v průběhu experimentů. Pro další výzkum sklo – ocelových sloupů lze tento model využít a dále jej rozšířit a zpřesnit. Numerický model byl vytvořen v programu ANSYS V11.0. Jelikož nelze v modelu postihnout přesné rozměry, byly geometrické imperfekce zjednodušeny.

Nejdůležitější zjednodušení lze popsat takto:

- a) posun mezi objímkami a tyčí byl řešen pomocí tření,
- b) prokluz/dosedání koncových částí byl modelován pomocí pružiny s konstantní tuhostí,
- c) předpoklad izotropních materiálů,
- d) stejný průměr ocelové tyče po celé délce,
- e) zanedbání imperfekcí skleněného panelu,
- f) porušení skla (trhliny) nebylo modelováno.

Porovnání výsledků je uvedeno v Tab. 3.5.

Tab. 3.5: Porovnání výsledků únosností

Číslo testu	Experiment	Numerický model	Rozdíl
1	525 kN	526 kN	0,2%
2	499 kN	495 kN	0,8%
3	520 kN	519 kN	0,2%
4	35 kN	35 kN	0,0%

Závěrem lze z provedených experimentů konstatovat, že omezení ztráty stability vybočením bylo dosaženo díky přidáním skleněných panelů. Experimentálně bylo prokázáno, že ocelovou tyč je možné vyztužit pomocí skleněných panelů a dále zatěžovat osovou silou. Z provedených experimentů vyplývá, že pro zvýšení únosnosti ocelové tyče je možné použít i menší skleněná žebra.

Sklo – ocelový sloup složený z ocelové tyče a skleněných panelů prokázal dostatečnou únosnost, zvláště pak v případě dvou skleněných na sebe kolmých panelů. Dále bylo prokázáno, že skleněné panely svou tuhostí přispěli k zvýšení celkové stability sloupu.

4. CENTRICKY ZATÍŽENÝ SLOUP ZE SKLA

4.1. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Předmětem disertační práce autora byl vývoj skleněného sloupu uzavřeného průřezu včetně konstrukčních detailů v uložení s možným budoucím využitím v praxi.

Hlavním 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.

4.2. METODA POUŽITÁ K DOSAŽENÍ CÍLE

K dosažení cíle disertační práce byly použity metody, které lze rozdělit na část praktickou a část teoretickou.

V experimentální praktické části práce byl vyzkoušen celoskleněný nosný konstrukční prvek: lepený uzavřený čtvercový sloup složený ze skleněných tabulí. Experimentální ověření sloupu bylo rozděleno do dvou etap.

První etapu tvořila tři zkušební tělesa vyrobená ve zmenšeném měřítku. Při výrobě zkušebních těles bylo použito plavené jednovrstvé sklo o tloušťce 6 mm. Jednotlivé panely byly spojeny pomocí akrylátového lepidla SIKA Fast 5211 NT do uzavřeného čtvercového průřezu, viz kap 5.

Druhou etapu tvořilo pět zkušebních těles vyrobených v měřítku pro reálné použití. Dílčí skleněné panely byly navrženy z vrstveného skla o tloušťkách 2x 10 mm. Jednotlivé panely byly spojeny opět pomocí akrylátového lepidla SIKA Fast 5211 NT do uzavřeného čtvercového průřezu, viz kap 6.

V teoretické části byl vytvořen numerický model v programu ANSYS, který byl kalibrován podle výsledků provedených experimentů. Vytvoření zjednodušeného analytického modelu, použitelného pro předběžný návrh navazovalo na dosažené výsledky v experimentální části a v parametrické studii za použití ověřeného numerického modelu. V numerickém i analytickém modelu je nutné zohlednit všechny faktory, které mají vliv na únosnost skleněného sloupu, jako jsou např. lepený spoj panelů, rozdílné uložení panelů na plastovou podložku, materiálové, geometrické a konstrukční imperfekce apod.

4.3. UPLATNĚNÍ SKLENĚNÝCH SLOUPŮ V PRAXI

Sloupy mají nalézt uplatnění zejména jako podpora transparentních stropních nebo střešních konstrukcí v reprezentativních prostorách budov, jako jsou atria, vstupní haly apod.

4.4. DÍLČÍ ETAPY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkum a celý projekt disertační práce byl strukturován do následujících dílčích etap:

- 1) Výběr vhodného lepidla a kalibrace numerického modelu materiálových smykových zkoušek lepidla, který navazoval na experimenty provedené v předchozích letech.

- 2) První experimentální etapa zahrnující tři zkušební tělesa sloupu vyrobená ve zmenšeném měřítku a vyhodnocení provedených experimentů.
- 3) Kalibrace numerického modelu a jeho validace s experimenty.
- 4) Druhá experimentální etapa zahrnující zkušební tělesa reálných rozměrů pro použití v praxi.
- 5) Kalibrace analytického modelu a jeho validace s experimenty.
- 6) Kalibrace numerického modelu a jeho validace s experimenty.
- 7) Parametrická studie použitelnosti sloupů
- 8) Zjednodušený analytický model a porovnání výsledků s experimenty a numerickým modelem
- 9) Vyhodnocení doplňkové kyvadlové zkoušky nárazem ocelové koule do skleněného sloupu.

5. SPOJOVÁNÍ NOSNÝCH KONSTRUKCÍ ZE SKLA

Spojování skleněných prvků vyplývá z přepravních možností. Běžný rozměr skleněné tabule z plaveného skla je 6000 x 3210 mm. Pro tepelně tvrzené a tepelně zpevněné sklo jsou přepravní rozměry menší. V současné době nabízejí přepravní společnosti dopravu skleněných panelů až do délky 12 m, ale ne vždy je toto řešení vhodné, neboť s rostoucí délkou se mohou zvyšovat i nežádoucí počáteční imperfekce skleněného výrobku. Velkoplošné či výrazně obdélníkové tabule skla není vhodné provádět (v některých případech ani nelze vyrobít) z jednoho kusu a proto je tento problém nutné vyřešit mechanickými nebo lepenými spoji.

Mechanické spoje v této práci nejsou uvedeny.

5.1. LEPENÉ SPOJE

Spojení stejných či rozdílných materiálů je ve velké míře využíváno napříč odvětvím inženýrského průmyslu. Výhodou lepení je, že můžeme spojovat chemicky odlišné materiály o menší tloušťce a to i v případě velkých ploch. Dostatečně poddajné lepidlo dokáže rovnoměrně přerozdělit napětí a tím zamezit vzniku nežádoucích špiček napětí, které jsou v případě skleněných konstrukcí vždy rozhodující.

Z architektonického hlediska jsou lepené spoje ve skleněných konstrukcích velkým přínosem. Estetický vjem přítomnosti spoje se snižuje a konstrukce zůstává plně transparentní.

Použití lepidla je nutné vybrat tak, aby výsledný spoj splňoval požadované mechanické vlastnosti a to především optimální interakci spojovaných prvků a zároveň poddajnost, aby byly ve spoji účinně přerozděleny špičky napětí nebo aby byla umožněna rozdílná teplotní deformace dílčích prvků při použití odlišných materiálů, např. sklo ($\alpha = 0,9 \times 10^{-5} / \text{K}$) a ocel ($\alpha = 1,2 \times 10^{-5} / \text{K}$).

Obecně lze lepidla rozdělit do několika skupin. První skupinu tvoří tuhá lepidla, do druhé skupiny jsou zařazena lepidla pružná. Mezi těmito skupinami jsou pak lepidla polotuhá, která se materiálovými vlastnostmi a chováním při zatížení blíží buď k lepidlům tuhým či pružným.

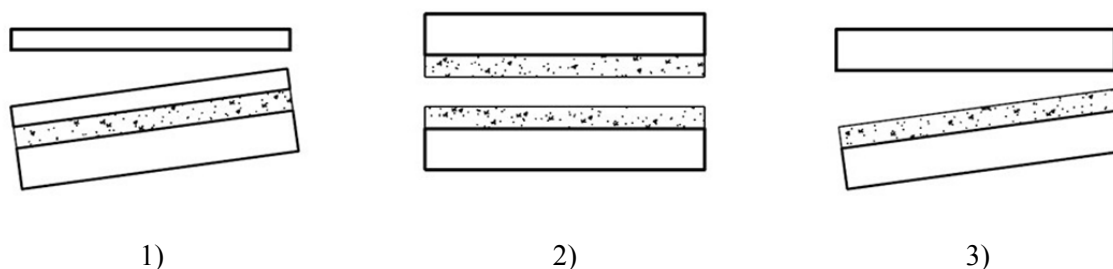
Pružná lepidla se obecně vyznačují schopností dosahovat velkých deformací při působení zatížení, po odtížení se navracejí do původního stavu. Tato vlastnost je způsobena nízkou hodnotou modulu pružnosti. Protahání je zpravidla větší než 150 %. Mezi pružná lepidla patří např. silikony či polyuretany.

Tuhá lepidla se výrazně liší od pružných lepidel svým chováním během namáhání. Při aplikaci lepidla v optimální tloušťce, která se pohybuje v řádech desetin milimetru (kontaktní spoj), dosahují velmi vysokých pevností. Obecně mají menší pružnost a schopnost se deformovat. Mezi tuhá lepidla patří např. akryláty nebo epoxidové pryskyřice.

5.2. MECHANISMY PORUŠENÍ

Obecně lze uvažovat tři možné způsoby porušení lepeného spoje. Na porušení má vliv způsob namáhání, teplota prostředí, vlhkost a stáří spoje, eventuálně UV záření. Tři způsoby porušení jsou zobrazeny a blíže popsány v Obr. 5.1, [25].

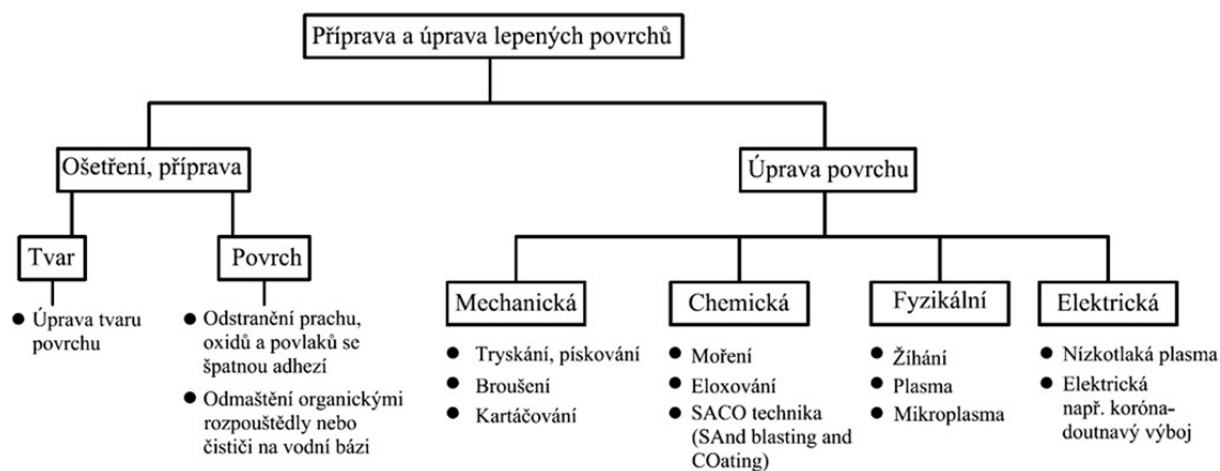
- 1) Porušení skleněného prvku z důvodu překročení tahové nebo smykové pevnosti – ztráta vnitřní soudržnosti substrátu.
- 2) Porušení soudržnosti lepidla (koheze) – smykové nebo tahové překročení pevnosti lepidla.
- 3) Nedostatečná přilnavost lepidla k lepeným povrchům (adheze) – prokluz nebo utrnutí vrstvy lepidla od povrchu [26].



Obr. 5.1: Možné tvary porušení lepeného spoje [26]

5.3. PŘÍPRAVA POVRCHŮ LEPENÝCH MATERIÁLŮ

Příprava a čistota povrchu spojovaných materiálů je jedním z faktorů, který má největší vliv na kvalitu a trvanlivost výsledného lepeného spoje. Účelem čištění je odstranit prach, mastné tuky, oleje, rez, výrobní nerovnosti a další nečistoty. Často se v rámci čištění provádí i úprava lepených povrchů za účelem lepší přilnavosti lepidla. Veškeré metody úprav a čištění povrchu, které se dobře osvědčily v průmyslu i stavebnictví, jsou uvedeny na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Příprava a úprava lepených povrchů [26]

Jsou-li kontaktní plochy znečištěny korozními produkty, mastnotou nebo separačními prostředky z výrobního procesu (vosk, prach, olej, nafta, pot, apod.), není možné očekávat plnou únosnost spoje. Lepidlo se nedostane k povrchu lepeného materiálu, ale jen k povrchu nečistoty, takže pevnost spoje pak závisí na soudržnosti nečistoty s podkladem a na rozsahu znečištění.

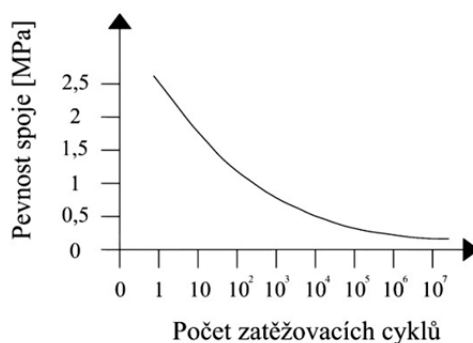
Obecně není vždy vhodné provádět u skleněných prvků úpravy povrchu. Mechanické opracování povrchu skla např. pískováním může zlepšit adhezi daného lepidla, ale jakýkoliv zásahy do struktury skla či neodborná manipulace vede ve většině případů ke ztrátě pevnosti a předčasným poruchám skleněného prvku [27].

5.4. ŽIVOTNOST A TRVANLIVOST LEPENÝCH SPOJŮ

Životnost lepených spojů je oproti spojům mechanickým značně omezená, neboť lepidla v čase degradují a ztrácí svou pevnost. Nezbytným předpokladem pro správnou a efektivní funkčnost adhezivního spojení po celou dobu životnosti konstrukce je nutnost uvážení veškerých silových i nesilových účinků, které významně ovlivňují trvanlivost lepidel. Mechanické účinky zatížení a chování lepidla v konstrukci jsme schopni poměrně dobře předvídat, především díky numerickým modelům. Oproti tomu posouzení nesilových účinků (vliv vlhkosti, teploty, apod.) je v běžné praxi složité. Degradací procesy nastávají nejčastěji kombinací zatížení, vysoký teplot a vlivu absorbované vlhkosti a UV záření.

5.4.1. *Dynamické zatížení*

Kromě účinků krátkodobého a dlouhodobého statického zatížení může být spoj během svého působení v konstrukci vystaven také dynamickým účinkům. Obecně, pevnost spoje při dynamických účincích klesá, viz Obr. 5.3. Poddajná lepidla mají schopnost lépe pohlcovat energii a i díky větší tloušťce mají lepidla ve spoji lepší odolnost při cyklickém dynamickém zatěžování než lepidla tuhá.

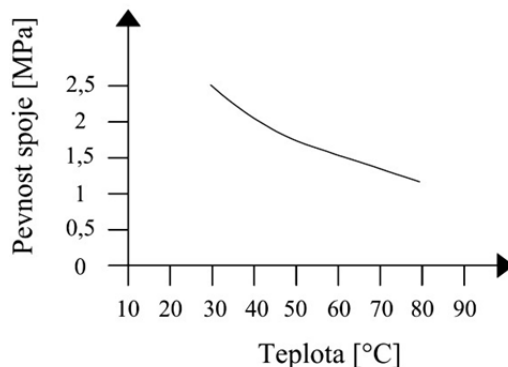


Obr. 5.3: Vliv dynamických účinků na pevnost spoje (ukázka PUR lepidla) [28]

5.4.2. *Zatížení teplotou*

Tepelná odolnost lepených spojů není obvykle tak vysoká jako u spojů mechanických. Ve většině případů je spoj skleněné konstrukce vystaven povrchovým teplotám do 80°C (tmavé konstrukce v letním období), což je pod hranicí kritického teplotního rozmezí většiny adheziv.

Nehrozí tedy, že by se lepidlo dostalo až do tekutého stavu. Ovšem s rostoucí teplotou se poddajnost spoje zvyšuje, ztrácí svou pevnost a to má negativní vliv na mechanickou odolnost celé konstrukce, viz Obr. 5.4. Jedinými zástupci plastů, kteří nepodléhají termickým účinkům, jsou reaktoplasty, tedy plasty které lze vyšší teplotou vytvrdit [28].



Obr. 5.4: Vliv teploty na pevnost spoje [28]

V další řadě je nutné uvážit, zda bude konstrukce plnit svou statickou funkci i v případě mimořádných situací, jako je např. vystavení vysokým teplotám při požáru. V některých případech může být nutné doplnění lepené konstrukce mechanickými prvky, aby byla zajištěna prevence možného kolapsu celé konstrukce a případného zranění od padajících kusů skla.

Sledování teplot je důležité také v prvotní fázi, tj. při výrobě spoje. Každé konstrukční lepidlo má jinou optimální teplotu pro zpracování, doporučené hodnoty uvádí vždy výrobce. Nízké teploty velmi zpomalují, někdy až zastavují reakci vedoucí k vytvrzení. Při nízkých teplotách se může stát, že k vytvrzení spoje bude potřeba několikanásobně více času, nebo že spoj 100% pevnosti vůbec nedosáhne.

Z hlediska bezpečnosti je žádoucí, aby došlo k porušení spoje ztrátou vnitřní soudržnosti (koheze), protože ke kolapsu nedochází náhle. Veškeré výpočty a únosnost lepidla se vztahuje vždy ke kohezivnímu porušení. Ztráta přilnavosti (adheze) vypovídá o jeho chování ve spoji, ale ne o jeho pevnosti (lepidlo má ještě pevnostní rezervu), neboli lepidlo povrch nedostatečně smáčí (má špatnou přilnavost k daným povrchům) či byla zanedbána příprava a čistota povrchu [26].

5.4.3. *Vlhkost a chemické látky*

Lepené spoje jsou během svého života vystaveny účinkům mnoha různých chemických produktů. Ve většině případů se jedná o krátkodobý až střednědobý kontakt s vodou nebo vodními roztoky chemikálií.

Mnoho adhezivních polymerů se stává plastickými díky svým hygroskopickým vlastnostem, jsou schopné na sebe vázat vzdušnou vlhkost. Voda se chová jako plastifikátor a může reagovat s některými chemickými skupinami, které zajišťují adhezi, a to vede k poklesu pevnosti. Tento proces je částečně vratný vysušením, ale obecně vede ke ztrátě vnitřní soudržnosti lepidla ve spoji. Projevování změn v pevnostním chování lepeného spoje končí ve chvíli, kdy je vrstva lepidla

plně nasycena vodou. Nevratné poškození lepené spáry vlhkostí se objevuje u moderních adheziv používaných v technologickém průmyslu zřídka, pokud nejsou záměrně k tomuto účelu vyrobeny.

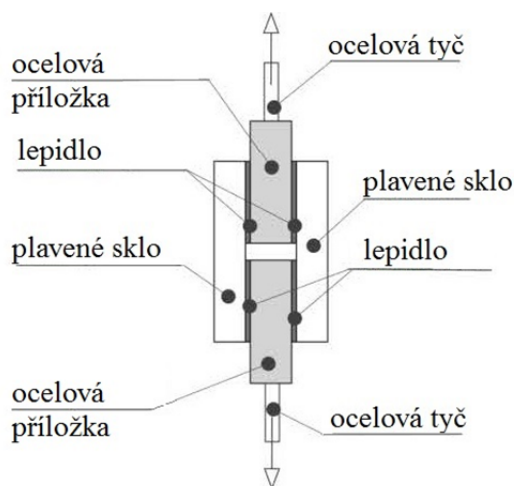
Při výběru lepidla je nutné kromě jiného uvážit možnost chemického ovlivnění spoje agresivními výpary nebo kapalinami, ať už se jedná o okolní prostředí, které na spoje působí anebo jen působení čisticích prostředků, kterými se budou skleněné konstrukce ošetřovat a čistit [26].

5.4.4. *UV záření*

Ultrafialové záření je součástí slunečního světla. Toto vysoko-energetické záření způsobuje degradační změny na povrchu nejen organického materiálu, ale také na povrchu nechráněných syntetických lepidel a tmelů. Zejména polyuretanová lepidla jsou při působení UV záření nestabilní, jejich odolnost lze zvýšit primerovými nátěry. Vzhledem k transparentnosti skla je nutné nanést nátěr na oba lepené povrchy, jednoduše tak zajistíme několikanásobně delší životnost spoje. Nátěry mají odolnost téměř 100% [27].

5.5. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM LEPENÉHO SMYKOVÉHO SPOJE

Pro účely této disertační práce byl převzat experimentální výzkum smykového spoje, který byl proveden na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí při ČVUT v Praze [29]. Hlavní podstatou experimentů bylo stanovení chování při zatížení nového dvousložkového akrylátového lepidla SIKA Fast 5211 NT od společnosti SIKA, které bylo použito v další fázi experimentů zaměřené na skleněné sloupy. Převzaté výsledky experimentů lepených spojů byly následně použity při ověření numerických modelů, viz kap. 5.6. Lepidlo bylo aplikováno na spoj skleněných destiček rozměrů 50 x 110 x 19 mm k ocelovým příložkám o rozměrech 50 x 75 x 25 mm. Schéma zkoušky je vidět na Obr. 5.5. Zkušební tělesa byla zatěžována tahem tak, aby lepený spoj byl namáhán smykem.



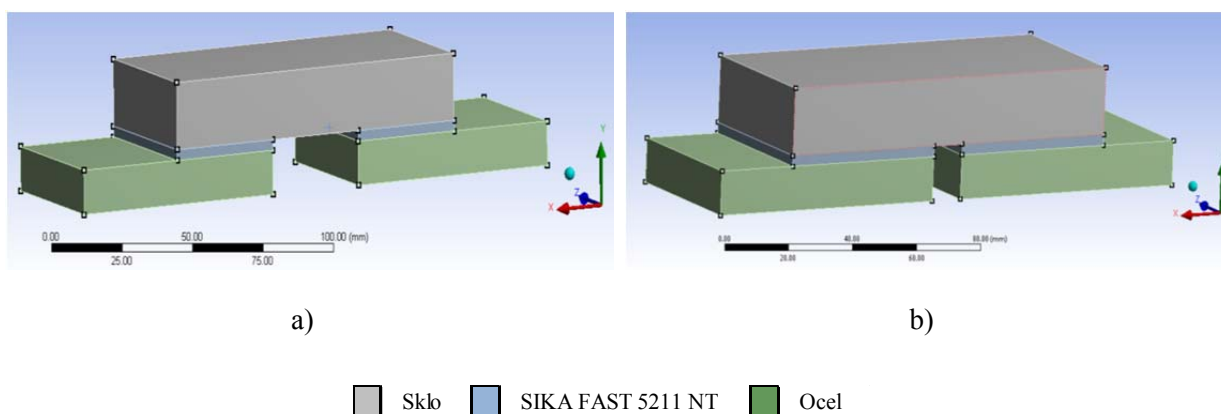
Obr. 5.5: Schéma smykové zkoušky [29]

5.6. NUMERICKÝ MODEL LEPENÉHO SPOJE

Numerický model lepidla byl ověřen pomocí výsledků z provedených experimentů a následně byl použit pro implementaci materiálových vlastností do numerického modelu skleněných sloupů, kde je lepidlo rovněž namáháno převážně smykem. Numerický model byl kalibrován pomocí experimentů, které nebyly vystaveny stárnutí. Současně byly vytvořeny dva typy modelů vzhledem k rozdílné ploše spoje, tj. Model - 1 s rozměry lepené plochy 38x50 mm a Model - 2 s geometrickými rozměry lepeného spoje 50x50 mm.

5.6.1. Materiálové vlastnosti

Numerický model smykového spoje byl proveden v programu ANSYS Workbench 15.0. Lepený spoj byl modelován v modulu Static Structural z objemových prvků SOLID 186. Vzhledem k symetrii spojů byla modelována pouze polovina každého spoje. Numerické modely lepených spojů pro zkoušky na malých tělesech jsou znázorněny na Obr. 5.6.

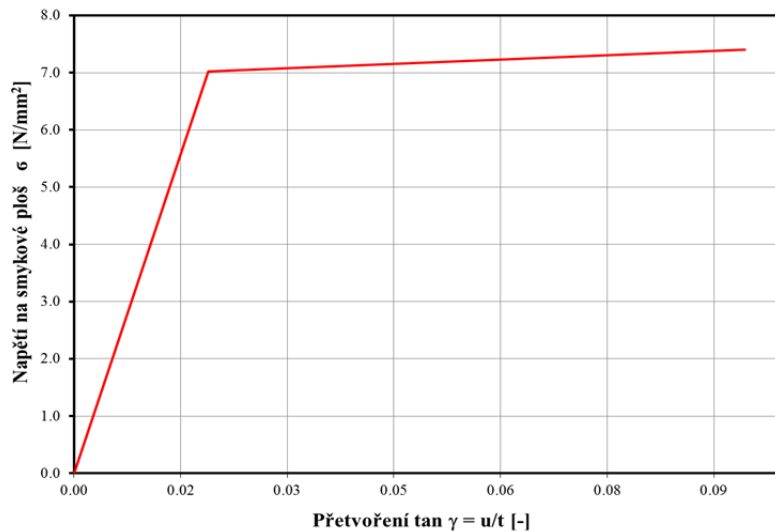


Obr. 5.6: Numerický model a) Model - 1, b) Model - 2

Sklo bylo modelováno jako lineárně - izotropní materiál s modulem pružnosti $E_{glass} = 70\ 000$ MPa a Poissonovým součinitelem $\nu = 0,23$. Jelikož se jednalo o běžné plavené sklo, pak maximální charakteristická pevnost skla v tahu byla uvažována $f_{t,glass} = 45$ MPa.

Materiálový model oceli byl převzat z knihovny programu a nebyl nijak měněn, tj. $E_a = 210\ 000$ MPa, $\nu = 0,3$.

Materiálový model lepidla byl zadán jako lineárně izotropní s bilineárním izotropním zpevněním s počátečním modulem pružnosti $E_{glue} = 370$ MPa a Poissonovým součinitelem $\nu = 0,34$. Bilineární zpevnění bylo zadáno pomocí meze kluzu $f_{t,glue} = 7$ MPa a tangenciálního modulu pevnosti $E_{tan,glue} = 5,0$ MPa. Bilineární pracovní diagram lepidla je naznačen na Obr. 5.7.



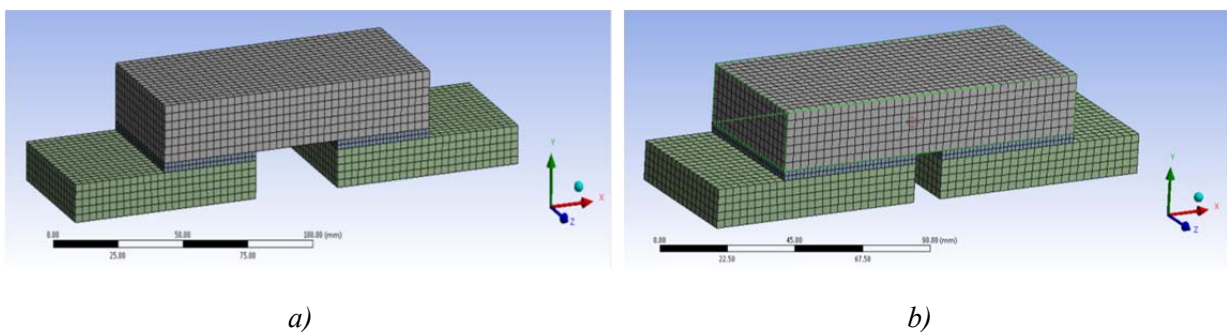
Obr. 5.7: Bilineární pracovní diagram Sika Fast 5211 NT

5.6.2. Kontakty

V numerickém modelu byly zvoleny kontakty typu *Bonded*, které svým nastavením nejvíce odpovídají reálnému spojení jednotlivých materiálů. Povrchy jsou spojeny – slepeny. V tomto režimu není dovoleno oddělení povrchů ani prokluz. Výhodou tohoto typu kontaktu je rychlejší průběh konvergence, kontakt navíc podporuje analýzu velkých deformací.

5.6.3. Sít' MKP

Velikost hexahedralní sítě byla nastavena o minimální velikosti 3 mm. Sít' konečných prvků byla v části lepidla zjemněna. Zjemnění sítě bylo provedeno pomocí funkce *BODY SIZING*. Velikost objemového prvku byla zvolena 1,5 mm. Tímto zjemnění bylo dosaženo zvýšení počtu prvků v lepidle a tím bylo dosaženo přesnějších výsledků. Celkový pohled na sít' je znázorněn na Obr. 5.8.

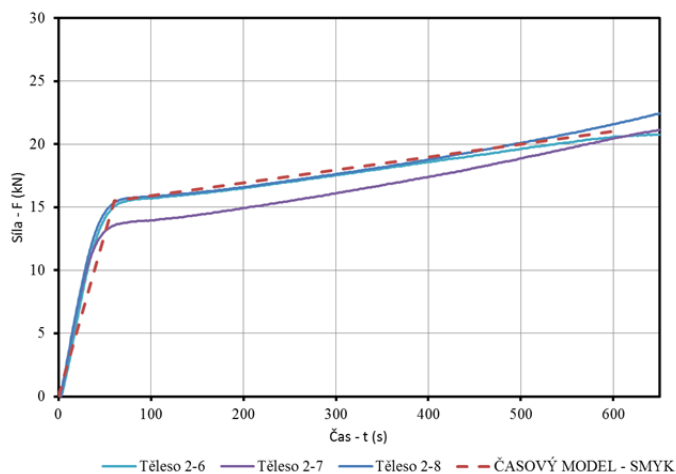


Obr. 5.8: Sít' MKP pro oba typy spojů, a) Model – 1, B) Model - 2

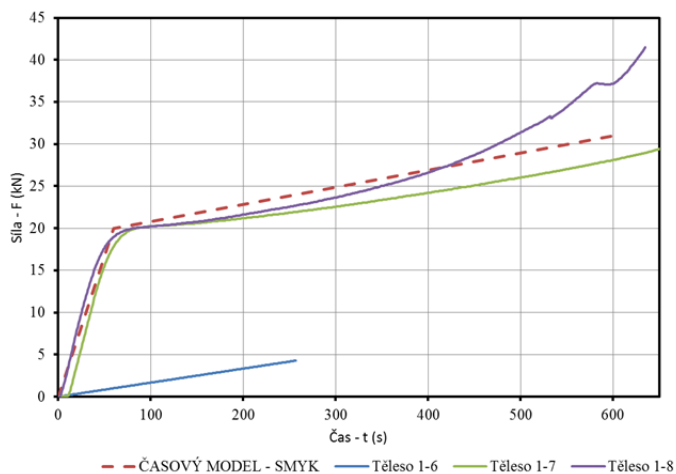
5.6.4. Nastavení výpočtu

Jednotlivé modely byly zatěžovány podle skutečného průběhu zkoušky. V případě Modelu – 1 byl zatěžovací stav rozdělen do 8 kroků tak, aby při validaci výsledků byl co nejpřesněji postihnout pracovní diagram. V případě Modelu – 2 byl zatěžovací stav rozdělen do 9 kroků.

Časový průběh experimentů a numerické analýzy je znázorněn na Obr. 5.9 pro oba typy spojů.



a)

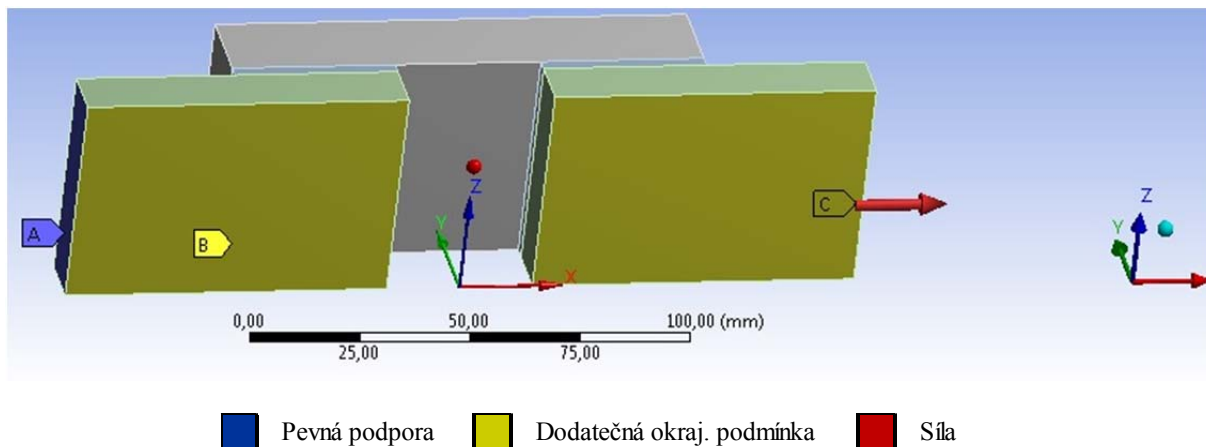


b)

Obr. 5.9: Průběh zatížení spoje a) Model – 1, b) Model - 2

V modelu, s ohledem na reálné chování lepeného spoje, byly uvažovány velké deformace.

Okrajové podmínky byly zvoleny tak, že levá část ocelové příložky byla upevněna pomocí fixní podpory a na opačné straně byla zavedena síla, která byla naměřena v daném časovém okamžiku. Aby byla zajištěna konvergence modelu, byla zavedena dodatečná okrajová podmínka, která zabraňovala posunu ocelových plechů ve směru os Y a Z. V ose X byla umožněna deformace. Celkové okrajové podmínky jsou pro Model – 1 naznačeny na Obr. 5.10. Stejně okrajové podmínky jsou nastaveny i u Modelu – 2.



Obr. 5.10: Okrajové podmínky v numerickém modelu

5.6.5. Analýza výsledků

V experimentu byly měřeny vzájemné podélné posuny ocelové ocelových plechů a skleněné desky. Z numerického modelu byly získány posuny ocelové desky ve směru X. Napětí na smykové ploše lze obecně vypočítat podle rovnice (5.1)

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{F}{A}, \quad (5.1)$$

kde

F je celková síla působící na spoj,

A je plocha jedné kontaktní plochy.

Poměrnou smykovou deformací vrstvy lepidla lze obecně vyjádřit ze vztahu (5.2)

$$\tan \gamma = \frac{u}{t}, \quad (5.2)$$

kde

u vzájemný posun spojovaných materiálů,

t je tloušťka vrstvy lepidla.

Výsledky získané z numerické analýzy jsou uvedeny v Tab. 5.1 a Tab. 5.2.

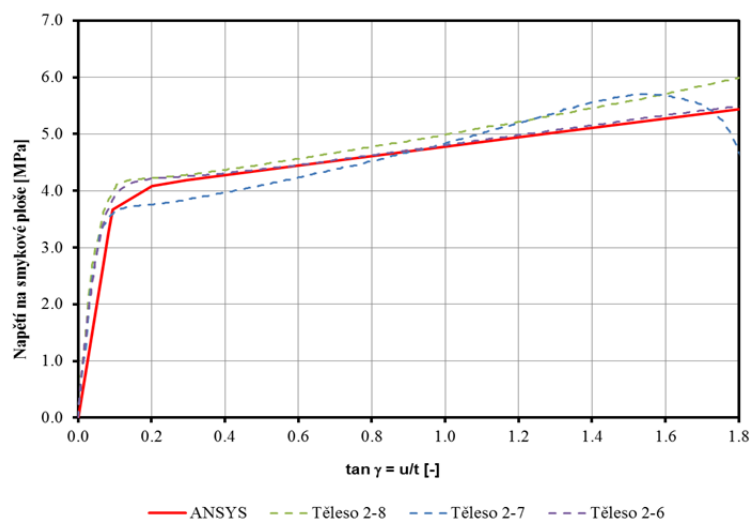
Tab. 5.1: Výsledky z numerické analýzy spoje, Model - 1

Čas T	Síla N	Plocha	Tloušťka	Posun	Smykové Napětí	Poměrné smykové protažení
[s]	[N]	mm ²	mm	mm	MPa	[-]
0.00	0.00	1900.00	3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	2583.33	1900.00	3.00	0.05	0.00	0.00
20.00	5166.67	1900.00	3.00	0.10	1.36	0.03
40.00	10333.33	1900.00	3.00	0.21	2.72	0.07
48.00	12400.00	1900.00	3.00	0.25	3.26	0.08
54.00	13950.00	1900.00	3.00	0.28	3.67	0.09
60.00	15500.00	1900.00	3.00	0.61	4.08	0.20
100.00	15907.41	1900.00	3.00	0.88	4.19	0.29
200.00	16925.93	1900.00	3.00	1.83	4.45	0.61
400.00	18962.96	1900.00	3.00	3.78	4.99	1.26
600.00	21000.00	1900.00	3.00	5.71	5.53	1.90

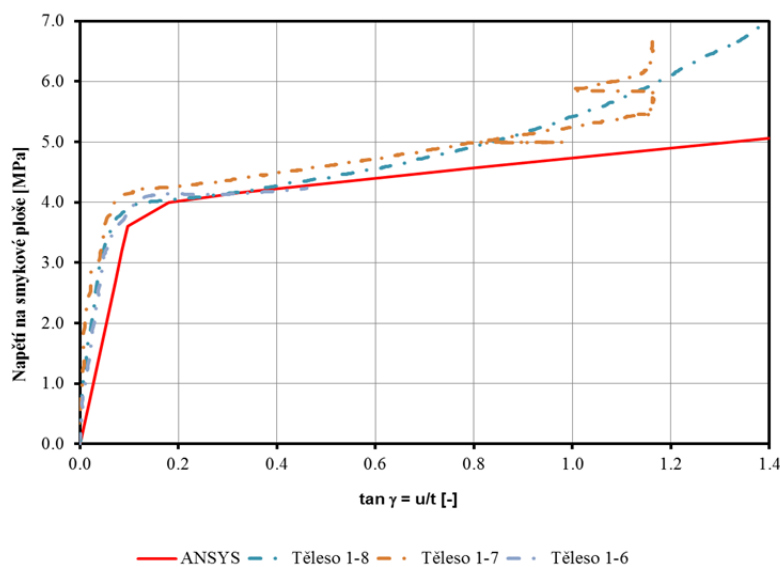
Tab. 5.2: Výsledky z numerické analýzy spoje, Model - 2

Čas T	Síla N	Plocha	Tloušťka	Posun	Smykové Napětí	Poměrné smykové protažení
[s]	[N]	mm ²	mm	mm	MPa	[-]
0.00	0.00	2500.00	3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	3333.33	2500.00	3.00	0.05	0.67	0.02
20.00	6666.67	2500.00	3.00	0.11	1.33	0.04
40.00	13333.33	2500.00	3.00	0.22	2.67	0.07
48.00	16000.00	2500.00	3.00	0.26	3.20	0.09
54.00	18000.00	2500.00	3.00	0.29	3.60	0.10
60.00	20000.00	2500.00	3.00	0.54	4.00	0.18
100.00	20814.81	2500.00	3.00	0.97	4.16	0.32
200.00	22851.85	2500.00	3.00	2.42	4.57	0.81
400.00	26925.93	2500.00	3.00	5.38	5.39	1.79
600.00	31000.00	2500.00	3.00	8.25	6.20	2.75

Výsledky numerické analýzy jsou porovnány se zkušebními tělesy, které nebyly vystaveny vlivu stárnutí. Z grafu je patrné, že bylo dosaženo dobré shody s výsledky z experimentů a lze takto kalibrovaný materiálový model lepidla implementovat do numerického modelu skleněných sloupů. Porovnání je naznačeno na Obr. 5.11.



a) Model – 1



b) Model – 2

Obr. 5.11: Porovnání numerického modelu s experimenty – a) Model-1, b) Model-2

5.7. ZHODNOCENÍ NUMERICKÉ ANALÝZY SPOJE

Numerický model byl kalibrován na základě experimentů s tělesy malých rozměrů, které byly zaměřeny na smykové chování spoje. Provedená numerická analýza byla nezbytnou součástí pro přípravu hlavního numerického modelu skleněných sloupů. Autor disertační práce předpokládá shodné chování spoje i v případě spojení sklo – sklo s ohledem na výsledné kohezní porušení všech zkušebních těles spoje sklo - ocel. Se zvyšující se tloušťkou lepeného spoje dochází ke snížení pevnosti a naopak. Optimální tloušťka lepeného spoje byla stanovena na 3 mm. Tato tloušťka bezpečně pokryje veškeré konstrukční imperfekce vzniklé při výrobě a současně spoj dosahuje dostatečné pevnosti ve smyku.

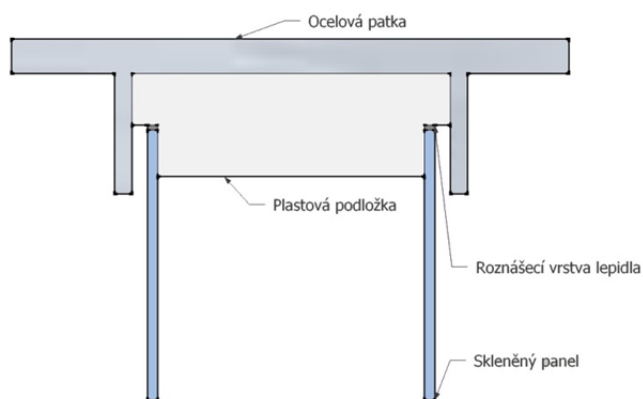
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ETAPA I

6.1. SKLENĚNÝ SLOUP UZAVŘENÉHO PRŮŘEZU

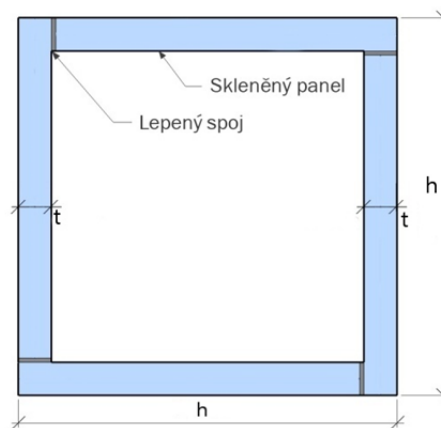
První etapa experimentální části byla zaměřena na ověření konstrukčního chování sloupu při zatížení včetně uložení pomocí ocelových patek. Součástí experimentů byla také validace technologického postupu výroby. Z tohoto důvodu byl v první sadě experimentů ověřen sloup ve zmenšeném měřítku, který byl vyroben pouze z jednovrstvého plaveného skla. Zkušební těleso – sloup byl uložen na obou koncích do ocelových patek. Základ patky tvořil plech o tl. 20 mm, který byl přivařen k čtvercovému průřezu složenému z plechů o tl. 10 mm, viz Obr. 6.1. Celkem byla vyrobena tři zkušební tělesa.

Skleněný sloup byl sestaven ze čtyř základních prvků. Prvním z nich jsou skleněné panely z plaveného skla tl. 6 mm, délky 1750 mm a šířky 150 mm. Další komponentu tvoří akrylátové lepidlo SIKAFa st 5211 – NT. Velké pozornosti bylo věnováno ukončení skleněných sloupů, které je jedním z nejdůležitějších detailů celého konceptu návrhu viz Obr. 6.1. V uložení sloupu na obou koncích bylo nezbytné zajistit rovnoměrný přenos normálové síly do všech skleněných panelů pomocí plastové podložky z polyamidu PMMA a vrstvy akrylátového lepidla, která sjednotila veškeré imperfekce vzniklé při výrobě, zejména délkové imperfekce skleněných panelů. Podložka byla vyrobena z jednoho kusu materiálu. Konstrukce podložky byla navržena ze dvou stupňů tak, aby zabránila případné ztrátě torzní stability průřezu. Poslední komponentou jsou ocelové patky, které mají za úkol přenášet vnější zatížení do sloupu.

Skleněné panely byly pomocí lepeného spoje sestaveny do čtvercového uzavřeného průřezu, viz Obr. 6.2



Obr. 6.1: Uložení sloupu



Obr. 6.2: Příčný řez sloupem

6.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

6.2.1. Zaměření imperfekcí dílčích panelů

Před montáží sloupů byly změřeny skutečné rozměry skleněných panelů. K měření byly použity standardní měřicí techniky a pomůcky (šuplera, pásmo, libela apod.). V následující Tab. 6.1 jsou uvedeny přesné rozměry skleněných panelů.

Maximální přípustné tolerance pro plavené sklo jsou $\pm 1,5\text{mm}$ pro rozměr delší než 1500 mm, $\pm 1\text{mm}$ pro rozměr menší než 1500 mm a $\pm 0,2\text{mm}$ pro tloušťku do 6mm [30]. Výška, tloušťka i délka dílčích panelů jsou podle vyhodnocení v mezních tolerancích (Tol -, Tol +), viz Tab. 6.2. Jedná se především o průměrné hodnoty a variační koeficient CoV. CoV je statistická veličina, která nemá žádné rozměry. Jedná se o míru rozptylu a používá se namísto standardní odchylky [31].

Tab. 6.1: Skutečné rozměry skleněných panelů 9 [31]

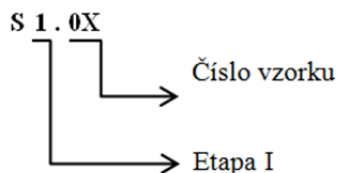
Panel	Sloup S1.01			Sloup S1.02			Sloup S1.03		
	Délka L_{real} [mm]	Šířka h_{real} [mm]	Tloušťka t_{real} [mm]	Délka L_{real} [mm]	Šířka h_{real} [mm]	Tloušťka t_{real} [mm]	Délka L_{real} [mm]	Šířka h_{real} [mm]	Tloušťka t_{real} [mm]
A	1750.5	149.85	6.10	1750.0	150.00	5.90	1750.0	149.05	5.90
B	1749.5	149.80	5.90	1749.8	149.80	6.00	1749.8	149.85	5.95
C	1750.0	149.70	5.90	1749.8	150.05	5.90	1750.0	149.85	5.90
D	1749.5	149.75	5.90	1750.3	149.85	5.90	1749.5	148.45	5.95

Tab. 6.2: Statistické vyhodnocení [31]

Průměr	1749.9	149.78	5.95	1750.0	149.93	5.93	1749.8	149.30	5.93
CoV	0.0003	0.0004	0.0168	0.0001	0.0008	0.0084	0.0001	0.0046	0.0049
Tol -	1751.5	151.00	6.20	1751.5	151.00	6.20	1751.5	151.00	6.20
Tol +	1748.5	149.00	5.80	1748.5	149.00	5.80	1748.5	149.00	5.80

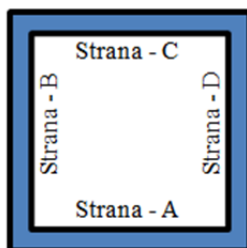
6.2.2. Značení vzorků a dílčích panelů

Skleněné sloupy (zkušební tělesa) byly označeny jako S 1.01 až S 1.03, kde symboly značení jsou vysvětleny níže na Obr. 6.3.



Obr. 6.3: Značení zkušebních těles

Jednotlivé skleněné panely, ze kterých byl složen průřez sloupu, byly označeny písmeny A až D. U všech vzorků byly panely sestaveny tak, aby v jednom směru byly panely A a C a ve směru kolmém B a D, viz Obr. 6.4.



Obr. 6.4: Schéma značení panelů

6.2.3. *Výroba zkušebních těles*

Příprava a čistota povrchu lepených materiálů je jedním z faktorů, který má největší vliv na kvalitu a trvanlivost výsledného lepeného spoje, viz kap. 4. Proto byl pro přípravu skleněných hran a povrchů použit systémový přípravek ADPrep, který odstraňuje všechny nečistoty, mastnoty a zároveň aktivuje povrchové molekuly skleněného panelu. Aplikace aktivátoru ADPrep se provádí přímo na skleněný povrch jedním souvislým a nepřerušným tahem směrem od počátku hrany až do konce, viz Obr. 6.5, Obr. 6.6.



Obr. 6.5: Příprava povrchu lepené hrany



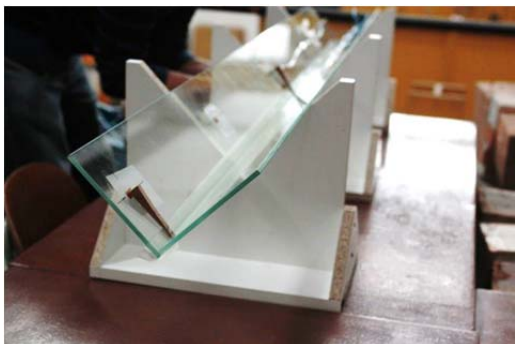
Obr. 6.6: Vytvoření distanční mezery

V průběhu lepení bylo nutné osadit skleněné panely do předem připravených dřevěných forem urovnaných do rovnováhy. Dřevěné formy měly speciální klínový tvar. Vnitřní úhel, který strany svíraly, byl 45°, obr. 6.7. Skleněné panely byly v této fázi uloženy v horizontální poloze. Formy byly umístěny vždy na konci a ve třetině délky skleněného panelu. Horizontální poloha skleněných panelů byla ověřena pomocí libely a případně dorovnána pomocí dřevěných klínů. K vytvoření potřebné lepené spáry bylo použito opět dřevěných klínů, viz Obr. 6.6.

Zvolené lepidlo SIKA Fast 5211 NT je dvousložkové lepidlo, které má otevřený čas použití 11 min. Jednotlivé složky lepidla jsou dodávány odděleně: základní složka + aktivační složka. Tyto složky se smíchají těsně před aplikací lepidla do spáry v plastovém mixéru, který je součástí aplikačního zařízení. Po smíšení nastává reakce (tuhnutí). Aktivační složka má zároveň funkci urychlovače (tzv. boosteru), který výrazně snižuje dobu tvrdnutí do konečné pevnosti lepidla. Finální pevnosti nabývá lepidlo zpravidla v řádech desítek minut (max. hodin) nezávisle na velikosti spoje a jeho geometrii. Vzhledem ke krátké době zpracovatelnosti lepidla je nutné bezprostředně po aplikaci odstraňovat přebytečné zbytky lepidla a zároveň očistit plochu skleněného panelu, Obr. 6.8.

Po aplikaci lepidla do spáry následuje nutná technologická pauza, po které je možné začít přípravu druhé poloviny skleněného dříku. Technologický postup se opakuje pro druhou polovinu dříku.

Skleněný dřík jako celek byl složen ze dvou polovin. Během manipulace byl brán zvýšený ohled na křehkost konstrukce. Po osazení do formy byly opět vytvořeny distanční mezery pro aplikaci lepidla. Aby nedocházelo k protékání lepidla do vnitřní části dříku, byly použity hliníkové rohové lišty, jejichž povrch byl potažen lepicí páskou s voskovým povrchem, Obr. 6.11. Voskový povrch zabraňuje úplnému přilnutí lepidla. Vzhledem k relativně krátké výšce sloupů bylo možné manuálně lišty upevnit i ve třetinách rozpětí.



Obr. 6.7: Polovina dříku před aplikací lepidla



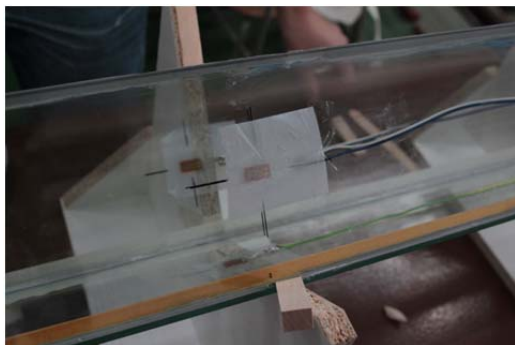
Obr. 6.8: Odstranění přebytečné vrstvy lepidla



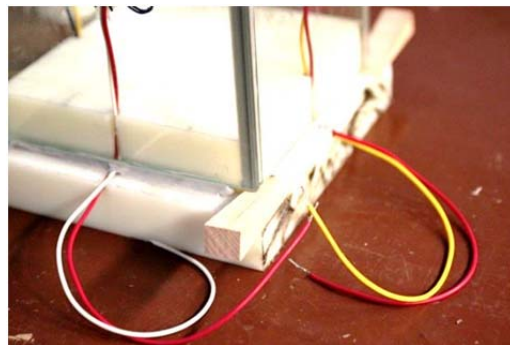
Obr. 6.9: Průřez dříku skleněného sloupu



Obr. 6.10: Osazení Alu lišt



Obr. 6.11: Detail Alu lišty



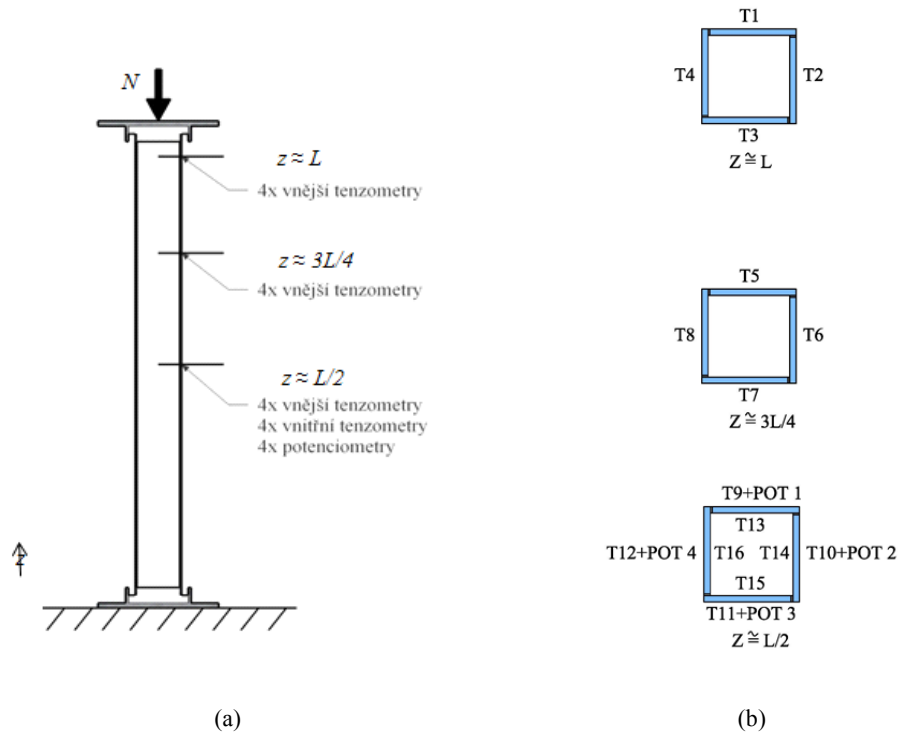
Obr. 6.12: Detail uložení skleněného dřívku na plastovou podložku

Poslední fází sestavení sloupu je osazení plastových dvoustupňových podložek. Sloup byl ustaven do svislé polohy a opět pomocí dřevěných klínů a libely uveden do rovnovážné polohy. Ložná dosedací spára průřezu byla vyplněna vrstvou lepidla. Tato vrstva pak zajišťuje rovnoměrnou redistribuci normálové síly do všech skleněných panelů, Obr. 6.12.

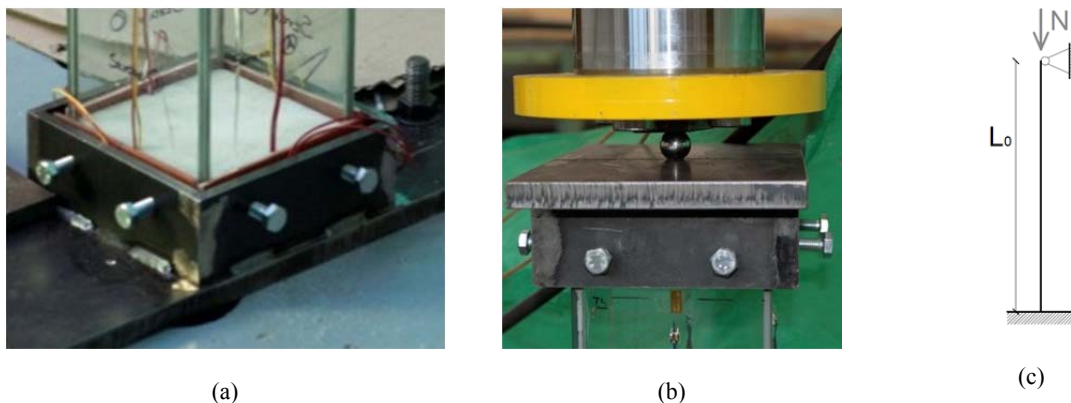
6.3. PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ

Zkušební tělesa byla usazena do ocelových patek tak, že mezi patkou a hranou skleněného sloupu byla plastová podložka. Sloup byl 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 LY11 – 10/120, viz Obr. 6.13. Tenzometry byly osazeny ve třech vodorovných řezech a to v místě vnesení zatížení, ve čtvrtině výšky sloupu a v polovině výšky sloupu. Tenzometry byly osazeny vždy na vnější straně a ve středním průřezu byly osazeny při obou stranách, tedy na vnitřním i vnějším povrchu, vždy proti sobě. V průběhu zkoušky byla rovněž zaznamenávána působící svislá síla a vodorovná deformace uprostřed sloupu. Vodorovné deformace byly měřeny pomocí 4 potenciometrů, které byly osazeny na každý panel po jednom kusu, viz Obr. 6.13b.

Na Obr. 6.13a) je znázorněn sloup a dílčí průřezy, ve kterých bylo umístěno snímací zařízení. Na Obr. 6.14a), Obr. 6.14b) je znázorněno reálné uložení ve zkušebním zařízení. Tyto okrajové podmínky lze idealizovat jako vetknutí v patě a kloub ve vrcholu, viz Obr. 6.14c). Zatížení bylo do skleněných vzorků vnášeno pomocí ocelového ložiska přes ocelovou patku, ve které byl sloup ustaven a vyrovnán.



Obr. 6.13: a) Schéma skleněného vzorku, b) pozice a označení rozmístění tenzometrů.



Obr. 6.14: Okrajové podmínky při testu a) spodní část, b) horní část, c) statické schéma sloupu

6.4. ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.02

Vzhledem ke geometrickým vadám vzniklým při výrobě (nedokonalé spojení rohu, které je vidět na Obr. 6.15) byl sloup S 1.02 zkoušen jako první.

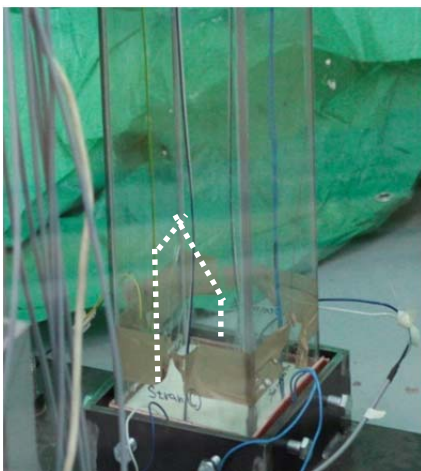
Vzhledem k asymetrii v jednom z lepených spojů, byl experiment charakterizován téměř nerovnoměrným chováním a to zejména v období po vytvoření prvních trhlin. První trhliny se objevily v blízkosti spodní části skleněných tabulí A a D, při dosažení tlakové síly $N_{f,1} = 72$ kN.

V průběhu testu se objevila řada dílčích problémů, které poukázaly na nesymetrické zatěžování skleněného sloupu. Prvním problémem bylo nedokonalé dosednutí plastové podložky v ocelové patě.

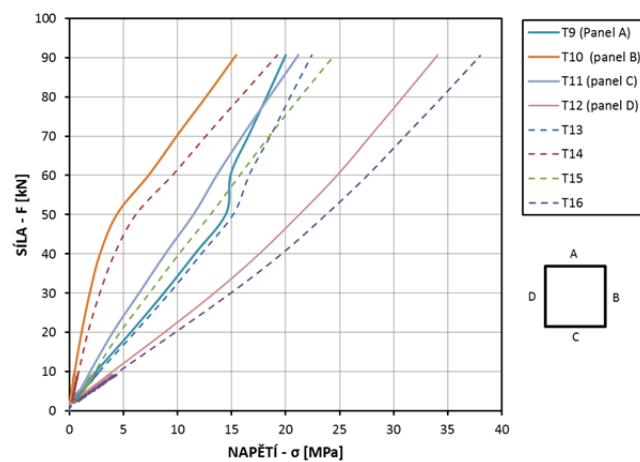
Ustavením sloupu ve svislé poloze plastová podložka spočívala pouze na dvou až třech rohových bodech. Zatěžováním sloupu tak docházelo k nerovnoměrnému přenosu zatížení a v kombinaci s imperfekcí lepeného spoje se tento efekt zvyšoval. Nesouměrný přenos tlakové síly značně ovlivnil chování vzorku po objevení prvních trhlin ve skle. Lokální špičky napětí způsobily oddělení části skleněného sloupu v patě. Nesymetrický průřezu pak významně ovlivnil i reziduální, neboli zbytkovou únosnost sloupu, tj. únosnost do kolapsu.

Ačkoliv bylo těleso S1.02 značně poškozeno, celkový kolaps nastal při zatížení silou $N_{f,max} = 95$ kN. Mechanismus porušení sloupu lze popsat jako náhlé uvolnění vnitřní energie. Před samotným kolapsem sloupu byl pozorován postupný rozvoj trhlin, Obr. 6.15a). Zbytkovou únosnost sloupu S 1.02 lze určit jako rozdíl sil při porušení a kolapsu, tedy $\Delta N = N_{f,max} - N_{f,1}$.

Na Obr. 6.15b) je zobrazena závislost hlavních napětí σ na zatěžovací síle N v polovině výšky sloupu. Na svislé ose je vynesena tlaková síla N a na vodorovné ose jsou zobrazena odpovídající napětí uprostřed výšky sloupu, kde bylo osazeno celkem 8 tenzometrů. Čárkované čáry odpovídají tenzometrům umístěným ve vnitřní části průřezu. Z grafu je patrné téměř pravidelné rozložení napětí při obou stranách. Výjimkou byl panel A (viz tenzometry T9 a T13). Nerovnoměrnost napětí je dána počátečními imperfekcemi popsanými výše.



a)



b)

Obr. 6.15: Vzorek S 1.02 a) zobrazení první trhliny ve spodní části, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle

Na úrovni zatížení $N = 55$ kN je vidět změnu v hlavních napětích, viz obr. 5.15b). Tato změna je pravděpodobně vyvolána dotvarováním plastové podložky v ocelové patě. Částečně na změnu napětí měl i vliv dotvarování lepeného rohu.

6.5. ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.01

Na základě pozorování a předběžného vyhodnocení výsledků během zkoušky sloupu S 1.02 bylo modifikováno uložení sloupu. Za účelem dosažení rovnoměrného rozložení napětí ve všech čtyřech panelech byla přidána vrstva jemného písku mezi plastovou podložku a ocelovou patku.

Touto úpravou bylo dosaženo zlepšení v chování sloupu při zatížení, zvláště pak ve fázi kdy byl sloup již porušen.

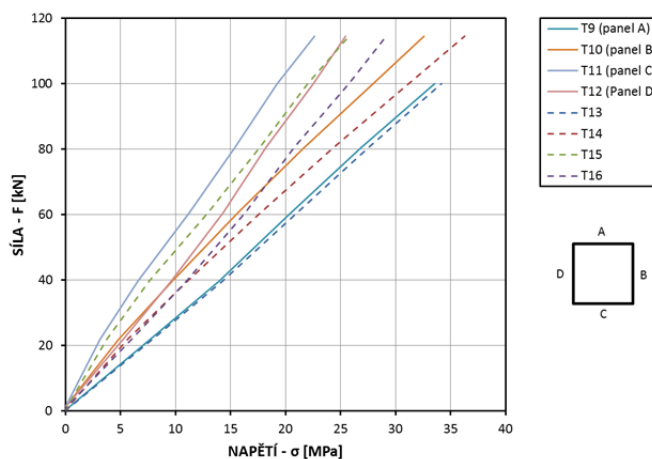
K prvnímu porušení došlo při působení tlakové síly $N_{f,1} = 72$ kN, tedy při stejné hodnotě zatížení jako u zkušebního tělesa S 1.02. Podobně jako u předešlého vzorku byly první trhliny pozorovány ve spodní části sloupu, konkrétně na panelu A. Směr trhlín byl svislý, viz Obr. 6.16a) a lze jej vysvětlit působením příčného tahu.

Zkušební těleso S 1.01 po dosažení své únosnosti mělo po úpravě uložení stabilnější chování až do kolapsu ve srovnání s vzorkem S 1.02. Úpravou přenosu zatížení v patě bylo docíleno rovnoměrného rozložení napětí. Průběh napětí v závislosti na zatížení uprostřed výšky je naznačen na Obr. 6.16b). Na svislé ose je vynesena tlaková síla N a na vodorovné ose jsou zobrazena odpovídající napětí. Z grafu je patrné, že napětí získaná z vnitřních i vnějších tenzometrů na příslušných panelech jsou téměř symetrická.

Dalším zatěžováním po dosažení únosnosti sloupu docházelo k postupnému šíření trhlín. Směr trhlín byl opět svislý a celkový kolaps sloupu S1.01 nastal při síle $N_{f,max} = 117.5$ kN, což je zhruba $1,63 N_{f,1}$. Na Obr. 6.16a) je znázorněn směr trhlín a na Obr. 6.16b) je znázorněn průběh hlavních napětí σ při působení svislé tlakové síly.



a)

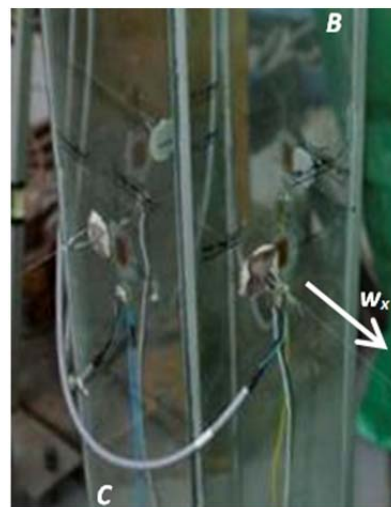
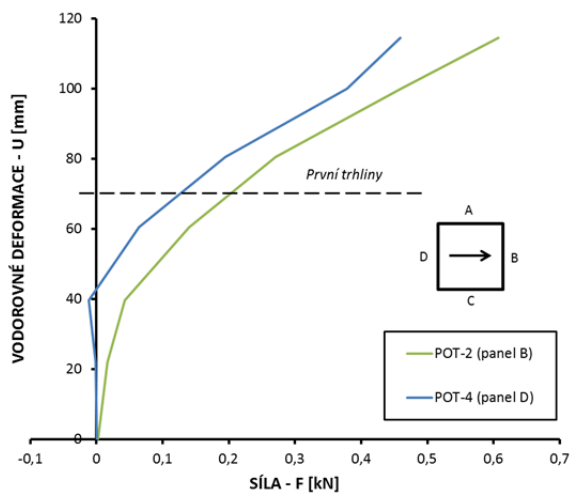


b)

Obr. 6.16: Vzorek S 1.01 a) znázornění první trhliny, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle

Odpovídající vodorovné deformace středního průřezu z roviny v závislosti na zatížení jsou zobrazeny na Obr. 6.17a) a to ve směru hlavního vybočení, tedy Pot-2 a Pot-4 umístěné na panelu B a D, viz Obr. 6.17. Z grafu je patrná dobrá shoda, pokud jde o globální mechanismus ohybu vzorku. Současně bylo

během experimentu měřeno vybočení v kolmém směru, tedy Pot-1 a Pot-3 umístěné na panelech A a C. Vybočení průřezu v tomto směru bylo ale zanedbatelné.



a)

b)

Obr. 6.17: Vzorek S 1.01 a) graf vybočení průřezu, b) detail umístění potenciometrů

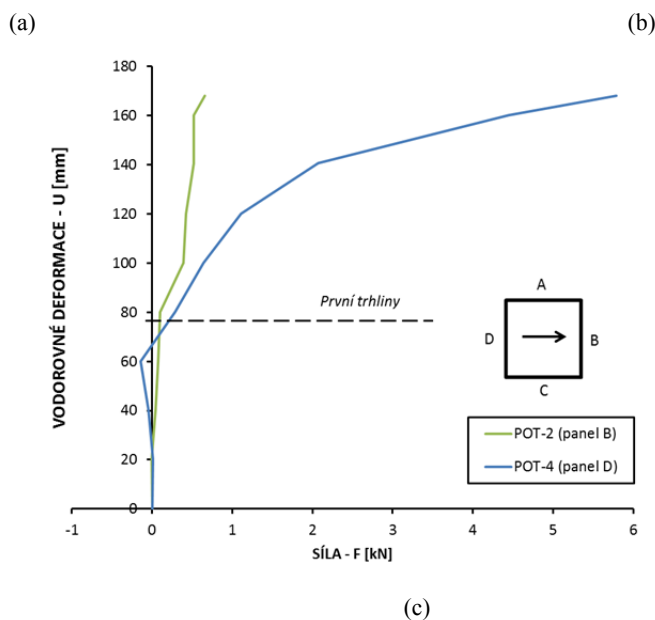
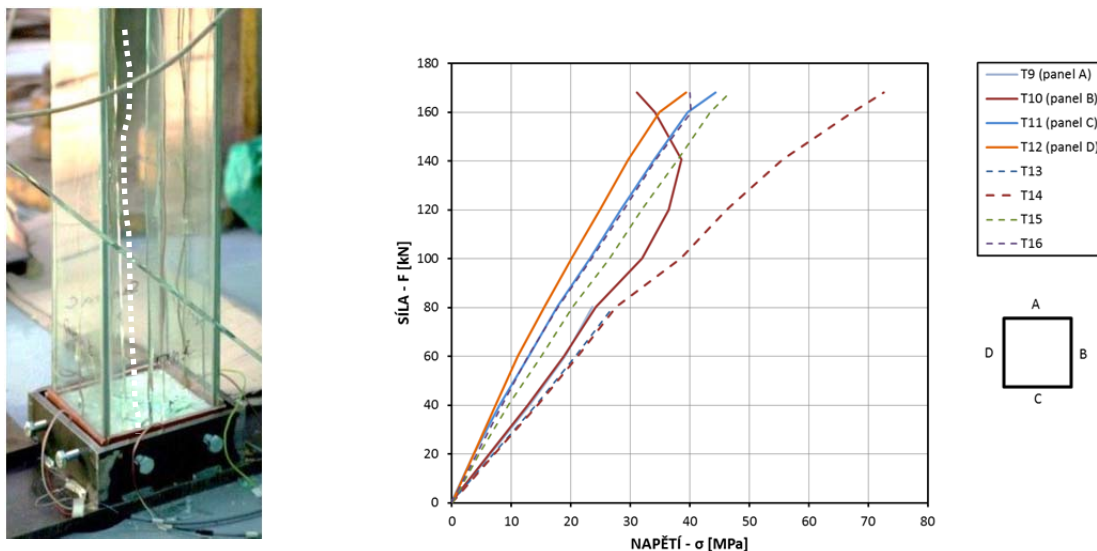
6.6. ZKUŠEBNÍ TĚLESO S 1.03

Sloup S 1.03 potvrdil celkové chování skleněného sloupu zatíženého centrickým tlakem. První trhliny se objevily opět ve spodní části panelu, konkrétně na panelu A. Síla, při které bylo dosaženo únosnosti sloupu, byla $N_{f,1} = 75$ kN, viz Obr. 6.18a).

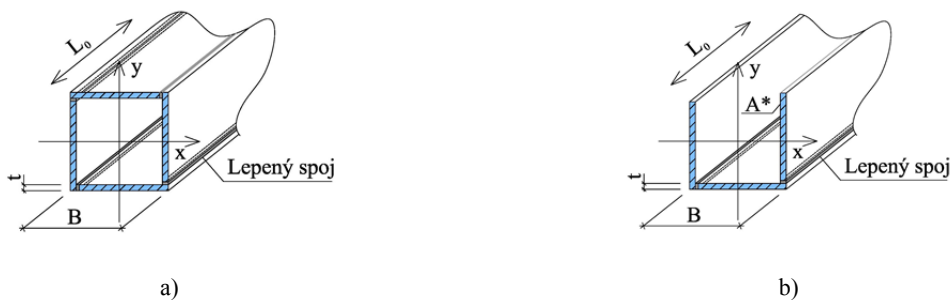
Dalším přitěžováním sloupu došlo k postupnému šíření trhliny na panelu A a to až do úplného rozpadu této skleněné části sloupu. Došlo k celkové změně průřezu, tedy ze čtvercového průřezu na “C” průřez, viz Obr. 6.19. I přes rozpad panelu A přenášel sloup zatížení až do porušení kolapsem. Celkový kolaps nastal při síle $N_{f,max} = 168$ kN, což je téměř 2,24 krát více než únosnost sloupu $N_{f,1}$.

Na obrázku Obr. 6.18b) je znázorněn průběh tlakové síly N v závislosti na hlavním normálovém napětí uprostřed výšky sloupu. Z průběhu napětí je dobře patrný okamžik porušení, zejména křivka pro panel B. Změna napětí se projevila při síle $N_{f,1} = 80$ kN, tedy v okamžiku rozpadu dílčího panelu A.

Na obrázku Obr. 6.18c) je znázorněna deformace středního průřezu z roviny sloupu v závislosti na tlakové síle. Porovnáním sloupu S 1.03 a S 1.01 lze pozorovat stejný směr vodorovné deformace před dosažením únosnosti sloupu $N_{f,1}$. Způsob, jakým se tento zkušební vzorek porušil, měl vliv na výsledné vodorovné deformace po překročení únosnosti sloupu.



Obr. 6.18: Vzorek S 1.03 a) zobrazení první trhliny, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle, c) graf vybočení průřezu ve středu rozpětí



Obr. 6.19: Grafické znázornění změny průřezu vzorku S1.03 a) před porušením, b) po porušení

6.7. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ I. ETAPY

Naměřená data dokazují dvojosé vybočení z hlavních rovin X a Y i přes to, že zkušební tělesa byla zatěžována jen svislou silou a dodatečný ohyb nastával kolem hlavních os vlivem počátečních imperfekcí. Z tohoto důvodu je přesný popis provedených experimentů obtížný - zejména pro fázi po vzniku první trhliny

Tab. 6.3: Souhrn získaných dat z experimentů I. Etapy

Vzorek	Únosnost sloupů			Zbytková únosnost			ΔN [%]
	$N_{f,1}$ [kN]	w_x [mm]	w_y [mm]	$N_{f,max}$ [kN]	w_x [mm]	w_y [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

Tab. 6.3 přehledně uvádí dosažené únosnosti dílčích vzorků a síly, při kterých došlo k celkovému kolapsu. Současně je Tab. 6.3 uvedeno, jakých hodnot vodorovné deformace bylo dosaženo uprostřed výšky pro daný směr a sílu. Zbytková únosnost je pak vyjádřena v procentech a vypočtena podle následující rovnice (6.1)

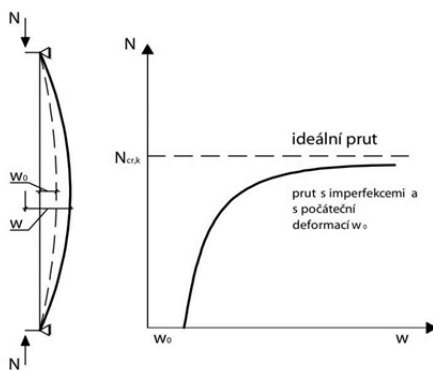
$$\Delta N = 100 \cdot \frac{(N_{f,max} - N_{f,1})}{N_{f,1}}. \quad (6.1)$$

U všech vzorků bylo dosaženo srovnatelného chování v první fázi experimentu, tj. až do vzniku první trhliny. U sloupu S 1.02 byly očekávány lokální špičky napětí v důsledku větších počátečních imperfekcí, které způsobily předčasné porušení skleněné tabule. Chování zkušební tělesa S 1.03 nelze objektivně porovnat se vzorkem S 1.01 vzhledem k rozpadnutí dílčího panelu A. Obecně lze ale říci, že sloupy dosáhly uspokojivé únosnosti a z hlediska bezpečnosti mají dostatečnou zbytkovou únosnost, což v praxi znamená, že kolaps sloupů nenastane v okamžiku vytvoření první trhliny.

6.8. ANALYTICKÝ MODEL

Analytický model pro výpočet napětí vychází při zatížení excentrickým tlakem ze stability ideálního přímého prutu [38].

Chování prutu z jednovrstvého skla může být popsáno za použití diferenciální rovnice druhého řádu 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. 6.20.

Obr. 6.20: Excentricky zatížený tlačený prut s počáteční deformací w_0 .

Diferenciální rovnici druhého řádu lze vyjádřit jako (6.2).

$$EIw(x)'' + N \cdot \left[w_0 \sin \frac{\pi x}{L} + e + w(x) \right] = 0 \quad (6.2)$$

Kritická (Eulerova) síla je pak definována jako (6.3)

$$N_{cr,k} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}, \quad (6.3)$$

kde

L_k je vzpěrná délka, závisí na způsobu uložení prutu

I je moment setrvačnosti dutého průřezu a lze jej vypočítat rovnicí (6.4)

$$I = \sum \left(\frac{1}{12} t_p \cdot h_p^3 + A_1 \cdot z_i^2 \right), \quad (6.4)$$

kde

t_p je tloušťka jednoho panelu

h_p – je výšky jednoho panelu

A_1 – je plocha jednoho panelu

z_i – je vzdálenost těžiště jednoho panelu od těžiště průřezu.

Maximální deformace je dána rovnicí (6.5)

$$w = \frac{e}{\cos(L_k / 2 \sqrt{N/N_{cr,k}}} + \frac{w_0}{1 - N/N_{cr,k}}. \quad (6.5)$$

Maximální napětí, na povrchu může být stanoveno jako (6.6)

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A_c} \pm \frac{N}{W} \left(\frac{e}{\cos(L_k / 2 \sqrt{N/N_{cr,k}}} + \frac{w_0}{1 - \frac{N}{N_{cr,k}}} \right), \quad (6.6)$$

kde

A_c je suma dílčích skleněných panelů,

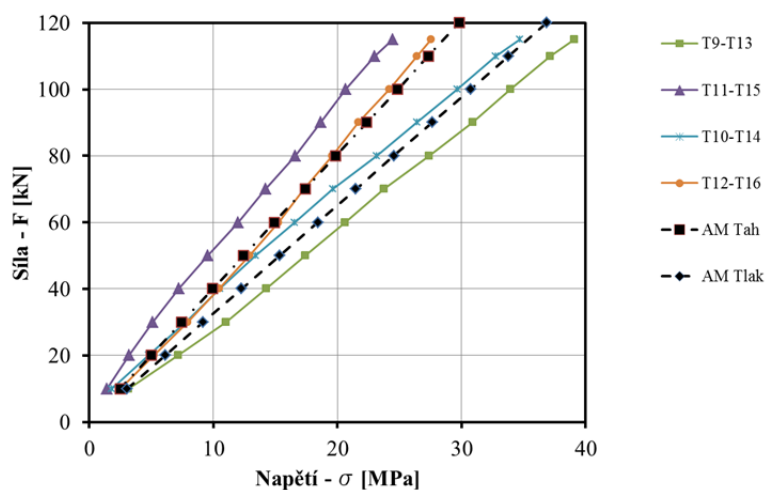
W je průřezový modul celého průřezu.

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 výroby sloupu a nepřesnosti

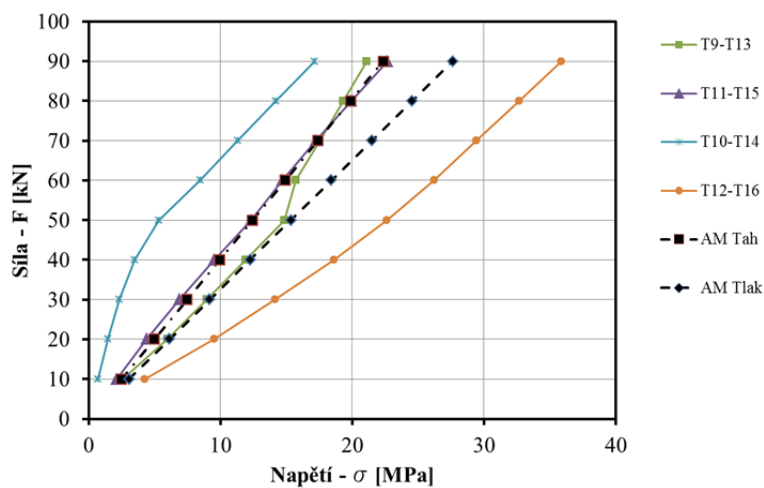
dílčích skleněných panelů vzniklé při výrobě. Celková vodorovná deformace w_0 je dána prostým součtem dílčích deformací $w_{0,1}$ a $w_{0,2}$.

Takto sestavený analytický model byl použit pro porovnání s výsledky z experimentů. Pro toto posouzení byly vybrány všechny vzorky.

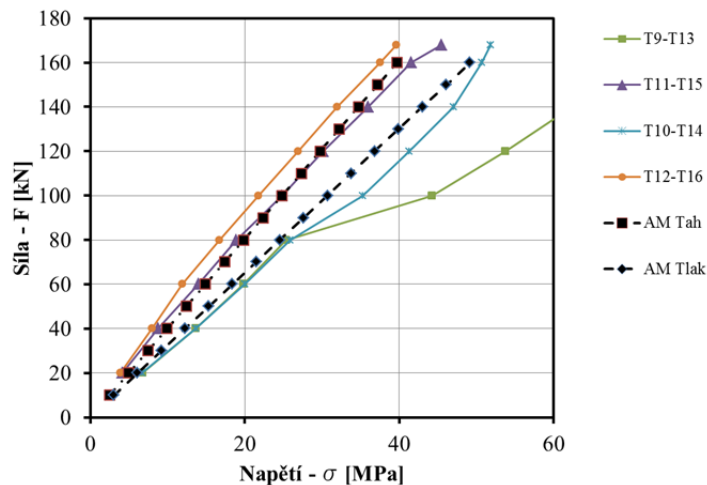
V následujícím Obr. 6.21 jsou zobrazeny hodnoty hlavních napětí σ ve středním průřezu v závislosti na vnesené síle N .



(a)



(b)



(c)

Obr. 6.21: Porovnání analytického modelu s experimenty v hlavním směru vybočení, a) sloup S 1.01, b) sloup S 1.02, c) sloup S 1.03

Křivky označené jako AM_{tah} jsou hodnoty napětí vypočtené na základě analytického modelu a snížené o ohybový účinek, křivky označené jako AM_{tlak} jsou hodnoty normálového napětí zvýšené o ohybový účinek.

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

Na Obr. 6.21b) je znázorněn sloup S 1.02, který byl testován první v pořadí. Z grafu jsou dobře čitelné vyšší hodnoty napětí a to vlivem imperfektního uložení v patě.

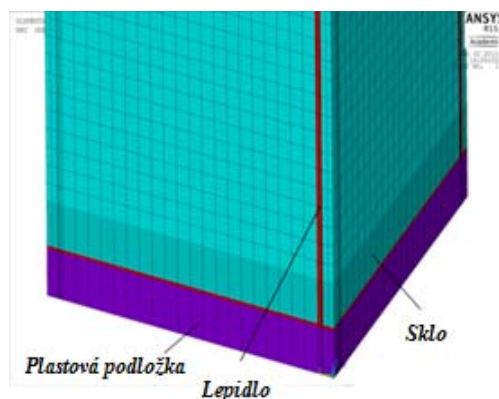
6.9. NUMERICKÝ MODEL SKLENĚNÉHO SLOUPU

K vytvoření numerického modelu byla použita metoda konečných prvků. Simulace numerickými modely byly provedeny pomocí a) 2D modelu s prvky SHELL a b) 3D modelu s prvky SOLID. Numerické modely byly porovnány s referenčním zkušebním tělesem S1.01.

6.9.1. *Předběžný numerický 3D model a porovnání výsledků s experimenty*

Předběžný numerický model byl vytvořen před provedením experimentů I. etapy s cílem ověřit chování zkušebního tělesa při zatížení a předběžně určit body vhodné k umístění měřicí techniky (tenzometry a potenciometry).

Numerický 3D model byl vytvořen v programovém prostředí softwaru ANSYS přičemž všechny části skleněného sloupu (skleněné panely, plastové podložky, lepidla) byly modelovány pomocí prvků SOLID, viz Obr. 6.22.



Obr. 6.22: Numerický model 3D vytvořený v programu ANSYS, detail zjemněné sítě

Z databáze programu ANSYS byly použity objemové prvky SOLID 186 a SOLID 45. SOLID 186 je pevný prvek v 3-D s dvaceti uzly vyššího řádu, které mají tři stupně volnosti na jeden uzel. Směr volnosti je tedy ve směrech X , Y a Z . Prvek podporuje plasticitu, hyper-elasticitu, tečení, stlačování, velkou deformaci a velké deformační schopnosti. Má rovněž vlastnosti vhodné pro simulaci deformací téměř nestlačitelných elasto-plastických materiálů a plně nestlačitelných hyper-elastických materiálů [32]. SOLID 45 se používá pro trojrozměrné modelování pevných konstrukcí. Prvek je definován osmi uzly, které mají v každém uzlu tři stupně volnosti. Element podporuje plasticitu a velké deformace [33]. V modelu byla zavedena některá zjednodušení, zejména byly použity nominální rozměry pro všechny části, viz Tab. 6.4. Všechny kontakty navrženy jako „lepené“, byly nastaveny jako tuhé. Pravidelná síť byla na koncích skleněných panelů zhuštěna, viz Obr. 6.22. Skleněné panely byly ve směru tloušťky panelu rozděleny dvěma elementy.

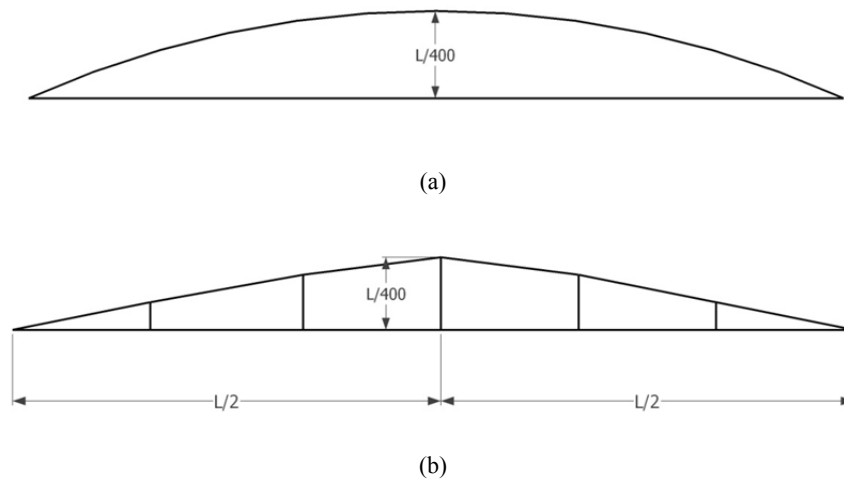
V předběžném numerickém modelu byly zanedbány ocelové patky, avšak okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby odpovídaly experimentům. Zejména bylo bráněno posunutí ve spodní části sloupu. Zatížení působilo na vrchní část plastové podložky v hlavě sloupu ve tvaru rovnoměrného plošného zatížení.

Tab. 6.4: Nominální rozměry panelů použité v numerickém modelu

Panel	Rozměry		
	Délka L_{real} [mm]	Šířka h_{real} [mm]	Tloušťka t_{real} [mm]
A	1750,0	150,0	6,0
B	1750,0	150,0	6,0
C	1750,0	150,0	6,0
D	1750,0	150,0	6,0

Numerický model byl od počátku modelován s počátečními imperfekcemi. Mezi imperfekce lze zahrnout materiálové a geometrické vady vzniklé při výrobě plaveného skla, vady vzniklé při montáži skleněných sloupů a v neposlední řadě excentrické působení zatížení. V souladu s těmito faktory byl vybrán počáteční tvar zakřivení ve tvaru sinusoidy o velikosti amplitudy $w_{0x} = L / 400$ [7].

Imperfektní tvar byl v tomto modelu zaveden pouze do jednoho směru a byl vymodelován pomocí pěti průřezů, jejichž posunem z roviny sloupu byl docílen zjednodušený požadovaný tvar, viz Obr. 6.23.



Obr. 6.23: Imperfekce v numerickém modelu, (a) tvar sinusoidy, (b) náhrada v numerickém modelu z pěti průřezu

Sklo bylo uvažováno jako izotropní materiál s Youngovým modulem pružnosti $E_{glass} = 70$ GPa a Poissonovým součinitelem $\nu_{glass} = 0,23$ [34]. Plastová podložka byla uvažována také jako izotropní materiál s počátečním modulem pružnosti $E_{PAD} = 3,5$ GPa a součinitelem $\nu_{PAD} = 0,39$ [34].

Pro popis akrylátového lepidla byl použit elasto-plastický model s počátečním modulem pružnosti $E_{glue} = 250$ MPa a Poissonovým součinitelem $\nu_{glue} = 0,4$ [34].

Jelikož se jedná o předběžný numerický model a reálné chování bylo ověřeno až po provedení zkoušek I. etapy, je tento model lepidla dostačující. Pro pozdější celkovou validaci a kalibraci byl materiálový model lepidla zpřesněn.

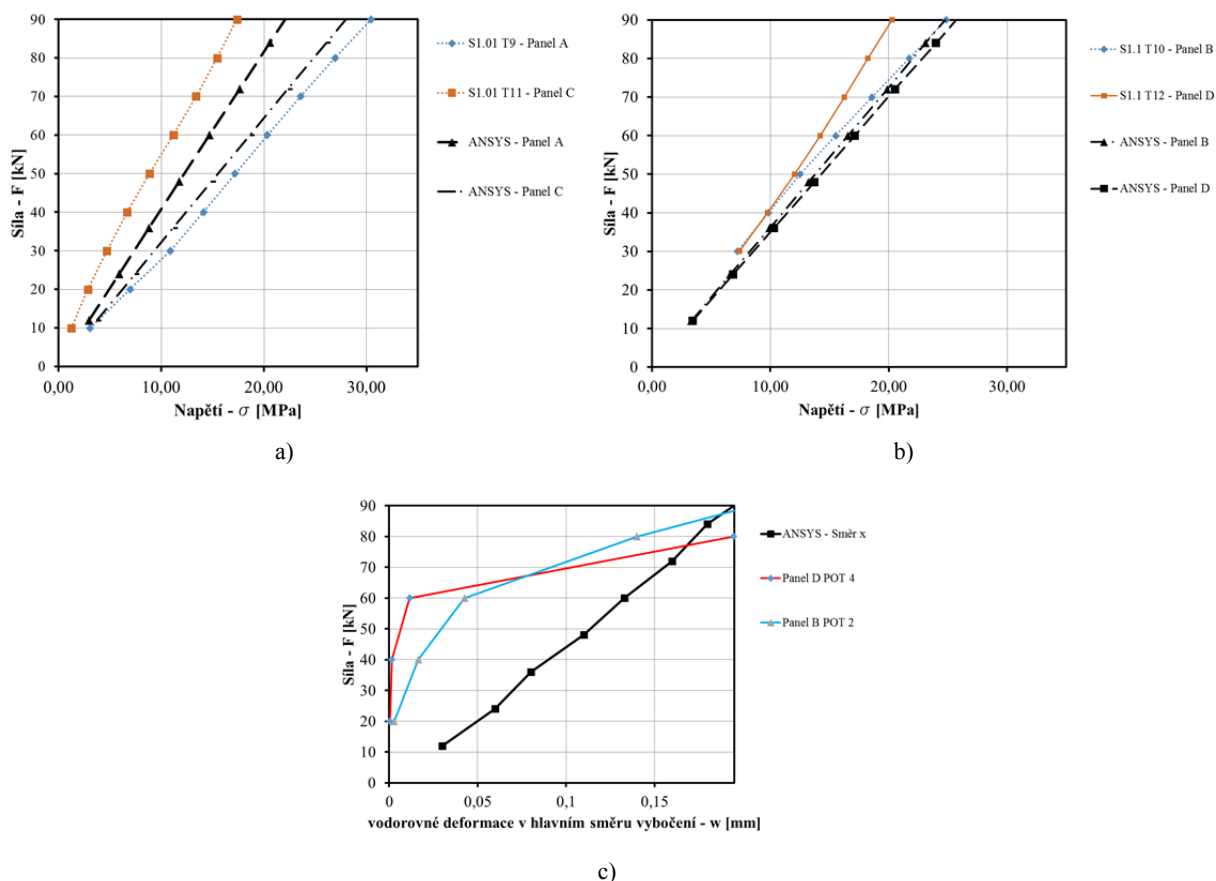
Takto sestavený a validovaný numerický 3D model byl použit pro porovnání s výsledky experimentů. Pro toto posouzení byl vybrán zkušební vzorek S1.01, který lze považovat za reprezentativní vzorek z provedených experimentů.

Porovnání výsledků je zobrazeno na Obr. 6.24. Na obrázku jsou zobrazeny hodnoty hlavních napětí σ ve středním průřezu v závislosti na vnesené síle N .

Na Obr. 6.24a jsou zobrazeny hodnoty napětí z tenzometru T9 (panel A) a T11 (panel C). Tyto hodnoty reprezentovaly hlavní směr vybočení průřezu. Vybočením průřezu docházelo k interakci ohybu s normálovou silou, přičemž křivka tenzometru T9 reprezentuje hodnotu tlakového normálového napětí zvětšenou o ohybový účinek. Naopak křivka odpovídající tenzometru T11 představuje tlakové normálové napětí snižené o ohybový účinek. Porovnáním experimentálních dat a

dat získaných z předběžného numerického modelu je vidět dostatečná shoda. Průměrná absolutní odchylka je v rozmezí 11,8% až 27,8%.

Na Obr. 6.24b) jsou zobrazeny hodnoty normálového napětí v kolmém směru, tedy T10 (panel B) a T12 (panel D). Jelikož v tomto směru nedocházelo k významným vodorovným deformacím, nebyla v tomto směru imperfekce zavedena. Hodnoty dosažených napětí z experimentů a z předběžného numerického modelu jsou ve shodě do vzniku prvního porušení, tj. do úrovně zatížení $N_{f,1} \approx 60\text{kN}$.



Obr. 6.24: Porovnání výsledků a) - b) porovnání normálového napětí v jednotlivých směrech, c) porovnání vybočení průřezu s numerickým modelem

Na obrázku Obr. 6.24c je porovnáno vybočení v hlavním směru. Vzhledem k tomu, že je imperfekce numerického modelu pouze v jednom směru, je porovnán pouze hlavní směr vybočení. Předběžný model v první fázi (před porušením) dosahuje podobných hodnot vybočení průřezu a je tedy na straně bezpečné.

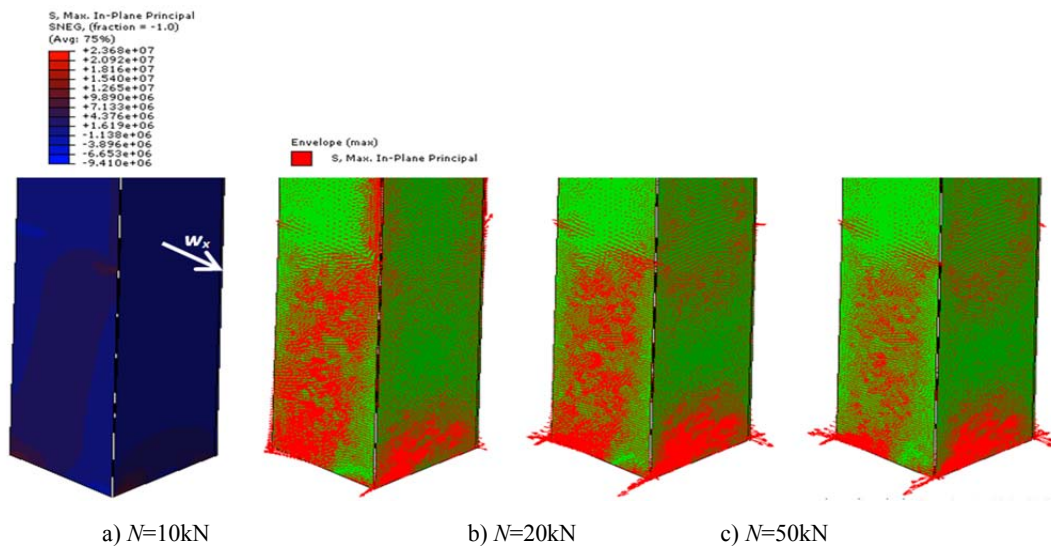
Od síly v $N \approx 60\text{kN}$ pak model nepostihuje rozvoj trhlin a faktickou změnu průřezu, která má vliv na tuhost sloupu v ohybu.

6.9.2. Zjednodušený 2D model a porovnání výsledků s experimenty

V této části numerické analýzy byl vytvořen zjednodušený model z prvků SHELL, tedy 2D model. Model byl vytvořen v jiném numerickém softwaru, konkrétně ABAQUS [18]. Veškeré materiálové

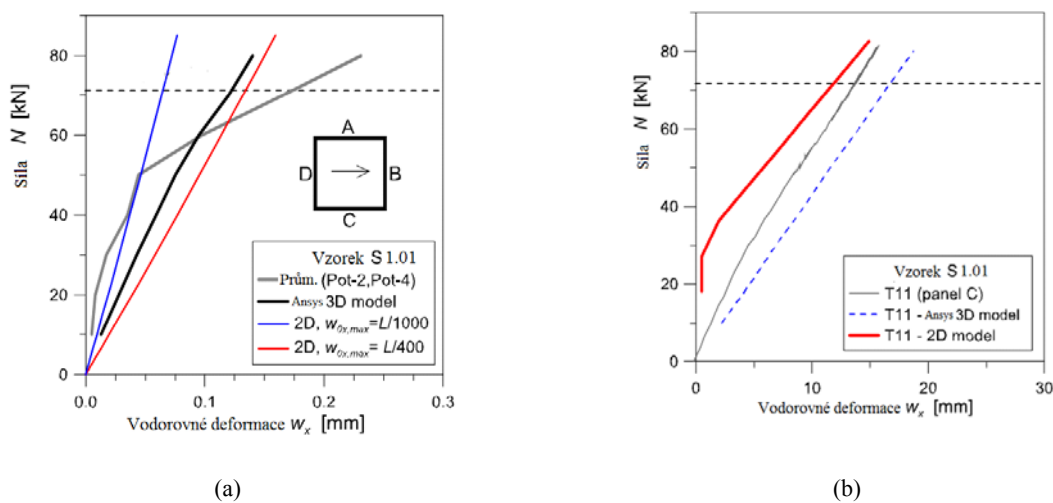
vlastnosti byly nastaveny shodně s 3D numerickým modelem. Rozdíl byl dán pouze geometrickým popisem dílčích komponent, jejichž popis byl zadán plošnými čtyřuzlovými prvky.

Takto sestavený 2D model byl porovnán s experimenty. V místě podepření lze vidět tvorbu tahových napětí, kterou lze popsat jakýmsi obloukovým mechanismem, viz Obr. 6.25. Tato skutečnost odráží i výše popsaný mechanismus porušení experimentálních vzorků.



Obr. 6.25: Schématické znázornění průběhu trajektorií hlavních napětí v patě sloupu [31]

Vzhledem k modelování s využitím 2D prvků je tento model vysoce citlivý ke zvolené počáteční imperfekci ve srovnání s 3D modelem. Tento efekt je znázorněn na Obr. 6.26a, kde je porovnáno vybočení průřezu ve středu rozpětí obou numerických modelů s průměrným vybočením vzorku S 1.01. Numerický 2D model byl testován na počáteční sinusovou výchylku s hodnotou amplitudy $L / 400$ a $L / 1000$. Vyšší citlivost sítě se projevuje i v porovnání hlavních napětí, které jsou porovnávána s 3D modelem a experimentálními daty na Obr. 6.26.



Obr. 6.26: Porovnání vybočení vypočtených numerickými modely s experimenty, b) porovnání pracovních diagramů, napětí - síla [31]

Závěrem lze říci, že provedená analýza numerických modelů uspokojivě prokázala shodu s dosaženými výsledky z experimentů. Ačkoliv 2D numerický model poskytuje poměrně dobré výsledky pro první fázi chování, tedy do prvního porušení, je 2D model značně zjednodušen v porovnání s 3D numerickým modelem, který zahrnuje přenos zatížení z plastové podložky do skleněného dřívku. 2D model tento fakt zanedbává a koncové podpěry jsou modelovány zjednodušeným způsobem.

6.10. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ I. ETAPY EXPERIMENTŮ

V této části disertační práce byla představena a popsána první etapa experimentální části výzkumu skleněných sloupů. V průběhu experimentů vykazovala zkušební tělesa stejný mechanismus porušení. Tvorba a rozvoj trhlin ve spodní části sloupu se projevily u všech tří zkušebních těles. Lineární průběh hlavních napětí byl změřen u všech těles až do únosnosti, tedy $N_{f,1}$, která byla téměř shodná. Volbou plaveného skla bylo docíleno i zbytkové (reziduální) únosnosti, tedy nedošlo k okamžitému kolapsu, a tudíž vzorky byly schopny přenášet další zatížení.

Analytickým porovnáním bylo prokázáno očekávané nadhodnocení výsledků vypočtených podle Eulerovy rovnice pro ideálně přímý prut a únosnost při prostém tlaku. Tyto analytické metody nezahrnují počáteční imperfekce skleněných panelů, imperfekce vzniklé při výrobě zkušebních těles či excentricitu působení zatížení. Analytické metody dále neuvažují poddajnost lepeného spoje mezi skleněnými panely.

V numerické části jsou porovnány dva modely. Oba modely byly vytvořeny v softwaru, který využívá metody konečných prvků. První model byl vytvořen z objemových prvků SOLID v programu ANSYS. V modelu byly zahrnuty okrajové podmínky uložení a přenos síly z plastové podložky do skleněného dřívku.

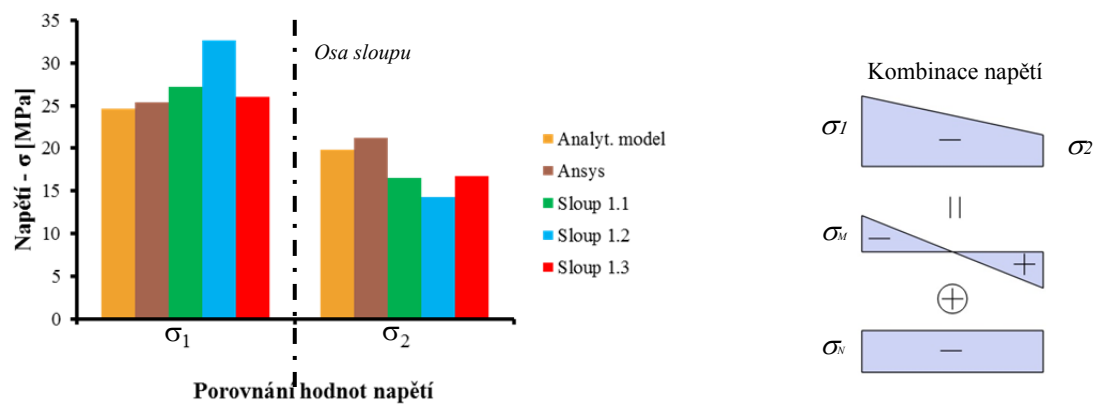
Druhý popsáný model byl vytvořen z plošných prvků SHELL v programu ABAQUS. Tento model představuje zjednodušení konstrukce a nezahrnuje vliv plastové podložky. Síla byla vnášena přímo na skleněný dřív.

Cílem těchto modelů bylo analyzovat skleněný dřív v první fázi zatěžování, tedy do únosnosti sloupu, a připravení dílčích postupů pro další etapu experimentů. V obou případech bylo dosaženo dostatečné shody numerického modelu s experimenty.

V následující Tab. 6.5 jsou porovnány naměřené a vypočtené výsledky z analytického modelu a z numerického modelu vytvořeného v programu ANSYS. Porovnání je provedeno v hlavním směru vybočení. Na Obr. 6.27 je znázorněno hlavní napětí σ_1 a σ_2 , přičemž σ_1 je normálové napětí zvýšené o účinek ohybového momentu a σ_2 je normálové napětí snižené o účinek ohybového momentu.

Tab. 6.5: Porovnání průměrných napětí z experimentů, AM a NM - Ansys

Porovnání napětí při působení síly 80 [kN]	Analyt. model	Numer. model	Sloup 1.1	Sloup 1.2	Sloup 1.3
	Průměrná napětí [MPa]				
Největší tlakové napětí	24,56	25,42	27,24	32,67	25,98
Nejmenší tlakové napětí	19,88	21,2	16,54	14,23	16,77



Obr. 6.27: Porovnání normálových napětí

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - ETAPA II

7.1. ÚVOD

Druhá etapa experimentů navazuje na provedené experimenty v I. etapě. Cílem bylo vyšetřit chování skleněného sloupu při zatížení v reálné velikosti.

Druhou etapu experimentů lze rozdělit do dvou hlavních částí. V první části experimentů byla tři tělesa zatěžována centrickým tlakem až do celkového kolapsu. Ve druhé části byla dvě tělesa, vystavena kyvadlové zkoušce.

7.2. POPIS ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

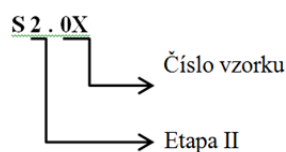
Všechna zkušební tělesa byla sestavena ze stejného materiálu a stejných rozměrů. Každé zkušební těleso bylo tvořeno čtyřmi základními prvky. První prvek tvořily skleněné panely z vrstveného plaveného skla o tloušťce 2x10 mm s PVB fólií. Celková šířka jednotlivých panelů byla 150 mm. Délka $L = 3000$ mm byla volena tak, aby bylo možné splnit výrobní poměr, tedy cca 1:20 a zároveň se dosáhlo co možná nejtíhlejšího průřezu. Současně bylo nutné splnit i veškeré výrobní tolerance dané normativními předpisy.

Skleněné panely byly spojovány v rozích pomocí dvousložkového akrylátového lepidla SIKA Fast 5215 NT. Rozdíl oproti předešlému použitému lepidlu SIKA Fast 5211 je pouze v době zpracování směsi po smíchání složek lepidla. Při použití SIKA Fast 5215 NT byl otevřený čas lepidla 5 minut, což byl dostatečný čas pro aplikaci do předem připravené spáry.

V návaznosti na předchozí experimenty z I. etapy byl ponechán koncept detailu uložení skleněného dřívku. Tento detail je jedním z nejdůležitějších pro návrh celého sloupu. Plastové podložky z PMMA byly použity v místě paty a hlavy sloupů. Celý průřez s rozměry je znázorněn na obr. 6.2 včetně detailu rohu.

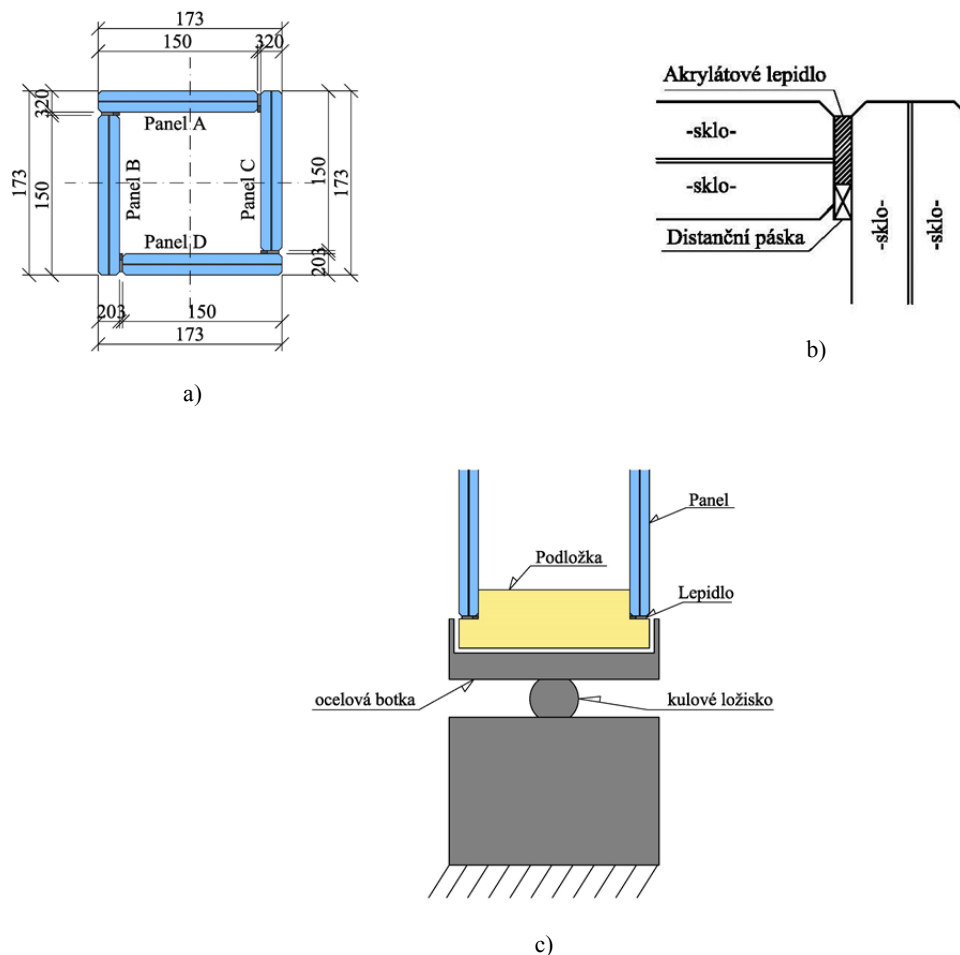
Poslední komponentou jsou ocelové patky, které mají za úkol přenášet vnější zatížení do sloupu. Patky byly upraveny tak, aby bylo možné jejich statické působení uvažovat jako kloub – kloub. Okrajové podmínky uložení sloupu jsou naznačeny na obr. 6.2.

Skleněné sloupy (zkušební tělesa) byly označeny S 2.01 – S 2.05, kde symboly značení jsou vysvětleny níže na Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Schéma označení zkušebních těles

Dílčí skleněné panely byly značeny písmeny A – D. U všech těles byly panely sestaveny tak, aby v jednom směru byly panely A a C a ve směru kolmém B a D, viz Obr. 7.2a). Detail lepené hrany je vidět na Obr. 7.2b). Schéma uložení skleněného sloupu včetně kulového ložiska je vidět na Obr. 7.2c).



Obr. 7.2: Skleněný sloup II. etapy a) rozměry vzorků, b) detail lepeného spoje, c) schéma uložení sloupu při experimentu

7.3. MĚŘENÍ POČÁTEČNÍCH IMPERFEKČÍ

7.3.1. Předběžné měření zkušebních těles

Před samotným sestavením těles, byly změřeny reálné rozměry dílčích skleněných panelů, neboli tloušťka t_{real} , šířka h_{real} a délka L_{real} . K měření byly využity měřicí přístroje (kalibrované posuvné měřítko s digitálním displejem) s tolerancí $\pm 0,1\text{mm}$. Jednotlivé panely byly měřeny ve třech řezech, v krajních řezech a ve středním řezu. V Tab. 7.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty, průměrná hodnota dílčího rozměru a CoV (variační koeficient). Hodnoty jsou porovnány s limitními výrobními tolerancemi pro tyto rozměry. Tolerance jsou uvedeny v EN 572–2:2004. Glass in buildings – Basic soda lime silicate glass products [30], [31].

Celkové počáteční imperfekce skleněných panelů by neměly přesáhnout limitní hodnoty $\pm 1,5\text{ mm}$ pro rozměr větší než 1500 mm , $\pm 1\text{ mm}$ pro rozměr menší než 1500 mm , $\pm 0,2\text{ mm}$ pro tloušťku menší než 6 mm .

Jak je vidět v Tab. 7.1, drobné odchylky rozměrů byly naměřeny na všech skleněných panelech. Odchylky jsou v limitu vzhledem k rozměrům zkušebního tělesa, tudíž v numerickém modelu v následně parametrické studii byly použity nominální hodnoty rozměrů.

Tab. 7.1: Skutečné rozměry dílčích skleněných panelů

Panel	Vzorek S 2.01			Vzorek S 2.02			Vzorek S 2.03			Vzorek S 2.04			Vzorek S 2.05		
	výška hreal	tloušťka treal	dálka Lreal	výška hreal	tloušťka treal	dálka Lreal	výška hreal	tloušťka treal	dálka Lreal	výška hreal	tloušťka treal	dálka Lreal	výška hreal	tloušťka treal	dálka Lreal
A	150,7	21,1	3000,0	150,5	20,8	3000,0	150,9	21,1	3000,0	151,4	21,0	3000,0	151,4	21,0	3000,0
B	150,8	21,1	3000,0	150,7	21,1	3000,0	151,2	21,0	3000,0	151,0	21,1	3000,0	151,0	21,2	3000,0
C	150,5	21,1	3000,0	150,3	21,0	3000,0	150,5	21,1	3000,0	150,8	21,1	3000,0	150,8	21,0	3000,0
D	150,1	21,2	3000,0	150,4	21,0	3000,0	150,9	21,1	3000,0	151,0	21,2	3000,0	150,9	21,1	3000,0
Průměr	150,5	21,1	3000,0	150,5	21,0	3000,0	150,9	21,1	3000,0	151,1	21,1	3000,0	151,0	21,1	3000,0
CoV	0,0020	0,0023	0,0000	0,0012	0,0061	0,0000	0,0018	0,0008	0,0000	0,0016	0,0035	0,0000	0,0019	0,0050	0,0000
Tol -	149	20,35	3001,5	149	20,35	3001,5	149	20,35	3001,5	149	20,35	3001,5	149	20,35	3001,5
Tol +	151	21,15	2998,5	151	21,15	2998,5	151	21,15	2998,5	151	21,15	2998,5	151	21,15	2998,5

Kontrola přímosti dílčích panelů nebyla provedena, ale obecně lze u deskových výrobků z plaveného skla předpokládat imperfekci v řádů $\approx L/3500$, kde L je délka jednoho panelu.

7.3.2. Měření vzorku optickým skenováním

Pro stanovení globálních i lokálních imperfekcí skleněného sloupu byl použit panoramatický skener Surphaser 25HSX, viz Obr. 7.3b). Sloup byl natřen bílou barvou, viz Obr. 7.3a), jelikož měření panoramatickým skenerem spočívá ve vyslání laserového paprsku a jeho zpětného zachycení při odrazu od skenovaného tělesa.

Pro optické skenování vzorku bylo vybráno zkušební těleso, které mělo nejvíce výrobních vad při měření a také po slepení, tj. S 2.02.



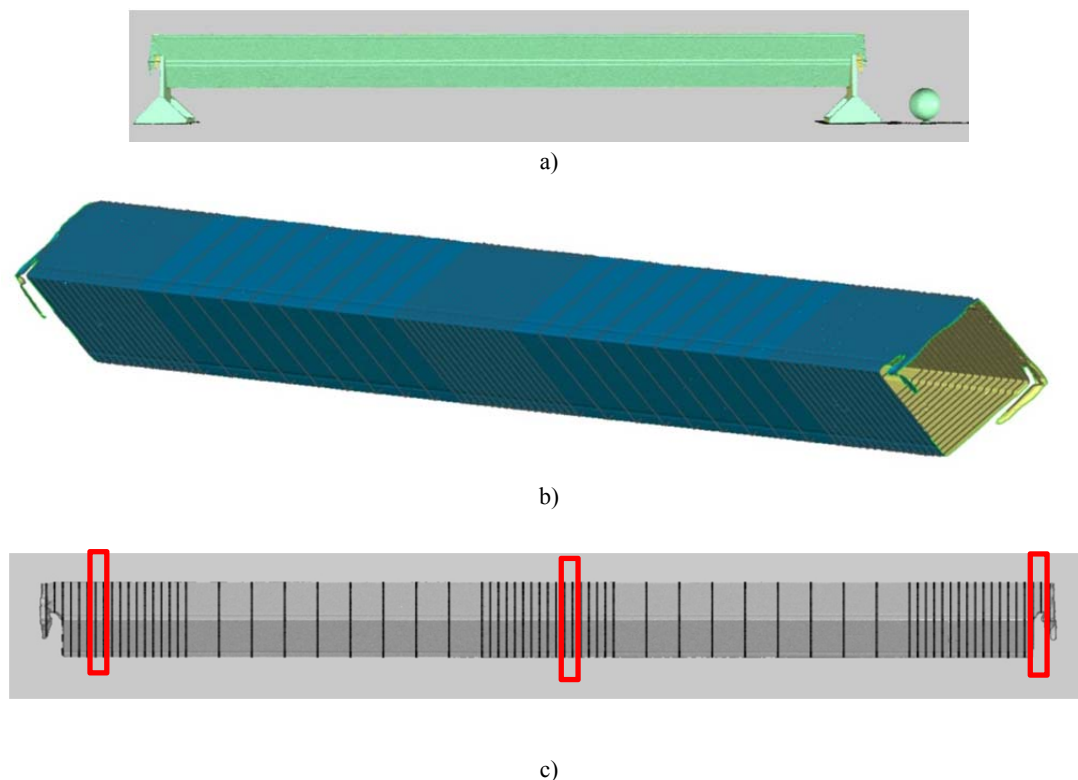
a)



b)

Obr. 7.3: a) Skenovaný vzorek S2.02, b) měřicí zařízení - Superhaser 25HSX

Výsledkem skenování je síť a systém příčných řezů, které přesně zmapují povrch sloupu. Zaměřený sloup je vidět na Obr. 7.4a).



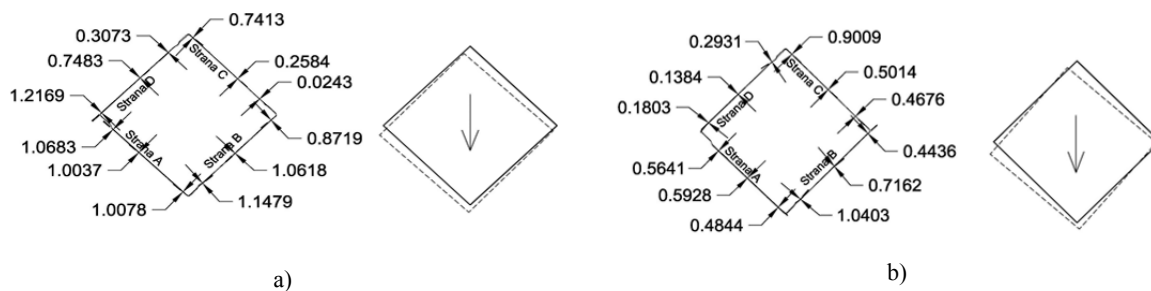
Obr. 7.4: Výsledky ze zaměření a) pohled na zaměřený vzorek, b) systém řezů v axonometrii, c) vybrané řezy určené k vyhodnocení

Při vyhodnocení byl sloup rozdělen na tři řezy, a to v krajních průřezech ve vnitřní části mezi dřevěnými podpěrami a střední průřez, viz Obr. 7.4c). Od průřezu v patě byly odměřeny vodorovné deformace průřezu v polovině výšky sloupu a v průřezu v hlavě. Měřeny byly posuny rohů a středy dílčích panelů. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7.2, ve které jsou znázorněny jednotlivá měření, jejich průměry a CoV (CoV viz kap. 6.2.1).

Tab. 7.2: Posun průřezů

Panel	Krajní průřezy					Průřez v patě a ve středu rozpětí				
	01 [mm]	02 [mm]	03 [mm]	<i>Průměr</i>	<i>CoV</i>	01 [mm]	02 [mm]	03 [mm]	<i>Průměr</i>	<i>CoV</i>
A	1,068	1,004	1,008	<i>1,027</i>	<i>0,035</i>	0,564	0,593	0,484	<i>0,547</i>	<i>0,103</i>
B	0,872	1,062	1,148	<i>1,027</i>	<i>0,137</i>	1,04	0,716	0,444	<i>0,733</i>	<i>0,407</i>
C	0,741	0,258	0,024	<i>0,341</i>	<i>1,072</i>	0,468	0,501	0,901	<i>0,623</i>	<i>0,387</i>
D	0,307	0,748	1,217	<i>0,758</i>	<i>0,601</i>	0,293	0,138	0,180	<i>0,204</i>	<i>0,392</i>

Na Obr. 7.5 jsou pak znázorněny naměřené hodnoty graficky a současně směr vybočení jednotlivých průřezů. Hodnoty jsou uvedeny v mm.



Obr. 7.5: Směr posunu dílčích průřezů a) posun krajních průřezů, b) posun průřezu ve středu.

7.4. VÝROBA SKLENĚNÝCH VZORKŮ

Příprava a čistota povrchu lepených materiálů je jedním z faktorů, který má největší vliv na kvalitu a trvanlivost výsledného lepeného spoje, viz kap. 4. Na odmaštěné hrany byl použit aktivátor ADPrep., viz Obr. 7.6.



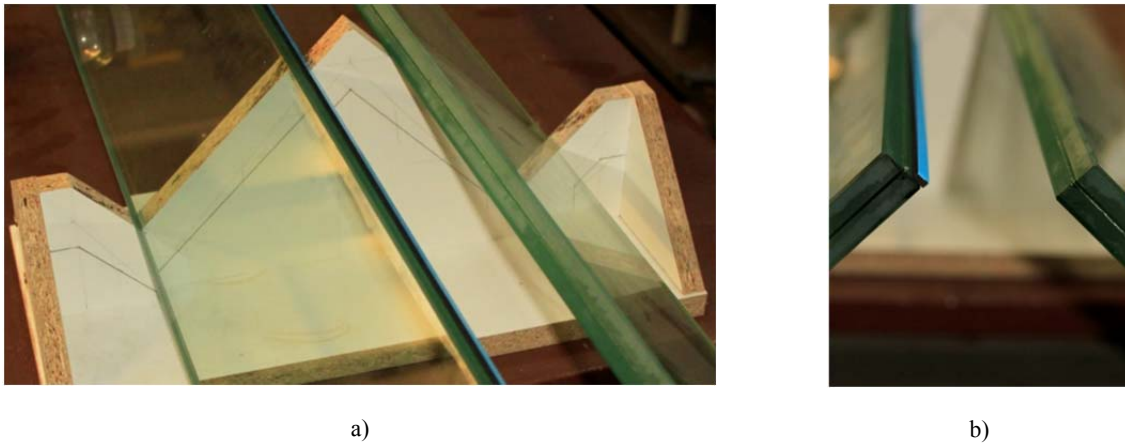
a)



b)

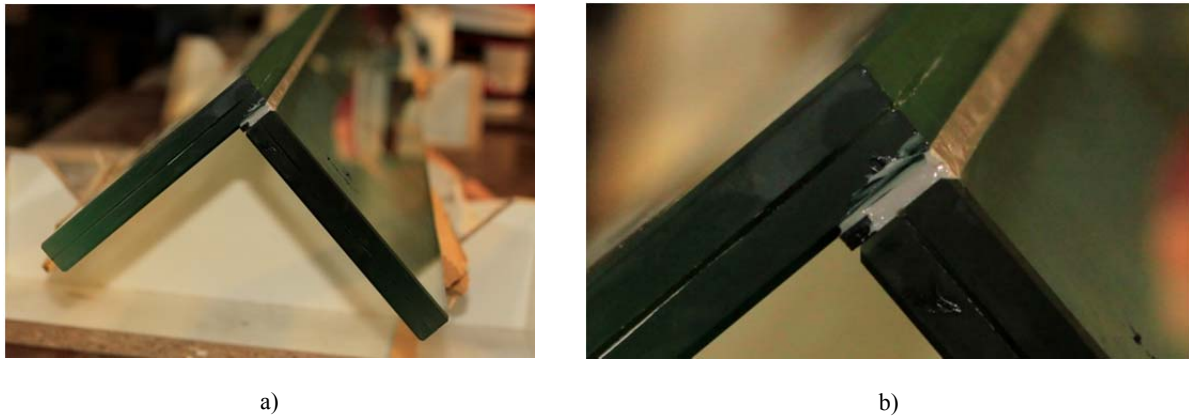
Obr. 7.6: Proces čištění a) aktivátor ADPrep, b) čištění lepených hran

Skleněné panely bylo nutné osadit do předem připravených dřevěných forem urovnaných do rovnováhy. Dřevěné formy měly speciální klínový tvar. Vnitřní úhel, který strany svíraly, byl 45° . Skleněné panely byly v této fázi uloženy v horizontální poloze. Proto bylo nutné ověřit, zda jsou ve vodorovné poloze. Formy byly umístěny vždy na konci a ve čtvrtině délky skleněného panelu. Horizontální poloha skleněných panelů byla ověřena pomocí libely a případně dorovnána pomocí dřevěných klínů. K vytvoření potřebné lepené spáry bylo použito speciální spárové pásky poskytnuté dodavatelem lepidla. Tato páska měla konstantní průřez šířky 6 mm a tl. 3 mm. Páska měla oboustranně lepicí povrch, který zajišťoval dostatečné přilnutí k povrchu skleněných panelů. Zajišťovala tak nepropustnou spáru v celé délce zkušebního tělesa. Do takto připravené spáry se poté aplikovalo lepidlo. Tloušťka spáry byla zvolena 3 mm z důvodu technologie aplikování lepidla a zároveň kompenzování imperfekcí skleněných panelů.



Obr. 7.7: Příprava skleněných panelů a) ustavení a vyrovnání panelů, b) detail spárové pásky

Zvolené lepidlo SIKA Fast 5215 NT je dvousložkové lepidlo, které má otevřený čas použití 5 min. Tato doba byla dostačující pro aplikaci lepidla a začištění lepené spáry od vzniklých zbytků lepidla.

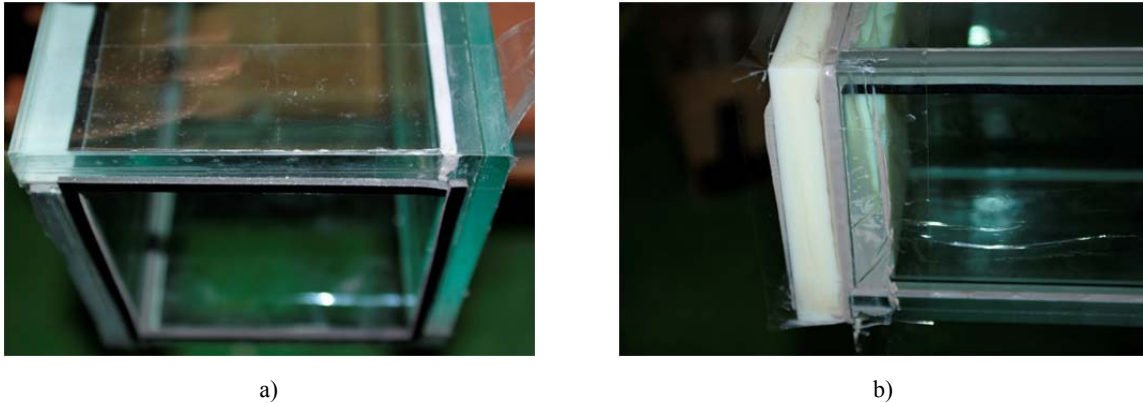


Obr. 7.8: Lepená spára a) spojené dva panely, b) detail lepené spáry

Po aplikaci lepidla do spáry následuje nutná technologická pauza, po které je možné začít přípravu druhé poloviny skleněného dříku. Technologický postup se opakuje. Finální kompletace skleněného dříku je stěžejní část celého technologického postupu. Během manipulace byl brán zvýšený ohled na křehkost konstrukce.

Poslední fází sestavení sloupu bylo osazení plastových dvoustupňových podložek.

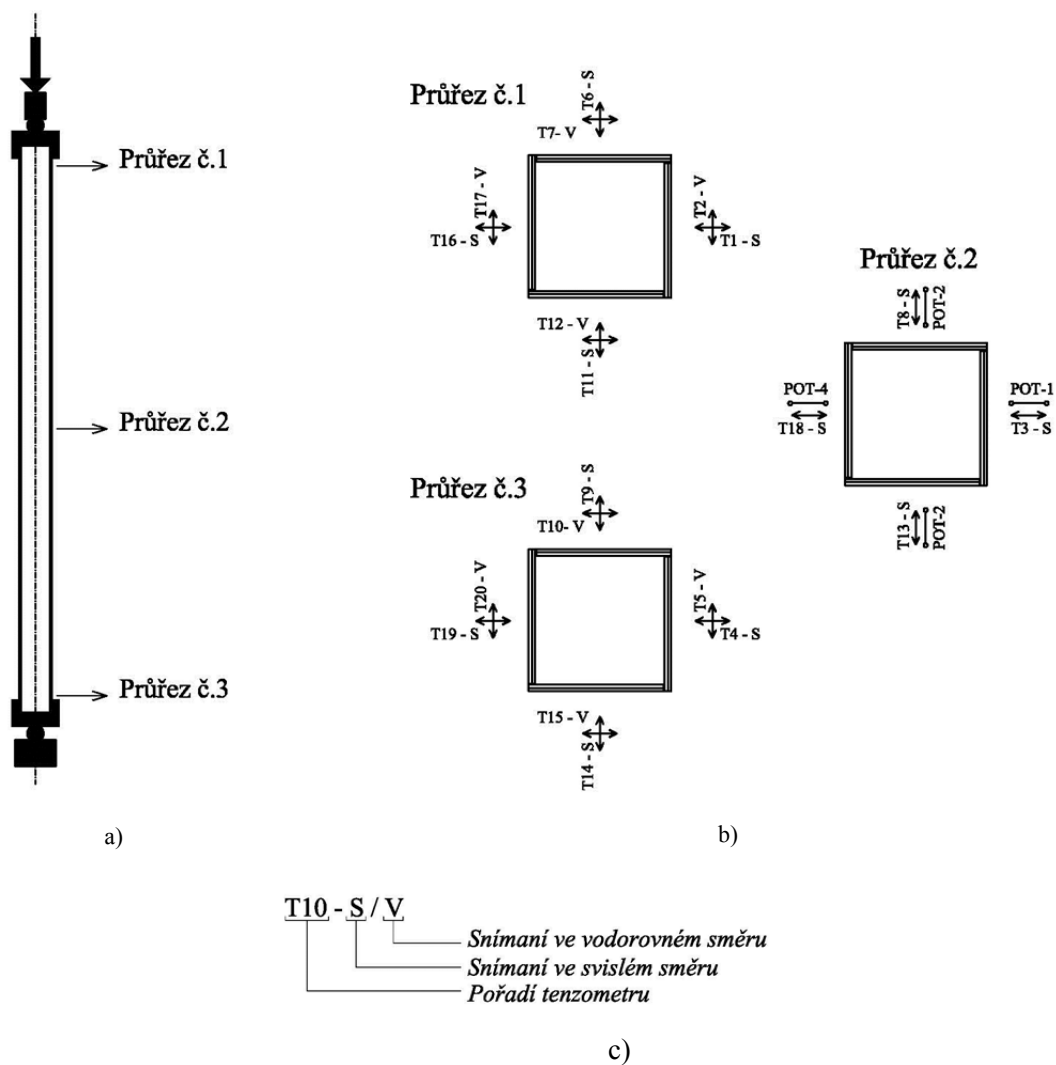
Plastové podložky bylo nutné opět očistit od nečistot pomocí primeru ADPrepu od firmy SIKA. Distanční páskou se opět vytvořila jednotná tloušťka lepené spáry. Vrstvu lepidla mezi plastovou podložkou a skleněným dříkem bylo nutné provést z důvodu vyrovnání podélných imperfekcí vzniklých při kompletování sloupu. Vrstva lepidla tak rovnoměrně přenášela napětí od centrického zatížení do všech panelů.



Obr. 7.9: Připojení plastových podložek a) vytvoření přesné lepené spáry, b) finální provedení detailu

7.5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ÚNOSNOSTI SLOUPŮ II. ETAPY

Zhotovená zkušební tělesa byla kontinuálně zatěžována osovým tlakem až do porušení. Každá zkouška trvala přibližně 10 minut. Na Obr. 7.10a) je schematicky znázorněn sloup a dílčí průřezy, ve kterých byly umístěny tenzometry pro nepřímé měření napětí. Každé zkušební těleso bylo osazeno vždy na vnější straně dvaceti tenzometry. V průřezu č. 1 a 3 byly použity tenzometry růžicového typu. Tenzometry jsou označeny podle schématu zobrazeného na Obr. 7.10c). V průřezu č. 2 byly použity čtyři lineární potenciometry, které měřily posun průřezu z roviny (značeno POT – 1 až POT - 4), přičemž každý byl osazen na samostatný panel, viz Obr. 7.10b). Na Obr. 7.11a) a b) je znázorněno reálné uložení ve zkušebním zařízení. Rychlost zatěžování byla konstantní po celou dobu 200 N / s až do kolapsu vzorků.



Obr. 7.10: Osazení tenzometrů a) zkušební těleso, b) popis měřicího zařízení, c) legenda označení tenzometrů



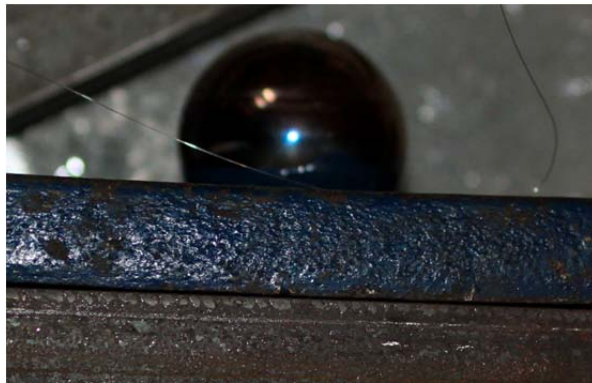
a)



b)

Obr. 7.11: a) Detail uložení v patě, b) detail uložení v hlavě sloupu

Zatížení bylo do skleněných vzorků vnášeno pomocí ocelového ložiska a ocelové botky, ve které byl sloup ustaven a vyrovnán, viz Obr. 7.11a).



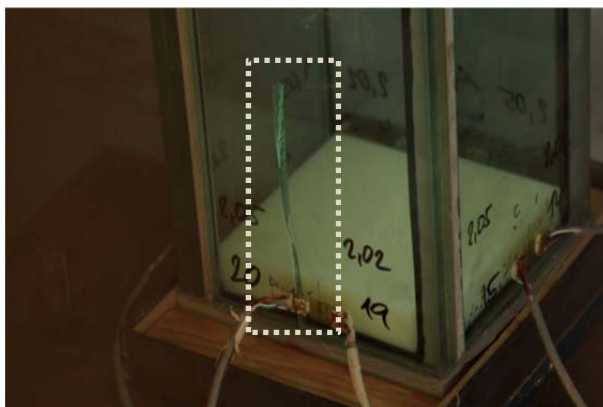
Obr. 7.12: Ocelové ložisko

Na základě pozorování a vyhodnocení výsledků během I. etapy byla modifikována spodní část ocelové desky tak, aby zde byl vytvořen kloub. K tomuto účelu byla použita ocelové pata s přivařeným sférickým ložiskem, viz Obr. 7.12. Stejné uložení bylo vytvořeno i ve vrcholu sloupu.

7.6. PRŮBĚH JEDNOTLIVÝCH EXPERIMENTŮ – ETAPA II.

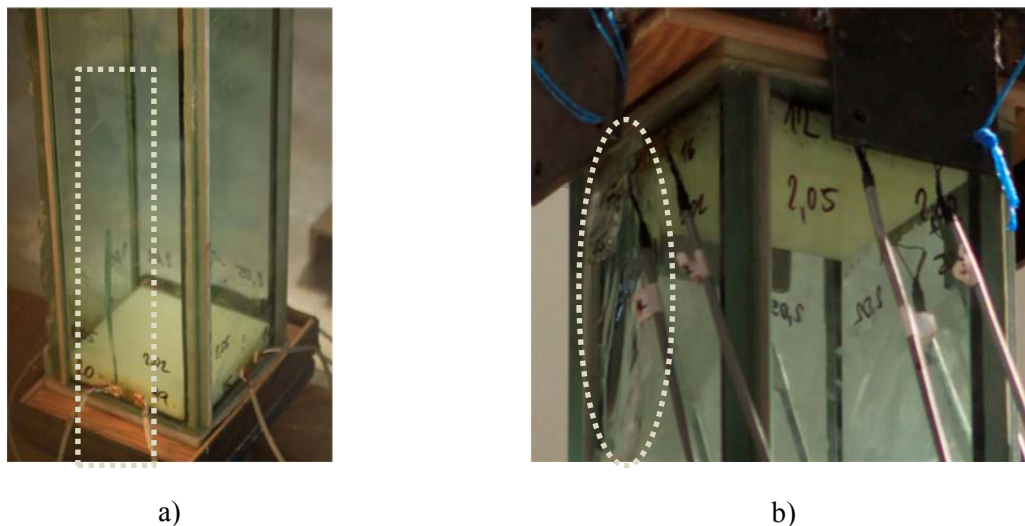
7.6.1. Zkušební těleso S 2.01

Poté co byl sloup urovnán ve svislé poloze, byla do vzorku vnášena tlaková síla N . První porušení zkušebního tělesa S 2.01 nastalo při síle $N_{f,1} = 580$ kN. V tomto okamžiku se vytvořila trhlina ve spodní části panelu D, viz Obr. 7.13. Trhlina byla v místě můstku tenzometru T20, směr trhliny byl svislý. Vznik první trhliny znamená dosažení únosnost sloupu.



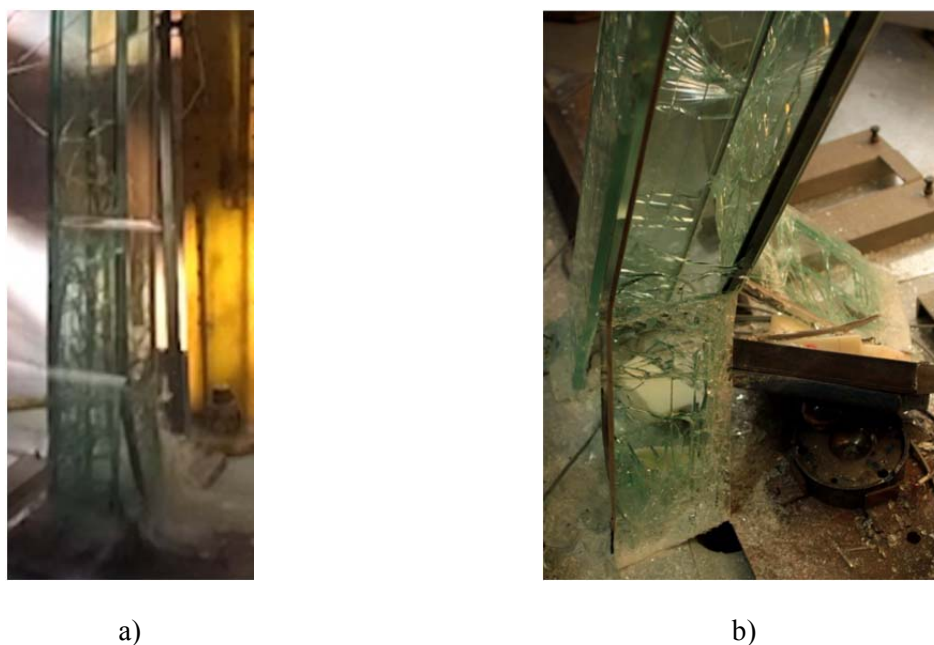
Obr. 7.13: Trhlina v patě sloupu – panel B

Dalším přitěžováním došlo k postupnému rozvoji trhlin ve spodní části panelu D, v pozdější fázi 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. Tato delaminace panelu B přispěla ke koncentraci napětí v této části. Postupný rozvoj trhlin je zobrazen na Obr. 7.14.



Obr. 7.14: Zkušební těleso S 2.01 a) delaminace panelu B, b) rozvoj trhlin v hlavě sloupu

Kolaps sloupu S 2.01 nastal při síle $N_{f,max} = 860$ kN. Mechanismus kolapsu byl náhlý, skleněný dřík byl rozdrcen v patě sloupu. Dřík se smykem sesunul z podložky a byl roztržen v lepeném rohu panelů B a D. Kolaps sloupu je zobrazen na Obr. 7.15.



Obr. 7.15: Zkušební těleso S 2.01 a) okamžik kolapsu sloupu, b) detail roztržené části paty sloupu

V průběhu zatěžování bylo pozorováno postupné vytlačování lepené vrstvy. Při kolapsu byla významně porušena plastová podložka. Charakter porušení a směr trhlin v podložce odpovídal protlačování kulového ložiska do vnitřní části skleněného dříku skrz podložku. Při kolapsu došlo k odtržení části podložky. Porušená podložka je zobrazena na Obr. 7.16.

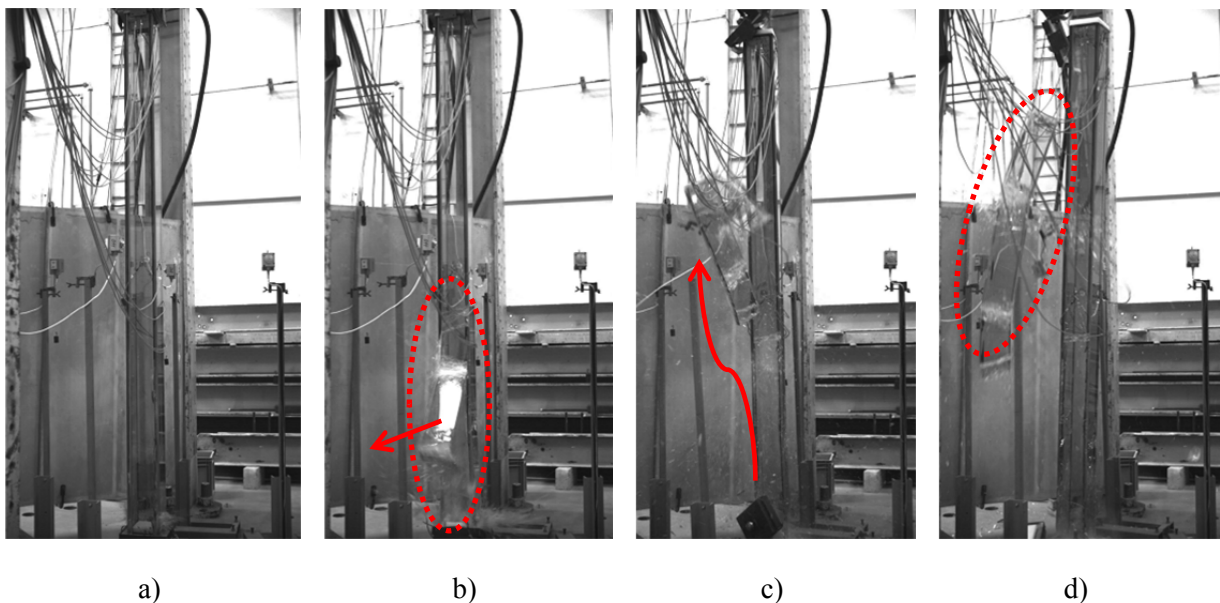


Obr. 7.16: Porušená podložka a) přední strana plastové podložky, b) zadní strana plastové podložky

7.6.2. Zkušební těleso S 2.04

Průběh experimentu zkušební tělesa S 2.04 byl shodný s předchozí zkouškou. Po osazení zkušební tělesa S 2.04 do svislé polohy bylo těleso zatěžováno rychlostí 200 N/s. Během zatěžování sloupu nebyly pozorovány trhliny, proto bylo únosnosti sloupu dosaženo současně s celkovým kolapsem. Kolaps sloupu nastal při síle $N_{f,1} = N_{f,max} = 860$ kN.

Mechanismus kolapsu sloupu měl odlišný průběh v porovnání se zkušebním tělesem S 2.01. V tomto případě došlo těsně před kolapsem k oddělení části panelu C z průřezu. Oddělená část měla délku 1300 mm. Prudkou separací panelu skla v patě došlo ke změně průřezu ze čtverce na profil „U“, čímž se vnesl do sloupu moment. Momentovému porušení odpovídají i trhliny v horní části průřezu, které se sbíhají k jednomu z rohů. Celý mechanismus porušení je zobrazen na Obr. 7.17.

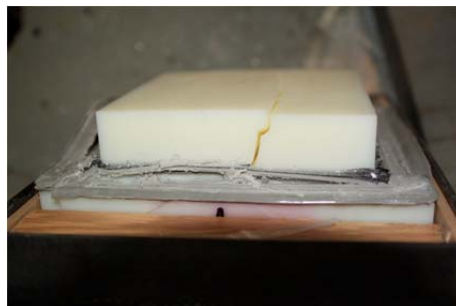


Obr. 7.17: Mechanismus porušení sloupu S 2.04 a) sloup před porušením, b) okamžik kolapsu – separace panelu C, c) oddělení panelu C, d) kolaps sloupu

Porušení plastové podložky ve spodní části mělo podobný charakter porušení jako v případě sloupu S 2.01. V tomto případě došlo k rozlomení podložky. Charakter porušení a směr trhlin v podložce odpovídal protlačování kulového ložiska do vnitřní části skleněného dřívku. Při kolapsu došlo k podrcení rohové části podložky. Porušená podložka je zobrazena na Obr. 7.18.



a)



b)

Obr. 7.18: Porušení podložky a) přední strana plastové podložky, b) boční strana plastové podložky

7.6.3. Zkušební těleso S 2.05

Poslední zkušební těleso zatěžované osovým tlakem bylo těleso S 20.5. Toto těleso bylo zhotoveno dodatečně s ohledem na rozšíření experimentální části o kyvadlovou zkoušku.

Rychlost zatěžování bylo opět 200 N/s. Porušení sloupu S 2.05 bylo náhlé a s největší pravděpodobností vyvolané rozpadem plastové podložky a deformací ocelové patky ve spodní části, viz Obr. 7.19.



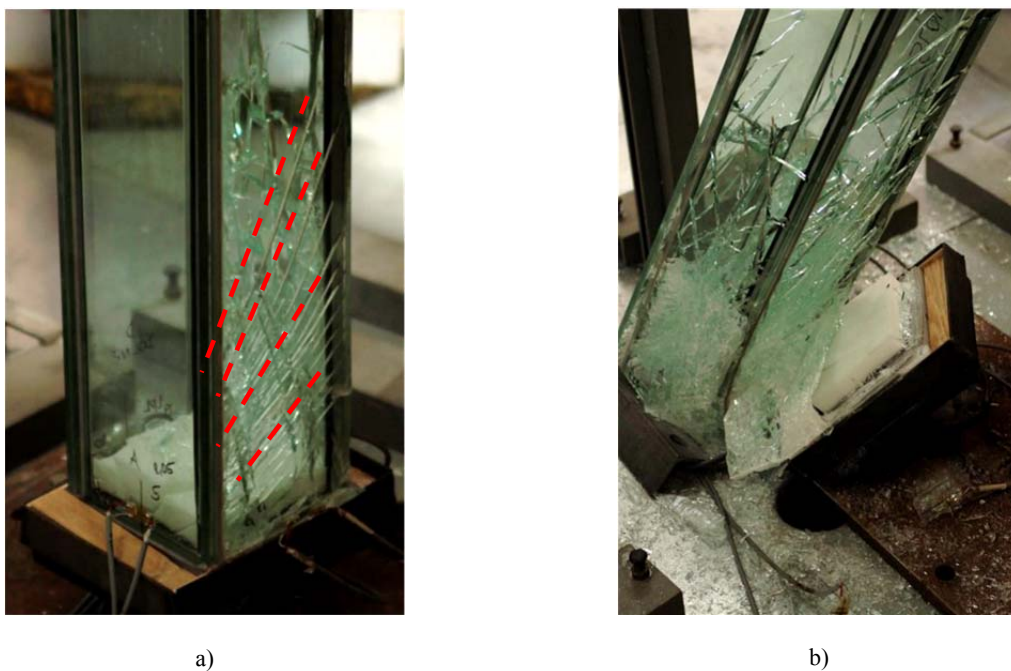
Obr. 7.19: Deformovaná ocelová pata

Tyto okrajové podmínky zapříčinily kolaps sloupu, který nastal při nižší síle ve srovnání s tělesy S 2.01 a S 2.04. První trhlina se vytvořila na panelu C opět ve spodní části při síle $N_{f,1} = 180$ kN, viz Tab. 7.3. Kořen trhliny byl téměř v polovině panelu a směr trhlin měl vějířový tvar. Tento tvar odpovídá lokální koncentraci napětí. Porušení je vidět na Obr. 7.20.



Obr. 7.20: Zkušební těleso S 2.05 a) počáteční trhliny na panelu C, b) detail

Konstantním přitěžováním došlo k postupnému rozvoji trhlin na panelu C. Směr šíření trhlin byl od spodní části nahoru směrem ke středu skleněného panelu. Na panelu B měly trhliny šikmý směr k lepené hraně. Charakter trhlin značí smykové působení lepidla. Kolaps sloupu nastal při síle $N_{f,max} = 460$ kN. Mechanismus kolapsu byl náhlý a skleněný dřík byl rozdrčen v patě sloupu. Dřík se smykem sesunul z podložky a byl roztržen v lepeném rohu panelů B a C. Kolaps sloupu je zobrazen na Obr. 7.21.



Obr. 7.21: Zkušební těleso S 2.05 a) rozvoj trhlin na panelu B, b) kolaps sloupu

Porušení plastové podložky ve spodní části mělo podobný charakter porušení jako v případě sloupu S 2.01 a S 2.04. V tomto případě došlo k rozlomení podložky. Porušená podložka je zobrazena na Obr. 7.22.



Obr. 7.22: Zkušební těleso S 2.05 a) přední strana plastové podložky, b) boční strana plastové podložky

V následující Tab. 7.3 jsou uvedeny hodnoty únosnosti a současně maximální vodorovné deformace v obou směrech, které byly dosaženy při kolapsu, tj. při síle $N_{f,max}$.

Tab. 7.3: Souhrnné výsledky z II. Etapy

Vzorek	Únosnost	Vybočení při síle $N_{f,l}$		Kolaps	Vybočení		Zbytková únosnost
	$N_{f,l}$ [kN]	$w_{x,l}$ [mm]	$w_{y,l}$ [mm]	$N_{f,max}$ [kN]	$w_{x,max}$ [mm]	$w_{y,max}$ [mm]	$\Delta N = N_{f,max} - N_{f,l}$ [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. 7.3 je patrné, že sloup vykazuje dostatečnou zbytkovou únosnost bez ohledu na to, při jakém zatížení dojde k prvnímu porušení skla.

Z tabulky je rovněž patrné, že průměrná únosnost skleněného sloupu je $N_{f,l} = 540$ kN a průměrný kolaps konstrukce nastal při síle $N_{f,max} = 720$ kN. Zbytková únosnost činí $\Delta N = 180$ kN.

7.7. ANALYTICKÝ MODEL

7.7.1. Výpočet napětí v polovině výšky sloupu

Analytický model popsáný v kapitole 6.8 pro sloup z jednovrstvého skla bylo nutné upravit tak, aby se zohlednil spoj mezi jednotlivými vrstvami skla. V tomto případě je zaveden součinitel přenosu smyku ω , který se pohybuje v intervalu $\langle 0;1 \rangle$, kde 0 představuje nulové smykové působení (panely po sobě kloužou) a 1 představuje monolitickou desku. Do výpočtu byl zaveden součinitel přenosu smyku roven $\omega = 0,5$.

Následující přístup zavádí do výpočtu efektivní tloušťku dílčího panelu. Efektivní tloušťka je vypočtena zvlášť pro výpočet vodorovných deformací, čili $t_{eff,w}$, podle rovnice (7.1) a zvlášť pro výpočet ohybových napětí ve středním průřezu, čili $t_{eff,\sigma}$, podle rovnice (7.2) [36]

$$t_{eff,w} = \sqrt[3]{(1 - \omega) \sum_i t_i^3 + \omega (\sum_i t_i)^3}, \quad (7.1)$$

kde

t_i je tloušťka dílčích vrstev, viz Obr. 7.23.

$$t_{eff,\sigma} = \sqrt{\frac{(t_{eff,w})^3}{(t_i + 2 \cdot \omega \cdot t_{m,j})}}, \quad (7.2)$$

kde

$t_{m,j}$ je vzdálenost těžišť jednotlivých vrstev skleněného panelu.

Momenty setrvačnosti dílčího panelu lze vypočítat podle následujících rovnic (7.3), (7.4),

$$I_{y,1,eff,w} = \frac{1}{12} \cdot t_{eff,w} \cdot h_1^3, \quad (7.3)$$

$$I_{z,1,eff,\sigma} = \frac{1}{12} \cdot h_1 \cdot t_{eff,\sigma}^3. \quad (7.4)$$

Momenty setrvačnosti celého průřezu lze vypočítat podle (7.5), (7.6) jako

$$I_{eff,w} = 2 \cdot \left\{ [I_{z,1,eff,w} + A_{eff,w} \cdot z_{eff,w}^2] + \left[I_{y,1,eff,w} + A_{eff,w} \cdot \left(\frac{h_1}{2} - z_{eff,w} \right)^2 \right] \right\}, \quad (7.5)$$

$$I_{eff,\sigma} = 2 \cdot \left\{ [I_{z,1,eff,\sigma} + A_{eff,\sigma} \cdot z_{eff,\sigma}^2] + \left[I_{y,1,eff,\sigma} + A_{eff,\sigma} \cdot \left(\frac{h_1}{2} - z_{eff,\sigma} \right)^2 \right] \right\}, \quad (7.6)$$

kde

h_1 je výška jednoho panelu,

$A_{eff,w(\sigma)}$ je plocha jednoho panelu vypočtenou jako součin h_1 a $t_{eff,w(\sigma)}$,

$z_{eff,w(\sigma)}$ je vzdálenost těžiště průřezu ke krajním vláknům.

Kritická (Eulerova) síla je pak definována jako (7.7)

$$N_{cr,k} = \frac{\pi^2 E I_{eff,w}}{L_k^2}, \quad (7.7)$$

Maximální deformace je dána rovnicí (7.8)

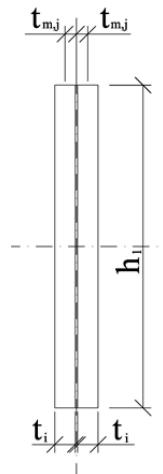
$$w = \frac{e}{\cos(L_k / 2 \sqrt{N/N_{cr,k}}} + \frac{w_0}{1 - N/N_{cr,k}}. \quad (7.8)$$

Maximální deformace w byla v analytickém modelu vypočtena na základě předem změřených imperfekcí $w_{0,1} = 0,5$ a $w_{0,2} = L / 2000$, které zohledňují nepřesnosti vlivem výroby sloupu a nepřesnosti vlivem umístění sloupu do experimentálního zařízení. Celková vodorovná deformace w_0 je dána prostým součtem dílčích deformací $w_{0,1}$ a $w_{0,2}$.

$$\Delta w = w + w_0 \quad (7.9)$$

Maximální napětí na povrchu může být stanoveno jako (7.10)

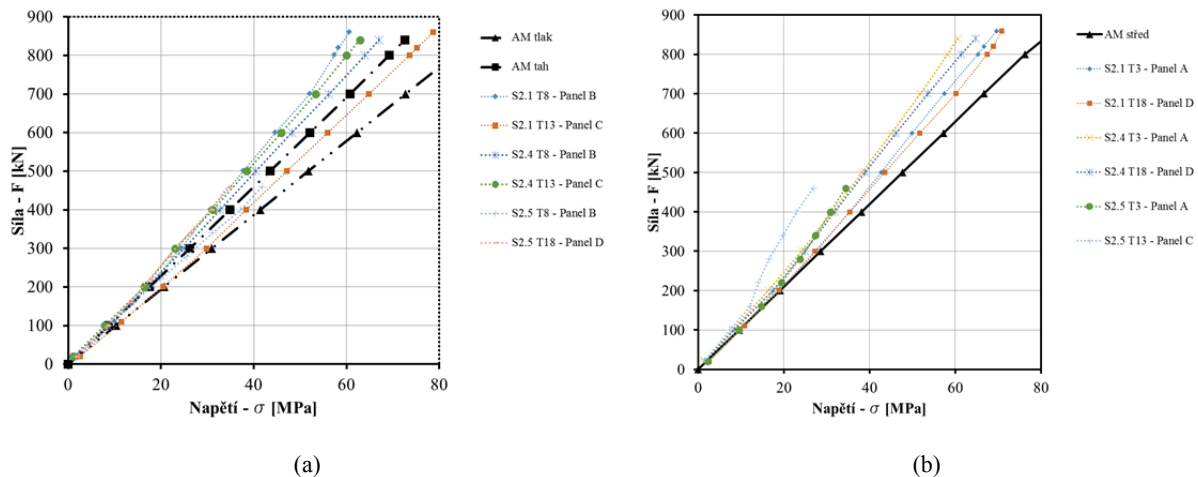
$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A_{eff,\sigma}} \pm \frac{N \cdot z_{eff,\sigma}}{I_{eff,\sigma}} \Delta w. \quad (7.10)$$



Obr. 7.23: Průřez dílčího skleněného panelu

Takto sestavený analytický model byl použit pro porovnání s výsledky z experimentů. Pro toto posouzení byly vybrány všechny vzorky.

V následujícím Obr. 7.24 jsou zobrazeny hodnoty hlavních napětí σ ve středním průřezu v závislosti na vnesené síle N . Na Obr. 7.24a) je zobrazena závislost napětí na vnesené síle pro hlavní směr vybočení. Z grafu je patrné, že takto sestavený numerický model je na straně bezpečné. Na Obr. 7.24b) je zobrazeno napětí ve směru kolmém a hodnotu napětí z analytického modelu tvoří pouze normálová složka, tedy $\sigma = N/A$.



Obr. 7.24: Závislost napětí na vnesené síle, a) hlavní směr vybočení, b) vedlejší směr vybočení

7.7.1. Výpočet napětí v patě

Analytický model okrajových částí vychází z průhybu plastové podložky, která vytváří dodatečné lokální napětí v krajním průřezu skleněného sloupu. Průhyb podložky w_{Pad} je stanoven na základě zjednodušených výpočtů ohybu izotropní desky malého průřezu, podle rovnice (7.11), viz Obr. 7.25. Tato zjednodušená metoda vychází z klasické teorie desek. Klasická teorie desek (často též nazývána Poissonova-Kirchoffova teorie tenkých desek) je založena na jistých idealizujících předpokladech a omezeních. Tyto předpoklady a mezení se týkají uvažované desky a materiálu, z něhož je vyrobena, a chování desky při působení zatížení [37].

Předpoklady týkající se materiálu a desky jsou následující:

- materiál desky je úplně pružný,
- materiál desky se řídí Hookovým zákonem a má stejné konstanty pružnosti (modul pružnosti, Poissonovo číslo) pro všechny druhy namáhání,
- materiál desky je homogenní a izotropní,
- tloušťka desky je konstantní,
- tloušťka desky je malá ve srovnání s ostatními jejími rozměry.

$$w_{Pad} = \beta \cdot \frac{q \cdot a^4}{E_{Pad} d^3}, \quad (7.11)$$

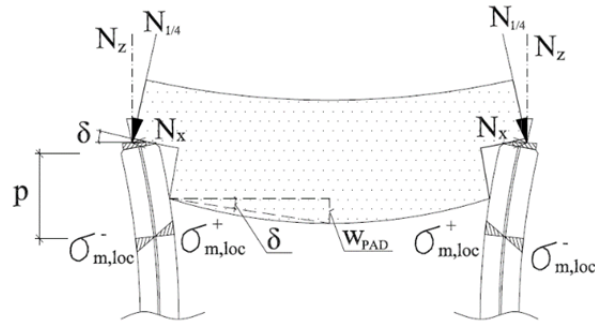
kde

β je součinitel pro desky po obvodě kloubově podepřené a poměr stran je roven 1 [37],

q je zatížení v kN/m^2 , jenž se rovná síle N / A_{Pad} ,

E_{Pad} je modul pružnosti plastové podložky a je roven 3500 MPa,

d je tloušťka plastové podložky, která byla v analytickém modelu rovna 40 mm.



Obr. 7.25: Deformace plastové podložky

Na Obr. 7.25 je znázorněn rozklad sil do dvou směrů. Rozložení sil je dáno změnou průhybu a je vyčíslo pomocí úhlu δ , který lze stanovit rovnicí (7.12)

$$\delta = \frac{w_{pad}}{0,5 \cdot b_{pad}}, \quad (7.11)$$

kde

b_{pad} je půdorysná šířka podložky.

Vodorovná složka síly N_x je pak vypočtena jako (7.12)

$$N_x = \frac{N\delta}{4}. \quad (7.12)$$

Lokální napětí $\sigma_{m,loc}$ je stanoveno z ohybového momentu podle rovnice (7.13)

$$\sigma_{m,loc} = \frac{N_x \cdot p}{I_{z,eff,\sigma,j} \cdot z_j}, \quad (7.13)$$

kde

z_j je vzdálenost těžiště redukovaného průřezu ke krajním vláknům,

$I_{z,eff,\sigma,j}$ je moment setrvačnosti redukovaného průřezu vypočteného podle rovnice (7.14),

$h_{red,1}$ je výška redukovaného průřezu.

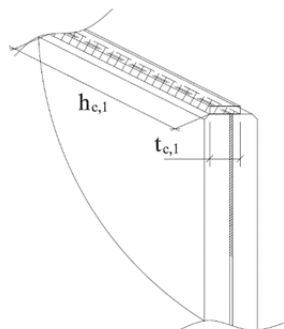
$$I_{z,eff,\sigma,j} = \frac{1}{12} h_{red,1} \cdot t_{eff,\sigma}^3. \quad (7.14)$$

Kontaktní napětí $\sigma_{y,loc}$ v místě vnášení zatížení je vypočteno podle následující rovnice (7.15) jako

$$\sigma_{y,loc} = \frac{N}{4 \cdot A_c}, \quad (7.15)$$

kde

A_c je kontaktní plocha lepidla a je rovna součinu $h_{c,1}$ a $t_{c,1}$, viz Obr. 7.26.



Obr. 7.26: Kontaktní plocha lepidla

Celkové napětí σ_y v krajním průřezu je součet všech složek napětí, viz rovnice (7.16)

$$\sigma_y = \sigma_{y,loc} + \sigma_{m,loc} \quad (7.16)$$

Vzhledem k rovinné napjatosti je podle Hookeova zákona pro rovinu odvozena rovnice (7.17).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y), \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x), \gamma_z = \frac{1}{G}\tau_z \quad (7.17)$$

Inverzí vztahů (7.17) dostáváme příslušné vztahy pro složky napětí. (7.18)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x - \mu\varepsilon_y), \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y - \mu\varepsilon_x), \tau_z = G\gamma_z \quad (7.18)$$

Při předpokladu, že ve směru ε_x je bráněno přetvoření a dosazením ε_x z rovnice (7.17) do rovnice (7.18) je výsledné napětí σ_x rovno, viz vztah (7.19)

$$\sigma_x = \mu\sigma_y, \quad (7.19)$$

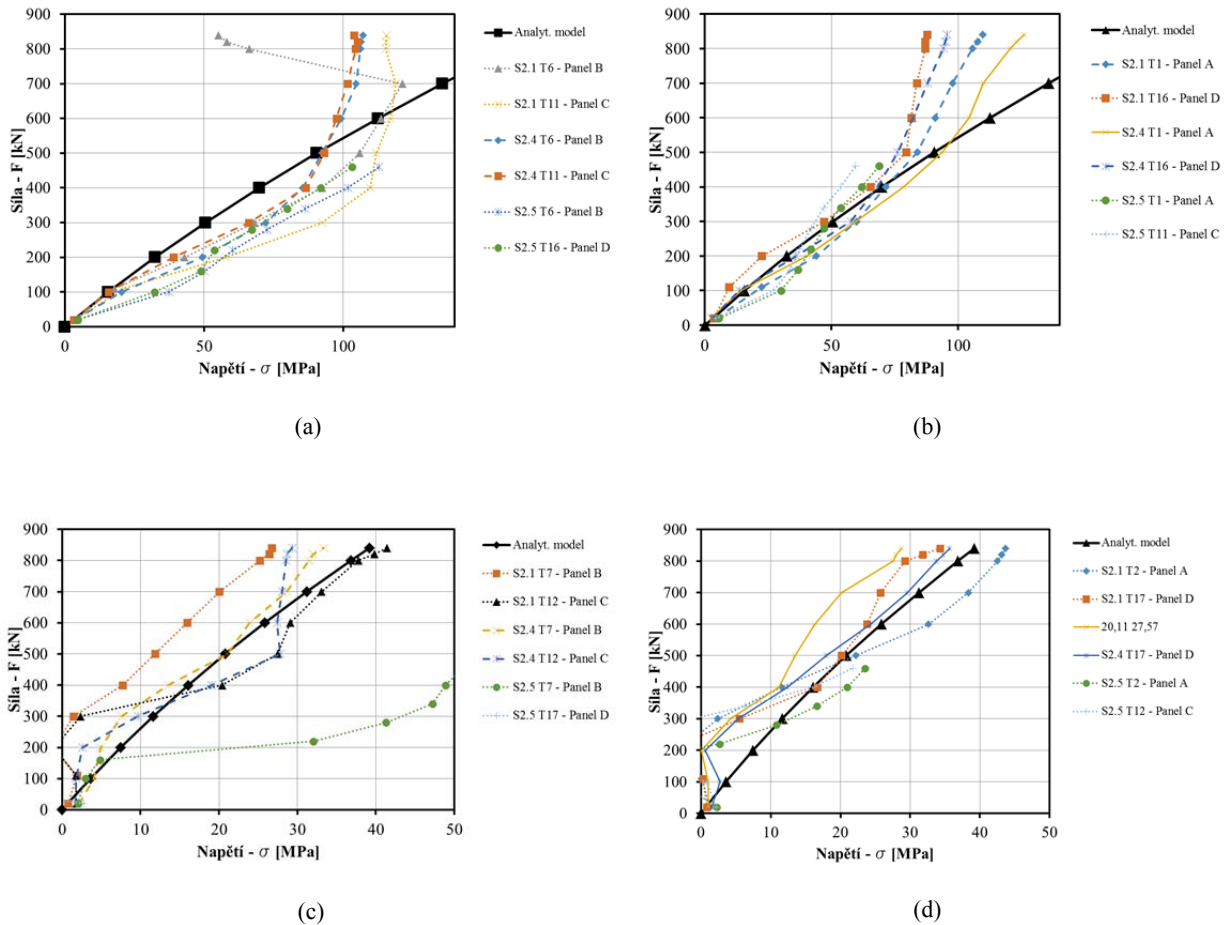
kde

E je modul pružnosti skla (70 GPa),

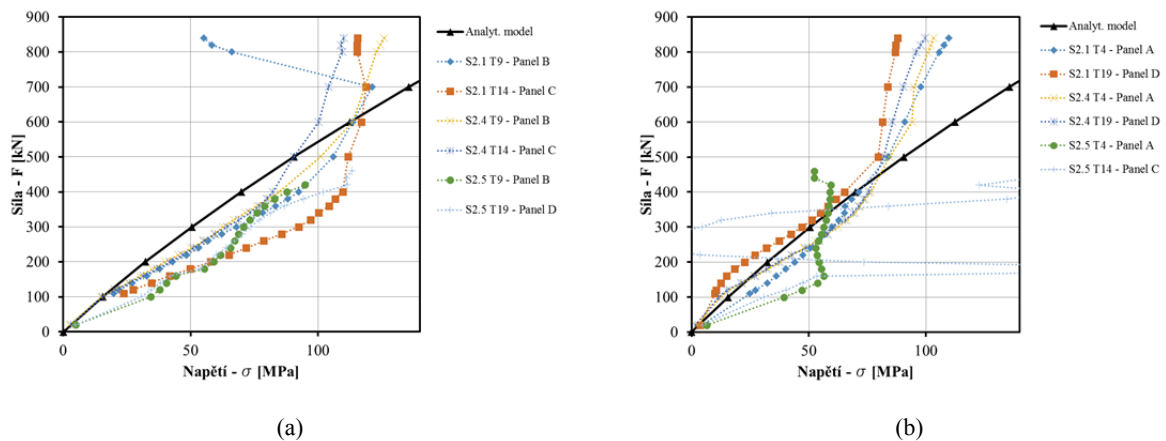
μ je Poissonova konstanta pro sklo rovna 0,23 [-].

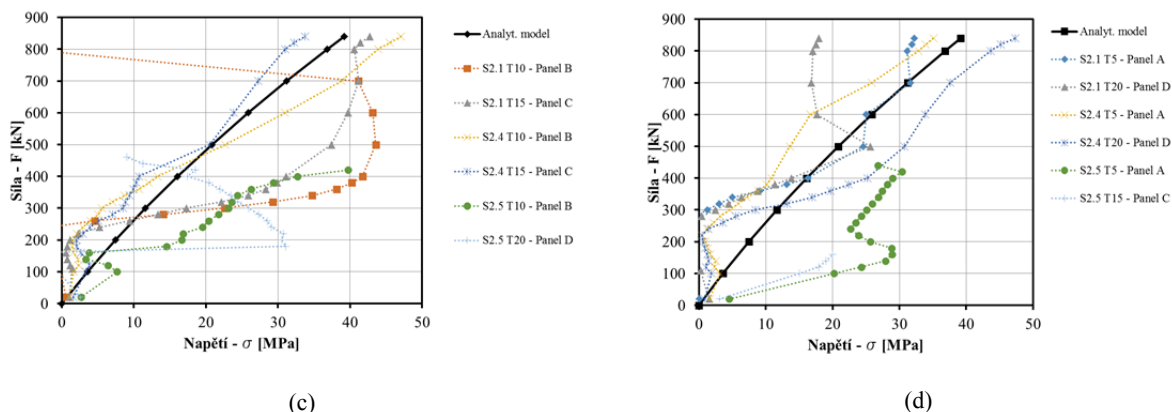
Validace analytického modelu je opět provedena pro závislost napětí na síle. V následujícím Obr. 7.27 je vidět, že takto upravený a sestavený analytický model dobře popisuje chování okrajových částí zkušební tělesa.

Na Obr. 7.27a) je vidět svislé napětí σ_y v krajním průřezu v hlavě sloupu, tedy v místě vnášení zatížení a na Obr. 7.27b) je zobrazena závislost ve směru kolmém. Příčná napětí σ_x jsou zobrazena ve stejném průřezu na Obr. 7.27c) a Obr. 7.27d). Obdobným způsobem jsou uvedena svislá a příčná napětí v patě sloupu, viz Obr. 7.28. Z experimentů je patrné, že analytický model nepopisuje přesně průběh skutečných příčných napětí. Stejným způsobem jsou zobrazena napětí σ_x a σ_y v patě průřezu na Obr. 7.28.



Obr. 7.27: Svislá a příčná napětí v hlavě, a) svislé napětí v hlavním směru vybočení, b) svislá napětí ve směru kolmém, c) příčné napětí ve směru hlavního vybočení, d) příčné napětí v kolmém směru





Obr. 7.28: Svislá a příčná napětí v patě, a) svislé napětí v hlavním směru vybočení, b) svislá napětí ve směru kolmém, c) příčné napětí ve směru hlavního vybočení, d) příčné napětí v kolmém směru

Analytický model popsany výše obecně vyhovuje experimentálním datům a pro napětí ve středním průřezu poskytuje bezpečné hodnoty.

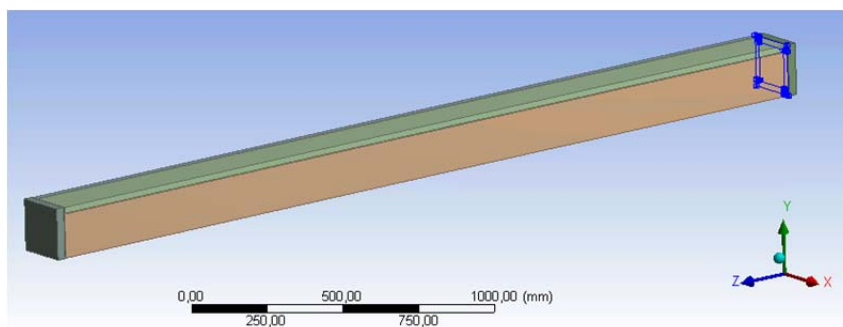
Přestože analytický model poskytuje srovnatelné výsledky s experimenty, bylo by třeba vylepšit analytické řešení zejména na okrajích použitím metody založené na výpočtu druhého řádu.

Hlavním cílem tohoto analytického modelu bylo odvodit příčná napětí, která byla hlavním důvodem porušení sloupů. Model může být použit jako předběžná metoda a porovnán s dalšími experimenty vycházejícími z této práce.

7.8. NUMERICKÝ MODEL 3D

Numerický model byl vytvořen po provedení experimentů II. Etapy. Cílem této části výzkumu byla validace modelu na základě dosažených výsledků z experimentální části. Kalibrovaný model byl dále využit pro parametrickou studii.

Numerický 3D model s využitím prvků SOLID 186 byl vytvořen v programovém prostředí Workbench ANSYS. Objemové prvky SOLID 186 byly použity pro všechny části skleněného sloupu, tedy pro skleněné panely, plastové podložky a lepidla. Numerický model je zobrazen na Obr. 7.29.

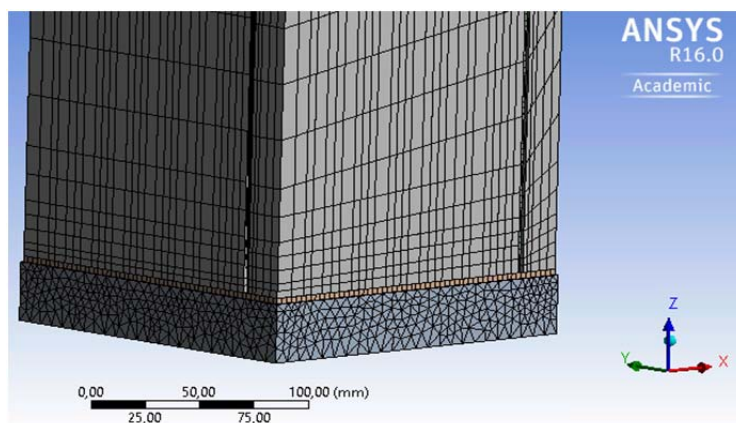


Obr. 7.29: Numerický model 3D

V modelu byla zavedena některá zjednodušení, zejména byly použity nominální rozměry pro všechny části, viz Tab. 7.4. Na rozdíl od předběžného modelu sestaveného pro první experimentální etapu, byly kontakty mezi plastovou podložkou a skleněným dříkem nastaveny již jako třecí s koeficientem tření 0,2. Tento typ kontaktu dostatečně dobře postihl reálné chování mezi plastovou podložkou a dříkem. Pravidelná síť byla na koncích skleněných panelů zhuštěna, viz Obr. 7.30. Skleněné panely byly po tloušťce rozděleny pěti prvky a po délce byla průměrná délka prvky 30 mm.

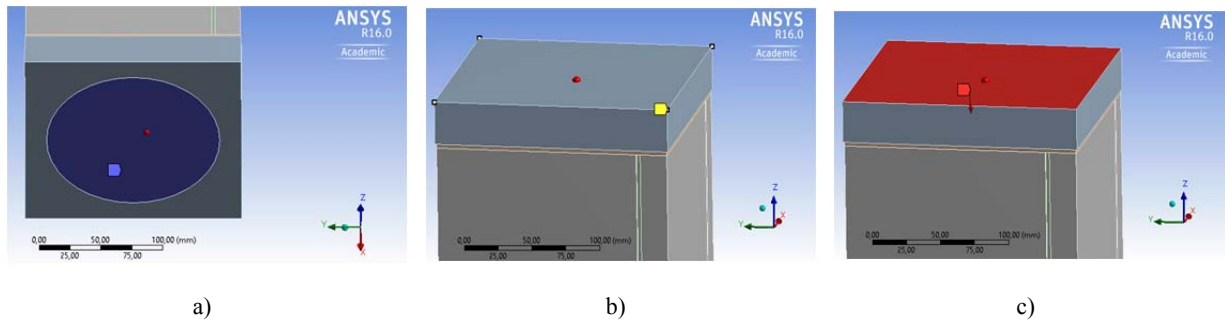
Tab. 7.4: Dílčí rozměry použité v numerickém modelu

Nominální hodnoty				
délka sloupu [mm]	tloušťka panelu [mm]	výška panelu [mm]	tloušťka lepidla [mm]	šířka lepidla [mm]
3000	20	150	3	6



Obr. 7.30: Detail zjemněné sítě v patě sloupu

V numerickém modelu byly zanedbány ocelové patky, avšak okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby odpovídaly experimentům. Ve spodní části sloupu byla vytvořena kruhová plocha na plastové podložce, která představovala reálnou plochu podepření. V horní části bylo krajním rohovým uzlům bráněno v posuvu ve směru X a Y . Ve směru Z nebylo bráněno posuvu z důvodu působení zatížení. Zatížení bylo aplikováno na vrchní část plastové podložky v hlavě sloupu ve formě jednotného plošného zatížení. Okrajové podmínky a zatížení jsou zobrazeny na Obr. 7.31.



Obr. 7.31: Okrajové podmínky numerického modelu a) náhradní plocha, b) odebrání směru posuvu v rovině XY , c) aplikace zatížení na plochu horní plochu podložky

Numerický model byl od počátku modelován s počátečními imperfekcemi. Mezi imperfekce lze zahrnout materiálové a geometrické vady vzniklé při výrobě plaveného skla, vady vzniklé při montáži skleněných sloupů a v neposlední řadě excentrické působení zatížení. V souladu s těmito faktory byl vybrán počáteční tvar zakřivení ve tvaru sinusoidy o velikosti amplitudy $w_{0x} = L / 300$. Velikost amplitudy zohledňuje veškeré imperfekce. Zejména se jedná o imperfekce dílčích panelů, celého zkušebního tělesa, způsob uložení ve zkušebním zařízení. Imperfektní tvar byl v tomto modelu zaveden do obou směrů. Amplituda sinusoidy v kolmém směru byla $w_{0y} = L / 600$.

Velká pozornost byla věnována kalibraci použitých materiálů. Sklo bylo uvažováno jako izotropní materiál s Youngovým modulem pružnosti $E_{glass} = 70$ GPa a Poissonovým součinitelem $\nu_{glass} = 0,23$ [34]. Plastová podložka byla uvažována rovněž jako izotropní materiál s počátečním modulem pružnosti $E_{PAD} = 3,5$ GPa a součinitelem $\nu_{PAD} = 0,39$ [22].

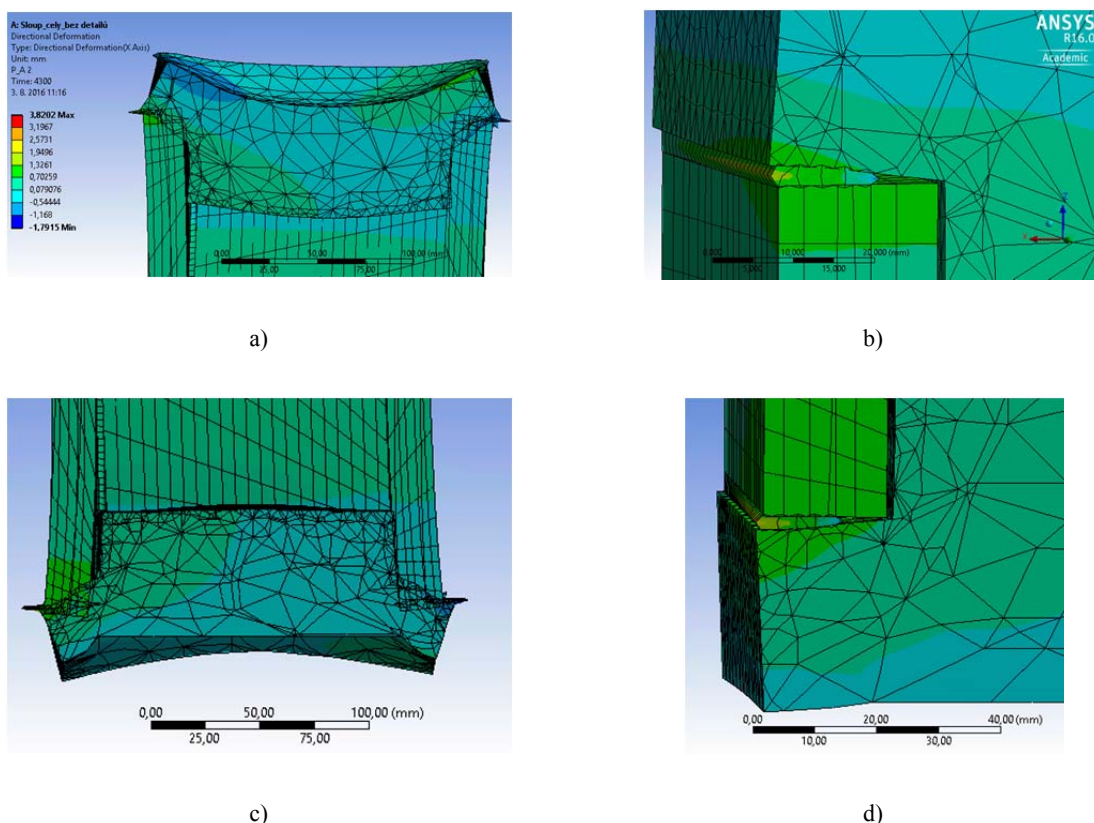
Pro popis akrylátového lepidla SIKA Fast 5215 NT byl použit model, který byl kalibrován na základě materiálových zkoušek lepeného spoje ve smyku. Tento model je blíže popsán v kapitole lepidla 4.5, tj. modul pružnosti lepidla $E_{glue,1} = 370$ MPa, Poissonův součinitelem $\nu_{glue,1} = 0,34$, mez kluzu $f_l = 7$ MPa a tangenciální modul pružnosti $E_{tag,1} = 5$ MPa. Takto kalibrovaný model bylo možné použít pouze pro lepený spoj skleněných panelů.

Vyrovňovací vrstvu lepidla mezi plastovou podložkou a skleněným dříkem bylo nutné zadat jinými materiálovými parametry. Důvodem bylo jiné chování lepidla při namáhání tlakem. Po provedení experimentů byla vrstva lepidla stlačena na průměrnou tl. 1,5 mm z původní tl. 3,0 mm. Model lepidla byl korigován pomocí materiálových charakteristik, kde $E_{glue,2} = 1000$ MPa, Poissonův součinitelem $\nu_{glue,2} = 0,34$, mez kluzu $f_l = 15$ MPa a tangenciální modul pružnosti $E_{tag,1} = 80$ MPa.

7.9. POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO MODELU S EXPERIMENTY

Takto sestavený a kalibrovaný numerický model byl porovnán s vybraným zkušebním tělesem S 2.01 a to až do prvního porušení. Vybrané těleso S 2.01 lze považovat za reprezentativní vzorek z provedených experimentů.

Porovnání výsledků je zobrazeno na následujících obrázcích, kde jsou zobrazeny hodnoty hlavních napětí σ ve všech průřezech v závislosti na vnesené síle N . Na Obr. 7.32 jsou zobrazeny okrajové podmínky na konci výpočtu. Pro lepší zobrazení je deformovaný tvar zvětšen.

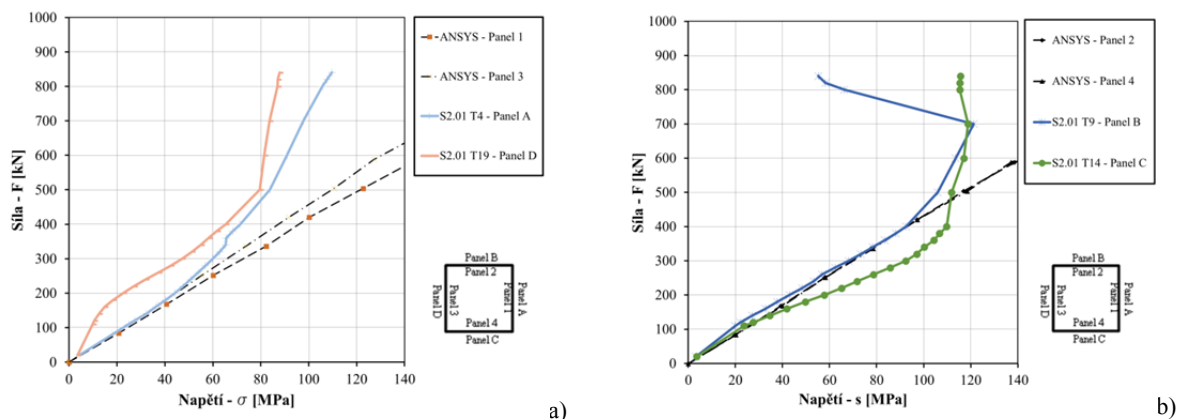


Obr. 7.32: Deformovaný numerický model a) zvětšený řez horní částí (zvětšeno 7,8x), b) detail lepené mezivrstvy (reálné měřítko), c) zvětšený řez dolní částí (zvětšeno 7), d) detail lepidla v patě (reálné měřítko)

Na Obr. 7.33 jsou zobrazeny hodnoty svislých napětí změřené ve spodní části sloupu (patě) v závislosti na působící síle, tj. Obr. 7.33a) napětí z tenzometrů T4 (panel A) a T19 (panel D) a na Obr. 7.33b) je vykreslen průběh napětí z tenzometrů T9 (panel B) a T14 (panel C). Oba směry jsou porovnány s napětími získanými pomocí numerického modelu. Data z modelu jsou vykreslena čárkovaně a čerchovaně.

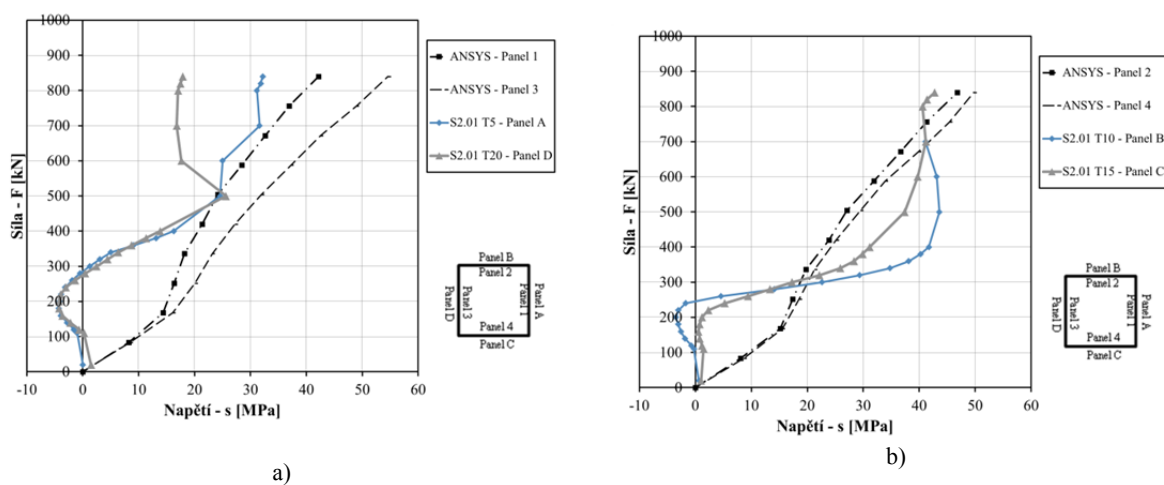
Z porovnání výsledků na Obr. 7.33a) je patrné, že numerický model dává vyšší hodnoty svislého napětí než napětí naměřená v průběhu experimentu. Z hlediska bezpečného návrhu je model na straně bezpečné. V tomto směru došlo k hlavnímu vybočení vzorku. Průměrná absolutní odchylka v tomto směru pro korespondující panely, tj. Panel A k Panelu 1, Panel D k Panelu 3, je 60% respektive 50%. Odchylka je určena pro sílu $N = 550$ kN.

Porovnáním výsledků na Obr. 7.33b) je dále patrné, že numerický model dobře postihuje průběh chování spodní části sloupu ve směru kolmém na hlavní směr vybočení. Téměř shodný průběh je pozorován až do síly cca $N = 500$ kN. Překročením této síly došlo k významnému odklonu od průběhu, který je způsoben vytvořením trhliny a dosažením únosnosti sloupu.



Obr. 7.33: Porovnání svislých napětí v horní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

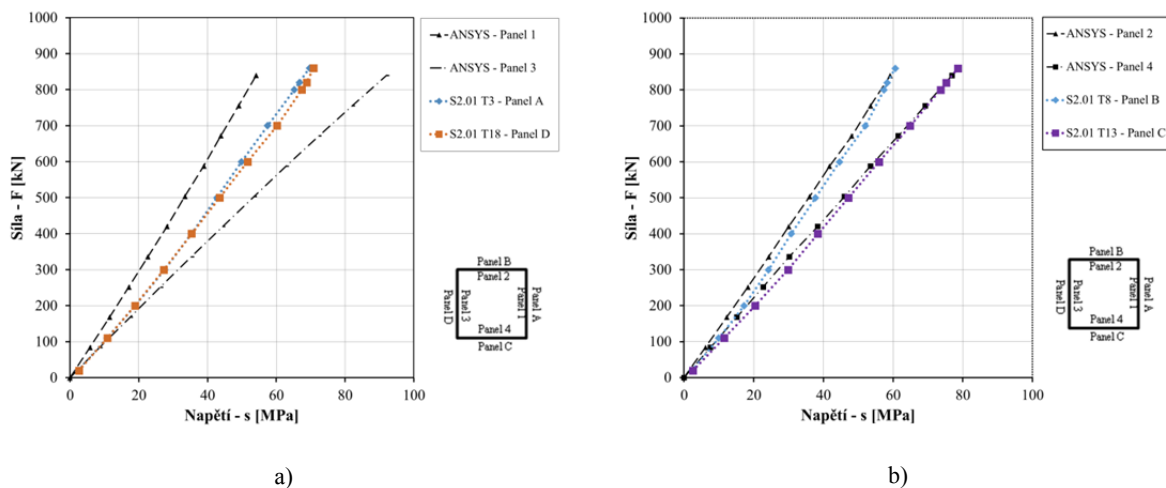
Na Obr. 7.34 jsou zobrazeny hodnoty vodorovných napětí změřené ve spodní části sloupu (patě). Na Obr. 7.34a) jsou vykresleny tenzometry T5 (panel A) a T20 (panel D), na Obr. 7.34b) je vykreslen průběh napětí z tenzometrů T10 (panel B) a T15 (panel C). Oba směry jsou porovnány s numerickými daty z příslušných směrů a dílčích panelů. Data z modelu jsou vykreslena čárkovaně a čerchovaně. Z porovnání výsledků na obrázku Obr. 7.34a) je patrné, že numerický model koresponduje pouze částečně s experimentálními daty a celkově model udává vyšší hodnoty vodorovného napětí. Z hlediska bezpečného návrhu je model na straně bezpečné. Zároveň je z výsledků na Obr. 7.34 patrné, že numerický model odpovídá průměrnému chování sloupu ve směru kolmém na hlavní směr vybočení.



Obr. 7.34: Porovnání vodorovných napětí v horní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

Na Obr. 7.35 jsou zobrazeny hodnoty svislých napětí, které byly změřené ve střední části sloupu. Na obrázku Obr. 7.35a) jsou vykresleny průběhy z tenzometrů T3 (panel A) a T18 (panel D). Na Obr. 7.35b) je vykreslen průběh napětí z tenzometrů T8 (panel B) a T13 (panel C). Schéma značení výsledků z numerického modelu je stejné jako v předešlém případě. Numerický model je více ovlivněn kladnými a zápornými přírůstků napětí od momentu vzniklého excentrickým působením síly. Průměrná absolutní odchylka v tomto směru pro korespondující panely, tj. Panel A k Panelu 1, Panel D k Panelu 3, je 28% respektive 22%. Odchylka je určena pro sílu $N = 550$ kN.

Výsledky z numerického modelu zobrazené na obrázku Obr. 7.35b) 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.



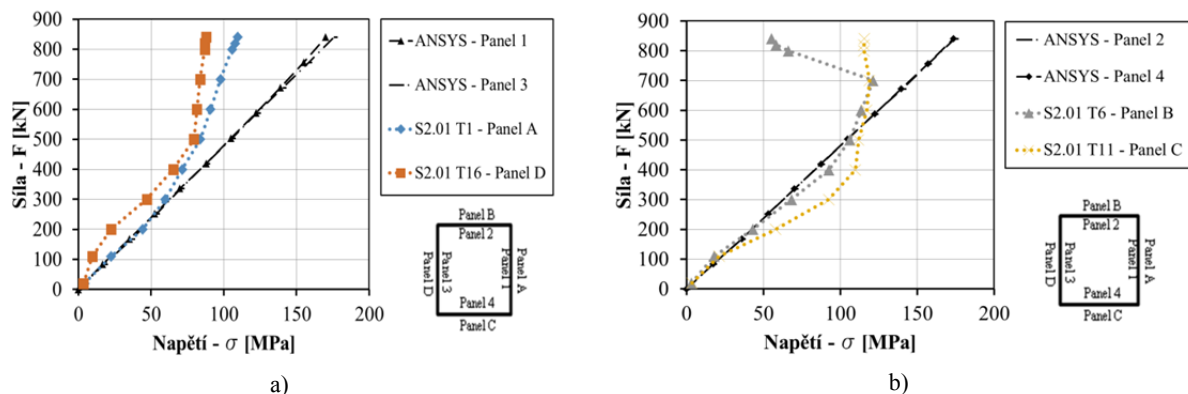
Obr. 7.35: Porovnání svislých napětí ve středním průřezu s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

Na Obr. 7.36 jsou zobrazeny hodnoty svislých napětí naměřené v horní části sloupu (hlavě sloupu). Na Obr. 7.36a) je znázorněna závislost napětí z tenzometrů T1 (panel A) a T16 (panel D) na síle. Na obrázku Obr. 7.36b) je vykreslena závislost napětí z tenzometrů T6 (panel B) a T11 (panel C) na zatěžovací síle.

Z porovnání výsledků na Obr. 7.36a) je patrné, že numerický model udává vyšší hodnoty normálového napětí ve svislém směru, než jsou napětí získaná z experimentu po dosažení únosnosti N_{f1} . Dalším zvyšováním normálové síly se již projevují trhliny, které se šířily v celém skleněném dřívku. Průměrná absolutní odchylka v tomto směru pro korespondující panely, tj. Panel A k Panelu 1, Panel D k Panelu 3, je 51% respektive 35%. Odchylka je určena pro sílu $N_{f1} = 550$ kN.

Porovnáním výsledků na obrázku Obr. 7.36b) je patrné, že numerický model dobře postihuje průběh chování spodní části sloupu ve směru kolmém na hlavní směr vybočení. Téměř shodný průběh je pozorován až do síly cca $N_{f1} = 550$ kN, tedy do vyčerpání únosnosti sloupu. Překročením této síly

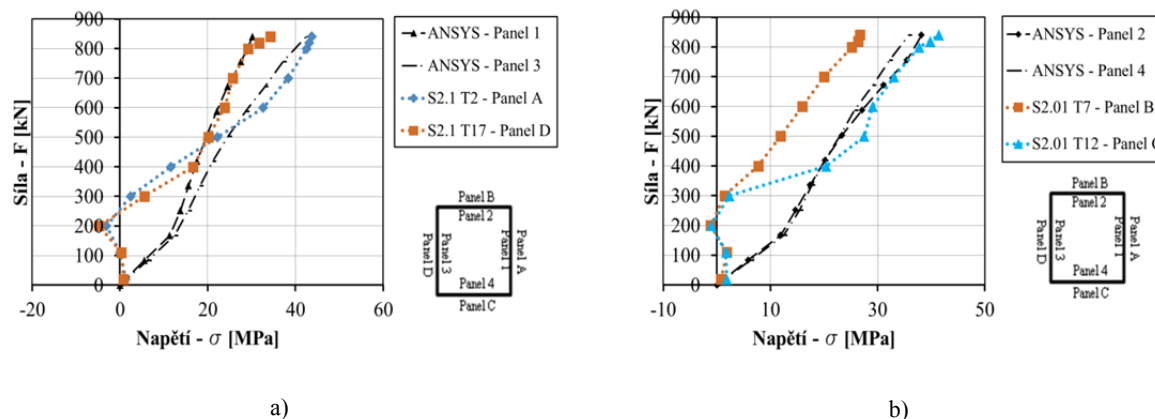
došlo k významnému odklonu od průběhu. Tento odklon je přisouzen vytvořením trhlin, které numerický model nepostihuje.



Obr. 7.36: Porovnání svislých napětí v dolní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

Na Obr. 7.37 je zobrazena závislost vodorovných napětí změřených v horní části sloupu na zatěžovací síle. Na obr. Obr. 7.37a) jsou vykresleny napětí z tenzometrů T2 (panel A) a T17 (panel D). Na Obr. 7.37b) je vykreslen průběh napětí z tenzometrů T7 (panel B) a T12 (panel C).

Při porovnání obou směrů je patrné, že numerický model vystihuje dobře chování sloupu i vznik prvních trhlin ve skleněném panelu, tj. po překročení únosnosti. Pomalý nárůst napětí lze přisoudit postupnému dotlačování lepené vrstvy mezi dřívkem sloupu a plastovou podložkou, která se postupně vytlačovala ze spáry.



Obr. 7.37: Porovnání vodorovných napětí v horní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C

7.10. ZÁVĚR NUMERICKÉ ANALÝZY A VALIDACE MODELU S VYUŽITÍM 3D PRVKŮ

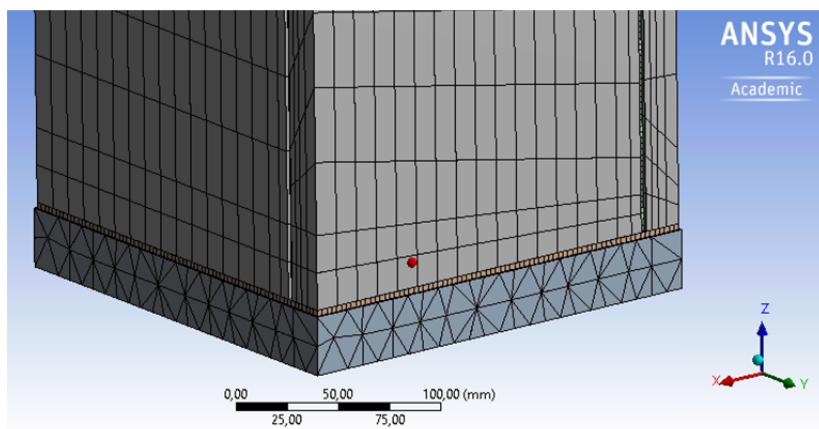
Jelikož o únosnosti sloupu vždy rozhoduje tahová pevnost, lze v tomto případě s jistotou říci, že únosnosti v patě sloupu bylo dosaženo působením příčného tahového napětí. Z tohoto důvodu byl při kalibraci modelu kladen velký důraz na vodorovná napětí. Nedostatky, které numerický model vykazuje, jsou způsobeny zavedeným zjednodušením. V modelu byly panely řešeny jako jedna skleněná deska, kdežto v experimentech se jednalo o vrstvené sklo. Důvodem tohoto zjednodušení je složitost a náročnost na výpočet. Současně se jedná o široké a komplexní téma, které nelze v tomto

výzkumu dostatečně přesně postihnout. Dalším zjednodušením je převedení všech imperfekcí pomocí jedné sinusové půl vlny. Imperfekce byly zavedeny do obou hlavních směrů, a to hodnotou $L / 300$ v směru X , respektive $L / 600$ ve směru Y .

Okrajové podmínky numerického modelu byly optimalizovány tak, aby odpovídaly reálnému uložení, které bylo provedeno v průběhu experimentů. Horní plastové podložce byly odebrány pohyby ve směru X a Y , přičemž ve směru Z byla aplikovaná síla na celou plochu podložky. Ve spodní části byla vytvořena náhradní kruhová styčná plocha, která odpovídala reálnému chování ocelové desky s ložiskem, které se protlačovalo do dřívku sloupu.

7.11. PARAMETRICKÁ STUDIE

Hlavním cílem parametrické studie je určení únosnosti skleněného sloupu, pro různé parametry, které byly vybrány tak, aby odpovídaly možnému reálnému využití v praxi. K sestavení této parametrické studie byl využit výše popsáný numerický model. Ve směru Y byla půl vlna sinusoidy počátečních imperfekcí snížena na hodnotu $L / 2500$. Z důvodu časové náročnosti výpočtu byla pro parametrickou studii použita hrubší síť konečných prvků. Upravená síť je vidět na Obr. 7.38.



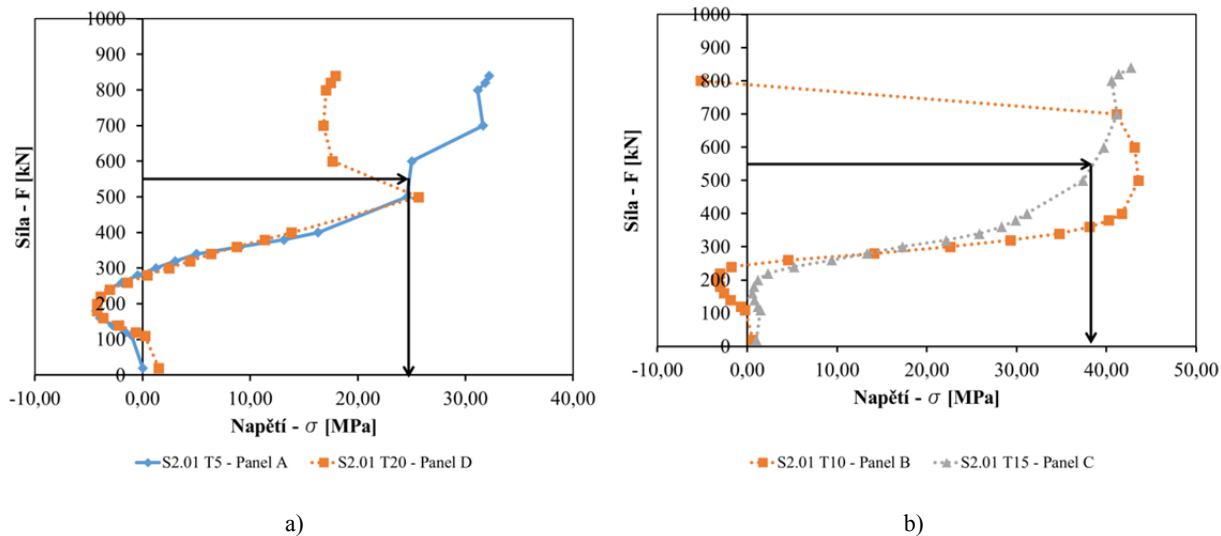
Obr. 7.38: Detail spodní části numerického modelu s nastavením sítě

Celkem bylo vytvořeno 16 modelů, přičemž první z nich odpovídá svými rozměry již provedeným experimentům. Numerické modely lze rozdělit do čtyř základních skupin. V první skupině je tloušťka panelu konstantní 20 mm a výška sloupu 3,0 m. V druhé skupině je tloušťka panelů 20 mm a výška 3,5 m. Ve třetí skupině je nastavena tloušťka 30 mm s výškou sloupu 3,5 m. Ve čtvrté skupině je opět tloušťka 30 mm, ale délka skleněných panelů je 4,0 m. Současně se u všech skupin měnila šířka panelů a to v rozmezí 150 – 350 mm tak, aby bylo možné zachovat výrobní poměr šířky a délky, tedy cca 1:10. Jednotlivé skupiny jsou uvedeny v Tab. 7.5. Postupně byly zvětšovány i tloušťky plastových podložek a to v krocích 5 a 10 mm. Jednotlivé tloušťky podložek byly 45 mm (model 9), 50 mm (modely 10, 11, 13, 14) a 60 mm (modely 12, 15, 16).

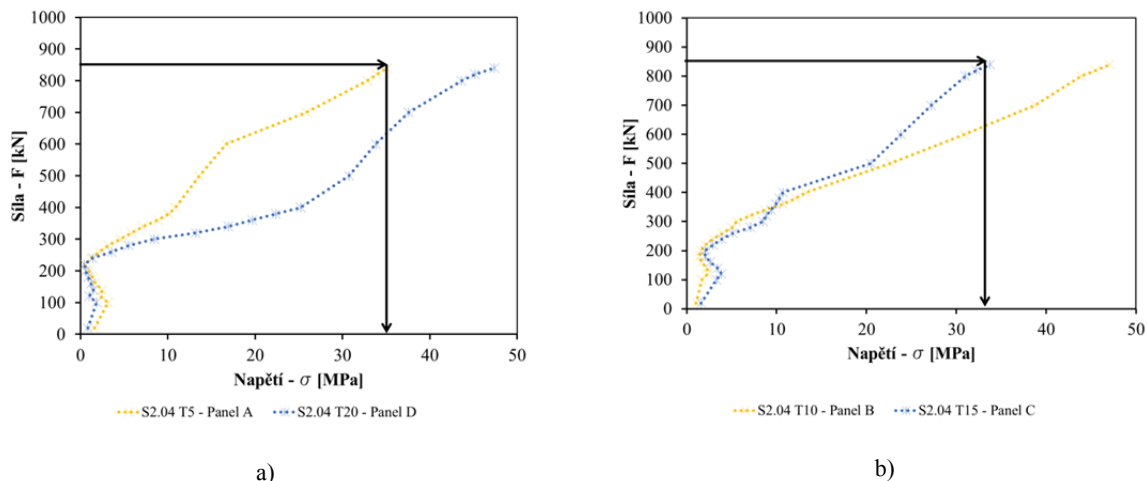
Tab. 7.5: Tabulka rozměrů parametrické studie

Značení modelů	Skupina I				Skupina II			
	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08
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
	Skupina III				Skupina IV			
	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
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

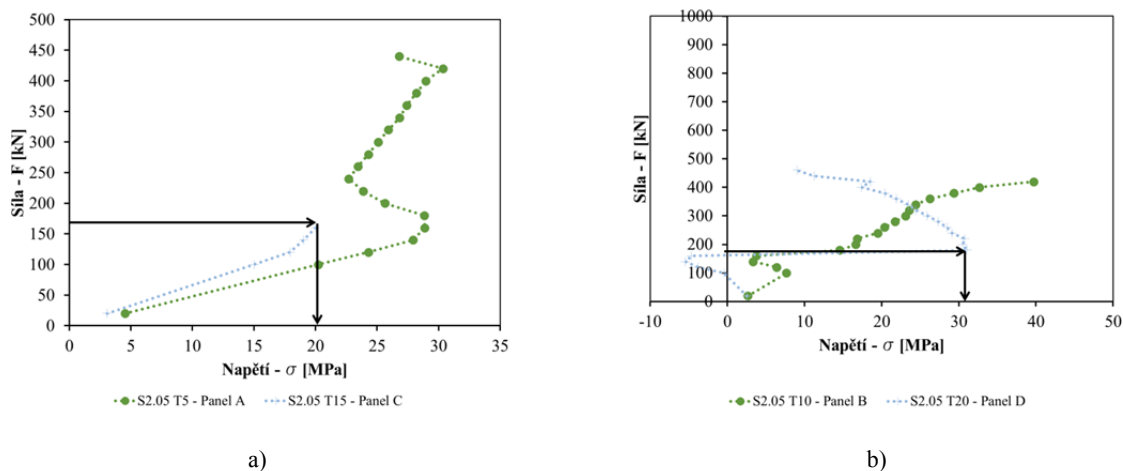
Na základě provedených experimentů a pozorování v I a II. etapě provedených experimentů byla únosnost sloupu vyčerpána porušením v patě sloupu příčným tahem. Charakteristická hodnota pevnosti v tahu byla určena na základě závislosti síly na napětí v příčném směru, viz Obr. 7.39, z provedených experimentů, resp. Z hodnot napětí získaných z tenzometrů.



Obr. 7.39: Vodorovná napětí – zkušební těleso S 2.01 a) směr A-D, b) směr B-C



Obr. 7.40: Vodorovná napětí - zkušební těleso S 2.04 a) směr A-D, b) směr B-C



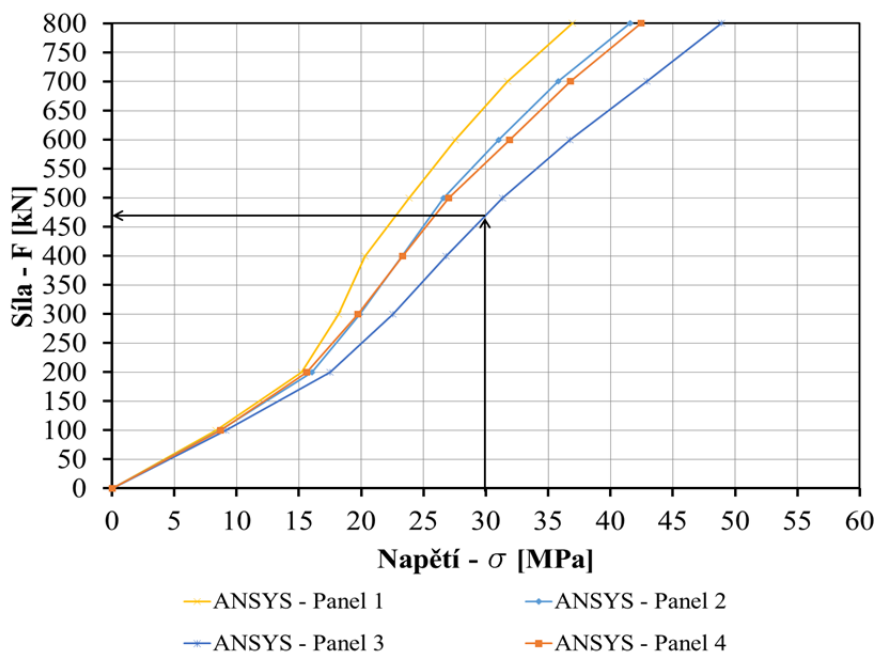
Obr. 7.41: Vodorovná napětí – zkušební těleso S 2.05 a) směr A-C, b) směr B-D

Pro lepší přehlednost jsou dílčí hodnoty napětí v příčném tahu při síle $N_{f,1}$ uvedeny v Tab. 7.6. Celková průměrná pevnost odpovídá charakteristické pevnosti plaveného skla v tahu, která má obecně vysokou míru rozptylu [35].

Tab. 7.6: Stanovení pevnosti při první trhlině z experimentů

Vzorek	Únosnost	Směr A - D	Směr B - C
	$N_{f,1}$ [kN]	$\sigma_{f,1}$ [MPa]	$\sigma_{f,1}$ [MPa]
S 2.01	500	25,41	25,62
S 2.04	860	33,75	35,11
S 2.05	180	31,07	20,01
Průměr		30,08	26,91
Celkový průměr			28,50

Na základě poznatků z experimentů, byla pro parametrickou studii uvažována pevnost v tahu hodnotou $\sigma_{max} = 30$ MPa a výsledná únosnost jednotlivých modelů byla určena ze závislosti napětí na síle pro jednotlivé panely. Na Obr. 7.42 jsou vynesena příčná napětí naměřená v patě u modelu M02, která byla vypočtena numerickým modelem. Výsledná únosnost modelu M02 odpovídající napětí $\sigma_{max} = 30$ MPa je stanovena z nejnižše položené křivky a odpovídá síle $N_{f,l} = 475$ kN.

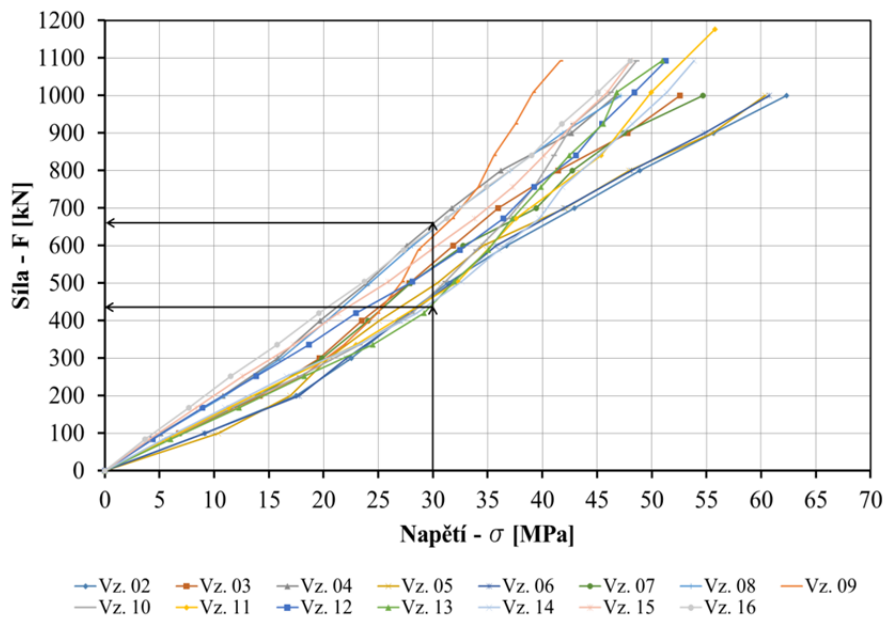


Obr. 7.42: Stanovení únosnosti sloupu pomocí vypočtených vodorovných napětí

Stejného postupu bylo využito i v případě ostatních modelů. Při porovnání všech vypočtených modelů se únosnost pohybuje v rozmezí od $N_{f,l} = 450$ do 650 kN. Nejnižší hodnoty dosahuje model M13 (tloušťka skla $t_{sklo} = 30$ mm, výška průřezu $h_{sklo} = 200$ mm, výška sloupu $L_{sklo} = 4000$ mm) a nejvyšší hodnoty únosnosti sloupu dosahuje model M04 (tloušťka skla $t_{sklo} = 20$ mm, výška průřezu $h_{sklo} = 300$ mm, výška sloupu $L_{sklo} = 3000$ mm). Na Obr. 7.43 jsou zobrazeny nejnižší křivky příčných napětí. Pro přehlednost jsou výsledné únosnosti všech numerických vzorků uvedeny v Tab. 7.7.

Tab. 7.7: Výsledné únosnosti dílčích vzorků z parametrické studie

		Skupina I				Skupina II			
		M01	M02	M 03	M 04	M05	M06	M07	M08
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			
		M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
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



Obr. 7.43: Graf závislosti síly na příčném napětí pro všechny modely uvažované v parametrické studii

7.12. ZÁVĚR PARAMETRICKÉ STUDIE

Hlavním cílem parametrické studie bylo stanovení únosnosti skleněných sloupů v závislosti na rozdílných průřezových charakteristikách, které svými zvolenými rozměry lze aplikovat ve stavební praxi. Celkem bylo otestováno 16 numerických modelů.

Proměnnými veličinami v parametrické studii byly tloušťka, výška a délka skleněných panelů. Nejvíce měněným rozměrem byla výška panelů a to od 150 – 350 mm. Dále pak délka od 3,0 m do 4,0 m. Tloušťky byly zvoleny pouze v rozmezí 20 mm a 30 mm.

K sestavení této parametrické studie byl využit výše popsáný numerický model. Ve směru Y byla půl vlna sinusoidy celkových imperfekcí snížena na hodnotu $L / 2500$, ve směru X byla amplituda půlvlny $L / 300$.

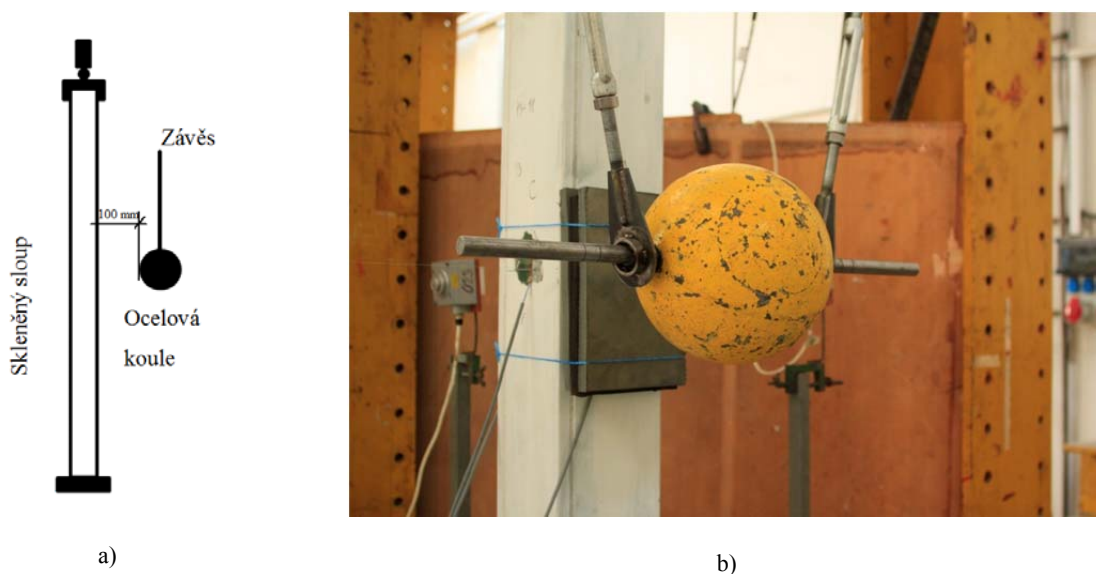
Celková únosnost dílčích vzorků byla stanovena podle pevnosti plaveného skla v tahu. Na základě provedených experimentů vyplývá, že pevnost skla v tahu byla vyčerpána při dosažení hodnoty $f_g = 30$ MPa. Tato hodnota napětí se stala určující mezí pro výpočet únosnosti skleněného sloupu. Únosnost sloupu byla stanovena podle numerického modelu v patě a to pro nejnižší křivky příčného napětí. Rozmezí únosnosti modelů se pohybovalo od $N_{f,min} = 450$ kN do $N_{f,max} = 650$ kN, pro tahovou pevnost skla $f_g = 30$ MPa. Nejvíce je únosnost skleněného sloupu ovlivněna poměrem šířky a tloušťky skleněného panelu. Je to dáno především okrajovými podmínkami, zejména způsobem uložení a velikostí podložky.

Použitím jiného druhu skla, např. tepelně tvrzeného, by únosnost sloupu dosahovala vyšších hodnot, ale z hlediska bezpečnosti by po vytvoření trhliny došlo ke kolapsu panelu či celého sloupu, protože tepelně tvrzené sklo se poruší na malé střepy v celé ploše skleněné tabule. Optimální variantou pro zvýšení únosnosti a zachování bezpečného chování je využití tepelně zpevněného skla, které má ve srovnání s plaveným sklem vyšší tahovou pevnost, ale porušuje se ve velkých střepích srovnatelně s plaveným sklem. Nevýhodou toho typu skla je cena vzhledem k technologickému procesu výroby.

8. KYVADLOVÁ ZKOUŠKA

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 nejvíce nepříznivém průřezu, tj. uprostřed výšky sloupu. Celkem bylo experimentálně ověřeno chování při zatížení nárazem na dvou zkušebních tělesech.

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 vzdáleno 100 mm od povrchu skleněného sloupu. Schéma zkoušky nárazu je vidět na Obr. 8.1.

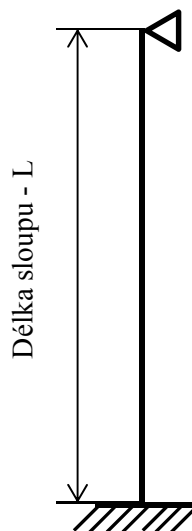


Obr. 8.1: a) Schéma zkoušky nárazem tělesa, b) reálné provedení experimentu

Na základě II. etapy experimentu a vyhodnocení mechanismů porušení byly okrajové podmínky uložení ve spodní části upraveny tak, aby nedocházelo k protlačování ocelového ložiska do vnitřní části skleněného dřívku. Detail uložení a nové statické schéma je naznačeno na Obr. 8.2. Během nárazů byly v první fázi použity pryžové podložky, které zabraňovaly přímému kontaktu ocelové koule a skleněného panelu, viz obr. 7.1b. Pryžové podložky byly složeny ze tří vrstev rozdílného materiálu.



a)



b)

Obr. 8.2: a) Detail způsobu uložení, b) statické schéma sloupu

8.1.1. Analýza podložek

Součástí zkoušky nárazem je i vyhodnocení pryžové podložky v tlaku. Podložky byly umístěny do zkušebního zařízení MTS v laboratořích ČVUT a zatíženy tlakem. Při samostatné zkoušce byla umístěna soustava pryžových podložek v MTS tak, aby odpovídala složení podložek, které byly použity při zkoušce nárazem. Dílčí tloušťky podložek byly $t_1 = 15,9$ mm, $t_2 = 15,5$ mm, $t_3 = 15,9$ mm. Celkem byly provedeny čtyři zkoušky s různou rychlostí vnášení zatížení. Rychlost zatížení byla stanovena na 1 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min a 20 mm/min. Zatížení do podložek bylo vnášeno přes ocelovou podložku, jejíž průměr byl 35,1 mm. Sestava gumových podložek a ocelové roznášecí podložky je zobrazena na Obr. 8.3.



a)



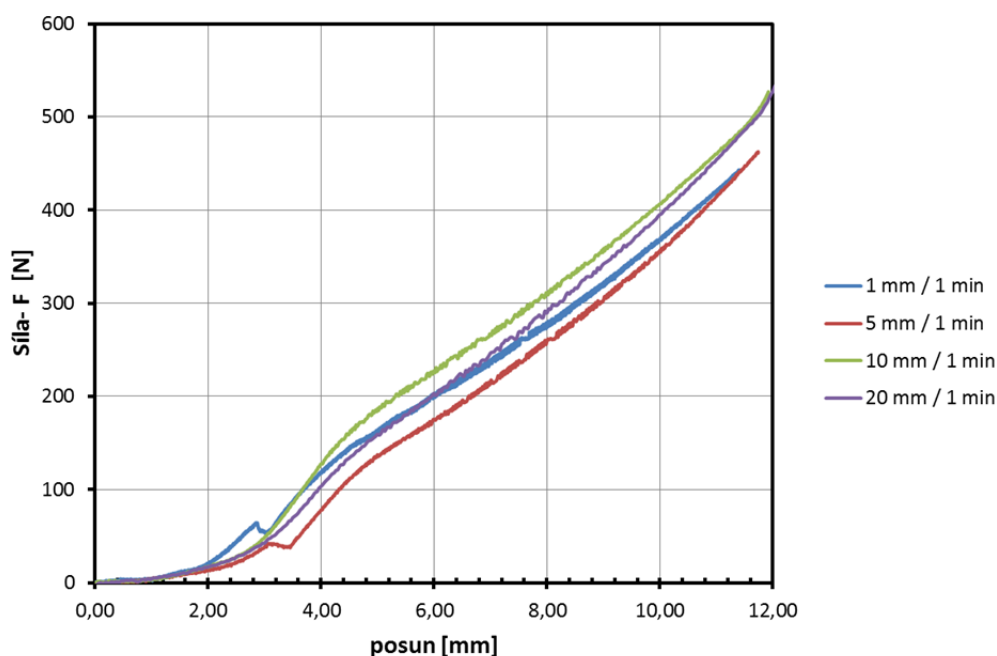
b)

Obr. 8.3: a) Zkouška soustavy ochranných podložek, b) detail ocelové roznášecí destičky

Na následujícím obr. 8.4 jsou vyneseny pracovní diagramy složené soustavy podložek. Na vodorovné ose je vynesena posun válce, který vyvozoval zatížení a na svislé ose je vynesena síla, které bylo dosaženo. Při pohledu na grafy je vidět, že tuhost gumových podložek se liší v závislosti na rychlosti zatěžování, viz Tab. 8.1.

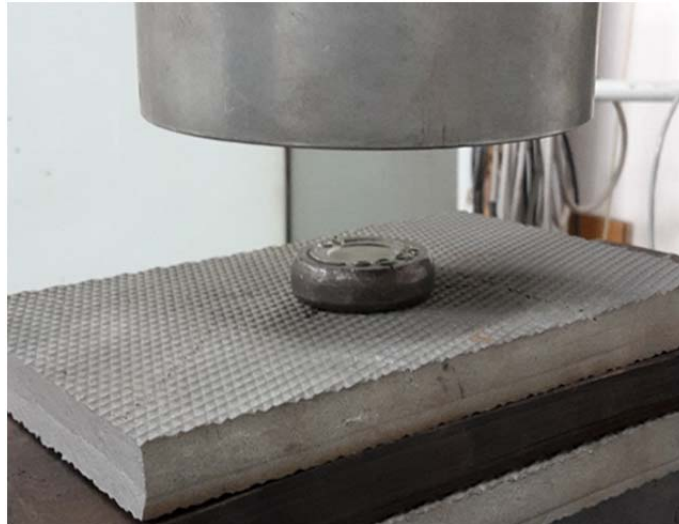
Tab. 8.1: Výsledky z tlakové zkoušky ochranných podložek

	1 mm/min	5 mm/min	10 mm/min	20 mm/min
zatlačení	dosažená síla	dosažená síla	dosažená síla	dosažená síla
[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]
4	118,02	78,08	127,61	105,34
6	200,29	174,86	226,52	200,93
8	276,79	259,89	309,86	294,07
10	376,91	356,83	406,73	396,34



obr. 8.4: Pracovní diagram podložek při různé rychlosti zatěžování

Při velikosti stlačení 3 mm došlo k relaxaci tlakové síly, která je vidět pouze v případě pomalého zatěžování, tj. 1 mm/min a 5 mm/min. Tato relaxace je způsobena povrchovou úpravou podložky, která byla v přímém kontaktu s ocelovou roznášecí deskou. Povrch podložky je tvořen mřížkou, která se při působení tlakové síly dodatečně zdeformovala, a tím došlo k relaxaci síly. Poté, co ocelová roznášecí deska stlačila mřížku, bylo stlačováno celé souvrství pryžových podložek. Povrch podložky je vidět na Obr. 8.5.



Obr. 8.5: Povrchová úprava podložky

8.1.2. Zkušební těleso S 2.02

Zkouška nárazem zkušební tělesa S 2.02 byla rozdělena na tři kroky. V první části bylo těleso vystaveno působení tlakové síly v ose sloupu až do $N_1 = 400$ kN. Cílem této části testu bylo ověření chování sloupu při zatížení a ověření celkové stability. V průběhu zatěžování do síly $N_1 = 400$ kN nevznikly ve skleněném sloupu žádné trhliny. 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, kdy byla provedena zkouška nárazem.

Skleněný sloup S 2.02 byl postupně vystaven nárazu postupně ocelovou koulí z různé vodorovné vzdálenosti, v místě dopadu byla na sloup připevněna pružná podložka, viz Obr. 8.6a). Vždy se postupovalo od nejkratší po nejdelší vzdálenost. Celkem bylo zkušební těleso vystaveno nárazům ze vzdálenosti 660 mm, 1010 mm, 1300 mm a 1450 mm. Žádný z nárazů nezpůsobil makroskopické (lidským okem viditelné) porušení skleněného sloupu. V následující Tab. 8.2 jsou uvedeny vzdálenosti ocelové koule od povrchu zkušební tělesa a počet nárazů z dané vzdálenosti.



a)



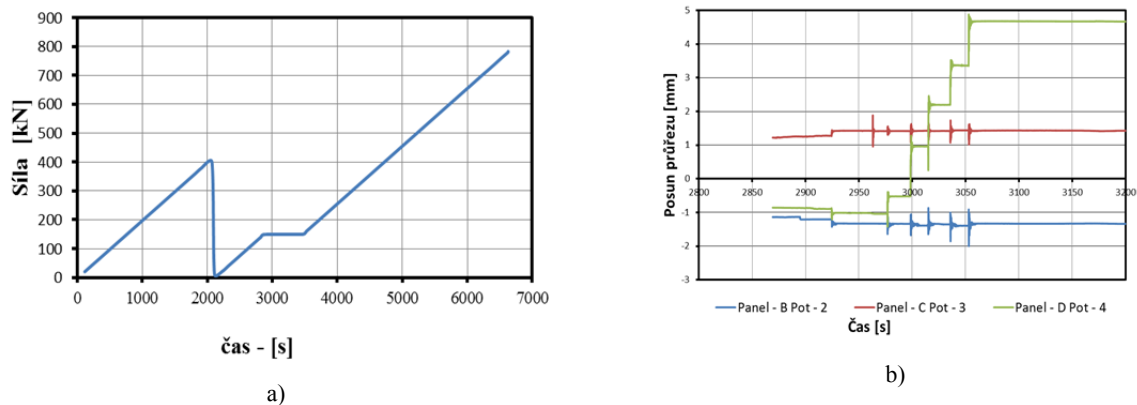
b)

Obr. 8.6: Těleso S 2.02 a) detail místa nárazu, b) záznam ze zkoušky nárazu

Tab. 8.2: Přehled zkoušky nárazem

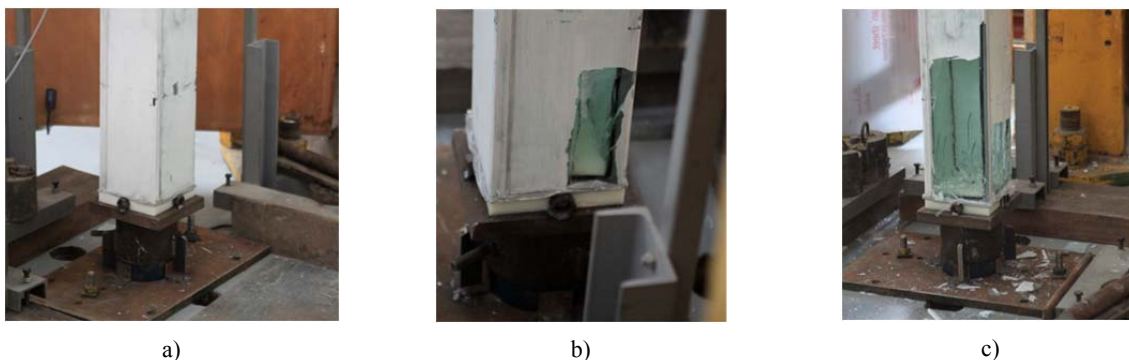
Zkušební těleso S 2.02					
vzdálenost	[mm]	660	1010	1300	1450
počet nárazů		1	1	3	1
ochrana		ano	ano	ano	ano
porušení		-	-	-	-

Po provedení zkoušky nárazem ocelovou koulí byl zkušební vzorek zatěžován plynule osovou silou až do porušení. Rychlost zatěžování byla nastavena opět na 200 N/s. K prvnímu porušení došlo ve spodní části zkušebního tělesa, kde se objevila trhлина se při síle $N_{f,1} = 630$ kN. Kolaps tělesa nastal při síle $N_{f,max} = 780$ kN. Na Obr. 8.7a) je znázorněna závislost síly na čase a v části Obr. 8.7b) je znázorněn průběh vodorovné deformace průřezu ze své roviny při jednotlivých nárazech ocelové koule.



Obr. 8.7: a) Průběh zatěžování sloupu S 2.02 v čase, b) vybočení průřezu v průběhu nárazů

Během zatěžování docházelo k postupnému vytlačování lepené mezivrstvy mezi skleněným dřikem a plastovou patkou, viz Obr. 8.8a). Další přitěžování bylo provázeno rozvojem trhliny. Rozvoj trhlin provázela postupná delaminace panelů a oddělování materiálu. Nejvíce k delaminaci materiálu docházelo ve spodní části panelu A. Celkový kolaps sloupu pak nastal náhle, viz Obr. 8.8b), Obr. 8.8c), při síle $N_{f,max} = 783$ kN.



Obr. 8.8: Způsob porušení sloupu 2.02 a) vytlačování lepené mezivrstvy, b) první trhлина, c) delaminace skleněných panelů v patě.

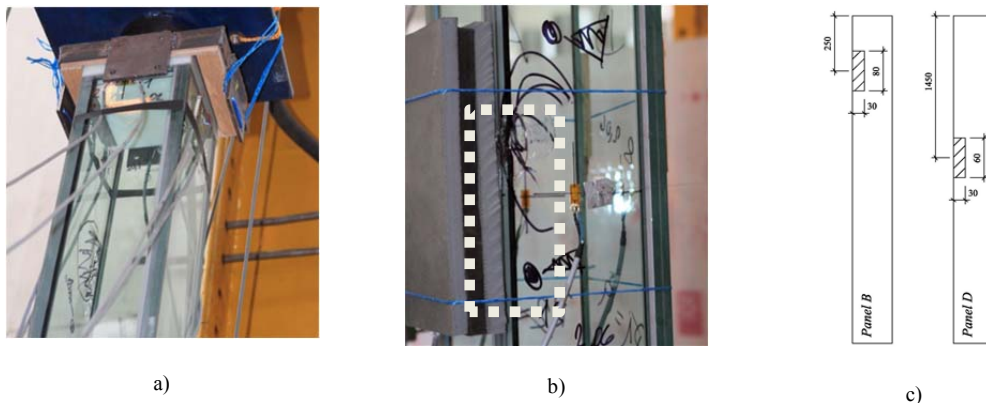
8.1.3. Zkušební těleso S 2.03

Před experimentální částí bylo zkušební těleso S 2.03 záměrně porušeno na dvou místech. Místa byla vybrána tak, aby záměrné porušení bylo v nejvíce nepříznivých průřezech, tedy v krajním průřezu a v průřezu uprostřed. Cílem tohoto porušení je simulace nehodové situace, např. při nešetřném stěhování vnitřního vybavení budov, viz Obr. 8.9. Takto upravený sloup byl vystaven zkoušce nárazem.

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 v osové vzdálenosti od kraje skleněného panelu 250 mm. viz Obr. 8.9a).

Druhé porušené místo bylo ve střední části sloupu při okraji panelu D. Porušen byl opět vnější skleněný panel v ploše 60 x 30 mm, která byla v osové vzdálenosti od kraje skleněného panelu 1500 mm, viz Obr. 8.9b).

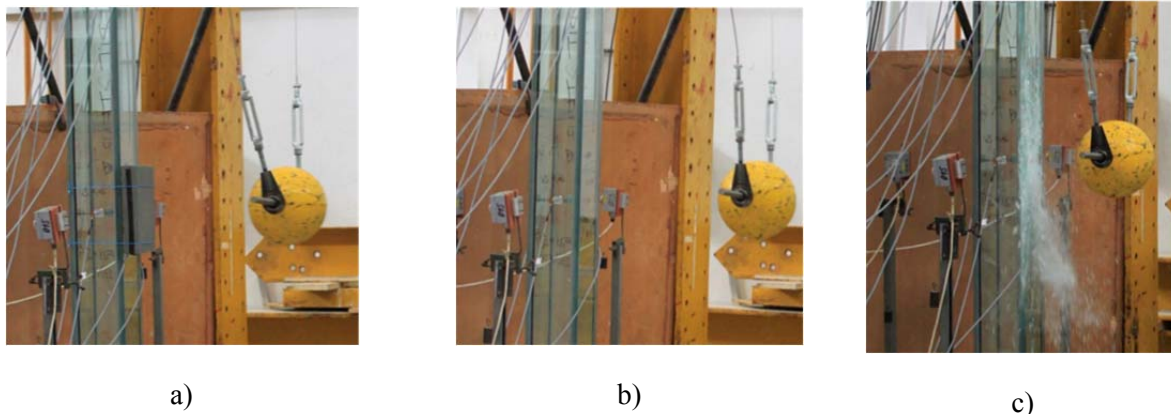
Na rozdíl od tělesa S 2.02 byla zkouška nárazem tělesa S 2.03 zjednodušena a rozdělena pouze na dva kroky. V prvním kroku bylo těleso zatíženo na sílu $N_I = 150$ kN. Rychlost zatěžování byla opět 200 N/s. Po dosažení síly N_I byla tato síla udržována po dobu min. 10 minut tak, aby bylo možné provést zkoušku nárazem.



Obr. 8.9: a) Porušení ve vrcholu, b) porušení ve středu, c) schématické znázornění počátečních poruch

Náraz měkkého tělesa byl simulován pomocí pryžových podložek v místě dopadu ocelové koule. Celkem byly provedeny 4 nárazy ze vzdáleností 750 mm a 1500 mm. Žádný z nárazů nezpůsobil makroskopické trhliny. V této části byla opět použita soustava gumových podložek, které bránily přímému kontaktu ocelové koule se skleněným dřikem, Obr. 8.10a).

Náraz tvrdého tělesa do sloupu byl simulován opět 4 nárazy ocelovou koulí ze vzdáleností 750 mm a 1500 mm. V této části experimentu byla soustava gumových podložek odstraněna. Žádný z nárazů nezpůsobil trhliny. K porušení sloupu došlo až při nárazu koulí ze vzdálenosti 1700 mm, viz Obr. 8.10b) a c).



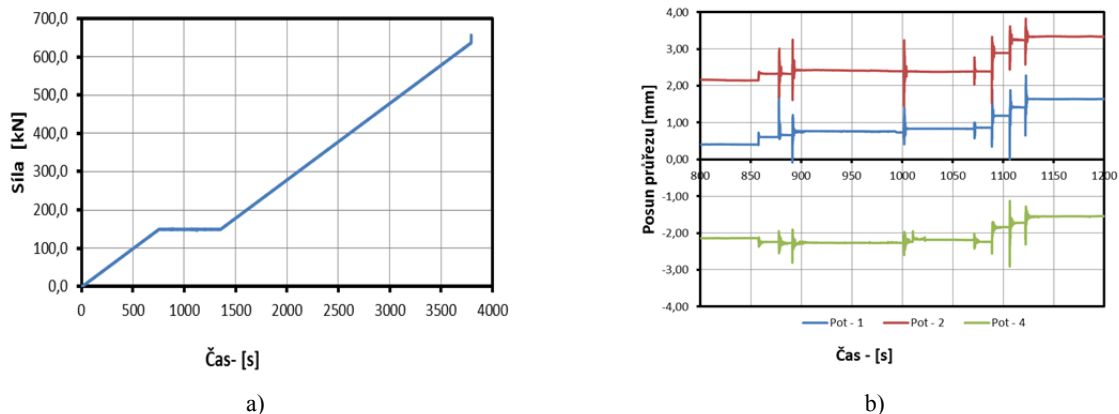
Obr. 8.10: Detail místa nárazu a) simulace nárazu člověkem, b) simulace nárazu ostrým předmětem, c) náraz ocelové koule ze vzdálenosti 1700 mm

V Tab. 8.3 je stručně shrnut průběh experimentu.

Tab. 8.3: Vyhodnocení zkoušky nárazem

		Těleso S 2.03				
Vzdálenost	[mm]	750	1500	750	1500	1700
počet nárazů		1	3	1	3	1
Ochrana		ano	ano	ne	ne	ne
Porušení		-	-	-	-	ano

Po provedení zkoušky nárazem, při kterém došlo k porušení skleněné tabule v místě dopadu ocelové koule, bylo zkušební těleso dále zatěžováno až do kolapsu. Rychlost zatěžování byla opět 200 N/s. Únosnost zkušební tělesa po provedení testu nárazem již nebylo možné určit. Kolaps sloupu nastal při síle $N_{f,max} = 630$ kN. Celkový průběh experimentu je vidět na Obr. 8.11a), kde je znázorněna závislost síly na čase. Na Obr. 8.11b) je znázorněna závislost vodorovné deformace průřezu ze své roviny při nárazu ocelové koule na čase.



Obr. 8.11: a) Průběh zatěžování sloupu S2.03 v čase, b) vybočení průřezu v průběhu nárazů

Během zatěžování docházelo k postupnému dotlačování lepené mezivrstvy. Lepená vrstva byla poté částečně vytlačena ze své pozice, tento stav lze vidět na Obr. 8.12a). Další přitěžování bylo prováděno rozvojem trhlin z místa nárazu, tj. z místa porušeného dopadem ocelové koule. Celkový kolaps sloupu pak nastal náhle a to ztrátou stability. Sloup vybočil a zlomil se uprostřed své výšky. Mechanismus porušení sloupu je vidět na . Obr. 8.12b) až Obr. 8.12c).



a)



b)



c)

Obr. 8.12: Způsob porušení sloupu 2.03 a) vytlačování lepené mezivrstvy, b) okamžik ztráty stability sloupu, c) porušený sloup.

9. ZÁVĚR

Předložená disertační práce popisuje výsledky experimentálního výzkumu, který byl zaměřen na skleněné sloupy zatížené osovou normálovou silou. Rozsáhlý experimentální výzkum probíhal v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT.

Skleněné sloupy byly navrženy s ohledem na požadavky současné moderní architektury jako lehká a transparentní konstrukce s vysokou mírou únosnosti a také zbytkovou únosností, která je podstatná pro návrh celé konstrukce. Ve světě jsou již několik let využívány skleněné konstrukce, které přenášejí zatížení vyvolané jak zatížení stálá, tak zatížení proměnná, tedy například pohyb osob, sníh, vítr, teplota. Skleněné prvky jsou v těchto případech namáhány převážně na ohyb, např. výztužné skleněné žebro fasády. Naproti tomu výzkum zaměřený na přenos normálové tlakové síly byl doposud opomíjen nebo studována jen okrajově, např. test monolitického skleněného panelu, zmenšené vzorky sloupů s křížovým průřezem apod., viz kap. 3.2. Pokud byl proveden rozsáhlejší test sloupů s reálnými rozměry, byl tento výzkum navázán na jeho reálné umístění, např. reprezentativní vstup do haly v Nordborgu, viz kap. 3.3.

Cílem toho výzkumu bylo navrhnout a ověřit celoskleněný nosný prvek, který by dokázal účinně a bezpečně přenášet tlakovou sílu. Současně bylo cílem ověření technologických postupů, které byly nutné k zhotovení zkušebních vzorků. Po provedení rešerše zaměřené na skleněné sloupy byl vybrán pro zkušební tělesa čtvercový průřez. Ke spojování skleněných panelů bylo vybráno akrylátové lepidlo SIKA Fast 5211 NT, resp. SIKA Fast 5215 NT (rozdíl v otevřeném čase pro zpracování). Lepidlo zajišťuje vysokou tuhost a pevnost a tím i únosnost lepeného spoje. Zároveň je velmi poddajné (s průtažností přibližně 200 %), čímž dokáže efektivně přerozdělit napětí. Pro smykové zkoušky lepeného spoje byly vytvořeny numerické modely v programu ANSYS, které velmi dobře odpovídají experimentům. Experimentálním výzkumem bylo prokázáno, že dvousložkové lepidlo SIKA Fast 5211 NT dokáže účinně tvořit klíčový prvek skleněného sloupu a zajišťovat spolupůsobení dílčích skleněných panelů v tuhém průřezu. Využitím lepidla bylo dosaženo vyrovnání všech materiálových i jiných imperfekcí, zejména délkových.

Výzkum zaměřený na ztrátu stability skleněných sloupů z jednovrstvého a vrstveného skla prokázal významný vliv počátečních imperfekcí, které jsou v případě skleněných nosných prvků nezanedbatelné.

Velká pozornost byla věnována detailu přenosu zatížení. Cílem bylo oddělit skleněný dřík od ocelové konstrukce, který bude do sloupu vnášet zatížení. Po pečlivém rozhodování byly vybrány plastové podložky. Podložky byly vyrobeny z jednoho kusu PMMA.

Na základě validovaného numerického modelu byly vytvořeny grafy a tabulka, ze kterých lze jednoduše určit předběžnou únosnost skleněných sloupů. Každý takto navržený sloup by měl být při změně geometrie experimentálně ověřen.

Předložená práce představuje pouze dílčí část víceletého experimentálního výzkumu. Veškeré chování sloupu bylo stanoveno pro krátkodobé zatížení a je tak třeba ověřit chování sloupu při působení dlouhodobých účinků. Dále je nutné zohlednit dotvarování lepidla, snížení pevnosti lepeného spoje vlivem stárnutí, vliv cyklického zatěžování, umístění sloupů v exteriéru atd.

9.1. HLAVNÍ DOSAŽENÉ CÍLE

- 1) Kompletní a ucelený popis chování skleněných sloupů.
- 2) Ověření technologie výroby zkušebních vzorků v obou etapách experimentů.
- 3) Vytvoření numerických modelů odpovídající smykovým zkouškám malých rozměrů pro akrylátové lepidlo SIKA Fast 5211 NT.
- 4) Ověření funkce skleněných sloupů reálnými experimenty a tvorba numerického modelu.
- 5) Provedení parametrické studie skleněného sloupu pro proměnné: tloušťka skleněného panelu, výška skleněného panelu a délka skleněného panelu
- 6) Zjednodušený analytický model vhodný pro předběžný návrh sloupu.

9.2. HODNOTNÉ VÝSTUPY

1. Bedon, Ch.; Kalamar, R.; Eliášová, M. Low velocity impact performance investigation on square hollow glass columns via full-scale experiments and Finite Element analyses Composite Structures. 2017, 182 311-325. ISSN 0263-8223.
2. Kalamar, R.; Bedon, Ch.; Eliášová, M. Assessing the structural behaviour of square hollow glass columns Engineering Structures. 2017,(143), 127-140. ISSN 0141-0296.
3. Kalamar, R.; Bedon, Chiara; Eliášová, M. Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns Engineering Structures. 2016, 113 1-15. ISSN 0141-0296.

Funkční vzorek

4. Kalamar, R. Eliášová, M. Centricky zatížený sloup ze skla. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových dřevěných konstrukcí. 25989. 21.10.2013.

9.3. DOPORUČENÍ BUDOUCÍHO VÝZKUMU

Bezpečný návrh sloupu musí vyhovovat všem kombinacím i dílčím zatížením, které na něj budou po dobu jeho životnosti působit. Zejména zatížení dlouhodobého charakteru, zatížení stálé např. vlastní tíha sloupu a tíha konstrukcí, kterou bude přenášet. Účinky dlouhodobého zatížení mají vliv na mechanické vlastnosti skla a významně ovlivňují přetvárné vlastnosti lepidla, zejména dotvarování a životnost. Může nastat situace, při které dojde ke ztrátě přilnavosti (adhese), což povede k poklesu únosnosti. Na základě experimentů II. etapy by bylo vhodné volit podložky z jiného materiálu, které by měly vyšší míru tuhosti. Jako vhodná náhrada plastových podložek PMMA je použití hliníku, vzhledem ke stejnému Youngovu modulu pružnosti $E_{Al} = 70$ GPa. Dalším doporučením je ověření stárnutí lepidla při působení UV záření nebo změny teploty a vlhkosti. Tyto hlavní faktory ovlivňují mechanické vlastnosti lepidla. V zásadě existují tři možnosti jak ověřit chování sloupu při dlouhodobém zatížení:

- 1) Stanovení materiálových vlastností lepeného spoje, např. smykové a tahové zkoušky při dlouhodobém zatížení. Redukovaná tuhost by poté byla uvažována ve statickém výpočtu při návrhu.
- 2) Uspořádání zkoušek skleněného sloupu při dlouhodobém zatížení až do okamžiku vyčerpání únosnosti, případě kolapsu (stanovení zbytkové únosnosti).
- 3) Statický návrh by předpokládal z dlouhodobého hlediska únosnost dílčích panelů samostatně, za předpokladu pružně podepřených krajů panelů. Ovšem tato varianta vede na velké tloušťky dílčích skleněných panelů.

Cyklické zatížení může mít velký vliv na mechanické vlastnosti sloupu. Vliv opakovaného zatěžování nebyl v tomto experimentálním projektu zkoumán.

Jelikož bylo záměrem ověřit transparentní vertikální konstrukci schopnou přenášet zatížení, nemohou být sloupy chráněny proti požáru. Požární bezpečnost takové konstrukce nebyla řešena, ale obecně lze tuto problematiku vyřešit odděleným systémem požární bezpečnosti, např. aktivní ochranou – sprinklery, detektory kouře, hasicí přístroje apod.

Obecně lze skleněné sloupy navrhovat i z jiných typů skel, např. tepelně tvrzeného či tepelně zpevněného skla. Vždy je třeba mít na paměti charakteristické vlastnosti materiálů a mechanismus porušení. V případě použití tvrzeného skla lze dosáhnout vyšší míry únosnosti, ale při prvním porušení může dojít k okamžitému kolapsu vzhledem k jinému typu porušení skla. Nelze tedy uvažovat se stejnou zbytkovou únosností takového konstrukčního prvku.

10. LITERATURA

- [1] Eliášová M (2013). Hybridní nosníky z oceli a skla. Habilitační práce 2013
- [2] Kalamar R (2014). Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 2014
- [3] Popovič Š (2009). Výroba a zpracování plochého skla. ISBN 978-80-247-3154-4
- [4] Fanderlik I (1996). Vlastnosti skel. ISBN 80-85427-91-5
- [5] Structural use of glass in buildings (Second edition) February 2014, Published by The Institution of Structural Engineers, London. ISBN 978-1-906335-25-0
- [6] Vuolio A (2003). Structural Behaviour of glass structures in facades. ISBN 951-22-6843-4, ISSN 1456-4327 Helsinky
- [7] Haldimann M, Luible A, Overend M (2008). Structural Use of Glass. ISBN 978-3-85748-119-2
- [8] Feldman M, Kasper R (2013) Guidline for a European strudtural design of glass Components. CEN/TC 250/WG 3 N 15
- [9] Nieuwenhuijzen van E J, Bos F.P., Veer F.A. (2005). The Laminated Glass Column. Glass Performance Days 2005, p. 420-423.
- [10] Overend M, Vassallo C, (2005). The design, Assembly a performance of glass columns. Glass Performance Days 2005, p. 287-291.
- [11] Trahair N.S. (1993). Flexural-torsion buckling of structures. London: Champ and Hall
- [12] Petersen RI, Bagger A (2009). Structural use of glass: Cruciform columns and glass portals with bolted connections subjected to bending. Proceedings of Glass Performance Days 2009: 381-385
- [13] Luible A, Crisinel M (2004). Buckling strength of glass elements in compression. Structural Engineering International, 2004: 120-125
- [14] Zenkert D, (1997) Engineering materials Advisory Services Ltd., Chameleon Press Ltd., London
- [15] F Foraboschi P (2009). Buckling of a laminated glass column under test. The Structural Engineer, Glass Performance Days 2009, p. 758-763.
- [16] Bedon C, Amadio C (2015). Design buckling curves for glass columns and beams. Structures & Buildings, 168(7): 514-526
- [17] Feldmann M, Langosh K (2010). Buckling resistence and buckling curves of pane-like glass columns with monolithic sextions f heat strengthened and tempered glass. In Proceedings of Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. TU Delft, Netherlands.
- [18] Feldmann M, Langosh K (2010). Kinckfestigkeit und einheitliche Knickkurven für scheibenförmige Glasstützen mit Monoglasqueschnitt aus TVG und ESG. Ernst and Shn Verlag für Architektur und Technische-Stahlbau Spezial 2010-Konstruktiver Glasbau, Berlin, Germany.
- [19] Oikonomopoulou F, E. A. M. van den Broek (2017). Design and experimental testing of the bundled glass column, Glass performance paper

- [20] <https://materialdistrict.com/material/conturax/>
- [21] Kalamar R, Bedon C, Eliášová M (2016). Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns. *Engineering Structures*, 113(4): 1-15
- [22] NEN-EN-1993-1-1, Navrhování ocelových konstrukcí, Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [23] European Technical Approval DYWIDAG Spannsysteme, ETA-05/0123, Dywidag product data sheet
- [24] Dierks D, Huveners E.M.P (2013). Slender high strength steel column laterally supported by glass panes. *Heron Vol. 58* (2013) ISSN (print): 0046-7316, ISSN (electronic): 1574-4078
- [25] Brockmann W., Geiß P.L., Klungen J., Schröder B. (přeložila Mikhail B.): *Adhesive Bonding – Materials, Applications and Technology*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8
- [26] Ebnesajjad S.: *Handbook of adhesives and surface preparation*. Elsevier, 2011. ISBN 978-1-4377-4461-3
- [27] Osten M.: *Práce s lepidly a tmely*. 2. vyd. Praha. SNTL, 1982.
- [28] Wurm J.: *Glass structures*. Birkhäuser, 2007. 255 s. ISBN 978-3-7643-7608-6.
- [29] Machalická K, Hořčíčková I, Eliášová M: *Shear Adhesive Shear Adhesive Connections for Glass Structures*. The 2nd International Conference „Inovative materials, Structures and Technologies“. Bristol: IOP Publishing 2nd, 2015, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). ISSN 1757-8981.
- [30] EN 572–2:2004. Glass in buildings – Basic soda lime silicate glass products. CEN.
- [31] Kalamar, R, Bedon, Ch, Eliášová, M. Assessing the structural behaviour of square hollow glass columns *Engineering Structures*. 2017,(143), 127-140. ISSN 0141-0296
- [32] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_thry/thy_el186.html
- [33] http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-45.htm
- [34] Fremr T. *Analýza únosnosti a robustnosti hybridních nosníků ze skla a oceli s dělenou stojinou*. Disertační práce, Praha 2015
- [35] Bos F.P. (2009). *Safety Concepts in Structural Glass Engineering, Towards an Integrated Approach*. ISBN 987-90-8570-428-7
- [36] European Standard Norme, Draft prEN 13474-3, June 2008.
- [37] Bareš B. (1979). *Tabulky pro výpočet desek a stěn*. L-17-B3-IV-51/72142. Vydání druhé, doplněné.
- [38] Bažant Z, Cedolin L (2010). *Stability of structures, Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*. ISBN-13 978-981-4317-02-3

11. SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- [39] ELIÁŠOVÁ, M., R. KALAMAR a Z. SOKOL. Adhesive Joints for Structural Applications – Glass Column Subjected to Compression. In: DA SILVA, L., ed. Book of Abstracts of 12th European Adhesion Conference and 4th Luse-Brazilian Conference on Adhesion and Adhesives. European Adhesion Conference and Luso-Brazilian Conference on Adhesion and Adhesives, Lisabon, 2018-09-05/2018-09-07. Publindústria, Produção de Comunicação, Lda., 2018. s. 295-297. ISBN 978-989-8927-24-8.
- [40] KALAMAR, R. a M. ELIÁŠOVÁ. Experimental evaluation of structural glass elements under compression. In: MEGUID, S.A. a J.F. SILVA GOMES, eds. Proceedings of the 7th Intrenational Conference on Mechanics and Materials in Design. 7th International Conference MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN, Albufeira, 2017- 06-11/2017-06-15. Porto: Edicoes INEGI, 2017. s. 1167-1174. ISBN 978-989-98832-7-7.
- [41] BEDON, Ch., R. KALAMAR a M. ELIÁŠOVÁ. Low velocity impact performance investigation on square hollow glass columns via full-scale experiments and Finite Element analyses. Composite Structures. 2017, 182 311- 325. ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2017.09.055
- [42] BEDON, Ch., R. KALAMAR a M. ELIÁŠOVÁ. Glass Columns under Impact - Experimental and Numerical Analyses. In: SVOBODA, P. et al., eds. Structural and Mechanical Engineering for Security and Prevention. Praha, 2017-06-14/2017-06-16. Curich: Trans Tech Publications, 2017. s. 82-89. sv. 755. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1236-0. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.82
- [43] KALAMAR, R., Ch. BEDON a M. ELIÁŠOVÁ. Assessing the structural behaviour of square hollow glass columns. Engineering Structures. 2017,(143), 127-140. ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2017.04.016
- [44] KALAMAR, R., Chiara BEDON a M. ELIÁŠOVÁ. Experimental investigation for the structural performance assessment of square hollow glass columns. Engineering Structures. 2016, 113 1-15. ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2016.01.028
- [45] KALAMAR, R. a M. ELIÁŠOVÁ. Load Bearing Innovative Construction from Glass. In: The 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies". 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies", Riga, 2015-09-30/2015-10-02. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2015. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). ISSN 1757-8981. DOI 10.1088/1757- 899X/96/1/012066
- [46] KALAMAR, R. Skleněný sloup namáhaný centrickým tlakem. In: STUDNIČKA, J. a F. ŘEHOŘ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí 20.5. a 22.9. 2015. Seminář doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, Praha, 2015-05-20. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2015. s. 47-52. ISBN 978-80-01-05741-4.

- [47] KALAMAR, R. a M. ELIÁŠOVÁ. Glass load bearing element subjected to compression. In: SCHNEIDER, J. a B. WELLER, eds. Glass - Facade - Energy. Engineered Transparency. International Conference at Glasstec, Düsseldorf, 2014-10-21/2014-10-22. Darmstadt: Technische Universität, 2014. s. 115-123. ISBN 978-3- 86780-402-8.
- [48] KALAMAR, R. a M. ELIÁŠOVÁ. Dřevěné formy určené pro výrobu skleněného sloupu. [Funkční vzorek] 2014.
- [49] KALAMAR, R. a M. ELIÁŠOVÁ. Skleněný sloup s uzavřeným čtvercovým průřezem. [Funkční vzorek] 2014.
- [50] KALAMAR, R. Centricky zatížený skleněný sloup. In: STUDNIČKA, J. a F. ŘEHOŘ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí. Seminář doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, Praha, 2014-03-19. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2014. s. 27-30. ISBN 978-80-01-05522-9.
- [51] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových dřevěných konstrukcí. Centricky zatížený sloup ze skla. Původci: R. KALAMAR a M. ELIÁŠOVÁ. Česká republika. Užitiný vzor CZ 25989. 2013-10-21.
- [52] KALAMAR, R. Inovativní konstrukce ze skla. In: STUDNIČKA, J. a F. ŘEHOŘ, eds. Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí. Seminář doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, Praha, 2013-03-26. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2013. s. 11- 12. ISBN 978-80-01-05289-1.
- [53] KALAMAR, R. Stability of Glass Structures. In: SCHNEIDER, J., ed. Proceedings Structural Glass COST Training School 2013. COST Training School, Darmstadt, 2013-03-11/2013-03-15. Darmstadt: Technische Universität, 2013. s. 387-390.

12. PŘÍLOHY

12.1. PŘÍLOHA 1

Industry

Produktový list
verze 1 (05 / 2013)

SikaFast®-5211 NT

rychle vytvrzující 2-komponentní lepicí systém pro konstrukční lepení

technická data

	komponent A SikaFast®-5211 NT	komponent B SikaFast®-5200
chemická báze	akrylát	
barva komponent (CQP ¹⁾ 001-1)	bílá	černá
barva směsi	šedá	
mechanismus vytvrzení	polymerizace	
hustota komponent (CQP 006-4)	1,15 kg / l	1,5 kg / l
hustota směsi	1,19 kg / l	
poměr míchání	objemový	10 : 1
	hmotnostní	10 : 1,3
stabilita	tixotropní pasta	
teplota zpracování	+ 5°C ÷ + 40°C	
otevřený čas ²⁾ (CQP 526-1)	ca 3 min	
čas fixace ²⁾ doba potřebná k dosažení 80% kon. pevnosti	ca 9 min	
tvrdost Shore A (CQP 023-1 / ISO 868)	90	
tvrdost Shore D (CQP 023-1 / ISO 868)	50	
pevnost v tahu ²⁾ (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 10 MPa	
prodloužení při přetřetí ²⁾ (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 200 %	
E - modul ²⁾ (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 250 MPa	
pevnost ve smyku (CQP 046-6 / ISO 4587)	ca 10 MPa	
teplota přechodu ke sklovitosti (CQP 509-1 / ISO 6721-2)	ca 60°C	
teplotní odolnost	-40 °C až + 80 °C	
skladovatelnost ³⁾ (CQP 016-1)	stříkačka	15 měsíců
	kartuše	9 měsíců
	hobok / sud	12 měsíců

¹⁾ CQP = Corporate Quality Procedures
²⁾ při 23°C a 50 % rel. vzdušné vlhkosti
³⁾ skladováno při teplotě pod 25°C, nevystaveno přímému slunečnímu záření

Popis


SikaFast®-5211 NT je rychle vytvrzující, strukturální, 2-komponentní lepicí systém na bázi ADP polymerů technologie odvozené z akrylátů. Nevytvrzený SikaFast®-5211 NT je pastovitý, nestékavý materiál umožňující jednoduchou a precizní aplikaci. SikaFast®-5211 NT je vyráběn v souladu s normami kvality ISO 9001 a 14001 a v souladu s programem « Responsible Care ».

Přednosti produktu

- nárůst pevnosti v několika minutách po aplikaci
- adheze na široké spektrum podkladů s minimální přípravou povrchu
- vysoká pevnost a odolnost proti nárazu
- bez rozpouštědel a kyselin
- snadné míchání
- nízký zápach oproti MMA

Oblast použití

SikaFast®-5211 NT je rychle tuhnutí, flexibilní lepidlo určené k nahrazení technologií jako jsou svařování, nýtování, šroubování a mechanické kotvení. Je vhodný zejména pro konstrukční a montážní lepení na různé podklady včetně kovů, plastů, skla, dřeva atd. Tento produkt je vhodný pouze pro profesionální uživatele. Před aplikací je nutno uskutečnit testy adheze s aktuálními podklady a podmínkami.



SikaFast®-5211NT 1/ 2

Vytvrzování

Lepidlo SikaFast®-5211 NT vytvrzuje polymerací při smíchání s komponentem B SikaFast®-5200. SikaFast®-5211 NT je vynikající lepidlo pro výrobní procesy v krátkých cyklech. Aby byla zaručena maximální pevnost spoje, musí podklady zůstat v klidu do doby fixace. Úpravy lepených částí jsou možné pouze v době lepidlosti materiálu.

Chemická odolnost

SikaFast®-5211 NT je odolný vůči mnoha chemikáliím. Pro konkrétní informace se prosím obraťte na Technický servis firmy Sika.

Dosažitelná adheze

Následující tabulka shrnuje výsledky smykového namáhání získané u různých substrátů. Tyto výsledky jsou orientační. Vzhledem k širokému rozsahu variant substrátů jsou doporučeny předběžné testy.

Tabulka adheze

substrát	L.	hodnota
AlMg3	K	10 MPa
nerezová ocel	K	10 MPa
galvanická ocel	K	10 MPa
sklo	K/ S	8 MPa
ABS	S	7 MPa
PVC	K/ S	10 MPa
PC	S	9 MPa

Tab. 1: pevnost dle ISO 4587, tloušťka 1.5 mm

Lom: porušení Substrátu, Kohezivní

Pokyny pro zpracování**Příprava podkladu**

Lepené plochy dlů musí být čisté, suché a zbavené všech mastnot. Nepevné části povrchu musí být mechanicky odstraněny.

V kombinaci se SikaFast®-5211 NT je nutno plochy očistit / aktivovat pomocí přípravku Sika®ADPrep. Vzhledem k rozmanitosti podkladů je nutné provést před aplikací zkoušky. V případě specifických aplikací doporučujeme konzultovat s technickým oddělením Industry.

Aplikace

SikaFast®-5211 NT se nanáší ve směšovací poměru 10:1 pomocí daného mixéru (24 elementů). Při aplikaci většího množství materiálu dochází v závislosti na množství vlivem exotermní reakce k vývinu tepla. Pro zabránění nadměrného vývinu tepla by neměla tloušťka spoje přesahovat 3 mm, minimálně však musí být 0,5 mm. Ustavení spoje je možno pouze v čase do 3 minut po smíchání, materiál dosahuje manipulační pevnosti v cca čase 9 minut. Optimální teplota pro lepení je mezi 15 °C až 25 °C. Schválený rozsah teplot podkladů a lepidla je 5 °C až 40 °C.

Pro přípravu a návrh zpracování aplikace a volbu zařízení doporučujeme využít technicko - uživatelské poradenství našeho oddělení System Engineering.

Odstranění zbytků lepidla

Nevytvrzený materiál krátce po nanesení je možné neprodleně utřít suchou utěrkou. Odstranění SikaFast®-5211 NT je možné pomocí materiálu Sika Remover 208. Vytvrzený materiál možno odstranit pouze mechanicky.

Ruce je možno očistit pomocí utěrky Sika Handclean nebo mycí pasty a oplachem vodou. Nepoužívejte rozpouštědla!

Další informace

Kopie následujících publikací jsou na vyžádání k dispozici

- bezpečnostní list produktu
- všeobecné směrnice pro SikaFast

Balení

SikaFast®-5211 NT (komp. A):	20 l hobok
SikaFast®-5211 NT (komp. A):	169 l sud
SikaFast®-5200 (komp. B):	18 l hobok
duální kartuše (komp. A+B)	250 ml
stříkačka	10 ml

Měřené hodnoty

Všechna technická data v tomto technickém listu jsou stanovena na základě laboratorních testů. Aktuálně naměřené hodnoty se mohou odchýlovat vzhledem k odlišným podmínkám měření mimo naši kontrolu.

Důležité

Další údaje o chemickém charakteru materiálu, toxikologii, ekologii, skladování, dopravě, likvidaci jsou obsaženy v bezpečnostním listu materiálu.

Upozornění

naše technicko uživatelské písemné či ústní informace a poradenství je sestaveno na základě našeho nejlepšího vědění, současného stavu znalostí z oblasti vývoje chemických produktů a získaných dlouholetých praktických zkušeností ze spolupráce s výrobci a opravami v dané oblasti. Naše doporučení jsou však nezávazná, netvoří žádný právní závazek a nezabývají kupujícího možnosti realizovat vlastní zkoušky našich produktů ve vztahu ke konstrukčním, technologickým a zpracovatelským podmínkám realizace a to zejména s ohledem na práva třetího. V ostatních záležitostech platí všeobecná ustanovení obchodního zákoníku. V případě technických informací se obraťte na naše oddělení Industry.



Sika Schweiz AG
Tüfienwies 16
8048 Zürich
Switzerland
Tel: +41 58 436 40 40
Fax: +41 58 436 45 30

Sika CZ s.r.o.
Bystrcká 1132 / 36
CZ - 624 00 Brno
Česká republika
tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com

Sika Slovensko spol. s r.o.
Rybničná 38
SK - 831 07 Bratislava
Slovensko
tel: +421 2 4920 0406
fax: +421 2 4920 0444
e-mail: sika@sk.sika.com

SikaFast®-5211 NT 2 / 2

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Schéma výroby plaveného skla [3].	11
Obr. 2.2: Porovnání chování plaveného skla s tepelně tvrzeným sklem [7].	14
Obr. 2.3: Porovnání chování plaveného skla s tepelně tvrzeným sklem [7].	15
Obr. 2.4: Porušení vrstvených skel různého druhu [8].	16
Obr. 3.1: Test skleněného sloupu	17
Obr. 3.2: Průřez vrstveného sloupu, [9]	17
Obr. 3.3: Schéma průřezů kříženého sloupu, [10].	18
obr. 3.4: Schéma lepeného spoje, [10]	19
Obr. 3.5: Průřez a detail styku spoje [12].	20
Obr. 3.6: Soustředěné břemeno na konci průběžného ramene [12].	21
Obr. 3.7: Sloup v závěrečné fázi zkoušky [12].	22
Obr. 3.8: Skutečné provedení skleněných sloupů [12].	22
Obr. 3.9: Hmyz, jenž uvízl v mezeře plátového spoje [12].	23
Obr. 3.10: a) Okrajové podmínky sloupu, b) detail válcové podložky, c) fotografie ze záznamu zkoušky [13].	24
Obr. 3.11: Excentricky zatížený tlačena prut s počáteční deformací [13].	25
Obr. 3.12: Průřez vrstveného skla	27
Obr. 3.13: Jednostranně vetknutý sloup zatížený osovou silou [15].	28
Obr. 3.14: Kritický tvar vybočení	28
Obr. 3.15: Skleněný sloup složený z násobného množství tyčí, a) průřez experimentálního vzorku složeného ze šesti tyčí, b) jádro experimentálního prvku, CONTURAX [20].	32
Obr. 3.16: Detail ocelové objímky	34
Obr. 3.17: Průřezy se dvěma nebo čtyřmi připojenými panely, a) spodní průřez, b) horní průřez,	35
Obr. 3.18: Sklo – ocelový sloup	36
Obr. 3.19: Test vzorků: a) test v tahu, b) test v prostém tlaku, c) test se ztrátou stability	37
Obr. 3.20: Pohled na lokální porušení skleněného panelu	38
Obr. 3.21: Pracovní diagram síly na posunu samostatné tyče, test 4	38
Obr. 5.1: Možné tvary porušení lepeného spoje [26]	43
Obr. 5.2: Příprava a úprava lepených povrchů [26]	43
Obr. 5.3: Vliv dynamických účinků na pevnost spoje (ukázka PUR lepidla) [28]	44
Obr. 5.4: Vliv teploty na pevnost spoje [28]	45
Obr. 5.5: Schéma smykové zkoušky [29].	46
Obr. 5.6: Numerický model a) Model - 1, b) Model - 2	47
Obr. 5.7: Bilineární pracovní diagram SIKA Fast 5211 NT	48
Obr. 5.8: Síť MKP pro oba typy spojů, a) Model – 1, B) Model - 2	48

Obr. 5.9: Průběh zatížení spoje a) Model – 1, b) Model - 2	49
Obr. 5.10: Okrajové podmínky v numerickém modelu	50
Obr. 5.11: Porovnání numerického modelu s experimenty – a) Model-1, b) Model-2	52
Obr. 6.1: Uložení sloupu	53
Obr. 6.2: Příčný řez sloupem	53
Obr. 6.3: Značení zkušebních těles	54
Obr. 6.4: Schéma značení panelů	55
Obr. 6.5: Příprava povrchu lepené hrany	55
Obr. 6.6: Vytvoření distanční mezery	55
Obr. 6.7: Polovina dříku před aplikací lepidla	56
Obr. 6.8: Odstranění přebytečné vrstvy lepidla	56
Obr. 6.9: Průřez dříku skleněného sloupu	56
Obr. 6.10: Osazení Alu lišt	56
Obr. 6.11: Detail Alu lišty	57
Obr. 6.12: Detail uložení skleněného dříku na plastovou podložku	57
Obr. 6.13: a) Schéma skleněného vzorku, b) pozice a označení rozmístění tenzometrů.	58
Obr. 6.14: Okrajové podmínky při testu a) spodní část, b) horní část, c) statické schéma sloupu	58
Obr. 6.15: Vzorek S 1.02 a) zobrazení první trhliny ve spodní části, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle	59
Obr. 6.16: Vzorek S 1.01 a) znázornění první trhliny, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle	60
Obr. 6.17: Vzorek S 1.01 a) graf vybočení průřezu, b) detail umístění potenciometrů	61
Obr. 6.18: Vzorek S 1.03 a) zobrazení první trhliny, b) pracovní diagram v závislosti napětí na síle, c) graf vybočení průřezu ve středu rozpětí	62
Obr. 6.19: Grafické znázornění změny průřezu vzorku S1.03 a) před porušením, b) po porušení	62
Obr. 6.20: Excentricky zatížený tlačný prut s počáteční deformací w_0	64
Obr. 6.21: Porovnání analytického modelu s experimenty v hlavním směru vybočení, a) sloup S 1.01, b) sloup S 1.02, c) sloup S 1.03	66
Obr. 6.22: Numerický model 3D vytvořený v programu ANSYS, detail zjemněné sítě	67
Obr. 6.23: Imperfekce v numerickém modelu, (a) tvar sinusoidy, (b) náhrada v numerickém modelu z pěti průřezu	68
Obr. 6.24: Porovnání výsledků a) - b) porovnání normálového napětí v jednotlivých směrech, c) porovnání vybočení průřezu s numerickým modelem	69
Obr. 6.25: Schématické znázornění průběhu trajektorií hlavních napětí v patě sloupu [31]	70
Obr. 6.26: Porovnání vybočení vypočtených numerickými modely s experimenty	70
Obr. 6.27: Porovnání normálových napětí	72
Obr. 7.1: Schéma označení zkušebních těles	73

Obr. 7.2: Skleněný sloup II. etapy a) rozměry vzorků, b) detail lepeného spoje, c) schéma uložení sloupu při experimentu.....	74
Obr. 7.3: a) Skenovaný vzorek S2.02, b) měřicí zařízení - Superhaser 25HSX.....	75
Obr. 7.4: Výsledky ze zaměření a) pohled na zaměřený vzorek, b) systém řezů v axonometrii, c) vybrané řezy určené k vyhodnocení.....	76
Obr. 7.5: Směr posunu dílčích průřezů a) posun krajních průřezu, b) posun průřezu ve středu.	77
Obr. 7.6: Proces čištění a) aktivátor ADPrep, b) čištění lepených hran.....	77
Obr. 7.7: Příprava skleněných panelů a) ustavení a vyrovnání panelů, b) detail spárové pásky.....	78
Obr. 7.8: Lepená spára a) spojené dva panely, b) detail lepené spáry.....	78
Obr. 7.9: Připojení plastových podložek a) vytvoření přesné lepené spáry, b) finální provedení detailu.....	79
Obr. 7.10: Osazení tenzometrů a) zkušební těleso, b) popis měřicího zařízení, c) legenda označení tenzometrů.....	80
Obr. 7.11: a) Detail uložení v patě, b) detail uložení v hlavě sloupu.....	80
Obr. 7.12: Ocelové ložisko.....	81
Obr. 7.13: Trhlina v patě sloupu – panel B.....	81
Obr. 7.14: Zkušební těleso S 2.01 a) delaminace panelu B, b) rozvoj trhlin v hlavě sloupu.....	82
Obr. 7.15: Zkušební těleso S 2.01 a) okamžik kolapsu sloupu, b) detail roztržené části paty sloupu... ..	82
Obr. 7.16: Porušená podložka a) přední strana plastové podložky, b) zadní strana plastové podložky	83
Obr. 7.17: Mechanismus porušení sloupu S 2.04 a) sloup před porušením, b) okamžik kolapsu – separace panelu C, c) oddělení panelu C, d) kolaps sloupu.....	83
Obr. 7.18: Porušení podložky a) přední strana plastové podložky, b) boční strana plastové podložky	84
Obr. 7.19: Deformovaná ocelová pata.....	84
Obr. 7.20: Zkušební těleso S 2.05 a) počáteční trhliny na panelu C, b) detail.....	85
Obr. 7.21: Zkušební těleso S 2.05 a) rozvoj trhlin na panelu B, b) kolaps sloupu.....	85
Obr. 7.22: Zkušební těleso S 2.05 a) přední strana plastové podložky, b) boční strana plastové podložky.....	86
Obr. 7.23: Průřez dílčího skleněného panelu.....	88
Obr. 7.24: Závislost napětí na vnesené síle, a) hlavní směr vybočení, b) vedlejší směr vybočení.....	89
Obr. 7.25: Deformace plastové podložky.....	90
Obr. 7.26: Kontaktní plocha lepidla.....	91
Obr. 7.27: Svislá a příčná napětí v hlavě, a) svislé napětí v hlavním směru vybočení, b) svislá napětí ve směru kolmém, c) příčné napětí ve směru hlavního vybočení, d) příčné napětí v kolmém směru.....	92
Obr. 7.28: Svislá a příčná napětí v patě, a) svislé napětí v hlavním směru vybočení, b) svislá napětí ve směru kolmém, c) příčné napětí ve směru hlavního vybočení, d) příčné napětí v kolmém směru.....	93
Obr. 7.29: Numerický model 3D.....	93
Obr. 7.30: Detail zjemněné sítě v patě sloupu.....	94

Obr. 7.31: Okrajové podmínky numerického modelu a) náhradní plocha, b) odebrání směru posuvu v rovině XY , c) aplikace zatížení na plochu horní plochu podložky.....	95
Obr. 7.32: Deformovaný numerický model a) zvětšený řez horní částí (zvětšeno 7,8x), b) detail lepené mezivrstvy (reálné měřítko), c) zvětšený řez dolní částí (zvětšeno 7), d) detail lepidla v patě (reálné měřítko)	96
Obr. 7.33: Porovnání svislých napětí v horní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C	97
Obr. 7.34: Porovnání vodorovných napětí v horní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C	97
Obr. 7.35: Porovnání svislých napětí ve středním průřezu s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C	98
Obr. 7.36: Porovnání svislých napětí v dolní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C	99
Obr. 7.37: Porovnání vodorovných napětí v dolní části s numerickým modelem a) směr A-D, b) směr B-C	99
Obr. 7.38: Detail spodní části numerického modelu s nastavením sítě.....	100
Obr. 7.39: Vodorovná napětí – zkušební těleso S 2.01 a) směr A-D, b) směr B-C.....	101
Obr. 7.40: Vodorovná napětí - zkušební– těleso S 2.04 a) směr A-D, b) směr B-C	102
Obr. 7.41: Vodorovná napětí – zkušební těleso S 2.05 a) směr A-C, b) směr B-D.....	102
Obr. 7.42: Stanovení únosnosti sloupu pomocí vypočtených vodorovných napětí.....	103
Obr. 7.43: Graf závislosti síly na příčném napětí pro všechny modely uvažované v parametrické studii	104
Obr. 8.1: a) Schéma zkoušky nárazem tělesa, b) reálné provedení experimentu	106
Obr. 8.2: a) Detail způsobu uložení, b) statické schéma sloupu.....	107
Obr. 8.3: a) Zkouška soustavy ochranných podložek, b) detail ocelové roznášecí destičky.....	107
obr. 8.4: Pracovní diagram podložek při různé rychlosti zatěžování	108
Obr. 8.5: Povrchová úprava podložky	109
Obr. 8.6: Těleso S 2.02 a) detail místa nárazu, b) záznam ze zkoušky nárazu.....	109
Obr. 8.7: a) Průběh zatěžování sloupu S 2.02 v čase, b) vybočení průřezu v průběhu nárazů.....	110
Obr. 8.8: Způsob porušení sloupu 2.02 a) vytlačování lepené mezivrstvy, b) první trhлина, c) delaminace skleněných panelů v patě.....	110
Obr. 8.9: a) Porušení ve vrcholu, b) porušení ve středu, c) schématické znázornění počátečních poruch	111
Obr. 8.10: Detail místa nárazu a) simulace nárazu člověkem, b) simulace nárazu ostrým předmětem, c) náraz ocelové koule ze vzdálenosti 1700 mm	112
Obr. 8.11: a) Průběh zatěžování sloupu S2.03 v čase, b) vybočení průřezu v průběhu nárazů.....	112

Obr. 8.12: Způsob porušení sloupu 2.03 a) vytlačování lepené mezivrstvy, b) okamžik ztráty stability sloupu, c) porušený sloup..... 113

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Dílčí zastoupení chemických prvků v plaveném skle	11
Tab. 2.2: Materiálové vlastnosti plaveného skla [2].....	12
Tab. 2.3: Závislost pevnosti skla na délce trvání zatížení [5].....	12
Tab. 3.1: Rozdělení vzorků	32
Tab. 3.2: Výsledky experimentů	33
Tab. 3.3: Výsledek z GMNIA	36
Tab. 3.4: Přehled provedených testů	37
Tab. 3.5: Porovnání výsledků únosností.....	39
Tab. 5.1: Výsledky z numerické analýzy spoje, Model - 1	51
Tab. 5.2: Výsledky z numerické analýzy spoje, Model - 2	51
Tab. 6.1: Skutečné rozměry skleněných panelů 9 [31]	54
Tab. 6.2: Statistické vyhodnocení [31].....	54
Tab. 6.3: Souhrn získaných dat z experimentů I. Etapy	63
Tab. 6.4: Nominální rozměry panelů použité v numerickém modelu	67
Tab. 6.5: Porovnání průměrných napětí z experimentů, AM a NM - Ansys.....	72
Tab. 7.1: Skutečné rozměry dílčích skleněných panelů	75
Tab. 7.2: Posun průřezů.....	76
Tab. 7.3: Souhrnné výsledky z II. Etapy	86
Tab. 7.4: Dílčí rozměry použité v numerickém modelu.....	94
Tab. 7.5: Tabulka rozměrů parametrické studie	101
Tab. 7.6: Stanovení pevnosti při první trhlině z experimentů	102
Tab. 7.7: Výsledné únosnosti dílčích vzorků z parametrické studie	104
Tab. 8.1: Výsledky z tlakové zkoušky ochranných podložek	108
Tab. 8.2: Přehled zkoušky nárazem.....	110
Tab. 8.3: Vyhodnocení zkoušky nárazem	112