



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

**Ztráta příčné a torzní stability hybridních nosníků z oceli a skla**

**Lateral and Torsional Stability of Hybrid Steel-Glass Beams**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Iva Pravdová**

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

**Praha, 2018**



## **PROHLÁŠENÍ**

Jméno doktoranda: Iva Pravdová

Název disertační práce: Ztráta příčné a torzní stability hybridních nosníků z oceli a skla

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Marty Eliášové, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: SGS15/038/OHK1/1T/11 - Nosné konstrukce ze skla, SGS13/123/OHK1/2T/11 - Inovativní konstrukce ze skla a grantu MŠMT č. LD13014 - Pokročilá analýza vlivu stárnutí na lepené spoje konstrukcí ze skla.

V Praze dne .....

.....  
podpis

## Poděkování

Předložená disertační práce vznikala v letech 2011-2018 a je shrnutím rozsáhlého výzkumu, za jehož odborné vedení, věcné připomínky a trpělivost velice děkuji své školitelce doc. Ing. Martině Eliášové, CSc.

Výzkum byl podporován firmami SIPRAL a.s. a SIKA CZ s.r.o., kterým náleží poděkování za konzultace a cenné rady. Děkuji Ing. Martinu Fučíkovi za jeho osobní přístup a Ing. Jiřímu Rumlovi za předání zkušeností s aplikací lepidel, které byly při výrobě zkušebních těles nepostradatelné.

Poděkování rovněž patří doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a jeho spolupracovníkům z Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT za pomoc a vstřícnost při provádění experimentů.

Dále bych chtěla poděkovat společnosti Dlubal Software s.r.o., která mi poskytla program RFEM 5.05 pro numerické výpočty.

V neposlední řadě mnohokrát děkuji všem kolegům a přátelům, Ing. Romanu Kalamárovi, Ing. Michalu Netušilovi, Ing. Kláře Machalické a dalším, kteří mi byli nápomocni při výrobě hybridních nosníků a zkušebních těles pro smykové zkoušky lepeného spoje.

Na závěr bych ráda poděkovala celé své rodině, zejména svým rodičům a manželovi, za vytrvalou podporu, pochopení a motivaci během celého studia.

## Abstrakt

Skleněné konstrukční prvky mají v současné architektuře nezastupitelné místo zejména kvůli transparentnosti tohoto materiálu. Vyvíjí se různé hybridní konstrukční prvky, ve kterých se kombinuje sklo s jiným materiálem (například ocelí, dřevem nebo betonem) tak, aby bylo dosaženo vyšší únosnosti i tuhosti při současném zachování vysoké transparentnosti. Štíhlé skleněné nebo hybridní sklo-ocelové nosníky, které jsou použité jako vertikální výztužné prvky skleněných fasád, mohou být náchylné ke ztrátě stability. Předložená práce se zabývá ztrátou příčné a torzní stability skleněných a hybridních sklo-ocelových nosníků. Na základě rozsáhlého experimentálního výzkumu je chování nosníků popsáno pomocí ověřených numerických modelů, které byly vytvořeny v programu ANSYS a RFEM. Vzhledem k tomu, že v současnosti chybí normy pro návrh nosných konstrukcí ze skla, je v práci uveden postup, jakým způsobem je možné bezpečně navrhnout hybridní sklo-ocelový nosník s ohledem na ztrátu příčné a torzní stability.

**Klíčová slova:** sklo, hybridní nosník, ztráta příčné a torzní stability, imperfekce, numerický model, kritický moment.

## Abstract

Glass has grown in importance in modern architecture because of its transparency. Various types of hybrid structures consisting of glass and another material (e.g. steel, timber, concrete) are developed to achieve higher strength and stiffness as well as to keep their transparency at the same time. Thin glass or hybrid steel-glass beams, which are used as vertical supporting fins for glass facades, may be influenced by the effect of lateral torsional buckling. This paper deals with the lateral and torsional stability of glass and hybrid steel-glass beams. The experimental research was carried out and the behaviour of the beams was described by numerical models created in ANSYS and RFEM. At this moment, there is a lack of standards for the design of this type of structures. The paper describes a method of safety design of hybrid steel-glass beams with respect to the loss of lateral and torsional stability.

**Keywords:** Glass, Hybrid beam, Lateral and torsional buckling, Imperfection, Numerical model, Critical moment.

# Obsah

<b><u>ZÁKLADNÍ PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....</u></b>	<b>9</b>
<b><u>ÚVOD.....</u></b>	<b>11</b>
<b><u>1 ZTRÁTA PŘÍČNÉ A TORZNÍ STABILITY SKLENĚNÝCH NOSNÍKŮ.....</u></b>	<b>12</b>
1.1 Ztráta příčné a torzní stability .....	12
1.2 Výpočet pružného kritického momentu .....	12
1.3 Normy a dokumenty zabývající se ztrátou příčné a torzní stability skleněných nosníků .....	13
1.3.1 Australská norma AS 1288-2006 .....	13
1.3.1.1 Nosníky držené v mezilehlých bodech .....	14
1.3.1.2 Nosníky bez mezilehlých příčných podpor .....	15
1.3.1.3 Nosníky spojitě držené .....	15
1.3.2 Italský dokument CNR-DT 210/2013.....	16
1.3.3 Dokument Guidance for European Structural Design of Glass Components.....	18
1.4 Stabilita skleněných nosníků .....	18
1.4.1 Výrobní tolerance tloušťky skleněných tabulí .....	18
1.4.2 Počáteční deformace .....	19
1.4.3 Poškození skleněného povrchu a chování PVB fólie .....	19
1.5 Provedené experimenty a jejich výsledky.....	20
1.5.1 Institute of Technology Lausanne, Švýcarsko .....	20
1.5.2 Německo RWTH Aachen – Institute of Steel Construction .....	22
1.5.3 Univerzita Gent, Belgie.....	23
<b><u>2 HYBRIDNÍ NOSNÍKY.....</u></b>	<b>24</b>
2.1 Nosníky ze skla a dřeva .....	24
2.2 Nosníky ze skla a betonu.....	26
2.3 Nosníky ze skla a oceli .....	27
2.3.1 Vyztužené skleněné nosníky .....	27
2.3.2 Skleněné nosníky s ocelovými pásnicemi .....	28
2.3.2.1 Möhlerova metoda.....	30
2.3.2.2 Modifikovaná Möhlerova metoda.....	32

2.3.3	Skleněné nosníky s ocelovými pásnicemi a dělenou stojinou .....	32
2.3.4	Skleněné nosníky v ocelovém rámu .....	33
2.3.5	Výzkum příčné a torzní stability hybridních sklo-ocelových nosníků .....	35
<b>3</b>	<b><u>CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE .....</u></b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b><u>EXPERIMENTY.....</u></b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Skleněné nosníky .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Tahové zkoušky lepidel .....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Popis zkoušky dle normy ČSN EN ISO 527 Plasty .....	41
4.2.2	Provedení experimentu .....	42
4.2.3	Vyhodnocení zkoušek .....	44
<b>4.3</b>	<b>Smykové zkoušky lepeného spoje .....</b>	<b>47</b>
4.3.1	Výroba zkušebních těles .....	47
4.3.2	Stárnutí zkušebních těles .....	49
4.3.3	Uspořádání experimentu .....	50
4.3.4	Vyhodnocení zkoušek .....	51
<b>4.4</b>	<b>Zkoušky hybridních nosníků ke stanovení jejich únosnosti.....</b>	<b>54</b>
4.4.1	Výroba hybridního nosníku.....	54
4.4.2	Uspořádání zkoušek.....	56
4.4.3	Vyhodnocení zkoušek .....	58
<b>4.5</b>	<b>Zkoušky hybridních nosníků zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability .....</b>	<b>61</b>
4.5.1	Výroba hybridních nosníků.....	61
4.5.2	Měření imperfekcí.....	62
4.5.3	Zkoušky hybridních nosníků.....	65
4.5.4	Vyhodnocení zkoušek .....	69
<b>5</b>	<b><u>ANALYTICKÉ A NUMERICKÉ MODELÝ.....</u></b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Numerický model skleněných nosníků .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2</b>	<b>Numerický model smykových zkoušek.....</b>	<b>75</b>
5.2.1	ANSYS 11.0 .....	76
5.2.2	RFEM 5.05 .....	76
5.2.3	Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5211 NT .....	76
5.2.4	Numerické modely smykových zkoušek s lepidlem SikaFast-5211 .....	77
<b>5.3</b>	<b>Analytický model hybridního nosníku o délce 4250 mm.....</b>	<b>78</b>

<b>5.4 Numerické modely hybridního nosníku o délce 4250 mm s příčným držením na ztrátu stability</b> .....	<b>80</b>
5.4.1 ANSYS 11.0 .....	81
5.4.2 RFEM 5.05 .....	81
5.4.3 Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5215 NT .....	81
5.4.4 Srovnání výsledků lepidel SikaFast-5215 NT a SikaFast-5211.....	83
<b>5.5 Výpočet kritického momentu hybridního nosníku</b> .....	<b>85</b>
5.5.1 Kritický moment pro skleněnou stojinu .....	86
5.5.2 Kritický moment hybridního sklo-ocelového nosníku.....	87
<b>5.6 Numerické modely hybridního nosníku o délce 4750 mm bez držení na ztrátu příčné a torzní stability</b> .....	<b>87</b>
5.6.1 LTBeam.....	88
5.6.1.1 Model střední části nosníku.....	88
5.6.1.2 Model celého hybridního nosníku.....	90
5.6.1.3 Porovnání .....	91
5.6.2 ANSYS 11.0 .....	92
5.6.3 RFEM 5.05 .....	93
5.6.4 Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5215 NT .....	94
<b>5.7 Maximální ohybový moment hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability</b> .....	<b>95</b>
<b>5.8 Parametrická studie</b> .....	<b>99</b>
5.8.1 Vzdálenost příčných podpor.....	100
5.8.2 Šířka ocelových pásnic.....	102
5.8.3 Výška skleněné stojiny .....	104
<b><u>ZÁVĚR</u></b> .....	<b>107</b>
<b><u>HLAVNÍ DOSAŽENÉ CÍLE</u></b> .....	<b>108</b>
<b><u>HODNOTNÉ VÝSTUPY</u></b> .....	<b>109</b>
<b><u>CÍLE BUDOUCÍHO VÝZKUMU</u></b> .....	<b>109</b>
1) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při dlouhodobém zatížení.....	109
2) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při cyklickém zatěžování .....	109
3) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při stárnutí .....	110
4) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při vyšších teplotách.....	110

<b>POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>111</b>
-----------------------------	------------

<b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORKY.....</b>	<b>114</b>
--------------------------------------	------------

<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>116</b>
----------------------	------------

Příloha 1 – Technický list SikaFast-5211 NT .....	116
Příloha 2 – Technický list SikaFast-5215 NT .....	118
Příloha 3 – Technický list SikaFast-5211 .....	120
Příloha 4 – Vstupní soubor do programu ANSYS, skleněný nosník .....	122
Příloha 5 – Vstupní soubor do programu ANSYS, smykové zkoušky lepeného spoje ...	126
Příloha 6 – Vstupní soubor do programu ANSYS, hybridní nosník s příčným držením na ztrátu stability .....	129
Příloha 7 – Vstupní soubor do programu ANSYS, hybridní nosník bez držení na ztrátu příčné a torzní stability .....	133



## Základní přehled použitých symbolů

$A_a$	Plocha ocelové pásnice
$b_k$	Šířka lepeného spoje v hybridním nosníku
$C_i, z_a$	Součinitelé zohledňující různé okrajové podmínky, různý průběh ohybových momentů a vzdálenost mezi těžištěm a působištěm síly
$d$	Tloušťka vrstvy lepidla v přeplátovaném spoji
$E$	Youngův modul pružnosti
$E_a$	Youngův modul pružnosti oceli
$E_G$	Youngův modul pružnosti skla
$F$	Působící síla
$f_{g,d}$	Návrhová hodnota pevnosti skla v tahu za ohybu
$f_R$	Pevnost skla v tahu za ohybu
$G$	Modul pružnosti ve smyku
$G_K$	Modul pružnosti ve smyku lepidla
$g_1, g_2, g_3$	Konstanty pro výpočet pružného kritického momentu
$h$	Výška průřezu
$h_w$	Výška skleněné stojiny hybridního nosníku
$I_a$	Moment setrvačnosti ocelové pásnice
$I_G$	Moment setrvačnosti skleněné stojiny
$I_t$	Moment tuhosti v prostém kroucení
$I_w$	Výsečový moment setrvačnosti
$I_y$	Moment setrvačnosti průřezu k ose y
$I_z$	Moment setrvačnosti průřezu k ose z
$K_K$	Poměrná tuhost lepeného spoje v hybridním nosníku
$L$	Délka nosníku
$L_{LT}$	Vzdálenost mezi body příčného držení
$L_{a\Phi}$	Vzdálenost mezi body, v nichž je průřezu efektivně bráněno v deplanaci
$M_b$	Maximální ohybový moment hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability
$M_{cr}$	Pružný kritický moment
$M_{Ed}$	Návrhový ohybový moment
$M_k$	Charakteristická hodnota ohybového momentu
$M_{Rd}$	Moment únosnosti
$n$	Pracovní součinitel
$t$	Šířka průřezu
$t_f$	Tloušťka ocelové pásnice

$t_k$	Tloušťka lepeného spoje v hybridním nosníku
$u$	Podélná deformace (posun) lepeného spoje
$v$	Příčný posun
$W_y$	Průřezový modul
$y_h$	Svislá vzdálenost působíště síly od těžiště
$y_0$	Svislá vzdálenost spojitého držení od neutrální osy
$z_a$	Svislá vzdálenost těžiště ocelové pásnice od těžiště celého průřezu hybridního nosníku
$\gamma$	Úhel zkosení lepené vrstvy
$\bar{\lambda}_{LT}$	Poměrná štíhlost při ztrátě příčné a torzní stability
$\nu$	Poissonovo číslo
$\sigma_{cr}$	Kritické napětí při ztrátě příčné a torzní stability
$\sigma_{r1a}$	Normálové napětí na vnějším líci ocelové pásnice hybridního nosníku
$\sigma_{r1i}$	Normálové napětí na vnitřním líci ocelové pásnice hybridního nosníku
$\sigma_{r2}$	Normálové napětí na okraji skleněné stojiny hybridního nosníku
$\sigma_{s1}$	Normálové napětí v těžišti ocelové pásnice
$\phi$	Natočení kolem podélné osy nosníku
$\chi_{LT}$	Součinitel příčné a torzní stability

## Úvod

V současné architektuře roste význam skla, neboť je důraz kladen na transparentnost a lehkost konstrukcí. Sklo se proto nepoužívá pouze na výplně okenních otvorů, ale stále častěji se používá pro nosné prvky. Ty přenáší zatížení nejen vlastní tíhou, ale i např. zatížení sněhem a větrem či užité zatížení. Sklo je materiál s vysokou pevností v tlaku a dostatečnou pevností v tahu za ohybu. Chová se pružně až do porušení křehkým lomem, ke kterému dochází náhle bez předchozího varování. Tuto skutečnost je nezbytné zohlednit při montáži, provozu i při samotném navrhování, zejména detailů.

V současnosti se vyvíjí různé hybridní konstrukční prvky, ve kterých se kombinuje sklo s jiným materiálem tak, aby bylo dosaženo vyšší únosnosti, tuhosti i zbytkové únosnosti při současném zachování vysoké transparentnosti. Klíčovou roli v těchto prvcích hraje spoj křehkého skla a výztužného prvku, neboť je zapotřebí zajistit nejen spolupůsobení spojovaných materiálů, ale umožnit například i jejich různou teplotní roztažnost. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější ukazují lepené spoje.

Hybridní nosník se skládá obvykle ze skleněné stojiny, ke které jsou připojeny pásnice z jiného materiálu. Také může být skleněná stojina pouze vyztužena na tažené straně, případně na tažené i tlačené straně.

Štíhlé skleněné nebo hybridní nosníky mohou být využity jako nosné konstrukční prvky střešních či podlahových konstrukcí nebo jako výztužná žebra skleněných fasád. Pokud jsou pak tato žebra zatížena například sáním větru, kdy jejich tlačená část není držena, je třeba při návrhu zohlednit i možnou ztrátu příčné a torzní stability.

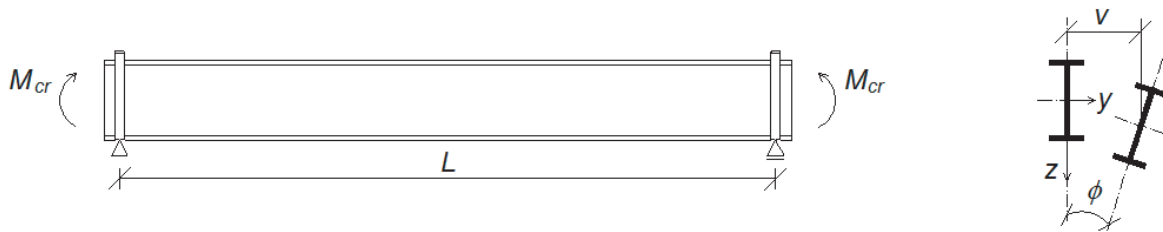
Pro navrhování skleněných konstrukcí prozatím chybí normy, a proto je jejich použití v praxi založeno na experimentech, což je finančně i časově náročné, a na praktických zkušenostech projektanta.

Předložená disertační práce shrnuje současný stav poznání v oblasti ztráty příčné a torzní stability skleněných a hybridních sklo-ocelových nosníků. První část je věnována ztrátě příčné a torzní stability skleněných nosníků. Další část se zabývá hybridními nosníky, které kombinují sklo s jiným materiálem (dřevem, ocelí či betonem). Poslední část je souhrnem autorčina výzkumu zabývajícího se ztrátou příčné a torzní stability skleněných a hybridních sklo-ocelových nosníků, který probíhal na Fakultě stavební ČVUT v Praze v letech 2011 – 2018.

# 1 Ztráta příčné a torzní stability skleněných nosníků

## 1.1 Ztráta příčné a torzní stability

Pokud je ideální nosník zatížen ohybovým momentem kolem své hlavní osy  $y$ , dojde při dosažení kritického ohybového momentu  $M_{cr}$  k bifurkaci (rozdvojení rovnováhy). Příčný nosník se stává nestabilním a při nepatrném impulsu v příčném směru dojde k jeho vychýlení – příčnému posunu ( $v$ ) a natočení kolem osy nosníku ( $\phi$ ), viz obr. 1, tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.



Obr. 1: Nosník namáhaný koncovými momenty

Tento stabilitní problém lze popsat dvěma diferenciálními rovnicemi 4. řádu, jejichž řešením získáme hodnotu kritického ohybového momentu. Diferenciální rovnice stability tenkostěnného prutu otevřeného průřezu namáhaného současně ohybem a osovou silou odvodil Vasilij Zacharovič Vlasov, [1], [2], [3].

## 1.2 Výpočet pružného kritického momentu

Pružný kritický moment pro prostě podepřený nosník dvouose symetrického průřezu namáhaného koncovými momenty je možné odvodit následujícím způsobem. Pokud je na obou koncích nosníku zabráněno příčnému posunu ( $v$ ) a natočení nosníku ( $\phi$ ) kolem jeho podélné osy a na obou koncích nosníku je kloub, tedy deplanace čela je volná a čelo není zatížené bimomentem (tedy na obou koncích nosníku není moment kolem hlavní osy a konce nosníku jsou volné k natočení), okrajové podmínky jsou pak následující:

$$v(0) = v(L) = \phi(0) = \phi(L) = 0, \quad (1.1)$$

$$v''(0) = v''(L) = \phi''(0) = \phi''(L) = 0. \quad (1.2)$$

Příčnou a torzní stabilitu lze popsat dvěma diferenciálními rovnicemi, jejichž řešením získáme hodnotu kritického ohybového momentu, [1], [2], [3].

$$EI_z v'' + M_{cr} \phi = 0, \quad (1.3)$$

$$EI_w \phi''' - GI_t \phi' + M_{cr} v' = 0, \quad (1.4)$$

kde  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $G$  modul pružnosti ve smyku,  $I_z$  moment setrvačnosti k ose  $z$ ,  $I_w$  výsečový moment setrvačnosti,  $I_t$  moment tuhosti v prostém kroucení,  $M_{cr}$  kritický ohybový moment.

Řešením rovnice (1.3) je vztah

$$v'' = -\frac{M_{cr}}{EI_z} \phi, \quad (1.5)$$

jehož dosazením do rovnice (1.4) lze odvodit vztah

$$EI_w \phi^{iv} - GI_t \phi'' - \frac{M_{cr}^2}{EI_z} \phi = 0. \quad (1.6)$$

Řešením rovnice (1.6) je následující vztah pro kritický ohybový moment

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L^2} \right)}. \quad (1.7)$$

### 1.3 Normy a dokumenty zabývající se ztrátou příčné a torzní stability skleněných nosníků

Přestože se v poslední době sklo používá stále častěji i na nosné konstrukce, neexistuje evropská norma pro návrh skleněných konstrukcí se zohledněním ztráty příčné a torzní stability. Stabilita skleněných nosníků je řešena pouze v australské normě AS 1288-2006, v italském dokumentu CNR-DT 210/2013 a v dokumentu Guidance for European Structural Design of Glass Components, [4], [5], [6].

#### 1.3.1 Australská norma AS 1288-2006

Stabilitě skleněných nosníků, které jsou používány například jako ztužující prvky fasád, je věnována příloha C v australské normě AS 1288-2006 Glass in buildings – Selection and installation. Návrhový moment pro určitou návrhovou situaci nesmí být větší než hodnota kritického momentu  $M_{cr}$  pro ideální nosník, která je podělena součinitelem bezpečnosti, jehož hodnota je 1,7, [4],

$$M_{Ed} \leq \frac{M_{cr}}{1,7}. \quad (1.8)$$

Následující doporučení jsou použitelná pouze pro nosníky s dvouose symetrickým průřezem, které jsou podepřeny na obou koncích, [4].

### 1.3.1.1 Nosníky držené v mezilehlých bodech

Pružný kritický moment mezi dvěma podporami, které drží nosníky proti ztrátě příčné a torzní stability, je

$$M_{cr} = \left( \frac{g_1}{L_{LT}} \right) \sqrt{EI_y G I_t}, \quad (1.9)$$

kde  $M_{cr}$  je pružný kritický moment,

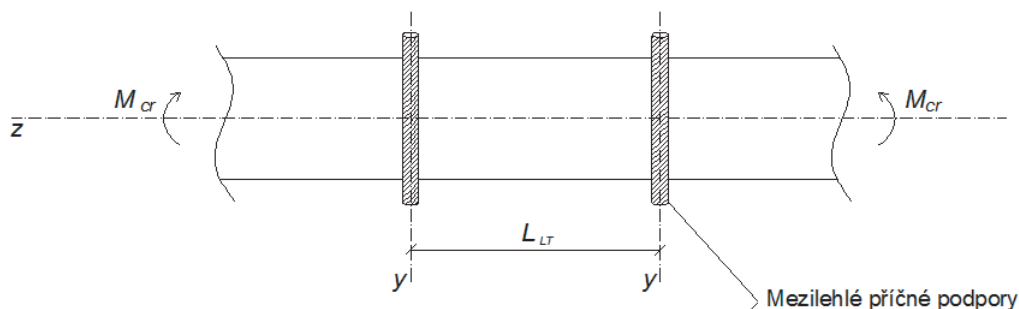
$g_1$  je konstanta, která závisí na průběhu ohybového momentu a na tom, zdali je umožněno natočení nosníku kolem svislé osy  $y$ , viz tab. 1 a obr. 2,

$L_{LT}$  je vzdálenost mezi body příčného držení, viz obr. 2,

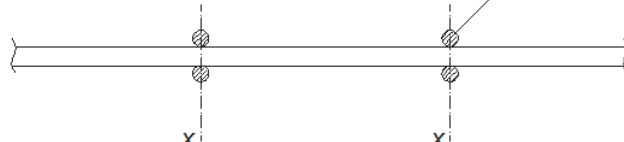
$EI_y$  je ohybová tuhost nosníku okolo měkké osy,

$G I_t$  je torzní tuhost nosníku.

BOČNÍ POHLED




POHLED SHORA



Obr. 2: Schéma mezilehlých příčných podpor

Tab. 1: Koeficient  $g_1$

Parametr $\beta$ 	$g_1$	
	Umožněno natočení okolo svislé osy $y$	Bráněno natočení okolo svislé osy $y$
1,0	3,1	6,3
0,5	4,1	8,2
0,0	5,5	11,1
-0,5	7,3	14,0
-1,0	8,0	14,0

Pro obdélníkový průřez je moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = \frac{t^3 h}{3} \left( 1 - 0,63 \frac{t}{h} \right), \quad (1.10)$$

kde  $t$  je šířka průřezu,  
 $h$  je výška průřezu.

Modul pružnosti ve smyku  $G$  by pro skleněná žebra měl být uvažován hodnotou 28,7 GPa, Youngův modul pružnosti  $E$  hodnotou 70,0 GPa, [4].

### 1.3.1.2 Nosníky bez mezilehlých příčných podpor

Pružný kritický moment nosníku bez mezilehlých příčných podpor je

$$M_{cr} = \left( \frac{g_2}{L_{LT}} \right) \sqrt{EI_y G I_t} \left[ 1 - g_3 \left( \frac{y_h}{L_{LT}} \right) \sqrt{\frac{EI_y}{G I_t}} \right], \quad (1.11)$$

kde  $M_{cr}$  je pružný kritický moment,

$g_2, g_3$  jsou konstanty, které závisí na průběhu ohybového momentu a na okrajových podmínkách, viz tab. 2,

$L_{LT}$  je vzdálenost mezi body příčného držení, tedy rozpětí nosníku,

$EI_y$  je ohybová tuhost nosníku okolo měkké osy,

$G I_t$  je torzní tuhost nosníku,

$y_h$  je svislá vzdálenost působíště síly od těžiště, [4].

### 1.3.1.3 Nosníky spojitě držené

Pružný kritický moment pro nosníky spojitě držené proti ztrátě stability ve vzdálenosti  $y_0$  od neutrální osy s dvouose symetrickým průřezem je

$$M_{cr} = \frac{\left( \frac{\pi}{L_{a\Phi}} \right)^2 EI_y \left( \frac{h^2}{12} + y_0^2 \right) + G I_t}{2y_0 + y_h}, \quad (1.12)$$

kde  $M_{cr}$  je pružný kritický moment,

$L_{a\Phi}$  je vzdálenost mezi body, v nichž je průřezu efektivně bráněno v deplanaci,

$EI_y$  je ohybová tuhost nosníku okolo měkké osy,

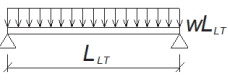

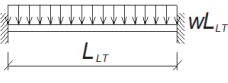

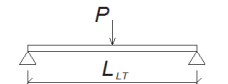

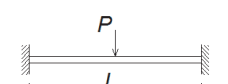

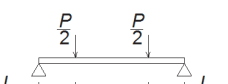



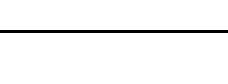
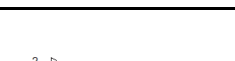
$h$  je výška nosníku,

$G I_t$  je torzní tuhost nosníku,

$y_0$  je svislá vzdálenost spojitěho držení od neutrální osy,

$y_h$  je svislá vzdálenost působiště síly od těžiště (může být i záporná hodnota), [4].

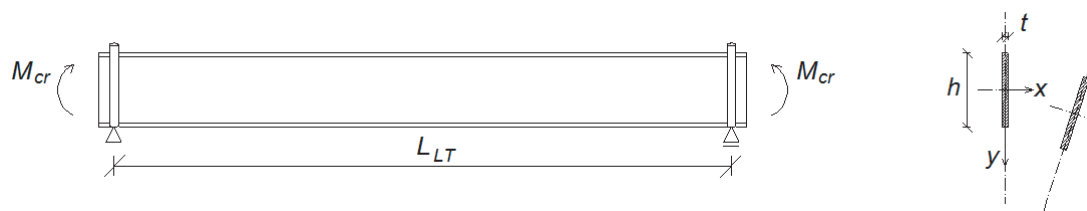
Tab. 2: Koeficienty  $g_2, g_3$

Zatížení	Ohybový moment	Natočení okolo svislé osy $y$	$g_2$	$g_3$
		Umožněno Bráněno	3,6 6,1	1,4 1,8
		Umožněno Bráněno	4,1 5,4	4,9 5,2
		Umožněno Bráněno	4,2 6,7	1,7 2,6
		Umožněno Bráněno	5,3 6,5	4,5 5,3
		Umožněno Bráněno	3,3 -	1,3 -
		Bráněno	4,0	2,0
		Bráněno	6,4	2,0

### 1.3.2 Italský dokument CNR-DT 210/2013

Stabilitě skleněných nosníků je věnována kapitola 6.4.3 v italském dokumentu CNR-DT 210/2013, [5]. Níže uvedené vztahy jsou platné pro nosník obdélníkového průřezu s okrajovými podmínkami naznačenými v obr. 3.





Obr. 3: Nosník namáhaný koncovými momenty

Pro jednovrstvé sklo musí návrhový ohybový moment splňovat podle tohoto dokumentu následující podmínku:

$$M_{Ed} \leq \chi_{LT} \frac{th^2}{6} f_{g,d}, \quad (1.13)$$

kde  $\chi_{LT}$  je součinitel příčné a torzní stability,  $h$  je výška průřezu,  $t$  je šířka průřezu a  $f_{g,d}$  je návrhová hodnota pevnost skla v tahu za ohybu, definovaná v dokumentu CNR-DT 210/2013, [5].

Součinitel příčné a torzní stability je možné spočítat podle rovnice (1.14).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \quad (1.14)$$

kde

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + 0,26(\bar{\lambda}_{LT} - 0,20) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right], \quad (1.15)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{h^2 t f_{g,k,st}}{6M_{cr}}}. \quad (1.16)$$

Kritický moment se určí ze vztahu

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi}{L_{LT}} \sqrt{E I_y G I_t}, \quad (1.17)$$

$f_{g,k,st}$  je pevnost skla definovaná v dokumentu CNR-DT 210/2013 [5],  $C_1$  je konstanta závislá na průběhu ohybového momentu, viz tab. 3,  $I_y$  moment setrvačnosti k ose  $y$ ,  $I_t$  moment tuhosti v prostém kroucení definovaný vztahem (1.18), [5].

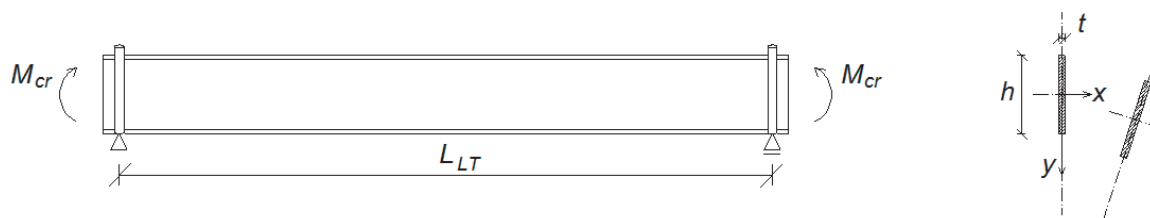
$$I_t = \frac{ht^3}{3} \quad (1.18)$$

Tab. 3: Koeficient  $C_1$ , [5]

Průběh ohybového momentu	$C_1$
Konstantní	1,00
Bi-lineární	2,70
Parabolický	1,13
Trojúhelníkový	1,36

### 1.3.3 Dokument Guidance for European Structural Design of Glass Components

Stabilitou skleněných nosníků dle obr. 4 se zabývá kapitola 7.3 v dokumentu Guidance for European Structural Design of Glass Components, [6].



Obr. 4: Nosník namáhaný koncovými momenty

Návrhový ohybový moment musí podle tohoto dokumentu pro jednovrstvé sklo splňovat následující podmínku:

$$M_{Ed} \leq \chi(\bar{\lambda}_{LT}) \cdot \frac{th^2}{6} f_{g,d}, \quad (1.19)$$

kde  $\chi(\bar{\lambda}_{LT})$  je součinitel příčné a torzní stability,  $h$  je výška průřezu,  $t$  je šířka průřezu a  $f_{g,d}$  je návrhová hodnota pevnost skla v tahu za ohybu.

Pružný kritický moment pro zatížení koncovými momenty se stanoví rovnicí

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_{LT}} \sqrt{EI_y GI_t}, \quad (1.20)$$

kde  $L_{LT}$  je vzdálenost mezi body příčného držení,  $EI_y$  je ohybová tuhost nosníku okolo měkké osy,  $GI_t$  je torzní tuhost nosníku.

## 1.4 Stabilita skleněných nosníků

Ztráta stability nosných prvků ze skla je výrazně ovlivněna výrobními tolerancemi tloušťky skleněných tabulí, počáteční deformací, poškozením povrchu skla, délkou trvání zatížení, pevností skla v tahu za ohybu a chováním PVB fólie u vrstvených skel, [7].

### 1.4.1 Výrobní tolerance tloušťky skleněných tabulí

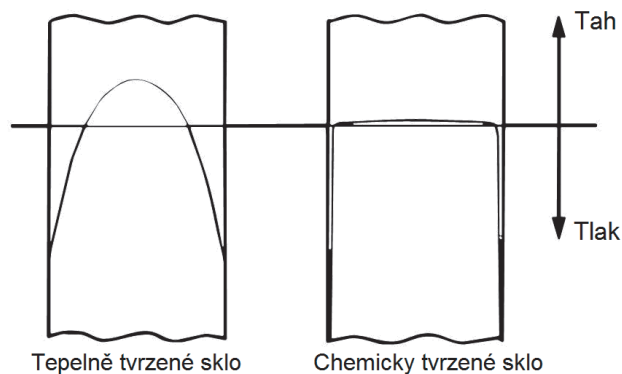
Měření zkušebních vzorků při experimentech prokázalo, že tloušťka plaveného skla  $t$  je obvykle menší než jmenovitá tloušťka udávaná výrobcem. Z tohoto důvodu je moment setrvačnosti průřezu ve skutečnosti menší než vypočtený, a únosnost nosníku je tak nižší, [7].

### 1.4.2 Počáteční deformace

Počáteční deformace je odlišná pro jednotlivé druhy skel. Plavená skla mají velmi malou počáteční deformaci. Uvádí se, že její velikost je nižší než  $L/2500$ , kde  $L$  je největší rozměr skleněné tabule. Na druhé straně tepelně upravovaná skla, mezi něž patří tepelně tvrzená a tepelně zpevněná skla, mají počáteční deformaci o velikosti až  $L/300$ . To je způsobeno výrobou tepelně upravovaných skel, kdy se tabule plaveného skla zahřeje na teplotu přibližně  $650^{\circ}\text{C}$  a následně je prudce zchlazena. Při procesu chlazení jsou tabule skla umístěny na válcích, které způsobí počáteční deformaci ve tvaru sinusoidy, [7].

### 1.4.3 Poškození skleněného povrchu a chování PVB fólie

Pokud je sklo poškozeno například poškrábáním, jeho pevnost je snížena. Redukce pevnosti je nejvíce patrná u plaveného a chemicky tvrzeného skla. Při procesu chemického tvrzení se jednotlivé tabule skla namáčejí do elektrolytické lázně, kde dochází k iontové výměně, čímž se vyvolají tlaková napětí v povrchové vrstvě skla. Aby se pak povrchové mikrotrhliny mohly dále šířit, je nutné, aby vnější působící síla nejprve překonala toto tlakové napětí. U chemicky tvrzených skel, oproti tepelně tvrzeným sklům, je ale zmíněná tlačaná povrchová zóna velmi tenká, čímž je náchylná na poškození, viz obr. 5.



Obr. 5: Průběh napětí po tloušťce tepelně tvrzeného a chemicky tvrzeného skla

U vrstvených skel je dále problém s chováním polyvinylbutyralové (PVB) fólie, která je nejčastěji používána ke spojení jednotlivých tabulí skla. Její vlastnosti jsou totiž závislé na teplotě a na délce trvání zatížení.

## 1.5 Provedené experimenty a jejich výsledky

Výzkumem příčné a torzní stability skleněných nosníků se zabývalo značné množství autorů, [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Někteří z nich se věnovali ztrátě příčné a torzní stability nosníků z jednovrstvého skla, někteří z vrstveného skla. V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky provedených experimentů.

### 1.5.1 Institute of Technology Lausanne, Švýcarsko

V univerzitě v Lausanne byly provedeny experimenty zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability skleněných nosníků. Prostě podepřené nosníky, tvořené buď jednovrstvým nebo vrstveným sklem, byly zatěžovány osamělým břemenem uprostřed rozpětí. Celkem bylo provedeno 79 experimentů s tepelně tvrzeným nebo tepelně zpevněným sklem.

Ke ztrátě příčné a torzní stability dojde, pokud maximální napětí v nosníku dosáhne mezní pevnosti materiálu na tažené straně. Z tohoto důvodu je pro skleněné konstrukce snaha zavést navrhování pomocí křivek klopení závislých na pevnosti v tahu, která je pro tyto konstrukce rozhodující.

Prvně se stanoví poměrná štíhlost  $\bar{\lambda}_{LT}$  vztahem

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{f_R}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{2f_R I_y}{M_{cr} h}}, \quad (1.21)$$

kde  $f_R$  je pevnost skla v tahu,  $\sigma_{cr}$  je kritické napětí při ztrátě příčné a torzní stability,  $I_y$  je moment setrvačnosti průřezu,  $M_{cr}$  je kritický moment při ztrátě příčné a torzní stability a  $h$  je výška průřezu.

Kritický moment při ztrátě příčné a torzní stability je pro jednovrstvé sklo roven

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L_{LT}^2} \left[ \sqrt{C_2 z_a + \frac{G I_t L_{LT}^2}{\pi^2 E I_z}} + C_2 z_a \right], \quad (1.22)$$

kde  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $I_z$  je moment setrvačnosti průřezu kolem osy  $z$ ,  $G$  je modul pružnosti ve smyku,  $I_t$  je moment tuhosti v prostém kroucení,  $L_{LT}$  je rozpětí (vzdálenost mezi příčnými podporami), součinitelé  $C_1$  a  $z_a$  zohledňují různé okrajové podmínky, různý průběh ohybových momentů a vzdálenost mezi těžištěm a působištem síly. Nutné je však zdůraznit, že uvedený vztah pro kritický moment platí pro ideální nosník, tedy nezohledňuje imperfekce, které často způsobí, že únosnost nosníku je vyčerpána ještě před dosažením vypočtené hodnoty.

Pro vrstvené sklo je možné použít vztah (1.22) pro výpočet kritického momentu  $M_{cr}$ , pouze je nutné nahradit ohybovou tuhost  $EI_z$  a tuhost v kroucení  $GI_t$  ekvivalentními tuhostmi  $EI_{z,eff}$  a  $GI_{t,eff}$ , které zohledňují vliv mezivrstvy (např. PVB fólie) na ztrátu příčné a torzní stability nosníku.

Pro dvouvrstvé sklo byly odvozeny následující vztahy:

$$EI_{z,eff} = EI_s \left( \frac{\alpha\beta\pi^2 + \alpha + 1}{1 + \beta\pi^2} \right), \quad (1.23)$$

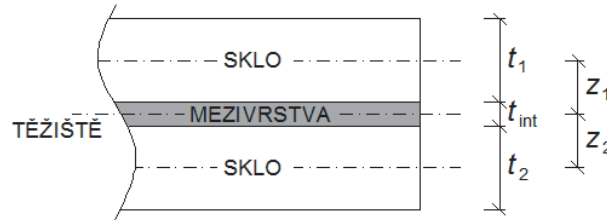
kde

$$I_s = h(t_1 z_1^2 + t_2 z_2^2), \quad (1.24)$$

$$\alpha = \frac{I_1 + I_2}{I_s}, \quad (1.25)$$

$$\beta = \frac{t_{int}}{G_{int} h (z_1 + z_2)^2} \frac{EI_s}{L_{LT}^2}, \quad (1.26)$$

kde  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_{int}$ ,  $z_1$  a  $z_2$  je zobrazeno na obr. 6,  $h$  je výška průřezu,  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $I_i$  moment setrvačnosti průřezu odpovídající skleněné tabule,  $G_{int}$  modul pružnosti ve smyku mezivrstvy (např. PVB fólie) a  $L_{LT}$  je vzdálenost příčných podpor.



Obr. 6: Vrstvené sklo

$$GI_{t,eff} = GI_{t,glass 1} + GI_{t,glass 2} + GI_{t,int}, \quad (1.27)$$

kde

$$GI_{t,int} = GI_{s,int} \left( 1 - \frac{2}{\lambda h} \tanh \frac{\lambda h}{2} \right), \quad (1.28)$$

$$I_{s,int} = 4 \left( \frac{t_1 + t_2}{2} + t_{int} \right)^2 \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} h, \quad (1.29)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_{int}}{G} \frac{t_1 + t_2}{t_{int} t_1 t_2}}, \quad (1.30)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku skla,  $I_{t, glass}$  je moment tuhosti v prostém kroucení dané tabule skla a  $I_{t, int}$  je moment tuhosti v kroucení mezivrstvy.

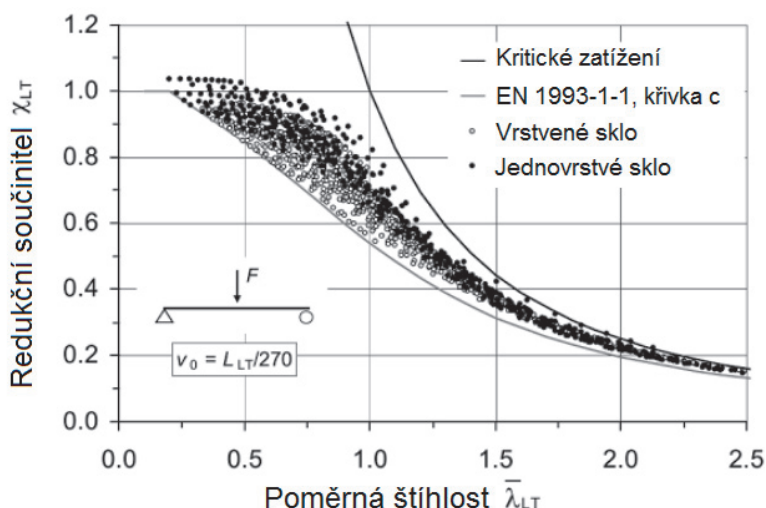
Redukční součinitel  $\chi_{LT}$  je pak funkcí poměrné štíhlosti

$$\chi_{LT} = f(\bar{\lambda}_{LT}). \quad (1.31)$$

Únosnost skleněného nosníku při ohybu se ztrátou příčné a torzní stability je

$$M_{Rd} = \chi_{LT} f_R W_y = \chi_{LT} f_R \frac{2I_y}{h}. \quad (1.32)$$

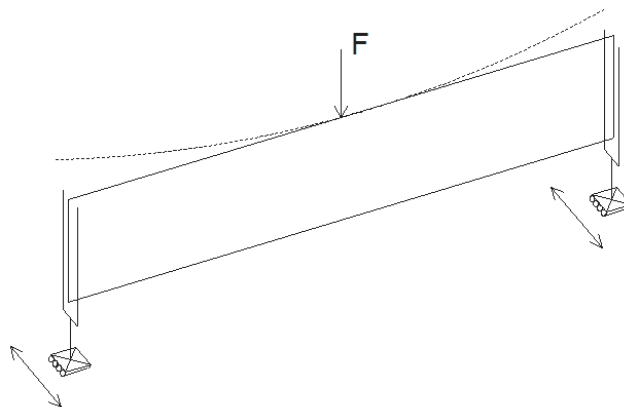
Pro různé způsoby zatížení, geometrie skleněných nosníků, smykové moduly mezivrstev u vrstvených skel, počáteční deformace a tahové pevnosti skla by tak v budoucnu mohly být vytvořeny křivky vzpěrné pevnosti a z nich by se stanovil redukční součinitel  $\chi_{LT}$ . Pro konzervativní návrh skleněného nosníku je dnes možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“ z normy EN 1993-1-1, viz obr. 7, [7], [11].



Obr. 7: Závislost redukčního součinitele na poměrné štíhlosti pro prostě podepřený nosník s počáteční příčnou deformací  $v_0 = L_{LT}/270$ , zatížený osamělým břemenem uprostřed rozpětí, [11]

### 1.5.2 Německo RWTH Aachen – Institute of Steel Construction

V Německu se zabývali ztrátou příčné a torzní stability nosníku z vrstveného skla. Během experimentů je nutné zajistit, aby síla, kterou je nosník zatěžován, působila stále ve stejném bodě, který se během experimentů vychyluje nejen svisle, ale i vodorovně. Z tohoto důvodu byly zvoleny podpory, které umožňovaly na koncích nosníku vodorovný posun a natočení kolem svislé osy a kolem osy nosníku, zatímco bod vnášení zatížení byl pevný, viz obr. 8. Měřena byla svislá deformace bodu vnášení zatížení, vodorovná deformace podpor, natočení středu rozpětí a napětí uprostřed rozpětí nosníku, [12].



Obr. 8: Schéma uspořádání experimentů, [12]

Během experimentů bylo prokázáno, že rychlost zatěžování má velký vliv na únosnost nosníku z vrstveného skla. Čím větší byla rychlost zatěžování, tím větší byla únosnost nosníků. Důvodem bylo chování PVB fólie, jejíž vlastnosti se v případě pomalejšího zatěžování výrazně mění, [12].

### 1.5.3 Univerzita Gent, Belgie

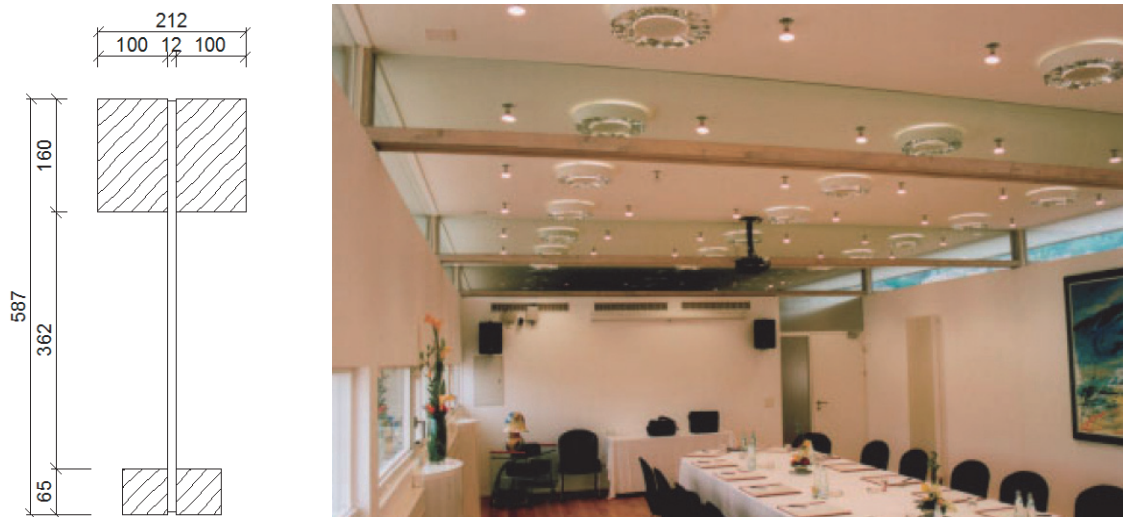
Na univerzitě v Gentu byly provedeny experimenty zaměřené na ztrátu stability vrstvených skel. Celkem bylo vytvořeno 55 zkušebních vzorků o celkové délce  $L = 3000$  mm, které byly tvořeny dvěma tabulemi skla s mezivrstvou. Příčné podpory na okrajích nosníků zabraňovaly natočení kolem osy nosníku. Natočení kolem svíslé osy bráněno nebylo. Nosníky byly zatěžovány uprostřed rozpětí osamělou silou. Vzorky je možné rozdělit do 12 sad, které se lišily materiálem mezivrstvy (polyvinyl butyral (PVB), SentryGlas), typem skel (plavené, tepelně zpevněné a tepelně tvrzené) a geometrií vzorků (tloušťkou, výškou). Experimenty prokázaly, že je nutné při analytickém výpočtu zohledňovat skutečnou tloušťku skleněných tabulí, která je vždy menší než výrobcem udávaná jmenovitá tloušťka, [13].

## 2 Hybridní nosníky

Hybridní nosníky vznikají kombinací různých materiálů tak, aby byly co nejlépe využity jejich vlastnosti. Hybridní nosník se obvykle skládá ze skleněné stojiny, ke které jsou přidány pásnice z jiného materiálu, nebo je stojina vyztužena pouze na tažené straně, eventuálně na tažené i tlačené straně. Sklo tak může být použito například v kombinaci se dřevem, ocelí či vyztuženým betonem. Skleněné prvky si tak zachovávají transparentnost a spolupůsobení s dalšími materiály zajišťuje zvýšení tuhosti, únosnosti i robustnosti konstrukčních prvků. Experimentálním výzkumem únosnosti hybridních nosníků se zabývala řada evropských pracovišť, jak je uvedeno dále. Provedené experimenty byly většinou zaměřeny na stanovení únosnosti a zbytkové únosnosti hybridních nosníků. Ztráta příčné a torzní stability nebyla dosud uceleně řešena.

### 2.1 Nosníky ze skla a dřeva

Nosníky tvořené dřevěnými pásnicemi a skleněnou stojinou byly poprvé použity ve švýcarském hotelu Palaffite u jezera Neuchâte, viz obr. 9. Nosníky o rozpětí 6 m byly tvořeny stojinou z jednovrstvého plaveného skla o tloušťce 12 mm, k níž byly přilepeny dřevěné trámky. Ty rovnoměrně roznášejí zatížení a vyztužují taženou oblast hybridního nosníku. Před realizací těchto nosníků byly provedeny experimenty v měřítku 1:1, [14], [15], [16].



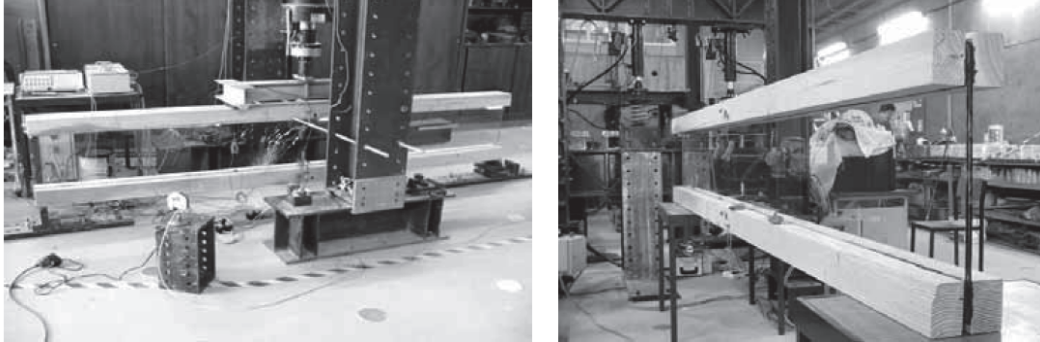
Obr. 9: Hybridní nosníky ze skla a dřeva, hotel Palaffite, Švýcarsko, [15]

Provedené experimenty prokázaly vliv druhu skla nejen na únosnost (první porušení skla), ale i na zbytkovou únosnost, tj. schopnost hybridního nosníku přenášet zatížení po vzniku první praskliny ve skleněné stojině až do kolapsu. S ohledem na bezpečný návrh těchto konstrukčních prvků je nejvhodnější použití plaveného či tepelně zpevněného skla,



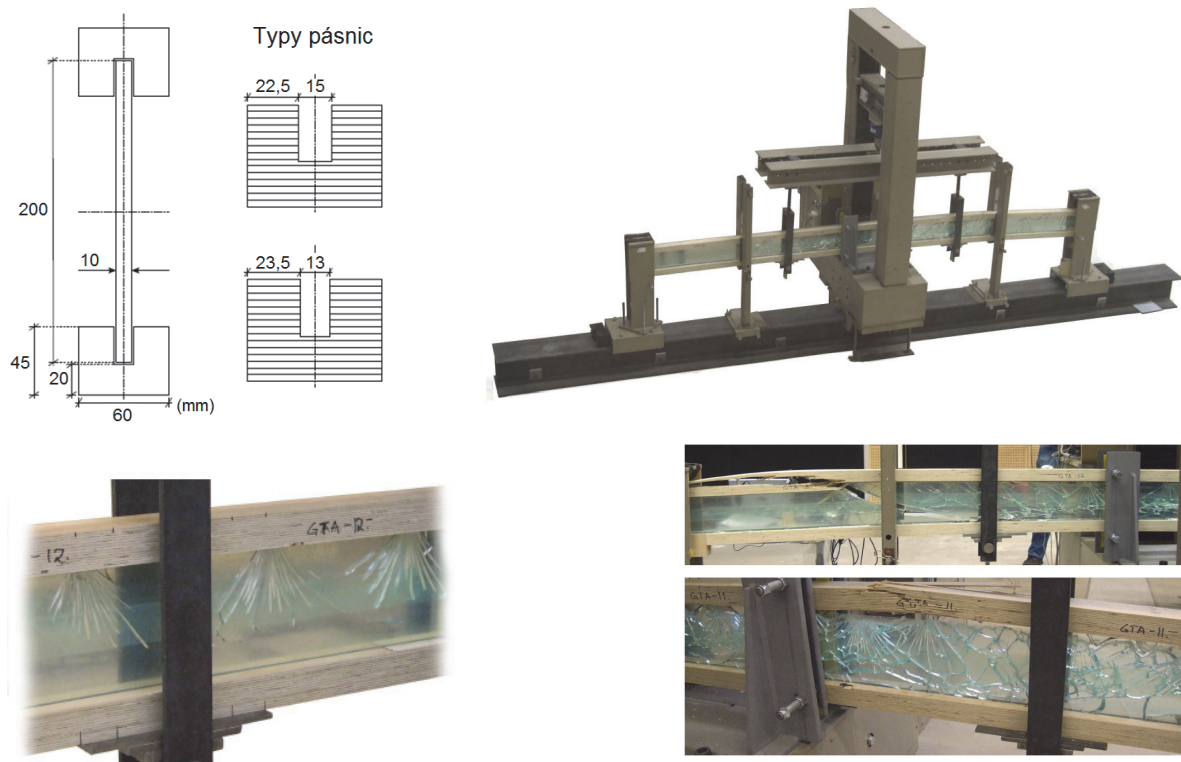
kteřá sice vykazují nižší pevnost ve srovnání s tepelně tvrzeným sklem, ale mají vysokou zbytkovou únosnost.

Experimenty s nosníky ze skla a dřeva byly dále provedeny na univerzitě Minho v Portugalsku. Zkoušeno bylo celkem 20 nosníků se stojinou z vrstveného skla s přilepenými dřevěnými trámky, které tvořily horní a spodní pásnici, [17], viz obr. 10.



Obr. 10: Experimenty na univerzitě Minho v Portugalsku, [17]

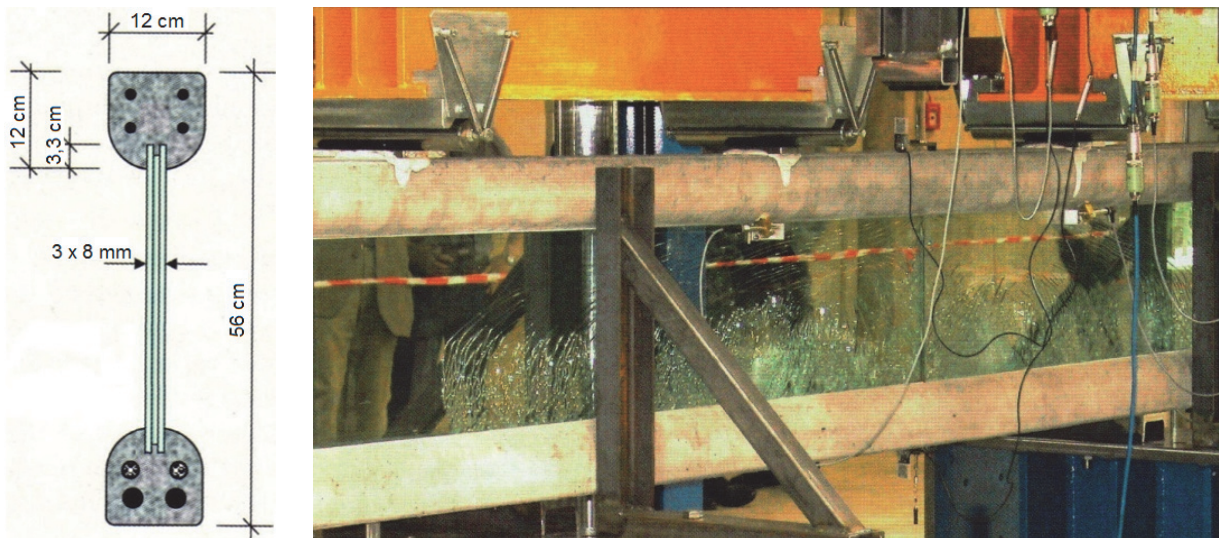
Hybridní nosníky ze skla a dřeva byly zkoušeny rovněž na univerzitě Linnæus ve Švédsku. Nosníky byly tvořeny jednovrstvou 10 mm silnou skleněnou stojinou, která byla vlepena do drážky dřevěné pásnice. Spoj byl proveden buď akrylátovým nebo silikonovým lepidlem. Prostě podepřené nosníky byly zkoušeny ve čtyřbodovém ohybu. Geometrie nosníku s fotografiemi ze zkoušek je zobrazena na obr. 11, [18].



Obr. 11: Nosníky zkoušené na univerzitě Linnæus ve Švédsku, vlevo nahoře – geometrie spoje, vpravo nahoře – schéma uspořádání experimentů, vlevo dole – typické počáteční porušení tabule skla, vpravo dole – úplné porušení, [18]

## 2.2 Nosníky ze skla a betonu

Experimenty s nosníky tvořenými skleněnou stojinou s betonovými pásnicemi byly provedeny na univerzitě v Grazu v Rakousku. Nosníky byly složeny ze stojiny z třívrstvého tepelně tvrzeného skla a dvou vyztužených betonových pásnic z vysokopevnostního betonu s pevností v tlaku 190 MPa. Kvalita smykového spoje zásadním způsobem ovlivňuje únosnost nosníku. Nejeftivnějšího přenosu smykových sil mezi stojinou a pásnicí je možné docílit při použití spoje po celé délce hrany skleněné tabule, neboť pak je dosaženo rovnoměrného rozdělení napětí. Z tohoto důvodu byl vytvořen přímý kontakt skla a betonu. Pro lepší smykové spojení byly skleněné hrany před betonáží zdrsňeny a dále byla prostřední tabule trojvrstvého skla zapuštěna, což je patrné na obr. 12. Z experimentů vyplynulo, že použitím betonových pásnic v kombinaci se skleněnou stojinou je možné vytvořit konstrukční prvek, který bude nejen robustní a bezpečný, ale také dostatečně transparentní, [19].



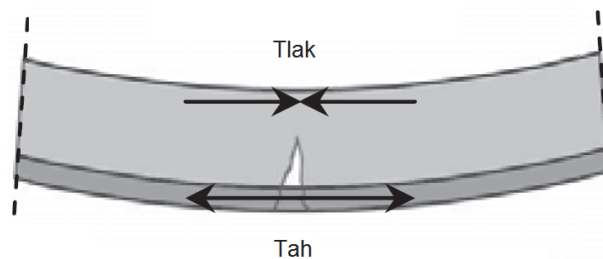
Obr. 12: Sklo-betonový hybridní nosník, vlevo – příčný řez, vpravo - nosník po dosažení pevnosti skla v tahu, [19]

## 2.3 Nosníky ze skla a oceli

Největší pozornost byla věnována výzkumu hybridních nosníků kombinujících sklo s ocelí.

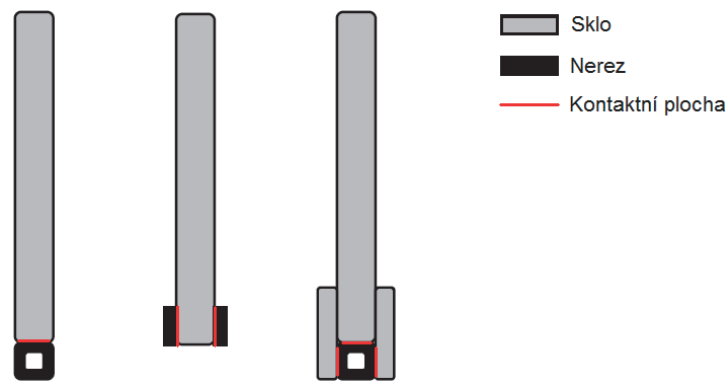
### 2.3.1 Vyztužené skleněné nosníky

Na univerzitě v Delftu probíhal výzkum nosníků tvořených plaveným sklem s vyztužením v tažené oblasti pomocí ocelového profilu. Výhodou těchto nosníků je, že po dosažení tahové pevnosti skla a jeho porušení přebírá vyztužný prvek tahové síly, viz obr. 13.




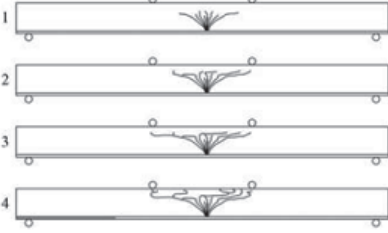
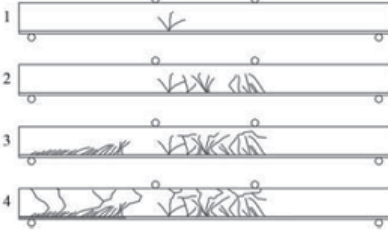

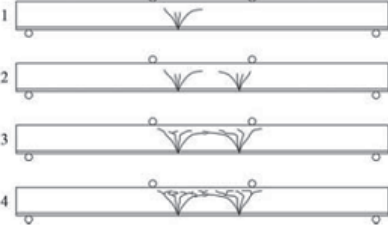
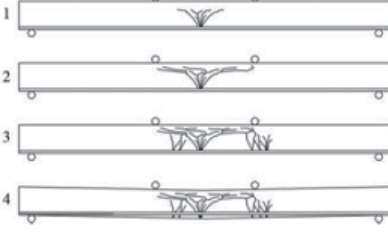

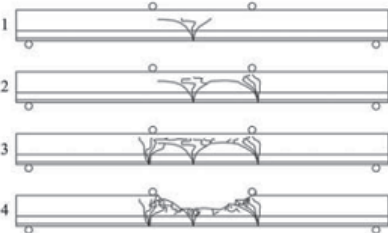
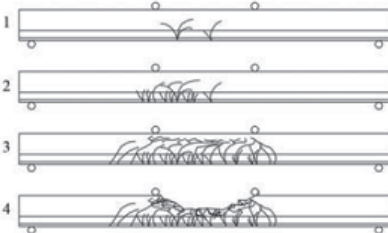
Obr. 13: Schéma sil po porušení skla, [20]

Vyrobeny byly tři druhy průřezů (viz obr. 14) s použitím dvou různých lepidel – akrylátového nebo dvousložkového epoxidu.



Obr. 14: Druhy průřezů vyztužených skleněných nosníků, [20]

Nosníky byly zkoušeny ve čtyřbodovém ohybu. Vyhodnocení experimentů bylo rozděleno do čtyř kroků – od vzniku první trhliny, až do vyčerpání únosnosti, viz obr. 15. Z experimentů vyplynulo, že druh použitého lepidla výrazně ovlivňuje charakter porušení. Nosníky s akrylátovým lepidlem měly spíše menší množství široce rozevřených horizontálně orientovaných trhlin, které oddělovaly taženou a tlačnou zónu. To pak vedlo ke kolapsu nosníku vlivem ztráty stability. Naproti tomu nosníky s epoxidovým lepidlem byly porušeny velkým množstvím menších nepravidelných trhlin, což se jeví jako výhodnější, [20], viz obr. 15.

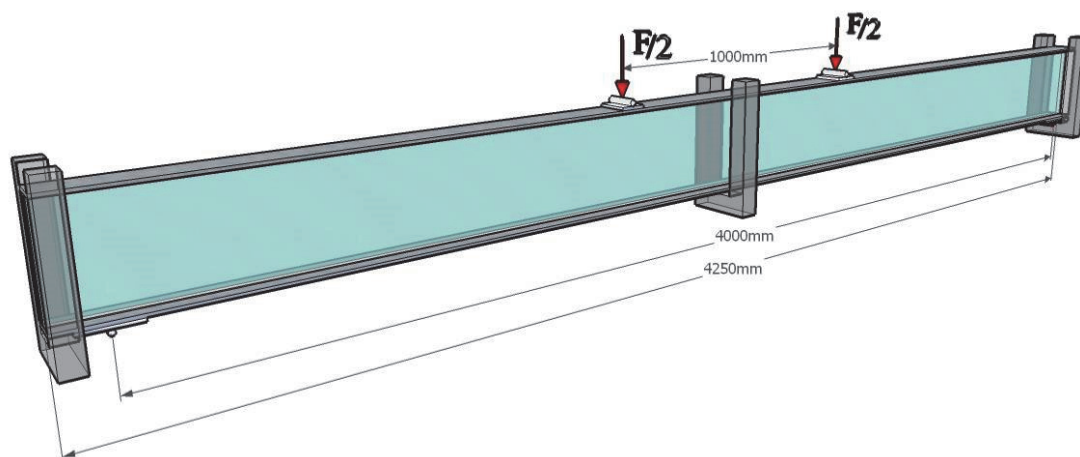
	AKRYLÁTOVÉ LEPIDLO	EPOXIDOVÉ LEPIDLO
	 <p>Porušení lepidla, odtržení výztuže</p>	 <p>Porušení lepidla, odtržení výztuže</p>
	 <p>Ztráta stability</p>	 <p>Odtržení výztuže</p>
	 <p>Ztráta stability</p>	 <p>Ztráta stability</p>

Obr. 15: Schéma šíření trhlin od vzniku první trhliny po dosažení únosnosti, [20]

Také na univerzitě v Dánsku probíhaly experimenty vyztužených skleněných nosníků. Ve čtyřbodovém ohybu byly zkoušeny nosníky o rozpětí 1700 mm a výšce 100 mm. Nosníky byly tvořeny čtyřvrstevným sklem o celkové tloušťce 40 mm, na jehož spodním okraji byly přilepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem 3mm nebo 6mm proužky oceli, [21].

### 2.3.2 Skleněné nosníky s ocelovými pásnicemi

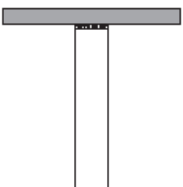
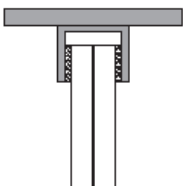
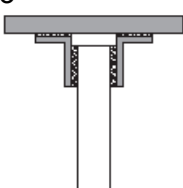
Hybridní nosníky průřezu I o délce 4250 mm byly zkoušeny ve čtyřbodovém ohybu v laboratořích stavební fakulty ČVUT v Praze. Nosníky měly skleněnou stojinu výšky 290 mm připojenou lepeným spojem k ocelovým pásnicím o rozměrech 100 × 10 mm. Nosníky byly prostě podepřeny (vzdálenost podpor byla 4 m), namáhány dvojicí osamělých sil vzdálených 1 m až do porušení. Na okrajích a uprostřed rozpětí byl nosník držen, aby nedošlo k příčnému posunu a natáčení průřezu okolo podélné osy nosníku. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 16, [22].



Obr. 16: Schéma uspořádání zkoušek hybridních nosníků

Odkoušeno bylo celkem 11 nosníků s různými lepidly a odlišnými typy přípoje, viz tab. 4.

Tab. 4: Zkoušené hybridní nosníky, [22]

Schéma a číslo přípoje	Použité sklo	Lepidlo	Počet nosníků
1 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně tvrzené</li> <li>• jednovrstvé</li> <li>• tl. 19 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5211</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	3
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• polyuretanové lepidlo Sikaflex-265 Booster 20W</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	2
2 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně tvrzené</li> <li>• vrstvené</li> <li>• tl. 2×12 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5211</li> <li>• tl. 2-4 mm</li> </ul>	3
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• polyuretanové lepidlo SikaForce-7550 L15</li> <li>• tl. 2-4 mm</li> </ul>	2
3 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně tvrzené</li> <li>• jednovrstvé</li> <li>• tl. 19 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• polyuretanové lepidlo Sikaflex-265 Booster 20W</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	1

V průběhu všech zkoušek byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí nosníku a pod silami, vzájemné posuny pásnice a stojiny na krajích nosníků a dále byly na nosníky osazeny tenzometry k nepřímému měření napětí. Výsledky experimentů jsou shrnuty v tab. 5.

Tab. 5: Souhrn výsledků experimentů hybridních nosníků

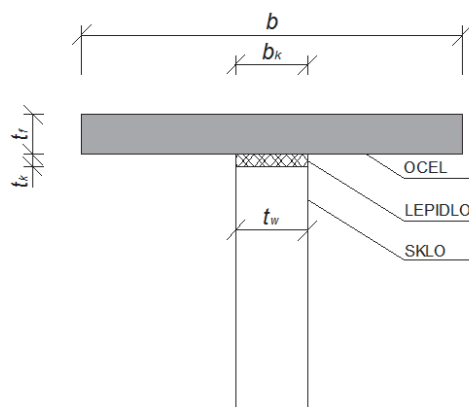
Číslo přípoje	Lepidlo	Označení nosníku	Max. síla $F$ [kN]	Max. napětí ve skle [MPa]
1	SikaFast-5211	N1	65,10	116,97
		N8	89,79	139,75
		N9	72,34	104,36
	Sikaflex-265	N3	57,33	115,58
		N4	64,04	130,22
2	SikaFast-5211	N1	127,80	127,33
		N5	114,45	92,21
		N7	139,21	110,82
	SikaForce-7550	N10	101,45	99,84
		N11	108,99	105,06
3	Sikaflex-265	N6	38,29	57,50

Výsledky experimentů prokázaly funkčnost lepeného spoje, který je klíčovým prvkem v hybridním nosníku. Akrylátové lepidlo SikaFast-5211 je vhodné k dosažení vysoké únosnosti a tuhosti nosníku. Na druhé straně lepidlo poddajnější – polyuretanové Sikaflex-265 je vhodnější pro přerozdělování špiček napětí či k vyrovnání rozdílného protažení skla a oceli při teplotním namáhání, [22].

Jak bylo prokázáno v [22], je možné pro návrh hybridních nosníků použít Möhlerovu metodu, kterou je však zapotřebí modifikovat, protože použitá lepidla neměla lineární elastické chování s konstantní tuhostí, což Möhlerova metoda předpokládá, [22], [23].

### 2.3.2.1 Möhlerova metoda

Základním předpokladem Möhlerovy metody je lineárně elastické chování lepidla. Pro přímý spoj, viz obr. 17, se poměrná tuhost spoje  $K_K$  (po délce spoje) určí podle rovnice (2.1), kde  $G_K$  je experimentálně zjištěný smykový modul pružnosti lepidla,  $b_k$  je šířka lepeného spoje a  $t_k$  je tloušťka lepeného spoje.



Obr. 17: Přímý spoj

$$K_K = G_K \frac{b_k}{t_k} \quad (2.1)$$

Součinitel efektivnosti  $\gamma$  a efektivní moment setrvačnosti  $I_{y,eff}$  dvouose symetrického průřezu se určí pomocí následujících rovnic:

$$\gamma = \frac{1}{1+k}, \quad (2.2)$$

$$I_{y,eff} = 2I_a + nI_G + 2\gamma A_a z_a^2, \quad (2.3)$$

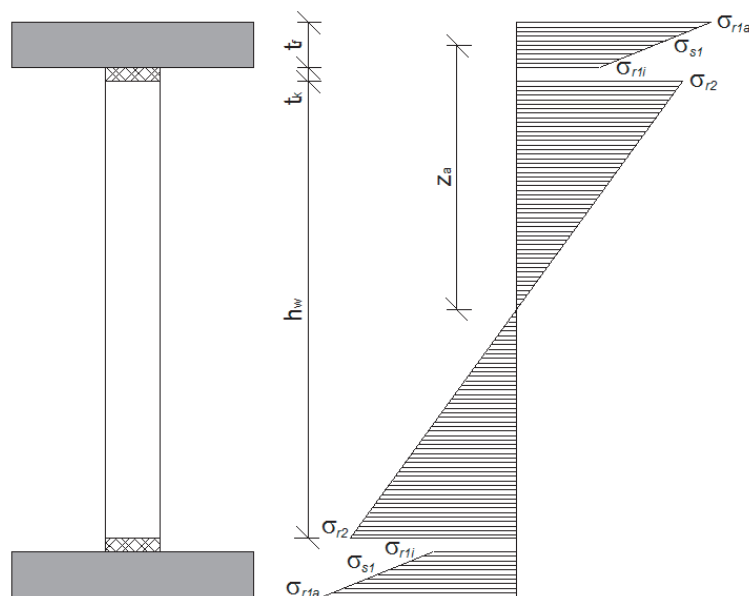
kde

$$k = \pi^2 \frac{E_a A_a}{L^2 K_K}, \quad (2.4)$$

$$n = \frac{E_G}{E_a}, \quad (2.5)$$

kde  $I_a$  je moment setrvačnosti ocelové pásnice,  $n$  je pracovní součinitel, který slouží k přepočtu modulů pružnosti na jeden materiál,  $I_G$  je moment setrvačnosti skleněné stojiny,  $A_a$  je plocha jedné ocelové pásnice,  $z_a$  je svislá vzdálenost těžiště ocelové pásnice od těžiště celého průřezu,  $E_a$  je Youngův modul pružnosti oceli,  $L$  je rozpětí nosníku a  $E_G$  je Youngův modul pružnosti skla.

Na obr. 18 je zobrazeno rozdělení normálového napětí po výšce průřezu s vyznačenými hodnotami, které lze vypočítat pomocí následujících vztahů.



Obr. 18: Rozdělení normálového napětí po průřezu hybridního nosníku

$$\sigma_{r1a} = \pm \frac{M_y}{I_{y,eff}} \left( \gamma z_a + \frac{t_f}{2} \right), \quad (2.6)$$

$$\sigma_{r1i} = \pm \frac{M_y}{I_{y,eff}} \left( \gamma z_a - \frac{t_f}{2} \right), \quad (2.7)$$

$$\sigma_{s1} = \pm \frac{M_y}{I_{y,eff}} \gamma z_a, \quad (2.8)$$

$$\sigma_{r2} = \pm \frac{M_y}{I_{y,eff}} \frac{h_w}{2} n, \quad (2.9)$$

kde  $M_y$  je maximální ohybový moment od vnějšího zatížení,  $t_f$  je tloušťka ocelové pásnice a  $h_w$  je výška skleněné stojiny.

### 2.3.2.2 Modifikovaná Möhlerova metoda

Pro lepidla, která nemají lineárně elastické chování, je nutné Möhlerovu metodu modifikovat, neboť smykový modul pružnosti lepidla není konstantou, ale mění se v závislosti na působícím zatížení.

Nejprve je nutné stanovit závislost smykového modulu na odpovídajícím ohybovém momentu. To je možné postupným dosazováním ohybových momentů od vnějšího zatížení a zjišťováním správné hodnoty smykového modulu lepidla tak, aby napětí ve skle odpovídalo napětí, které bylo pro daný ohybový moment změřeno při experimentu.

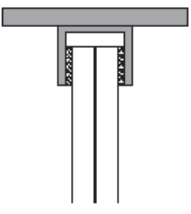
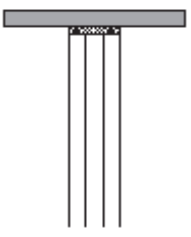
Jakmile je vytvořena závislost smykového modulu pružnosti daného lepidla na ohybovém momentu, je možné spočítat rozdělení normálových napětí po průřezu hybridního nosníku i při použití poddajného lepidla. Jako vstup již nebude použita konstantní hodnota smykového modulu pružnosti lepidla, ale smykový modul pružnosti lepidla se odečte z grafu pro daný ohybový moment. Pro výsledné hodnoty napětí to vede k iteračnímu postupu, [22].

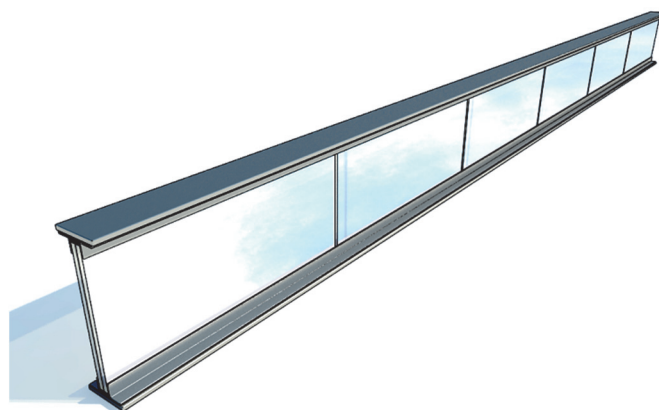
### 2.3.3 Skleněné nosníky s ocelovými pásnicemi a dělenou stojinou

V laboratoři stavební fakulty ČVUT v Praze byly dále provedeny experimenty s hybridními nosníky o délce 4250 mm ve čtyřbodovém ohybu s ocelovými pásnicemi (100 × 10 mm) a dělenou skleněnou stojinou výšky 290 mm. Celkem bylo odzkoušeno 9 nosníků s různými typy přípojí, s různým počtem skleněných panelů (tři nebo pět skleněných panelů) a dvěma druhy lepidel (akrylátové lepidlo SikaFast-5211 a polyuretanové lepidlo SikaForce-7550), [24], viz tab. 6.



Tab. 6: Zkoušené hybridní nosníky s dělenou stojinou

Schéma a číslo přípoje	Použité sklo	Lepidlo	Počet nosníků
1 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně zpevněné</li> <li>• vrstvené</li> <li>• tl. 2×12 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5211</li> <li>• tl. 2-4 mm</li> </ul>	3
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• polyuretanové lepidlo SikaForce-7550</li> <li>• tl. 2-4 mm</li> </ul>	1
2 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně zpevněné</li> <li>• vrstvené</li> <li>• tl. 3×8 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5211</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	3
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• polyuretanové lepidlo SikaForce-7550</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	2

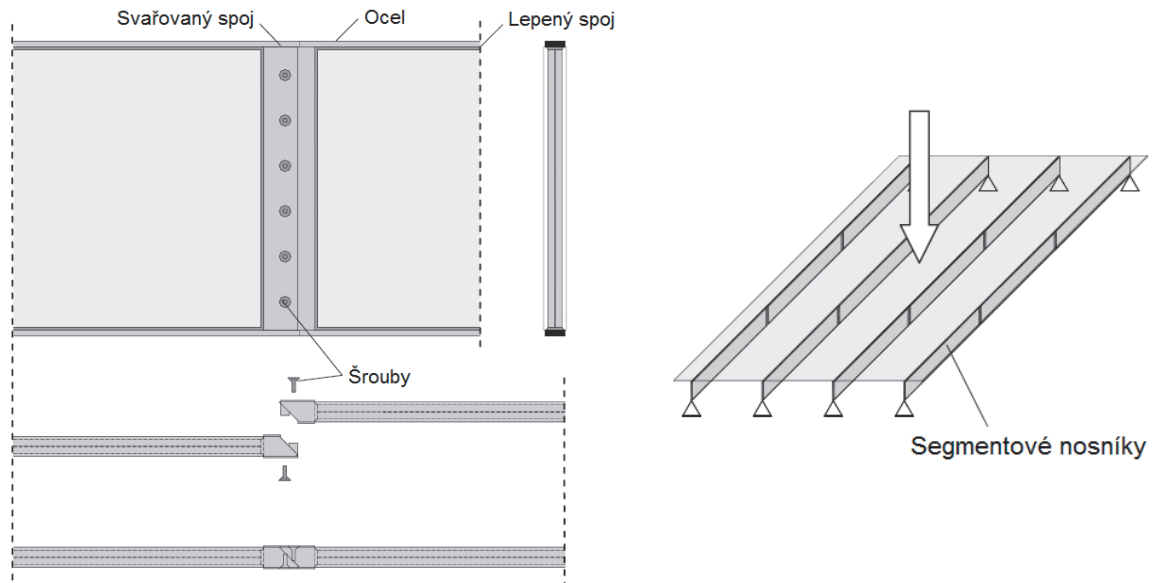


Obr. 19: Schéma hybridního nosníku s dělenou stojinou, [24]

Nosníky o rozpětí 4,05 m byly prostě podepřeny a namáhány dvojicí osamělých sil vzdálených 1950 mm. Na okrajích a uprostřed rozpětí byl nosník držen proti ztrátě příčné a torzní stability. V průběhu experimentů byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí nosníku a pod působícími silami, natočení jednotlivých panelů. Dále byly na nosníky osazeny tenzometry k nepřímému měření napětí, [24].

### 2.3.4 Skleněné nosníky v ocelovém rámu

V Absoluut Glastechnik v Nizozemsku byly vyrobeny skleněné nosníky v ocelovém rámu. Nosníky tvořila stojina z vrstveného tepelně tvrzeného skla, která byla vlepena do ocelového rámu. Výhodou těchto nosníků je možnost spojování jednotlivých segmentů pomocí šroubovaného přípoje a tím vytváření nosníků o větším rozpětí, viz obr. 20.



Obr. 20: Skleněné nosníky v ocelovém rámu, vlevo – detail spojení segmentů, [25]

Experimenty uvedených nosníků probíhaly na univerzitě v Ghentu v Belgii. Prostě podepřené nosníky držené proti ztrátě příčné a torzní stability byly zkoušeny ve tříbodovém ohybu. Jeden z experimentů byl zaměřen i na dlouhodobé účinky zatížení.

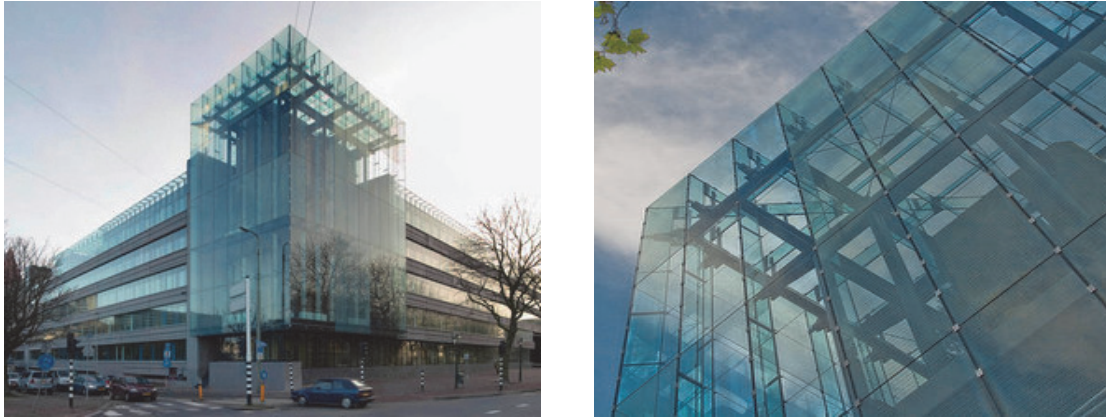
Přestože byly nosníky drženy proti ztrátě příčné a torzní stability, byly během zatěžování prvních nosníků pozorovány příčné posuny mezi jednotlivými podporami, viz obr. 21.



Obr. 21: Ztráta příčné a torzní stability, [25]

Ke ztrátě příčné a torzní stability docházelo proto, že nosníky byly velmi štíhlé a nedostatečně příčně držené. Z tohoto důvodu bylo v průběhu experimentů změněno schéma uspořádání, kdy bylo použito více podpor držících nosník proti ztrátě stability. Pro použití v praxi je tak nutné co nejvíce omezit tvarové imperfekce, které vznikají při výrobě, neboť ty ovlivňují značným způsobem chování nosníku pod zatížením.

Skleněné nosníky v ocelovém rámu byly použity jako střešní nosníky i jako ztužující konstrukce fasády při rekonstrukci budovy ministerstva financí v Haagu v Nizozemsku, viz obr. 22, [25], [26].

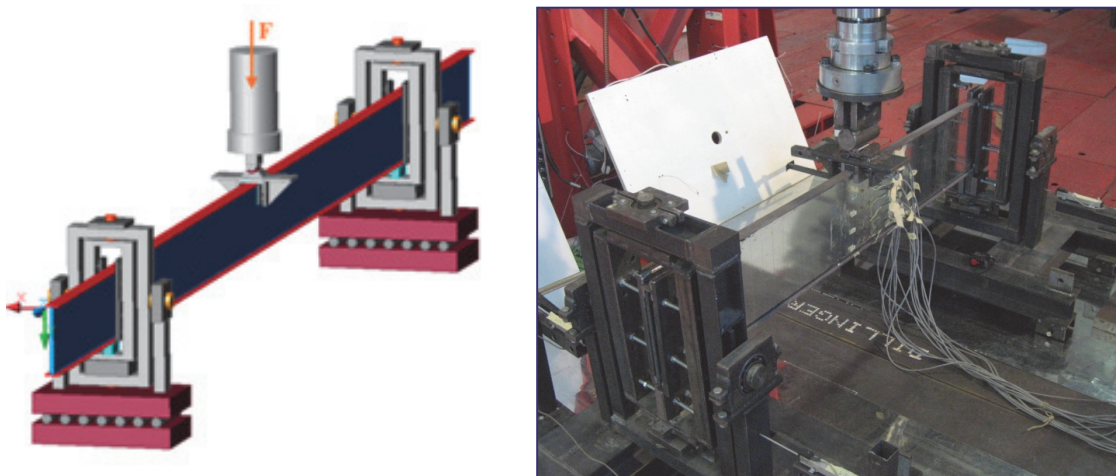


Obr. 22: Skleněné nosníky v ocelovém rámu, budova ministerstva financí, Haag, Nizozemsko, [26]

### 2.3.5 Výzkum příčné a torzní stability hybridních sklo-ocelových nosníků

V laboratoři RWTH Aachen proběhly pilotní experimenty zabývající se ztrátou stability hybridních sklo-ocelových nosníků. Celkem byly odzkoušeny 4 nosníky, které byly 1600 mm dlouhé, tvořené skleněnou stojinou z jednovrstvého tepelně zpevněného skla tloušťky 12 mm a výšky 250 mm. Pásnice o rozměrech  $30 \times 5$  mm z oceli pevnostní třídy S235 byly 3mm vrstvou lepidla připojeny ke skleněné stojině. U dvou nosníků bylo použito polyuretanové lepidlo SikaForce-7550, u dvou nosníků epoxidová pryskyřice DP 490, [27].

Schéma uspořádání experimentů je patrné na obr. 23. Na okrajích nosníků byly umístěny podpory umožňující vodorovný posun a natočení kolem svislé osy a kolem osy nosníku. Bod vnášení zatížení byl uprostřed rozpětí nosníku a byl pevný, viz obr. 23.



Obr. 23: Schéma uspořádání experimentů, [27]

U hybridních nosníků s epoxidovou pryskyřicí DP 490 došlo během experimentů ke ztrátě příčné a torzní stability. Experimenty s nosníky s polyuretanovým lepidlem SikaForce-7550 byly ukončeny adhezním porušením lepidla, kdy došlo k velkému natočení ocelových pásnic a nebylo možné pokračovat v zatěžování.

Vzhledem k malému množství zkoušených vzorků není možné z provedených experimentů vyvozovat závěry. Během zkoušek bylo ale zřejmé, že s pohyblivými podporami je obtížné dosáhnout prvního tvaru vybočení, protože podpory mají sklon se pohybovat na opačnou stranu, tedy vyvozovat druhý tvar vybočení, [27].

### 3 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce autorky je stanovení únosnosti hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability. Chování hybridního sklo-ocelového nosníku při ztrátě stability bude popsáno pomocí numerických modelů vytvořených v programu LTBeam, ANSYS a RFEM, ověřených podle výsledků provedených experimentů.

V následujících kapitolách jsou popsány kroky, které bylo nutné provést pro dosažení cíle disertační práce.

Nejprve byly vyhodnoceny experimenty skleněných nosníků zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability, které byly provedeny v roce 2007 v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT. Výsledky těchto experimentů byly použity k vyladění numerického modelu v programu ANSYS. Následně bylo ověřeno správné chování numerického modelu při měnící se počáteční imperfekci skleněného nosníku.

Poté bylo nutné zjistit charakteristiky dvousložkového akrylátového lepidla SikaFast-5211 NT (new technology), které bylo vybráno pro spoj mezi sklem a ocelí poté, co byla ukončena výroba lepidla SikaFast-5211, jehož vlastnosti byly zjišťovány v dřívějším výzkumu, který probíhal na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze. Provedeny byly materiálové zkoušky lepidla SikaFast-5211 NT a zkoušky lepeného spoje namáhaného smykem, při nichž byl zkoumán i vliv stárnutí lepidla. Všechny výsledky experimentů byly porovnávány s výsledky zkoušek lepidla SikaFast-5211.

V další etapě byly provedeny dvě zkoušky hybridního sklo-ocelového nosníku s lepidlem SikaFast-5215 NT pro stanovení únosnosti těchto nosníků.

Následně byly provedeny experimenty zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability hybridních sklo-ocelových nosníků tvořených skleněnou stojinou a ocelovými pásnicemi.

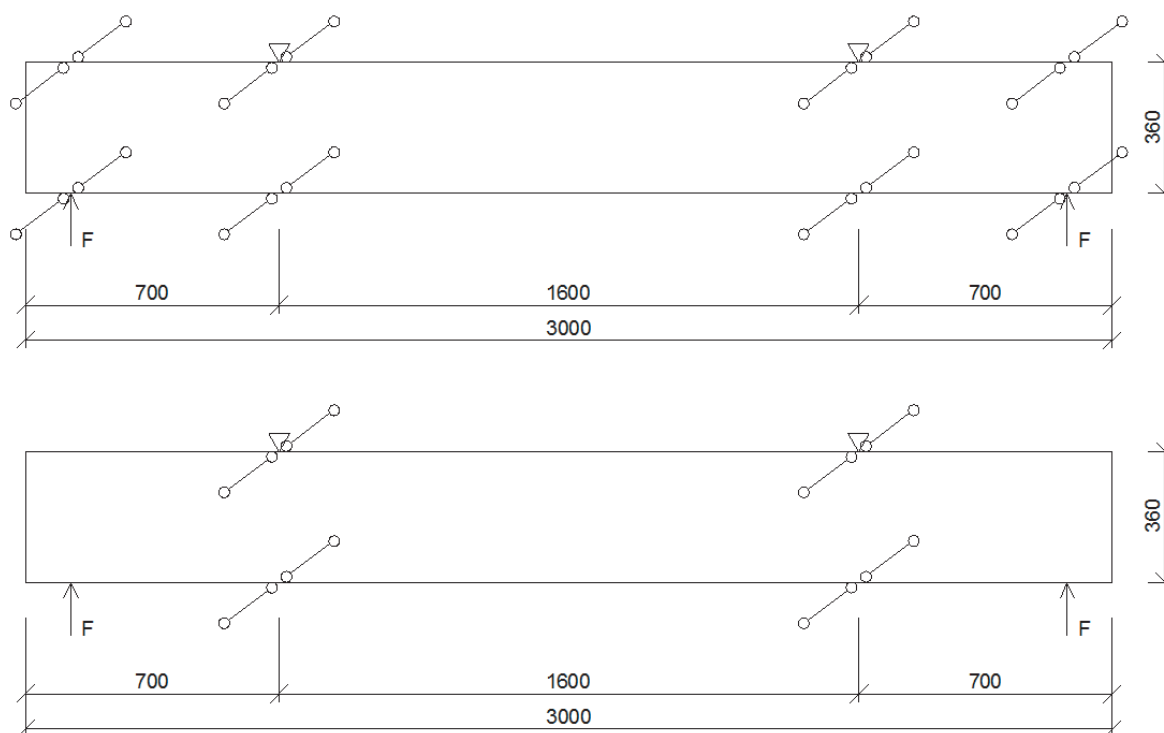
V poslední etapě byly vytvořeny numerické modely nosníků v programu ANSYS a RFEM, byl proveden výpočet kritického momentu hybridního nosníku, výpočet maximálního ohybového momentu hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability a provedena parametrická studie. Na základě parametrické studie byl ověřen analytický model pro určení únosnosti hybridního nosníku se započtením ztráty příčné a torzní stability.

## 4 Experimenty

### 4.1 Skleněné nosníky

V Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT byly v roce 2007 provedeny experimenty zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability skleněných nosníků namáhaných ohybem. Celkem bylo odzkoušeno 24 nosníků, z nichž polovina byla z jednovrstvého skla a druhá polovina ze skla vrstveného. V obou případech se jednalo o nosníky délky 3 m a výšky 360 mm vyrobené z plaveného skla. Tloušťky nosníků z jednovrstvého skla byly 8 mm (3 ks), 10 mm (6 ks) a 12 mm (3 ks), z vrstveného skla 2×8 mm (3 ks), 2×10 mm (6 ks), 2×12 mm (3 ks) s PVB fólií tloušťky 1,52 mm. Nosníky byly prostě podepřené s převislými konci, které byly zatěžovány osamělými břemeny, [28].

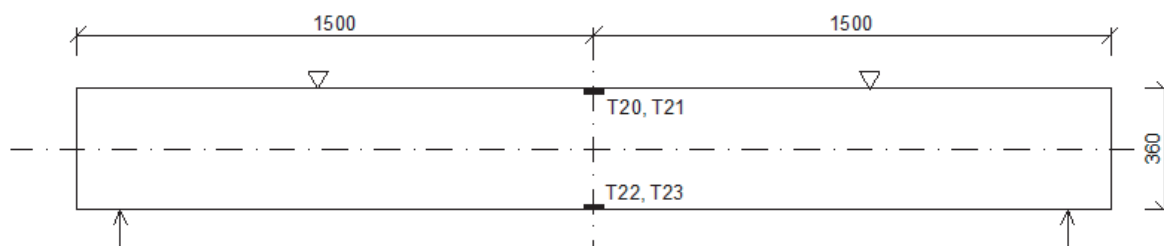
Zkoušené nosníky můžeme rozdělit na dvě sady, u nichž se lišilo schéma uspořádání experimentů. První sadě (označené varianta A) bylo bráněno vodorovnému posunu v místě působení břemen. Byl zde umožněn pouze svislý posun a pootočení kolem osy Z. Druhé sadě (označené varianta B) bylo v místě působení břemen umožněno i pootočení kolem podélné osy nosníku a vodorovný posun. Tím bylo docíleno větší vodorovné deformace nosníku uprostřed rozpětí. Schéma uspořádání pro obě sady je znázorněno na obr. 24.



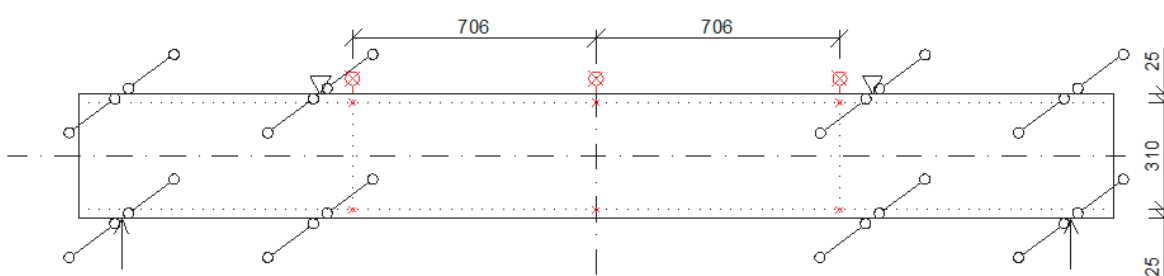
Obr. 24: Schéma uspořádání zkoušek, nahoře - varianta A, dole – varianta B

Experimenty byly řízeny silou, zatěžování probíhalo po stupních s časovým intervalem 60 s. Uprostřed rozpětí nosníků byly osazeny foliové tenzometry k nepřímému

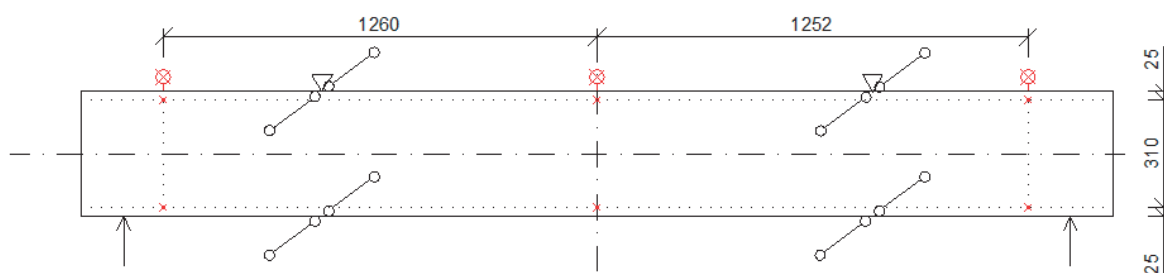
měření napětí. V průběhu experimentů byl dále měřen příčný posun a svislá deformace uprostřed rozpětí a u obou podpor. Přesné rozmístění tenzometrů a míst, v nichž byly měřeny příčné i svislé posuny, je zobrazeno na obr. 25, 26 a 27, [28].



Obr. 25: Schéma osazení tenzometrů



Obr. 26: Místa měření příčných a svislých posunů pro variantu A



Obr. 27: Místa měření příčných a svislých posunů pro variantu B

U všech vzorků bylo patrné vějířovité porušení v tažené oblasti průřezu (na spodní hraně) uprostřed rozpětí nosníku, viz obr. 28. Na rozdíl od jednovrstvého skla nedocházelo u skla vrstveného k roztříštění celé tabule skla, neboť střepy ulpávaly na PVB fólii. V tab. 7 jsou uvedeny hodnoty naměřené při experimentech pro nosníky z jednovrstvého skla tloušťky 8 a 10 mm. V grafu 1 je zobrazena závislost působící síly na příčné deformaci horní části průřezu uprostřed rozpětí nosníku pro nosníky z jednovrstvého skla tloušťky 8 mm, [28].

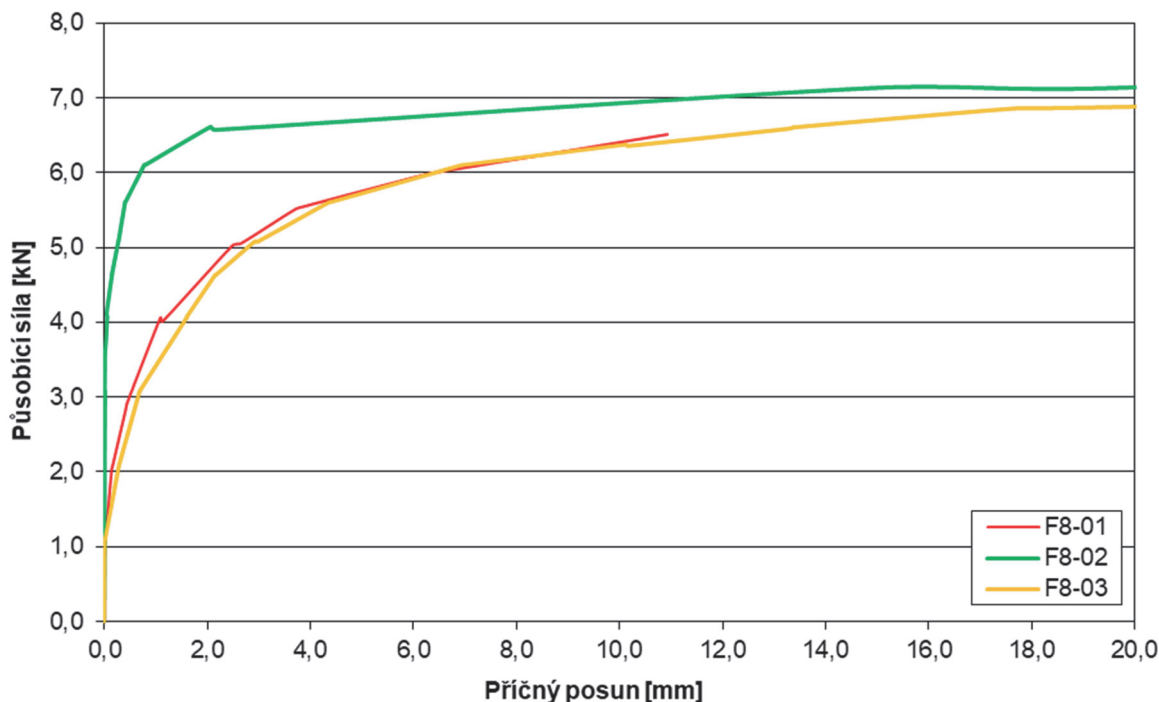


Obr. 28: Jednovrstvé sklo, nahoře a vlevo dole – uspořádání experimentů, vpravo dole – typické porušení vzorku, [28]

Tab. 7: Naměřené hodnoty pro nosníky z jednovrstvého skla tl. 8 a 10 mm

Označení vzorku	Varianta podepření	Max. příčný posun uprostřed rozpětí [mm]	Působící síla [kN]	Moment [kNm]	Max. tahové napětí [MPa]
F08-01	B	10,94	6,52	3,85	24,64
F08-02	B	39,89	7,66	4,52	55,51
F08-03	B	41,79	7,14	4,21	46,48
F10-01	A	1,42	16,85	9,94	40,11
F10-02	A	0,38	12,83	7,57	29,26
F10-03	A	0,29	10,93	6,45	23,94
F10-04	B	0,62	13,90	8,20	30,87
F10-05	B	6,33	11,41	6,73	31,43
F10-06	B	1,79	7,97	4,70	16,59





Graf 1: Závislost působící síly na příčné deformaci horní části průřezu uprostřed rozpětí nosníku tl. 8 mm

## 4.2 Tahové zkoušky lepidel

S cílem získat materiálové charakteristiky lepidla, které bylo použito v lepeném spoji mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou hybridních nosníků, byly provedeny tahové zkoušky podle normy ČSN EN ISO 527 Plasty, [29], [30].

### 4.2.1 Popis zkoušky dle normy ČSN EN ISO 527 Plasty

V normě ČSN EN ISO 527 Plasty – Stanovení tahových vlastností v části 1 jsou popsány základní principy, v části 2 zkušební podmínky pro tvářené plasty. Pro zkoušky se používají zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek, která jsou připravena tvářením (odlíváním do forem) nebo mechanickým opracováním desek lepidla na potřebné rozměry, [29], [30]. Zkušební tělesa musí být bez viditelných vad, vrypů či jiných nedostatků a nesmí být zkroucená. Požadavky musí být kontrolovány vizuálně pomocí mikrometru a rovné pravoúhlé desky s přímými okraji. Tělesa, jež nesplňují požadavky, jsou před zkouškou vyřazena. Požadované minimální množství zkušebních těles je pět pro každou hodnocenou vlastnost (modul pružnosti, mez pevnosti v tahu atd.).

Zkontrolované zkušební těleso je pak zatěžováno tahem ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí až do porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. Tělesa, která se přetrhnou v rozšířené části vzorku nebo která vyklouznou z čelistí, musí být vyřazena a nahrazena

novými. V průběhu zkoušky se měří zatížení, jež působí na těleso, a prodloužení měřené střední části  $L_0$ . Norma stanoví přesnou rychlost zatěžování (oddalování čelistí zkušebního stroje) pro daný materiál, kterou musí trhací stroj být schopen vyvinout.

Nezbytnou součástí sestavy je siloměrný snímač udávající celkovou tahovou sílu působící na těleso upnuté v čelistech, průtahoměr, jenž stanovuje relativní změny počáteční měřené délky zkušebního tělesa v průběhu celé zkoušky, a zařízení na měření šířky a tloušťky zkušebních těles. Ze zkoušek je získána závislost napětí na přetvoření a tím modul pružnosti. Dále lze touto zkouškou stanovit poměr mezi příčnou a podélnou deformací, tedy Poissonův součinitel, [29], [30], [31].

#### 4.2.2 Provedení experimentu

Tahové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 527, [29], [30], probíhaly v dubnu 2013 v laboratořích akreditovaného výzkumného pracoviště společnosti Swell, spol. s r.o. v Hořicích.

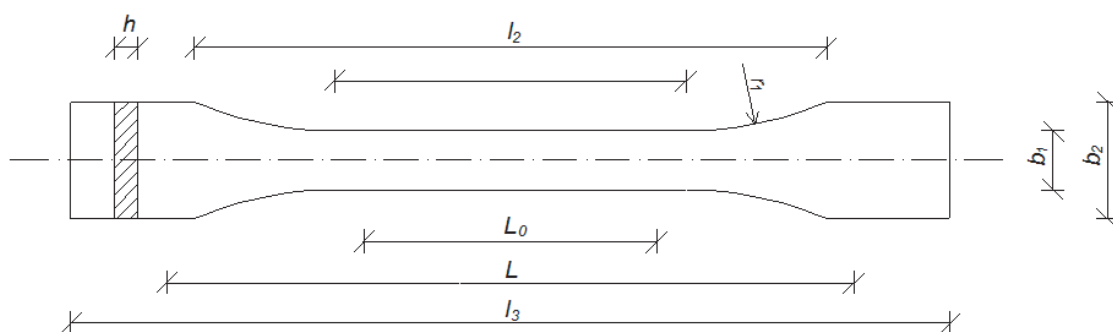
Připraveny byly dvě sady zkušebních těles o různých rozměrech (typ 1B a typ 5A), viz obr. 29. Zkušební tělesa byla vytvořena mechanickým obrobením polotovarů z dvousložkového akrylátového lepidla SikaFast-5211 NT (new technology). Uvedené lepidlo nahrazuje staré lepidlo SikaFast-5211, jehož vlastnosti byly zjišťovány v dřívějším výzkumu, který probíhal na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze, [22], [24].

Jednotlivé vzorky byly zatěžovány tahovou silou v rychlostech 1, 2 a 8 mm/min. Zaznamenávána byla působící síla a podélné protažení. Příčné zúžení nebylo možné z technických důvodů měřit, [31]. Uspořádání zkoušky je znázorněno na obr. 30.

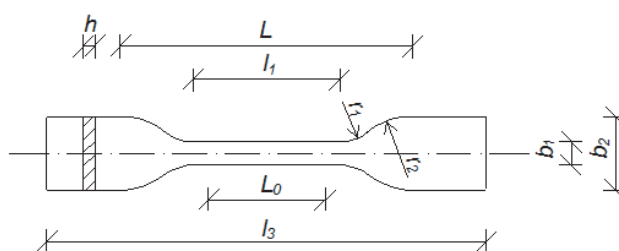
#### Použitá měřidla:

- univerzální zkušební stroj LaborTech 3.50 (kalibrace 16.10.2012) + software LabNET,
- tenzometrický siloměr HBM U3 500N (kalibrace 16.10.2012),
- extenzometr MFN (kalibrace 9.12.2011) – rozsah 0 až 800 mm.

Typ 1B



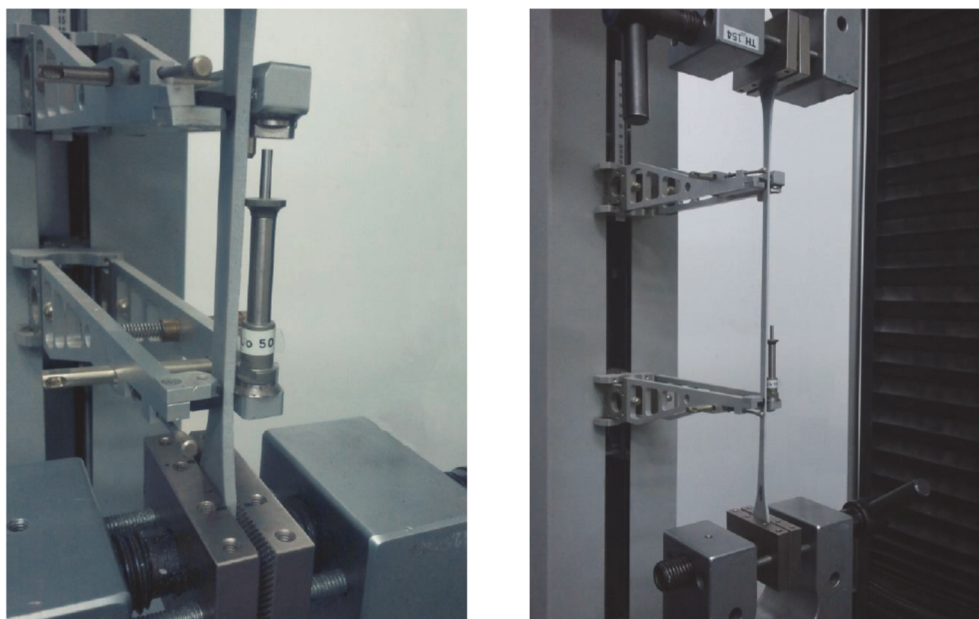
Typ 5A



Označení		Rozměry [mm]	
		Typ 1B	Typ 5A
$l_3$	Celková délka	$\geq 150$	$\geq 75$
$l_1$	Délka zúžení rovnoběžné části	$60 \pm 2$	$25 \pm 1$
$r_1$	Poloměr	$\geq 60$	$8,0 \pm 0,5$
$r_2$	Poloměr		$12,5 \pm 1$
$l_2$	Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi	106 až 120	
$b_2$	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	$12,5 \pm 1$
$b_1$	Šířka zúžené rovnoběžné části	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,1$
$h$	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	$\geq 2$
$L_0$	Počáteční měřená délka	$50,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$
$L$	Počáteční vzdálenost čelistí	$115 \pm 1$	$50 \pm 2$



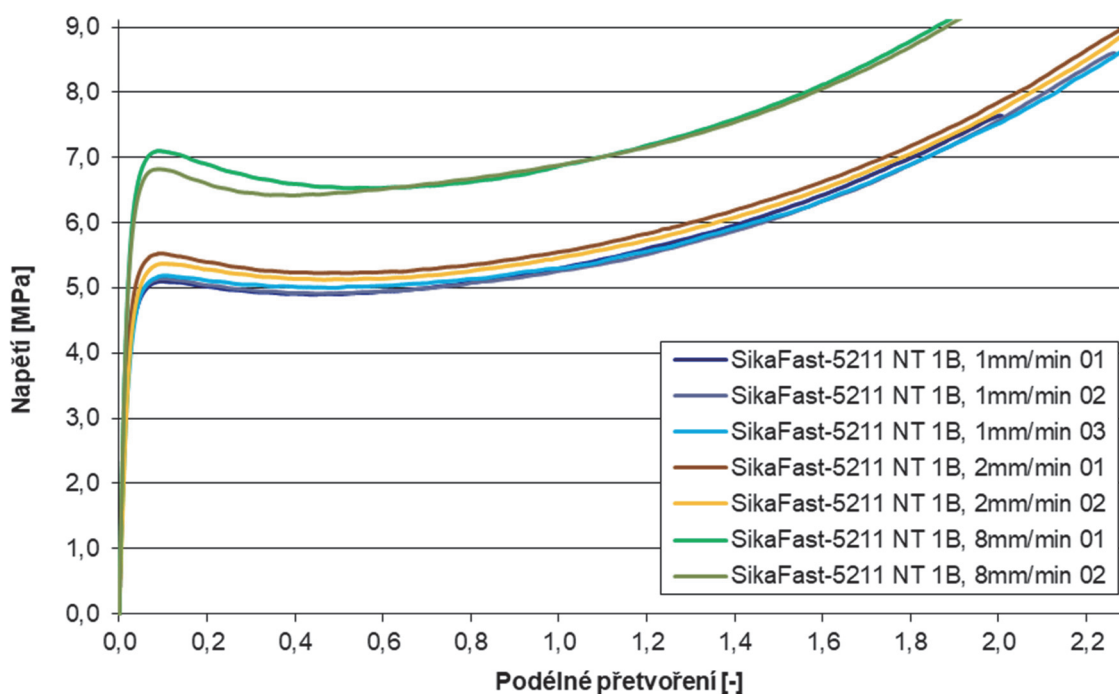
Obr. 29: Zkušební tělesa



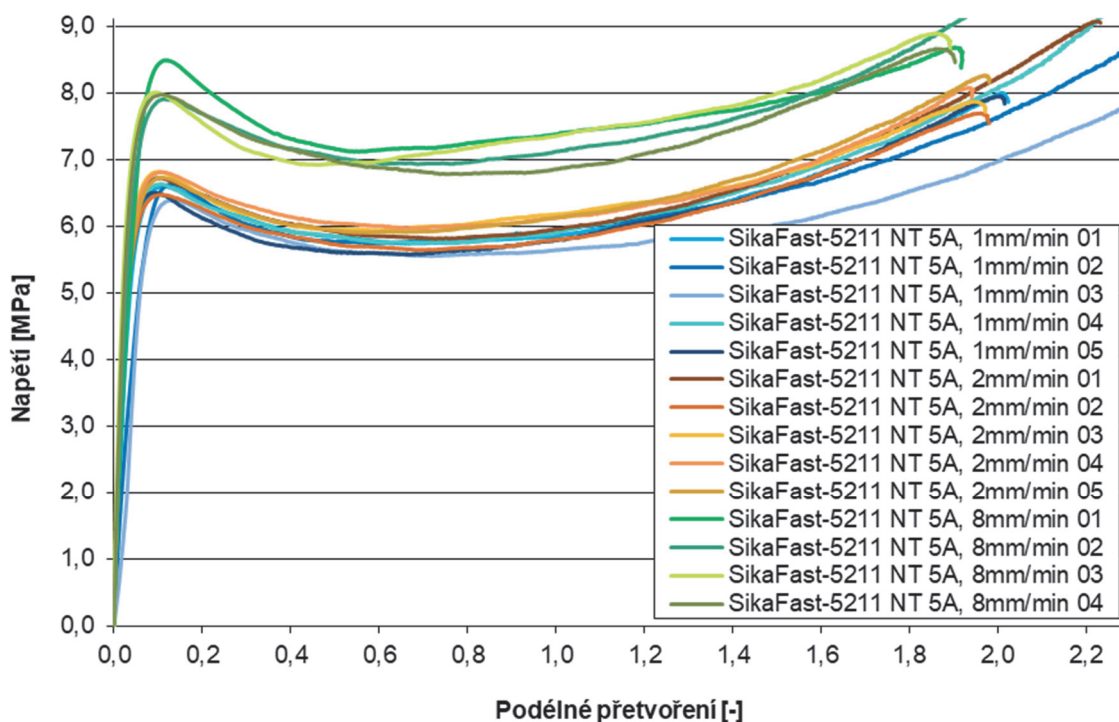
Obr. 30: Uspořádání zkoušky pro lepidlo SikaFast-5211 NT, [31]

### 4.2.3 Vyhodnocení zkoušek

Výsledky tahových zkoušek jsou zobrazeny v grafu 2 a 3, kde je vynesena závislost napětí na podélném přetvoření. V grafu 2 jsou výsledky pro sadu zkušebních těles 1B, v grafu 3 pro 5A.



Graf 2: Závislost napětí na podélném přetvoření lepidla SikaFast-5211 NT, tělesa typu 1B, [31]



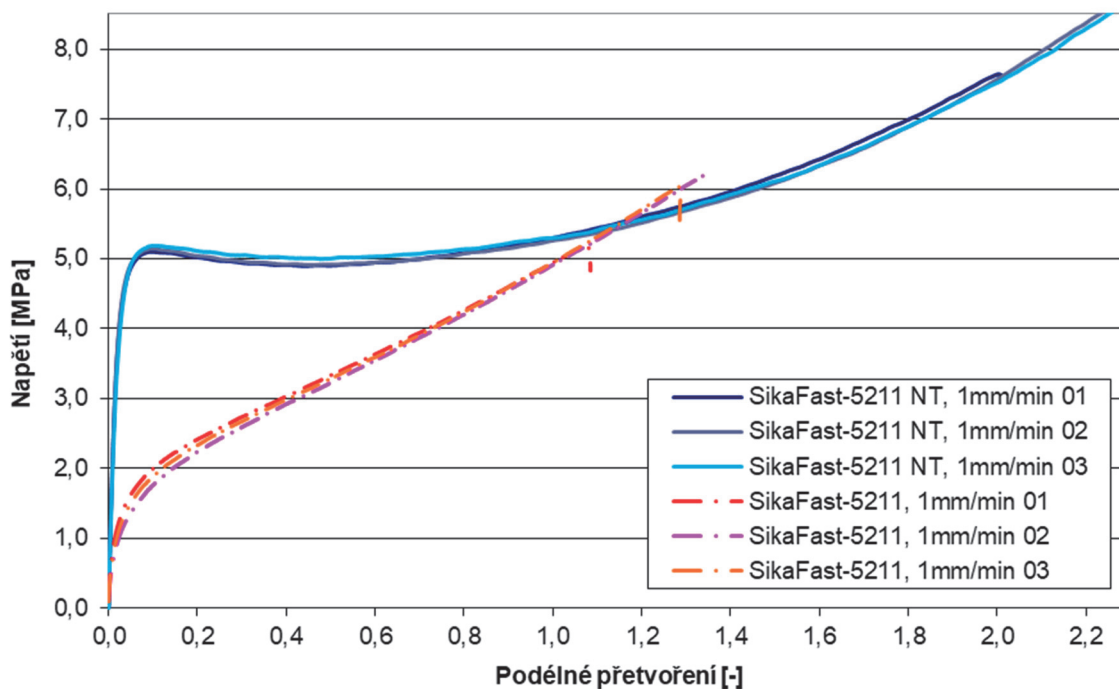
Graf 3: Závislost napětí na podélném přetvoření lepidla SikaFast-5211 NT, tělesa typu 5A, [31]

U vzorků typu 5A se projevil tzv. size effect, neboli vliv velikosti zkušebního tělesa na výsledné hodnoty napětí a modulů pružnosti. Malá tělesa (typ 5A) vykazovala vyšší tuhost v počáteční fázi až do napětí na mezi kluzu, které bylo o cca 1 MPa vyšší než u těles velkých (typ 1B), [31].

Akrylátové lepidlo SikaFast-5211 NT vykazuje poměrně velkou tuhost a pevnost v počáteční fázi zatěžování. Po dosažení meze kluzu dochází k mírnému poklesu napětí a značnému nárůstu deformací. Následně dochází opět k tahovému zpevnění a nárůstu pevnosti až do porušení. Lepidlo zajišťuje vysokou tuhost a tím i únosnost budoucího lepeného spoje. Zároveň je velmi poddajné, s průtažností 200-225 %, čímž dokáže efektivně přerozdělit napětí způsobené rozdílnou teplotní roztažností spojovaných materiálů, [31].

Rychlost zatěžování má zásadní vliv na výsledné hodnoty. Se zvyšující se rychlostí zatěžování roste i tuhost a pevnost materiálu. Při rychlosti 8 mm/min je patrné dosažení vyšších napětí při stejné poměrné deformaci, viz graf 2 a 3.

Lepidlo SikaFast-5211 NT nahradilo lepidlo SikaFast-5211, jehož vlastnosti byly zkoumány v rámci výzkumu na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí. Je možné obě akrylátová lepidla porovnat. Z grafu 4 je zřejmé, že lepidlo SikaFast-5211 NT dosahuje vyšších pevností a průtažnost materiálu je přibližně 2x vyšší než u lepidla SikaFast-5211. Počáteční tuhost lepidla SikaFast-5211 v oblasti napětí mezi 1-2 MPa značně klesá a následně pokračuje téměř lineárně až do porušení, [31].



Graf 4: Závislost napětí na podélném přetvoření lepidla SikaFast-5211 a SikaFast-5211 NT, [31]

V tab. 8 jsou vypsány parametry srovnávající lepidlo SikaFast-5211 a SikaFast-5211 NT. Srovnání bylo provedeno na tělesech typu 1B při rychlosti zatěžování 1 mm/min. Uvedený vypočtený modul pružnosti je určen podle normy ČSN EN ISO 527-1

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (4.1)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu [MPa],

$\sigma_1$  je napětí [MPa] naměřené při podélném přetvoření  $\varepsilon_1 = 0,0005$ ,

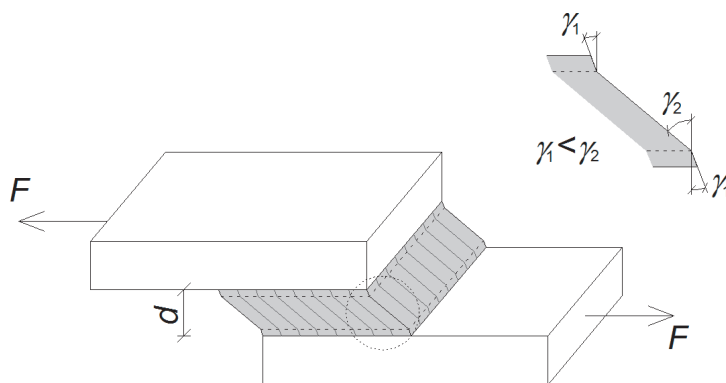
$\sigma_2$  je napětí [MPa] naměřené při podélném přetvoření  $\varepsilon_2 = 0,0025$ , [31].

Tab. 8: Srovnání materiálových vlastností lepidel SikaFast-5211 a SikaFast-5211 NT

	SikaFast-5211	SikaFast-5211 NT
Napětí při porušení (5% kvantil) [MPa]	4,75	7,22
Podélné přetvoření [-]	1,24	2,19
Vypočtený modul pružnosti [MPa]	96,94	260,14

### 4.3 Smykové zkoušky lepeného spoje

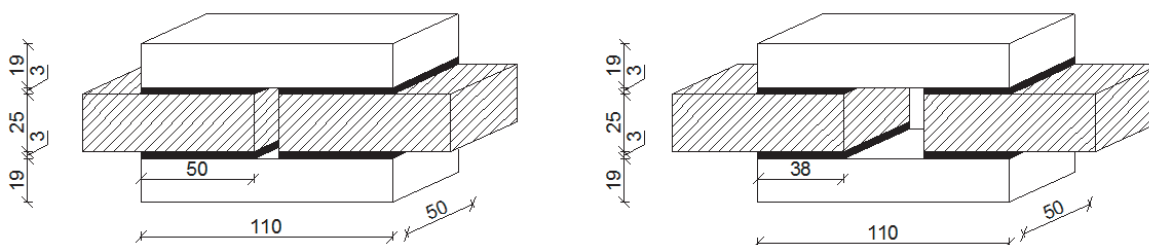
Z tahových zkoušek popsaných v kapitole 4.2 byly zjištěny materiálové charakteristiky lepidla. Pro použití lepidla v hybridních nosnících bylo zapotřebí provést smykové zkoušky lepeného spoje, aby byly zjištěny charakteristiky lepidla ve spoji, neboť se liší od materiálových charakteristik lepidla. Důvodem je rozdílný způsob namáhání vrstvy lepidla v plošném spoji a dále tužší chování lepidla na stykové ploše mezi lepidlem a spojovaným materiálem, [32]. Na obr. 31 je zobrazena deformace vrstvy lepidla, kde je patrné, že úhel zkosení  $\gamma_1$  na stykové ploše lepidla je menší než  $\gamma_2$  ve střední části lepené vrstvy.



Obr. 31: Lepený spoj se stykovou plochou, [32]

#### 4.3.1 Výroba zkušebních těles

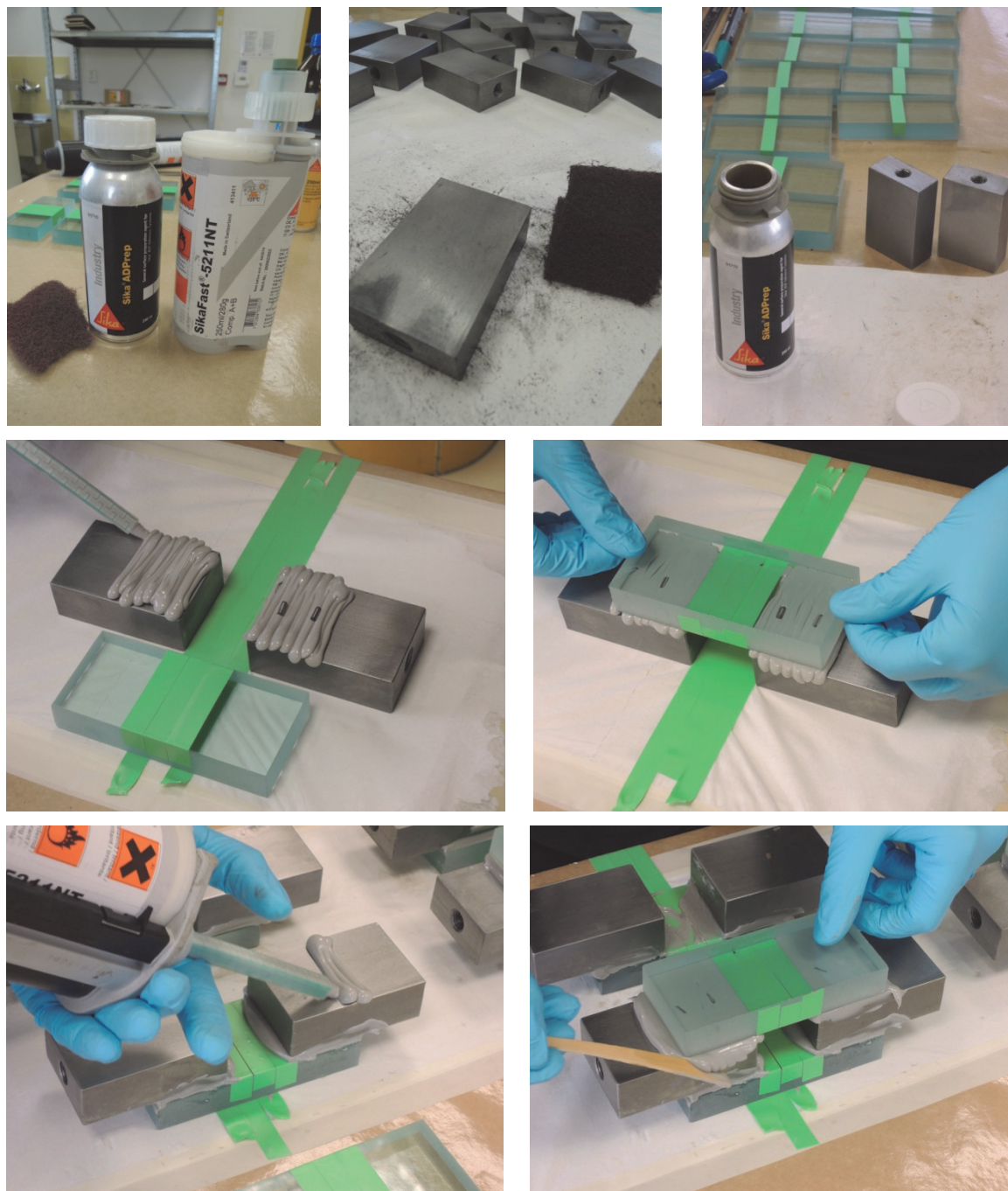
Celkem bylo připraveno 16 zkušebních těles pro smykové zkoušky lepeného spoje. Tělesa byla tvořena destičkami plaveného skla o rozměrech 110 × 50 mm a tloušťce 19 mm, které byly vrstvami lepidla připojeny ke dvěma ocelovým deskám tloušťky 25 mm a rozměrech 75 × 50 mm, viz obr. 32. Tloušťka lepeného spoje byla 3 mm. Připraveny byly dvě sady zkušebních těles po 8 vzorcích. V první sadě byl každý lepený spoj realizován na ploše cca 50 × 50 mm, ve druhé sadě na ploše cca 38 × 50 mm.



Obr. 32: Zkušební tělesa pro smykové zkoušky

Zkušební tělesa byla vyráběna přímo v laboratoři firmy Sika CZ, s.r.o. v Brně, viz obr. 33, aby byla zaručena správná technologie při aplikaci lepidla SikaFast-5211 NT.

Při výrobě byly použity certifikované technologie pro úpravu povrchu oceli a skla před aplikací lepidla. Nejprve byly u oceli mechanicky odstraněny hrubé nečistoty pomocí minerální drátěnky Scotch Brite. Lepené plochy pak byly aktivovány přípravkem Sika ADPrep a poté již bylo nanášeno dvousložkové akrylátové lepidlo SikaFast-5211 NT.



Obr. 33: Postup výroby zkušebních těles



### 4.3.2 Stárnutí zkušebních těles

U části vyrobených vzorků bylo provedeno umělé stárnutí. Cílem provedených zatěžovacích cyklů bylo umělé simulování vnějších klimatických podmínek ve střední Evropě v rozsahu 15-20 let. Na vzorcích byl použit proces zatěžování dle CQP-034-1 (CQP = Sika Corporate Quality Procedure) respektive DVS 1618. Jedná se o následující expozice:

1. 7 dní teplota +23°C, 50% relativní vlhkost vzduchu
2. 7 dní deionizovaná voda o teplotě +23°C
3. 1 den teplota +80°C
4. 7 dní teplota +70°C, 100% relativní vlhkost vzduchu

Na části vzorků bylo dále provedeno umělé stárnutí zohledňující přímořské (slané) podnebí nebo jinak agresivní prostředí s přítomností solí (průmysl, blízkost pozemní komunikace apod.). Vzorky s označením 1-4, 1-5, 2-4 a 2-5 tak byly navíc ponořeny v přesyceném roztoku HCl a vystaveny cyklickému zatížení teplotou, kdy byly vzorky střídavě vystaveny teplotě +55°C a -30°C. Délka jednoho cyklu trvala 10 dní (5 dní +55°C, 5 dní -30°C). Provedeny byly celkem 3 cykly.

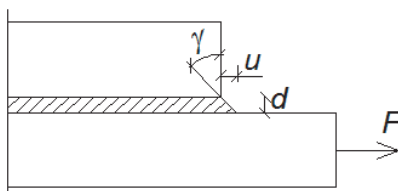
Na obr. 34 jsou zobrazeny všechny zkušební vzorky, na kterých bylo provedeno umělé stárnutí.



Obr. 34: Zkušební vzorky po provedeném umělém stárnutí

### 4.3.3 Uspořádání experimentu

V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byly v lednu 2014 provedeny smykové zkoušky lepeného spoje, viz obr. 36. Zkušební tělesa byla zatěžována tahem nebo tlakem, kontrolovanou deformací 1 mm/min ve zkušebním stroji TIRA 2300 s rozsahem 100 kN. Vrstvy lepidla tak byly namáhány smykem, viz obr. 35. Měřeno bylo protažení nebo stlačení každého lepeného spoje potenciometrickými snímači posunu (POT1 - POT4) v závislosti na působící síle  $F$ , viz obr. 36.

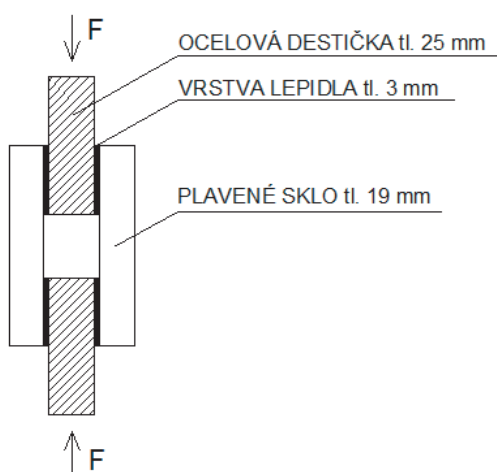
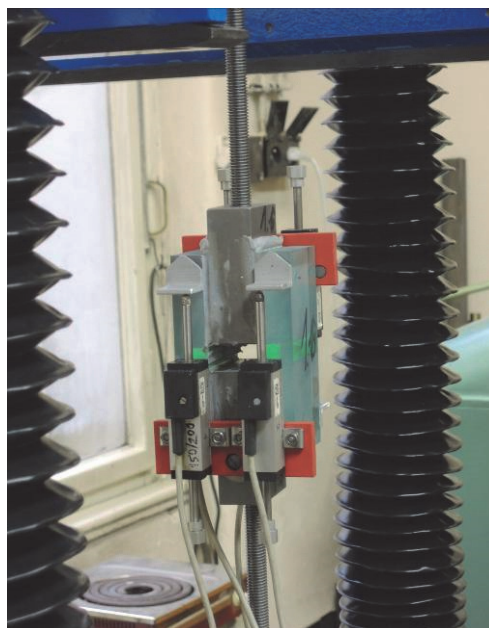
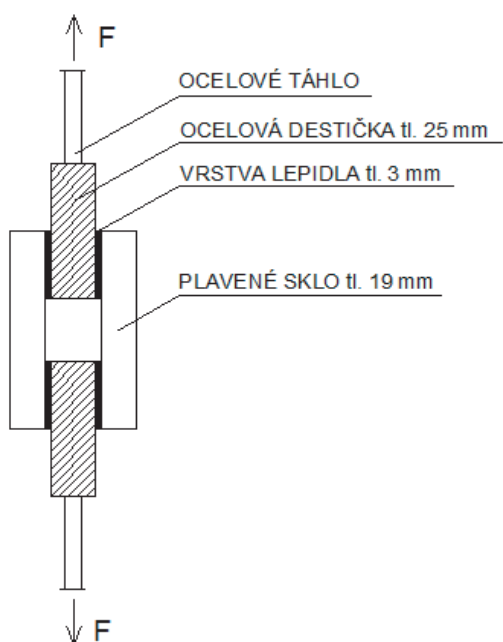


Obr. 35: Deformace vrstvy lepidla při namáhání smykem

Systém značení zkušebních těles je vysvětlen v tab. 9.

Tab. 9: Označení vzorků pro smykové zkoušky lepeného spoje

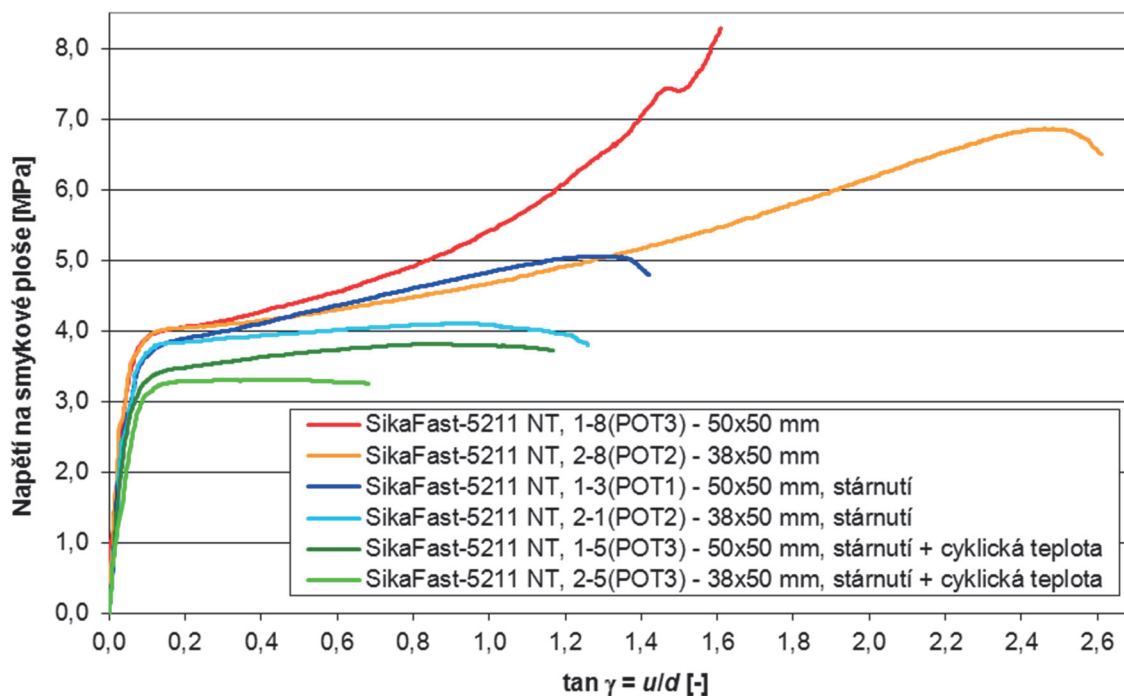
Označení vzorku		Popis
Plocha lepeného spoje 50 × 50 mm	Plocha lepeného spoje 38 × 50 mm	
1-1	2-1	Vzorky vystaveny stárnutí podle DVS 1618
1-2	2-2	
1-3	2-3	
1-4	2-4	Vzorky vystaveny stárnutí podle DVS 1618 + cyklickému zatížení teplotou v HCl
1-5	2-5	
1-6	2-6	Vzorky nebyly vystaveny stárnutí
1-7	2-7	
1-8	2-8	



Obr. 36: Uspořádání smykových zkoušek lepeného spoje, nahoře – tah, dole – tlak

#### 4.3.4 Vyhodnocení zkoušek

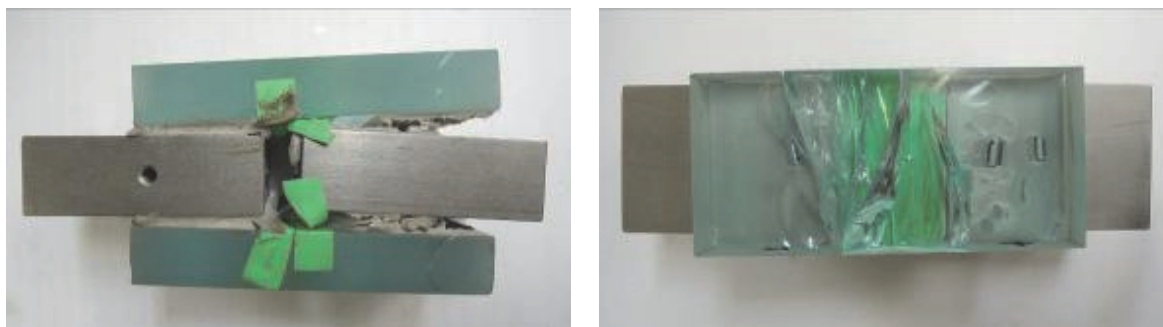
Výsledky zkoušek lepeného spoje namáhaného smykem jsou zobrazeny v grafu 5, kde je vynesena závislost napětí na smykové ploše lepidla na podélném přetvoření pro reprezentativní křivky. V legendě je za názvem vzorku uvedeno označení potenciometrického snímače posunutí (POT1 – POT4).



Graf 5: Závislost napětí na smykové ploše na podélném přetvoření lepidla SikaFast-5211 NT

Z grafu 5 je patrné, že i při smykových zkouškách spoje vykazuje akrylátové lepidlo SikaFast-5211 NT poměrně velikou tuhost v počáteční fázi zatěžování, která se do 50 – 80 % jeho únosnosti nemění.

Výsledky experimentů dále prokázaly, že nedochází k výrazné změně chování lepeného spoje po vystavení stárnutí podle DVS 1618. Rozdíl však byl pozorován ve způsobu porušení těchto vzorků. Zatímco vzorky, které stárnutí vystaveny nebyly, byly porušeny kohezí nebo došlo ke kolapsu skla, vzorky vystavené stárnutí podle DVS 1618 byly téměř vždy porušeny adhezí, viz obr. 37 a 38.



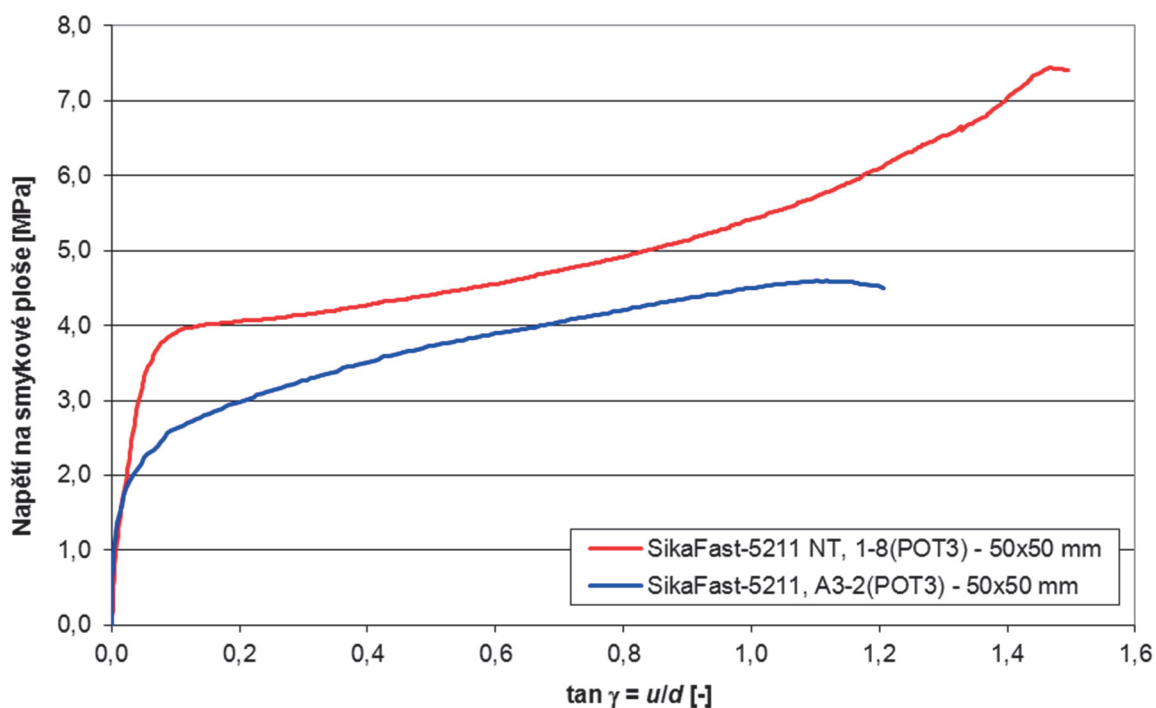
Obr. 37: Porušení vzorků kohezí a kolapsem skla



Obr. 38: Porušení vzorků adhezi

Pokud srovnáme výsledky vzorků, které byly vystaveny stárnutí podle DVS 1618 a dále i cyklickému zatížení teplotou při současném ponoření v přesyceném roztoku HCl (vzorky 1-4, 1-5, 2-4 a 2-5), s ostatními vzorky, můžeme si všimnout, že bylo dosaženo nejen menší únosnosti, ale i podélného přetvoření.

I pro smykové zkoušky lepeného spoje máme možnost porovnat nové lepidlo SikaFast-5211 NT s lepidlem SikaFast-5211. Z grafu 6 je zřejmé, že nové lepidlo SikaFast-5211 NT má odlišné chování oproti svému předchůdci. Dosahuje nejen vyšší únosnosti a podélného přetvoření, ale také počáteční tuhost ve spoji se na smykové ploše nemění do hodnoty 3,5 - 4 MPa.



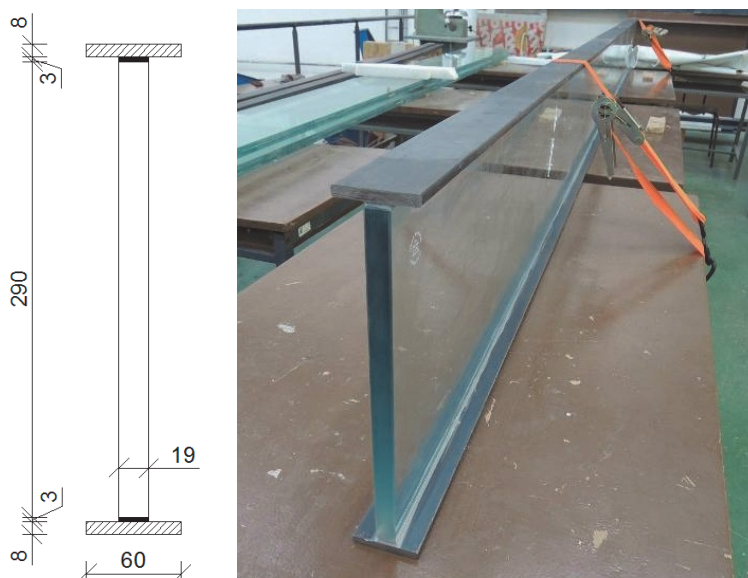
Graf 6: Porovnání výsledků smykových zkoušek lepidel SikaFast-5211 NT a SikaFast-5211

## 4.4 Zkoušky hybridních nosníků ke stanovení jejich únosnosti

Únosnost hybridního sklo-ocelového nosníku s lepeným spojem tvořeným akrylátovým lepidlem nové technologie bylo zapotřebí experimentálně ověřit. Pro použití modifikované Möhlerovy metody, viz kapitola 2.3.2.2, je potřeba získat závislost smykového modulu pružnosti použitého lepidla na normálovém napětí ve skle.

### 4.4.1 Výroba hybridního nosníku

Hybridní nosník o délce 4250 mm byl tvořen ocelovými pásnicemi o rozměru  $60 \times 8$  mm, z oceli pevnostní třídy S235, které byly lepeným spojem o tloušťce 3 mm připojeny ke skleněné stojině. Tu tvořilo jednovrstvé tepelně tvrzené sklo tloušťky 19 mm a výšky 290 mm. Skleněná stojina před použitím v hybridním nosníku prošla Heat Soak testem, [33] k vyloučení přítomnosti vměstků sulfidu niklu, které mohou způsobit samovolnou destrukci skla. Jednovrstvé sklo bylo zvoleno z důvodu minimalizace faktorů ovlivňujících chování nosníku. V praxi je však jednovrstvé sklo z hlediska bezpečnosti nepřijatelné, protože zbytková únosnost takovéto konstrukce je nulová.



Obr. 39: Hybridní sklo-ocelový nosník

Nosník byl vyroben v laboratoři stavební fakulty ČVUT za asistence autorizovaného technika v oboru lepení, aby byla zaručena správná technologie přípravy lepených povrchů a aplikace lepidla, viz obr. 40.

Nejprve byly mechanicky odstraněny hrubé nečistoty pomocí minerální drátěnky Scotch Brite. Poté byly lepené plochy aktivovány přípravkem Sika ADPrep a následně bylo z boku již ustavené stojiny aplikováno lepidlo v tloušťce 3 mm. Předepsaná tloušťka spoje byla zajišťována pomocí dřevěných distančních vložek. Místa s těmito distančními

vložkami, která nebyla při aplikaci vyplněna, byla dodatečně vyplněna lepidlem po zatvrdnutí lepeného spoje.

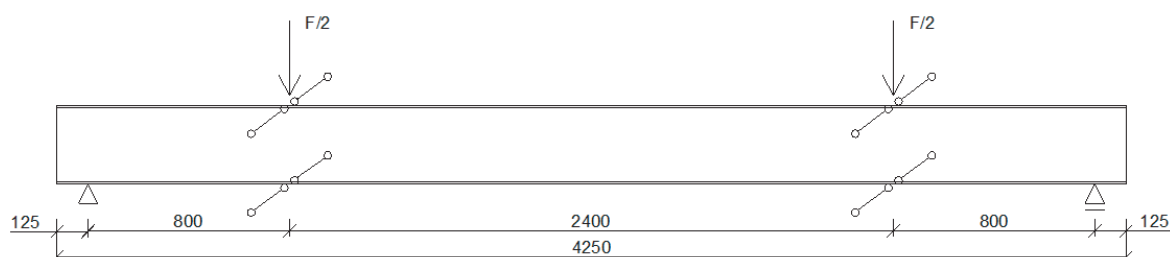
V hybridním sklo-ocelovém nosníku bylo použito dvousložkové akrylátové lepidlo SikaFast-5215 NT (new technology). Jedná se o lepidlo se stejnými mechanickými vlastnosti jako SikaFast-5211 NT, které bylo použito pro materiálové zkoušky a pro zkoušky spoje namáhaného smykem. Lepidla se liší pouze otevřeným časem (dobou mezi aplikací lepidla a začátkem nevratné chemické reakce při tvrdnutí). Lepidlo SikaFast-5211 NT s otevřeným časem 3 minuty (při 23°C a 50% relativní vzdušné vlhkosti) bylo možné použít pro menší zkušební tělesa. Pro výrobu hybridního nosníku bylo nutné zvolit lepidlo SikaFast-5215 NT s delším otevřeným časem 5 minut.



Obr. 40: Postup výroby hybridního nosníku

#### 4.4.2 Uspořádání zkoušek

V laboratoři stavební fakulty ČVUT v Praze proběhly v březnu a květnu 2014 zkoušky hybridního nosníku o délce 4250 mm ve čtyřbodovém ohybu. Nosník byl prostě podepřen na rozpětí 4 m, namáhán dvojicí osamělých sil vzdálených 2,4 m až do porušení. Příčnému posunu bylo bráněno v místech vnášení zatížení. Schéma uspořádání je patrné na obr. 41.



Obr. 41: Schématické uspořádání experimentu



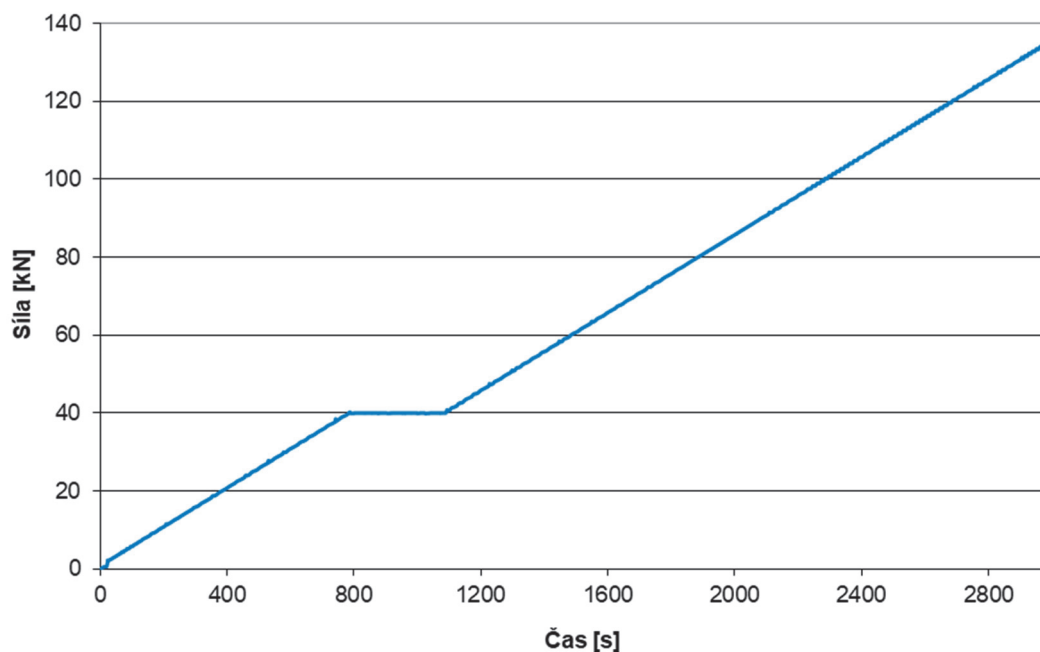
Obr. 42: Uspořádání experimentu

Tab. 10: Zkoušené hybridní nosníky

Schéma přípoje	Použité sklo	Lepidlo	Počet experimentů	Označení
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně tvrzené</li> <li>• jednovrstvé</li> <li>• tl. 19 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5215 NT</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	2	01
				02

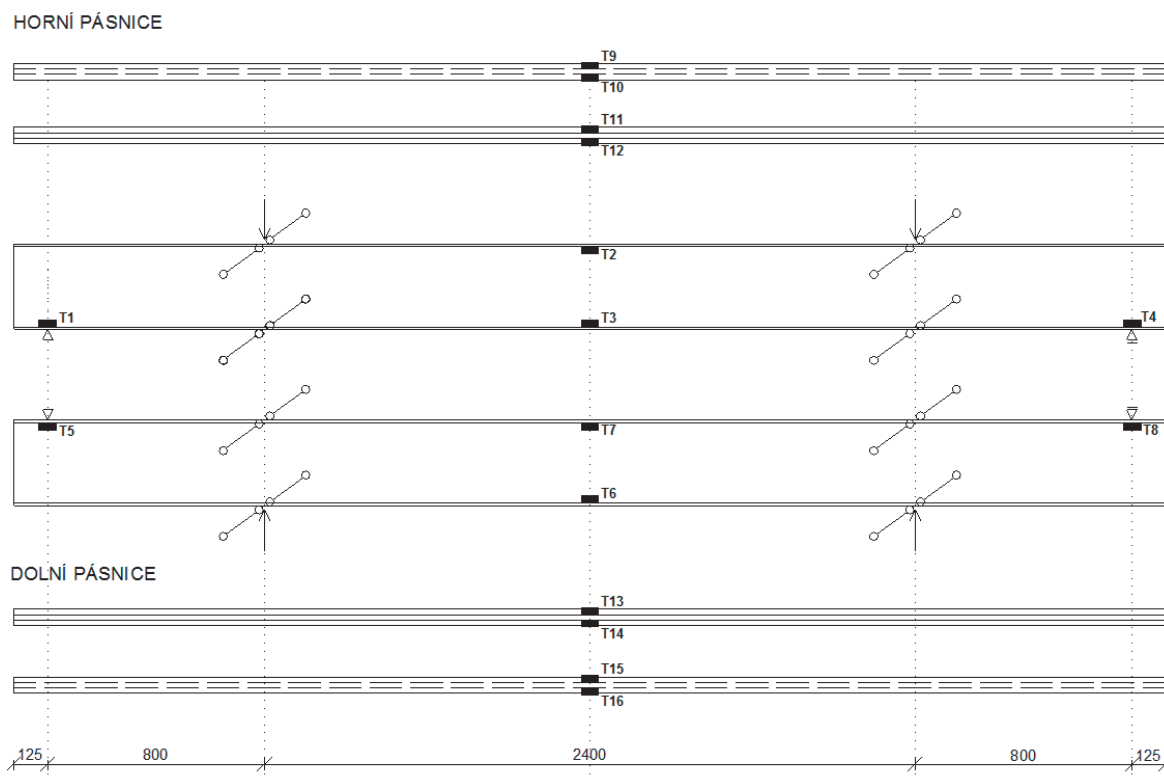
Experimenty byly řízeny silou, zatěžování probíhalo rychlostí 50 N/s. Nosníky byly zatěžovány až do dosažení síly 40 kN, na této hodnotě síly bylo setrváno po dobu 300 s do ustálení deformace a poté se pokračovalo v dalším přitěžování. Závislost zatěžovací síly na čase je znázorněna v grafu 7.





Graf 7: Rychlost zatěžování nosníků

V průběhu zkoušek byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí nosníku, vzájemný posun pásnice a stojiny na kraji nosníku, příčný posun pásnic a stojiny uprostřed rozpětí a dále byly na nosníku osazeny tenzometry k nepřímému měření napětí. Schéma osazení tenzometrů je zobrazeno na obr. 43. Použity byly foliové odporové tenzometry HBM LY11-10/120.



Obr. 43: Schéma osazení tenzometrů

### 4.4.3 Vyhodnocení zkoušek

První experiment hybridního nosníku byl ukončen adhezním porušením lepeného spoje horní pásnice, viz obr. 44. Nedostatečná přilnavost na rozhraní lepidla a oceli byla zřejmě způsobena špatnou úpravou ocelového povrchu před lepením. Pro druhou zkoušku byla proto ocel zbrúšena, aby byla zaručena správná přilnavost. Druhý experiment byl ukončen porušením skleněné stojiny, viz obr. 45. Při dosažení pevnosti v tahu za ohybu v dolní části skleněné stojiny uprostřed rozpětí nosníku došlo k celkovému kolapsu nosníku, protože stojina byla tvořena jednovrstvým tepelně tvrzeným sklem.



Obr. 44: Adhezní porušení lepeného spoje při prvním experimentu

Výsledky experimentů jsou shrnuty v tabulce 11.

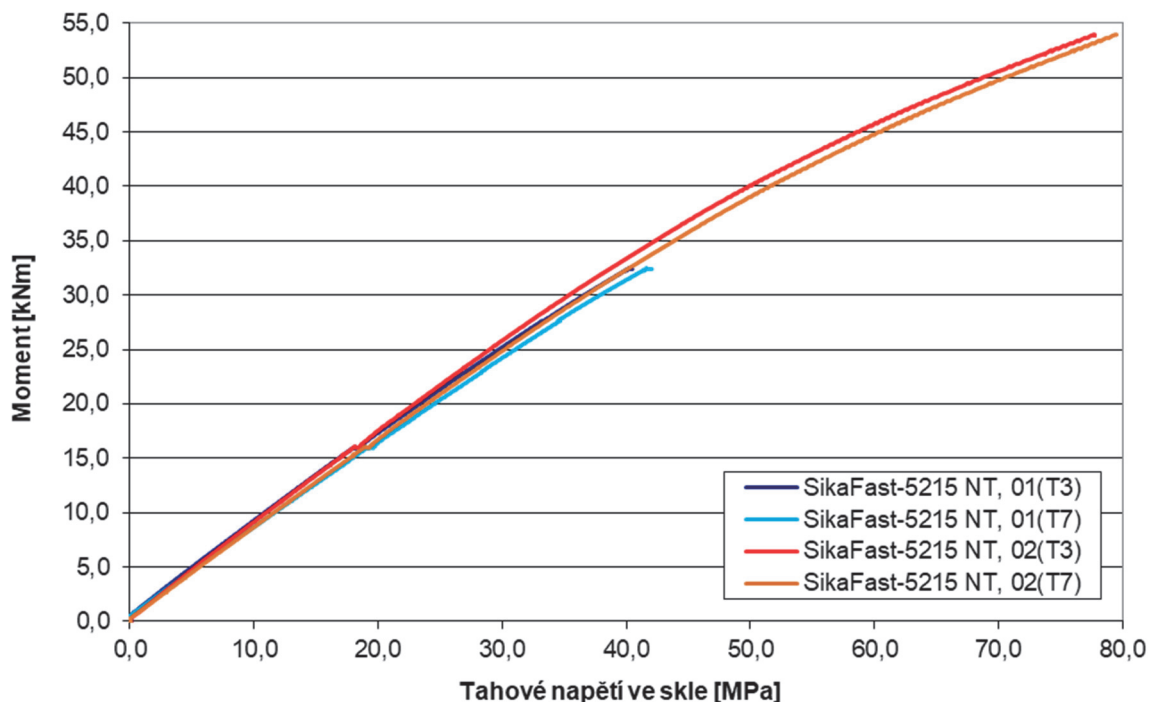
Tab. 11: Souhrn výsledků pro hybridní nosník

Označení vzorku	Max. síla $F$ [kN]	Max. moment $M$ [kNm]	Max. napětí ve skle [MPa]	Max. průhyb uprostřed [mm]	Způsob porušení
01	81,27	32,5	41,61	11,0	adhezí
02	137,20	54,9	79,45	22,0	kolaps skla



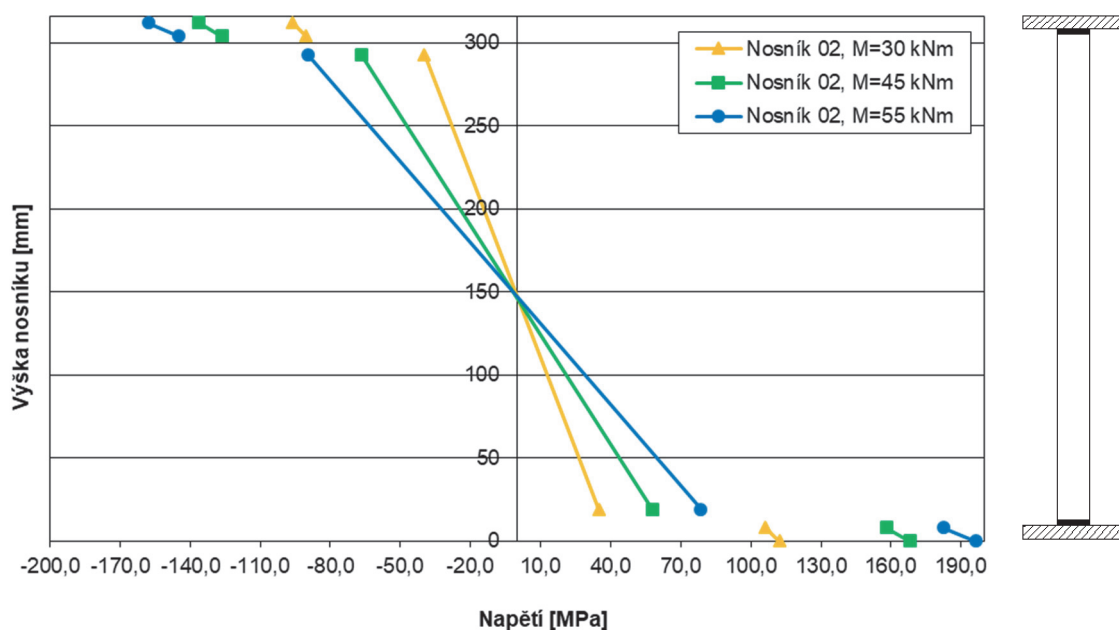
*Obr. 45: Porušení nosníku při druhém experimentu*

V grafu 8, který zobrazuje závislost působícího ohybového momentu na tahovém napětí ve skle uprostřed rozpětí nosníku, je patrný nárůst tahového napětí přibližně o 0,5 MPa při působícím ohybovém momentu o velikosti 16 kNm. Tento nárůst byl způsoben setrváním při působící síle 40 kN po dobu 300 s do ustálení deformace. V legendě grafu je za označením vzorku uvedeno označení tenzometru (T3, T7), jejichž poloha je patrná z obr. 43.



Graf 8: Závislost momentu na tahovém napětí ve skle uprostřed rozpětí nosníku

V grafu 9 je vykreslen průběh normálového napětí po výšce průřezu nosníku 02 s jeho rozdělením mezi skleněnou a ocelovou část průřezu pro různé ohybové momenty. Z grafu je zřejmé, že při použití lepidla SikaFast-5215 NT je pro všechny uvedené ohybové momenty zajištěn přenos napětí ze skleněné stojiny do ocelových pásnic, protože tuhost lepeného spoje se v průběhu zatěžování příliš nemění.



Graf 9: Průběh normálového napětí po výšce průřezu hybridního nosníku pro různé ohybové momenty

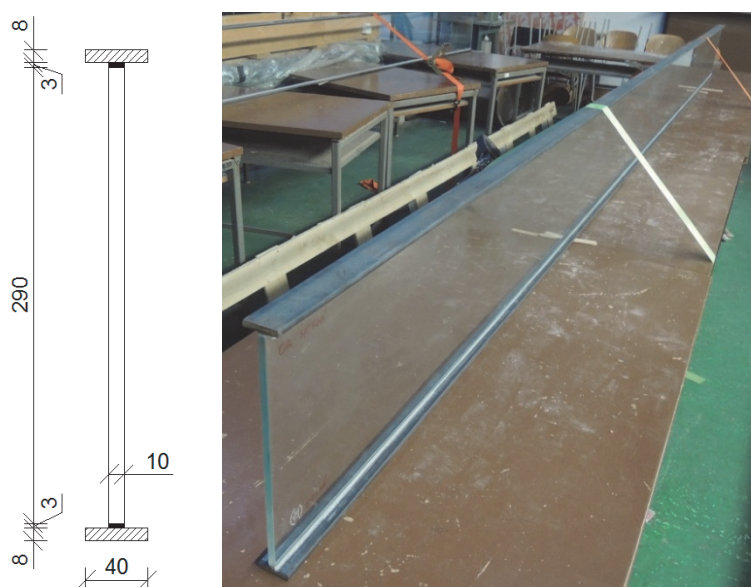
## 4.5 Zkoušky hybridních nosníků zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability

Ztráta příčné a torzní stability hybridních sklo-ocelových nosníků nebyla dosud podrobně zkoumána. Provedeny byly pouze pilotní experimenty v laboratoři RWTH Aachen, viz kapitola 2.3.5, na nosnících o délce 1600 mm s polyuretanovým lepidlem a epoxidovou pryskyřicí.

Ukázala se tak nutnost provést další experimenty, aby bylo možné stanovit postup pro návrh hybridních sklo-ocelových nosníků s ohledem na ztrátu příčné a torzní stability.

### 4.5.1 Výroba hybridních nosníků

Hybridní nosníky o délce 4750 mm byly tvořeny pásnicemi o rozměrech 40 × 8 mm z oceli pevnostní třídy S235, ke kterým byla lepeným spojením připojena skleněná stojina. Lepený spoj o tloušťce 3 mm byl tvořen dvousložkovým akrylátovým lepidlem SikaFast-5215 NT, obr. 46. Na skleněnou stojinu bylo použito jednovrstvé tepelně tvrzené sklo tloušťky 10 mm a výšky 290 mm. Skleněné stojiny před použitím v hybridním nosníku prošly Heat Soak testem, [33]. Nosníky byly vyrobeny v laboratoři stavební fakulty ČVUT stejným postupem jako nosník o délce 4250 mm, viz kapitola 4.4.1, obr. 47.



Obr. 46: Hybridní sklo-ocelový nosník



Obr. 47: Postup výroby hybridního nosníku

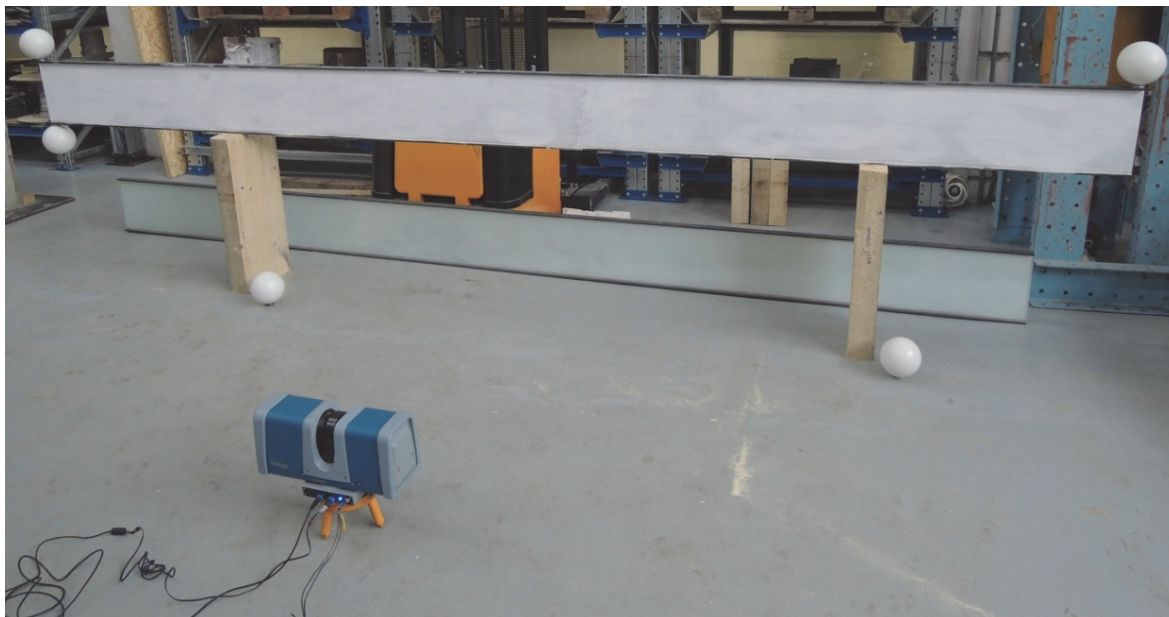
#### 4.5.2 Měření imperfekcí

Před experimenty byly zaměřeny geometrické (globální i lokální) imperfekce nosníků pomocí laserového skenování. Aby bylo možné použít laserové skenování pro měření imperfekcí sklo-ocelových hybridních nosníků, bylo nutné nejprve skleněnou stojinu opatřit nátěrem.

Pro měření byl použit panoramatický skener Surphaser 25HSX, kterým je možné zaměřit objekty ve vzdálenosti od 0,2 do 70 metrů s přesností nižší než 1 mm. Zorný úhel je  $360^\circ \times 270^\circ$ . Měření bylo provedeno ze dvou stanovisek, aby bylo možné zachytit horní i spodní pásnici nosníku, viz obr. 48 a 49. Data z obou měření pak byla při zpracování spojena pomocí identických bodů. Ty tvořily bílé koule o průměru 145 mm, které byly pomocí plošky s magnetem uchyceny na ocelových pásnicích.

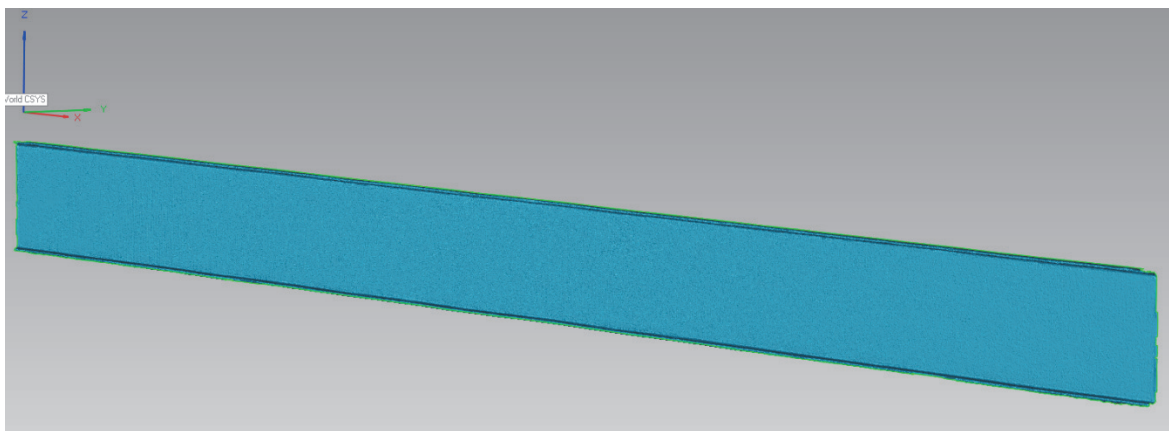


Obr. 48: Laserové skenování, stanoviště 1



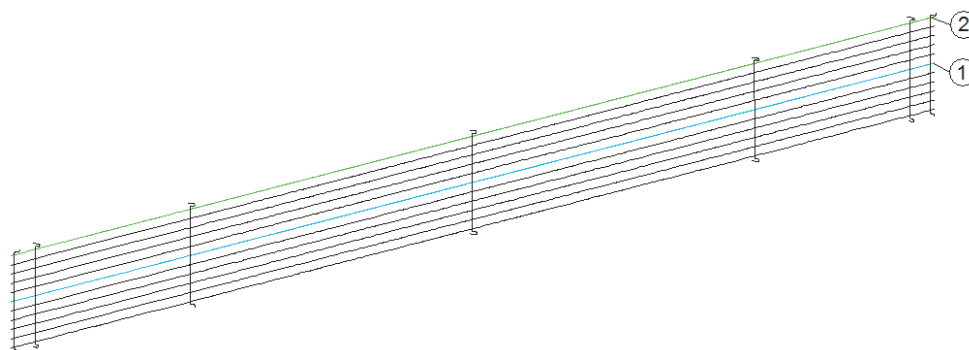
Obr. 49: Laserové skenování, stanoviště 2

Laserové skenování umožňuje zaměřit velké množství bodů za krátkou dobu, a přenést tak skenovaný objekt do počítače. Vznikne digitální model s vysokou hustotou zaměřených bodů, které tvoří tzv. mračno bodů, viz obr. 50. Z něho je pak možné dalším zpracováním získat vodorovné i svislé řezy, [34].



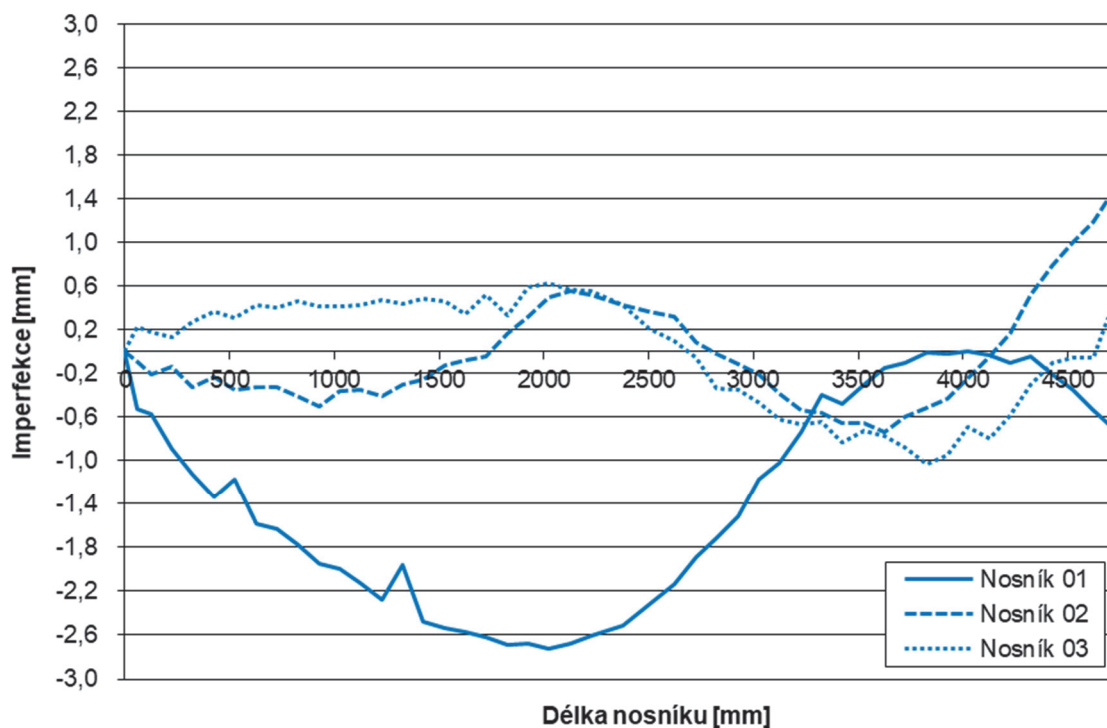
Obr. 50: Mračno bodů

Na obr. 51 jsou zobrazeny vytvořené vodorovné i svislé řezy nosníku. Vodorovný řez č. 1 je umístěn uprostřed výšky nosníku, vodorovný řez č. 2 na horní hraně skla.



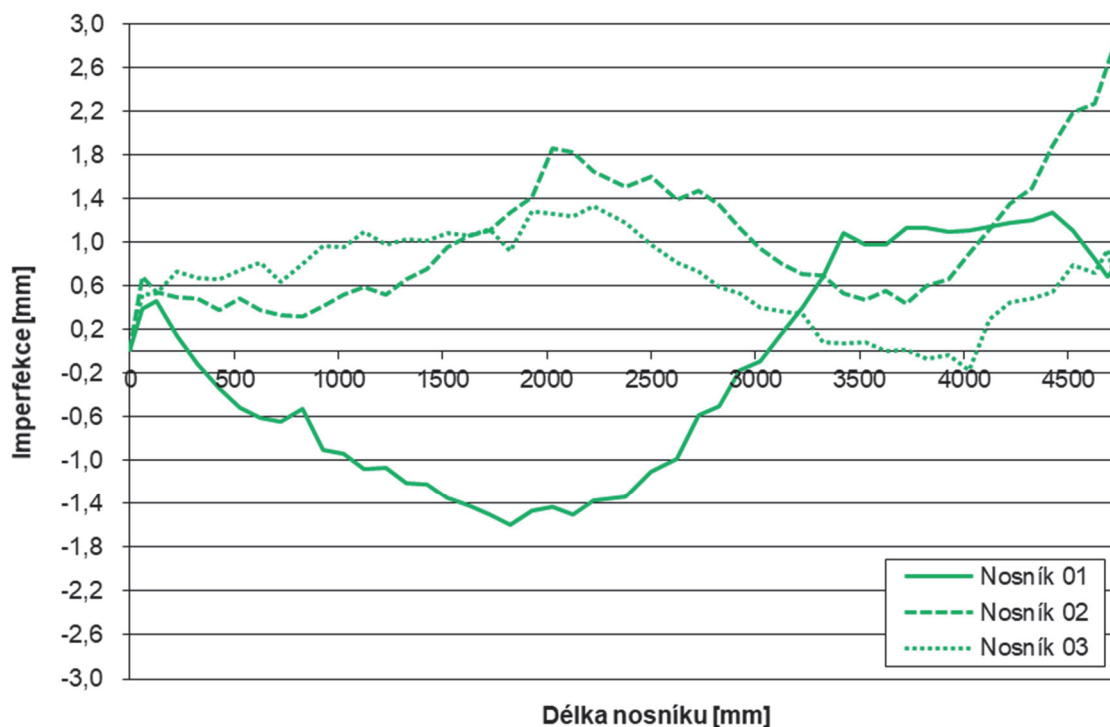
Obr. 51: Vodorovné a svislé řezy nosníku

Obr. 52 a 53 zobrazují vodorovný řez č. 1 a 2 tří laserově skenovaných hybridních sklo-ocelových nosníků. Za povšimnutí stojí, že maximální imperfekce skleněné stojiny je velmi malá (menší než  $3 \text{ mm} = L/1500$ , kde  $L$  je délka nosníku), přestože bylo v nosnících použito tepelně tvrzené sklo, u kterého se uvádí počáteční deformace o velikosti až  $L/300$ , viz kapitola 1.4.2.



Obr. 52: Imperfekce z vodorovného řezu nosníků č. 1



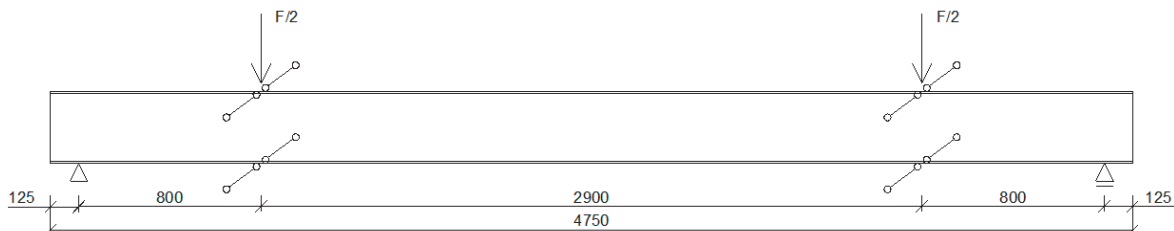


Obr. 53: Imperfekce z vodorovného řezu nosníků č. 2

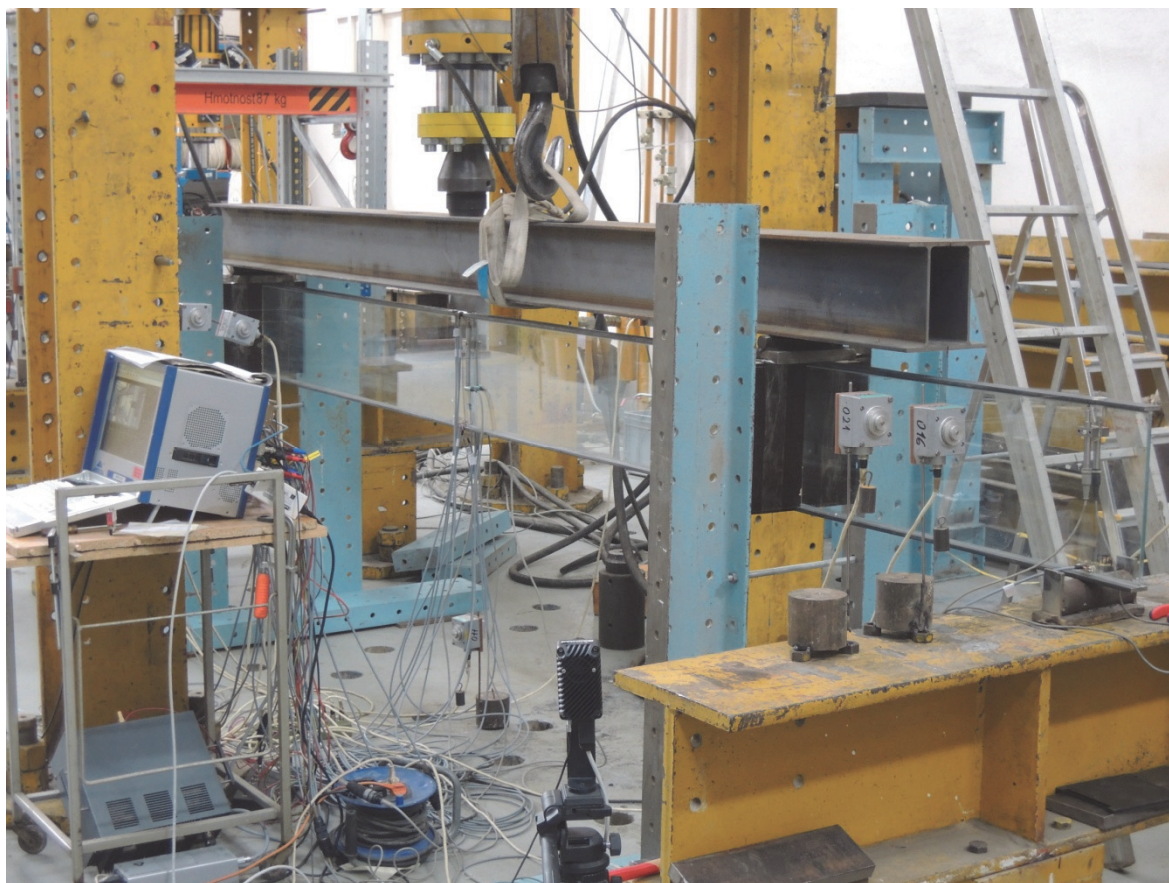
Ručním měřením byly následně ještě zkontrolovány rozměry nosníků.

#### 4.5.3 Zkoušky hybridních nosníků

V laboratoři stavební fakulty ČVUT v Praze proběhly v červnu 2015 a červenci 2016 zkoušky hybridních nosníků o délce 4750 mm ve čtyřbodovém ohybu zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability. Nosníky byly prostě podepřeny na rozpětí 4,5 m, namáhány dvojicí osamělých sil vzdálených 2,9 m až do porušení. Příčnému posunu a natáčení okolo podélné osy nosníku bylo bráněno v místech vnášení zatížení. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 54 a 55. Celkem byla vyzkoušena tři zkušební tělesa, viz tab. 12.

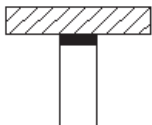


Obr. 54: Schématické uspořádání experimentu

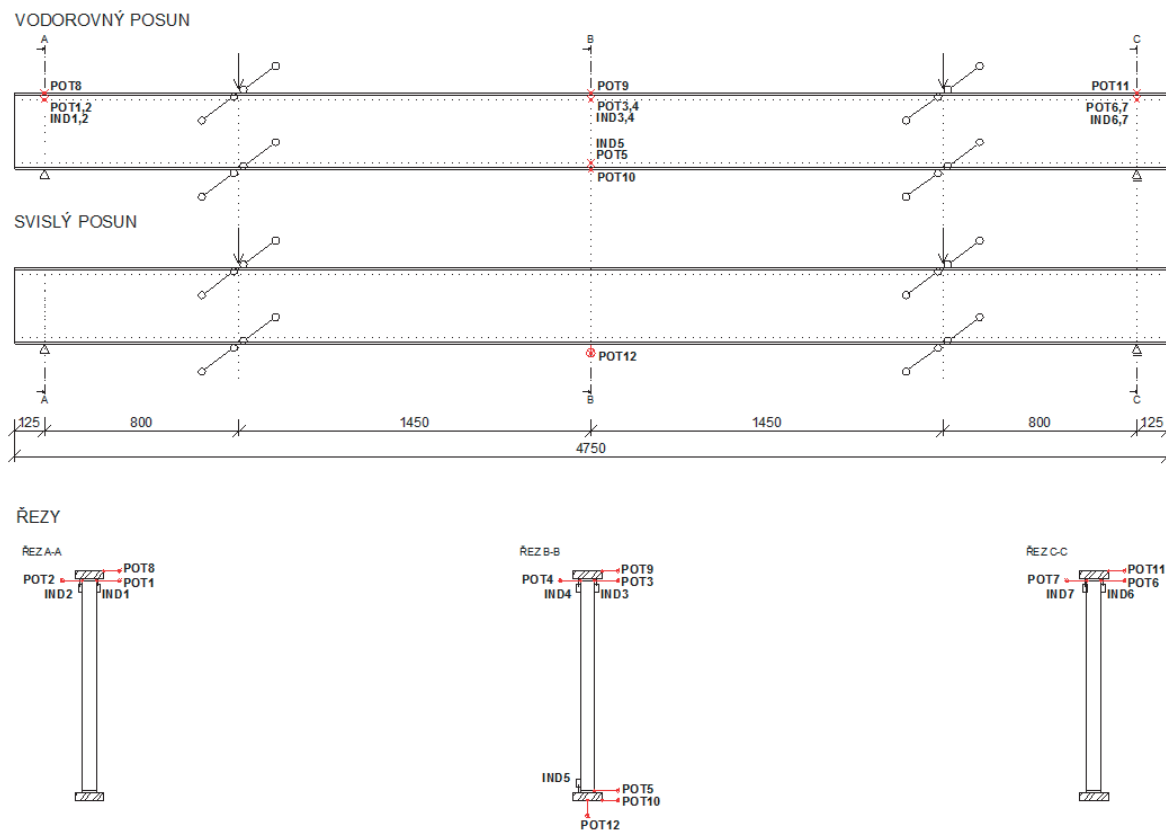


Obr. 55: Uspořádání zkoušky

Tab. 12: Zkoušené hybridní nosníky

Schéma přípoje	Použité sklo	Lepidlo	Počet nosníků	Označení
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tepelně tvrzené</li> <li>• jednovrstvé</li> <li>• tl. 10 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• akrylátové lepidlo SikaFast-5215 NT</li> <li>• tl. 3 mm</li> </ul>	3	01
				02
				03

Experimenty byly řízeny silou, zatěžování probíhalo rychlostí 50 N/s. V průběhu zkoušek byla zaznamenávána působící síla, svislá deformace uprostřed rozpětí nosníku, příčný posun pásnic a stojiny uprostřed rozpětí a u krajních podpor a natočení pásnic vůči stojině uprostřed rozpětí nosníku a u krajních podpor. Schéma umístění potenciometrů a indukčních snímačů je zobrazeno na obr. 56 a 57.

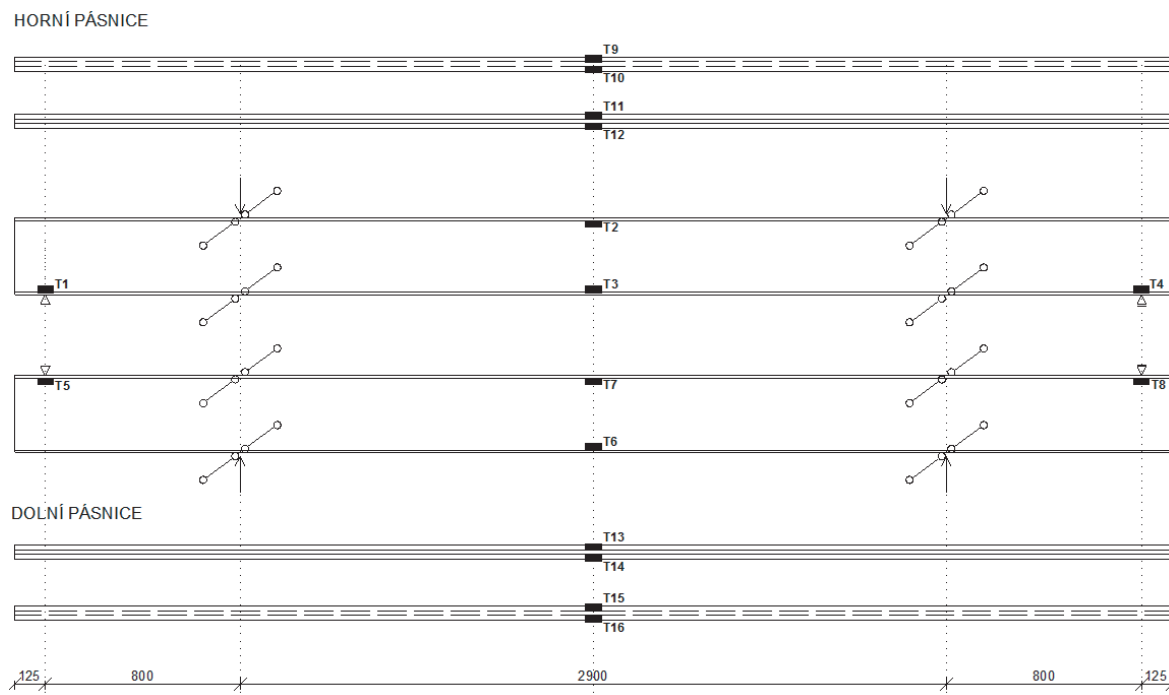


Obr. 56: Schéma osazení potenciometrů a indukčních snímačů



Obr. 57: Potenciometry a indukční snímače

Na nosníku bylo dále osazeno 16 tenzometrů k nepřímému měření napětí. Osm tenzometrů bylo umístěno na ocelových pásnicích, osm na skleněné stojině. Schéma osazení tenzometrů je zobrazeno na obr. 58. Použity byly foliové odporové tenzometry HBM LY11-10/120, viz obr. 59.

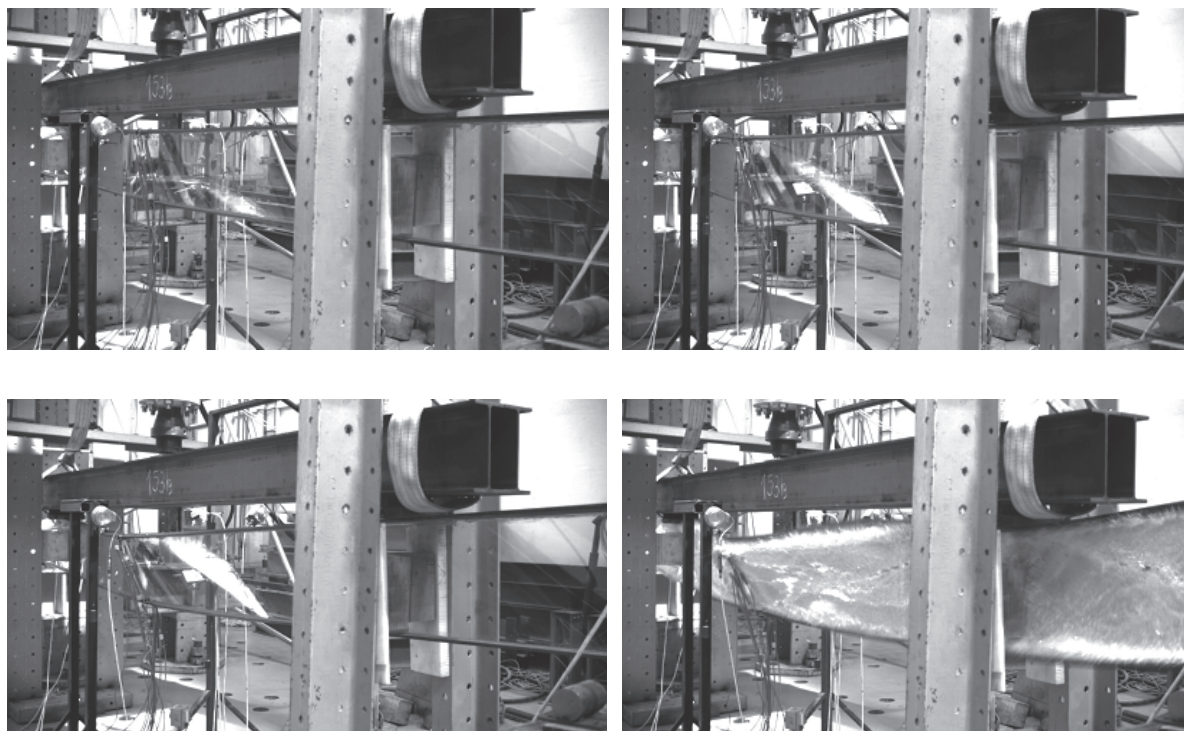


Obr. 58: Schéma osazení tenzometrů



Obr. 59: Tenzometry

Obr. 60 zobrazuje čtyři snímky z průběhu zkoušky. Snímky byly pořízeny vysokofrekvenční kamerou, která zaznamenávala průběh experimentů. Rychlost snímání byla 100 snímků za vteřinu. Obrázek vlevo nahoře zachycuje počátek ztráty příčné a torzní stability nosníku, vpravo nahoře je zobrazena deformace nosníku při dalším zatěžování. Obrázek vlevo dole zobrazuje maximální příčnou deformaci, vpravo dole je zachyceno porušení nosníku. Dosažením pevnosti v tahu za ohybu jednovrstvé skleněné stojiny z tepelně tvrzeného skla došlo ke kolapsu celého sklo-ocelového nosníku.



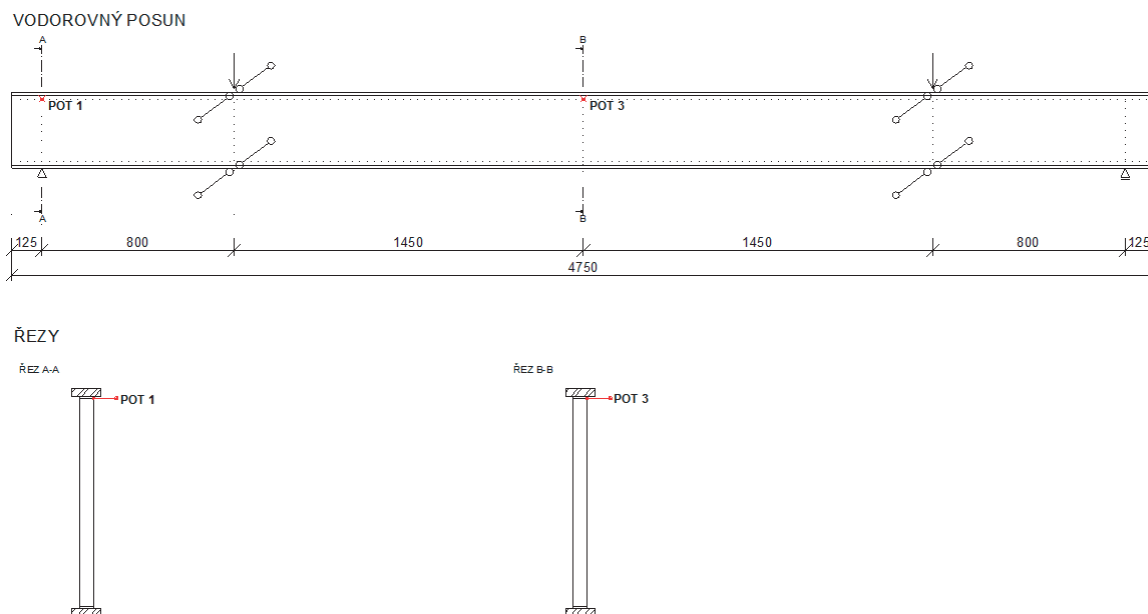
*Obr. 60: Průběh zkoušky hybridního nosníku zaměřené na ztrátu příčné a torzní stability*

#### 4.5.4 Vyhodnocení zkoušek

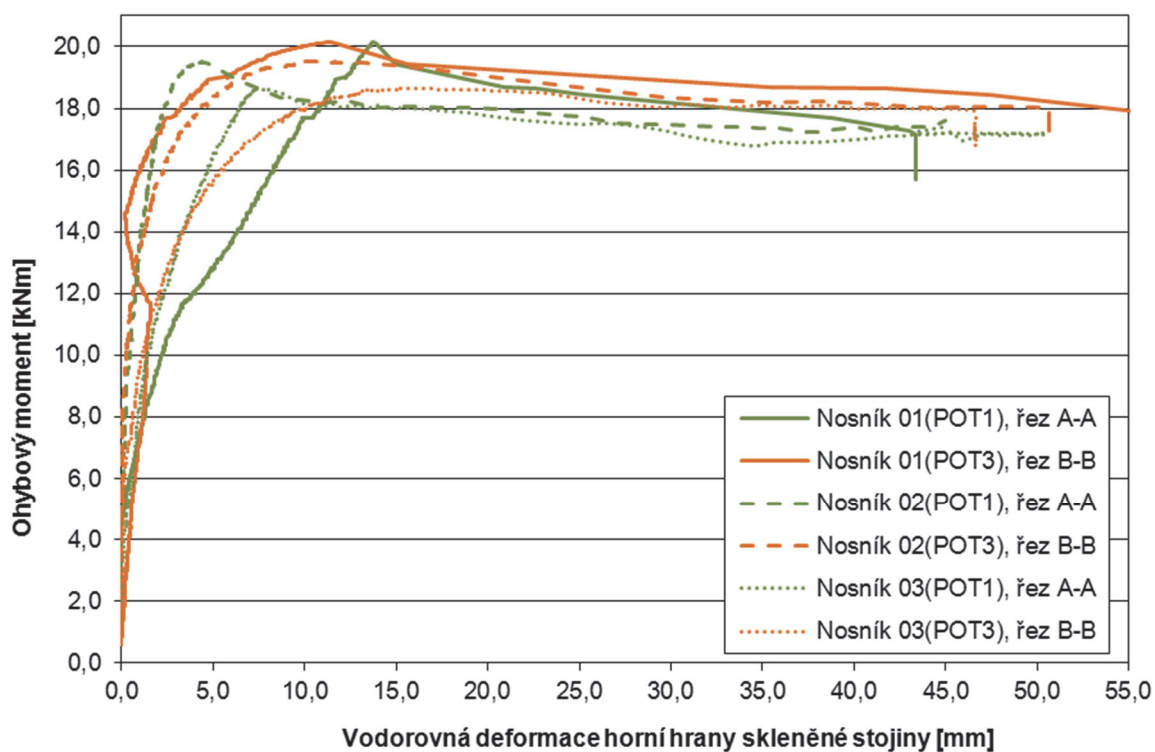
Výsledky experimentů jsou zobrazeny v grafu 10 a tab. 13. Při všech třech zkouškách došlo ke ztrátě příčné a torzní stability nosníků.

Nosník 01 a 03 byl zatěžován až do kolapsu nosníku, ke kterému došlo porušením skleněné stojiny. Při dosažení pevnosti v tahu za ohybu v horní části skleněné stojiny uprostřed rozpětí nosníku došlo k celkovému kolapsu nosníku, protože stojina byla tvořena jednovrstvým tepelně tvrzeným sklem. U nosníku 02 došlo k ukončení experimentu dosažením nastavené limitní hodnoty posunu hydraulického lisu.

V grafu 10 je zobrazena závislost vodorovné deformace horní hrany skleněné stojiny, měřená potenciometry POT1 a POT3, na ohybovém momentu. Potenciometr POT1 byl umístěn na okraji nosníku (řez A-A), POT3 uprostřed rozpětí nosníku (řez B-B), viz obr. 61.



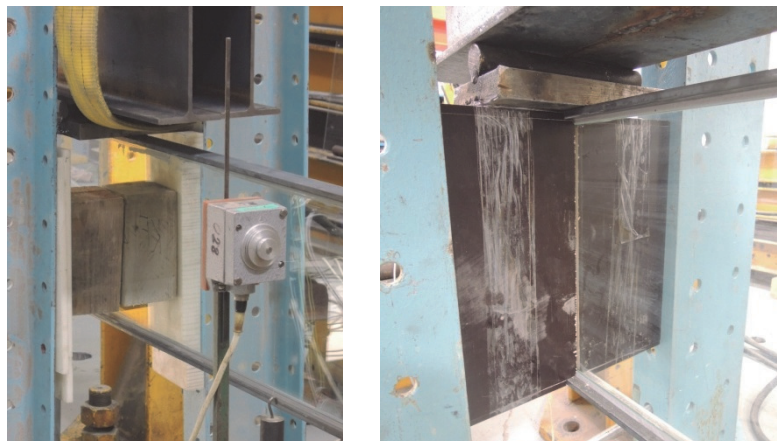
Obr. 61: Schéma osazení potenciometrů POT1 a POT3



Graf 10: Závislost ohybového momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny

Z grafu 10 je zřejmé, že nosník 01 se choval odlišně než nosníky 02 a 03. Nosník 01 měl větší příčný posun na okraji nosníku (v řezu A-A) než uprostřed rozpětí nosníku (v řezu B-B). U nosníků 02 a 03 byl větší příčný posun uprostřed rozpětí nosníku (v řezu B-B). Příčinou byl zřejmě způsob příčného držení, který byl u nosníku 01 odlišný než u zbylých zkušebních těles. Proti příčnému posunu a natočení kolem osy nosníku byla

držena u nosníku 01 totiž pouze skleněná stojina. U nosníků 02 a 03 byly drženy i obě ocelové pásnice, viz obr. 62.



Obr. 62: Držení nosníku proti příčnému posunu, vlevo - nosník 01, vpravo - nosník 02 a 03

V tab. 13 jsou shrnuty výsledky pro jednotlivé nosníky.

Tab. 13: Souhrn výsledků pro hybridní nosníky délky 4750 mm

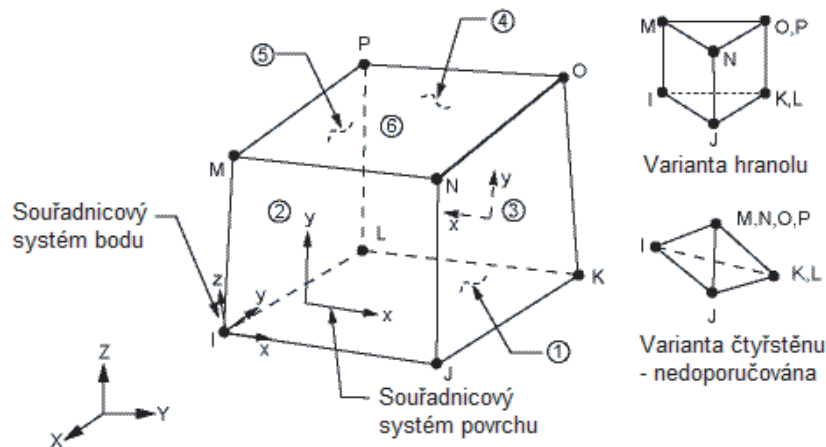
Označ. vzorku	Max. síla $F$ [kN]	Max. moment $M$ [kNm]	Příčný posun skla uprostřed rozpětí nosníku při dosažení max. síly [mm]	Příčný posun skla uprostřed rozpětí nosníku při porušení [mm]	Max. průhyb [mm]	Max. tahové napětí ve skle [MPa]
01	50,35	20,14	11,3	92,5	16,4	42,75
02	48,79	19,52	10,0	50,7	14,3	41,53
03	46,63	18,65	16,6	46,6	15,3	46,09

Z tab. 13 je patrné, že při experimentech zaměřených na ztrátu příčné a torzní stability bylo u všech vzorků dosaženo maximálního tahového napětí ve skle kolem 44 MPa. V porovnání s nosníkem 02 držným proti ztrátě příčné a torzní stability, viz kapitola 4.4.3, u kterého bylo dosaženo napětí ve skle 79 MPa, byla velikost normálového napětí ve skle o 44 % nižší.

## 5 Analytické a numerické modely

### 5.1 Numerický model skleněných nosníků

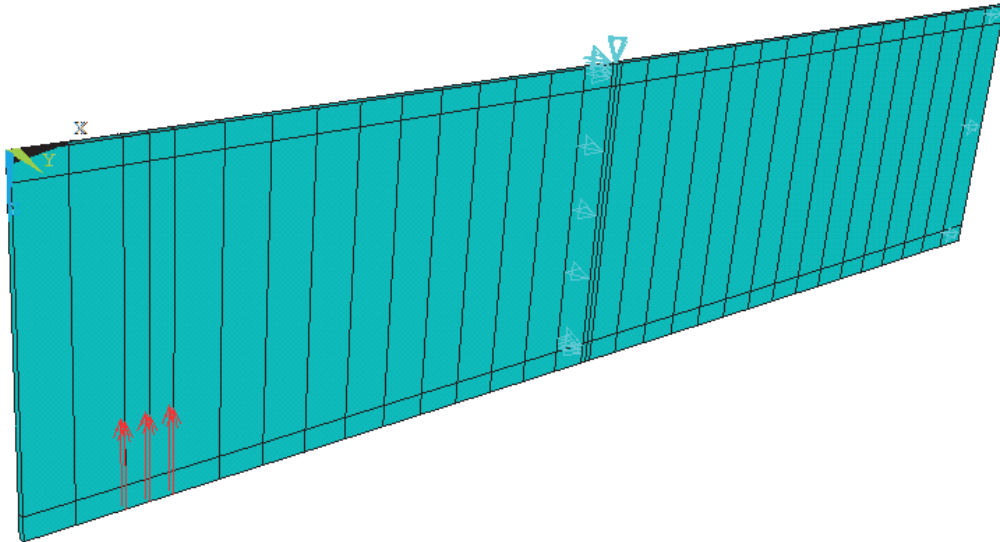
Numerický model skleněných nosníků byl vytvořen ve výpočetním programu ANSYS, verzi 11.0. Použity byly prostorové osmi-uzlové prvky SOLID45 se třemi stupni volnosti v každém uzlu (posuvy ve směrech  $x$ ,  $y$  a  $z$ ). Materiálový model skla byl zvolen lineárně izotropní s modulem pružnosti  $E = 70 \cdot 10^3$  MPa a Poissonovým číslem  $\nu = 0,23$ . Délka prvku sítě byla zvolena 10 mm.



Obr. 63: Geometrie prvku SOLID45

Vzhledem k tomu, že bylo možné využít symetrii, byla modelována pouze polovina nosníku. Okrajové podmínky byly vytvořeny tak, aby odpovídaly provedeným experimentům, tedy vodorovnému posunu bylo bráněno pouze v oblasti podpor (uspořádání dle varianty B, popsané v kapitole 4.1). Nosník byl zatížen bodovými silami působícími proti směru osy  $Z$ . Dále byly vytvořeny dvě liniové podpory ve vzdálenosti 700 mm od okraje nosníku. První z nich bránila posunu ve směru osy  $Z$ . Druhá liniová podpora probíhala po výšce nosníku a bránila příčnému posunu, tedy posunu ve směru osy  $Y$ .

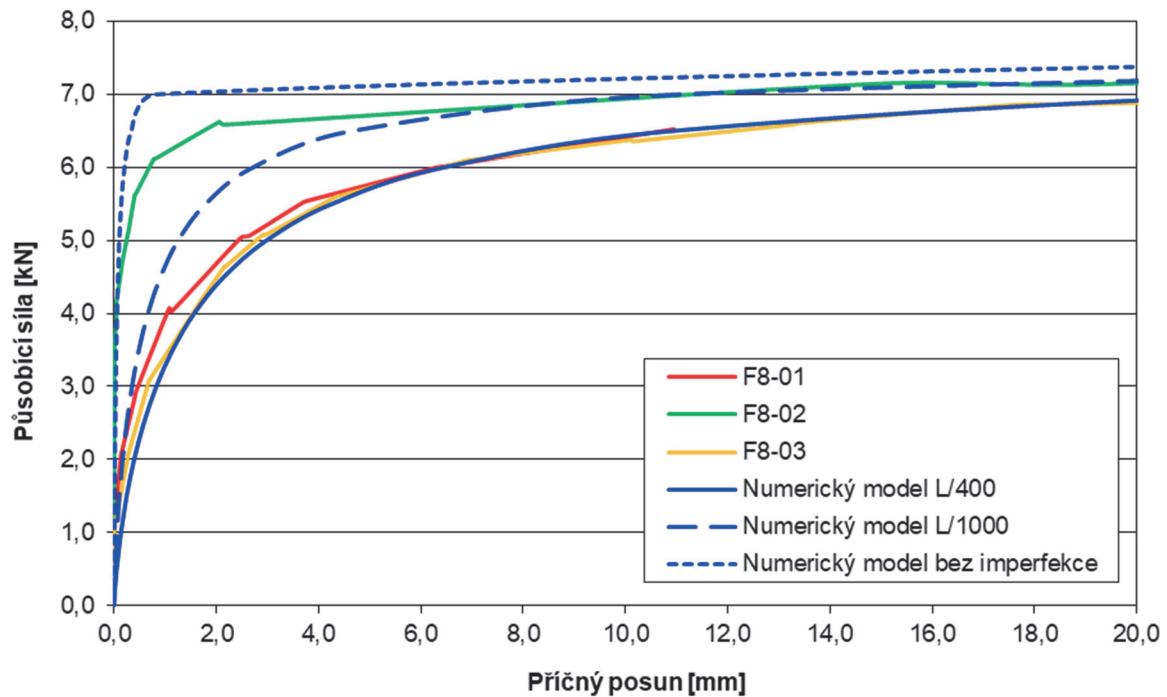




Obr. 64: Model skleněného nosníku

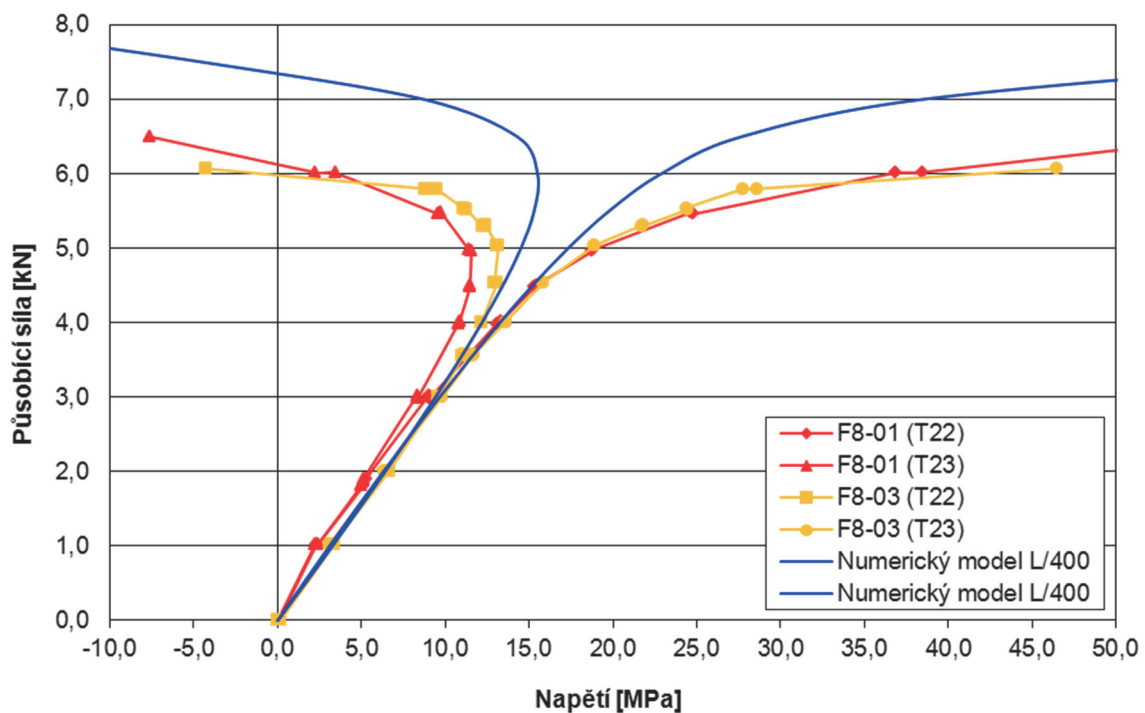
Nosník byl modelován zakřivený, aby byly zohledněny geometrické imperfekce, obr. 64. Deformace byla zavedena ve tvaru sinusoidy s amplitudou  $L/400$ . Nejprve byl vytvořen model nosníku z jednovrstvého skla tloušťky 8 mm. Následně byla stejná vstupní data použita i pro nosník z jednovrstvého skla tloušťky 10 mm, aby se ověřila správnost modelu.

V grafu 11 a 12 jsou patrné výsledky numerického modelu v porovnání s experimenty. V grafu 11 je zobrazena závislost příčného posunu na působící síle. Kromě výše popsaného modelu se zakřivením ve tvaru sinusoidy s amplitudou  $L/400$ , který nejlépe odpovídá vzorkům F8-01 a F8-03, jsou v grafu 11 uvedeny i výsledky pro model s amplitudou  $L/1000$  a model zcela bez imperfekce. Z výsledků numerického modelu je zřejmé, že vzorek F8-02 měl menší počáteční zakřivení než vzorky F8-01 a F8-03.



Graf 11: Závislost působící síly na příčné deformaci horní části průřezu uprostřed rozpětí nosníku tl. 8 mm

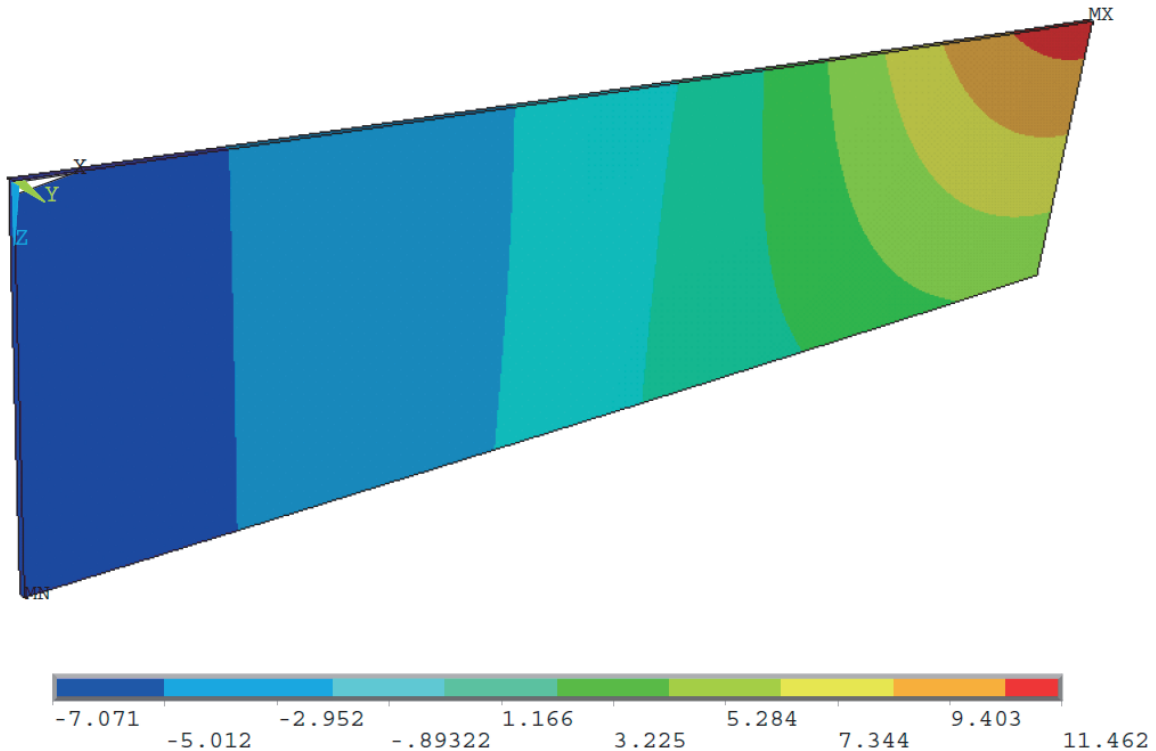
V grafu 12 je zobrazeno normálové napětí na tažené straně průřezu uprostřed rozpětí nosníku v závislosti na působící síle. V grafu jsou uvedeny výsledky vzorků F8-01, F8-03 a numerického modelu s amplitudou  $L/400$ .



Graf 12: Závislost působící síly na normálovém napětí na tažené straně průřezu uprostřed rozpětí nosníku tl. 8 mm

Z obou grafů je patrná velmi dobrá shoda naměřených hodnot při zkouškách s výsledky z numerického modelu.

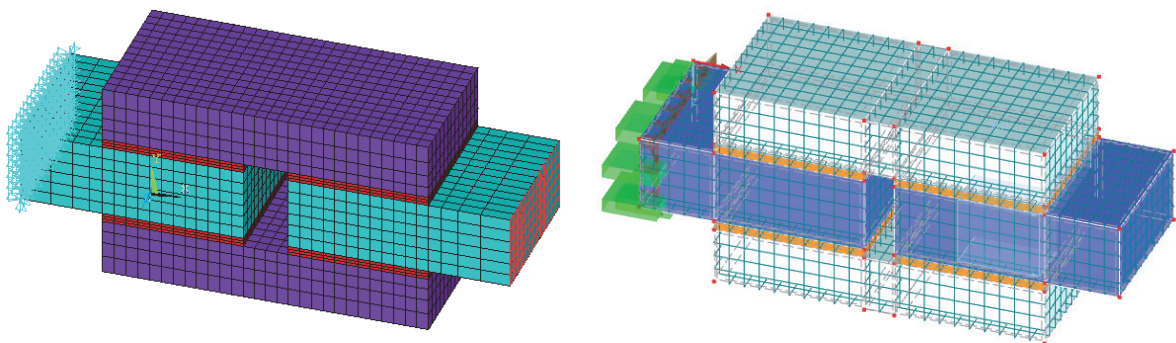
Na obr. 65 je zobrazena příčná deformace nosníku dosažená při působící síle 6,5 kN na modelu skleněného nosníku s amplitudou  $L/400$ .



Obr. 65: Příčná deformace numerického modelu skleněného nosníku

## 5.2 Numerický model smykových zkoušek

Numerický model smykových zkoušek byl vytvořen ve dvou výpočetních programech založených na metodě konečných prvků – v programu ANSYS, verzi 11.0 a RFEM 5.05, viz obr. 66. Popis obou numerických modelů je v následujících kapitolách.



Obr. 66: Modely smykových zkoušek lepidla SikaFast-5211 NT, vlevo - ANSYS, vpravo - RFEM

### 5.2.1 ANSYS 11.0

Model byl vytvořen pomocí prostorových prvků SOLID45 a SOLID185. Oba tyto prvky jsou osmi-uzlové se třemi stupni volnosti v každém uzlu (posuvy ve směrech  $x$ ,  $y$  a  $z$ ). Prvek SOLID45 byl použit pro ocelové a skleněné části, prvek SOLID185 pro vrstvu lepidla, neboť umožňuje poddajné chování spoje a velkou průtažnost materiálu.

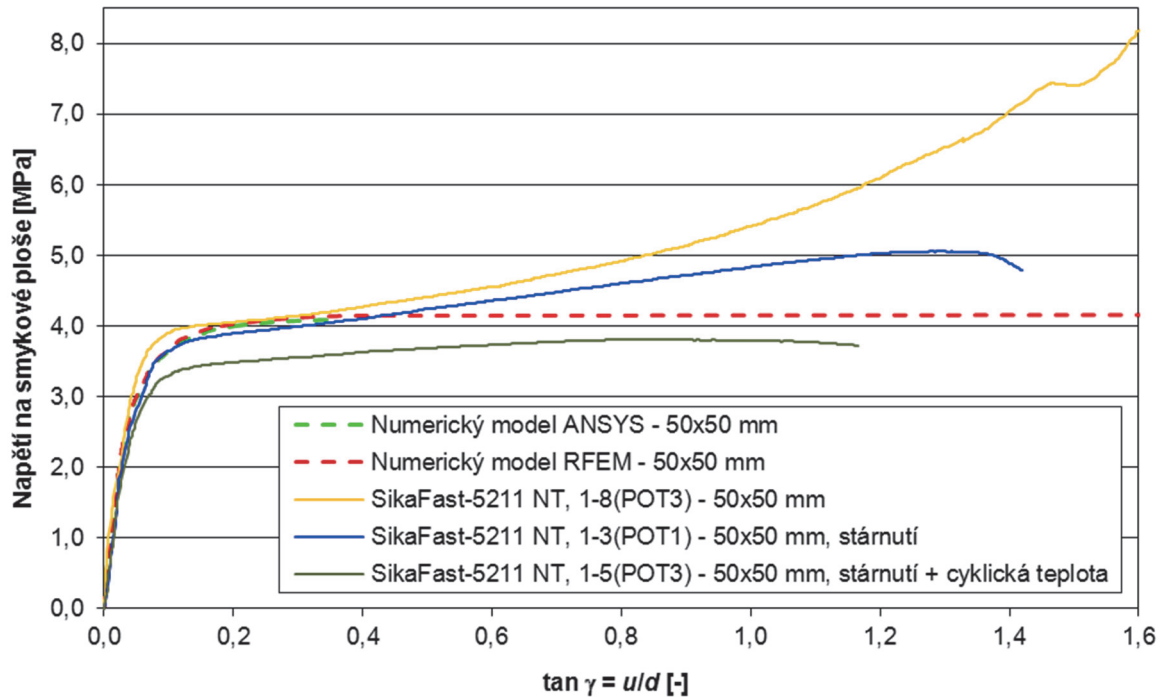
Materiálový model skla byl zvolen lineárně izotropní s modulem pružnosti  $E = 70 \cdot 10^3$  MPa a Poissonovým číslem  $\nu = 0,23$ . V případě ocelových prvků se v modelu předpokládá, že nedojde k překročení meze kluzu, tj. že chování materiálu bude lineárně pružné. Proto je volen materiál lineárně izotropní s modulem pružnosti  $E = 210 \cdot 10^3$  MPa a Poissonovým číslem  $\nu = 0,3$ . Pro popis chování akrylátového lepidla SikaFast-5211 NT byl zvolen multilineárně izotropní materiálový model. Model je definován počátečním modulem pružnosti, Poissonovým číslem a dále křivkou závislosti napětí na přetvoření. Počáteční modul pružnosti byl zvolen 260 MPa a Poissonovo číslo 0,4. Křivka definující závislost napětí na přetvoření je obsažena ve vstupním souboru programu ANSYS, který je přílohou této práce (Příloha 5).

### 5.2.2 RFEM 5.05

Model smykových zkoušek byl v programu RFEM 5.05 vytvořen pomocí těles. Tělesové prvky v programu RFEM mají osm uzlů se šesti stupni volnosti v každém uzlu. Materiálový model skla a oceli byl definován jako izotropní lineárně elastický, pro lepidlo byl zvolen izotropní plastický 2D/3D. Materiálové charakteristiky byly zvoleny shodně jako v programu ANSYS.

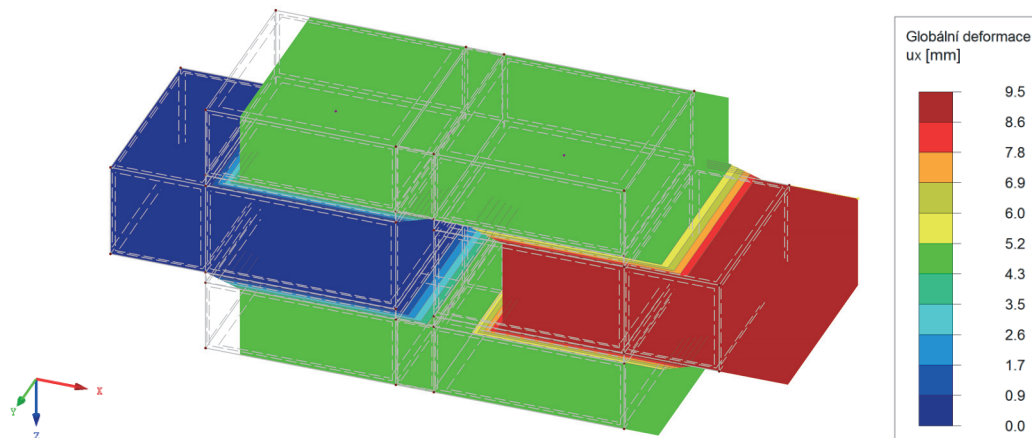
### 5.2.3 Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5211 NT

Graf 13 zobrazuje porovnání výsledků smykových zkoušek lepeného spoje s akrylátovým lepidlem SikaFast-5211 NT s oběma numerickými modely. Z grafu je zřejmé, že oba modely je možné použít pro popis chování lepidla SikaFast-5211 NT ve spoji.



Graf 13: Porovnání numerických modelů s experimentem, lepidlo SikaFast-5211 NT

Na obr. 67 je zobrazena deformace numerického modelu z programu RFEM.

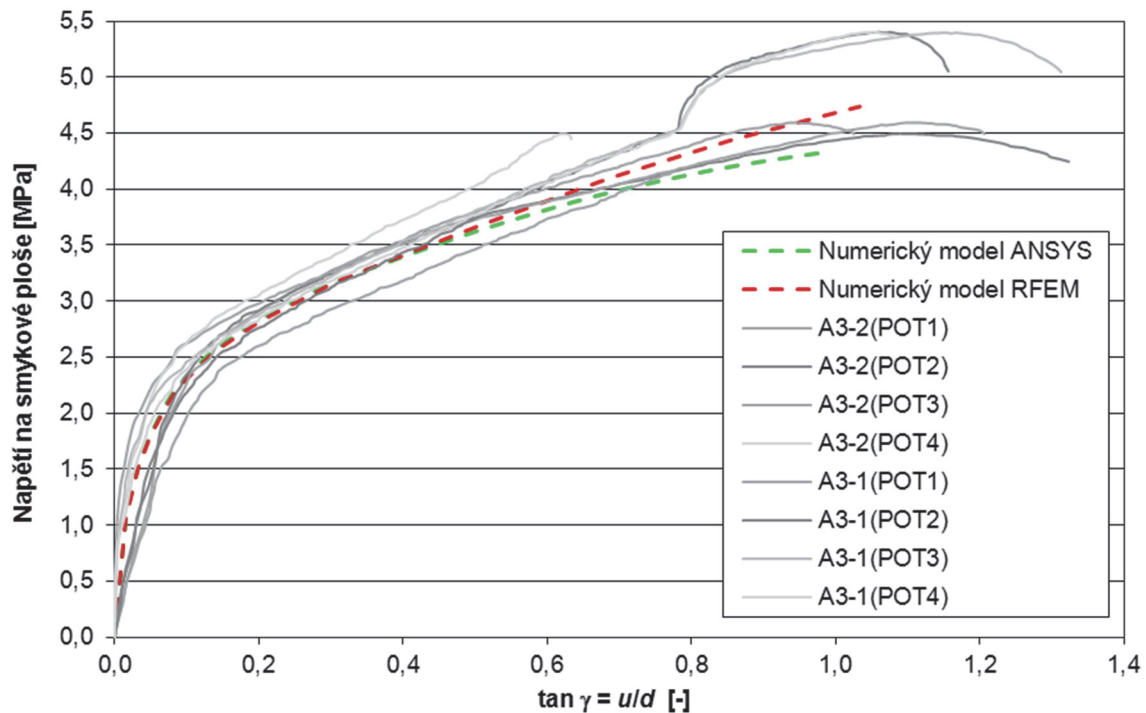


Obr. 67: Deformace spoje numerického modelu, RFEM

## 5.2.4 Numerické modely smykových zkoušek s lepidlem SikaFast-5211

Numerické modely smykových zkoušek byly vytvořeny i pro lepidlo SikaFast-5211 v programu ANSYS a RFEM. Materiálové modely lepidla byly zvoleny stejné, jako pro lepidlo SikaFast-5211 NT. V programu ANSYS se jednalo o multilineárně izotropní, v programu RFEM o izotropní plastický 2D/3D materiálový model. Počáteční modul pružnosti pro lepidlo SikaFast-5211 byl 186,5 MPa a Poissonovo číslo 0,4.

V grafu 14 je zobrazeno porovnání výsledků numerických modelů s hodnotami z experimentů provedených v rámci předchozího výzkumu, [22].



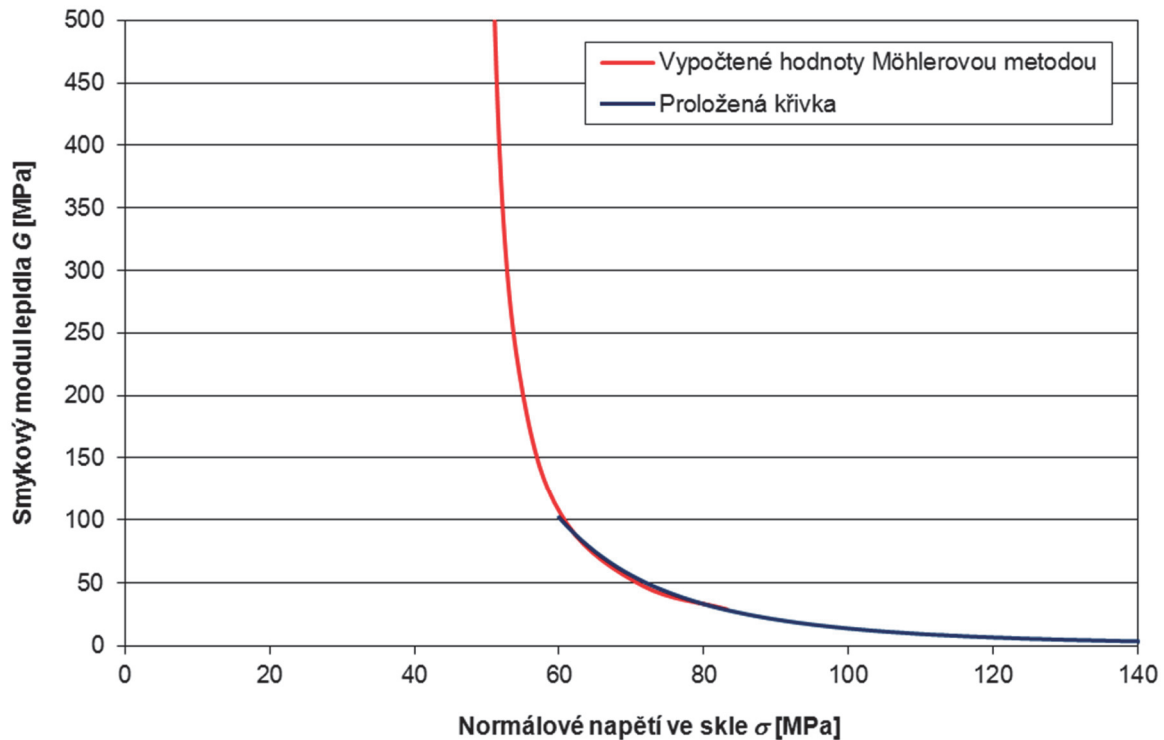
Graf 14: Porovnání numerických modelů s experimentem, lepidlo SikaFast-5211

### 5.3 Analytický model hybridního nosníku o délce 4250 mm

Pro určení průběhu normálového napětí po výšce průřezu i pro stanovení závislosti modulu pružnosti ve smyku lepidla na tahovém napětí ve skle lze použít modifikovanou Möhlerovu metodu. Základním předpokladem nemodifikované Möhlerovy metody je lineárně elastické chování lepidla, proto je nutné ji pro akrylátové lepidlo modifikovat, protože smykový modul lepidla není konstantní, ale mění se v závislosti na působícím zatížení, viz kapitola 2.3.2.2, [22], [23].

Hledány byly smykové moduly pružnosti lepidla pro různé hodnoty působícího ohybového momentu tak, aby napětí ve skle v místě tenzometrů spočtené Möhlerovou metodou odpovídalo experimentálně zjištěným hodnotám. Tímto způsobem byl vytvořen graf 15, který zobrazuje závislost smykového modulu lepidla na normálovém napětí na hraně skla, a je tak charakteristikou lepidla SikaFast-5215 NT o tloušťce 3 mm. Rovnice (5.1) popisuje proloženou křivku pro normálové napětí ve skle větší nebo rovno 60 MPa.

$$G = 842\,035\,601,36 \sigma^{-3,89} \quad (5.1)$$

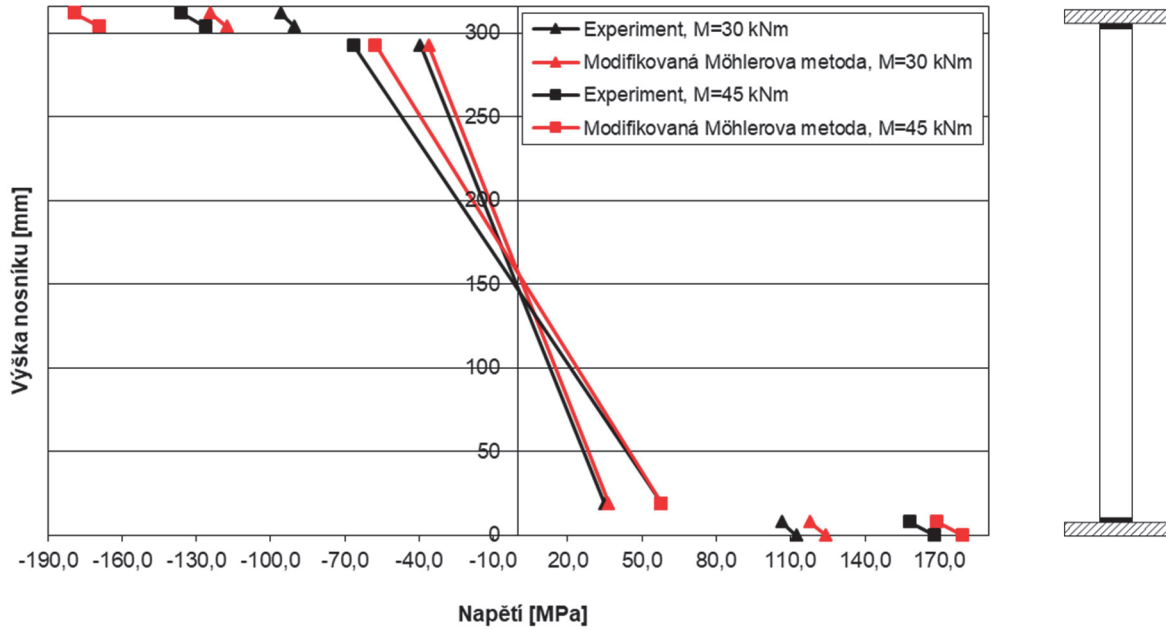


Graf 15: Závislost smykového modulu lepidla SikaFast-5215 NT na normálovém napětí ve skle

Z grafu 15 je patrné, že smykový modul pružnosti akrylátového lepidla SikaFast-5215 NT je do hodnoty normálového napětí ve skle přibližně 47 MPa vysoký, lepený spoj je tak tuhý. Po dosažení hodnoty normálového napětí ve skle přibližně 47 MPa dochází k poklesu smykového modulu pružnosti lepidla až na hodnotu přibližně 29 MPa pro normálové napětí ve skle o velikosti 80 MPa. V průběhu experimentu došlo při 80 MPa k porušení skleněné stojiny, proto již nebylo dosaženo nižší hodnoty smykového modulu pružnosti lepidla.

V grafu 16 je zobrazen průběh normálového napětí po průřezu hybridního nosníku pro různé ohybové momenty. Červeně jsou zde doplněny hodnoty získané modifikovanou Möhlerovou metodou, do které vstupuje proměnný smykový modul lepidla podle grafu 15, rovnice (5.1).

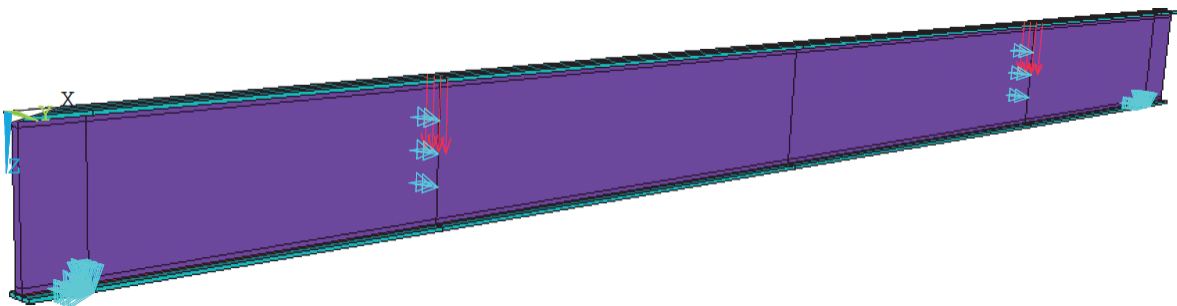
Z grafu 16 je patrné, že spočtené normálové napětí ve skleněné stojině dobře odpovídá hodnotám získaným při experimentu. Normálové napětí v ocelových pásnicích z experimentu a získané modifikovanou Möhlerovou metodou s použitím hodnot smykových modulů z grafu 15 se liší o maximálně 30 %. Vzhledem k tomu, že ocel nerozhoduje o únosnosti hybridního nosníku, protože dosažené napětí je menší než mez kluzu, je možné tento rozdíl zanedbat.



Graf 16: Průběh napětí po průřezu hybridního nosníku 02 s hodnotami z modifikované Möhlerovy metody

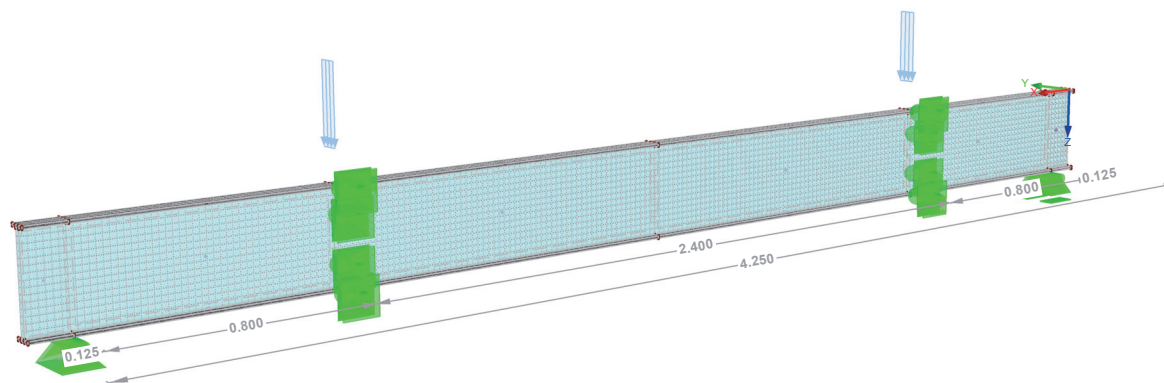
#### 5.4 Numerické modely hybridního nosníku o délce 4250 mm s příčným držením na ztrátu stability

Numerický model hybridního nosníku, který byl příčně držen na ztrátu stability, viz experimenty popsané v kapitole 4.4, byl vytvořen ve dvou výpočetních programech – v programu ANSYS, verzi 11.0 a RFEM 5.05, viz obr. 68 a 69. Popis obou numerických modelů je v následujících kapitolách.



Obr. 68: Model hybridního nosníku, ANSYS





Obr. 69: Model hybridního nosníku, RFEM

### 5.4.1 ANSYS 11.0

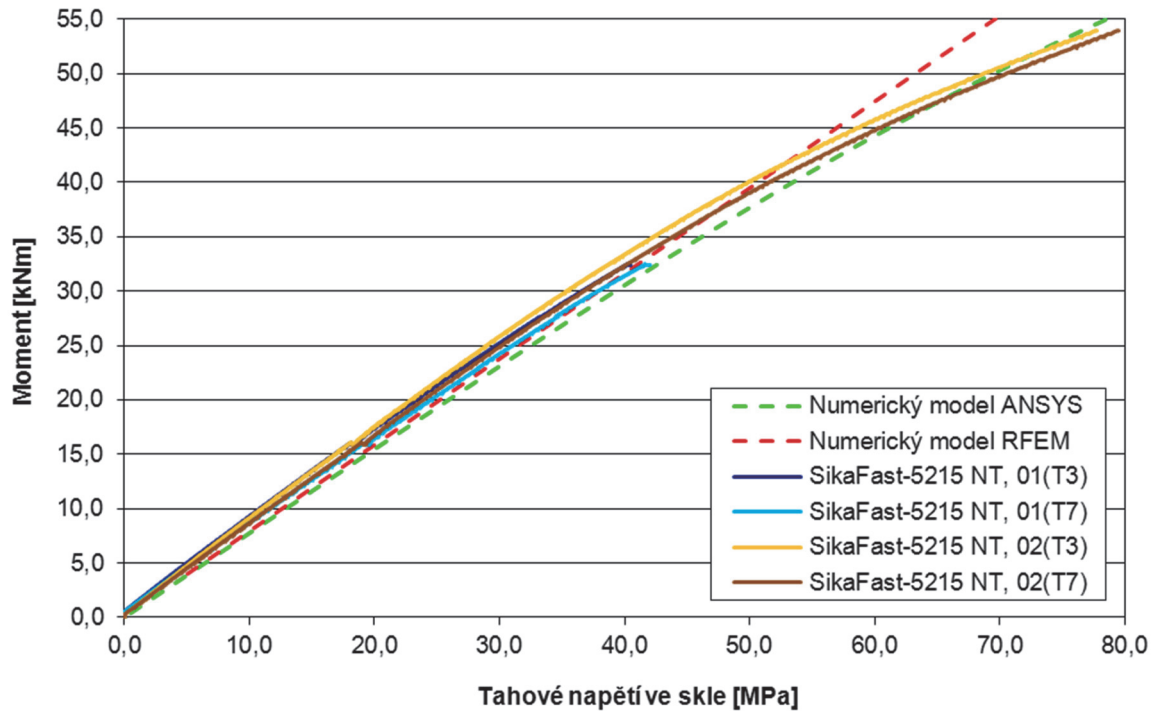
Model hybridního nosníku byl vytvořen pomocí prostorových osmi-uzlových prvků SOLID185. Materiálový model skla byl zvolen lineárně izotropní s modulem pružnosti  $E = 70 \cdot 10^3$  MPa a Poissonovým číslem  $\nu = 0,23$ . V případě ocelových prvků se v modelu předpokládá, že nedojde k překročení meze kluzu, tj. že chování materiálu bude lineárně pružné. Proto byl zvolen materiál lineárně izotropní s modulem pružnosti  $E = 210 \cdot 10^3$  MPa a Poissonovým číslem  $\nu = 0,3$ . Pro popis chování akrylátového lepidla SikaFast-5215 NT byl zvolen multilineárně izotropní materiálový model, stejně jako v modelu smykových zkoušek lepeného spoje, viz kapitola 5.2.1. Počáteční modul pružnosti byl zvolen 260 MPa a Poissonovo číslo 0,4. Křivka definující závislost napětí na přetvoření je obsažena ve vstupním souboru programu ANSYS, který je přílohou této práce (Příloha 6). Okrajové podmínky byly vytvořeny tak, aby odpovídaly provedeným experimentům. Model nosníku byl prostě podepřen na rozpětí 4,0 m, v místech vnášení zatížení bylo bráněno příčnému posunu nosníku.

### 5.4.2 RFEM 5.05

Numerický model hybridního nosníku ve výpočetním programu RFEM 5.05 byl vytvořen pomocí osmi-uzlových tělesových prvků, které mají šest stupňů volnosti v každém uzlu. Materiálový model skla i oceli byl izotropní lineárně elastický. Pro lepidlo byl zvolen materiálový model izotropní plastický 2D/3D se stejnými charakteristikami jako v modelu v programu ANSYS.

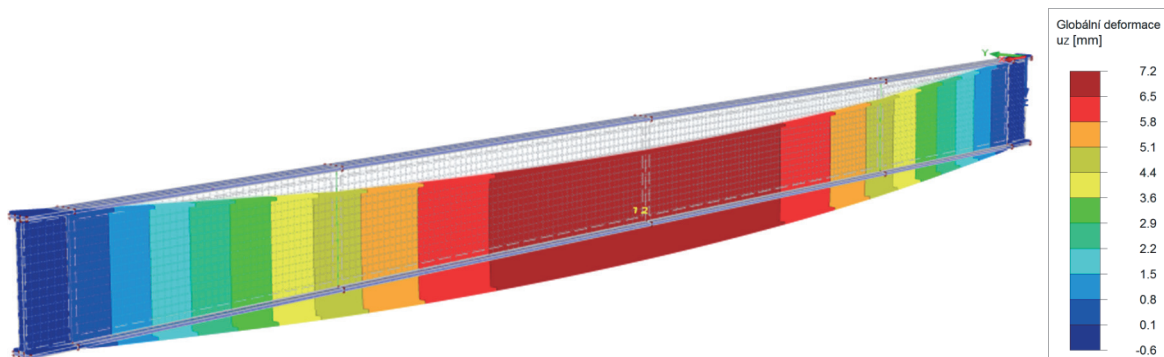
### 5.4.3 Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5215 NT

Graf 17 zobrazuje porovnání výsledků zkoušek hybridních nosníků s akrylátovým lepidlem SikaFast-5215 NT s oběma numerickými modely. Z grafu je zřejmé, že oba modely je možné použít pro popis chování hybridního nosníku.

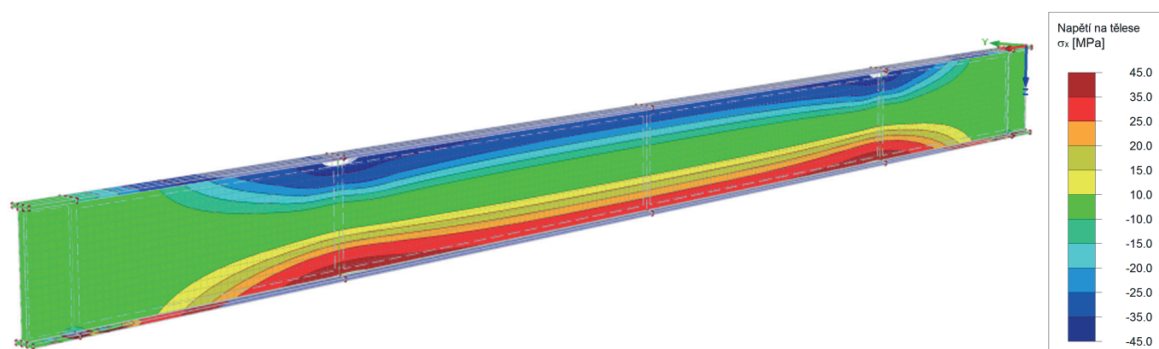


Graf 17: Porovnání numerických modelů s experimenty

Na obrázku 70 a 71 je zobrazen průhyb nosníku a průběh normálového napětí ve skleněné stojně při ohybovém momentu 24 kNm z programu RFEM.



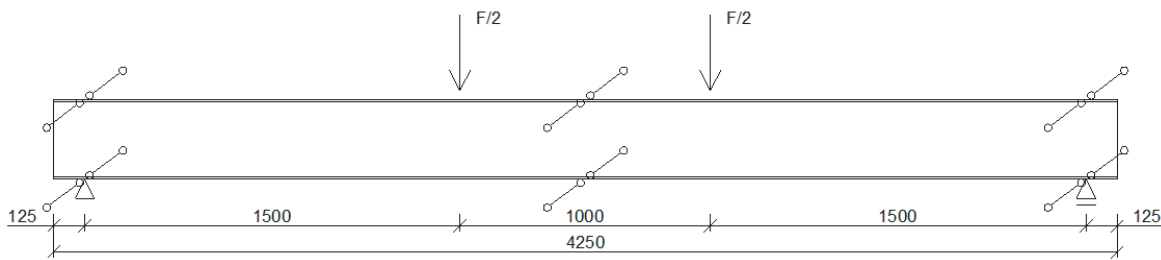
Obr. 70: Výsledky numerického modelu RFEM, svislá deformace nosníku



Obr. 71: Výsledky numerického modelu RFEM, normálové napětí ve skleněné stojně

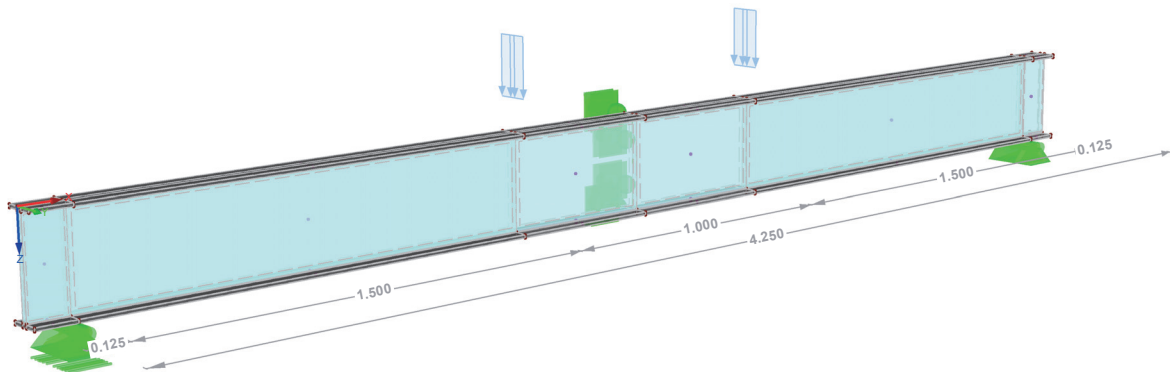
#### 5.4.4 Srovnání výsledků lepidel SikaFast-5215 NT a SikaFast-5211

I pro hybridní nosník bylo možné vytvořit srovnání nového lepidla SikaFast-5215 NT s jeho předchůdcem SikaFast-5211. Data lepidla SikaFast-5211 bylo možné použít z předchozího výzkumu, [22]. Vzhledem k tomu, že schéma uspořádání zkoušek stejně jako i průřez nosníku se u starého a nového lepidla lišil, bylo nutné provést srovnání pomocí numerických modelů. Porovnání výsledků bylo provedeno na nosníku s rozměry ocelových pásnic  $100 \times 10$  mm se schématem uspořádání podle obr. 72. Nosník byl příčně držen v podporách a uprostřed rozpětí.



Obr. 72: Schématické uspořádání experimentu hybridního nosníku s lepidlem SikaFast-5211

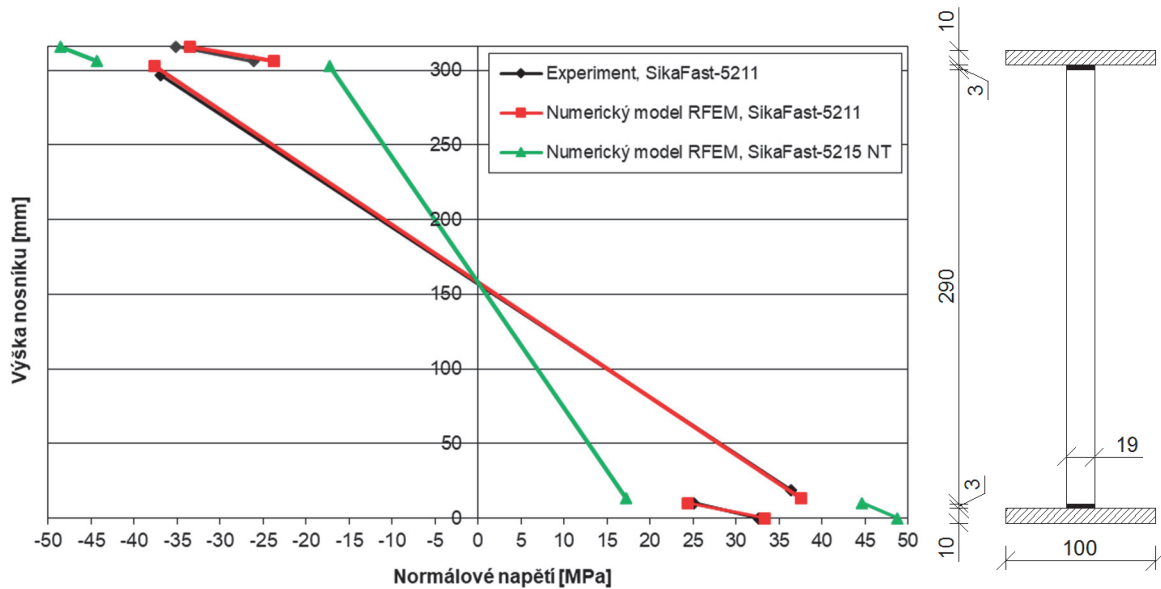
Obr. 73 zobrazuje numerický model vytvořený v programu RFEM 5.05. Na stejném numerickém modelu proběhl jeden výpočet pro lepidlo SikaFast-5211 a druhý pro lepidlo SikaFast-5215 NT. V obou případech byl použit izotropní plastický 2D/3D materiálový model lepidla, lišily se pouze charakteristiky lepidla. Pro SikaFast-5211 byl počáteční modul pružnosti 25 MPa a Poissonovo číslo 0,4. U lepidla SikaFast-5215 NT byl počáteční modul pružnosti 260 MPa a Poissonovo číslo 0,4.



Obr. 73: Numerický model vytvořený v programu RFEM pro porovnání výsledků s lepidlem SikaFast-5215 NT a SikaFast-5211

Graf 18 zobrazuje porovnání experimentu s numerickým modelem pro působící ohybový moment 18,9 kNm. V grafu je zobrazeno normálové napětí po výšce průřezu pro staré i nové lepidlo. Z grafu je zřejmé, že se u zkoušek hybridních nosníků potvrdilo chování nového lepidla, které je popsáno u tahových a smykových zkoušek lepeného spoje, viz kapitola 4.2.3 a 4.3.4. Nové akrylátové lepidlo SikaFast-5215 NT je tužší, proto

je patrný vyšší stupeň spolupůsobení mezi ocelí a sklem. To vede k výrazně nižšímu normálovému napětí na hranách skla, tedy k vyššímu normálovému napětí v ocelových pásnicích. Znamená to, že hybridní nosník s lepidlem SikaFast-5215 NT dosahuje vyšší únosnosti.



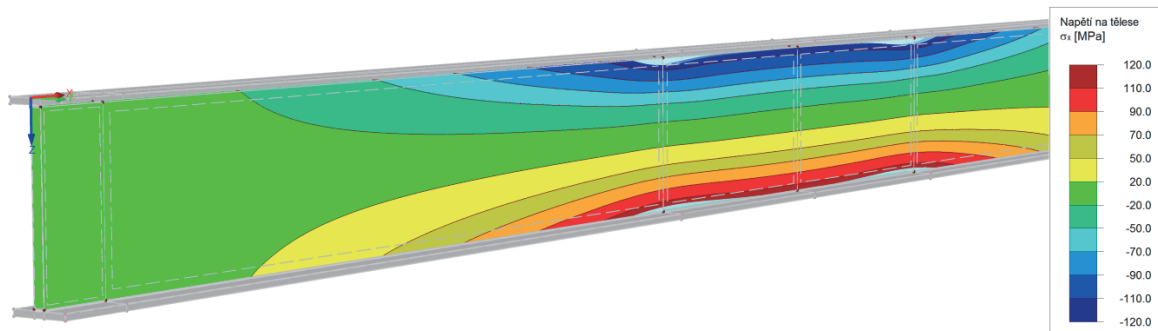
Graf 18: Normálové napětí po výšce průřezu hybridního nosníku při ohybovém momentu 18,9 kNm, porovnání výsledků z experimentu a numerických modelů

V tab. 14 je provedeno srovnání maximální dosažené síly, ohybového momentu a normálového napětí v ocelové pásnici pro obě lepidla při dosažení normálového napětí ve skle 120 MPa. Z tabulky je zřejmé, že s lepidlem SikaFast-5215 NT je možné nosník zatěžovat větší silou. Vzhledem k většímu spolupůsobení mezi ocelí a sklem je lépe využita ocelová pásnice, neboť normálové napětí zde dosahuje vyšší hodnoty. V porovnání s provedenými experimenty s lepidlem SikaFast-5211 je nárůst únosnosti při použití lepidla SikaFast-5215 NT o 36 %.

Tab. 14: Hodnoty pro max. normálové napětí ve skle 120 MPa

Sledované veličiny	SikaFast-5211 RFEM/Experiment	SikaFast-5215 NT RFEM
Síla [kN]	72,6 / 75,7	103,0
Moment [kNm]	54,5 / 56,8	77,3
Max. normálové napětí v ocelové pásnici [MPa]	86,7 / 94,4	167,7

Na obr. 74 je zobrazen průběh normálového napětí ve skleněné stojně při ohybovém momentu 54,5 kNm pro hybridní nosník s lepidlem SikaFast-5211.



Obr. 74: Výsledky numerického modelu RFEM, normálové napětí ve skleněné stojně

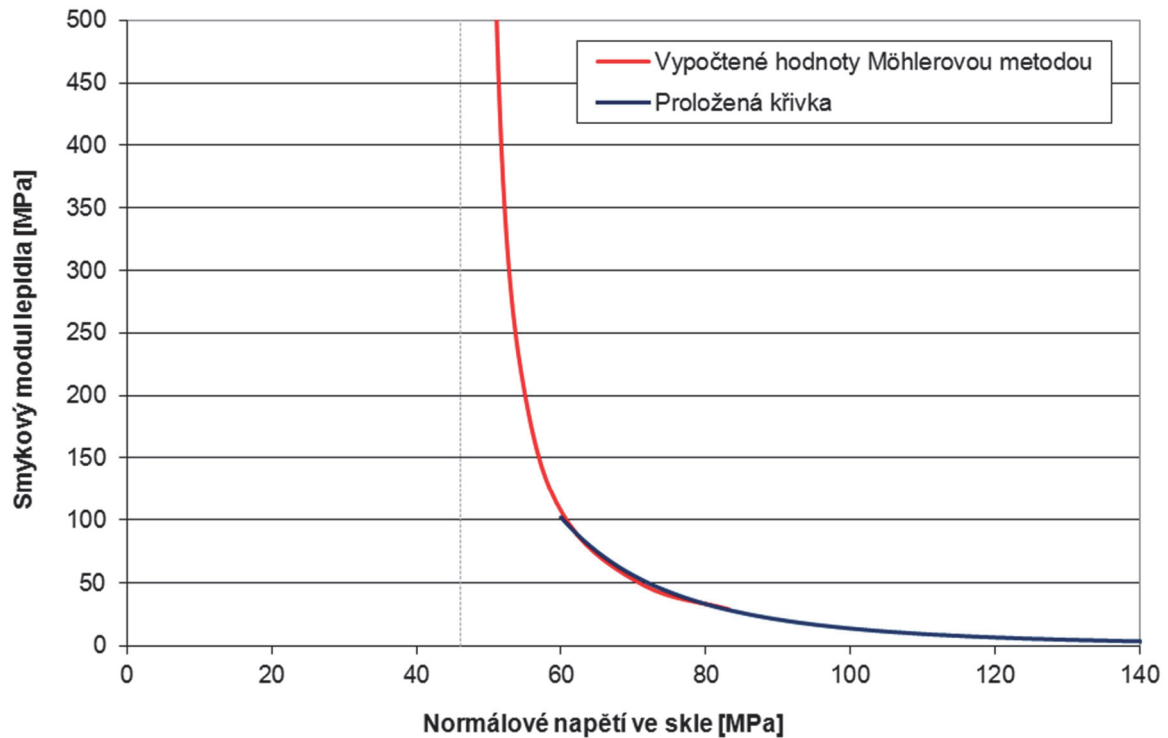
## 5.5 Výpočet kritického momentu hybridního nosníku

Pružný kritický moment při ztrátě příčné a torzní stability prostého nosníku zatíženého koncovými momenty je možné spočítat podle následující rovnice odvozené v kapitole 1.2, [1], [2], [3].

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left( G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} \right)} \quad (5.2)$$

Výpočet kritického momentu byl proveden nejen pro hybridní nosník, ale i pro samotnou skleněnou stojinu. Porovnáním velikostí kritických momentů je zřejmé, že ocelové pásnice mají významný vliv na odolnost nosníku proti ztrátě příčné a torzní stability.

V případě hybridního nosníku s lepidlem SikaFast-5215 NT se pohybujeme v oblasti, kde se lepidlo chová lineárně, viz kapitoly 4.5.4 a 5.3, ze kterých je patrné, že během experimentů zaměřených na ztrátu příčné a torzní stability bylo dosaženo normálového napětí ve skle maximálně 46 MPa, což je v oblasti velmi vysokého smykového modulu pružnosti lepidla, viz graf 19. Do výpočtu kritického momentu tak není třeba zavádět poddajnost lepidla.



Graf 19: Závislost smykového modulu lepidla SikaFast-5215 NT na normálovém napětí ve skle

### 5.5.1 Kritický moment pro skleněnou stojinu

Výpočet kritického momentu byl proveden pro samotnou skleněnou stojinu hybridního nosníku. Sklo mělo následující parametry:  $h = 290$  mm,  $L = 2900$  mm a  $t = 10$  mm.

Pružný kritický moment je spočten podle rovnice (5.2).

$$I_z = \frac{1}{12} ht^3 = \frac{1}{12} 290 \cdot 10^3 = 24166,7 \text{ mm}^4, \quad (5.3)$$

$$I_t = \frac{1}{3} ht^3 = \frac{1}{3} 290 \cdot 10^3 = 96666,7 \text{ mm}^4, \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \left( G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{\pi^2 70000 \cdot 24166,7}{2900^2} \left( 28455,3 \cdot 96666,7 + \frac{\pi^2 70000 \cdot 0}{900^2} \right)} = \\ &= 2,34 \cdot 10^6 \text{ Nmm}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Kritický moment pro samotnou skleněnou stojinu vychází  $M_{cr} = 2,34$  kNm.

### 5.5.2 Kritický moment hybridního sklo-ocelového nosníku

Kritický moment hybridního sklo-ocelového nosníku lze spočítat podle následujícího vztahu.

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 (EI_z)_{eff}}{L^2} \left( (GI_t)_{eff} + \frac{\pi^2 (EI_w)_{eff}}{L^2} \right)} \quad (5.6)$$

Při výpočtu následujících charakteristik průřezu je uvažován tuhý spoj mezi skleněnou stojinou a ocelovými pásnicemi.

$$\begin{aligned} (EI_z)_{eff} &= E_{glass} I_{z,glass} + E_{steel} I_{z,steel} = \\ &= 70000 \cdot \frac{1}{12} 290 \cdot 10^3 + 210000 \cdot 2 \cdot \frac{1}{12} 8 \cdot 40^3 = \\ &= 1,96 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2, \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} (GI_t)_{eff} &= G_{glass} I_{t,glass} + G_{steel} I_{t,steel} = \\ &= 28455,3 \cdot \frac{1}{3} 290 \cdot 10^3 + 80769,2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{3} 8 \cdot 40^3 = \\ &= 3,85 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2, \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} (EI_w)_{eff} &= 210000 \cdot \frac{1}{4} (h_{glass} + 2h_{glue} + h_{steel})^2 I_{z,steel} = \\ &= 210000 \cdot \frac{1}{4} (290 + 2 \cdot 3 + 8)^2 85333,3 = \\ &= 4,14 \cdot 10^{14} \text{ Nmm}^2, \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \sqrt{\frac{\pi^2 1,96 \cdot 10^{10}}{2900^2} \left( 3,85 \cdot 10^9 + \frac{\pi^2 4,14 \cdot 10^{14}}{2900^2} \right)} = \\ &= 9,994 \cdot 10^6 \text{ Nmm}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

kde  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $I_z$  je moment setrvačnosti k ose  $z$ ,  $I_t$  je moment tuhosti v prostém kroucení,  $I_w$  je výsečový moment setrvačnosti a  $h$  je výška. Index *glass* označuje skleněnou stojinu, *steel* označuje ocelové pásnice a *glue* lepený spoj.

Kritický moment pro hybridní sklo-ocelový nosník vychází  $M_{cr} = 9,994 \text{ kNm}$ . Přidáním ocelových pásnic ke skleněné stojině zvýšíme kritický moment o 327 %.

### 5.6 Numerické modely hybridního nosníku o délce 4750 mm bez držení na ztrátu příčné a torzní stability

Numerické modely hybridního nosníku, který nebyl držen na ztrátu příčné a torzní stability, viz experimenty popsané v kapitole 4.5, byly vytvořeny ve třech různých

softwarech (LTBeam, ANSYS, RFEM). Jejich podrobný popis a srovnání je uvedeno v následujících kapitolách.

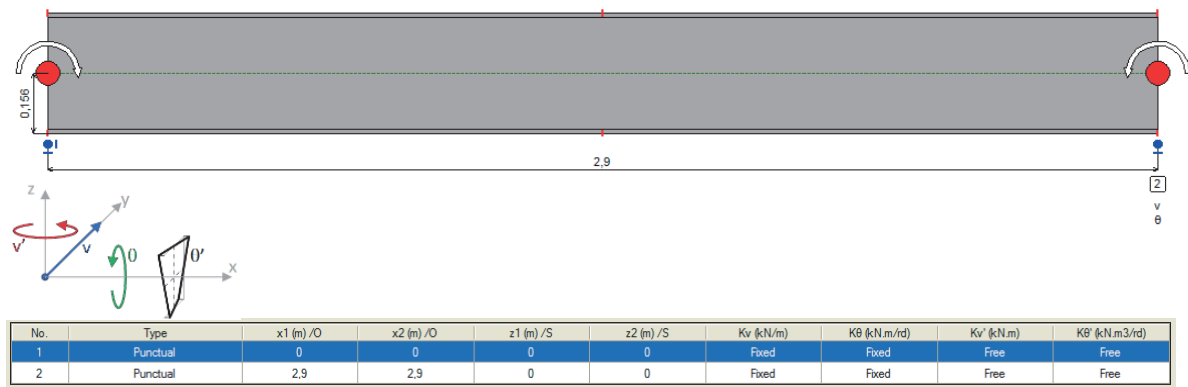
### 5.6.1 LTBeam

Výpočet kritického momentu byl proveden ve výpočetním software LTBeam. Tento software byl vytvořen CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Metallique - France) v rámci evropského výzkumného projektu.

V programu bylo vytvořeno několik modelů, které byly srovnány s ručním výpočtem a s výsledky experimentů.

#### 5.6.1.1 Model střední části nosníku

Nejprve byl vytvořen model A odpovídající ručnímu výpočtu. Jednalo se tedy pouze o střední část nosníku o délce 2900 mm, prostě podepřenou a zatíženou koncovými momenty. Příčnému posunu a natočení nosníku kolem vodorovné osy nosníku bylo bráněno na obou okrajích. Natočení kolem svislé osy nosníku bráněno nebylo, viz obr. 75.



Obr. 75: Model A střední části nosníku LTBeam - příčné podpory

Pro materiál průřezu bylo zvoleno sklo, ale samotný průřez byl definován pomocí charakteristik spočtených podle následujících vztahů. Opět byl uvažován tuhý spoj mezi skleněnou stojinou a ocelovými pásnicemi.

$$h = h_{glass} + 2h_{steel} + 2h_{glue} = 312 \text{ mm}, \quad (5.11)$$

$$A = \frac{A_{glass}E_{glass} + A_{steel}E_{steel}}{E_{glass}} = 4910 \text{ mm}^2, \quad (5.12)$$

$$I_y = \frac{E_{glass}I_{y,glass} + E_{steel}I_{y,steel}}{E_{glass}} = 6469,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \quad (5.13)$$

$$I_z = \frac{E_{glass}I_{z,glass} + E_{steel}I_{z,steel}}{E_{glass}} = 28,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \quad (5.14)$$

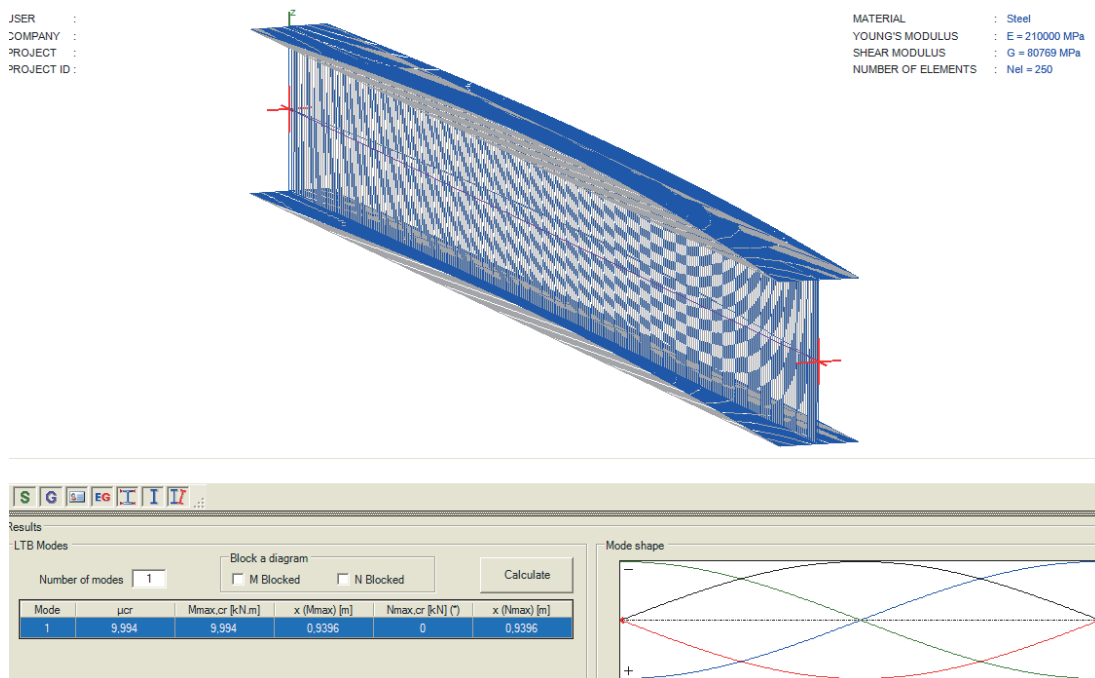


$$I_t = \frac{G_{glass} I_{t,glass} + G_{steel} I_{t,steel}}{G_{glass}} = 13,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \quad (5.15)$$

$$I_w = \frac{E_{glass} I_{w,glass} + E_{steel} I_{w,steel}}{E_{glass}} = 5915 \cdot 10^6 \text{ mm}^6, \quad (5.16)$$

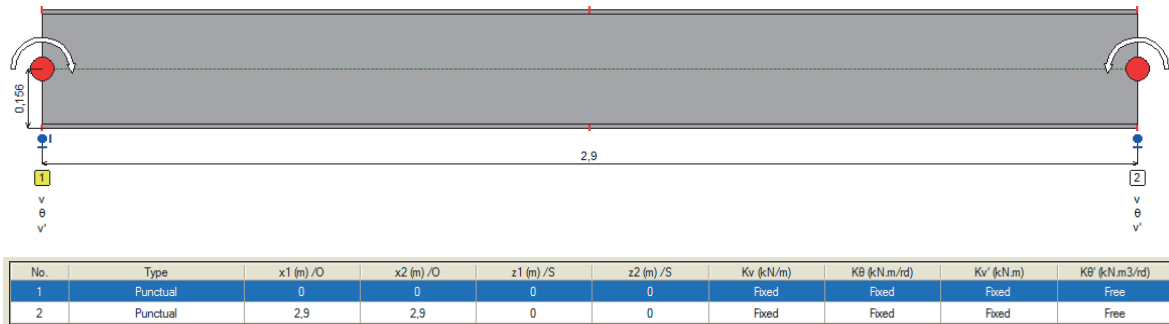
kde  $h$  je výška,  $A$  je plocha,  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $I_y$  je moment setrvačnosti k ose  $y$ ,  $I_z$  je moment setrvačnosti k ose  $z$ ,  $I_t$  je moment tuhosti v prostém kroucení a  $I_w$  je výsečový moment setrvačnosti. Index *glass* označuje skleněnou stojinu, *steel* označuje ocelové pásnice a *glue* lepený spoj.

Kritický moment v programu LTBeam vyšel zcela shodně jako při ručním výpočtu, tedy  $M_{cr} = 9,994 \text{ kNm}$ , viz obr. 76.



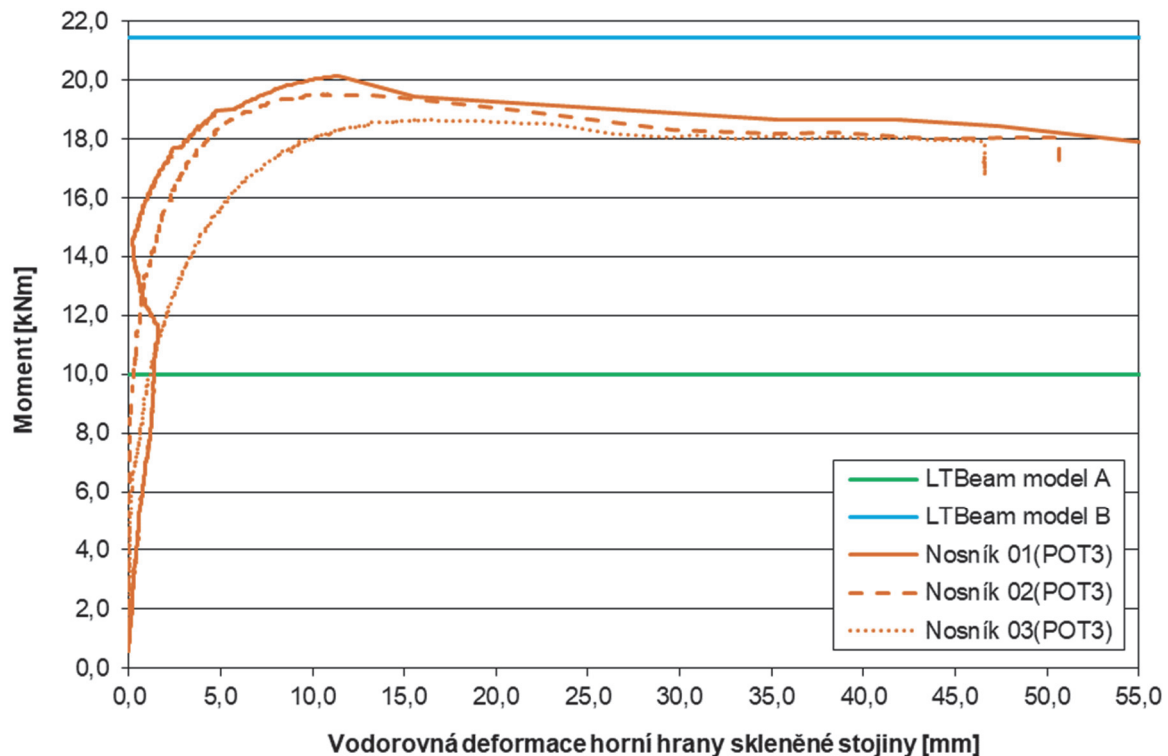
Obr. 76: Model A střední části nosníku LTBeam - výsledky

Následně byl vytvořen model B, který se oproti modelu A lišil pouze příčnými podporami. Na okrajích modelované části nosníku bylo bráněno nejen příčnému posunu a natočení kolem vodorovné osy nosníku, ale zabráněno bylo i natočení kolem svislé osy nosníku, viz obr. 77. Tím bylo dosaženo vyšší hodnoty kritického momentu  $M_{cr} = 21,45 \text{ kNm}$ .



Obr. 77: Model B střední části nosníku LTBeam - příčné podpory

Pokud porovnáme hodnoty kritických momentů spočtených pro oba popsané modely s hodnotami z experimentů, viz graf 20, zjistíme, že skutečná hodnota kritického momentu zkoušeného hybridního nosníku je větší než u modelu A, ale zároveň nižší než u modelu B. Způsobeno je to tím, že příčné držení při experimentech nebylo volné v natočení kolem svislé osy nosníku, ani zcela tuhé.

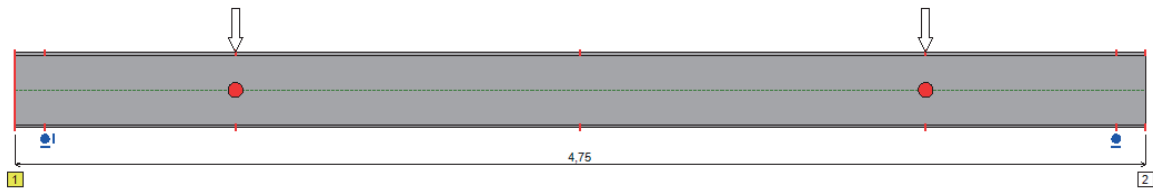


Graf 20: Závislost momentu na vodorovné deformaci nosníku - srovnání experimentu s kritickými momenty spočtenými v LTBeam na modelu A a B

### 5.6.1.2 Model celého hybridního nosníku

V programu LTBeam byl modelován i celý hybridní nosník, aby bylo zjištěno, jak se bude lišit hodnota kritického momentu spočtená na přesném modelu oproti hodnotě spočtené na zjednodušeném modelu střední části nosníku.

Nosník o délce 4,75 m byl prostě podepřen s rozpětím 4,5 m, příčné podepření bylo umístěno v místech vnášení zatížení, jejichž vzdálenost byla 2,9 m, viz obr. 78.



Obr. 78: Model celého hybridního nosníku LTBeam

Celkem byly vytvořeny tři modely hybridních nosníků, které se lišily typem příčných podpor.

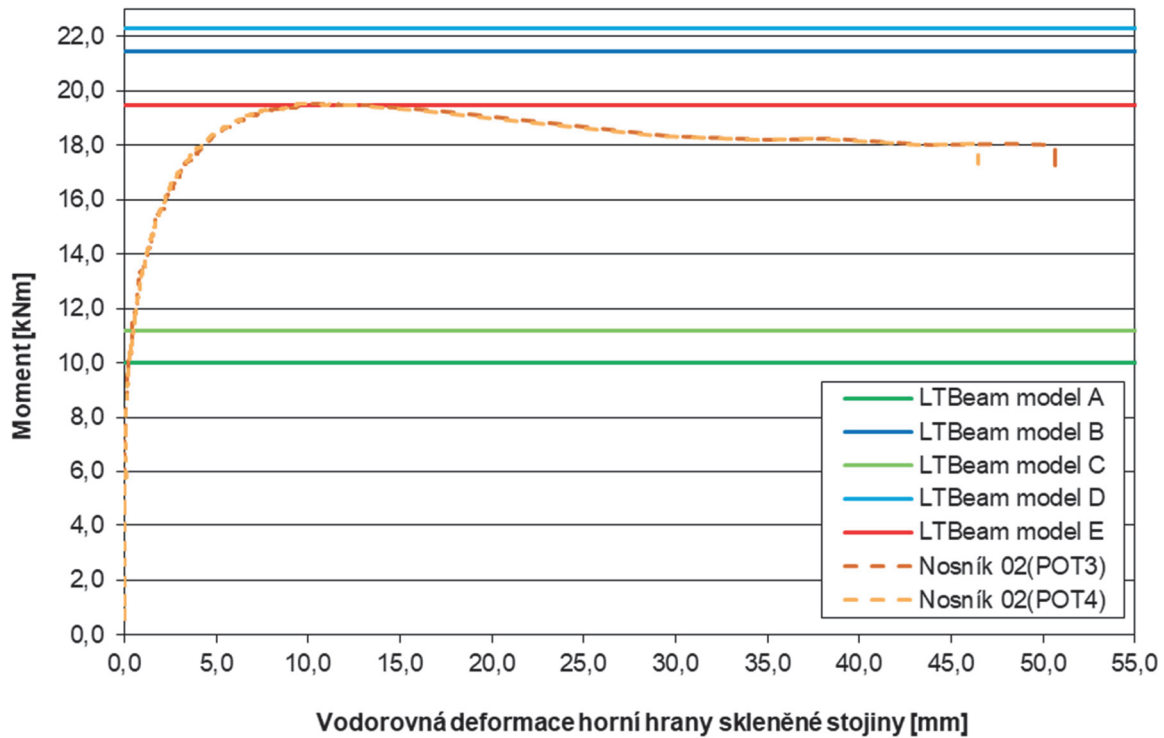
V modelu C byly zvoleny příčné podpory bránící pouze příčnému posunu a natočení kolem vodorovné osy nosníku (příčné podpory stejné jako ve zjednodušeném modelu A). Kritický moment pro tento typ příčných podpor vyšel  $M_{cr} = 11,19 \text{ kNm}$ .

Model D měl příčné podpory bránící příčnému posunu, natočení kolem vodorovné osy nosníku i natočení kolem svislé osy nosníku (příčné podpory stejné jako ve zjednodušeném modelu B). Kritický moment pro tento model hybridního sklo-ocelového nosníku vyšel  $M_{cr} = 22,3 \text{ kNm}$ .

Vzhledem k tomu, že je zřejmé, že příčné podepření při experimentech nebylo ani zcela volné, ani tuhé v natočení kolem svislé osy nosníku, byl vytvořen model E zcela odpovídající provedenému experimentu hybridního nosníku 02. K vyladění modelu byly použity příčné posuny nosníku 02 naměřené při experimentu na okrajích a uprostřed rozpětí nosníku. Tuhost v natočení kolem svislé osy nosníku byla v LTBeam zvolena tak, aby model vykazoval příčné posuny odpovídající experimentu. Jedné příčné podpoře tak byla nastavena pro natočení kolem svislé osy nosníku pružina s 150 kNm, druhé s 75 kNm. Pro nosník 02 tak vyšla hodnota kritického momentu  $M_{cr} = 19,45 \text{ kNm}$ , což zcela odpovídá experimentům, viz graf 21.

### 5.6.1.3 Porovnání

Na základě výše popsaných výsledků je zřejmé, že kritický moment spočtený na zjednodušeném modelu střední části hybridního nosníku (model A a B) vyšel nižší než na modelu celého hybridního nosníku (model C a D). Pro návrh je tak výpočet kritického momentu na zjednodušeném modelu bezpečný.



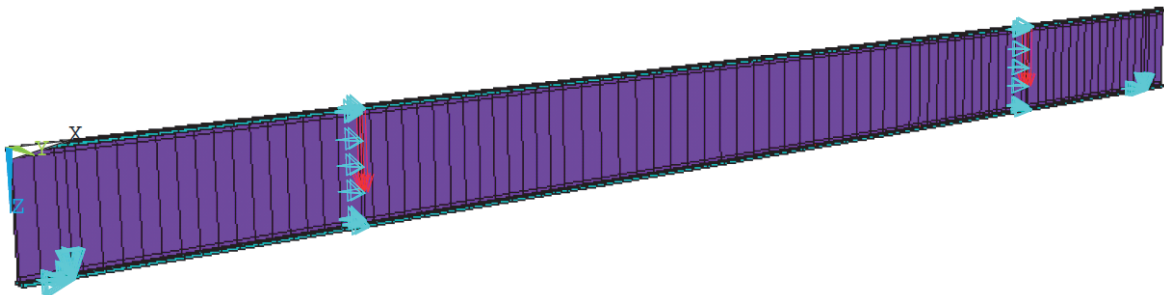
Graf 21: Závislost momentu na vodorovné deformaci nosníku - srovnání experimentu s kritickými momenty spočtenými v programu LTBeam

### 5.6.2 ANSYS 11.0

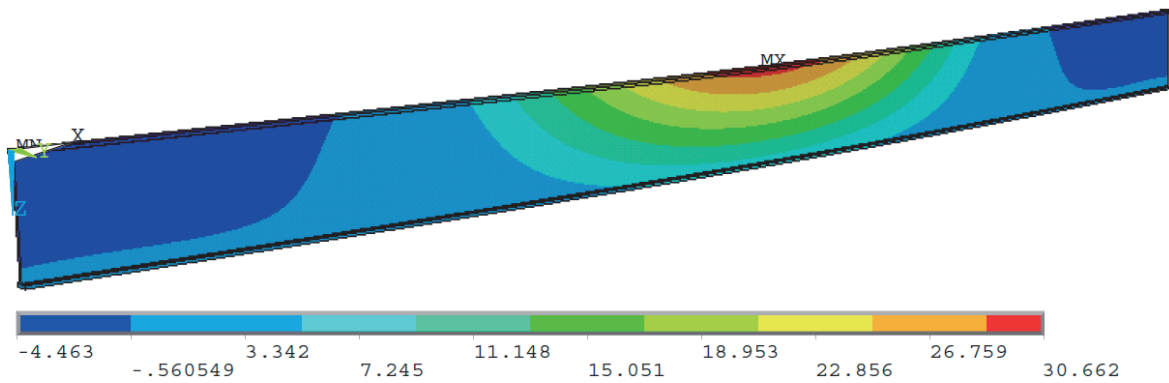
Pro numerický model hybridního nosníku byly použity stejné prostorové prvky i materiálové modely jako v případě nosníku o délce 4250 mm, viz kapitola 5.4.1.

Nosník byl modelován zakřivený, aby byly zohledněny jeho geometrické imperfekce. Deformace byla ve tvaru sinusoidy s amplitudou 2,5 mm ( $L/1800$ ), což byla imperfekce nosníku, která byla zaznamenána při laserovém skenování. Okrajové podmínky byly zvoleny shodně s experimentem, nosník byl prostě podepřen a v místech vnášení zatížení bylo bráněno příčnému posunu.

Na obr. 79 a 80 je zobrazen numerický model nosníku a max. příčná deformace nosníku. Vstupní soubor programu ANSYS je přílohou této práce (Příloha 7).



Obr. 79: Numerický model hybridního nosníku o délce 4750 mm, ANSYS



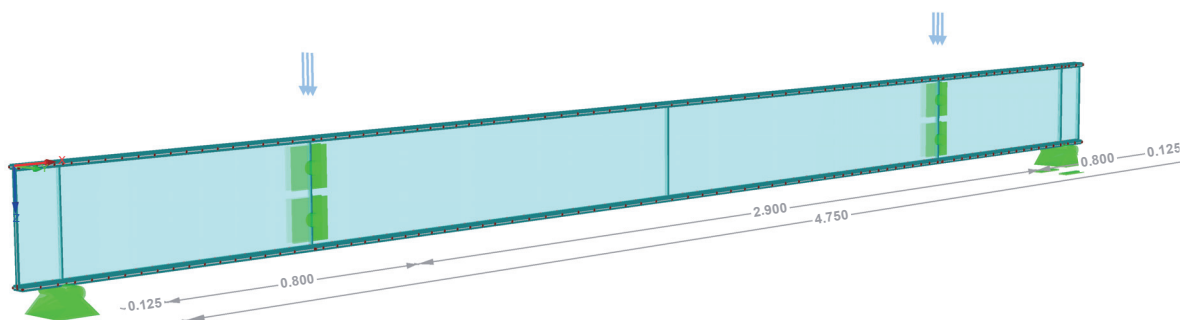
Obr. 80: Numerický model hybridního nosníku o délce 4750 mm – příčná deformace, ANSYS

### 5.6.3 RFEM 5.05

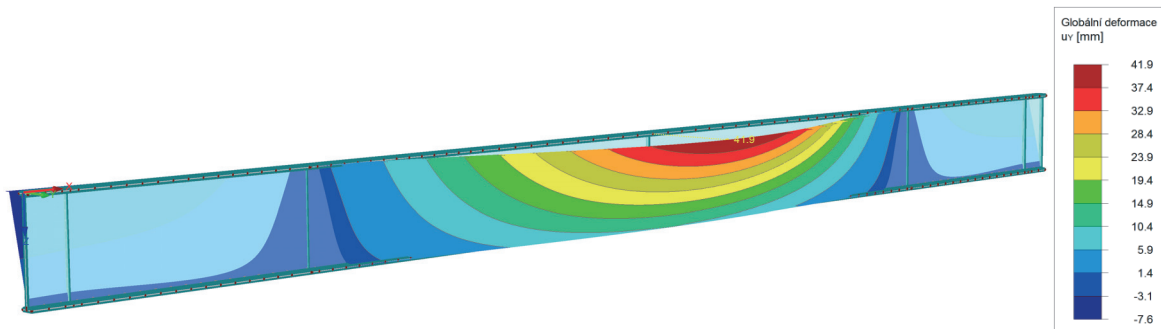
Numerický model hybridního nosníku o délce 4750 mm byl vytvořen pomocí plošných prvků. Geometrická imperfekce nosníku byla v modelu zohledněna zakřivením nosníku ve tvaru sinusoidy s různými hodnotami amplitud. Materiálový model skla i oceli byl izotropní lineárně elastický. Také pro lepidlo byl zvolen izotropní lineárně elastický materiálový model, protože z grafu 19 je zřejmé, že materiálové charakteristiky lepidla se během experimentů hybridních nosníků zaměřených na ztrátu příčné a torzní stability příliš neměnily, a není tak zapotřebí uvažovat poddajnost lepidla. Modul pružnosti byl zvolen 260 MPa, smykový modul pružnosti 93 MPa a Poissonovo číslo 0,4.

Výpočet byl proveden podle teorie velkých deformací s Newton-Raphsonovou metodou řešení soustavy nelineárních rovnic. Zvolena byla přírůstková metoda, při které dochází k postupnému navyšování zatížení k určení kritického zatížení.

Na obr. 81 a 82 je zobrazen numerický model nosníku a max. příčná deformace nosníku.



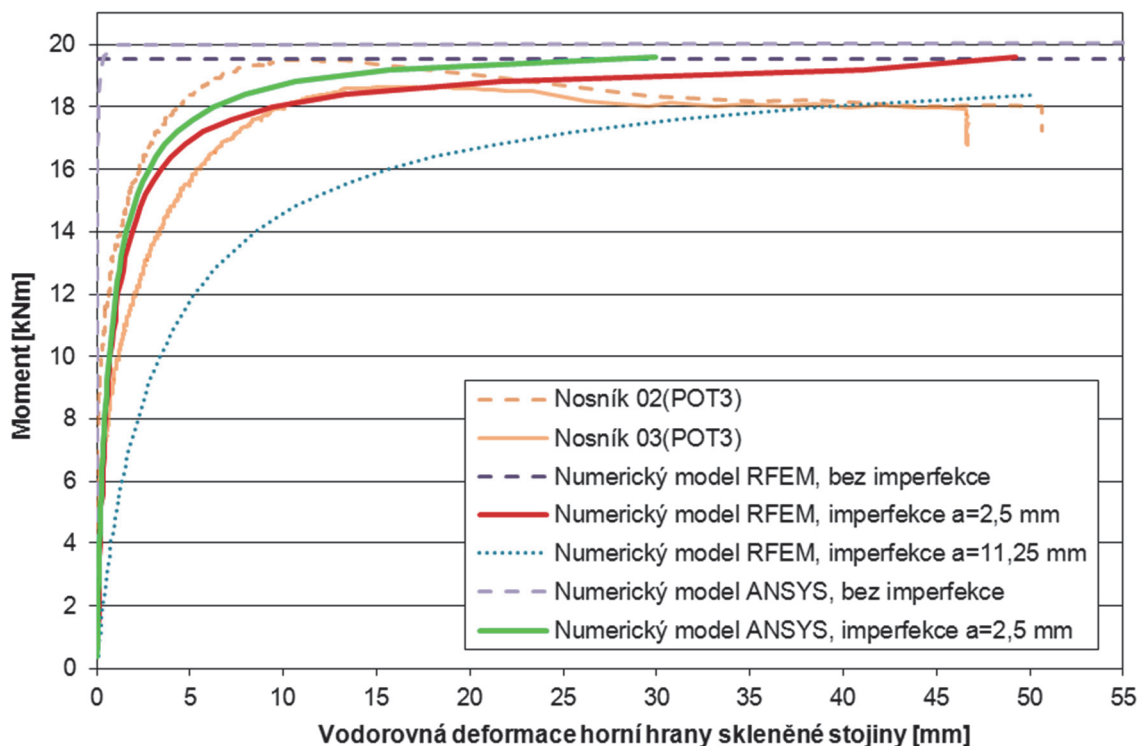
Obr. 81: Numerický model hybridního nosníku o délce 4750 mm, RFEM



Obr. 82: Numerický model hybridního nosníku o délce 4750 mm – příčná deformace, RFEM

#### 5.6.4 Výsledky numerických modelů s lepidlem SikaFast-5215 NT

V grafu 22 je zobrazena závislost ohybového momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny. Vyneseny jsou výsledky numerického modelu v porovnání s experimenty. Kromě numerických modelů se zakřivením ve tvaru sinusoidy s amplitudou 2,5 mm ( $L/1800$ ), které velmi dobře odpovídají zkoušeným nosníkům, jsou v grafu uvedeny i výsledky pro modely bez imperfekce. V grafu jsou také vyneseny hodnoty pro numerický model RFEM se zakřivením ve tvaru sinusoidy s amplitudou 11,25 mm ( $L/400$ ).



Graf 22: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny - srovnání experimentů s hodnotami z modelů

## 5.7 Maximální ohybový moment hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability

Maximální ohybový moment hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability je možné stanovit následujícím vztahem.

$$M_b = \chi_{LT} M_k, \quad (5.17)$$

kde  $\chi_{LT}$  je součinitel příčné a torzní stability a  $M_k$  je charakteristická hodnota ohybového momentu hybridního nosníku.

Nejprve spočteme charakteristickou hodnotu ohybového momentu hybridního nosníku  $M_k$ . K výpočtu použijeme modifikovanou Möhlerovu metodu popsanou v kapitole 2.3.2.2. Pomocí vztahu (5.1) spočteme smykový modul pružnosti lepidla SikaFast-5215 NT pro normálové napětí na hraně skla o velikosti 120 MPa, což odpovídá charakteristické hodnotě pevnosti v tahu za ohybu tepelně tvrzeného skla.

$$G_{120} = 842\,035\,601,36 \cdot \sigma^{-3,89} = 842\,035\,601,36 \cdot 120^{-3,89} = 6,88 \text{ MPa}. \quad (5.18)$$

Následně je hledána taková hodnota působícího ohybového momentu, aby napětí na hraně skla spočtené Möhlerovou metodou bylo rovno 120 MPa.

$$K_K = G_K \frac{b_k}{t_k} = 6,88 \frac{10}{3} = 22,9 \text{ MPa}, \quad (5.19)$$

$$k = \pi^2 \frac{E_a A_a}{L^2 K_K} = \pi^2 \frac{210000 \cdot (40 \cdot 8)}{4500^2 \cdot 22,9} = 1,43, \quad (5.20)$$

$$\gamma = \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+1,43} = 0,41, \quad (5.21)$$

$$n = \frac{E_G}{E_a} = \frac{70000}{210000} = \frac{1}{3}, \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} I_{y,eff} &= 2I_a + nI_G + 2\gamma A_a z_a^2 = \\ &= 2 \cdot 1707 + \frac{1}{3} 20324167 + 2 \cdot 0,41 \cdot 320 \cdot 152^2 = 12865500 \text{ mm}^4, \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$M_k = \frac{2\sigma_{r2} I_{y,eff}}{nh_w} = \frac{2 \cdot 120 \cdot 12865500}{\frac{1}{3} 290} = 31,94 \text{ kNm}. \quad (5.24)$$

Pro hybridní sklo-ocelový nosník s lepidlem SikaFast-5215 NT o délce 4750 mm (prostě podepřený na rozpětí 4500 mm), popisovaný v kapitole 4.5, vychází hodnota ohybového momentu  $M_k = 31,94 \text{ kNm}$ .

Abychom v tabulkách vzpěrnostních součinitelů pro ocelové konstrukce mohli nalézt hodnotu součinitele příčné a torzní stability  $\chi_{LT}$ , je nutné stanovit poměrnou štíhlost při klopení.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_k}{M_{cr}}}, \quad (5.25)$$

kde  $M_{cr}$  je pružný kritický moment, který byl pro nosník 02 stanoven na hodnotu  $M_{cr} = 19,45 \text{ kNm}$  v kapitole 5.6.1.2 (model E).

Dosazením do rovnice (5.25) získáme hodnotu poměrné štíhlosti při klopení pro zkoušený nosník 02.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{31,94}{19,45}} = 1,282 \quad (5.26)$$

V tab. 15 jsou uvedeny součinitelé příčné a torzní stability  $\chi_{LT}$  z tabulek vzpěrnostních součinitelů pro ocelové konstrukce pro spočtenou hodnotu poměrné štíhlosti.

Tab. 15: Součinitelé příčné a torzní stability pro hybridní nosník (model E)

$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{LT}$ pro křivku vzpěrné pevnosti			
	a	b	c	d
1,282	0,481	0,436	0,396	0,345

Maximální ohybové momenty hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability pro všechny křivky vzpěrné pevnosti jsou následující:

$$M_{b,a} = \chi_{LT,a} M_k = 0,481 \cdot 31,94 = 15,37 \text{ kNm}, \quad (5.27)$$

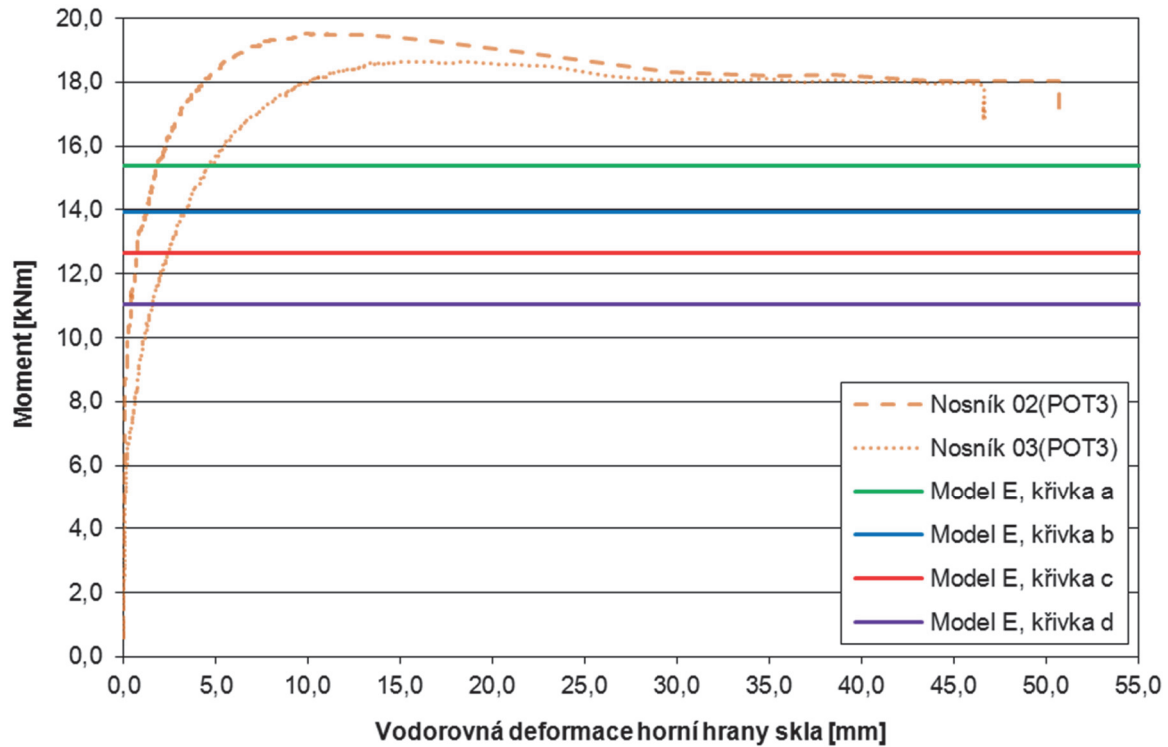
$$M_{b,b} = \chi_{LT,b} M_k = 0,436 \cdot 31,94 = 13,93 \text{ kNm}, \quad (5.28)$$

$$M_{b,c} = \chi_{LT,c} M_k = 0,396 \cdot 31,94 = 12,66 \text{ kNm}, \quad (5.29)$$

$$M_{b,d} = \chi_{LT,d} M_k = 0,345 \cdot 31,94 = 11,03 \text{ kNm}. \quad (5.30)$$

V grafu 23 je zobrazena závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skla hybridního nosníku. V grafu jsou vyneseny všechny spočtené maximální ohybové momenty hybridního nosníku pro jednotlivé křivky vzpěrných pevností. Při porovnání s výsledky experimentu hybridního sklo-ocelového nosníku 02 je zřejmé, že pro návrh uvedeného hybridního nosníku s lepidlem SikaFast-5215 NT je možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“, která byla doporučovaná i pro návrh skleněných nosníků, viz kapitola 1.5.1.





Graf 23: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skla - srovnání experimentů se spočtenými max. ohybovými momenty

Pro možnost porovnání je proveden stejný výpočet maximálního ohybového momentu hybridního sklo-ocelového nosníku i pro případ použití staršího lepidla SikaFast-5211. Uvažován je hybridní nosník o stejných rozměrech jako v předešlém případě, pouze se bude lišit použité lepidlo.

Stanovíme smykový modul pružnosti lepidla SikaFast-5211 pro normálové napětí na hraně skla o velikosti 120 MPa, což odpovídá návrhové hodnotě pevnosti v tahu za ohybu tepelně tvrzeného skla, [22].

$$G_{SF,120} = 32,315 \cdot \sigma^{-0,4624} = 32,315 \cdot 120^{-0,4624} = 3,5 \text{ MPa.} \quad (5.31)$$

Následně je hledána taková hodnota působícího ohybového momentu, aby napětí na hraně skla spočtené Möhlerovou metodou bylo rovno 120 MPa.

$$K_K = G_K \frac{b_k}{t_k} = 3,5 \frac{10}{3} = 11,8 \text{ MPa} \quad (5.32)$$

$$k = \pi^2 \frac{E_a A_a}{L^2 K_K} = \pi^2 \frac{210000 \cdot (40 \cdot 8)}{4500^2 \cdot 11,8} = 2,78, \quad (5.33)$$

$$\gamma = \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+2,78} = 0,26, \quad (5.34)$$

$$n = \frac{E_G}{E_a} = \frac{70000}{210000} = \frac{1}{3}, \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned}
 I_{y,eff} &= 2I_a + nI_G + 2\gamma A_a z_a^2 = \\
 &= 2 \cdot 1707 + \frac{1}{3} 20324167 + 2 \cdot 0,26 \cdot 320 \cdot 152^2 = 10687740 \text{ mm}^4,
 \end{aligned}
 \tag{5.36}$$

$$M_k = \frac{2\sigma_{r2} I_{y,eff}}{nh_w} = \frac{2 \cdot 120 \cdot 10687740}{\frac{1}{3} 290} = 26,54 \text{ kNm}.
 \tag{5.37}$$

Charakteristická hodnota ohybového momentu pro hybridní sklo-ocelový nosník s lepidlem SikaFast-5211 vychází  $M_k = 26,54 \text{ kNm}$ .

Při výpočtu poměrné štíhlosti budeme uvažovat kritický moment spočtený na modelu celého hybridního nosníku, popsaném v kapitole 5.6.1.2 (model E),  $M_{cr} = 19,45 \text{ kNm}$ .

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{26,54}{19,45}} = 1,168
 \tag{5.38}$$

Tab. 16: Součinitelé příčné a torzní stability

$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{LT}$ pro křivku vzpěrné pevnosti			
	a	b	c	d
1,168	0,550	0,496	0,449	0,389

Spočteme maximální ohybový moment hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability pro všechny křivky vzpěrné pevnosti.

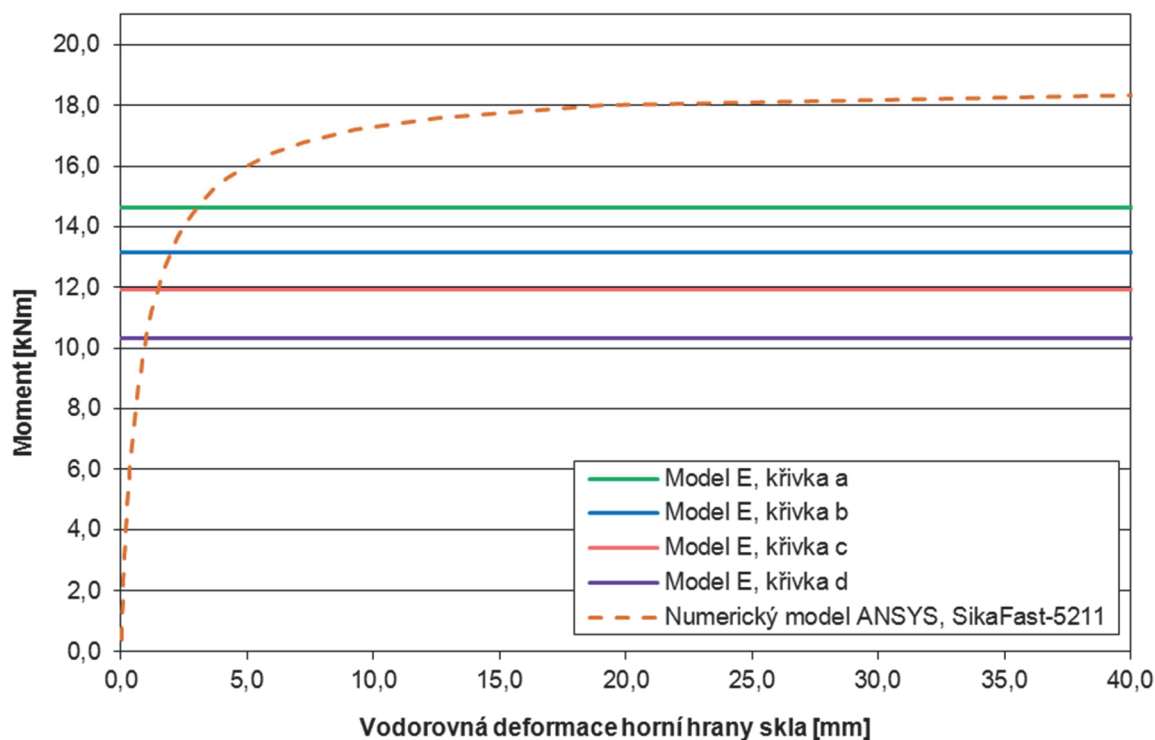
$$M_{b,a} = \chi_{LT,a} M_k = 0,550 \cdot 26,54 = 14,61 \text{ kNm},
 \tag{5.39}$$

$$M_{b,b} = \chi_{LT,b} M_k = 0,496 \cdot 26,54 = 13,16 \text{ kNm},
 \tag{5.40}$$

$$M_{b,c} = \chi_{LT,c} M_k = 0,449 \cdot 26,54 = 11,92 \text{ kNm},
 \tag{5.41}$$

$$M_{b,d} = \chi_{LT,d} M_k = 0,389 \cdot 26,54 = 10,33 \text{ kNm}.
 \tag{5.42}$$

V grafu 24 je zobrazena závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skla hybridního nosníku. V grafu jsou vyneseny všechny spočtené maximální ohybové momenty pro jednotlivé křivky vzpěrných pevností. Při porovnání s výsledky numerického modelu je zřejmé, že i pro návrh uvedeného hybridního sklo-ocelového nosníku s lepidlem SikaFast-5211 je možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“.



Graf 24: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skla - srovnání výsledků numerického modelu se spočtenými max. ohybovými momenty

Hodnota maximálního ohybového momentu hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability vyšla při použití křivky vzpěrné pevnosti „c“ pro lepidlo SikaFast-5215 NT  $M_{b,c} = 12,66$  kNm, pro lepidlo SikaFast-5211  $M_{b,c} = 11,92$  kNm. Je zřejmé, že pro použití v hybridních nosnících je vhodnější použití nového lepidla SikaFast-5215 NT, se kterým je dosaženo větší únosnosti.

Z provedených výpočtů je zřejmé, že vzpěrnostní křivku „c“ je možné použít pro konzervativní a bezpečný návrh s oběma uvedenými druhy akrylátového lepidla.

## 5.8 Parametrická studie

V grafu 25, 28 a 31 jsou vyneseny výsledky parametrických studií provedených na hybridním sklo-ocelovém nosníku s přímým spojem, který je tvořen lepidlem SikaFast-5215 NT. Sledovanými parametry byla vzdálenost příčných podpor, šířka ocelových pásnic a výška skleněné stojiny. Rozměry nosníku byly vždy shodné jako v experimentu popsáném v kapitole 4.5. Prováděna byla vždy pouze změna sledovaného parametru.

V každém grafu je zobrazen maximální působící ohybový moment při dosažení charakteristické hodnoty pevnosti skla v tahu za ohybu na okraji skleněné stojiny. Uvedeny jsou vždy dvě křivky, jedna pro případ, kdy není počítáno se ztrátou stability

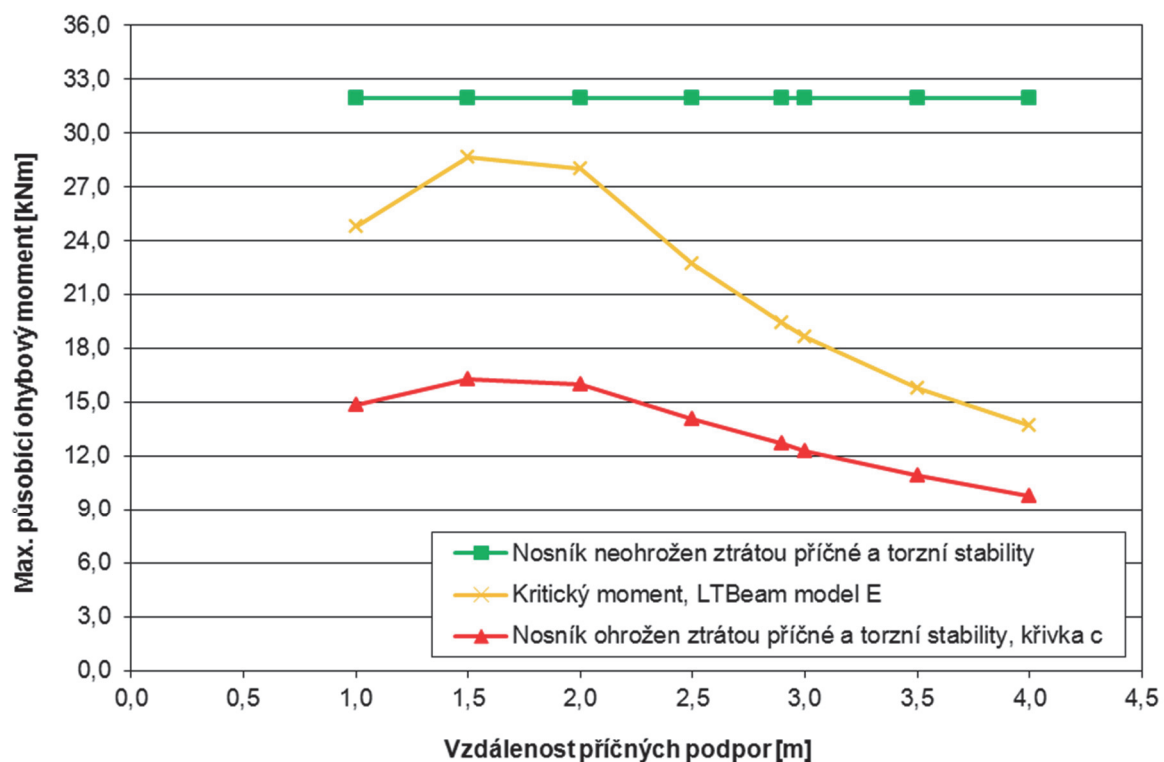
nosníku, druhá zobrazující výsledky pro nosník ohrožený ztrátou příčné a torzní stability. Pro stanovení součinitele příčné a torzní stability je použita křivka vzpěrné pevnosti „c“.

V grafech je dále vynesena kritický moment, který je počítán v programu LTBeam na modelu celého nosníku s příčnými podporami odpovídajícími experimentu (model E).

### 5.8.1 Vzdálenost příčných podpor

Z grafu 25 je patrné, že vzdálenost příčných podpor má veliký vliv na velikost maximálně působícího ohybového momentu v případě, že je nosník ohrožen ztrátou příčné a torzní stability. S rostoucí vzdáleností příčných podpor dochází nejprve k nárůstu kritického momentu a poté k jeho zmenšování. Způsobeno je to tím, že v případě, že je vzdálenost příčných podpor malá, dochází ke ztrátě stability nosníku na jeho okrajích. Při zvětšování vzdálenosti příčných podpor dochází ke klopení mezi příčnými podporami.

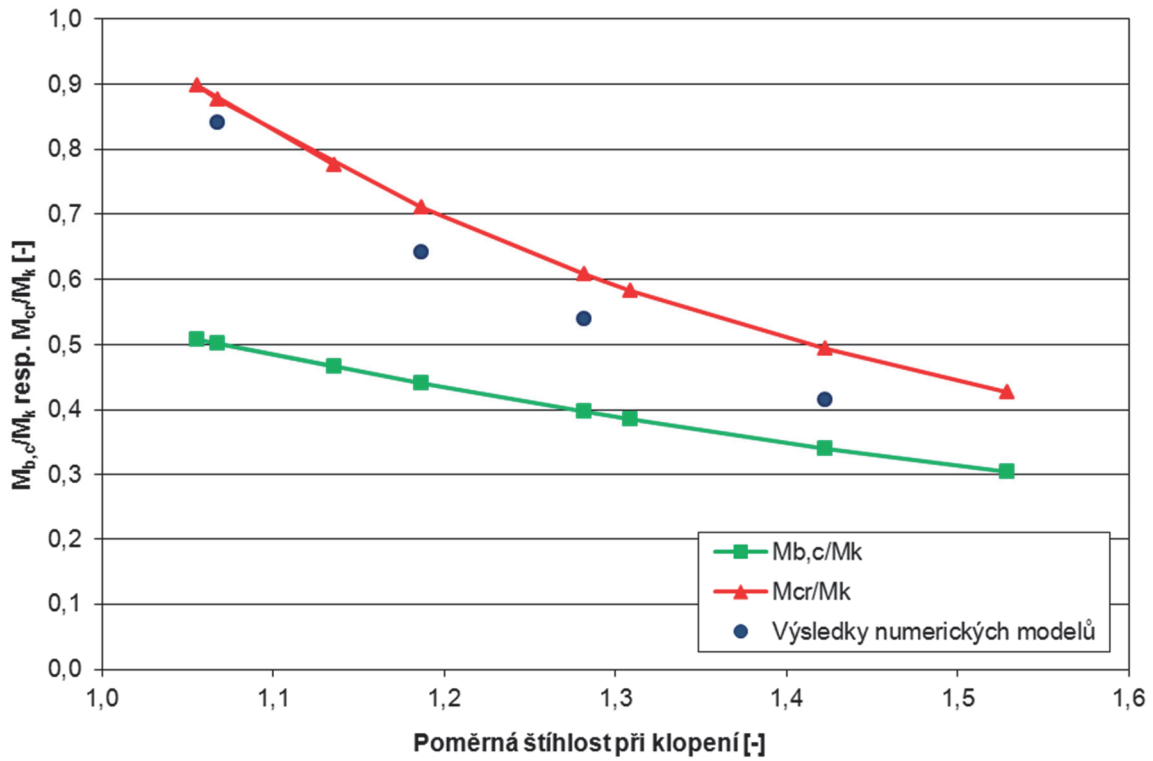
Se zmenšující se hodnotou kritického momentu dochází k zvětšování poměrné štíhlosti při klopení  $\bar{\lambda}_{LT}$ , a tedy ke snižování součinitele příčné a torzní stability  $\chi_{LT}$ .



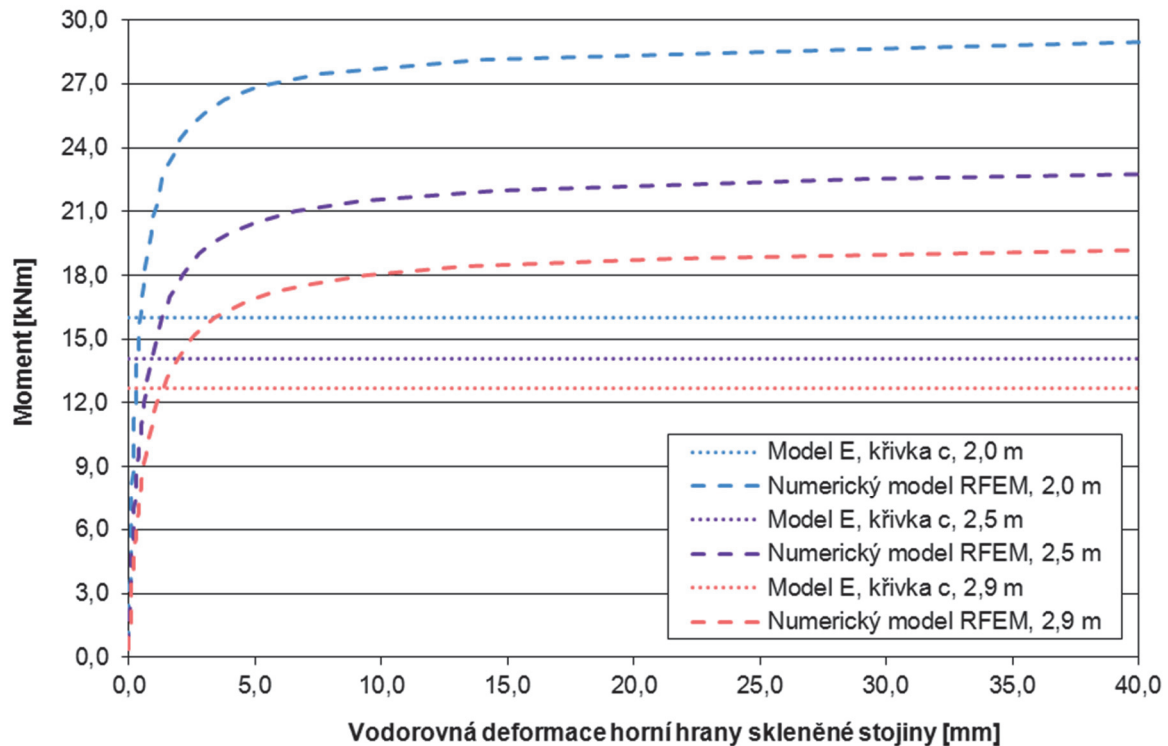
Graf 25: Závislost max. působícího ohybového momentu na vzdálenosti příčných podpor

V grafu 26 je na svislé ose vynesena poměr maximálního působícího ohybového momentu sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability  $M_{b,c}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního nosníku  $M_k$ , resp. pružného kritického momentu  $M_{cr}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního

nosníku  $M_k$ . Na vodorovné ose grafu je vynesena poměrná štíhlost při klopení  $\bar{\lambda}_{LT}$ . V grafu jsou zobrazeny spočtené hodnoty pro různé vzdálenosti příčných podpor a výsledky numerických modelů z programu RFEM.



Graf 26: Závislost  $M_{b,c}/M_k$  resp.  $M_{cr}/M_k$  na poměrné štíhlosti při klopení

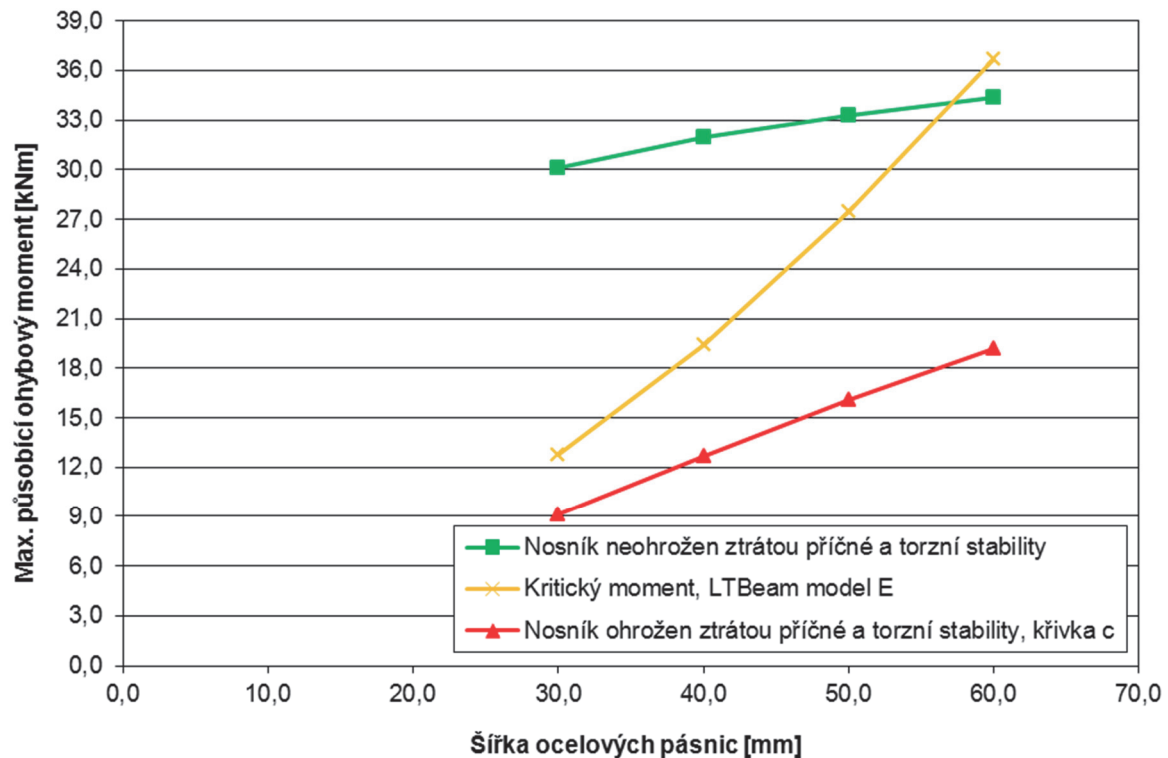


Graf 27: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny

V grafu 27 je zobrazena závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny. V grafu jsou zobrazeny spočtené maximální ohybové momenty hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability pro různé vzdálenosti příčných podpor a jim odpovídající numerické modely z programu RFEM. Z grafu je zřejmé, že pro návrh nosníků se všemi uvedenými vzdálenostmi příčných podpor je možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“.

## 5.8.2 Šířka ocelových pásnic

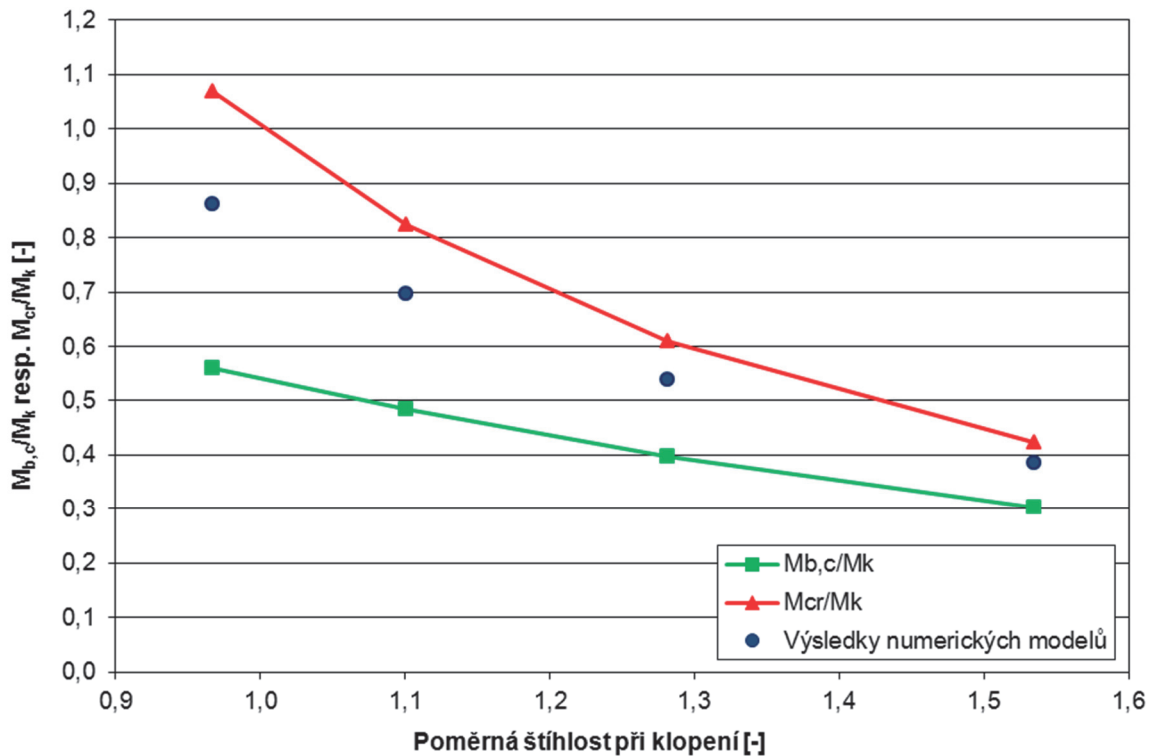
Z grafu 28 je zřejmé, že šířka ocelových pásnic má vliv na velikost maximálního působícího ohybového momentu. V případě, že je nosník ohrožen ztrátou příčné a torzní stability, je vliv šířky pásnice výraznější. Důvodem je zvětšující se poměr momentu setrvačnosti kolem osy  $z$  a plochy ( $I_z / A$ ) při zvětšující se šířce ocelových pásnic. Tím roste i velikost kritického momentu, a tedy i maximální působící ohybový moment.



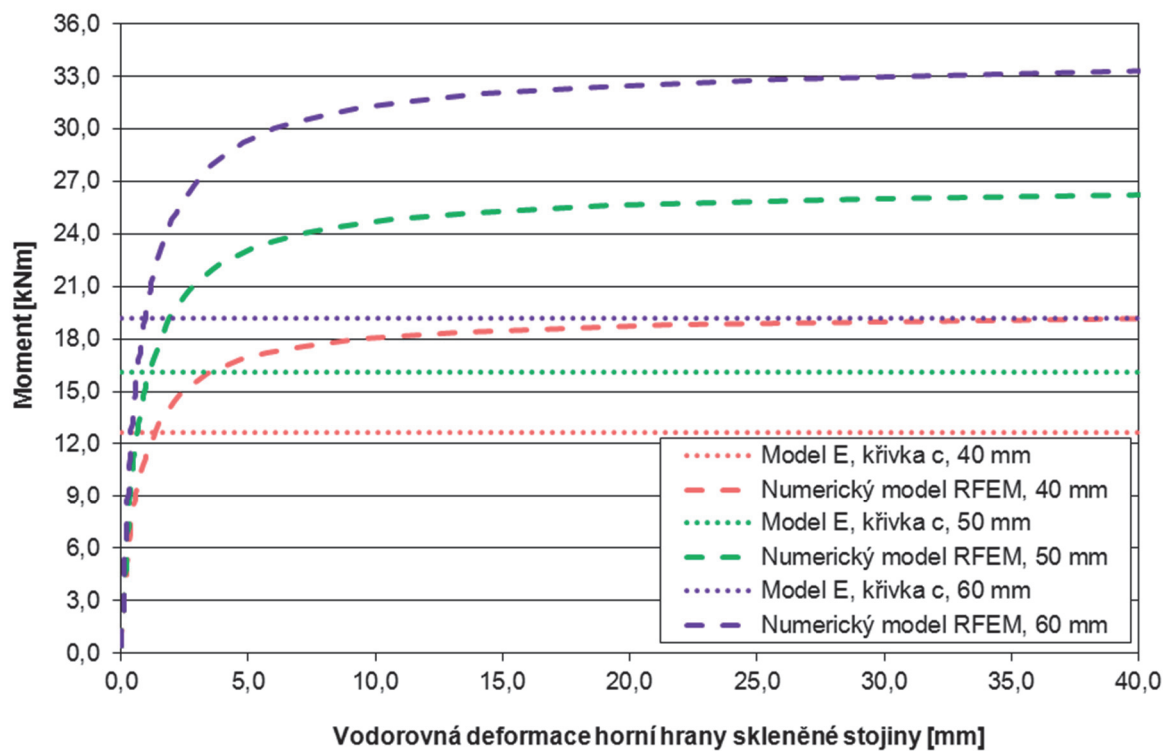
Graf 28: Závislost max. působícího ohybového momentu na šířce ocelových pásnic

V grafu 29 je na svislé ose vynesena poměr maximálního působícího ohybového momentu sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability  $M_{b,c}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního nosníku  $M_k$ , resp. pružného kritického momentu  $M_{cr}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního nosníku  $M_k$ . Na vodorovné ose grafu je vynesena poměrná štíhlost při klopení  $\bar{\lambda}_{LT}$ .

V grafu jsou zobrazeny spočtené hodnoty pro různé šířky ocelových pásnic a výsledky odpovídajících numerických modelů z programu RFEM.



Graf 29: Závislost  $M_{b,c}/M_k$  resp.  $M_{cr}/M_k$  na poměrné štíhlosti při klopení

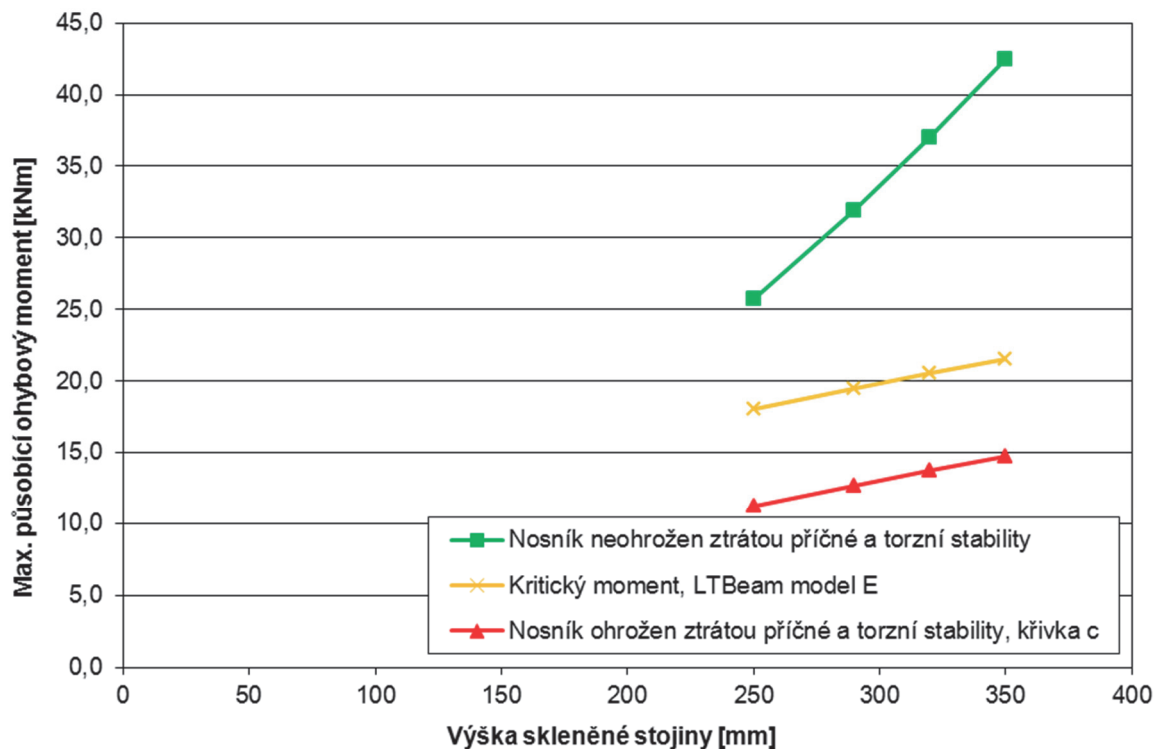


Graf 30: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny

Graf 30 zobrazuje závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny. V grafu jsou zobrazeny spočtené maximální ohybové momenty hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability pro různé šířky ocelových pásnic a jim odpovídající numerické modely z programu RFEM. Z grafu je zřejmé, že pro návrh nosníků se všemi uvedenými šířkami ocelových pásnic je možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“.

### 5.8.3 Výška skleněné stojiny

V grafu 31 je zobrazena závislost maximálního působícího ohybového momentu na výšce skleněné stojiny. Z grafu je patrné, že v případě, že nosník není ohrožen ztrátou příčné a torzní stability, vliv výšky skleněné stojiny je větší než v případě, kdy nosník ztrátou příčné a torzní stability ohrožen je. Způsobeno je to tím, že s rostoucí výškou skleněné stojiny nedochází k tak velkému nárůstu kritického momentu, čímž dochází ke zvětšování poměrné štíhlosti při klopení  $\bar{\lambda}_{LT}$ , a tedy ke snižování součinitele příčné a torzní stability  $\chi_{LT}$ .

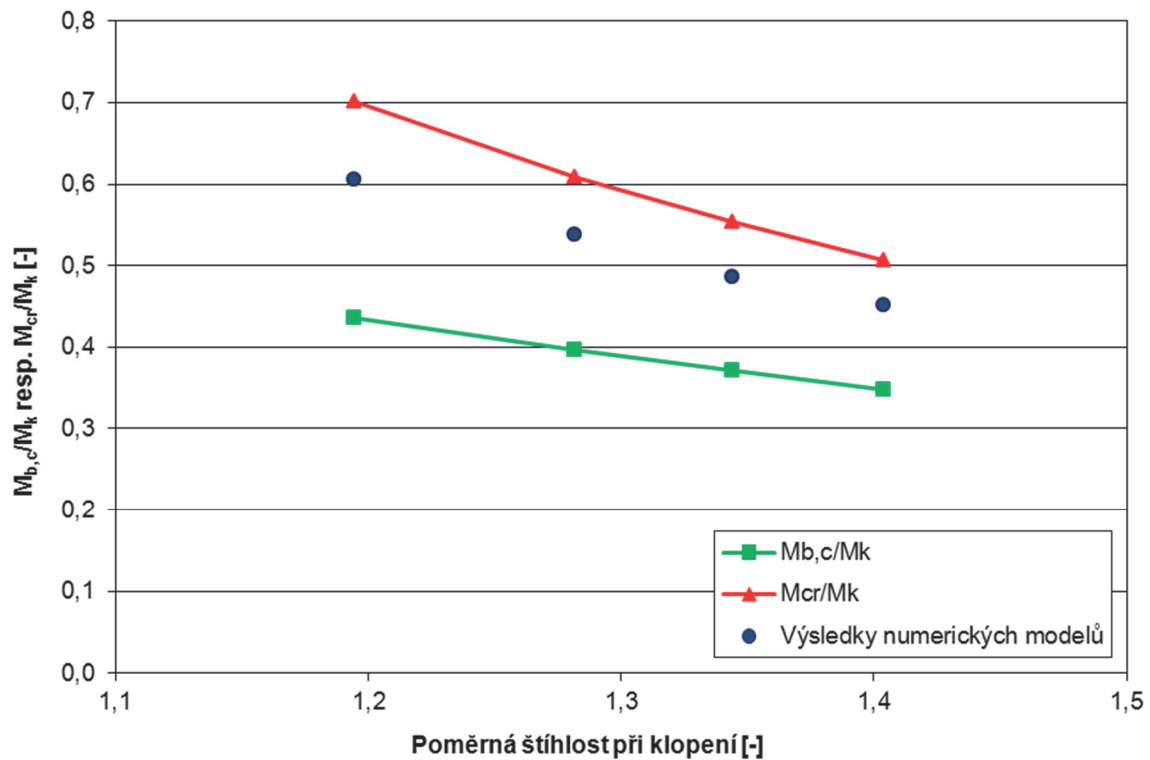


Graf 31: Závislost max. působícího ohybového momentu na výšce skleněné stojiny

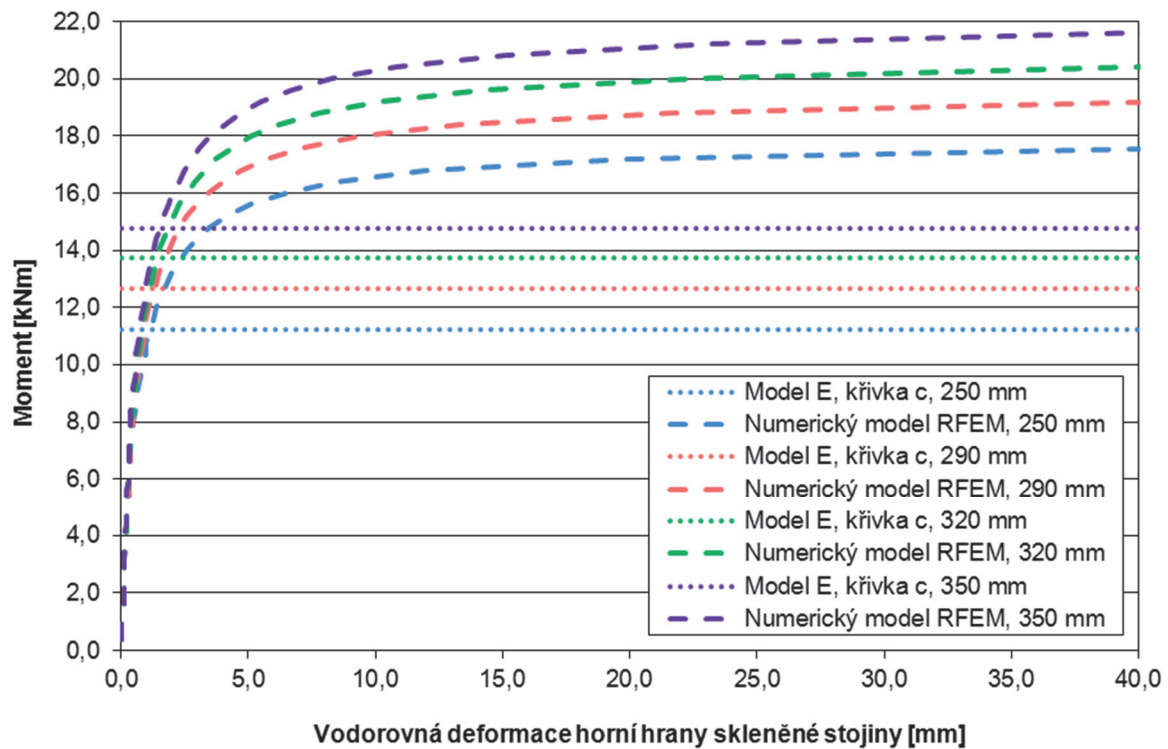
V grafu 32 je na svislé ose vynesena poměr maximálního působícího ohybového momentu sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability  $M_{b,c}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního nosníku  $M_k$ , resp. pružného kritického momentu  $M_{cr}$  a charakteristické hodnoty ohybového momentu hybridního



nosníku  $M_k$ . Na vodorovné ose grafu je vynesena poměrná štíhlost při klopení  $\bar{\lambda}_{LT}$ . V grafu jsou zobrazeny spočtené hodnoty pro různé výšky skleněné stojiny a výsledky odpovídajících numerických modelů z programu RFEM.



Graf 32: Závislost  $M_{b,c}/M_k$  resp.  $M_{cr}/M_k$  na poměrné štíhlosti při klopení



Graf 33: Závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny

V grafu 33 je zobrazena závislost momentu na vodorovné deformaci horní hrany skleněné stojiny. V grafu jsou zobrazeny spočtené maximální ohybové momenty hybridního nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability pro různé výšky skleněné stojiny a jim odpovídající numerické modely z programu RFEM. Z grafu je zřejmé, že pro návrh nosníků se všemi uvedenými výškami skleněné stojiny je možné použít křivku vzpěrné pevnosti „c“.

## Závěr

Předložená disertační práce popisuje výsledky experimentálního výzkumu, jehož předmětem byly skleněné a hybridní sklo-ocelové nosníky ohrožené ztrátou příčné a torzní stability. Uvedené konstrukční prvky splňují nejen požadavky současné architektury na transparentnost a lehkost, ale mají i vysokou únosnost a tuhost. Rozsáhlý experimentální výzkum probíhal v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT, v Kloknerově ústavu ČVUT a v laboratořích akreditovaného výzkumného pracoviště společnosti Swell, spol. s r.o. v Hořicích.

Pro zjištění charakteristik dvousložkového akrylátového lepidla SikaFast-5211 NT (new technology), které bylo vybráno pro výzkum, byly provedeny materiálové tahové zkoušky a zkoušky lepeného spoje namáhaného smykem, při kterých byl zkoumán i vliv stárnutí lepidla. Během experimentů se prokázalo, že vlastnosti vybraného lepidla SikaFast-5211 NT jsou pro použití v hybridním nosníku vhodnější než lepidlo SikaFast-5211, jehož vlastnosti byly zkoumány v dřívějším výzkumu na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze. Lepidlo SikaFast-5211 NT zajišťuje vysokou tuhost a pevnost a tím i únosnost lepeného spoje. Zároveň je velmi poddajné (s průtažností přibližně 200 %), čímž dokáže efektivně přerozdělit napětí způsobené rozdílnou teplotní roztažností spojovaných materiálů. Zkoumání vlivu stárnutí zkušebních těles prokázalo, že nedochází k výrazné změně chování lepeného spoje. Rozdíl byl pozorován především ve způsobu jejich porušení. Pro smykové zkoušky lepeného spoje byly vytvořeny numerické modely v programu ANSYS a RFEM, které velmi dobře odpovídají experimentům.

Výzkum zaměřený na ztrátu příčné a torzní stability skleněných nosníků z jednovrstvého a vrstveného skla prokázal významný vliv počátečních imperfekcí, které jsou v případě skleněných nosníků nezanedbatelné. Numerický model nosníku z jednovrstvého skla o tl. 8 mm, který byl vytvořen v programu ANSYS, zohledňoval rovněž geometrické imperfekce. Nosník byl modelován bez zakřivení nebo s počátečním zakřivením ve tvaru sinusoidy s amplitudou o velikosti  $L/400$  a  $L/1000$ . Numerický model byl ověřen pomocí hodnot, které byly získány v průběhu experimentů. V případě skleněných nosných prvků namáhaných ohybem bylo ověřeno, že je nutné při posouzení ztráty příčné a torzní stability zohlednit počáteční imperfekce ve tvaru geometrické imperfekce o velikosti  $L/400$  i v případě plaveného skla, jehož počáteční imperfekce by měla být menší než v případě tepelně tvrzeného skla.

Následně byly provedeny experimenty prostě podepřených hybridních nosníků ze skla a oceli o délce 4250 mm zaměřené na stanovení únosnosti hybridních nosníků. V hybridních nosnících bylo použito lepidlo SikaFast-5215 NT, jehož mechanické

vlastnosti jsou shodné jako u lepidla SikaFast-5211 NT, pouze se liší doba mezi aplikací lepidla a začátkem tvrdnutí. Pomocí modifikované Möhlerovy metody pak bylo možné stanovit závislost smykového modulu lepidla na maximálním normálovém napětí na hraně skla pro lepidlo SikaFast-5215 NT o tloušťce 3 mm, což je důležitá charakteristika pro návrh nosníků.

Ztráta příčné a torzní stability byla zkoumána na hybridních sklo-ocelových nosnících délky 4750 mm tvořenými ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou. Lepený spoj tvořilo dvousložkové akrylátové lepidlo SikaFast-5215 NT. Před provedením experimentů proběhlo laserové skenování ke stanovení geometrických imperfekcí nosníků. Během všech provedených experimentů bylo dosaženo ztráty příčné a torzní stability. Maximální vodorovný posun skleněné stojiny nosníku dosáhl 92,5 mm.

Chování hybridních nosníků bylo popsáno pomocí numerických modelů vytvořených v programu ANSYS, RFEM a LTBeam. Modely byly ověřeny pomocí výsledků z provedených experimentů. Pomocí numerického modelu bylo možné prokázat významný vliv počátečních imperfekcí na chování nosníku při ztrátě příčné a torzní stability. Dále byly spočteny kritické momenty hybridního nosníku i samotné skleněné stojiny. Z výsledků je zřejmý významný vliv ocelových pásnic na odolnost proti ztrátě příčné a torzní stability.

Aby bylo možné hybridní sklo-ocelové nosníky ohrožené ztrátou příčné a torzní stability navrhnout, je v předložené práci uveden postup výpočtu maximálního ohybového momentu, který tyto nosníky jsou schopny přenést. Na základě provedeného experimentálního výzkumu bylo prokázáno, že je možné pro návrh hybridních sklo-ocelových nosníků použít křivku vzpěrné pevnosti „c“ z normy EN 1993-1-1. Tato vzpěrnostní křivka je v dostupné literatuře doporučována v současnosti pro konzervativní návrh skleněných nosníků. Tuto křivku je tedy možné použít i pro bezpečný návrh hybridních sklo-ocelových nosníků tvořených skleněnou stojinou a ocelovými pásnicemi připojenými akrylátovým lepidlem.

## Hlavní dosažené cíle

- 1) Popis chování lepidla SikaFast-5211 NT ve spoji namáhaném smykem.
- 2) Nalezení nelineárního numerického materiálového modelu pro lepidlo SikaFast-5211 NT.
- 3) Vytvoření numerických modelů vystihujících chování skleněných a hybridních sklo-ocelových nosníků, které byly validovány na provedených experimentech.
- 4) Doporučení postupu výpočtu maximálního ohybového momentu hybridního sklo-ocelového nosníku ohroženého ztrátou příčné a torzní stability.

- 5) Prokázání možnosti použití křivky vzpěrné pevnosti „c“ z EN 1993-1-1 pro bezpečný návrh hybridních sklo-ocelových nosníků tvořených skleněnou stojinou a ocelovými pásnicemi připojenými akrylátovým lepidlem.

## Hodnotné výstupy

- 1) Výsledky výzkumu byly průběžně prezentovány na tuzemských i zahraničních seminářích a konferencích.

- 2) Příspěvek v recenzovaném časopise registrovaném v databázi Web of Science:

PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Influence of an initial imperfection on the lateral and torsional buckling of hybrid beam. In: *Engineering Mechanics 2017 - Book of full texts*. Brno: Brno University of Technology, 2017. pp. 802-805. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-5497-2.

- 3) Příspěvky v recenzovaných časopisech registrovaných v databázi SCOPUS:

PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Lateral and torsional stability of hybrid steel-glass beams. In: *Structures and Architecture - Beyond their Limits*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. pp. 1029-1035. ISBN 978-1-138-02651-3.

MACHALICKÁ, Klára, Iva PRAVDOVÁ a Martina ELIÁŠOVÁ. Shear Adhesive Connections for Glass Structures. In: *The 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies"*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2015, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). ISSN 1757-8981.

HORČIČKOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Lateral and Torsional Stability of Glass Beams. In: *Experimental Stress Analysis 2015*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015, pp. 130-133. ISBN 978-80-01-05734-6.

## Cíle budoucího výzkumu

- 1) **Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při dlouhodobém zatížení**

Pro bezpečný návrh hybridních nosníků je zapotřebí zjistit vliv dlouhodobého zatížení, např. vlastní tíhy a stálého zatížení, na chování hybridního sklo-ocelového nosníku. Délka trvání zatížení totiž ovlivňuje tuhost a tím i únosnost lepeného spoje.

- 2) **Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při cyklickém zatěžování**

Cyklické zatěžování může mít velký vliv na vlastnosti lepeného spoje. V předložené práci byl zkoumán vliv cyklického zatížení teplotou na smykovou

pevnost lepeného spoje u čtyř zkušebních těles, viz kapitola 4.3.2. Vzhledem k tomu, že bylo prokázáno, že cyklické zatížení teplotou při současném ponoření vzorků do přesyceného roztoku HCl způsobilo menší únosnosti i podélné přetvoření lepeného spoje, je zapotřebí tuto problematiku podrobněji prozkoumat.

### **3) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při stárnutí**

V předložené práci je popsáno umělé stárnutí vzorků pro smykové zkoušky podle DVS 1618, viz kapitola 4.3.2, které bylo aplikováno celkem na 10 zkušebních těles. Provedené zatěžovací cykly měly simulovat vnější klimatické podmínky v rozsahu 15-20 let při středoevropských podmínkách. Z výsledků experimentů je zřejmé, že umělé stárnutí zapříčinilo jiný způsob porušení zkušebních těles, oproti vzorkům, které stárnutí vystaveny nebyly. Pro další výzkum hybridních sklo-ocelových nosníků s lepeným spojem by bylo vhodné provést výzkum zaměřený na vliv stárnutí na zatížených nosnících.

### **4) Chování hybridních sklo-ocelových nosníků při vyšších teplotách**

Vzhledem k tomu, že hybridní sklo-ocelové nosníky není možné chránit obkladem, kvůli jejich estetické funkci, je zapotřebí se věnovat problematice požární odolnosti. Lepený spoj totiž za zvýšené teploty ztrácí tuhost a únosnost.

## Použité zdroje

- [1] VLASOV, Vasilij Zacharovič. Tenkostěnné pružné pruty. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1962.
- [2] BŘEZINA, Vladimír. Vzpěrná pevnost prutů kovových konstrukcí. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1963.
- [3] TRAHAIR, N. S., BRADFORD, M. A., NETHERCOT, D. A., GARDNER, L. *The behaviour and design of steel structures to EC3*. Taylor & Francis, 2008. ISBN 978-0-415-41865-2.
- [4] AS 1288—2006. *Glass in buildings: Selection and installation*. Sydney: Standards Australia, 2006.
- [5] CNR-DT 210/2013. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*. Technický dokument. Roma, 2013.
- [6] FELDMANN, Markus a Ruth KASPER aj. *Guidance for European structural design of glass components: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. ISBN 978-92-79-35094-8.
- [7] LUIBLE, Andreas a Michel CRISINEL. Stability of Load Carrying Elements of Glass. In: *EU COST C13 Glass and interactive Building Envelopes – Final Report*. 2007. s. 195 – 208. Volume 1. ISBN 978-1-58603-709-3.
- [8] LUIBLE, Andreas a Michel CRISINEL. Lateral torsional buckling of glass beams. In: *Proceedings of the XI International Conference on Metal Structures: "Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures"*. Taylor & Francis, 2006. s. 971 – 978. ISBN 0-415-40120-8.
- [9] BEDON, Chiara a Claudio AMADIO. Analytical and numerical assessment of the strengthening effect of structural sealant joints for the prediction of the LTB critical moment in laterally restrained glass beams. In: *Material and Structures*. 2016, s. 2471-2492. Volume 49: Issue 6. ISSN 1359-5997.
- [10] LUIBLE, Andreas a Daniel SCHÄRER. Lateral torsional buckling of glass beams with continuous lateral support. In: *Glass Structures & Engineering*. 2016, s. 153-171. Volume 1: Issue 1. ISSN 2363-5142.
- [11] SONCK, Delphine a Jan BELIS. Elastic lateral-torsional buckling of glass beams with continuous lateral restraints. In: *Glass Structures & Engineering*. 2016, s. 173-194. Volume 1: Issue 1. ISSN 2363-5142. HALDIMANN, Matthias, Andreas LUIBLE a Mauro OVEREND. *Structural Use of Glass*. Structural Engineering Document 10. IABSE-AIPC-IVBH, Zürich, 2008. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [12] KASPER, Ruth a Gerhard SEDLACEK. Stability of Laminated Glass Beams. In: *EU COST C13 Glass and Interactive Building Envelopes - Final Report*. 2007, s. 177-187. Volume 1. ISBN 978-1-58603-709-3.
- [13] BELIS, Jan, Chiara BEDON, Christian LOUTER, Claudio AMADIO a Rudy Van IMPE. Experimental and analytical assessment of lateral torsional buckling of laminated glass beams. In: *Engineering Structures*. Elsevier, 2013, s. 295 – 305. Volume 51. ISSN 0141-0296.

- [14] KREHER, Klaus a Julius NATTERER. Timber-Glass-Composite Girders for a Hotel in Switzerland. In: *Structural Engineering International*. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004, s. 149-151. Volume 14, Number 2. ISSN 1016-8664.
- [15] HALLER, Peer. Eminent Structural Engineer: Julius Natterer. In: *Structural Engineering International*. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008, s. 207-209. Volume 18, Number 2. ISSN 1016-8664.
- [16] LOUTER, Pieter Christiaan. *Fragile yet Ductile: Structural Aspects of Reinforced Glass Beams*. TU Delft, Delft, 2011. ISBN 978-90-8570-743-1. Disertační práce. Delft University of Technology.
- [17] CRUZ, Paulo a José PEQUENO. Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour & Architectural Solutions. In: BOS, Freek, Christian LOUTER a Fred VEER. *Challenging Glass: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Delft: Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 2008, s. 439-448. ISBN 978-1-58603-866-3.
- [18] BLYBERG, Louise a Erik SERRANO. Timber/Glass adhesively bonded I-beams. In: *Glass Performance Days, Conference Proceedings, 2011*. Tampere (Finland), 2011, s. 451-456. ISBN 978-952-5836-02-8.
- [19] FREYTAG, Bernhard. Glass-Concrete Composite Technology. In: *Structural Engineering International*. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004, s. 111-117. Volume 14, Number 2. ISSN 1016-8664.
- [20] LOUTER, Christian, Fred VEER a Gerrie HOBBELMAN. Reinforcing glass, effects of reinforcement geometry and bonding technology. In: *Glass Performance Days 2007: Proceedings of the 10th International conference in Tampere*. Glass Performance Days, 2007, s. 93-97. ISBN 952-91-8674-6.
- [21] NIELSEN, Jens Henrik a John Forbes OLESEN. Mechanically Reinforced Glass Beams. In: ZINGONI, Alphonse. *Recent Developments in Structural Engineering, Mechanics and Computation: Proceedings of the Third International Conference on Structural Engineering*. Cape Town: Millpress Science Publishers, 2007, s. 655-656. ISBN 978-90-5966-054-0.
- [22] NETUŠIL, Michal. Hybridní nosníky ze skla a oceli. Disertační práce. Praha: ČVUT, 2012
- [23] MÖHLER, Karl. *Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln*. TH Karlsruhe, 1956. 73 s. Dizertační práce. Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.
- [24] FREMR, Tomáš. Analýza zbytkové únosnosti a robustnosti hybridních nosníků ze skla a oceli. In: *Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí*. Praha: ČVUT, 2010, s. 24-27. ISBN 978-80-01-04583-1.
- [25] BELIS, Jan, Dieter CALLEWAERT, Didier DELINCÉ a Rudy VAN IMPE. Experimental failure investigation of a hybrid glass/steel beam. In: *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, 2009, s. 1163-1173. Volume 16: Issue 4. ISSN 1350-6307.



- [26] *ARCHITONIC: The Independent Resource for Architecture and Design* [online]. 2008 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.architonic.com/aisht/renovation-of-ministry-of-finance-building-meyer-en-van-schooten-architecten-mvsa/5100836>
- [27] FELDMANN, Markus, Dieter UNGERMANN, Björn ABELN aj. *Development of innovative steel-glass structures in respect to structural and architectural design (Innoglast)*. Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, RFCS-CT-2007-00036, 2007-2010.
- [28] HEŘMANOVÁ, Lucie., Martina ELIÁŠOVÁ a Michal NETUŠIL. Experiments of glass structures subjected to bending. In: *Eurosteel 2008 – 5th European Conference on Steel and Composite Structures*. Brussel: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2008, s. 929-935. ISBN 92-0147-000-90.
- [29] ČSN EN ISO 527-1. Plasty – Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy. Srpen 1997.
- [30] ČSN EN ISO 527-2. Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Duben 1998.
- [31] VOJTA, Aleš. Lepené spoje konstrukcí ze skla. Bakalářská práce. Praha: ČVUT, 2013.
- [32] WELLER, Bernhard, Silke TASCHE a Iris VOGT. Bonded joints of adhesives with higher strength. In: *Proceedings of the international conference on Building Envelope Systems and Technology ICBEST'07*. The University of Bath, UK, 2007, s. 185-196. ISBN 978-1-874003-44-1.
- [33] ČSN EN 14179-1. Sklo ve stavebnictví - Prohřívání tepelně tvrzené sodnovápenatokřemičité bezpečnostní sklo - Část 1: Definice a popis. Listopad 2017.
- [34] KŘEMEN, Tomáš a Bronislav KOSKA. Determination of the Initial Shape and the Deformation of the Steel Beams with High Accuracy During the Stress Tests Using Laser Scanning Technology. In: *13th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics And Remote Sensing - SGEM2013 Conference Proceedings*. Sofia, STEF92 Technology Ltd., 2013, s. 601-608. Volume 2. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7105-01-8.

## Seznam publikací autorky

- [35] PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Influence of an initial imperfection on the lateral and torsional buckling of hybrid beam. In: *Engineering Mechanics 2017 - Book of full texts*. Brno: Brno University of Technology, 2017. pp. 802-805. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-214-5497-2.
- [36] PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Lateral and torsional stability of hybrid steel-glass beams. In: *Structures and Architecture - Beyond their Limits*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. pp. 1029-1035. ISBN 978-1-138-02651-3.
- [37] PRAVDOVÁ, Iva, Klára MACHALICKÁ a Martina ELIÁŠOVÁ. Steel-glass structural elements with a new generation of adhesives. In: *Challenging Glass 5 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Ghent: Ghent University, 2016. pp. 201-208. ISBN 9789082526806.
- [38] PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Stability of Glass Structural Elements Subjected to Bending. In: *Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II*. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2016. pp. 219-222. Applied Mechanics and Materials vol. 827. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-531-1.
- [39] PRAVDOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Příčná a torzní stabilita skleněných nosníků. In: *TZB info*. 2016, 18 ISSN 1801-4399.
- [40] MACHALICKÁ, Klára, Iva PRAVDOVÁ a Martina ELIÁŠOVÁ. Lepené spoje skleněných konstrukcí namáhané smykem. In: *TZB info*. 2016, 18.(2.), ISSN 1801-4399.
- [41] MACHALICKÁ, Klára, Iva PRAVDOVÁ a Martina ELIÁŠOVÁ. Shear Adhesive Connections for Glass Structures. In: *The 2nd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies"*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2015, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). ISSN 1757-8981.
- [42] HORČIČKOVÁ, Iva a Martina ELIÁŠOVÁ. Lateral and Torsional Stability of Glass Beams. In: *Experimental Stress Analysis 2015*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015, p. 130-133. ISBN 978-80-01-05735-3.
- [43] HORČIČKOVÁ, Iva. Stabilita skleněných a hybridních nosníků ze skla a oceli. In: *Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2014, s. 55-60. ISBN 978-80-01-05522-9.
- [44] HORČIČKOVÁ, Iva. Stabilita skleněných a hybridních nosníků ze skla a oceli. In: *Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2013, s. 27-30. ISBN 978-80-01-05289-1.
- [45] HORČIČKOVÁ, Iva. Overview of the Stability Problems of Glass Beams. In: *Recent, Current and Near-Future Research - on Structural Glass; Student Colloquium COST Training School "Structural Glass"*. Ghent: Ghent University, 2012, p. 23-25. ISBN 978-94-6197-029-9.

- [46] HORČIČKOVÁ, Iva. Stabilita hybridních nosníků ze skla a oceli namáhaných ohybem. In: *Sborník semináře doktorandů katedry ocelových a dřevěných konstrukcí*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2012, s. 14-15. ISBN 978-80-01-05075-0.

# Přílohy

## Příloha 1 – Technický list SikaFast-5211 NT

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 <sup>1)</sup> 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 <sup>2)</sup> (CQP 526-1)	ca 3 min	
čas fixace <sup>2)</sup> 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 <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 10 MPa	
prodloužení při přetržení <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 200 %	
E - modul <sup>2)</sup> (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 <sup>3)</sup> (CQP 016-1)	stříkačka kartuše hobok / sud	15 měsíců 9 měsíců
	12 měsíců	9 měsíců

<sup>1)</sup> CQP = Corporate Quality Procedures

<sup>2)</sup> při 23°C a 50 % rel. vzdušné vlhkosti

<sup>3)</sup> 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 polymerární 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.

Industry



SikaFast®-5211NT 1/ 2

### Vytvrzování

Lepidlo SikaFast<sup>®</sup>-5211 NT vytvrzuje polymerací při smíchání s komponentem B SikaFast<sup>®</sup>-5200. SikaFast<sup>®</sup>-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<sup>®</sup>-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
nerozová 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 dílů musí být čisté, suché a zbavené všech mastnot. Nepevné části povrchu musí být mechanicky odstraněny.

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

#### Aplikace

SikaFast<sup>®</sup>-5211 NT se nanáší ve směšovacím 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<sup>®</sup>-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 <sup>®</sup> -5211 NT (komp. A):	20 l hobok
SikaFast <sup>®</sup> -5211 NT (komp. A):	169 l sud
SikaFast <sup>®</sup> -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 naší kontrolu.

### Důležité

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

### Upozornění

naše technico 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  
Tüfenwies 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](mailto: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](mailto:sika@sk.sika.com)

SikaFast<sup>®</sup>-5211 NT 2/2

## Příloha 2 – Technický list SikaFast-5215 NT

Produktový list  
verze 1 (05 / 2013)

### SikaFast®-5215 NT

rychle vytvrzující 2-komponentní lepicí systém pro konstrukční lepení

#### technická data

	komponent A SikaFast®-5215 NT	komponent B SikaFast®-5200
chemická báze	akrylát	
barva komponent (CQP <sup>1)</sup> 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 <sup>2)</sup> (CQP 526-1)	ca 5 min	
čas fixace <sup>2)</sup> doba potřebná k dosažení 80% kon. pevnosti	ca 15 min	
tvrdost Shore A (CQP 023-1 / ISO 868)	90	
tvrdost Shore D (CQP 023-1 / ISO 868)	50	
pevnost v tahu <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 10 MPa	
prodloužení při přetržení <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 200 %	
E - modul <sup>2)</sup> (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 <sup>3)</sup> (CQP 016-1)	kartuše 50 ml	15 měsíců
	kartuše	9 měsíců
	hobok / sud	12 měsíců
		9 měsíců

<sup>1)</sup> CQP = Corporate Quality Procedures

<sup>2)</sup> při 23°C a 50 % rel. vzdušné vlhkosti

<sup>3)</sup> skladováno při teplotě pod 25°C, nevystaveno přímému slunečnímu záření

#### Popis

SikaFast®-5215 NT je rychle vytvrzující, strukturální, 2-komponentní lepicí systém na bázi ADP polymeremí technologie odvozené z akrylátů.

Nevytvrzený SikaFast®-5215 NT je pastovitý, nestékavý materiál umožňující jednoduchou a precizní aplikaci.

SikaFast®-5215 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®-5215 NT je rychle tuhneoucí, 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.

Industry



SikaFast®-5215NT 1/ 2

### Vytvrzování

Lepidlo SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT vytvrzuje polymerací při smíchání s komponentem B SikaFast<sup>®</sup>-5200. SikaFast<sup>®</sup>-5215 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<sup>®</sup>-5215 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/ S	8 MPa
galvanická ocel	K/ S	10 MPa
sklo	K/ S	9 MPa
ABS	S	8 MPa
PVC	K	10 MPa
PC	K	10 MPa

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

Lom: porušení Substrátu, Kohezivní

### Pokyny pro zpracování

#### Příprava podkladu

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

V kombinaci se SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT je nutno plochy očistit / aktivovat pomocí přípravku Sika<sup>®</sup>ADPrep. Vzhledem k rozmanitosti podkladů je nutné provést před aplikací zkoušky. V případě specifických aplikací doporučujeme konzultovat s technickým oddělením Industry.

#### Aplikace

SikaFast<sup>®</sup>-5215 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 5 minut po smíchání, materiál dosahuje manipulační pevnosti v cca čase 15 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<sup>®</sup>-5215 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 <sup>®</sup> -5215 NT (komp. A):	20 l hobok
SikaFast <sup>®</sup> -5215 NT (komp. A):	169 l sud
SikaFast <sup>®</sup> -5200 (komp. B):	18 l hobok
duální kartuše (komp. A+B )	250 ml
duální kartuše (komp. A+B )	50 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 naší 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 nezabavují 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**  
Tüffenwies 16  
8048 Zürich  
Switzerland  
Tel: +41 58 436 40 40  
Fax: +41 58 436 45 30

**Sika CZ s.r.o.**  
Bystřoká 1132 / 36  
CZ - 624 00 Brno  
Česká republika  
tel: +420 546 422 464  
fax: +420 546 422 400  
e-mail: [sika@cz.sika.com](mailto:sika@cz.sika.com)

**Sika Slovensko spol. s r.o.**  
Rybničná 38  
SK - 631 07 Bratislava  
Slovensko  
tel: +421 2 4920 0406  
fax: +421 2 4920 0444  
e-mail: [sika@sk.sika.com](mailto:sika@sk.sika.com)

SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT 2/2

## Příloha 3 – Technický list SikaFast-5211

technický list  
verze 04 / 2005

### SikaFast®-5211

rychle vytvrzující 2-komponentní lepicí systém pro konstrukční lepení,  
(otevřený čas: 3 min)

technická data:

	komponent A SikaFast®-5211	komponent B SikaFast®-5200
chemická báze	2-komponentní ADP akrylát	
barva komponent ( CQP <sup>1)</sup> 001-1 )	bílá	černá
barva směsi	šedá	
hustota komponent ( CQP 006-4)	1,14 g / cm <sup>3</sup>	1,46 g / cm <sup>3</sup>
hustota směsi	1,17 g / cm <sup>3</sup>	
poměr míchání	objemový	10 : 1
	hmotnostní	10 : 1,28
stabilita	tixotropní pasta	
mechanismus vytvrzení	polymerizace	
otevřený čas <sup>2)</sup> ( CQP 526 – 1 ) ( statický mixer ) při 23°C	ca 3 min ( viz diagram)	
rychlost vytvrzování	viz diagram	
tvrdost Shore A ( CQP 023-1 / ISO 868 )	90	
tvrdost Shore D	50	
pevnost v tahu <sup>2)</sup> ( CQP 036-1 / ISO 527 )	ca 10 N / mm <sup>2</sup>	
prodloužení při přetržení <sup>2)</sup> ( CQP 036-1 / ISO 527 )	ca 150 %	
pevnost ve smyku <sup>2)</sup> ( CQP 546-1 / ISO 4587 )	ca 8 N / mm <sup>2</sup>	
teplota přechodu ke sklovitosti ( CQP 509-1 / ISO 4663 )	ca 52°C	
elektrický odpor ( CQP 079-2 / ASTM D 257-99 )	ca 1,6 x 10 <sup>13</sup> Ω cm	
teplota zpracování	+ 10°C ÷ + 40°C	
teplotní odolnost trvalá	-40 °C až + 80 °C	
Skladovatelnost <sup>3)</sup> ( CQP 016-1 ),	kartuše	12 měsíců
	hobok	12 měsíců

<sup>1)</sup>CQP = Corporate Quality Procedures

<sup>2)</sup> při 23°C a 50 % rel. vzdušné vlhkosti

<sup>3)</sup> skladováno při teplotě pod 25°C, nevystaveno přímému slunečnímu záření

#### Popis:

SikaFast®-5211 je rychle vytvrzující ,  
elastický, 2-komponentní lepicí systém  
na bázi ADP polymerní technologie  
odvozené z akrylátů.

Nevytvrzený SikaFast®-5215 je pas-  
tovitý, nestěkávký, nehořlavý materiál  
umožňující jednoduchou a precizní  
aplikaci.

SikaFast®-5211 je vyráběn  
v souladu s normami jakosti ISO  
9001 / 14001.

#### Přednosti produktu:

- nárůst pevnosti v několika minu-  
tách po aplikaci
- adheze na široké spektrum kovů,  
plastů a sklo s minimální přípravou  
povrchu
- vysoká pevnost
- vyrovnává tolerance, vyplňuje  
nerovnosti (do 3 mm)
- pružný, tlumí vibrace
- bez rozpouštědel a kyselin
- snadné míchání
- nízký zápach
- schválení dle NSF R2  
( náhodný styk s potravinami)

#### Oblast použití:

ADP technologie nabízí novou kate-  
gorii rychle vytvrzujících lepidel na-  
hrazujících v mnoha směrech tech-  
nologie svařování, nýtování, temo-  
vání nebo prolisování.

SikaFast®-5211 vhodný zejména  
pro konstrukční a montážní lepení  
v oblasti sériové výroby zařízení,  
přístrojů, spotřebičů pro průmysl  
nebo domácnost, z plechů, plastů,  
lakovaných povrchů atd., umožňuje  
řešení vysoce pevnostních skrytých  
spojů u různorodých materiálů včet-  
ně finálně povrchově úpravených  
dílů. V těchto a dalších otázkách  
doporučujeme konzultovat s technic-  
kým oddělením Industry.



SikaFast®-5211 1/ 2



### Vytvrzování :

Vytvrzovací reakce materiálu SikaFast®-5211 se uskutečňuje při pokojové teplotě. Komponent A, SikaFast®-5211 obsahující reaktivní monomer vytvrzuje působením iniciátoru komponentu B SikaFast®-5200, po smíchání v předepsaném objemovém poměru (10:1) při vytlačování přes statický mixer.

( rychlost vytvrzování je mírně ovlivněna teplotou prostředí).

SikaFast®-5211 nabízí relativně dlouhý otevřený čas s následným rychlým vytvrzením, což vytváří optimální poměr mezi časem pro aplikaci a následným nárůstem pevnosti ( viz diagram) k dosažení hodnoty manipulační pevnosti.

I přes rychlý nárůst pevnosti může předčasné zatížení způsobit destrukci spoje. Ponechte lepidlo / spoj 10 minut po promíchání v klidu bez zatížení.

Ustavení spoje je možno pouze v čase do 3 minut po smíchání.

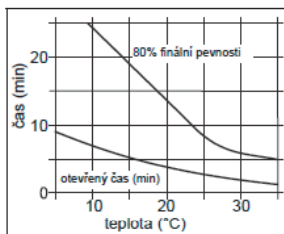


Diagram 1: Otevřený čas a rychlost vytvrzení SikaFast®-5211

### Chemická odolnost :

Závazné posouzení je podmíněno objektovou zkouškou .

### 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.

Je nutné vzít v úvahu, že mechanické hodnoty jsou závislé na teplotě ( hodnoty na vyžádání).

### Tabulka adheze

substrát		hodnota
aluminium	K	8 N/mm <sup>2</sup>
Al Mg3		
ocel St 32	K	8 N/mm <sup>2</sup>
neroz	K	8 N/mm <sup>2</sup>
ocel galvanicky pokovená	A	6 N/mm <sup>2</sup>
sklo	S	9 N/mm <sup>2</sup>
polyester laminát	S	6 N/mm <sup>2</sup>
lak akrylátový	S	6 N/mm <sup>2</sup>
ABS (Terulian)	K	7 N/mm <sup>2</sup>
PVC ( Kóratur ES)	K	9 N/mm <sup>2</sup>
polykarbonát	S	8 N/mm <sup>2</sup>

Tab. 1: zkušební desky dle ISO 4587, tloušťka spoje (1,5 mm)

Lom: Adhezivní, Kohezivní, Substrát

### Pokyny pro zpracování :

**Příprava podkladu** - lepené plochy dílů musí být čisté, suché a zbavené všech mastnot . Nepevné části povrchu musí být mechanicky odstraněny.

V kombinaci se SikaFast®-5211 je nutno plochy očistit / aktivovat pomocí přípravku **Sika®ADPrep**.

Při aplikaci na lakované povrchy je nutno věnovat pozornost dostatečně přilnavé pevnosti laku na podkladě . V případě specifických aplikací doporučujeme konzultovat s technickým oddělením Industry.

### Aplikace.

Z 2-k duální kartuše a přes našroubovaný statický mixer je vytlačování možné pomocí speciální ruční nebo vzduchové pistole.

Při zpracování lepidla pomocí vytlačovací pumpy z hoboků je nutné dávkování v poměru 10:1 a statický mixer.

Pracovní teplota lepidla ovlivňuje mírně otevřený čas, stabilitu housenky po nanesení a reakční časy. Při zpracování má být v rozsahu od +10 °C do max + 40 °C.

**Důležité: 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.**

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 nutno neprodleně utřít suchou utěrkou, vytvrzený materiál možno odstranit pouze mechanicky. Ruce je možno očistit pomocí utěrky Handclean nebo mycí pasty a oplachem vodou .

### Další informace

Kopie následujících publikací jsou na vyžádání k dispozici

- bezpečnostní list produktu
- všeobecné směrnice pro SikaFast

### Balení:

SikaFast®-5211 (komp. A):	20 l hobok
SikaFast®-5200 (komp. B):	18 l hobok
duální kartuše (komp. A+B )	250 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 naší 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 nezbavují 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  
Tüfenwies 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](mailto: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](mailto:sika@sk.sika.com)

SikaFast®-5211 2/2



## Příloha 4 – Vstupní soubor do programu ANSYS, skleněný nosník

Vstupní soubor do programu ANSYS pro numerický model skleněného nosníku, který je popsán v kapitole 5.1.

```

/FILENAM,file
/PREP 7

/OUTPUT,file_OUT,TXT,,
/OUTPUT
/OUTPUT,file_OUT,TXT,,append

!variable values (mm)
tw=8 !thickness of the glass pane
hw=360 !height of the glass pane

!element data
ET,1,SOLID45

!material characteristics
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,70000
MPDATA,PRXY,1,,0.23

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,3500
MPDATA,PRXY,2,,0.39

!keypoints
K,1,0,0,0
K,2,50,0.39252,0
K,3,100,0.783963,0
K,4,125,0.978946,0
K,5,150,1.173258,0
K,6,200,1.559338,0
K,7,250,1.941143,0
K,8,300,2.317627,0
K,9,350,2.68776,0
K,10,400,3.050525,0
K,11,450,3.404929,0
K,12,500,3.75,0
K,13,550,4.084793,0
K,14,600,4.408389,0
K,15,650,4.719903,0
K,16,693,4.977489,0
K,17,700,5.01848,0
K,18,707,5.059201,0
K,19,750,5.303301,0
K,20,800,5.573586,0
K,21,850,5.828595,0
K,22,900,6.067627,0
K,23,950,6.290029,0
K,24,1000,6.495191,0
K,25,1050,6.682549,0
K,26,1100,6.851591,0
K,27,1150,7.001853,0

K,28,1200,7.132924,0
K,29,1250,7.244444,0
K,30,1300,7.336107,0
K,31,1350,7.407663,0
K,32,1400,7.458914,0
K,33,1450,7.489722,0
K,34,1500,7.5,0

K,35,0,0,25
K,36,0,0,(hw-25)
K,37,0,0,hw

K,41,0,(0+tw),0
K,42,50,(0.39252+tw),0
K,43,100,(0.783963+tw),0
K,44,125,(0.978946+tw),0
K,45,150,(1.173258+tw),0
K,46,200,(1.559338+tw),0
K,47,250,(1.941143+tw),0
K,48,300,(2.317627+tw),0
K,49,350,(2.68776+tw),0
K,50,400,(3.050525+tw),0
K,51,450,(3.404929+tw),0
K,52,500,(3.75+tw),0
K,53,550,(4.084793+tw),0
K,54,600,(4.408389+tw),0
K,55,650,(4.719903+tw),0
K,56,693,(4.977489+tw),0
K,57,700,(5.01848+tw),0
K,58,707,(5.059201+tw),0
K,59,750,(5.303301+tw),0
K,60,800,(5.573586+tw),0
K,61,850,(5.828595+tw),0
K,62,900,(6.067627+tw),0
K,63,950,(6.290029+tw),0
K,64,1000,(6.495191+tw),0
K,65,1050,(6.682549+tw),0
K,66,1100,(6.851591+tw),0
K,67,1150,(7.001853+tw),0
K,68,1200,(7.132924+tw),0
K,69,1250,(7.244444+tw),0
K,70,1300,(7.336107+tw),0
K,71,1350,(7.407663+tw),0
K,72,1400,(7.458914+tw),0
K,73,1450,(7.489722+tw),0
K,74,1500,(7.5+tw),0

!lines
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 5, 6

```

LSTR,	6,	7	LSTR,	72,	73
LSTR,	7,	8	LSTR,	73,	74
LSTR,	8,	9			
LSTR,	9,	10	LSTR,	1,	41
LSTR,	10,	11	LSTR,	3,	43
LSTR,	11,	12	LSTR,	4,	44
LSTR,	12,	13	LSTR,	5,	45
LSTR,	13,	14	LSTR,	16,	56
LSTR,	14,	15	LSTR,	17,	57
LSTR,	15,	16	LSTR,	18,	58
LSTR,	16,	17	LSTR,	34,	74
LSTR,	17,	18	LSTR,	1,	35
LSTR,	18,	19	LSTR,	35,	36
LSTR,	19,	20	LSTR,	36,	37
LSTR,	20,	21			
LSTR,	21,	22	lareas		
LSTR,	22,	23	FLST,2,6,4		
LSTR,	23,	24	FITEM,2,67		
LSTR,	24,	25	FITEM,2,1		
LSTR,	25,	26	FITEM,2,2		
LSTR,	26,	27	FITEM,2,68		
LSTR,	27,	28	FITEM,2,35		
LSTR,	28,	29	FITEM,2,34		
LSTR,	29,	30	AL,P51X		
LSTR,	30,	31	FLST,2,4,4		
LSTR,	31,	32	FITEM,2,68		
LSTR,	32,	33	FITEM,2,3		
LSTR,	33,	34	FITEM,2,69		
			FITEM,2,36		
LSTR,	41,	42	AL,P51X		
LSTR,	42,	43	FLST,2,4,4		
LSTR,	43,	44	FITEM,2,69		
LSTR,	44,	45	FITEM,2,4		
LSTR,	45,	46	FITEM,2,70		
LSTR,	46,	47	FITEM,2,37		
LSTR,	47,	48	AL,P51X		
LSTR,	48,	49			
LSTR,	49,	50	FLST,2,24,4		
LSTR,	50,	51	FITEM,2,70		
LSTR,	51,	52	FITEM,2,5		
LSTR,	52,	53	FITEM,2,6		
LSTR,	53,	54	FITEM,2,7		
LSTR,	54,	55	FITEM,2,8		
LSTR,	55,	56	FITEM,2,9		
LSTR,	56,	57	FITEM,2,10		
LSTR,	57,	58	FITEM,2,11		
LSTR,	58,	59	FITEM,2,12		
LSTR,	59,	60	FITEM,2,13		
LSTR,	60,	61	FITEM,2,14		
LSTR,	61,	62	FITEM,2,15		
LSTR,	62,	63	FITEM,2,71		
LSTR,	63,	64	FITEM,2,48		
LSTR,	64,	65	FITEM,2,47		
LSTR,	65,	66	FITEM,2,46		
LSTR,	66,	67	FITEM,2,45		
LSTR,	67,	68	FITEM,2,44		
LSTR,	68,	69	FITEM,2,43		
LSTR,	69,	70	FITEM,2,42		
LSTR,	70,	71	FITEM,2,41		
LSTR,	71,	72	FITEM,2,40		

FITEM,2,39  
FITEM,2,38  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,71  
FITEM,2,16  
FITEM,2,72  
FITEM,2,49  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,72  
FITEM,2,17  
FITEM,2,73  
FITEM,2,50  
AL,P51X

FLST,2,34,4  
FITEM,2,73  
FITEM,2,18  
FITEM,2,19  
FITEM,2,20  
FITEM,2,21  
FITEM,2,22  
FITEM,2,23  
FITEM,2,24  
FITEM,2,25  
FITEM,2,26  
FITEM,2,27  
FITEM,2,28  
FITEM,2,29  
FITEM,2,30  
FITEM,2,31  
FITEM,2,32  
FITEM,2,33  
FITEM,2,74  
FITEM,2,66  
FITEM,2,65  
FITEM,2,64  
FITEM,2,63  
FITEM,2,62  
FITEM,2,61  
FITEM,2,60  
FITEM,2,59  
FITEM,2,58  
FITEM,2,57  
FITEM,2,56  
FITEM,2,55  
FITEM,2,54  
FITEM,2,53  
FITEM,2,52  
FITEM,2,51  
AL,P51X

!extrude areas to volumes  
FLST,2,7,5,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-7  
FLST,8,3,4  
FITEM,8,75

FITEM,8,76  
FITEM,8,77  
VDRAG,P51X, , , , ,P51X

!glue all volumes  
FLST,2,21,6,ORDE,2  
FITEM,2,1  
FITEM,2,-21  
VGLUE,P51X

!merge all items  
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

!meshing  
VATT, 1, , 1, 0

ESIZE,10,0,  
FLST,5,21,6,ORDE,2  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-21  
CM,\_Y,VOLU  
VSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,\_Y  
!\*  
VSWEEP,\_Y1  
!\*  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1  
CMDELE,\_Y2  
!\*

!supports - line on the bottom flange  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,72  
!\*  
/GO  
DL,P51X, ,UZ,

!supports - lateral support  
FLST,2,4,4,ORDE,4  
FITEM,2,16  
FITEM,2,148  
FITEM,2,290  
FITEM,2,432  
!\*  
/GO  
DL,P51X, ,UY,

!supports - symmetry - on area  
FLST,2,3,5,ORDE,3  
FITEM,2,71  
FITEM,2,152  
FITEM,2,233  
!\*  
/GO  
DA,P51X,UX,

!load [N]

F=8000 !one point load on 6 keypoints

FLST,2,6,3,ORDE,4

FITEM,2,211

FITEM,2,-212

FITEM,2,214

FITEM,2,-217

!\*

/GO

FK,P51X,FZ,(-F/6)

!solution properties

ANTYPE,0

NLGEOM,1

NSUBST,16,16,16

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL

AUTOTS,1

LNSRCH,1

NEQIT,10000

## Příloha 5 – Vstupní soubor do programu ANSYS, smykové zkoušky lepeného spoje

Vstupní soubor do programu ANSYS pro numerický model smykových zkoušek lepeného spoje, který je popsán v kapitole 5.2.1.

```

/FILENAM,file
/PREP 7

/OUTPUT,file_OUT,TXT,,
/OUTPUT
/OUTPUT,file_OUT,TXT,,append

!variable values (mm)
ts=25 !thickness of the steel
ta1=3 !thickness of the adhesive layer 1
tg=19 !thickness of the glass
ta2=3 !thickness of the adhesive layer 2
b=50 !width
ls=75 !length of the steel
lg=110 !length of the glass
la=47.5 !length of the adhesive

!element data
ET,1,SOLID45
ET,2,SOLID185

!material characteristics
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,210000
MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,70000
MPDATA,PRXY,2,,0.23

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,727.2727
MPDATA,PRXY,3,,0.4

TB,MISO,3,1,16,
TBTEMP,0
TBPT,,0.000,0.000
TBPT,,0.0055,4.0
TBPT,,0.011,5.8
TBPT,,0.016,6.3
TBPT,,0.027,6.8
TBPT,,0.045,7.2
TBPT,,0.07,7.40
TBPT,,0.1,7.6
TBPT,,0.15,7.75
TBPT,,0.2,7.75
TBPT,,0.25,7.75

TBPT,,0.3,7.75
TBPT,,0.35,7.75
TBPT,,0.4,7.75
TBPT,,0.45,7.75
TBPT,,0.5,7.75

!keypoints
K,1,0,0,0,
K,2,la,0,0,
K,3,lg-la,0,0,
K,4,lg,0,0,
K,5,0,tg,0,
K,6,la,tg,0,
K,7,lg-la,tg,0,
K,8,lg,tg,0,
K,9,0,tg+ta1,0,
K,10,la,tg+ta1,0,
K,11,lg-la,tg+ta1,0,
K,12,lg,tg+ta1,0,
K,13,la-ls,tg+ta1,0,
K,14,lg+ls-la,tg+ta1,0,
K,15,la-ls,tg+ta1+ts,0,
K,16,0,tg+ta1+ts,0,
K,17,la,tg+ta1+ts,0,
K,18,lg-la,tg+ta1+ts,0,
K,19,lg,tg+ta1+ts,0,
K,20,lg+ls-la,tg+ta1+ts,0,
K,21,0,tg+ta1+ts+ta2,0,
K,22,la,tg+ta1+ts+ta2,0,
K,23,lg-la,tg+ta1+ts+ta2,0,
K,24,lg,tg+ta1+ts+ta2,0,
K,25,0,tg+ta1+ts+ta2+tg,0,
K,26,la,tg+ta1+ts+ta2+tg,0,
K,27,lg-la,tg+ta1+ts+ta2+tg,0,
K,28,lg,tg+ta1+ts+ta2+tg,0,

K,29,0,0,b,

!areas
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,6
FITEM,2,5
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,7
FITEM,2,6

```

```

A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,8
FITEM,2,7
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,10
FITEM,2,9
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,12
FITEM,2,11
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,13
FITEM,2,9
FITEM,2,16
FITEM,2,15
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,17
FITEM,2,16
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,19
FITEM,2,18
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,12
FITEM,2,14
FITEM,2,20
FITEM,2,19
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,16
FITEM,2,17
FITEM,2,22
FITEM,2,21
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,18
FITEM,2,19
FITEM,2,24
FITEM,2,23
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FITEM,2,26
FITEM,2,25

```

```

A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,22
FITEM,2,23
FITEM,2,27
FITEM,2,26
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,28
FITEM,2,27
A,P51X

!extrude areas to volumes
LSTR, 1, 29

FLST,2,14,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
VDRAG,P51X, , , , , 43

!merge all items
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

!glue all volumes
FLST,2,14,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-14
VGLUE,P51X

/PNUM,MAT,1
/REPLOT

!meshing
FLST,5,4,6,ORDE,4
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 2, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,6,6,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
FITEM,5,12
FITEM,5,-14
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y

```

```
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
NLGEOM,ON
NSUBST,500,500,500
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
```

```
!*
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,6
FITEM,5,-9
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
```

```
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
FLST,5,14,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-14
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
```

```
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
```

```
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```

```
!supports
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,39
!*
/GO
DA,P51X,ALL,
```

```
!load [N]
F=50000
q=F/(b*ts)
```

```
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,49
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,-q
```

```
!solution properties
ANTYPE,0
```



## Příloha 6 – Vstupní soubor do programu ANSYS, hybridní nosník s příčným držením na ztrátu stability

Vstupní soubor do programu ANSYS pro numerický model hybridního sklo-ocelového nosníku o délce 4250 mm s příčným držením na ztrátu stability, který je popsán v kapitole 5.4.1.

```

/FILENAM,file
/PREP 7

/OUTPUT,file_OUT,TXT,,
/OUTPUT
/OUTPUT,file_OUT,TXT,,append

!variable values (mm)
tw=19 !thickness of the glass pane
hw=290 !height of the glass pane
tg=3 !thickness of the glue
ts=8 !thickness of the steel
bs=60 !width of the steel
d=10 !potenciometer position

!element data
ET,1,SOLID185

!material characteristics
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,210000
MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,70000
MPDATA,PRXY,2,,0.2

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,260.0
MPDATA,PRXY,3,,0.4

TB,MISO,3,1,16,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.000,0.000
TBPT,,0.0055,1.43
TBPT,,0.011,2.3
TBPT,,0.016,2.9
TBPT,,0.027,3.4
TBPT,,0.045,3.9
TBPT,,0.07,4.4
TBPT,,0.1,4.8
TBPT,,0.15,5.3
TBPT,,0.2,5.7
TBPT,,0.25,6.05
TBPT,,0.3,6.3

TBPT,,0.35,6.45
TBPT,,0.4,6.6
TBPT,,0.45,6.7
TBPT,,1,6.8

! keypoints
K,1,0,0,0
K,2,125,0,0
K,3,925,0,0
K,4,2125,0,0
K,5,3325,0,0
K,6,4125,0,0
K,7,4250,0,0

K,11,0,(bs-tw)/2,0
K,12,0,((bs-tw)/2+tw),0
K,13,0,bs,0
K,14,0,0,ts
K,15,0,(bs-tw)/2,ts
K,16,0,((bs-tw)/2+tw),ts
K,17,0,bs,ts
K,18,0,(bs-tw)/2,(ts+tg)
K,19,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg)
K,20,0,(bs-tw)/2,(ts+tg+d)
K,21,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg+d)
K,22,0,(bs-tw)/2,(ts+tg+hw-d)
K,23,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw-d)
K,24,0,(bs-tw)/2,(ts+tg+hw)
K,25,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw)
K,26,0,0,(ts+tg+hw+tg)
K,27,0,(bs-tw)/2,(ts+tg+hw+tg)
K,28,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)
K,29,0,bs,(ts+tg+hw+tg)
K,30,0,0,(ts+tg+hw+tg+ts)
K,31,0,(bs-tw)/2,(ts+tg+hw+tg+ts)
K,32,0,((bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg+ts)
K,33,0,bs,(ts+tg+hw+tg+ts)

!lines
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 5, 6
LSTR, 6, 7

LSTR, 1, 11
LSTR, 11, 12

```

LSTR, 12, 13  
 LSTR, 1, 14  
 LSTR, 11, 15  
 LSTR, 12, 16  
 LSTR, 13, 17  
 LSTR, 14, 15  
 LSTR, 15, 16  
 LSTR, 16, 17  
 LSTR, 15, 18  
 LSTR, 16, 19  
 LSTR, 18, 19  
 LSTR, 18, 20  
 LSTR, 19, 21  
 LSTR, 20, 21  
 LSTR, 20, 22  
 LSTR, 21, 23  
 LSTR, 22, 23  
 LSTR, 22, 24  
 LSTR, 23, 25  
 LSTR, 24, 25  
 LSTR, 24, 27  
 LSTR, 25, 28  
 LSTR, 26, 27  
 LSTR, 27, 28  
 LSTR, 28, 29  
 LSTR, 26, 30  
 LSTR, 27, 31  
 LSTR, 28, 32  
 LSTR, 29, 33  
 LSTR, 30, 31  
 LSTR, 31, 32  
 LSTR, 32, 33

!areas

FLST,2,4,4  
 FITEM,2,9  
 FITEM,2,13  
 FITEM,2,16  
 FITEM,2,12  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,12  
 FITEM,2,8  
 FITEM,2,11  
 FITEM,2,15  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,11  
 FITEM,2,7  
 FITEM,2,10  
 FITEM,2,14  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,18  
 FITEM,2,15  
 FITEM,2,17  
 FITEM,2,19  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,21

FITEM,2,19  
 FITEM,2,20  
 FITEM,2,22  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,24  
 FITEM,2,22  
 FITEM,2,23  
 FITEM,2,25  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,27  
 FITEM,2,25  
 FITEM,2,26  
 FITEM,2,28  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,28  
 FITEM,2,30  
 FITEM,2,32  
 FITEM,2,29  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,34  
 FITEM,2,31  
 FITEM,2,35  
 FITEM,2,38  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,32  
 FITEM,2,36  
 FITEM,2,39  
 FITEM,2,35  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,33  
 FITEM,2,37  
 FITEM,2,40  
 FITEM,2,36  
 AL,P51X

!extrude areas to volumes

FLST,2,11,5,ORDE,2  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,-11  
 FLST,2,11,5,ORDE,2  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,-11  
 LPLOT  
 FLST,8,6,4  
 FITEM,8,1  
 FITEM,8,2  
 FITEM,8,3  
 FITEM,8,4  
 FITEM,8,5  
 FITEM,8,6  
 VDRAG,P51X, , , , ,P51X

!glue all volumes

FLST,2,66,6,ORDE,2

```

FITEM,2,1
FITEM,2,-66
VGLUE,P51X

!merge all items
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

!meshing atributes
FLST,5,36,6,ORDE,14
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
FITEM,5,9
FITEM,5,-14
FITEM,5,20
FITEM,5,-25
FITEM,5,31
FITEM,5,-36
FITEM,5,42
FITEM,5,-47
FITEM,5,53
FITEM,5,-58
FITEM,5,64
FITEM,5,-66
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,12,6,ORDE,12
FITEM,5,4
FITEM,5,8
FITEM,5,15
FITEM,5,19
FITEM,5,26
FITEM,5,30
FITEM,5,37
FITEM,5,41
FITEM,5,48
FITEM,5,52
FITEM,5,59
FITEM,5,63
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,18,6,ORDE,12
FITEM,5,5

```

```

FITEM,5,-7
FITEM,5,16
FITEM,5,-18
FITEM,5,27
FITEM,5,-29
FITEM,5,38
FITEM,5,-40
FITEM,5,49
FITEM,5,-51
FITEM,5,60
FITEM,5,-62
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

!merge all items
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

```

```

!supports - line on the bottom flange
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,87
FITEM,2,93
FITEM,2,98
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,319
FITEM,2,325
FITEM,2,330
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,

```

```

FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,319
FITEM,2,325
FITEM,2,330
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,

```

```

!supports - lateral supports (line supports)
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,127
FITEM,2,131
FITEM,2,243
FITEM,2,247
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,

```

```
!load [N]
F=140000 !one point load on 4 keypoints
```

```
FLST,2,8,3,ORDE,8
FITEM,2,3
FITEM,2,5
FITEM,2,55
FITEM,2,-56
FITEM,2,60
FITEM,2,103
FITEM,2,-104
FITEM,2,108
!*
/GO
FK,P51X,FZ,(F/8)
```

```
!meshing
ESIZE,10,0,
FLST,5,66,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-66
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```

```
!solution properties
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,140,140,140
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
LNSRCH,1
NEQIT,10000
```

## Příloha 7 – Vstupní soubor do programu ANSYS, hybridní nosník bez držení na ztrátu příčné a torzní stability

Vstupní soubor do programu ANSYS pro numerický model hybridního sklo-ocelového nosníku o délce 4750 mm bez držení na ztrátu příčné a torzní stability, který je popsán v kapitole 5.6.2.

```

/FILENAM,file
/PREP 7

/OUTPUT,file_OUT,TXT,,
/OUTPUT
/OUTPUT,file_OUT,TXT,,append

!variable values (mm)
tw=10 !thickness of the glass pane
hw=290 !height of the glass pane
tg=3 !thickness of the glue
ts=8 !thickness of the steel
bs=40 !width of the steel
d=10 !potenciometer position
m=(2.5)

!element data
ET,1,SOLID45
ET,2,SOLID185

!material characteristics
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,210000
MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,70000
MPDATA,PRXY,2,,0.23

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,260.0
MPDATA,PRXY,3,,0.4

TB,MISO,3,1,16,0
TBTEMP,0
TBPT,,0.000,0.000
TBPT,,0.0055,1.43
TBPT,,0.011,2.3
TBPT,,0.016,2.9
TBPT,,0.027,3.4
TBPT,,0.045,3.9
TBPT,,0.07,4.4
TBPT,,0.1,4.8
TBPT,,0.15,5.3
TBPT,,0.2,5.7

TBPT,,0.25,6.05
TBPT,,0.3,6.3
TBPT,,0.35,6.45
TBPT,,0.4,6.6
TBPT,,0.45,6.7
TBPT,,1,6.8

!keypoints
K,1,0,0,0
K,2,50,(m*0.033063),0
K,3,100,(m*0.066091),0
K,4,125,(m*0.082579),0
K,5,150,(m*0.099046),0
K,6,200,(m*0.131892),0
K,7,250,(m*0.164595),0
K,8,300,(m*0.197117),0
K,9,350,(m*0.229424),0
K,10,400,(m*0.261480),0
K,11,450,(m*0.293250),0
K,12,500,(m*0.324699),0
K,13,550,(m*0.355794),0
K,14,600,(m*0.386499),0
K,15,650,(m*0.416782),0
K,16,700,(m*0.446609),0
K,17,750,(m*0.475947),0
K,18,800,(m*0.504766),0
K,19,850,(m*0.533032),0
K,20,915,(m*0.568902),0
K,21,925,(m*0.574329),0
K,22,950,(m*0.587785),0
K,23,1000,(m*0.614213),0
K,24,1050,(m*0.639969),0
K,25,1100,(m*0.665025),0
K,26,1150,(m*0.689353),0
K,27,1200,(m*0.712928),0
K,28,1250,(m*0.735724),0
K,29,1300,(m*0.757715),0
K,30,1350,(m*0.778877),0
K,31,1400,(m*0.799188),0
K,32,1450,(m*0.818625),0
K,33,1500,(m*0.837166),0
K,34,1550,(m*0.854793),0
K,35,1600,(m*0.871484),0
K,36,1670,(m*0.893248),0
K,37,1740,(m*0.913097),0
K,38,1810,(m*0.930989),0
K,39,1880,(m*0.946886),0
K,40,1950,(m*0.960754),0

```

K,41,2020,(m\*0.972563),0  
 K,42,2090,(m\*0.982287),0  
 K,43,2160,(m\*0.989907),0  
 K,44,2230,(m\*0.995405),0  
 K,45,2300,(m\*0.998770),0  
  
 K,46,2375,(m\*1.000000),0  
  
 K,47,2450,(m\*0.998770),0  
 K,48,2520,(m\*0.995405),0  
 K,49,2590,(m\*0.989907),0  
 K,50,2660,(m\*0.982287),0  
 K,51,2730,(m\*0.972563),0  
 K,52,2800,(m\*0.960754),0  
 K,53,2870,(m\*0.946886),0  
 K,54,2940,(m\*0.930989),0  
 K,55,3010,(m\*0.913097),0  
 K,56,3080,(m\*0.893248),0  
 K,57,3150,(m\*0.871484),0  
 K,58,3200,(m\*0.854793),0  
 K,59,3250,(m\*0.837166),0  
 K,60,3300,(m\*0.818625),0  
 K,61,3350,(m\*0.799188),0  
 K,62,3400,(m\*0.778877),0  
 K,63,3450,(m\*0.757715),0  
 K,64,3500,(m\*0.735724),0  
 K,65,3550,(m\*0.712928),0  
 K,66,3600,(m\*0.689353),0  
 K,67,3650,(m\*0.665025),0  
 K,68,3700,(m\*0.639969),0  
 K,69,3750,(m\*0.614213),0  
 K,70,3800,(m\*0.587785),0  
 K,71,3825,(m\*0.574329),0  
 K,72,3835,(m\*0.568902),0  
 K,73,3900,(m\*0.533032),0  
 K,74,3950,(m\*0.504766),0  
 K,75,4000,(m\*0.475947),0  
 K,76,4050,(m\*0.446609),0  
 K,77,4100,(m\*0.416782),0  
 K,78,4150,(m\*0.386499),0  
 K,79,4200,(m\*0.355794),0  
 K,80,4250,(m\*0.324699),0  
 K,81,4300,(m\*0.293250),0  
 K,82,4350,(m\*0.261480),0  
 K,83,4400,(m\*0.229424),0  
 K,84,4450,(m\*0.197117),0  
 K,85,4500,(m\*0.164595),0  
 K,86,4550,(m\*0.131892),0  
 K,87,4600,(m\*0.099046),0  
 K,88,4625,(m\*0.082579),0  
 K,89,4650,(m\*0.066091),0  
 K,90,4700,(m\*0.033063),0  
 K,91,4750,0,0  
  
 K,101,0,(0+(bs-tw)/2),0  
 K,102,50,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2),0  
 K,103,100,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2),0  
 K,104,125,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2),0  
 K,105,150,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2),0

K,106,200,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2),0  
 K,107,250,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2),0  
 K,108,300,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2),0  
 K,109,350,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2),0  
 K,110,400,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2),0  
 K,111,450,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2),0  
 K,112,500,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2),0  
 K,113,550,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2),0  
 K,114,600,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2),0  
 K,115,650,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2),0  
 K,116,700,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2),0  
 K,117,750,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2),0  
 K,118,800,((m\*0.504766)+(bs-tw)/2),0  
 K,119,850,((m\*0.533032)+(bs-tw)/2),0  
 K,120,915,((m\*0.568902)+(bs-tw)/2),0  
 K,121,925,((m\*0.574329)+(bs-tw)/2),0  
 K,122,950,((m\*0.587785)+(bs-tw)/2),0  
 K,123,1000,((m\*0.614213)+(bs-tw)/2),0  
 K,124,1050,((m\*0.639969)+(bs-tw)/2),0  
 K,125,1100,((m\*0.665025)+(bs-tw)/2),0  
 K,126,1150,((m\*0.689353)+(bs-tw)/2),0  
 K,127,1200,((m\*0.712928)+(bs-tw)/2),0  
 K,128,1250,((m\*0.735724)+(bs-tw)/2),0  
 K,129,1300,((m\*0.757715)+(bs-tw)/2),0  
 K,130,1350,((m\*0.778877)+(bs-tw)/2),0  
 K,131,1400,((m\*0.799188)+(bs-tw)/2),0  
 K,132,1450,((m\*0.818625)+(bs-tw)/2),0  
 K,133,1500,((m\*0.837166)+(bs-tw)/2),0  
 K,134,1550,((m\*0.854793)+(bs-tw)/2),0  
 K,135,1600,((m\*0.871484)+(bs-tw)/2),0  
 K,136,1670,((m\*0.893248)+(bs-tw)/2),0  
 K,137,1740,((m\*0.913097)+(bs-tw)/2),0  
 K,138,1810,((m\*0.930989)+(bs-tw)/2),0  
 K,139,1880,((m\*0.946886)+(bs-tw)/2),0  
 K,140,1950,((m\*0.960754)+(bs-tw)/2),0  
 K,141,2020,((m\*0.972563)+(bs-tw)/2),0  
 K,142,2090,((m\*0.982287)+(bs-tw)/2),0  
 K,143,2160,((m\*0.989907)+(bs-tw)/2),0  
 K,144,2230,((m\*0.995405)+(bs-tw)/2),0  
 K,145,2300,((m\*0.998770)+(bs-tw)/2),0  
  
 K,146,2375,((m\*1.000000)+(bs-tw)/2),0  
  
 K,147,2450,((m\*0.998770)+(bs-tw)/2),0  
 K,148,2520,((m\*0.995405)+(bs-tw)/2),0  
 K,149,2590,((m\*0.989907)+(bs-tw)/2),0  
 K,150,2660,((m\*0.982287)+(bs-tw)/2),0  
 K,151,2730,((m\*0.972563)+(bs-tw)/2),0  
 K,152,2800,((m\*0.960754)+(bs-tw)/2),0  
 K,153,2870,((m\*0.946886)+(bs-tw)/2),0  
 K,154,2940,((m\*0.930989)+(bs-tw)/2),0  
 K,155,3010,((m\*0.913097)+(bs-tw)/2),0  
 K,156,3080,((m\*0.893248)+(bs-tw)/2),0  
 K,157,3150,((m\*0.871484)+(bs-tw)/2),0  
 K,158,3200,((m\*0.854793)+(bs-tw)/2),0  
 K,159,3250,((m\*0.837166)+(bs-tw)/2),0  
 K,160,3300,((m\*0.818625)+(bs-tw)/2),0  
 K,161,3350,((m\*0.799188)+(bs-tw)/2),0  
 K,162,3400,((m\*0.778877)+(bs-tw)/2),0  
 K,163,3450,((m\*0.757715)+(bs-tw)/2),0

K,164,3500,((m\*0.735724)+(bs-tw)/2),0  
K,165,3550,((m\*0.712928)+(bs-tw)/2),0  
K,166,3600,((m\*0.689353)+(bs-tw)/2),0  
K,167,3650,((m\*0.665025)+(bs-tw)/2),0  
K,168,3700,((m\*0.639969)+(bs-tw)/2),0  
K,169,3750,((m\*0.614213)+(bs-tw)/2),0  
K,170,3800,((m\*0.587785)+(bs-tw)/2),0  
K,171,3825,((m\*0.574329)+(bs-tw)/2),0  
K,172,3835,((m\*0.568902)+(bs-tw)/2),0  
K,173,3900,((m\*0.533032)+(bs-tw)/2),0  
K,174,3950,((m\*0.504766)+(bs-tw)/2),0  
K,175,4000,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2),0  
K,176,4050,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2),0  
K,177,4100,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2),0  
K,178,4150,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2),0  
K,179,4200,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2),0  
K,180,4250,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2),0  
K,181,4300,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2),0  
K,182,4350,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2),0  
K,183,4400,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2),0  
K,184,4450,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2),0  
K,185,4500,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2),0  
K,186,4550,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2),0  
K,187,4600,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2),0  
K,188,4625,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2),0  
K,189,4650,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2),0  
K,190,4700,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2),0  
K,191,4750,(0+(bs-tw)/2),0

K,201,0,(0+(bs-tw)/2+tw),0  
K,202,50,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,203,100,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,204,125,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,205,150,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,206,200,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,207,250,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,208,300,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,209,350,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,210,400,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,211,450,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,212,500,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,213,550,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,214,600,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,215,650,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,216,700,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,217,750,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,218,800,((m\*0.504766)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,219,850,((m\*0.533032)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,220,915,((m\*0.568902)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,221,925,((m\*0.574329)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,222,950,((m\*0.587785)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,223,1000,((m\*0.614213)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,224,1050,((m\*0.639969)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,225,1100,((m\*0.665025)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,226,1150,((m\*0.689353)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,227,1200,((m\*0.712928)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,228,1250,((m\*0.735724)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,229,1300,((m\*0.757715)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,230,1350,((m\*0.778877)+(bs-tw)/2+tw),0

K,231,1400,((m\*0.799188)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,232,1450,((m\*0.818625)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,233,1500,((m\*0.837166)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,234,1550,((m\*0.854793)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,235,1600,((m\*0.871484)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,236,1670,((m\*0.893248)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,237,1740,((m\*0.913097)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,238,1810,((m\*0.930989)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,239,1880,((m\*0.946886)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,240,1950,((m\*0.960754)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,241,2020,((m\*0.972563)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,242,2090,((m\*0.982287)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,243,2160,((m\*0.989907)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,244,2230,((m\*0.995405)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,245,2300,((m\*0.998770)+(bs-tw)/2+tw),0

K,246,2375,((m\*1.000000)+(bs-tw)/2+tw),0

K,247,2450,((m\*0.998770)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,248,2520,((m\*0.995405)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,249,2590,((m\*0.989907)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,250,2660,((m\*0.982287)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,251,2730,((m\*0.972563)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,252,2800,((m\*0.960754)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,253,2870,((m\*0.946886)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,254,2940,((m\*0.930989)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,255,3010,((m\*0.913097)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,256,3080,((m\*0.893248)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,257,3150,((m\*0.871484)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,258,3200,((m\*0.854793)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,259,3250,((m\*0.837166)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,260,3300,((m\*0.818625)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,261,3350,((m\*0.799188)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,262,3400,((m\*0.778877)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,263,3450,((m\*0.757715)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,264,3500,((m\*0.735724)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,265,3550,((m\*0.712928)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,266,3600,((m\*0.689353)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,267,3650,((m\*0.665025)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,268,3700,((m\*0.639969)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,269,3750,((m\*0.614213)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,270,3800,((m\*0.587785)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,271,3825,((m\*0.574329)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,272,3835,((m\*0.568902)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,273,3900,((m\*0.533032)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,274,3950,((m\*0.504766)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,275,4000,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,276,4050,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,277,4100,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,278,4150,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,279,4200,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,280,4250,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,281,4300,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,282,4350,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,283,4400,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,284,4450,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,285,4500,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,286,4550,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,287,4600,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,288,4625,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2+tw),0

K,289,4650,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,290,4700,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2+tw),0  
K,291,4750,(0+(bs-tw)/2+tw),0

K,301,0,(0+bs),0  
K,302,50,((m\*0.033063)+bs),0  
K,303,100,((m\*0.066091)+bs),0  
K,304,125,((m\*0.082579)+bs),0  
K,305,150,((m\*0.099046)+bs),0  
K,306,200,((m\*0.131892)+bs),0  
K,307,250,((m\*0.164595)+bs),0  
K,308,300,((m\*0.197117)+bs),0  
K,309,350,((m\*0.229424)+bs),0  
K,310,400,((m\*0.261480)+bs),0  
K,311,450,((m\*0.293250)+bs),0  
K,312,500,((m\*0.324699)+bs),0  
K,313,550,((m\*0.355794)+bs),0  
K,314,600,((m\*0.386499)+bs),0  
K,315,650,((m\*0.416782)+bs),0  
K,316,700,((m\*0.446609)+bs),0  
K,317,750,((m\*0.475947)+bs),0  
K,318,800,((m\*0.504766)+bs),0  
K,319,850,((m\*0.533032)+bs),0  
K,320,915,((m\*0.568902)+bs),0  
K,321,925,((m\*0.574329)+bs),0  
K,322,950,((m\*0.587785)+bs),0  
K,323,1000,((m\*0.614213)+bs),0  
K,324,1050,((m\*0.639969)+bs),0  
K,325,1100,((m\*0.665025)+bs),0  
K,326,1150,((m\*0.689353)+bs),0  
K,327,1200,((m\*0.712928)+bs),0  
K,328,1250,((m\*0.735724)+bs),0  
K,329,1300,((m\*0.757715)+bs),0  
K,330,1350,((m\*0.778877)+bs),0  
K,331,1400,((m\*0.799188)+bs),0  
K,332,1450,((m\*0.818625)+bs),0  
K,333,1500,((m\*0.837166)+bs),0  
K,334,1550,((m\*0.854793)+bs),0  
K,335,1600,((m\*0.871484)+bs),0  
K,336,1670,((m\*0.893248)+bs),0  
K,337,1740,((m\*0.913097)+bs),0  
K,338,1810,((m\*0.930989)+bs),0  
K,339,1880,((m\*0.946886)+bs),0  
K,340,1950,((m\*0.960754)+bs),0  
K,341,2020,((m\*0.972563)+bs),0  
K,342,2090,((m\*0.982287)+bs),0  
K,343,2160,((m\*0.989907)+bs),0  
K,344,2230,((m\*0.995405)+bs),0  
K,345,2300,((m\*0.998770)+bs),0

K,346,2375,((m\*1.000000)+bs),0

K,347,2450,((m\*0.998770)+bs),0  
K,348,2520,((m\*0.995405)+bs),0  
K,349,2590,((m\*0.989907)+bs),0  
K,350,2660,((m\*0.982287)+bs),0  
K,351,2730,((m\*0.972563)+bs),0  
K,352,2800,((m\*0.960754)+bs),0  
K,353,2870,((m\*0.946886)+bs),0

K,354,2940,((m\*0.930989)+bs),0  
K,355,3010,((m\*0.913097)+bs),0  
K,356,3080,((m\*0.893248)+bs),0  
K,357,3150,((m\*0.871484)+bs),0  
K,358,3200,((m\*0.854793)+bs),0  
K,359,3250,((m\*0.837166)+bs),0  
K,360,3300,((m\*0.818625)+bs),0  
K,361,3350,((m\*0.799188)+bs),0  
K,362,3400,((m\*0.778877)+bs),0  
K,363,3450,((m\*0.757715)+bs),0  
K,364,3500,((m\*0.735724)+bs),0  
K,365,3550,((m\*0.712928)+bs),0  
K,366,3600,((m\*0.689353)+bs),0  
K,367,3650,((m\*0.665025)+bs),0  
K,368,3700,((m\*0.639969)+bs),0  
K,369,3750,((m\*0.614213)+bs),0  
K,370,3800,((m\*0.587785)+bs),0  
K,371,3825,((m\*0.574329)+bs),0  
K,372,3835,((m\*0.568902)+bs),0  
K,373,3900,((m\*0.533032)+bs),0  
K,374,3950,((m\*0.504766)+bs),0  
K,375,4000,((m\*0.475947)+bs),0  
K,376,4050,((m\*0.446609)+bs),0  
K,377,4100,((m\*0.416782)+bs),0  
K,378,4150,((m\*0.386499)+bs),0  
K,379,4200,((m\*0.355794)+bs),0  
K,380,4250,((m\*0.324699)+bs),0  
K,381,4300,((m\*0.293250)+bs),0  
K,382,4350,((m\*0.261480)+bs),0  
K,383,4400,((m\*0.229424)+bs),0  
K,384,4450,((m\*0.197117)+bs),0  
K,385,4500,((m\*0.164595)+bs),0  
K,386,4550,((m\*0.131892)+bs),0  
K,387,4600,((m\*0.099046)+bs),0  
K,388,4625,((m\*0.082579)+bs),0  
K,389,4650,((m\*0.066091)+bs),0  
K,390,4700,((m\*0.033063)+bs),0  
K,391,4750,(0+bs),0

K,400,0,(0+(bs-tw)/2),ts  
K,401,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg)  
K,402,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+d)  
K,403,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw-d)  
K,404,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw)  
K,405,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
K,406,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg+ts)  
K,407,0,0,(ts+tg+hw+tg)  
K,408,0,(0+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
K,409,0,(0+bs),(ts+tg+hw+tg)

K,501,0,0,(ts+tg+hw+tg)  
K,502,50,(m\*0.033063),(ts+tg+hw+tg)  
K,503,100,(m\*0.066091),(ts+tg+hw+tg)  
K,504,125,(m\*0.082579),(ts+tg+hw+tg)  
K,505,150,(m\*0.099046),(ts+tg+hw+tg)  
K,506,200,(m\*0.131892),(ts+tg+hw+tg)  
K,507,250,(m\*0.164595),(ts+tg+hw+tg)  
K,508,300,(m\*0.197117),(ts+tg+hw+tg)



K,509,350,(m\*0.229424),(ts+tg+hw+tg)  
 K,510,400,(m\*0.261480),(ts+tg+hw+tg)  
 K,511,450,(m\*0.293250),(ts+tg+hw+tg)  
 K,512,500,(m\*0.324699),(ts+tg+hw+tg)  
 K,513,550,(m\*0.355794),(ts+tg+hw+tg)  
 K,514,600,(m\*0.386499),(ts+tg+hw+tg)  
 K,515,650,(m\*0.416782),(ts+tg+hw+tg)  
 K,516,700,(m\*0.446609),(ts+tg+hw+tg)  
 K,517,750,(m\*0.475947),(ts+tg+hw+tg)  
 K,518,800,(m\*0.504766),(ts+tg+hw+tg)  
 K,519,850,(m\*0.533032),(ts+tg+hw+tg)  
 K,520,915,(m\*0.568902),(ts+tg+hw+tg)  
 K,521,925,(m\*0.574329),(ts+tg+hw+tg)  
 K,522,950,(m\*0.587785),(ts+tg+hw+tg)  
 K,523,1000,(m\*0.614213),(ts+tg+hw+tg)  
 K,524,1050,(m\*0.639969),(ts+tg+hw+tg)  
 K,525,1100,(m\*0.665025),(ts+tg+hw+tg)  
 K,526,1150,(m\*0.689353),(ts+tg+hw+tg)  
 K,527,1200,(m\*0.712928),(ts+tg+hw+tg)  
 K,528,1250,(m\*0.735724),(ts+tg+hw+tg)  
 K,529,1300,(m\*0.757715),(ts+tg+hw+tg)  
 K,530,1350,(m\*0.778877),(ts+tg+hw+tg)  
 K,531,1400,(m\*0.799188),(ts+tg+hw+tg)  
 K,532,1450,(m\*0.818625),(ts+tg+hw+tg)  
 K,533,1500,(m\*0.837166),(ts+tg+hw+tg)  
 K,534,1550,(m\*0.854793),(ts+tg+hw+tg)  
 K,535,1600,(m\*0.871484),(ts+tg+hw+tg)  
 K,536,1670,(m\*0.893248),(ts+tg+hw+tg)  
 K,537,1740,(m\*0.913097),(ts+tg+hw+tg)  
 K,538,1810,(m\*0.930989),(ts+tg+hw+tg)  
 K,539,1880,(m\*0.946886),(ts+tg+hw+tg)  
 K,540,1950,(m\*0.960754),(ts+tg+hw+tg)  
 K,541,2020,(m\*0.972563),(ts+tg+hw+tg)  
 K,542,2090,(m\*0.982287),(ts+tg+hw+tg)  
 K,543,2160,(m\*0.989907),(ts+tg+hw+tg)  
 K,544,2230,(m\*0.995405),(ts+tg+hw+tg)  
 K,545,2300,(m\*0.998770),(ts+tg+hw+tg)  
  
 K,546,2375,(m\*1.000000),(ts+tg+hw+tg)  
  
 K,547,2450,(m\*0.998770),(ts+tg+hw+tg)  
 K,548,2520,(m\*0.995405),(ts+tg+hw+tg)  
 K,549,2590,(m\*0.989907),(ts+tg+hw+tg)  
 K,550,2660,(m\*0.982287),(ts+tg+hw+tg)  
 K,551,2730,(m\*0.972563),(ts+tg+hw+tg)  
 K,552,2800,(m\*0.960754),(ts+tg+hw+tg)  
 K,553,2870,(m\*0.946886),(ts+tg+hw+tg)  
 K,554,2940,(m\*0.930989),(ts+tg+hw+tg)  
 K,555,3010,(m\*0.913097),(ts+tg+hw+tg)  
 K,556,3080,(m\*0.893248),(ts+tg+hw+tg)  
 K,557,3150,(m\*0.871484),(ts+tg+hw+tg)  
 K,558,3200,(m\*0.854793),(ts+tg+hw+tg)  
 K,559,3250,(m\*0.837166),(ts+tg+hw+tg)  
 K,560,3300,(m\*0.818625),(ts+tg+hw+tg)  
 K,561,3350,(m\*0.799188),(ts+tg+hw+tg)  
 K,562,3400,(m\*0.778877),(ts+tg+hw+tg)  
 K,563,3450,(m\*0.757715),(ts+tg+hw+tg)  
 K,564,3500,(m\*0.735724),(ts+tg+hw+tg)  
 K,565,3550,(m\*0.712928),(ts+tg+hw+tg)  
 K,566,3600,(m\*0.689353),(ts+tg+hw+tg)

K,567,3650,(m\*0.665025),(ts+tg+hw+tg)  
 K,568,3700,(m\*0.639969),(ts+tg+hw+tg)  
 K,569,3750,(m\*0.614213),(ts+tg+hw+tg)  
 K,570,3800,(m\*0.587785),(ts+tg+hw+tg)  
 K,571,3825,(m\*0.574329),(ts+tg+hw+tg)  
 K,572,3835,(m\*0.568902),(ts+tg+hw+tg)  
 K,573,3900,(m\*0.533032),(ts+tg+hw+tg)  
 K,574,3950,(m\*0.504766),(ts+tg+hw+tg)  
 K,575,4000,(m\*0.475947),(ts+tg+hw+tg)  
 K,576,4050,(m\*0.446609),(ts+tg+hw+tg)  
 K,577,4100,(m\*0.416782),(ts+tg+hw+tg)  
 K,578,4150,(m\*0.386499),(ts+tg+hw+tg)  
 K,579,4200,(m\*0.355794),(ts+tg+hw+tg)  
 K,580,4250,(m\*0.324699),(ts+tg+hw+tg)  
 K,581,4300,(m\*0.293250),(ts+tg+hw+tg)  
 K,582,4350,(m\*0.261480),(ts+tg+hw+tg)  
 K,583,4400,(m\*0.229424),(ts+tg+hw+tg)  
 K,584,4450,(m\*0.197117),(ts+tg+hw+tg)  
 K,585,4500,(m\*0.164595),(ts+tg+hw+tg)  
 K,586,4550,(m\*0.131892),(ts+tg+hw+tg)  
 K,587,4600,(m\*0.099046),(ts+tg+hw+tg)  
 K,588,4625,(m\*0.082579),(ts+tg+hw+tg)  
 K,589,4650,(m\*0.066091),(ts+tg+hw+tg)  
 K,590,4700,(m\*0.033063),(ts+tg+hw+tg)  
 K,591,4750,0,(ts+tg+hw+tg)

K,601,0,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,602,50,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,603,100,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,604,125,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,605,150,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,606,200,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,607,250,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,608,300,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,609,350,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,610,400,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,611,450,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,612,500,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,613,550,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,614,600,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,615,650,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,616,700,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,617,750,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)

K,618,800,((m\*0.504766)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,619,850,((m\*0.533032)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,620,915,((m\*0.568902)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,621,925,((m\*0.574329)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,622,950,((m\*0.587785)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,623,1000,((m\*0.614213)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,624,1050,((m\*0.639969)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,625,1100,((m\*0.665025)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,626,1150,((m\*0.689353)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,627,1200,((m\*0.712928)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,628,1250,((m\*0.735724)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,629,1300,((m\*0.757715)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,630,1350,((m\*0.778877)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,631,1400,((m\*0.799188)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,632,1450,((m\*0.818625)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,633,1500,((m\*0.837166)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,634,1550,((m\*0.854793)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,635,1600,((m\*0.871484)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,636,1670,((m\*0.893248)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,637,1740,((m\*0.913097)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,638,1810,((m\*0.930989)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,639,1880,((m\*0.946886)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,640,1950,((m\*0.960754)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,641,2020,((m\*0.972563)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,642,2090,((m\*0.982287)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,643,2160,((m\*0.989907)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,644,2230,((m\*0.995405)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,645,2300,((m\*0.998770)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
  
 K,646,2375,((m\*1.000000)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)

K,647,2450,((m\*0.998770)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,648,2520,((m\*0.995405)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,649,2590,((m\*0.989907)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,650,2660,((m\*0.982287)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,651,2730,((m\*0.972563)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,652,2800,((m\*0.960754)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,653,2870,((m\*0.946886)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,654,2940,((m\*0.930989)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,655,3010,((m\*0.913097)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,656,3080,((m\*0.893248)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,657,3150,((m\*0.871484)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,658,3200,((m\*0.854793)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,659,3250,((m\*0.837166)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,660,3300,((m\*0.818625)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,661,3350,((m\*0.799188)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,662,3400,((m\*0.778877)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,663,3450,((m\*0.757715)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,664,3500,((m\*0.735724)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,665,3550,((m\*0.712928)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,666,3600,((m\*0.689353)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,667,3650,((m\*0.665025)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,668,3700,((m\*0.639969)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,669,3750,((m\*0.614213)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,670,3800,((m\*0.587785)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,671,3825,((m\*0.574329)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,672,3835,((m\*0.568902)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,673,3900,((m\*0.533032)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,674,3950,((m\*0.504766)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,675,4000,((m\*0.475947)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,676,4050,((m\*0.446609)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)

K,677,4100,((m\*0.416782)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,678,4150,((m\*0.386499)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,679,4200,((m\*0.355794)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,680,4250,((m\*0.324699)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,681,4300,((m\*0.293250)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,682,4350,((m\*0.261480)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,683,4400,((m\*0.229424)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,684,4450,((m\*0.197117)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,685,4500,((m\*0.164595)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,686,4550,((m\*0.131892)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,687,4600,((m\*0.099046)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,688,4625,((m\*0.082579)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,689,4650,((m\*0.066091)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,690,4700,((m\*0.033063)+(bs-  
 tw)/2),(ts+tg+hw+tg)  
 K,691,4750,(0+(bs-tw)/2),(ts+tg+hw+tg)

K,701,0,(0+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,702,50,((m\*0.033063)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,703,100,((m\*0.066091)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,704,125,((m\*0.082579)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,705,150,((m\*0.099046)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,706,200,((m\*0.131892)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,707,250,((m\*0.164595)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,708,300,((m\*0.197117)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,709,350,((m\*0.229424)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,710,400,((m\*0.261480)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,711,450,((m\*0.293250)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,712,500,((m\*0.324699)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,713,550,((m\*0.355794)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,714,600,((m\*0.386499)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,715,650,((m\*0.416782)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)

K,716,700,((m\*0.446609)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,717,750,((m\*0.475947)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,718,800,((m\*0.504766)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,719,850,((m\*0.533032)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,720,915,((m\*0.568902)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,721,925,((m\*0.574329)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,722,950,((m\*0.587785)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,723,1000,((m\*0.614213)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,724,1050,((m\*0.639969)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,725,1100,((m\*0.665025)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,726,1150,((m\*0.689353)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,727,1200,((m\*0.712928)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,728,1250,((m\*0.735724)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,729,1300,((m\*0.757715)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,730,1350,((m\*0.778877)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,731,1400,((m\*0.799188)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,732,1450,((m\*0.818625)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,733,1500,((m\*0.837166)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,734,1550,((m\*0.854793)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,735,1600,((m\*0.871484)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,736,1670,((m\*0.893248)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,737,1740,((m\*0.913097)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,738,1810,((m\*0.930989)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,739,1880,((m\*0.946886)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,740,1950,((m\*0.960754)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,741,2020,((m\*0.972563)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,742,2090,((m\*0.982287)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,743,2160,((m\*0.989907)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,744,2230,((m\*0.995405)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,745,2300,((m\*0.998770)+(bs-  
 tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)

K,746,2375,((m\*1.000000)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,747,2450,((m\*0.998770)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,748,2520,((m\*0.995405)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,749,2590,((m\*0.989907)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,750,2660,((m\*0.982287)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,751,2730,((m\*0.972563)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,752,2800,((m\*0.960754)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,753,2870,((m\*0.946886)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,754,2940,((m\*0.930989)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,755,3010,((m\*0.913097)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,756,3080,((m\*0.893248)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,757,3150,((m\*0.871484)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,758,3200,((m\*0.854793)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,759,3250,((m\*0.837166)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,760,3300,((m\*0.818625)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,761,3350,((m\*0.799188)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,762,3400,((m\*0.778877)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,763,3450,((m\*0.757715)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,764,3500,((m\*0.735724)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,765,3550,((m\*0.712928)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,766,3600,((m\*0.689353)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,767,3650,((m\*0.665025)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,768,3700,((m\*0.639969)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,769,3750,((m\*0.614213)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,770,3800,((m\*0.587785)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,771,3825,((m\*0.574329)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,772,3835,((m\*0.568902)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,773,3900,((m\*0.533032)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,774,3950,((m\*0.504766)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,775,4000,((m\*0.475947)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,776,4050,((m\*0.446609)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,777,4100,((m\*0.416782)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,778,4150,((m\*0.386499)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,779,4200,((m\*0.355794)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,780,4250,((m\*0.324699)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,781,4300,((m\*0.293250)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,782,4350,((m\*0.261480)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,783,4400,((m\*0.229424)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,784,4450,((m\*0.197117)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,785,4500,((m\*0.164595)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,786,4550,((m\*0.131892)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,787,4600,((m\*0.099046)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,788,4625,((m\*0.082579)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,789,4650,((m\*0.066091)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,790,4700,((m\*0.033063)+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,791,4750,(0+(bs-tw)/2+tw),(ts+tg+hw+tg)  
 K,801,0,(0+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,802,50,((m\*0.033063)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,803,100,((m\*0.066091)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,804,125,((m\*0.082579)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,805,150,((m\*0.099046)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,806,200,((m\*0.131892)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,807,250,((m\*0.164595)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,808,300,((m\*0.197117)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,809,350,((m\*0.229424)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,810,400,((m\*0.261480)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,811,450,((m\*0.293250)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,812,500,((m\*0.324699)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,813,550,((m\*0.355794)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,814,600,((m\*0.386499)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,815,650,((m\*0.416782)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,816,700,((m\*0.446609)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,817,750,((m\*0.475947)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,818,800,((m\*0.504766)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,819,850,((m\*0.533032)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,820,915,((m\*0.568902)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,821,925,((m\*0.574329)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,822,950,((m\*0.587785)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,823,1000,((m\*0.614213)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,824,1050,((m\*0.639969)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,825,1100,((m\*0.665025)+bs),(ts+tg+hw+tg)

K,826,1150,((m\*0.689353)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,827,1200,((m\*0.712928)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,828,1250,((m\*0.735724)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,829,1300,((m\*0.757715)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,830,1350,((m\*0.778877)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,831,1400,((m\*0.799188)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,832,1450,((m\*0.818625)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,833,1500,((m\*0.837166)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,834,1550,((m\*0.854793)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,835,1600,((m\*0.871484)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,836,1670,((m\*0.893248)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,837,1740,((m\*0.913097)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,838,1810,((m\*0.930989)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,839,1880,((m\*0.946886)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,840,1950,((m\*0.960754)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,841,2020,((m\*0.972563)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,842,2090,((m\*0.982287)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,843,2160,((m\*0.989907)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,844,2230,((m\*0.995405)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,845,2300,((m\*0.998770)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
  
 K,846,2375,((m\*1.000000)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
  
 K,847,2450,((m\*0.998770)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,848,2520,((m\*0.995405)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,849,2590,((m\*0.989907)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,850,2660,((m\*0.982287)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,851,2730,((m\*0.972563)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,852,2800,((m\*0.960754)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,853,2870,((m\*0.946886)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,854,2940,((m\*0.930989)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,855,3010,((m\*0.913097)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,856,3080,((m\*0.893248)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,857,3150,((m\*0.871484)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,858,3200,((m\*0.854793)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,859,3250,((m\*0.837166)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,860,3300,((m\*0.818625)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,861,3350,((m\*0.799188)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,862,3400,((m\*0.778877)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,863,3450,((m\*0.757715)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,864,3500,((m\*0.735724)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,865,3550,((m\*0.712928)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,866,3600,((m\*0.689353)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,867,3650,((m\*0.665025)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,868,3700,((m\*0.639969)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,869,3750,((m\*0.614213)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,870,3800,((m\*0.587785)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,871,3825,((m\*0.574329)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,872,3835,((m\*0.568902)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,873,3900,((m\*0.533032)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,874,3950,((m\*0.504766)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,875,4000,((m\*0.475947)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,876,4050,((m\*0.446609)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,877,4100,((m\*0.416782)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,878,4150,((m\*0.386499)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,879,4200,((m\*0.355794)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,880,4250,((m\*0.324699)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,881,4300,((m\*0.293250)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,882,4350,((m\*0.261480)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,883,4400,((m\*0.229424)+bs),(ts+tg+hw+tg)

K,884,4450,((m\*0.197117)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,885,4500,((m\*0.164595)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,886,4550,((m\*0.131892)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,887,4600,((m\*0.099046)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,888,4625,((m\*0.082579)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,889,4650,((m\*0.066091)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,890,4700,((m\*0.033063)+bs),(ts+tg+hw+tg)  
 K,891,4750,(0+bs),(ts+tg+hw+tg)

!lines  
 LSTR, 1, 2  
 LSTR, 2, 3  
 LSTR, 3, 4  
 LSTR, 4, 5  
 LSTR, 5, 6  
 LSTR, 6, 7  
 LSTR, 7, 8  
 LSTR, 8, 9  
 LSTR, 9, 10  
 LSTR, 10, 11  
 LSTR, 11, 12  
 LSTR, 12, 13  
 LSTR, 13, 14  
 LSTR, 14, 15  
 LSTR, 15, 16  
 LSTR, 16, 17  
 LSTR, 17, 18  
 LSTR, 18, 19  
 LSTR, 19, 20  
 LSTR, 20, 21  
 LSTR, 21, 22  
 LSTR, 22, 23  
 LSTR, 23, 24  
 LSTR, 24, 25  
 LSTR, 25, 26  
 LSTR, 26, 27  
 LSTR, 27, 28  
 LSTR, 28, 29  
 LSTR, 29, 30  
 LSTR, 30, 31  
 LSTR, 31, 32  
 LSTR, 32, 33  
 LSTR, 33, 34  
 LSTR, 34, 35  
 LSTR, 35, 36  
 LSTR, 36, 37  
 LSTR, 37, 38  
 LSTR, 38, 39  
 LSTR, 39, 40  
 LSTR, 40, 41  
 LSTR, 41, 42  
 LSTR, 42, 43  
 LSTR, 43, 44  
 LSTR, 44, 45  
 LSTR, 45, 46  
 LSTR, 46, 47  
 LSTR, 47, 48  
 LSTR, 48, 49  
 LSTR, 49, 50  
 LSTR, 50, 51

LSTR, 51, 52  
 LSTR, 52, 53  
 LSTR, 53, 54  
 LSTR, 54, 55  
 LSTR, 55, 56  
 LSTR, 56, 57  
 LSTR, 57, 58  
 LSTR, 58, 59  
 LSTR, 59, 60  
 LSTR, 60, 61  
 LSTR, 61, 62  
 LSTR, 62, 63  
 LSTR, 63, 64  
 LSTR, 64, 65  
 LSTR, 65, 66  
 LSTR, 66, 67  
 LSTR, 67, 68  
 LSTR, 68, 69  
 LSTR, 69, 70  
 LSTR, 70, 71  
 LSTR, 71, 72  
 LSTR, 72, 73  
 LSTR, 73, 74  
 LSTR, 74, 75  
 LSTR, 75, 76  
 LSTR, 76, 77  
 LSTR, 77, 78  
 LSTR, 78, 79  
 LSTR, 79, 80  
 LSTR, 80, 81  
 LSTR, 81, 82  
 LSTR, 82, 83  
 LSTR, 83, 84  
 LSTR, 84, 85  
 LSTR, 85, 86  
 LSTR, 86, 87  
 LSTR, 87, 88  
 LSTR, 88, 89  
 LSTR, 89, 90  
 LSTR, 90, 91  
  
 LSTR, 101, 102  
 LSTR, 102, 103  
 LSTR, 103, 104  
 LSTR, 104, 105  
 LSTR, 105, 106  
 LSTR, 106, 107  
 LSTR, 107, 108  
 LSTR, 108, 109  
 LSTR, 109, 110  
 LSTR, 110, 111  
 LSTR, 111, 112  
 LSTR, 112, 113  
 LSTR, 113, 114  
 LSTR, 114, 115  
 LSTR, 115, 116  
 LSTR, 116, 117  
 LSTR, 117, 118  
 LSTR, 118, 119  
 LSTR, 119, 120

LSTR, 120, 121  
 LSTR, 121, 122  
 LSTR, 122, 123  
 LSTR, 123, 124  
 LSTR, 124, 125  
 LSTR, 125, 126  
 LSTR, 126, 127  
 LSTR, 127, 128  
 LSTR, 128, 129  
 LSTR, 129, 130  
 LSTR, 130, 131  
 LSTR, 131, 132  
 LSTR, 132, 133  
 LSTR, 133, 134  
 LSTR, 134, 135  
 LSTR, 135, 136  
 LSTR, 136, 137  
 LSTR, 137, 138  
 LSTR, 138, 139  
 LSTR, 139, 140  
 LSTR, 140, 141  
 LSTR, 141, 142  
 LSTR, 142, 143  
 LSTR, 143, 144  
 LSTR, 144, 145  
 LSTR, 145, 146  
 LSTR, 146, 147  
 LSTR, 147, 148  
 LSTR, 148, 149  
 LSTR, 149, 150  
 LSTR, 150, 151  
 LSTR, 151, 152  
 LSTR, 152, 153  
 LSTR, 153, 154  
 LSTR, 154, 155  
 LSTR, 155, 156  
 LSTR, 156, 157  
 LSTR, 157, 158  
 LSTR, 158, 159  
 LSTR, 159, 160  
 LSTR, 160, 161  
 LSTR, 161, 162  
 LSTR, 162, 163  
 LSTR, 163, 164  
 LSTR, 164, 165  
 LSTR, 165, 166  
 LSTR, 166, 167  
 LSTR, 167, 168  
 LSTR, 168, 169  
 LSTR, 169, 170  
 LSTR, 170, 171  
 LSTR, 171, 172  
 LSTR, 172, 173  
 LSTR, 173, 174  
 LSTR, 174, 175  
 LSTR, 175, 176  
 LSTR, 176, 177  
 LSTR, 177, 178  
 LSTR, 178, 179  
 LSTR, 179, 180

LSTR,	180,	181	LSTR,	249,	250
LSTR,	181,	182	LSTR,	250,	251
LSTR,	182,	183	LSTR,	251,	252
LSTR,	183,	184	LSTR,	252,	253
LSTR,	184,	185	LSTR,	253,	254
LSTR,	185,	186	LSTR,	254,	255
LSTR,	186,	187	LSTR,	255,	256
LSTR,	187,	188	LSTR,	256,	257
LSTR,	188,	189	LSTR,	257,	258
LSTR,	189,	190	LSTR,	258,	259
LSTR,	190,	191	LSTR,	259,	260
			LSTR,	260,	261
LSTR,	201,	202	LSTR,	261,	262
LSTR,	202,	203	LSTR,	262,	263
LSTR,	203,	204	LSTR,	263,	264
LSTR,	204,	205	LSTR,	264,	265
LSTR,	205,	206	LSTR,	265,	266
LSTR,	206,	207	LSTR,	266,	267
LSTR,	207,	208	LSTR,	267,	268
LSTR,	208,	209	LSTR,	268,	269
LSTR,	209,	210	LSTR,	269,	270
LSTR,	210,	211	LSTR,	270,	271
LSTR,	211,	212	LSTR,	271,	272
LSTR,	212,	213	LSTR,	272,	273
LSTR,	213,	214	LSTR,	273,	274
LSTR,	214,	215	LSTR,	274,	275
LSTR,	215,	216	LSTR,	275,	276
LSTR,	216,	217	LSTR,	276,	277
LSTR,	217,	218	LSTR,	277,	278
LSTR,	218,	219	LSTR,	278,	279
LSTR,	219,	220	LSTR,	279,	280
LSTR,	220,	221	LSTR,	280,	281
LSTR,	221,	222	LSTR,	281,	282
LSTR,	222,	223	LSTR,	282,	283
LSTR,	223,	224	LSTR,	283,	284
LSTR,	224,	225	LSTR,	284,	285
LSTR,	225,	226	LSTR,	285,	286
LSTR,	226,	227	LSTR,	286,	287
LSTR,	227,	228	LSTR,	287,	288
LSTR,	228,	229	LSTR,	288,	289
LSTR,	229,	230	LSTR,	289,	290
LSTR,	230,	231	LSTR,	290,	291
LSTR,	231,	232			
LSTR,	232,	233	LSTR,	301,	302
LSTR,	233,	234	LSTR,	302,	303
LSTR,	234,	235	LSTR,	303,	304
LSTR,	235,	236	LSTR,	304,	305
LSTR,	236,	237	LSTR,	305,	306
LSTR,	237,	238	LSTR,	306,	307
LSTR,	238,	239	LSTR,	307,	308
LSTR,	239,	240	LSTR,	308,	309
LSTR,	240,	241	LSTR,	309,	310
LSTR,	241,	242	LSTR,	310,	311
LSTR,	242,	243	LSTR,	311,	312
LSTR,	243,	244	LSTR,	312,	313
LSTR,	244,	245	LSTR,	313,	314
LSTR,	245,	246	LSTR,	314,	315
LSTR,	246,	247	LSTR,	315,	316
LSTR,	247,	248	LSTR,	316,	317
LSTR,	248,	249	LSTR,	317,	318

LSTR,	318,	319	LSTR,	378,	379
LSTR,	319,	320	LSTR,	379,	380
LSTR,	320,	321	LSTR,	380,	381
LSTR,	321,	322	LSTR,	381,	382
LSTR,	322,	323	LSTR,	382,	383
LSTR,	323,	324	LSTR,	383,	384
LSTR,	324,	325	LSTR,	384,	385
LSTR,	325,	326	LSTR,	385,	386
LSTR,	326,	327	LSTR,	386,	387
LSTR,	327,	328	LSTR,	387,	388
LSTR,	328,	329	LSTR,	388,	389
LSTR,	329,	330	LSTR,	389,	390
LSTR,	330,	331	LSTR,	390,	391
LSTR,	331,	332			
LSTR,	332,	333	LSTR,	1,	101
LSTR,	333,	334	LSTR,	101,	201
LSTR,	334,	335	LSTR,	201,	301
LSTR,	335,	336			
LSTR,	336,	337	LSTR,	2,	102
LSTR,	337,	338	LSTR,	102,	202
LSTR,	338,	339	LSTR,	202,	302
LSTR,	339,	340			
LSTR,	340,	341	LSTR,	3,	103
LSTR,	341,	342	LSTR,	103,	203
LSTR,	342,	343	LSTR,	203,	303
LSTR,	343,	344			
LSTR,	344,	345	LSTR,	4,	104
LSTR,	345,	346	LSTR,	104,	204
LSTR,	346,	347	LSTR,	204,	304
LSTR,	347,	348			
LSTR,	348,	349			
LSTR,	349,	350	LSTR,	5,	105
LSTR,	350,	351	LSTR,	105,	205
LSTR,	351,	352	LSTR,	205,	305
LSTR,	352,	353			
LSTR,	353,	354			
LSTR,	354,	355	LSTR,	20,	120
LSTR,	355,	356	LSTR,	120,	220
LSTR,	356,	357	LSTR,	220,	320
LSTR,	357,	358			
LSTR,	358,	359	LSTR,	21,	121
LSTR,	359,	360	LSTR,	121,	221
LSTR,	360,	361	LSTR,	221,	321
LSTR,	361,	362			
LSTR,	362,	363	LSTR,	22,	122
LSTR,	363,	364	LSTR,	122,	222
LSTR,	364,	365	LSTR,	222,	322
LSTR,	365,	366			
LSTR,	366,	367	LSTR,	46,	146
LSTR,	367,	368	LSTR,	146,	246
LSTR,	368,	369	LSTR,	246,	346
LSTR,	369,	370			
LSTR,	370,	371	LSTR,	70,	170
LSTR,	371,	372	LSTR,	170,	270
LSTR,	372,	373	LSTR,	270,	370
LSTR,	373,	374			
LSTR,	374,	375	LSTR,	71,	171
LSTR,	375,	376	LSTR,	171,	271
LSTR,	376,	377	LSTR,	271,	371
LSTR,	377,	378			



LSTR,	72,	172	LSTR,	529,	530
LSTR,	172,	272	LSTR,	530,	531
LSTR,	272,	372	LSTR,	531,	532
			LSTR,	532,	533
LSTR,	87,	187	LSTR,	533,	534
LSTR,	187,	287	LSTR,	534,	535
LSTR,	287,	387	LSTR,	535,	536
			LSTR,	536,	537
LSTR,	88,	188	LSTR,	537,	538
LSTR,	188,	288	LSTR,	538,	539
LSTR,	288,	388	LSTR,	539,	540
			LSTR,	540,	541
LSTR,	89,	189	LSTR,	541,	542
LSTR,	189,	289	LSTR,	542,	543
LSTR,	289,	389	LSTR,	543,	544
			LSTR,	544,	545
LSTR,	90,	190	LSTR,	545,	546
LSTR,	190,	290	LSTR,	546,	547
LSTR,	290,	390	LSTR,	547,	548
			LSTR,	548,	549
LSTR,	91,	191	LSTR,	549,	550
LSTR,	191,	291	LSTR,	550,	551
LSTR,	291,	391	LSTR,	551,	552
			LSTR,	552,	553
LSTR,	101,	400	LSTR,	553,	554
LSTR,	400,	401	LSTR,	554,	555
LSTR,	401,	402	LSTR,	555,	556
LSTR,	402,	403	LSTR,	556,	557
LSTR,	403,	404	LSTR,	557,	558
LSTR,	404,	405	LSTR,	558,	559
LSTR,	405,	406	LSTR,	559,	560
			LSTR,	560,	561
LSTR,	501,	502	LSTR,	561,	562
LSTR,	502,	503	LSTR,	562,	563
LSTR,	503,	504	LSTR,	563,	564
LSTR,	504,	505	LSTR,	564,	565
LSTR,	505,	506	LSTR,	565,	566
LSTR,	506,	507	LSTR,	566,	567
LSTR,	507,	508	LSTR,	567,	568
LSTR,	508,	509	LSTR,	568,	569
LSTR,	509,	510	LSTR,	569,	570
LSTR,	510,	511	LSTR,	570,	571
LSTR,	511,	512	LSTR,	571,	572
LSTR,	512,	513	LSTR,	572,	573
LSTR,	513,	514	LSTR,	573,	574
LSTR,	514,	515	LSTR,	574,	575
LSTR,	515,	516	LSTR,	575,	576
LSTR,	516,	517	LSTR,	576,	577
LSTR,	517,	518	LSTR,	577,	578
LSTR,	518,	519	LSTR,	578,	579
LSTR,	519,	520	LSTR,	579,	580
LSTR,	520,	521	LSTR,	580,	581
LSTR,	521,	522	LSTR,	581,	582
LSTR,	522,	523	LSTR,	582,	583
LSTR,	523,	524	LSTR,	583,	584
LSTR,	524,	525	LSTR,	584,	585
LSTR,	525,	526	LSTR,	585,	586
LSTR,	526,	527	LSTR,	586,	587
LSTR,	527,	528	LSTR,	587,	588
LSTR,	528,	529	LSTR,	588,	589

LSTR, 589, 590  
LSTR, 590, 591  
  
LSTR, 601, 602  
LSTR, 602, 603  
LSTR, 603, 604  
LSTR, 604, 605  
LSTR, 605, 606  
LSTR, 606, 607  
LSTR, 607, 608  
LSTR, 608, 609  
LSTR, 609, 610  
LSTR, 610, 611  
LSTR, 611, 612  
LSTR, 612, 613  
LSTR, 613, 614  
LSTR, 614, 615  
LSTR, 615, 616  
LSTR, 616, 617  
LSTR, 617, 618  
LSTR, 618, 619  
LSTR, 619, 620  
LSTR, 620, 621  
LSTR, 621, 622  
LSTR, 622, 623  
LSTR, 623, 624  
LSTR, 624, 625  
LSTR, 625, 626  
LSTR, 626, 627  
LSTR, 627, 628  
LSTR, 628, 629  
LSTR, 629, 630  
LSTR, 630, 631  
LSTR, 631, 632  
LSTR, 632, 633  
LSTR, 633, 634  
LSTR, 634, 635  
LSTR, 635, 636  
LSTR, 636, 637  
LSTR, 637, 638  
LSTR, 638, 639  
LSTR, 639, 640  
LSTR, 640, 641  
LSTR, 641, 642  
LSTR, 642, 643  
LSTR, 643, 644  
LSTR, 644, 645  
LSTR, 645, 646  
LSTR, 646, 647  
LSTR, 647, 648  
LSTR, 648, 649  
LSTR, 649, 650  
LSTR, 650, 651  
LSTR, 651, 652  
LSTR, 652, 653  
LSTR, 653, 654  
LSTR, 654, 655  
LSTR, 655, 656  
LSTR, 656, 657  
LSTR, 657, 658

LSTR, 658, 659  
LSTR, 659, 660  
LSTR, 660, 661  
LSTR, 661, 662  
LSTR, 662, 663  
LSTR, 663, 664  
LSTR, 664, 665  
LSTR, 665, 666  
LSTR, 666, 667  
LSTR, 667, 668  
LSTR, 668, 669  
LSTR, 669, 670  
LSTR, 670, 671  
LSTR, 671, 672  
LSTR, 672, 673  
LSTR, 673, 674  
LSTR, 674, 675  
LSTR, 675, 676  
LSTR, 676, 677  
LSTR, 677, 678  
LSTR, 678, 679  
LSTR, 679, 680  
LSTR, 680, 681  
LSTR, 681, 682  
LSTR, 682, 683  
LSTR, 683, 684  
LSTR, 684, 685  
LSTR, 685, 686  
LSTR, 686, 687  
LSTR, 687, 688  
LSTR, 688, 689  
LSTR, 689, 690  
LSTR, 690, 691  
  
LSTR, 701, 702  
LSTR, 702, 703  
LSTR, 703, 704  
LSTR, 704, 705  
LSTR, 705, 706  
LSTR, 706, 707  
LSTR, 707, 708  
LSTR, 708, 709  
LSTR, 709, 710  
LSTR, 710, 711  
LSTR, 711, 712  
LSTR, 712, 713  
LSTR, 713, 714  
LSTR, 714, 715  
LSTR, 715, 716  
LSTR, 716, 717  
LSTR, 717, 718  
LSTR, 718, 719  
LSTR, 719, 720  
LSTR, 720, 721  
LSTR, 721, 722  
LSTR, 722, 723  
LSTR, 723, 724  
LSTR, 724, 725  
LSTR, 725, 726  
LSTR, 726, 727

LSTR,	727,	728	LSTR,	787,	788
LSTR,	728,	729	LSTR,	788,	789
LSTR,	729,	730	LSTR,	789,	790
LSTR,	730,	731	LSTR,	790,	791
LSTR,	731,	732			
LSTR,	732,	733	LSTR,	801,	802
LSTR,	733,	734	LSTR,	802,	803
LSTR,	734,	735	LSTR,	803,	804
LSTR,	735,	736	LSTR,	804,	805
LSTR,	736,	737	LSTR,	805,	806
LSTR,	737,	738	LSTR,	806,	807
LSTR,	738,	739	LSTR,	807,	808
LSTR,	739,	740	LSTR,	808,	809
LSTR,	740,	741	LSTR,	809,	810
LSTR,	741,	742	LSTR,	810,	811
LSTR,	742,	743	LSTR,	811,	812
LSTR,	743,	744	LSTR,	812,	813
LSTR,	744,	745	LSTR,	813,	814
LSTR,	745,	746	LSTR,	814,	815
LSTR,	746,	747	LSTR,	815,	816
LSTR,	747,	748	LSTR,	816,	817
LSTR,	748,	749	LSTR,	817,	818
LSTR,	749,	750	LSTR,	818,	819
LSTR,	750,	751	LSTR,	819,	820
LSTR,	751,	752	LSTR,	820,	821
LSTR,	752,	753	LSTR,	821,	822
LSTR,	753,	754	LSTR,	822,	823
LSTR,	754,	755	LSTR,	823,	824
LSTR,	755,	756	LSTR,	824,	825
LSTR,	756,	757	LSTR,	825,	826
LSTR,	757,	758	LSTR,	826,	827
LSTR,	758,	759	LSTR,	827,	828
LSTR,	759,	760	LSTR,	828,	829
LSTR,	760,	761	LSTR,	829,	830
LSTR,	761,	762	LSTR,	830,	831
LSTR,	762,	763	LSTR,	831,	832
LSTR,	763,	764	LSTR,	832,	833
LSTR,	764,	765	LSTR,	833,	834
LSTR,	765,	766	LSTR,	834,	835
LSTR,	766,	767	LSTR,	835,	836
LSTR,	767,	768	LSTR,	836,	837
LSTR,	768,	769	LSTR,	837,	838
LSTR,	769,	770	LSTR,	838,	839
LSTR,	770,	771	LSTR,	839,	840
LSTR,	771,	772	LSTR,	840,	841
LSTR,	772,	773	LSTR,	841,	842
LSTR,	773,	774	LSTR,	842,	843
LSTR,	774,	775	LSTR,	843,	844
LSTR,	775,	776	LSTR,	844,	845
LSTR,	776,	777	LSTR,	845,	846
LSTR,	777,	778	LSTR,	846,	847
LSTR,	778,	779	LSTR,	847,	848
LSTR,	779,	780	LSTR,	848,	849
LSTR,	780,	781	LSTR,	849,	850
LSTR,	781,	782	LSTR,	850,	851
LSTR,	782,	783	LSTR,	851,	852
LSTR,	783,	784	LSTR,	852,	853
LSTR,	784,	785	LSTR,	853,	854
LSTR,	785,	786	LSTR,	854,	855
LSTR,	786,	787	LSTR,	855,	856

LSTR,	856,	857	LSTR,	546,	646
LSTR,	857,	858	LSTR,	746,	846
LSTR,	858,	859			
LSTR,	859,	860	LSTR,	570,	670
LSTR,	860,	861	LSTR,	770,	870
LSTR,	861,	862			
LSTR,	862,	863	LSTR,	571,	671
LSTR,	863,	864	LSTR,	771,	871
LSTR,	864,	865			
LSTR,	865,	866	LSTR,	572,	672
LSTR,	866,	867	LSTR,	772,	872
LSTR,	867,	868			
LSTR,	868,	869	LSTR,	587,	687
LSTR,	869,	870	LSTR,	787,	887
LSTR,	870,	871			
LSTR,	871,	872	LSTR,	588,	688
LSTR,	872,	873	LSTR,	788,	888
LSTR,	873,	874			
LSTR,	874,	875	LSTR,	589,	689
LSTR,	875,	876	LSTR,	789,	889
LSTR,	876,	877			
LSTR,	877,	878	LSTR,	590,	690
LSTR,	878,	879	LSTR,	790,	890
LSTR,	879,	880			
LSTR,	880,	881	LSTR,	591,	691
LSTR,	881,	882	LSTR,	791,	891
LSTR,	882,	883			
LSTR,	883,	884	lareas		
LSTR,	884,	885	FLST,2,4,4		
LSTR,	885,	886	FITEM,2,361		
LSTR,	886,	887	FITEM,2,1		
LSTR,	887,	888	FITEM,2,364		
LSTR,	888,	889	FITEM,2,91		
LSTR,	889,	890	AL,P51X		
LSTR,	890,	891	FLST,2,4,4		
			FITEM,2,181		
LSTR,	501,	601	FITEM,2,362		
LSTR,	701,	801	FITEM,2,91		
			FITEM,2,365		
LSTR,	502,	602	AL,P51X		
LSTR,	702,	802	FLST,2,4,4		
			FITEM,2,271		
LSTR,	503,	603	FITEM,2,363		
LSTR,	703,	803	FITEM,2,181		
			FITEM,2,366		
LSTR,	504,	604	AL,P51X		
LSTR,	704,	804	FLST,2,4,4		
			FITEM,2,2		
LSTR,	505,	605	FITEM,2,367		
LSTR,	705,	805	FITEM,2,92		
			FITEM,2,364		
LSTR,	520,	620	AL,P51X		
LSTR,	720,	820	FLST,2,4,4		
			FITEM,2,365		
LSTR,	521,	621	FITEM,2,92		
LSTR,	721,	821	FITEM,2,368		
			FITEM,2,182		
LSTR,	522,	622	AL,P51X		
LSTR,	722,	822	FLST,2,4,4		
			FITEM,2,366		

FITEM,2,182  
FITEM,2,369  
FITEM,2,272  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,367  
FITEM,2,3  
FITEM,2,370  
FITEM,2,93  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,93  
FITEM,2,368  
FITEM,2,183  
FITEM,2,371  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,369  
FITEM,2,273  
FITEM,2,183  
FITEM,2,372  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,370  
FITEM,2,94  
FITEM,2,4  
FITEM,2,373  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,371  
FITEM,2,184  
FITEM,2,94  
FITEM,2,374  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,372  
FITEM,2,274  
FITEM,2,184  
FITEM,2,375  
AL,P51X  
  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,375  
FITEM,2,275  
FITEM,2,276  
FITEM,2,277  
FITEM,2,278  
FITEM,2,279  
FITEM,2,280  
FITEM,2,281  
FITEM,2,282  
FITEM,2,284  
FITEM,2,283  
FITEM,2,286  
FITEM,2,285  
FITEM,2,287  
FITEM,2,288  
FITEM,2,289  
FITEM,2,378  
FITEM,2,199

FITEM,2,198  
FITEM,2,197  
FITEM,2,196  
FITEM,2,195  
FITEM,2,194  
FITEM,2,193  
FITEM,2,192  
FITEM,2,191  
FITEM,2,190  
FITEM,2,189  
FITEM,2,188  
FITEM,2,187  
FITEM,2,186  
FITEM,2,185  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,185  
FITEM,2,374  
FITEM,2,95  
FITEM,2,96  
FITEM,2,186  
FITEM,2,97  
FITEM,2,187  
FITEM,2,98  
FITEM,2,188  
FITEM,2,99  
FITEM,2,189  
FITEM,2,100  
FITEM,2,190  
FITEM,2,191  
FITEM,2,101  
FITEM,2,102  
FITEM,2,192  
FITEM,2,103  
FITEM,2,193  
FITEM,2,104  
FITEM,2,194  
FITEM,2,105  
FITEM,2,195  
FITEM,2,106  
FITEM,2,196  
FITEM,2,197  
FITEM,2,107  
FITEM,2,108  
FITEM,2,198  
FITEM,2,109  
FITEM,2,199  
FITEM,2,377  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,373  
FITEM,2,95  
FITEM,2,5  
FITEM,2,6  
FITEM,2,96  
FITEM,2,7  
FITEM,2,97  
FITEM,2,8  
FITEM,2,98  
FITEM,2,9

FITEM,2,99  
FITEM,2,10  
FITEM,2,100  
FITEM,2,11  
FITEM,2,12  
FITEM,2,13  
FITEM,2,14  
FITEM,2,15  
FITEM,2,16  
FITEM,2,17  
FITEM,2,18  
FITEM,2,19  
FITEM,2,376  
FITEM,2,109  
FITEM,2,108  
FITEM,2,107  
FITEM,2,106  
FITEM,2,105  
FITEM,2,104  
FITEM,2,103  
FITEM,2,102  
FITEM,2,101  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,378  
FITEM,2,290  
FITEM,2,381  
FITEM,2,200  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,200  
FITEM,2,380  
FITEM,2,110  
FITEM,2,377  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,376  
FITEM,2,110  
FITEM,2,379  
FITEM,2,20  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,381  
FITEM,2,291  
FITEM,2,384  
FITEM,2,201  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,201  
FITEM,2,383  
FITEM,2,111  
FITEM,2,380  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,379  
FITEM,2,111  
FITEM,2,382  
FITEM,2,21  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,384  
FITEM,2,292  
FITEM,2,294  
FITEM,2,293  
FITEM,2,295  
FITEM,2,297  
FITEM,2,296  
FITEM,2,298  
FITEM,2,300  
FITEM,2,299  
FITEM,2,301  
FITEM,2,303  
FITEM,2,302  
FITEM,2,304  
FITEM,2,305  
FITEM,2,306  
FITEM,2,307  
FITEM,2,308  
FITEM,2,310  
FITEM,2,311  
FITEM,2,221  
FITEM,2,309  
FITEM,2,312  
FITEM,2,313  
FITEM,2,314  
FITEM,2,315  
FITEM,2,387  
FITEM,2,225  
FITEM,2,224  
FITEM,2,223  
FITEM,2,222  
FITEM,2,220  
FITEM,2,219  
FITEM,2,218  
FITEM,2,217  
FITEM,2,216  
FITEM,2,215  
FITEM,2,214  
FITEM,2,213  
FITEM,2,212  
FITEM,2,211  
FITEM,2,210  
FITEM,2,209  
FITEM,2,208  
FITEM,2,207  
FITEM,2,206  
FITEM,2,205  
FITEM,2,204  
FITEM,2,203  
FITEM,2,202  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,383  
FITEM,2,112  
FITEM,2,202  
FITEM,2,203  
FITEM,2,113

FITEM,2,114  
FITEM,2,204  
FITEM,2,115  
FITEM,2,205  
FITEM,2,116  
FITEM,2,206  
FITEM,2,117  
FITEM,2,207  
FITEM,2,118  
FITEM,2,208  
FITEM,2,119  
FITEM,2,209  
FITEM,2,120  
FITEM,2,210  
FITEM,2,121  
FITEM,2,211  
FITEM,2,122  
FITEM,2,212  
FITEM,2,213  
FITEM,2,123  
FITEM,2,214  
FITEM,2,124  
FITEM,2,125  
FITEM,2,215  
FITEM,2,126  
FITEM,2,216  
FITEM,2,217  
FITEM,2,127  
FITEM,2,128  
FITEM,2,218  
FITEM,2,129  
FITEM,2,219  
FITEM,2,220  
FITEM,2,130  
FITEM,2,131  
FITEM,2,221  
FITEM,2,222  
FITEM,2,132  
FITEM,2,133  
FITEM,2,223  
FITEM,2,135  
FITEM,2,224  
FITEM,2,134  
FITEM,2,386  
FITEM,2,225  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,135  
FITEM,2,385  
FITEM,2,45  
FITEM,2,44  
FITEM,2,43  
FITEM,2,42  
FITEM,2,41  
FITEM,2,40  
FITEM,2,39  
FITEM,2,38  
FITEM,2,37  
FITEM,2,36

FITEM,2,35  
FITEM,2,34  
FITEM,2,33  
FITEM,2,32  
FITEM,2,123  
FITEM,2,124  
FITEM,2,125  
FITEM,2,126  
FITEM,2,127  
FITEM,2,128  
FITEM,2,129  
FITEM,2,130  
FITEM,2,131  
FITEM,2,132  
FITEM,2,133  
FITEM,2,134  
FITEM,2,31  
FITEM,2,29  
FITEM,2,30  
FITEM,2,28  
FITEM,2,26  
FITEM,2,27  
FITEM,2,25  
FITEM,2,23  
FITEM,2,22  
FITEM,2,24  
FITEM,2,382  
FITEM,2,112  
FITEM,2,113  
FITEM,2,114  
FITEM,2,116  
FITEM,2,115  
FITEM,2,117  
FITEM,2,119  
FITEM,2,120  
FITEM,2,118  
FITEM,2,121  
FITEM,2,122  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,387  
FITEM,2,316  
FITEM,2,317  
FITEM,2,318  
FITEM,2,320  
FITEM,2,319  
FITEM,2,321  
FITEM,2,323  
FITEM,2,322  
FITEM,2,324  
FITEM,2,325  
FITEM,2,226  
FITEM,2,227  
FITEM,2,228  
FITEM,2,229  
FITEM,2,230  
FITEM,2,231  
FITEM,2,232  
FITEM,2,233

FITEM,2,234  
FITEM,2,235  
FITEM,2,236  
FITEM,2,326  
FITEM,2,327  
FITEM,2,328  
FITEM,2,329  
FITEM,2,332  
FITEM,2,330  
FITEM,2,331  
FITEM,2,333  
FITEM,2,335  
FITEM,2,334  
FITEM,2,336  
FITEM,2,338  
FITEM,2,337  
FITEM,2,339  
FITEM,2,390  
FITEM,2,246  
FITEM,2,249  
FITEM,2,248  
FITEM,2,247  
FITEM,2,245  
FITEM,2,244  
FITEM,2,243  
FITEM,2,242  
FITEM,2,241  
FITEM,2,240  
FITEM,2,239  
FITEM,2,238  
FITEM,2,237  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,389  
FITEM,2,159  
FITEM,2,249  
FITEM,2,158  
FITEM,2,248  
FITEM,2,157  
FITEM,2,247  
FITEM,2,156  
FITEM,2,246  
FITEM,2,155  
FITEM,2,245  
FITEM,2,154  
FITEM,2,244  
FITEM,2,153  
FITEM,2,243  
FITEM,2,152  
FITEM,2,242  
FITEM,2,241  
FITEM,2,239  
FITEM,2,151  
FITEM,2,150  
FITEM,2,240  
FITEM,2,149  
FITEM,2,148  
FITEM,2,147  
FITEM,2,146

FITEM,2,235  
FITEM,2,145  
FITEM,2,236  
FITEM,2,237  
FITEM,2,238  
FITEM,2,144  
FITEM,2,234  
FITEM,2,233  
FITEM,2,142  
FITEM,2,143  
FITEM,2,232  
FITEM,2,231  
FITEM,2,141  
FITEM,2,140  
FITEM,2,230  
FITEM,2,139  
FITEM,2,229  
FITEM,2,138  
FITEM,2,228  
FITEM,2,137  
FITEM,2,227  
FITEM,2,226  
FITEM,2,136  
FITEM,2,386  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,385  
FITEM,2,46  
FITEM,2,136  
FITEM,2,47  
FITEM,2,48  
FITEM,2,49  
FITEM,2,50  
FITEM,2,51  
FITEM,2,52  
FITEM,2,54  
FITEM,2,55  
FITEM,2,56  
FITEM,2,53  
FITEM,2,137  
FITEM,2,138  
FITEM,2,139  
FITEM,2,140  
FITEM,2,141  
FITEM,2,142  
FITEM,2,144  
FITEM,2,143  
FITEM,2,145  
FITEM,2,146  
FITEM,2,57  
FITEM,2,58  
FITEM,2,59  
FITEM,2,60  
FITEM,2,62  
FITEM,2,63  
FITEM,2,65  
FITEM,2,64  
FITEM,2,66  
FITEM,2,67



FITEM,2,68  
FITEM,2,69  
FITEM,2,388  
FITEM,2,159  
FITEM,2,158  
FITEM,2,156  
FITEM,2,157  
FITEM,2,155  
FITEM,2,153  
FITEM,2,154  
FITEM,2,152  
FITEM,2,61  
FITEM,2,150  
FITEM,2,151  
FITEM,2,149  
FITEM,2,148  
FITEM,2,147  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,340  
FITEM,2,250  
FITEM,2,390  
FITEM,2,393  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,250  
FITEM,2,160  
FITEM,2,389  
FITEM,2,392  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,388  
FITEM,2,160  
FITEM,2,391  
FITEM,2,70  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,393  
FITEM,2,341  
FITEM,2,251  
FITEM,2,396  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,251  
FITEM,2,392  
FITEM,2,161  
FITEM,2,395  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,71  
FITEM,2,161  
FITEM,2,391  
FITEM,2,394  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,342  
FITEM,2,343  
FITEM,2,346  
FITEM,2,254

FITEM,2,345  
FITEM,2,253  
FITEM,2,344  
FITEM,2,348  
FITEM,2,347  
FITEM,2,349  
FITEM,2,350  
FITEM,2,352  
FITEM,2,351  
FITEM,2,353  
FITEM,2,354  
FITEM,2,355  
FITEM,2,356  
FITEM,2,399  
FITEM,2,266  
FITEM,2,265  
FITEM,2,264  
FITEM,2,263  
FITEM,2,262  
FITEM,2,261  
FITEM,2,260  
FITEM,2,259  
FITEM,2,258  
FITEM,2,257  
FITEM,2,256  
FITEM,2,255  
FITEM,2,252  
FITEM,2,396  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,395  
FITEM,2,252  
FITEM,2,162  
FITEM,2,253  
FITEM,2,163  
FITEM,2,254  
FITEM,2,164  
FITEM,2,165  
FITEM,2,255  
FITEM,2,256  
FITEM,2,166  
FITEM,2,167  
FITEM,2,257  
FITEM,2,168  
FITEM,2,258  
FITEM,2,259  
FITEM,2,169  
FITEM,2,260  
FITEM,2,170  
FITEM,2,261  
FITEM,2,171  
FITEM,2,172  
FITEM,2,262  
FITEM,2,173  
FITEM,2,263  
FITEM,2,264  
FITEM,2,174  
FITEM,2,175  
FITEM,2,265  
FITEM,2,266

FITEM,2,176  
FITEM,2,398  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,176  
FITEM,2,86  
FITEM,2,397  
FITEM,2,85  
FITEM,2,175  
FITEM,2,83  
FITEM,2,173  
FITEM,2,84  
FITEM,2,174  
FITEM,2,81  
FITEM,2,171  
FITEM,2,172  
FITEM,2,82  
FITEM,2,79  
FITEM,2,169  
FITEM,2,170  
FITEM,2,80  
FITEM,2,78  
FITEM,2,168  
FITEM,2,77  
FITEM,2,167  
FITEM,2,166  
FITEM,2,76  
FITEM,2,75  
FITEM,2,165  
FITEM,2,164  
FITEM,2,74  
FITEM,2,73  
FITEM,2,163  
FITEM,2,72  
FITEM,2,162  
FITEM,2,394  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,87  
FITEM,2,397  
FITEM,2,177  
FITEM,2,400  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,398  
FITEM,2,177  
FITEM,2,267  
FITEM,2,401  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,399  
FITEM,2,267  
FITEM,2,402  
FITEM,2,357  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,88  
FITEM,2,403  
FITEM,2,178

FITEM,2,400  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,401  
FITEM,2,268  
FITEM,2,178  
FITEM,2,404  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,358  
FITEM,2,268  
FITEM,2,402  
FITEM,2,405  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,403  
FITEM,2,179  
FITEM,2,89  
FITEM,2,406  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,269  
FITEM,2,179  
FITEM,2,404  
FITEM,2,407  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,359  
FITEM,2,405  
FITEM,2,269  
FITEM,2,408  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,406  
FITEM,2,90  
FITEM,2,180  
FITEM,2,409  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,407  
FITEM,2,270  
FITEM,2,180  
FITEM,2,410  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,408  
FITEM,2,270  
FITEM,2,360  
FITEM,2,411  
AL,P51X

FLST,2,4,4  
FITEM,2,804  
FITEM,2,775  
FITEM,2,806  
FITEM,2,685  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,803

FITEM,2,595  
FITEM,2,805  
FITEM,2,505  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,806  
FITEM,2,776  
FITEM,2,808  
FITEM,2,686  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,805  
FITEM,2,596  
FITEM,2,807  
FITEM,2,506  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,687  
FITEM,2,777  
FITEM,2,808  
FITEM,2,810  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,807  
FITEM,2,597  
FITEM,2,809  
FITEM,2,507  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,810  
FITEM,2,778  
FITEM,2,812  
FITEM,2,688  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,809  
FITEM,2,598  
FITEM,2,508  
FITEM,2,811  
AL,P51X  
  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,788  
FITEM,2,693  
FITEM,2,694  
FITEM,2,695  
FITEM,2,696  
FITEM,2,697  
FITEM,2,698  
FITEM,2,699  
FITEM,2,700  
FITEM,2,701  
FITEM,2,702  
FITEM,2,703  
FITEM,2,704  
FITEM,2,705  
FITEM,2,706  
FITEM,2,707  
FITEM,2,790  
FITEM,2,617

FITEM,2,616  
FITEM,2,615  
FITEM,2,614  
FITEM,2,613  
FITEM,2,611  
FITEM,2,612  
FITEM,2,610  
FITEM,2,608  
FITEM,2,609  
FITEM,2,607  
FITEM,2,606  
FITEM,2,605  
FITEM,2,604  
FITEM,2,603  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,437  
FITEM,2,436  
FITEM,2,434  
FITEM,2,433  
FITEM,2,435  
FITEM,2,430  
FITEM,2,432  
FITEM,2,429  
FITEM,2,431  
FITEM,2,428  
FITEM,2,427  
FITEM,2,426  
FITEM,2,424  
FITEM,2,425  
FITEM,2,423  
FITEM,2,787  
FITEM,2,513  
FITEM,2,514  
FITEM,2,515  
FITEM,2,516  
FITEM,2,517  
FITEM,2,518  
FITEM,2,519  
FITEM,2,520  
FITEM,2,521  
FITEM,2,523  
FITEM,2,524  
FITEM,2,522  
FITEM,2,525  
FITEM,2,526  
FITEM,2,789  
FITEM,2,527  
AL,P51X  
  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,790  
FITEM,2,708  
FITEM,2,792  
FITEM,2,618  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,528  
FITEM,2,789  
FITEM,2,438

FITEM,2,791  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,792  
FITEM,2,709  
FITEM,2,794  
FITEM,2,619  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,791  
FITEM,2,529  
FITEM,2,439  
FITEM,2,793  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,710  
FITEM,2,620  
FITEM,2,794  
FITEM,2,711  
FITEM,2,712  
FITEM,2,714  
FITEM,2,715  
FITEM,2,713  
FITEM,2,621  
FITEM,2,622  
FITEM,2,623  
FITEM,2,624  
FITEM,2,625  
FITEM,2,717  
FITEM,2,627  
FITEM,2,718  
FITEM,2,716  
FITEM,2,626  
FITEM,2,719  
FITEM,2,628  
FITEM,2,629  
FITEM,2,721  
FITEM,2,720  
FITEM,2,631  
FITEM,2,630  
FITEM,2,722  
FITEM,2,723  
FITEM,2,724  
FITEM,2,726  
FITEM,2,725  
FITEM,2,727  
FITEM,2,637  
FITEM,2,636  
FITEM,2,635  
FITEM,2,634  
FITEM,2,633  
FITEM,2,632  
FITEM,2,728  
FITEM,2,729  
FITEM,2,730  
FITEM,2,731  
FITEM,2,732  
FITEM,2,733  
FITEM,2,796

FITEM,2,643  
FITEM,2,642  
FITEM,2,641  
FITEM,2,640  
FITEM,2,639  
FITEM,2,638  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,462  
FITEM,2,463  
FITEM,2,461  
FITEM,2,459  
FITEM,2,458  
FITEM,2,460  
FITEM,2,553  
FITEM,2,552  
FITEM,2,550  
FITEM,2,551  
FITEM,2,549  
FITEM,2,457  
FITEM,2,548  
FITEM,2,456  
FITEM,2,547  
FITEM,2,455  
FITEM,2,546  
FITEM,2,545  
FITEM,2,453  
FITEM,2,454  
FITEM,2,543  
FITEM,2,544  
FITEM,2,450  
FITEM,2,451  
FITEM,2,452  
FITEM,2,540  
FITEM,2,541  
FITEM,2,542  
FITEM,2,448  
FITEM,2,449  
FITEM,2,538  
FITEM,2,539  
FITEM,2,795  
FITEM,2,446  
FITEM,2,447  
FITEM,2,445  
FITEM,2,536  
FITEM,2,537  
FITEM,2,444  
FITEM,2,535  
FITEM,2,534  
FITEM,2,443  
FITEM,2,442  
FITEM,2,441  
FITEM,2,532  
FITEM,2,533  
FITEM,2,440  
FITEM,2,531  
FITEM,2,530  
FITEM,2,793  
AL,P51X

FLST,2,50,4  
FITEM,2,734  
FITEM,2,644  
FITEM,2,796  
FITEM,2,735  
FITEM,2,645  
FITEM,2,736  
FITEM,2,646  
FITEM,2,737  
FITEM,2,738  
FITEM,2,647  
FITEM,2,648  
FITEM,2,739  
FITEM,2,740  
FITEM,2,741  
FITEM,2,743  
FITEM,2,744  
FITEM,2,745  
FITEM,2,742  
FITEM,2,650  
FITEM,2,649  
FITEM,2,651  
FITEM,2,653  
FITEM,2,652  
FITEM,2,655  
FITEM,2,654  
FITEM,2,746  
FITEM,2,656  
FITEM,2,747  
FITEM,2,748  
FITEM,2,657  
FITEM,2,658  
FITEM,2,750  
FITEM,2,749  
FITEM,2,660  
FITEM,2,751  
FITEM,2,753  
FITEM,2,754  
FITEM,2,755  
FITEM,2,756  
FITEM,2,757  
FITEM,2,752  
FITEM,2,659  
FITEM,2,661  
FITEM,2,663  
FITEM,2,662  
FITEM,2,665  
FITEM,2,664  
FITEM,2,666  
FITEM,2,667  
FITEM,2,798  
AL,P51X  
  
FLST,2,50,4  
FITEM,2,473  
FITEM,2,475  
FITEM,2,474  
FITEM,2,476  
FITEM,2,477

FITEM,2,478  
FITEM,2,479  
FITEM,2,481  
FITEM,2,482  
FITEM,2,480  
FITEM,2,483  
FITEM,2,485  
FITEM,2,486  
FITEM,2,487  
FITEM,2,797  
FITEM,2,576  
FITEM,2,577  
FITEM,2,484  
FITEM,2,575  
FITEM,2,573  
FITEM,2,574  
FITEM,2,571  
FITEM,2,572  
FITEM,2,570  
FITEM,2,568  
FITEM,2,569  
FITEM,2,566  
FITEM,2,565  
FITEM,2,564  
FITEM,2,563  
FITEM,2,567  
FITEM,2,472  
FITEM,2,471  
FITEM,2,470  
FITEM,2,469  
FITEM,2,468  
FITEM,2,467  
FITEM,2,466  
FITEM,2,464  
FITEM,2,465  
FITEM,2,795  
FITEM,2,554  
FITEM,2,555  
FITEM,2,556  
FITEM,2,557  
FITEM,2,558  
FITEM,2,560  
FITEM,2,562  
FITEM,2,559  
FITEM,2,561  
AL,P51X  
  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,758  
FITEM,2,798  
FITEM,2,800  
FITEM,2,668  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,578  
FITEM,2,797  
FITEM,2,488  
FITEM,2,799  
AL,P51X  
FLST,2,4,4

FITEM,2,759  
FITEM,2,800  
FITEM,2,669  
FITEM,2,802  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,489  
FITEM,2,579  
FITEM,2,799  
FITEM,2,801  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,760  
FITEM,2,761  
FITEM,2,762  
FITEM,2,764  
FITEM,2,763  
FITEM,2,766  
FITEM,2,765  
FITEM,2,767  
FITEM,2,768  
FITEM,2,769  
FITEM,2,770  
FITEM,2,771  
FITEM,2,772  
FITEM,2,773  
FITEM,2,774  
FITEM,2,804  
FITEM,2,684  
FITEM,2,683  
FITEM,2,682  
FITEM,2,681  
FITEM,2,680  
FITEM,2,679  
FITEM,2,678  
FITEM,2,677  
FITEM,2,676  
FITEM,2,675  
FITEM,2,674  
FITEM,2,673  
FITEM,2,672  
FITEM,2,671  
FITEM,2,670  
FITEM,2,802  
AL,P51X  
FLST,2,32,4  
FITEM,2,803  
FITEM,2,504  
FITEM,2,503  
FITEM,2,502  
FITEM,2,500  
FITEM,2,499  
FITEM,2,501  
FITEM,2,591  
FITEM,2,592  
FITEM,2,593  
FITEM,2,594  
FITEM,2,494  
FITEM,2,495  
FITEM,2,496

FITEM,2,497  
FITEM,2,498  
FITEM,2,589  
FITEM,2,590  
FITEM,2,587  
FITEM,2,586  
FITEM,2,588  
FITEM,2,584  
FITEM,2,585  
FITEM,2,493  
FITEM,2,492  
FITEM,2,490  
FITEM,2,491  
FITEM,2,801  
FITEM,2,580  
FITEM,2,581  
FITEM,2,582  
FITEM,2,583  
AL,P51X  
  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,779  
FITEM,2,419  
FITEM,2,781  
FITEM,2,509  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,780  
FITEM,2,599  
FITEM,2,782  
FITEM,2,689  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,781  
FITEM,2,420  
FITEM,2,783  
FITEM,2,510  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,782  
FITEM,2,600  
FITEM,2,784  
FITEM,2,690  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,783  
FITEM,2,511  
FITEM,2,785  
FITEM,2,421  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,601  
FITEM,2,784  
FITEM,2,691  
FITEM,2,786  
AL,P51X  
FLST,2,4,4  
FITEM,2,786  
FITEM,2,692  
FITEM,2,788

FITEM,2,602  
 AL,P51X  
 FLST,2,4,4  
 FITEM,2,785  
 FITEM,2,512  
 FITEM,2,787  
 FITEM,2,422  
 AL,P51X  
  
 FLST,2,48,5,ORDE,2  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,-48  
 VDRAG,P51X, , , , , 412  
 LPLOT  
 FLST,2,16,5,ORDE,16  
 FITEM,2,89  
 FITEM,2,100  
 FITEM,2,110  
 FITEM,2,120  
 FITEM,2,172  
 FITEM,2,196  
 FITEM,2,206  
 FITEM,2,285  
 FITEM,2,387  
 FITEM,2,420  
 FITEM,2,430  
 FITEM,2,482  
 FITEM,2,506  
 FITEM,2,516  
 FITEM,2,526  
 FITEM,2,536  
 FLST,8,5,4  
 FITEM,8,413  
 FITEM,8,414  
 FITEM,8,415  
 FITEM,8,416  
 FITEM,8,417  
 VDRAG,P51X, , , , ,P51X  
 FLST,2,48,5,ORDE,18  
 FITEM,2,49  
 FITEM,2,-80  
 FITEM,2,1396  
 FITEM,2,1400  
 FITEM,2,1404  
 FITEM,2,1408  
 FITEM,2,1440  
 FITEM,2,1444  
 FITEM,2,1448  
 FITEM,2,1498  
 FITEM,2,1548  
 FITEM,2,1552  
 FITEM,2,1556  
 FITEM,2,1588  
 FITEM,2,1592  
 FITEM,2,1596  
 FITEM,2,1600  
 FITEM,2,1604  
 VDRAG,P51X, , , , , 418  
  
 !glue all volumes

FLST,2,176,6,ORDE,2  
 FITEM,2,1  
 FITEM,2,-176  
 VGLUE,P51X  
  
 !meshing atributes  
 FLST,5,96,6,ORDE,4  
 FITEM,5,1  
 FITEM,5,-48  
 FITEM,5,177  
 FITEM,5,-224  
 CM,\_Y,VOLU  
 VSEL, , , ,P51X  
 CM,\_Y1,VOLU  
 CMSEL,S,\_Y  
 !\*  
 CMSEL,S,\_Y1  
 VATT, 1, , 2, 0  
 CMSEL,S,\_Y  
 CMDELE,\_Y  
 CMDELE,\_Y1  
 !\*  
 FLST,5,32,6,ORDE,4  
 FITEM,5,49  
 FITEM,5,-64  
 FITEM,5,113  
 FITEM,5,-128  
 CM,\_Y,VOLU  
 VSEL, , , ,P51X  
 CM,\_Y1,VOLU  
 CMSEL,S,\_Y  
 !\*  
 CMSEL,S,\_Y1  
 VATT, 3, , 2, 0  
 CMSEL,S,\_Y  
 CMDELE,\_Y  
 CMDELE,\_Y1  
 !\*  
 FLST,5,48,6,ORDE,2  
 FITEM,5,65  
 FITEM,5,-112  
 CM,\_Y,VOLU  
 VSEL, , , ,P51X  
 CM,\_Y1,VOLU  
 CMSEL,S,\_Y  
 !\*  
 CMSEL,S,\_Y1  
 VATT, 2, , 2, 0  
 CMSEL,S,\_Y  
 CMDELE,\_Y  
 CMDELE,\_Y1  
 !\*  
  
 !merge all items  
 NUMMRG,ALL, , , ,LOW  
  
 !supports - line on the bottom flange  
 FLST,2,3,4,ORDE,3  
 FITEM,2,4229  
 FITEM,2,4234

```
FITEM,2,4631
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
```

```
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,3488
FITEM,2,3496
FITEM,2,4658
!*
/GO
DL,P51X, ,UZ,
```

```
FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,3488
FITEM,2,3496
FITEM,2,4658
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,
```

```
!supports - lateral supports (line supports)
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,1400
FITEM,2,2256
FITEM,2,2635
FITEM,2,3014
FITEM,2,4066
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,
```

```
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,988
FITEM,2,2052
FITEM,2,2431
FITEM,2,2810
FITEM,2,3658
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,
```

```
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,893
FITEM,2,2019
FITEM,2,2398
FITEM,2,2777
FITEM,2,3561
!*
/GO
DL,P51X, ,UY,
```

```
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,1411
FITEM,2,2261
FITEM,2,2640
FITEM,2,3019
FITEM,2,4076
!*
/GO
```

```
/GO
DL,P51X, ,UY,
```

```
!load [N]
F=140000 !one point load on 4 keypoints on
two sides
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,21
FITEM,2,121
FITEM,2,221
FITEM,2,321
!*
/GO
```

```
FK,P51X,FZ,(F/8)
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,71
FITEM,2,171
FITEM,2,271
FITEM,2,371
!*
/GO
```

```
FK,P51X,FZ,(F/8)
```

```
!meshing
ESIZE,10,0,
FLST,5,176,6,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-128
FITEM,5,177
FITEM,5,-224
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/GO
```

```
!solution properties
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,140,140,140
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
LNSRCH,1
NEQIT,10000
```