
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza skrytého kotevního bodu pro vrstvené skleněné konstrukce

Autor práce: Bc. Michaela Zdražilová

Vedoucí práce: doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

Praha 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Zdražilová Jméno: Michaela Osobní číslo: 424440
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza skrytého kotevního bodu pro vrstvené skleněné konstrukce
Název diplomové práce anglicky: Analysis of embedded connection for laminated glass panes

Pokyny pro vypracování:

Rešerše mechanických spojů pro nosné konstrukce ze skla, provedení experimentů skrytého kotevního bodu namáhaného smykem s excentricitou a jejich vyhodnocení, porovnání s předchozími experimenty.

Seznam doporučené literatury:

Wurm J.: Glass Structures, Birkhauser, 2007, ISBN 978-3-7643-7608-6

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 25.9.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

roopis vedoucího práce

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

25.9.2018

Datum převzetí zadání

roopis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza skrytého kotevního bodu pro vrstvené skleněné konstrukce* zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne 6. 1. 2019

Michaela Zdražilová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí této práce doc. Ing. Martině Eliášové, CSc. za odborné vedení a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. za pomoc při tvorbě numerického modelu a při realizaci experimentů.

**ANALÝZA SKRYTÉHO KOTEVNÍHO BODU
PRO VRSTVENÉ SKLENĚNÉ KONSTRUKCE**

**ANALYSIS OF EMBEDDED CONNECTION
FOR LAMINATED GLASS PANES**

Anotace

Diplomová práce se zabývá zkouškami laminovaného spoje se skrytou kotevní hlavou pro skleněné konstrukce, při kterých je zjišťována únosnost spoje zatíženého smykem s excentricitou. Pro daný problém byl pomocí programu ANSYS vytvořen numerický model, který byl dále využit pro parametrickou studii. Jako parametr je zavedena excentricita působící smykové síly.

Klíčová slova

laminované sklo, laminovaný spoj, skrytý kotevní bod, experiment, smyk s excentricitou, numerický model

Summary

This diploma thesis is dealing with experiments of laminated embedded glass connections for glass structures. The aim is to find out the load capacity of the connection under eccentric shear load. Using ANSYS programme, the numerical model was created to describe this problem. It was used for the parametric analysis with the eccentricity of the shear load as the parametre.

Key words

laminated glass, laminated connection, embedded connection, experiment, eccentric shear load, numerical model

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Spoje skleněných konstrukcí.....	2
2.1 Obecné informace.....	2
2.2 Mechanické spoje.....	5
2.2.1 Liniové podepření.....	5
2.2.2 Upínací a třecí spoje.....	6
2.2.3 Šroubové spoje.....	7
2.3 Lepené spoje.....	13
2.3.1 Elastické lepené spoje.....	14
2.3.2 Tuhé lepené spoje.....	14
2.3.3 Laminované spoje.....	15
3. Současný stav výzkumu.....	18
3.1 Univerzita Minho.....	18
3.2 České vysoké učení technické v Praze.....	21
3.2.1 Popis zkušebního zařízení a uspořádání zkoušek.....	21
3.2.2 Popis zkoušek.....	24
4. Cíl diplomové práce.....	31
5. Experimentální analýza.....	32
5.1 Popis zkušebních vzorků.....	32
5.2 Popis zkušebního zařízení a uspořádání zkoušek.....	34
5.3 Popis průběhu zkoušek.....	36
5.4 Vyhodnocení zkoušek.....	49
5.5 Porovnání tahových zkoušek a zkoušek na smyk s excentricitou.....	50
6. Numerická analýza.....	51
6.1 Numerický model pro zatížení tahem.....	51
6.1.1 Materiálové vlastnosti.....	51
6.1.2 Geometrie.....	53

6.1.3 Kontakty a síť.....	54
6.1.4 Podepření a zatížení.....	56
6.1.5 Vyhodnocení.....	56
6.2 Numerický model pro zatížení smykem s excentricitou	58
6.2.1 Podepření a zatížení.....	58
6.2.2 Úprava materiálových charakteristik a vyhodnocení	59
6.3 Parametrická studie.....	62
7. Závěr.....	64
8. Literatura	65

Seznam obrázků:

<i>Obr. 1 Běžné způsoby podepření: a) liniové podepření (přítlačná lišta), b) konstrukční silikonové těsnění (SSG podpora), c) lokální upnutí d), lokální bodové podpory [7].....</i>	2
<i>Obr. 2 Příklad liniového podepření skleněných tabulí.....</i>	3
<i>Obr. 3 Příklady připojení pomocí lokálního upnutí.....</i>	3
<i>Obr. 4 Příklad připojení pomocí bodových podpor.....</i>	4
<i>Obr. 5 Schéma typické lineární podpory s EPDM těsněním a zasklívací lištou [7].....</i>	5
<i>Obr. 6 Lokální upínací spoj [3].....</i>	6
<i>Obr. 7 Schéma typického upínacího připojení s nízkým třením [7].....</i>	6
<i>Obr. 8 Schéma typického třecího spoje pro monolitické a laminované sklo [7].....</i>	7
<i>Obr. 9 Typy šroubových spojů: a) Šroubový s klasickou hlavou, b) Šroubový se zapuštěnou hlavou, c) Šroubový se skrytou vloženou hlavou [3].....</i>	8
<i>Obr. 10 Typické rozdělení napětí v okolí otvoru [3].....</i>	8
<i>Obr. 11 Schéma klasického šroubového spoje [5].....</i>	9
<i>Obr. 12 Schéma jednoduchého spoje se zapuštěnou hlavou [5].....</i>	10
<i>Obr. 13 Schéma připojení ocelové desky s oporou [5].....</i>	10
<i>Obr. 14 Schéma třecího spoje [5].....</i>	11
<i>Obr. 15 Schéma vylepšeného spoje se zapuštěnou hlavou [5].....</i>	11
<i>Obr. 16 Schéma kloubového šroubového spoje [5].....</i>	12
<i>Obr. 17 Schéma spoje s vloženou hlavou [4].....</i>	12
<i>Obr. 18 Lepené spoje: a) Lepený kotevní bod b) Zapuštěný laminovaný spoj s tlustou ocelovou deskou c) Zapuštěný laminovaný spoj s tenkou ocelovou deskou d) Spoj se skrytou vloženou hlavou [3].....</i>	13
<i>Obr. 19 Schéma výroby: a) Standardního laminovaného spoje, b) Vloženého laminovaného spoje [3].....</i>	16
<i>Obr. 20 Laminovaný spoj fasády evropského distribučního centra Dow Corning, Felluy, Belgie [3].....</i>	16
<i>Obr. 21 Vložené laminované spoje Apple Retail Store, New York, USA [3].....</i>	17
<i>Obr. 22 Příklad spoje se skrytým kotevním bodem pro izolační sklo [6].....</i>	17
<i>Obr. 23 Vzorek po zkoušce nárazem [4].....</i>	18
<i>Obr. 24 Vzorek po zkoušce nárazem [4].....</i>	19
<i>Obr. 25 Vzorek po zkoušce vysokou teplotou [4].....</i>	19
<i>Obr. 26 Vzorek po zkoušce vlhkostí [4].....</i>	20

<i>Obr. 27</i> MTS Qtest 100 [10].....	21
<i>Obr. 28</i> Laserový extenzometr [10].....	22
<i>Obr. 29</i> Zatěžovací rám [8].....	22
<i>Obr. 30</i> Ocelová stolice s plastovými podložkami [10].....	23
<i>Obr. 31</i> Umístění zkušební vzorku [10].....	23
<i>Obr. 32</i> Schéma experimentu.....	24
<i>Obr. 33</i> Vzorek před tahovou zatěžovací zkouškou [8].....	24
<i>Obr. 34</i> Detail vzorku po tahové zatěžovací zkoušce [8].....	25
<i>Obr. 35</i> Vzorek před tahovou zatěžovací zkouškou [10].....	25
<i>Obr. 36</i> Vzorek po tahové zatěžovací zkoušce [10].....	26
<i>Obr. 37</i> Stav vzorků před zkouškou a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03	27
<i>Obr. 38</i> Stav vzorků při síle 5kN a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03	28
<i>Obr. 39</i> Stav vzorků při síle 14kN a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03	28
<i>Obr. 40</i> Vzorek T1-01 po porušení.....	29
<i>Obr. 41</i> Schéma zkušební vzorku.....	32
<i>Obr. 42</i> Detail kotevního bodu.....	33
<i>Obr. 43</i> Výrobní vady vzorku: a) S1-01 b) S1-02 c) S1-03.....	33
<i>Obr. 44</i> Snímač.....	34
<i>Obr. 45</i> Ocelový rám.....	34
<i>Obr. 46</i> Přípravek.....	35
<i>Obr. 47</i> Schéma experimentu pro vzorky S1.....	35
<i>Obr. 48</i> Vzorek připravený ke zkoušce.....	36
<i>Obr. 49</i> Stav vzorku S1-01 při zatěžování na kN.....	37
<i>Obr. 50</i> Stav HDPE podložky vzorku S1-01 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	38
<i>Obr. 51</i> Stav vzorku S1-01 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	38
<i>Obr. 52</i> Vzorek S1-01 po porušení.....	39
<i>Obr. 53</i> Detail plaveného skla vzorku S1-01 po porušení.....	39
<i>Obr. 54</i> Detail tvrzeného skla vzorku S1-01 po porušení.....	39
<i>Obr. 55</i> Stav vzorku S1-02 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	41
<i>Obr. 56</i> Stav HDPE podložky vzorku S1-02 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	42
<i>Obr. 57</i> Detail porušeného vzorku S1-02.....	42
<i>Obr. 58</i> Vzorek S1-02 po porušení.....	43
<i>Obr. 59</i> Detail zdeformovaného kotevního bodu vzorku S1-02.....	43
<i>Obr. 60</i> Stav vzorku S1-03 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	46

<i>Obr. 61</i> Stav HDPE podložky vzorku S1-03 při zatížení a) kN b) kN c) kN.....	46
<i>Obr. 62</i> Pohled shora na vzorek S1-03 při zatížení kN.....	46
<i>Obr. 63</i> Detaily vzorku S1-03 po porušení.....	47
<i>Obr. 64</i> Detail zdeformovaného kotevního bodu vzorku S1-02.....	47
<i>Obr. 65</i> Půdorysné schéma modelu.....	53
<i>Obr. 66</i> Geometrie modelu.....	53
<i>Obr. 67</i> CONTA174 [11].....	54
<i>Obr. 68</i> TARGE170 [11].....	54
<i>Obr. 69</i> SOLID186 [11].....	55
<i>Obr. 70</i> Síť.....	55
<i>Obr. 71</i> Okrajové podmínky a zatížení T1.....	56
<i>Obr. 72</i> Svislá deformace numerického modelu při zatížení kN.....	56
<i>Obr. 73</i> Rozložení maximálního tahového napětí v tvrzeném skle.....	57
<i>Obr. 74</i> Okrajové podmínky a zatížení S1.....	58
<i>Obr. 75</i> Zatížení vyplývající z vlastní tíhy přípravku.....	59
<i>Obr. 76</i> Schéma přepočtu posunu	59
<i>Obr. 77</i> Deformovaný model.....	61
<i>Obr. 78</i> Rozložení maximálního napětí v tvrzeném skle.....	61
<i>Obr. 79</i> Parametr a.....	62

Seznam grafů:

Graf 1 Závislost síly na čase pro vzorky F3 [10].....	26
Graf 2 Závislosti síly na čase pro vzorky T1	27
Graf 3 Závislosti posunu na síle pro vzorek T1-01	29
Graf 4 Tuhosti vzorků T1 v tahu.....	30
Graf 5 Schéma zatěžování vzorku S1-01	37
Graf 6 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-01	40
Graf 7 Vodorovná deformace v závislosti na síle pro vzorek S1-01.....	40
Graf 8 Schéma zatěžování pro vzorek S1-02.....	41
Graf 9 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-02.....	44
Graf 10 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-02.....	44
Graf 11 Schéma zatěžování vzorku S1-03a.....	45
Graf 12 Schéma zatěžování vzorku S1-03b.....	45
Graf 13 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-03.....	48
Graf 14 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-03, zatěžovací schéma a.....	48
Graf 15 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-03, zatěžovací schéma b.....	49
Graf 16 Porovnání tuhostí spoje ve smyku s excentricitou.....	50
Graf 17 Porovnání tuhostí numerického modelu a vzorků T1	57
Graf 18 Porovnání tuhostí numerického modelu a vzorků S1.....	60
Graf 19 Porovnání tuhostí pro různé excentricity zatížení.....	62
Graf 20 Závislost únosnosti spoje na excentricitě smykové síly.....	63

Seznam tabulek:

<i>Tabulka 1: Výsledky zkoušky pro vzorky T1.....</i>	30
<i>Tabulka 2: Výsledky zkoušky pro vzorky S1.....</i>	49
<i>Tabulka 3: Porovnání výsledků zkoušek vzorků T1 a S1.....</i>	51
<i>Tabulka 4: Materiálové vlastnosti skla.....</i>	51
<i>Tabulka 5: Materiálové vlastnosti EVA fólie.....</i>	52
<i>Tabulka 6: Materiálové vlastnosti oceli.....</i>	52
<i>Tabulka 7: Materiálové vlastnosti HDPE.....</i>	52
<i>Tabulka 8: Materiálové vlastnosti materiálu pro delaminaci.....</i>	52
<i>Tabulka 9: Vlastnosti přípravku.....</i>	58
<i>Tabulka 10: Materiálové vlastnosti folie pro vzorky S1.....</i>	60
<i>Tabulka 11: Deformace při zatížení kN.....</i>	60
<i>Tabulka 12: Tuhosti a maximální možné zatížení spoje pro různé hodnoty excentricity.....</i>	63

1. Úvod

Sklo je jedním z nejstarších člověkem vytvořených stavebních materiálů. Ve stavebních konstrukcích je používáno již od 11. století a nejen způsob výroby, ale i využití skleněných prvků prošlo dlouhým vývojem. Po dlouhá staletí bylo ploché sklo používáno pouze jako výplňový materiál okenních otvorů, v současné době ale stále častěji plní úlohu nosného prvku.

Skleněné prvky neodmyslitelně patří k moderní architektuře. V konstrukcích se běžně vyskytují skleněná zábradlí, fasády, zastřešení atrií a výjimkou nejsou ani skleněné nosníky, sloupy a můstky. Tyto prvky musí být schopné přenést nejen svou vlastní tíhu, ale i jiná namáhání vznikající při běžném provozu konstrukce, jako je například zatížení sněhem, větrem a užitné zatížení.

Při návrhu těchto prvků je nutné vzít v úvahu některé specifické vlastnosti skla. Jednou z nich je jeho pružné chování až do porušení. Protože skleněný prvek nemůže dosáhnout žádné plastické deformace, není možné počítat s plastickým přerozdělením špiček napětí, jako je tomu u oceli. Při zatížení ve skle vznikají trhlinky, které se šíří až do porušení křehkým lomem. K porušení dochází náhle, bez předchozího varování. Po porušení lze v závislosti na druhu skla a okrajových podmínkách počítat s větší či menší zbytkovou únosností.

S rostoucí popularitou konstrukcí ze skla roste také důraz na jejich transparentnost. Upevnění skleněných tabulí do rámových konstrukcí používané v minulosti se postupem času stalo pro využití v moderní architektuře esteticky nepříjemné a došlo tedy k vývoji alternativních upevňovacích systémů, které připojují skleněné prvky ke zbytku konstrukce pouze lokálně. Tyto spoje se od sebe odlišují jak použitým spojovacím materiálem (ocelový šroub, lepidlo), tak i nutností vrtání otvoru do skla. Jedním z nejmodernějších způsobů připojení je stále se vyvíjející laminovaný spoj se skrytou kotevní hlavou, který kombinuje šroubový a lepený spoj.

I přes to, že jsou v dnešní době skleněné konstrukce běžné, prozatím neexistují ucelené postupy pro jejich návrh a při navrhování je často nutné vycházet především z poznatků získaných experimenty.

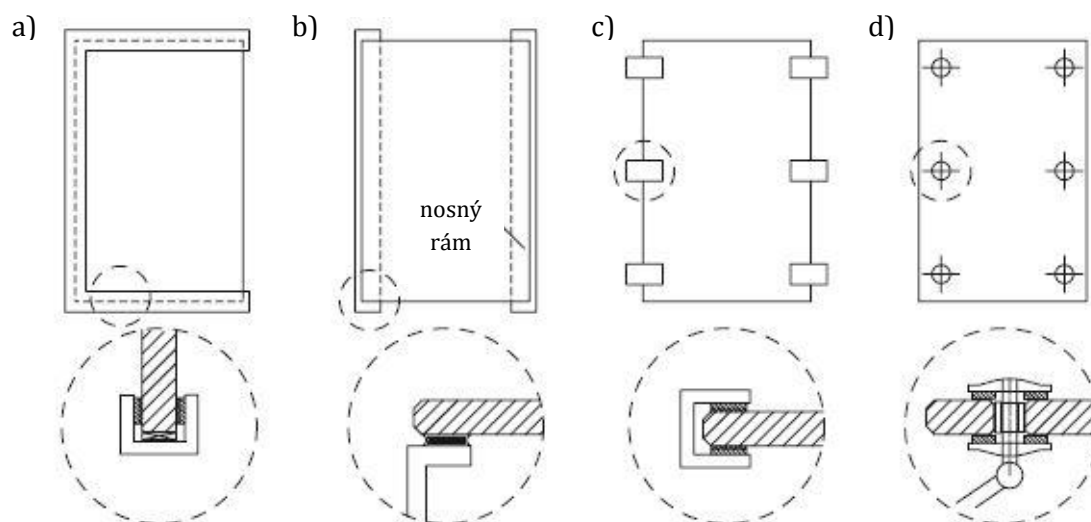
2. Spoje skleněných konstrukcí

2.1 Obecné informace

Jak spojení skleněných tabulí mezi sebou, tak i připojení tabulí k podpůrné konstrukci patří k důležitým částem konstrukce, a je proto třeba jim při návrhu věnovat náležitou pozornost.

Připojení prvků skleněných konstrukcí by mělo být navrženo tak, aby vyhovovalo různým kombinacím napětí. Při návrhu je důležité vzít v úvahu materiálové vlastnosti skla, zejména pevnost skla v tahu. Vzhledem ke křehkému lomu nelze uvažovat s plastickou redistribucí napětí, což dělá ze spoje nejkritičtější část návrhu skleněné konstrukce.

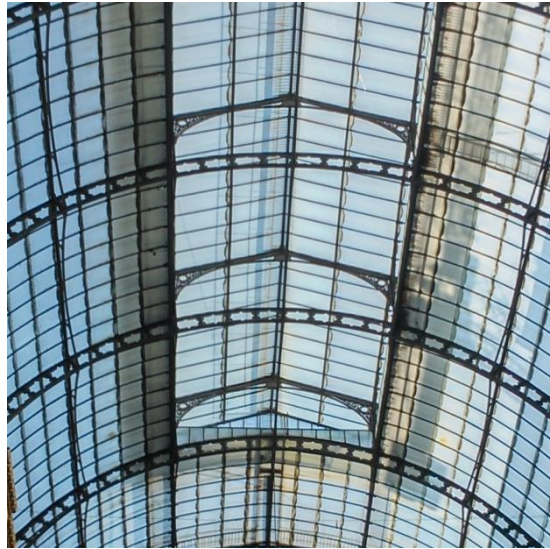
Skleněnou desku nebo tabuli lze podepřít liniově podél okrajů nebo lokálně pomocí okrajového upnutí a bodových podpor, případně jejich kombinací (viz obrázek 1). [1]



Obr. 2 Běžné způsoby podepření: **a)** liniové podepření (přítlačná lišta) **b)** konstrukční silikonové těsnění (SSG podpora) **c)** lokální upnutí **d)** lokální bodové podpory [7]

Každý takový spoj musí zajišťovat rovnoměrný přenos sil mezi sklem a spojovacím prvkem tak, aby nedocházelo ke vzniku koncentrací napětí a nepředvídatelných špiček a zároveň je nutné zabránit kontaktu mezi dvěma skly nebo mezi sklem a jiným tvrdším materiálem (např. ocelí). Proto se mezi sklo a ocel vkládají vhodné mezilehlé vrstvy, které zabraňují přímému kontaktu skla se šrouby či příložkami. Tvrdost, tuhost a odolnost této vrstvy má velký vliv na chování desky při zatížení, a tím i na únosnost spoje. Použitý materiál by měl mít podobně nízký modul pružnosti jako sklo, životnost odpovídajících požadavků a co nejvyšší pevnost v tlaku, aby byl zajištěn bezpečný přenos zatížení. Tyto požadavky splňují mezilehlé vrstvy z plastu, pryskyřice, neoprenu, injektované malty, hliníku nebo vláknitého těsnění. [1], [7]

Liniové podepření, vyvinuté v polovině 20. století, je obvykle tvořeno rámem. Sklo se od rámu odděluje distančními podložkami z plastu nebo silikátovými vložkami, které přenášejí vlastní tíhu panelu. Vnější zatížení je do nosné konstrukce přenášeno přítlačnou krycí lištou. [2]



Obr. 2 Příklad liniového podepření skleněných tabulí

V případě lokálního upnutí je skleněný panel ke konstrukci připojen pouze místně, čímž tento spoj působí vizuálně lépe (viz obrázek 3). Zároveň díky upnutí panelu po okraji odpadá vrtání otvoru pro umístění ocelového prvku.



Obr. 3 Příklad příklady připojení pomocí lokálního upnutí

Lokální uchycení pomocí bodových podpor bylo vyvinuto v 80. a 90. letech 20. století a nejlépe splňuje estetické požadavky moderní architektury (viz obrázek 4). Mezilehlá vrstva mezi sklem a šroubem je tvořena plastovými vložkami nebo injektovanou pryskyřicí, která slouží zároveň jako tlumič. [2]



Obr. 4 Příklad připojení pomocí bodových podpor

Z výše zmíněných způsobů připojení lze vyzorovat postupné zmenšování velikosti spojovacích prostředků, které vyplývá zejména ze zvyšujících se nároků na transparentnost skleněných konstrukcí. To má také za následek zvýšení zatížení, které je přenášeno do skla.

V současné době dochází k vývoji chemických lepených spojů, díky nimž lze uskutečnit vize, které by s použitím mechanických spojů byly nemyslitelné. Na druhou stranu s sebou ale nesou řadu problémů, jedním z nich je například jejich trvanlivost.

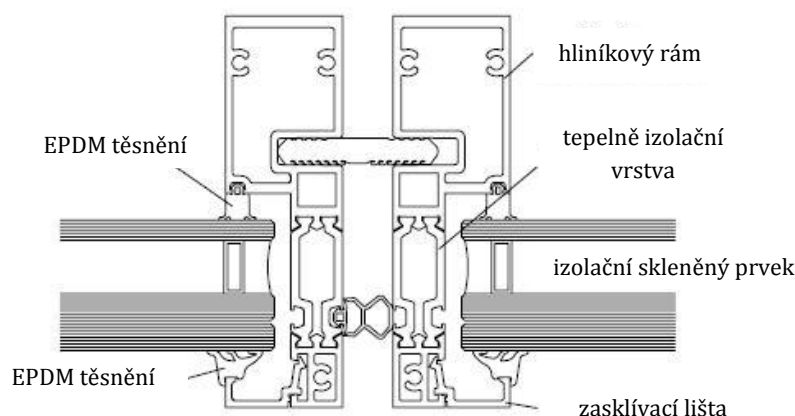
Obecně je tedy možné spoje skleněných konstrukcí rozdělit na dva hlavní typy – na spoje mechanické a na spoje lepené. Pro zvýšení bezpečnosti spoje lze použít jejich kombinaci, kdy šroub funguje jako pojistka pro případ, že by lepidlo vlivem stárnutí ztratilo své vlastnosti. Také pokud je ve spoji použito tuhé lepidlo, často dochází k tomu, že je lepená část prvku mnohem tužší než část mechanická. Ve výsledku lepená část spoje ponese většinu zatížení až do chvíle, kdy dojde k vyčerpání její únosnosti a až poté začne působit část mechanická. [7]

2.2 Mechanické spoje

2.2.1 Liniové podepření

Liniové podepření je nejstarší (a tedy nejčastější) a nejjednodušší způsob podpory skleněných tabulí. Po staletí se běžně používá pro upevnění skleněných tabulí v okenních otvorech. V současnosti se tento způsob využívá i v rámových konstrukcích, jako jsou závěsné skleněné fasády. Tabule mohou být podepřeny podél dvou, tří nebo i všech čtyř stran.

Vlastní tíha je do rámu přenášena pomocí plastových distančních podložek umístěných na spodní vodorovné hraně. Aby byla zajištěna odolnost proti zatížení způsobenému sáním a tlakem větru, upíná se skleněná tabule mezi rám a přítlačnou lištu. Zatížení se přenáší přes 6 až 15 mm silnou vrstvu neoprenu, EPDM (etylenpropylenový kaučuk) nebo silikonového těsnění (viz obrázek 5). [7], [1]



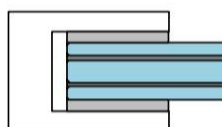
Obr. 5 Schéma typické lineární podpory s EPDM těsněním a zasklívací lištou [7]

V rámových systémech je velikost rámu vždy větší než skleněná tabule. Rozdíl by měl být dostatečný, aby pokryl jak odchylky způsobené výrobou a instalací, tak i deformace vzniklé později, například teplotní roztažností.

Alternativa pro mechanické upnutí tabule do rámu je použití konstrukčního silikonového těsnění, kdy se tabule do rámu připevňuje lepením. Rám zůstává na vnitřní straně zasklení (v interiéru), povrch v exteriéru je hladký. Pouze spára mezi skly je tmelena konstrukčními silikony. [7], [1]

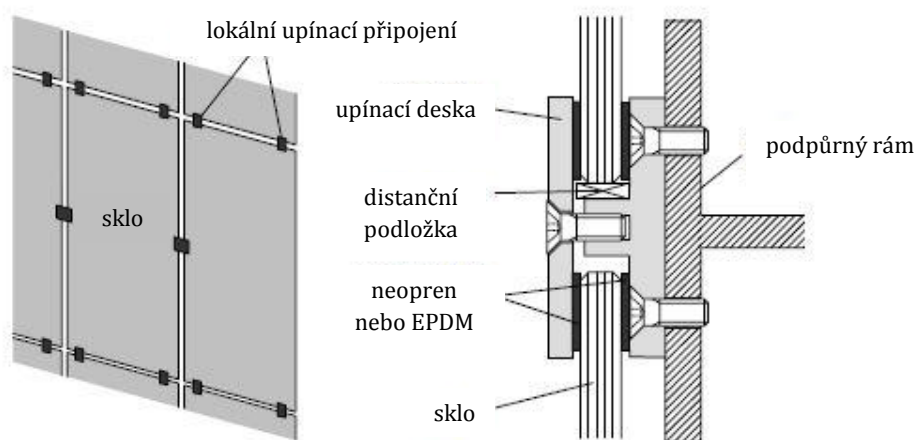
2.2.2 Upínací a třecí spoje

Upínací připojení (viz obrázek 6) se vyvinulo z potřeby moderní architektury minimalizovat neestetické uchycení do rámu. Okraje skleněného panelu jsou na několika místech přichyceny pomocí kovových svorek, které mohou být upevněny na vnitřní podpůrný rám nebo skleněné žebro. Takové zmenšení připojovacích prvků, a tím i kontaktních ploch, vede ke vzniku lokálních napětí, což by v návrhu mělo být řádně zohledněno. Upínací spoje jsou běžným řešením pro malé prvky s nižším významem v konstrukci, jako jsou fasády.



Obr. 6 Lokální upínací spoj [3]

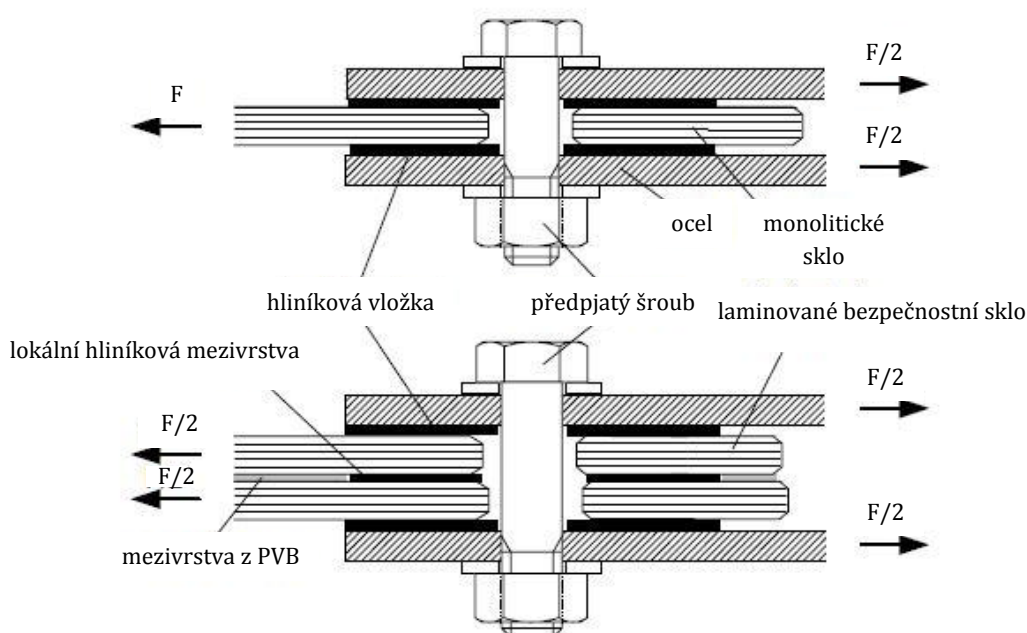
K přenosu zatížení působícího kolmo na skleněnou tabuli se používá upínací připojení s nízkým třením, kde má kovová svorka za úkol pouze držet tabuli na místě. Sklo je od kovu odděleno měkkou vrstvou z neoprenu nebo EPDM (viz obrázek 7). [3], [7]



Obr. 7 Schéma typického upínacího připojení s nízkým třením [7]

Jiný druh upínacího připoje dokáže přenášet zatížení v rovině pomocí třecího spoje vytvořeného vnesením přitlačné síly. Třecí spoje využívají předem předpjaté šrouby a navíc je zatížení přenášeno větší plochou, čímž lze minimalizovat koncentrace napětí. Obvykle se třecí spoj skládá ze skleněné tabule umístěné mezi dvěma ocelovými deskami oddělenými těsněním a šroubu, který souvrství spojuje dohromady. Přímému kontaktu mezi sklem a ocelí je zabráněno vytvořením většího prostoru pro šroub a umístěním vložek mezi sklo a ocelové desky. Vložka musí být dostatečně pevná, aby odolala napětí vyvolanému předepnutými šrouby

a aby přenesla smykové namáhání od vodorovného zatížení. Zároveň nesmí být moc tvrdá, aby nepoškodila sklo, ale musí být dostatečně flexibilní, aby vyrovnávala výrobní tolerance mezi sklem a ocelí. Také by měla zajistit dostatečný součinitel tření mezi sklem a ocelovými deskami. Aby se zabránilo poklesu normálových sil ve šroubu, tendence k tečení (creep) by měla být co nejnižší. Ideální je použití vláknitých vložek nebo vložek z čistého hliníku. Jejich tloušťka se pohybuje řádově kolem 1 mm. Problém nastává u laminovaného skla, jehož mezivrstvy jsou k tečení vysoce náchylné. Řešením je nahrazení polymerové mezivrstvy hliníkovou folií o stejné tloušťce v místě příložek třecího spoje (viz obrázek 8). [3], [7]



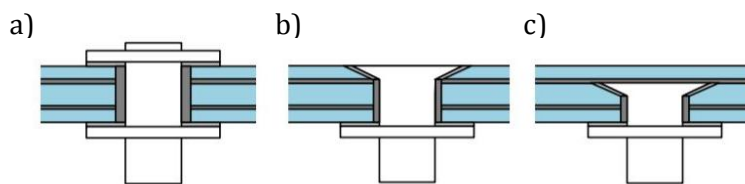
Obr. 8 Schéma typického třecího spoje pro monolitické a laminované sklo [7]

2.2.3 Šroubové spoje

Šroubové spoje se ve skleněných konstrukcích používají od 60. let 20. století a vizuálně představují vhodný způsob mechanického upevnění. Jejich postupným vývojem a zdokonalováním vzniklo několik různých druhů (viz obrázek 9), které slouží jak pro bodové připevnění panelů skleněných fasád, tak i pro vzájemné spojení skleněných tabulí u různých konstrukčních prvků (nosníky, sloupy, žebra). [3], [7]

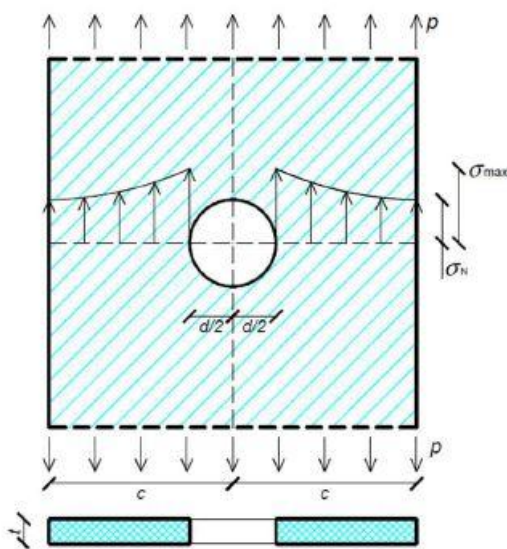
U šroubových spojů je skrz skleněnou tabuli provrtaný otvor a síly jsou přenášeny pomocí šroubů a podložek. Šrouby mohou být buď klasické, nebo zapaštěné. V případě zapaštění je třeba upravit otvor do kónického tvaru. Aby nedošlo ke kontaktu mezi sklem a ocelí, otvor je větší než průměr šroubu a mezery mezi sklem a šroubem se vyplňují speciální maltou, hliníkem

nebo polymerem. Malta se lépe přizpůsobuje nerovnostem povrchu v otvoru, který bývá způsoben laminací vrtaných dílů tvrzeného skla. [3]



Obr. 9 Typy šroubových spojů: **a)** Šroubových s klasickou hlavou, **b)** Šroubových se zapuštěnou hlavou, **c)** Šroubových se skrytou vloženou hlavou [3]

Nicméně i přes široké možnosti přenosu zatížení nepatří šroubové spoje k nejefektivnějším. Malá plocha spoje způsobuje vznik větších lokálních napětí a kvůli zvětšení napětí v okolí otvorů pro šrouby je pro aplikaci šroubového spoje vyžadováno použití tepelně tvrzeného skla. Aby v přípoji nevznikly nežádoucí excentricity vyvolávající přídavná ohybová namáhání, je těmto místům při návrhu nutné věnovat zvláštní pozornost, a také při instalaci je nutné dbát na správnou manipulaci.



Obr. 10 Typické rozdělení napětí v okolí otvoru [3]

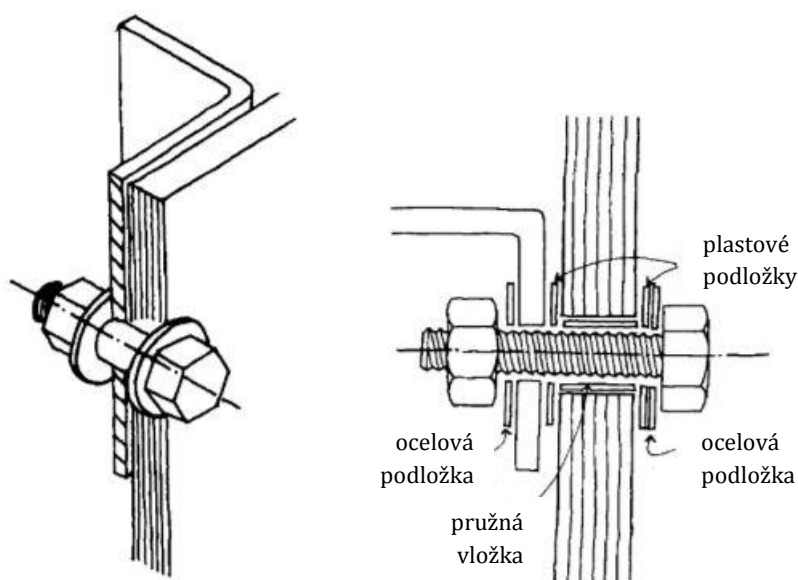
Hlavním úkolem je tedy vytvoření takového spoje, ve kterém by nedocházelo k přímému kontaktu skla a oceli, a tím se omezil vznik velmi vysokých špiček napětí. [3], [7]

Na únosnost panelu se šroubovým spojem má vliv zbytkové napětí otvoru a kvalita povrchu skla. Vzhledem k tomu, že maximální tahové napětí se obvykle objevuje právě v okolí otvoru (viz obrázek 10), pro správný návrh je nezbytný realistický výpočetní model. Jen zřídka je možné určit rozložení napětí kolem otvorů zjednodušenými metodami nebo pomocí grafů. Obvykle je nutné přistoupit k nelineární konečné prvkové analýze.[7]

Následující typy šroubových spojů pro připojení fasádních panelů se od sebe liší především umístěním šroubu ve skleněném panelu:

a) Klasický šroubový spoj

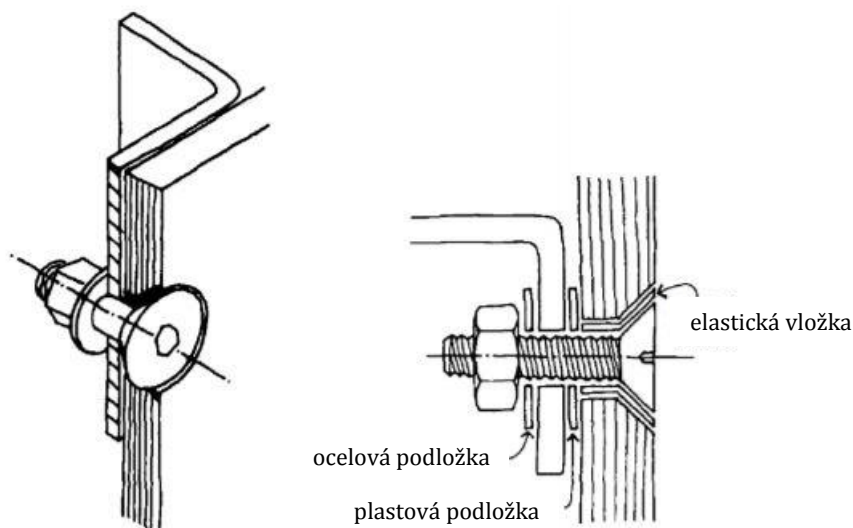
Klasický šroubový spoj je nejstarší a nejjednodušší ze šroubových spojů. Hlava šroubu vyčnívá nad rovinu skleněné tabule a zatížení se přenáší přímým uložením skla na dřívku. Kvůli malé kontaktní ploše má tento spoj malou únosnost. Aby se plocha zvětšila a zároveň aby se zabránilo přímému kontaktu skla a oceli, umisťuje se mezi oba prvky vložka z pružného materiálu. Skleněný panel je pevně připojený k nosné konstrukci, a proto tento spoj neumožňuje téměř žádné pootočení fasádního panelu (viz obrázek 11). [5]



Obr. 11 Schéma klasického šroubového spoje [5]

b) Jednoduchý spoj se zapuštěnou hlavou

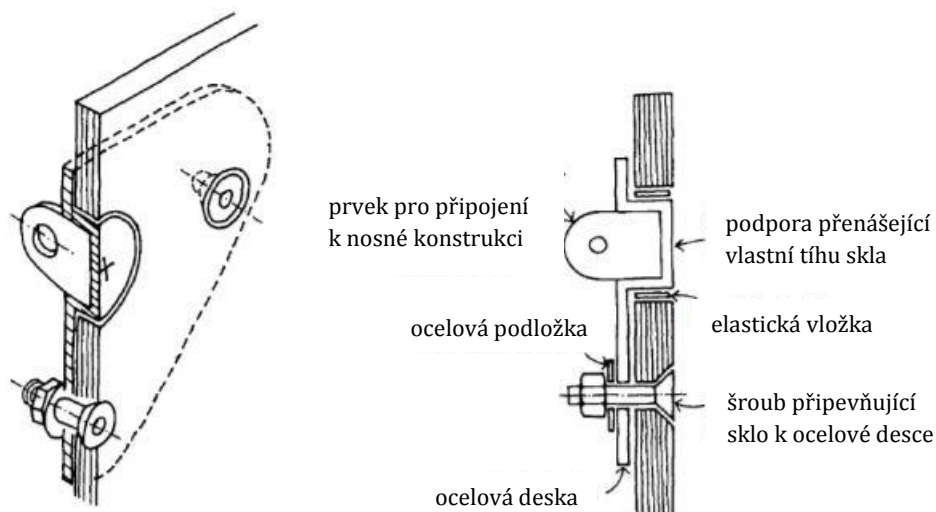
U jednoduchých spojů se zapuštěnou hlavou je hlava šroubu ve stejné rovině, jako horní povrch panelu. Stejně jako u klasických spojů se i u zapuštěných používá elastická vložka, která zvyšuje kontaktní plochu a tím i únosnost pro přenos zatížení v rovině skla. Vlivem vrtání a dalších výrobních úprav může dojít k větším koncentracím napětí. Ani tento spoj neumožňuje pootočení panelu fasády (viz obrázek 12). [5]



Obr. 12 Schéma jednoduchého spoje se zapuštěnou hlavou [5]

c) Ocelová deska s oporou

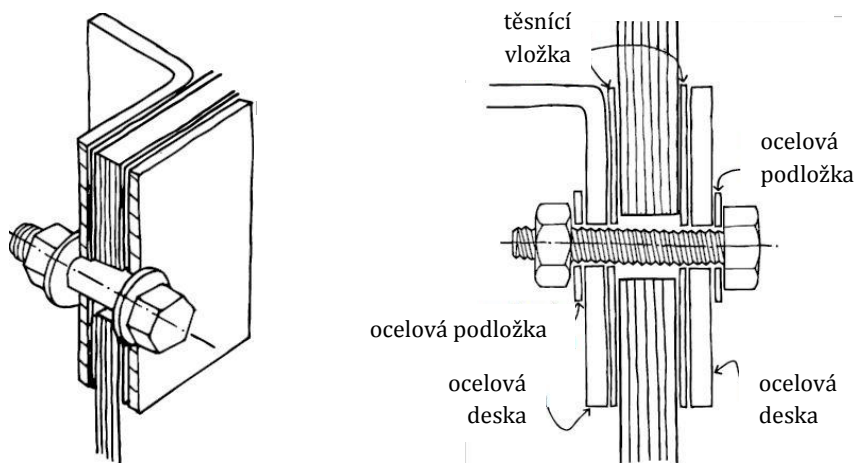
Tento spoj umožňuje přenos vlastní tíhy (vertikálního zatížení) pomocí podpory, která je součástí zadní ocelové desky a může být opatřena vložkou. Zapuštěné šrouby připojují skleněné panely k ocelové desce a přenášejí vodorovné zatížení. Vzhledem k tomu, že je ve skleněném panelu nutné vyvrtat tři otvory, jedná se o relativně komplikovaný spoj (viz obrázek 13). [5]



Obr. 13 Schéma připojení ocelové desky s oporou [5]

d) Třecí spoj

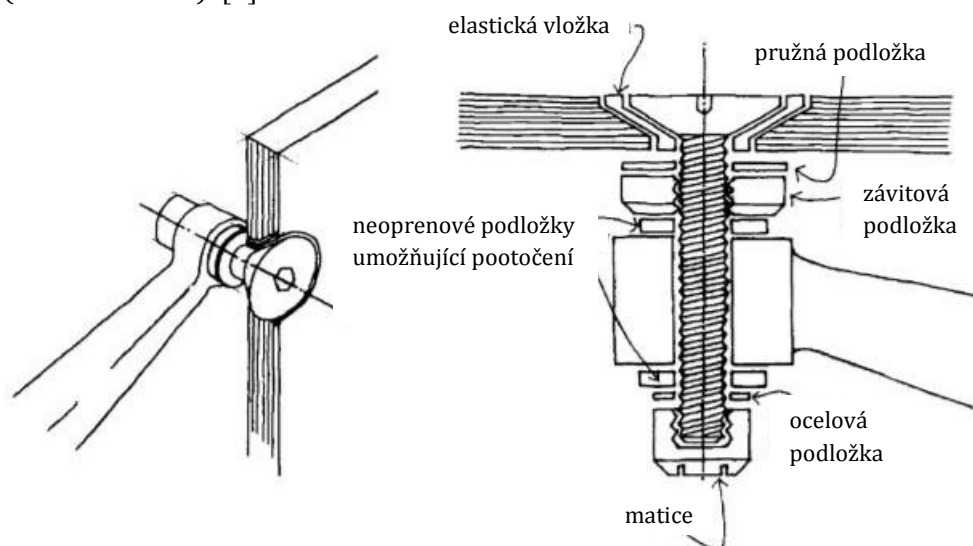
Tento druh spoje byl vyvinut pro použití se skleněnými žebry. Na každé straně skleněného panelu je umístěna ocelová deska uložená na vhodné mezivrstvě. Šrouby jsou utažené předepsaným kroutícím momentem, aby bylo dosaženo třecího spoje (viz obrázek 14). (Více viz 2.2.2 Upínací a třecí spoje.) [5]



Obr. 14 Schéma třecího spoje [5]

e) Vylepšený spoj se zapaštěnou hlavou (spider)

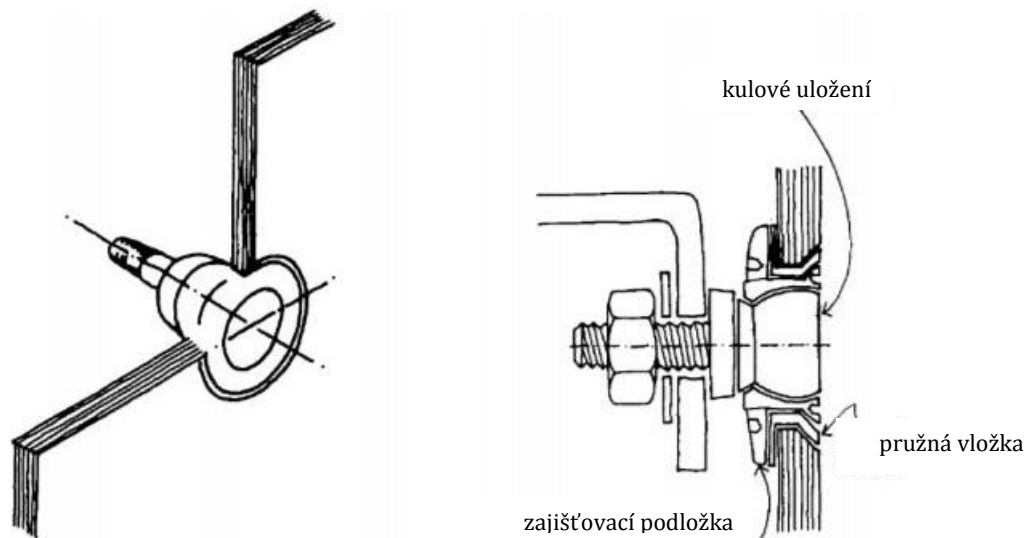
Mezi jednoduchým a vylepšeným spojem se zapaštěnou hlavou jsou dva hlavní rozdíly – použití závitových podložek na vnitřní straně skleněné desky a pružných podložek na obou stranách. Tyto úpravy umožňují natočení mezi sklem a kotvicím profilem a zároveň přináší možnost nastavení šroubu do příhodné polohy vzhledem k předem určenému torznímu momentu (viz obrázek 15). [5]



Obr. 15 Schéma vylepšeného spoje se zapaštěnou hlavou [5]

f) Kloubový šroubový spoj

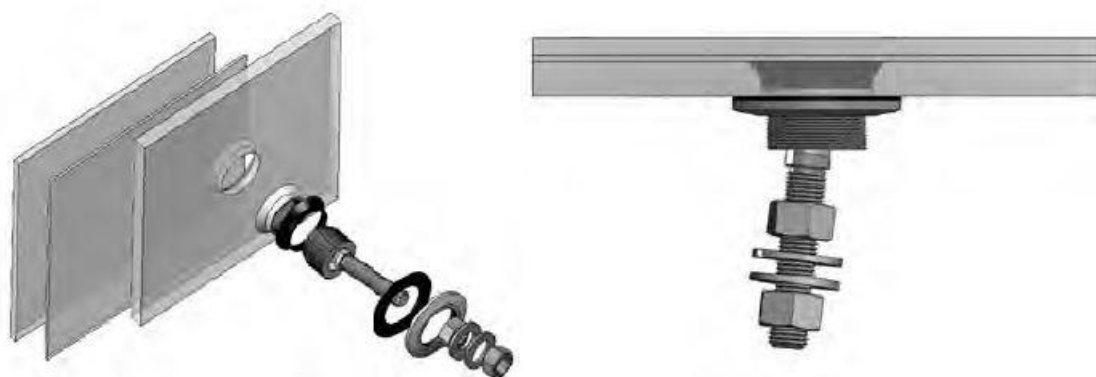
V tomto spoji se používá netypický šroub s kulovou hlavou, která je zasazena do ložiskové misky zasunuté do skleněného panelu. Díky tomu a díky použití vhodných podložek je umožněno pootočení panelu kolem podpory. Tím je omezen vliv přídatných momentů, které zvětšují napětí ve skleněné tabuli. Kloubové šrouby také dovolují odejmutí a zpětné připevnění panelů do podporových systémů (viz obrázek 16). [5]



Obr. 16 Schéma kloubového šroubového spoje [5]

g) Spoj se skrytým kotevním bodem (skrytou vloženou hlavou)

Spoj se skrytou vloženou hlavou je aktuálně nejmodernější a stále se vyvíjející metodou. Technologie spočívá v zalaminování kotevního bodu mezi vrstvy skla (viz 2.3.3). Jeho výhodou je kromě transparentnosti také přerušení tepelného mostu, protože šroub neprochází skrz celý panel (viz obrázek 17). [4]

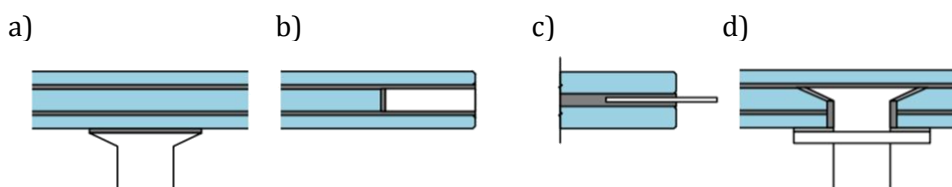


Obr. 17 Schéma spoje s vloženou hlavou [4]

2.3 Lepené spoje

Lepeným spojem se rozumí takový spoj, jehož pojícím prvkem je přílnavý, nekovový materiál, který získává své vlastnosti až po prodělání určitého vytvrzovacího procesu. Kvalita spojení, a tím i přenos zatížení, závisí na vlastnostech hraničních vrstev spojovaných prvků (skleněné tabule, ocelové části) a pojící vrstvy (lepidla). Vliv na spojení má jak přílnavost hraniční vrstvy, tak i soudržnost pojící vrstvy (pevnost lepidla). [1]

Spojení může být bodové, liniové nebo plošné. V plošných spojih jsou síly přenášeny velkým povrchem – tyto spoje se používají pro realizaci rohových spojů konstrukcí ze skla (například příčle a sloupu). Příkladem liniového lepeného spoje je konstrukční silikonové těsnění (viz obrázek 1b), kde je síla přenášena prostřednictvím dlouhé liniové plochy. V případě bodového připojení (viz obrázek 18) se síla přenáší pouze malou plochou, což sice vede k větší transparentnosti spoje, ale také vyžaduje vysokou mechanickou odolnost lepidla. [3]



Obr. 18 Lepené spoje: **a)** Lepený kotevní bod **b)** Zapuštěný laminovaný spoj s tlustou ocelovou deskou **c)** Zapuštěný laminovaný spoj s tenkou ocelovou deskou **d)** Spoj se skrytou vloženou hlavou [3]

Velkou výhodou lepených spojů je, že díky větší homogenitě umožňují rovnoměrnější přenos zatížení než spoje mechanické a s ohledem na volbu geometrie a tuhosti spoje lze zabránit vzniku náhlých špiček napětí, které jsou typické pro mechanické spoje. Zároveň odpadá nutnost vrtání otvoru do skleněného panelu. Další výhodou představuje hladký povrch, který se snadno čistí. Díky tomu jsou lepené spoje relativně snadné na výrobu. Na druhou stranu je ale při návrhu nutné vzít v úvahu, že pevnost spoje je závislá na mnoha různých faktorech. Mezi ně patří například typ a doba trvání zatížení, úprava povrchu, teplota, vlhkost, UV záření a dodržení technologických postupů. [1], [8]

Lepené spoje používané pro skleněné konstrukce mohou být elastické (konstrukční silikonové těsnění), tuhé či polotuhé (akrylová a epoxidová lepidla, polyester pryskyřice) nebo laminované (EVA, PVB, Sentryglas). [7]

2.3.1 Elastické lepené spoje

Konstrukční silikonové těsnění (SSG) bylo původně používáno pro připojení skleněných tabulí k hliníkovým rámcům skleněných fasád výškových budov. V současné době se silikonů využívá pro dosažení elastického spojení mezi dvěma skly, sklem a hliníkem nebo sklem a ocelí.

Dostupné jsou dva druhy konstrukčních silikonů – jednosložkové a dvousložkové.

Jednosložkové silikonové lepidla se začínají vytvrzovat, jakmile přijdou do styku s vlhkostí obsaženou ve vzduchu. Optimální teplota je 24°C při minimální vlhkosti vzduchu 50%. Doba vytvrzování záleží na tloušťce vrstvy (doporučuje se minimálně 6 mm při maximální šířce 20 mm) – obecně lze počítat, že lepený spoj dosáhne plné únosnosti do 3 týdnů. Nicméně pokud je vrstva moc silná, nemusí k vytvrzení vnitřních vrstev vůbec dojít.

Dvousložkové silikonové lepidla se vytvrzují polymerizační reakcí. Reakce se spustí smícháním obou složek – bazické sloučeniny (přibližně 90% objemu) a katalyzátoru (přibližně 10% objemu). K vytvrzení není třeba žádné vnější chemické složky a jeho postup je poměrně rychlý – doba schnutí je méně než tři dny (doporučená tloušťka vrstvy je minimálně 6 mm a šířka maximálně 50 mm, přičemž vzájemný poměr tloušťky a šířky by měl být maximálně 1:4). Aby měl spoj požadované vlastnosti, je nutné při aplikaci často kontrolovat správné promíchání složek. Aplikace dvousložkových silikonů přímo na staveništi je proto nevhodná. [7]

Elastická lepidla, vzhledem k tloušťce vrstvy kolem 6 mm, vyplňují mezery a vyrovnávají napětí. Elastické spoje dobře přenášejí dynamické zatížení, tlumí přenos zvuku mezi prvky, fungují jako těsnění a zároveň je snazší je opravit nebo rozebrat. Díky vysoké odolnosti vůči potrhání nehrozí náhlá ztráta pevnosti materiálu. [1] Pro krátkodobé zatížení dosahují konstrukční silikonové lepidla obvykle pevnosti v tahu pro dynamické zatížení (v závislosti na teplotě) kolem 0,8 – 1,8 MPa. Při dlouhodobém zatížení mají tendenci k tečení (creep). K tečení dochází při hodnotách dlouhodobého zatížení odpovídajících zhruba 10% krátkodobé pevnosti. Dlouhodobé přetvoření nad hranici tečení vede k relaxaci. Tím poklesne napětí, ale k porušení dojde až po překročení mezního přetvoření.

Kvůli nízkému modulu pružnosti nejsou tyto spoje vhodné pro přenos smykových sil. [7]

2.3.2 Tuhé lepené spoje

Jako lepidla pro tuhé spoje se nejčastěji používají akryláty a epoxidové pryskyřice. Při návrhu je nutné vzít v úvahu mnoho faktorů. Svou roli hraje výběr samotného lepidla, při kterém se musí zvážit jeho chemická kompatibilita, dále geometrie spojované oblasti, rozsah

teplot, kterému bude spoj vystaven a jeho životnost. Záleží také na zpracovatelnosti a způsobu vytvrzení. [7]

Geometrie spoje úzce souvisí s volbou lepidla. V tomto ohledu je primární otázkou tloušťka spoje. Každý typ lepidla má optimální tloušťku, při které dosahuje maximální pevnosti. Pro jinou tloušťku pak pevnost spoje klesá. Při použití kontaktního lepidla je možná tloušťka pod 1 mm, naopak lepidla pro vyplnění mezer lze nanášet ve vrstvě větší než 5 mm. Při tloušťce vrstvy mezi 0,1 a 0,5 mm mají tyto materiály velmi nízkou zbytkovou únosnost a dochází k porušení spoje křehkým lomem. Pokud je jejich tloušťka optimální, mají extrémně vysokou pevnost, ale nepřizpůsobují se nerovnostem konstrukce a nevyrovnávají napětí. Jsou proto vhodné hlavně pro bodové spoje. [1]

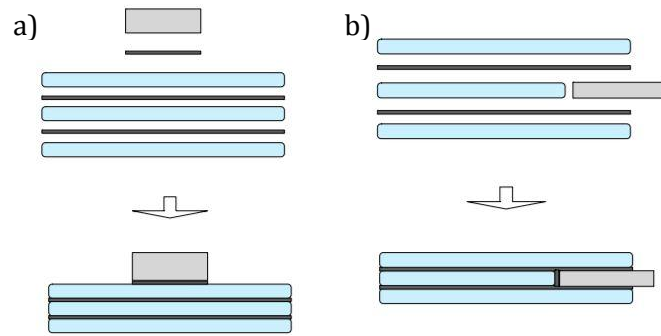
K aktivaci lepidel používaných pro kontaktní spoje často slouží UV záření. Ke zrychlení procesu lze použít UV lampy, což umožňuje úplné využití mechanických vlastností materiálu v relativně krátkém čase. Tato lepidla je nutné nanášet v tenkých vrstvách, protože jinak by se UV záření nedostalo ke všem monomerům a k aktivaci lepidla by plně nedošlo. Výhodou těchto lepidel je, že jakmile vytvrdnou, jsou k UV záření plně odolné. [3], [7]

Ačkoli jsou skleněné prvky obecně ploché, tepelným zpracováním vznikají na jejich povrchu vlnkovité deformace a spojení dvou či více tabulí může vyžadovat větší montážní tolerance. Pokud je tolerance větší než 1 mm, doporučuje se použití lepidel na bázi epoxidů, které umožňují vyplnění nerovností. Při nižších tolerancích je možné použít lepidlo na bázi akrylu. [7]

2.3.3 Laminované spoje

Laminované spoje prochází stejným procesem výroby jako laminované skleněné prvky – několik vrstev skla je spojeno pomocí adhesivního transparentního polymerového materiálu (mezivrstvy). Na rozdíl od jiných spojovacích technologií tato vrstva není na bázi kapalných nebo polokapalných látek, ale je ve formě pevné tenké folie (nominální tloušťka 0,38-1,52 mm) z ethylenvinyl acetátu (EVA), polyvinyl butyralu (PVB), transparentních ionomerů (Sentryglas) nebo transparentního konstrukčního silikonu (TSSA).

Základní myšlenkou laminovaných spojů je použití stejných postupů a výrobních protokolů jako při výrobě vrstveného (laminovaného) skla pro docílení lepeného transparentního spojení. Mezi kovový prvek a skleněný panel je umístěna folie a proběhne standardní laminace v autoklávu. Ve výsledku je ocelový prvek pomocí transparentní folie plně připojen ke sklu (viz obrázek 19). Hlavní výhodou těchto spojů spočívá v tom, že jsou na konci laminačního procesu kompletní a připravené k použití přímo na stavbě. [3]



Obr. 19 Schéma výroby: **a)** Standardního laminovaného spoje

b) Vloženého laminovaného spoje [3]

a) Standardní laminovaný spoj

U standardních laminovaných spojů je kovový prvek připojen ke sklu jedním svým povrchem. Pro tento typ spoje lze mimo jiné použít i transparentní konstrukční silikon, který není obecně určen pro spojení prvků laminovaného skla. Tento materiál je vhodný pouze pro připojení ocelového bodu ke sklu. Příklad použití v konstrukci lze vidět na obrázku 20. [3]



Obr. 20 Laminovaný spoj fasády evropského distribučního centra Dow Corning,

Felluy, Belgie [3]

b) Vložený laminovaný spoj

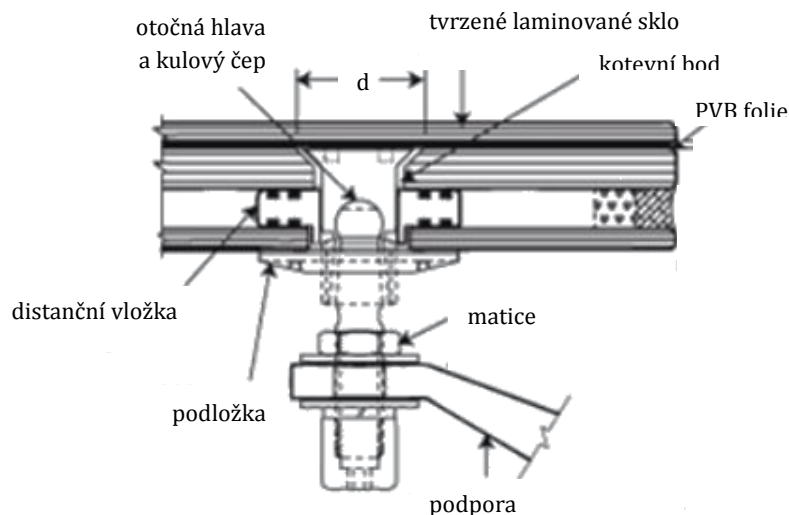
V případě vloženého spoje je kovová část umístěná mezi laminované prvky. U tenkých vložených spojů (jako na obr. 18c) je často nutné navrstvit mezi skleněné tabule několik folií. U tlustých spojů se běžně používají kovové vložky se stejnou tloušťkou, jako je tloušťka jedné skleněné tabule. V případě vložek s větší tloušťkou je nutné vyříznout ve středovém skle otvor odpovídající geometrii vloženého plechu. Tento typ spoje lze použít i pro připojení příčle ke sloupu (viz obrázek 21). [3]



Obr. 21 Vložené laminované spoje Apple Retail Store, New York, USA [3]

c) Spoj se skrytým kotevním bodem

Spoj se skrytým kotevním bodem představuje kombinaci lepeného (laminovaného) a šroubového spoje. Kotevní bod je vložený mezi vrstvy celistvých skleněných tabulí a tabulí s předem vyvrtaným otvorem. Šroub tedy neprochází skrz celý panel, jako je tomu u tradičních šroubových spojů, ale pouze jeho částí (viz obrázek 22). Zároveň spolu se skly projde procesem laminace v autoklávu, čímž se pomocí folie připevní k povrchu jedné z tabulí. [3]



Obr. 22 Příklad spoje se skrytým kotevním bodem pro izolační sklo [6]

3. Současný stav výzkumu

Jak již bylo zmíněno, laminovaný spoj se skrytou kotevní hlavou je v současné době nejmodernější a nejvíce se rozvíjející metodou bodového upevnění skleněných tabulí. Protože prozatím neexistují žádné ucelené návrhové postupy, je při návrhu nutné ověřit chování spoje pomocí experimentů. Těmi se, mimo jiné, zabývá řada univerzit. Níže následuje popis některých zkoušek uskutečněných v minulých letech na Univerzitě Minho a na Českém vysokém učení technickém v Praze. Experimenty se zabývají změnou vlastností tohoto spoje vystavenému různým vlivům, jako je náraz na povrch panelu, vysoká teplota, vlhkost a tahová síla.

3.1 Univerzita Minho

Na Fakultě architektury Univerzity Minho byla v roce 2010 provedena série zkoušek laminovaného spoje se skrytou kotevní hlavou. Skleněný panel pro zkušební tělesa byl vytvořený běžnou průmyslovou laminací. Postupně byly provedeny zkoušky odolnosti vůči nárazu, vysoké teplotě a vlhkosti.

a) Zkouška nárazem

Rozměry tabule z vrstveného skla pro tuto zkoušku byly 1124 x 1085 mm. Jednalo se o vrstvené sklo složené z tepelně zpevněného skla o tloušťce 6 mm, tvrzeného skla o tloušťce 12 mm a folie Sentryglas o tloušťce 2,28 mm. Do tvrzeného skla byly ve čtyřech rozích vyvrtány otvory pro umístění čtyř kotevních hlav s průměrem 59 mm. Vzorek byl svisle připojen k nosné konstrukci a následně podél povrchu zcela rozbit pomocí automatického razníku. Nejprve došlo k porušení tepelně zpevněného skla a až poté tvrzeného. Porušený panel byl po několika dalších dny ponechán ve svislé poloze, aniž by došlo k jeho kolapsu (viz obrázek 23). [4]



Obr. 23 Vzorek po zkoušce nárazem [4]

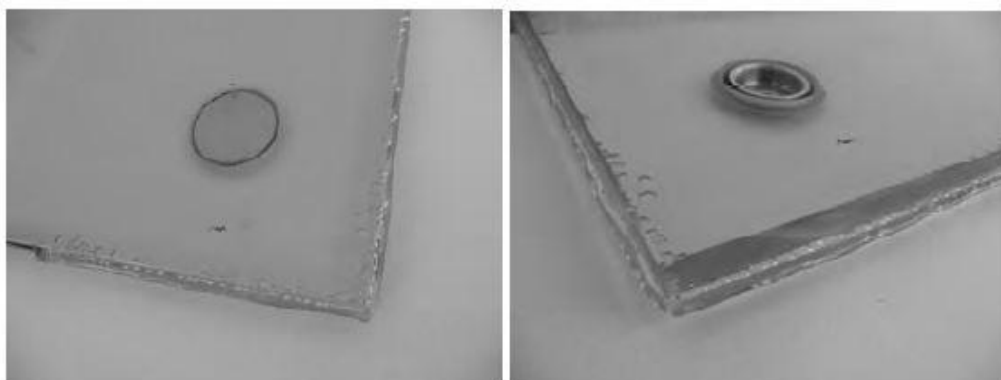
Stejně zkoušce byl podroben vzorek izolačního skla skládajícího se z 6 mm vnější vrstvy skla, 12 mm distanční vložky připevněné konstrukčním silikonem, 6 mm tepelně zpevněného skla, 2,29 mm folie Sentryglas a 12 mm tvrzeného skla. V tomto případě došlo k porušení pouze tvrzeného skla, které bylo jako jediné přístupné. Ani tento vzorek nejevil po několika dnech ve svislé poloze známky kolapsu (viz obrázek 24). [4]



Obr. 24 Vzorek po zkoušce nárazem [4]

b) Zkouška odolnosti k vysoké teplotě

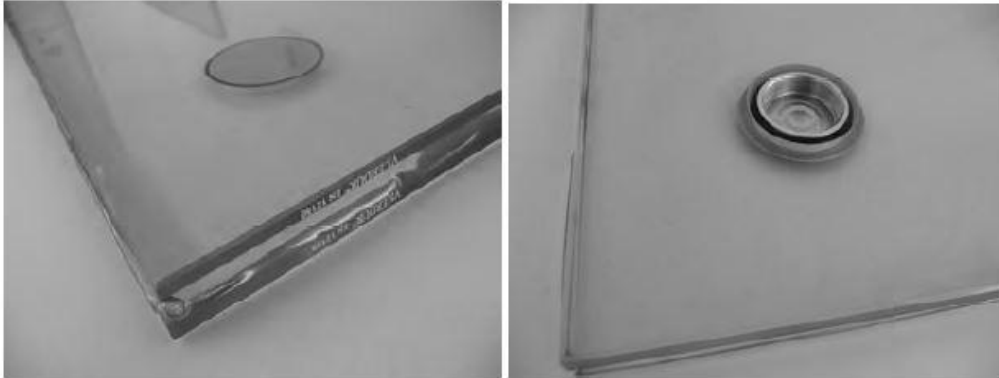
Vzorky pro tuto zkoušku měly rozměry 600 x 300 mm a skládaly se z tepelně zpevněného skla o tloušťce 6 mm, 1,52 mm folie Sentryglas a tvrzeného skla tloušťky 12 mm. Vzorky byly zahřáty na 100°C a na této teplotě ponechány 16 hodin. Cílem této zkoušky bylo zjistit, zda dojde ke změně vlastností vzorku tvorbou bublin, delaminací nebo zakalením. Výsledkem bylo pouze pár bublin do 15 mm od hran a v okolí spoje pouze v okruhu 5 mm (viz obrázek 25). [4]



Obr. 25 Vzorek po zkoušce vysokou teplotou [4]

c) Zkouška odolnosti k vlhkosti

Pro tuto zkoušku byl použitý identický vzorek jako pro zkoušku teplotou. Cílem této zkoušky bylo zjistit, zda při dlouhodobému vystavení vlhkosti dojde ke změně vlastností panelu, konkrétně k tvorbě bublin, delaminaci a zakalení. Vzorek byl ve svislé poloze na dva týdny umístěn do klimatické komory, ve které byla udržována 100% vlhkost při teplotě 50°C. Také výsledky této zkoušky lze prohlásit za uspokojivé, protože na povrchu panelu nebyla pozorována žádná změna (viz obrázek 26). [4]



Obr. 26 Vzorek po zkoušce vlhkostí [4]

3.2 České vysoké učení technické v Praze

V letech 2016 - 2018 byla na Fakultě stavební ČVUT v Praze provedena série tahových zkoušek laminovaného spoje se skrytou kotevní hlavou. Ve všech případech byl rozměr vzorků 500 x 300 mm. Schéma experimentu a použitá zařízení byly pro všechny zkoušky stejné.

3.2.1 Popis zkušebního zařízení a uspořádání zkoušek

Pro zatěžování zkušebních vzorků bylo použito zařízení MTS Qtest 100 se softwarem TestWorks 4 (viz obrázek 27). Toto zařízení je možné použít na zatěžování do 100 kN a jeho součástí je snímač, který měří posun příčnicku.



Obr. 27 MTS Qtest 100 [10]

Pro měření průhybu skla byl použit laserový extenzometr (viz obrázek 28), který snímá vzdálenost mezi spodní stranou šroubu a vztažným bodem umístěným na zatěžovací stoličce.



Obr. 28 Laserový extenzometr [10]

Pro přenos zatížení do zkušební vzorku byl použit zatěžovací rám, který musel být pro tento účel speciálně vyroben (viz obrázek 29). Rám má odnímatelnou spodní část a byl navržen tak, aby vydržel zatížení do 50 kN.



Obr. 29 Zatěžovací rám [8]

K podepření zkušebních vzorků byla použita ocelová stolice (viz obrázek 30) s válcovitými podporami, na které byly umístěny plastové podložky.



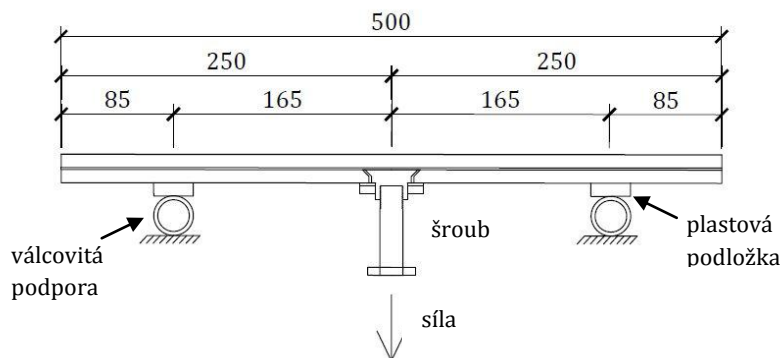
Obr. 30 Ocelová stolice s plastovými podložkami [10]

Zkušební vzorky byly umísťovány tak, aby ocelový kotevní bod směřoval dolů a šroub se tak mohl upevnit k rámu (viz obrázek 31).



Obr. 31 Umístění zkušební vzorku [10]

Vzorky byly podepřeny symetricky vždy 85 mm od okraje a umístěny tak, aby se kotevní bod nacházel vždy uprostřed (viz obrázek 32).



Obr. 32 Schéma experimentu

3.2.2 Popis zkoušek

a) Tahová zatěžovací zkouška 2016 – vzorky F1-01, F1-02, F1-03

Vzorky z roku 2016 se skládaly z 10 mm plaveného skla, 4 vrstev folie Sentryglas (každá o tloušťce 0,38 mm), 10 mm tepelně zpevněného skla s otvorem uprostřed a vloženého kotevního bodu z nerezové oceli a šroubu M16 (viz obrázek 33). [8]



Obr. 33 Vzorek před tahovou zatěžovací zkouškou [8]

Vzorky byly postupně zatěžované a odtěžované až do porušení. Během zkoušky mohlo dojít buď k porušení skla v okolí otvoru vlivem koncentrace napětí, k delaminaci kotevního bodu od folie, anebo k porušení folie vlivem normálového napětí.

Všechny vzorky této série se porušily stejným způsobem bez ohledu na výrobní vady, které byly zjištěny před zkouškou (viz obrázek 34). Nejprve došlo k delaminaci ocelového bodu od folie, po které následoval pokles tuhosti. Porušení panelu předcházela další rychlá delaminace, nicméně přesný moment, kdy k delaminaci dojde je nepředvídatelný. Bylo by proto vhodné zkoušce podrobit větší počet vzorků. [8]



Obr. 34 Detail vzorku po tahové zatěžovací zkoušce [8]

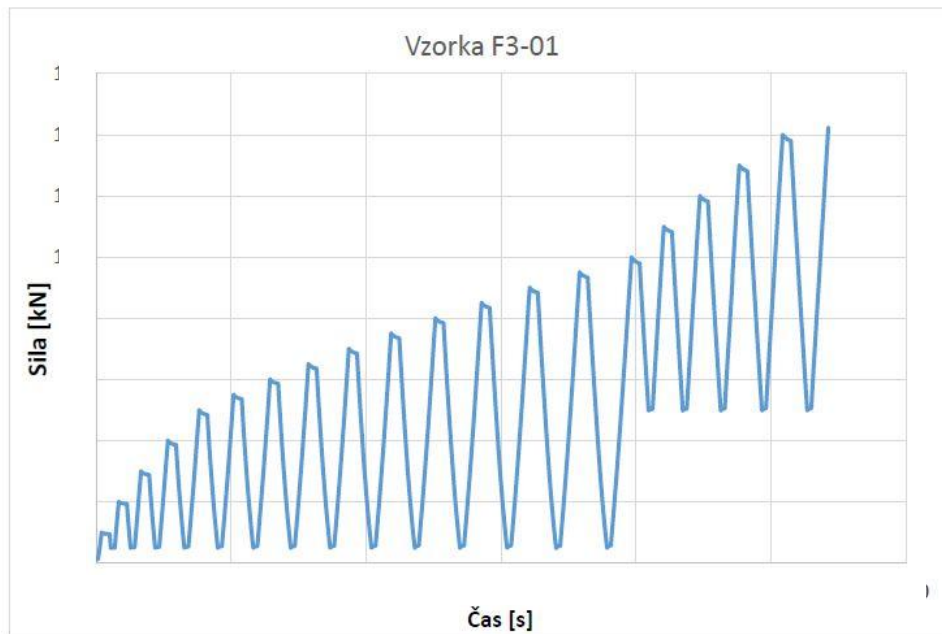
b) Tahová zatěžovací zkouška 2017 – vzorky F3-01, F3-02, F3-03

Vzorky pro tuto zkoušku se skládaly z 10mm plaveného skla, 4 vrstev folie EVA (každá o tloušťce 0,38 mm) a 10 mm tepelně zpevněného skla s otvorem uprostřed pro vložení kotevního bodu z oceli a šroubu M16 (viz obrázek 35). [10]



Obr. 35 Vzorek před tahovou zatěžovací zkouškou [10]

Stejně jako u předešlé zkoušky byly vzorky postupně zatěžované a odtěžované až do porušení. Zatěžování probíhalo postupně v krocích s prodlevou 1 min při dosažení předepsané síly. Následně bylo těleso odtíženo a opět zatíženo na vyšší úroveň zatížení (viz graf 1).



Graf 1 Závislost síly na čase pro vzorky F3 [10]

Kromě několika malých bublinek v okolí spoje nedošlo během zkoušky k žádným pozorovatelným změnám. K porušení panelu došlo náhle bez jakékoli předchozí delaminace (viz obrázek 36).

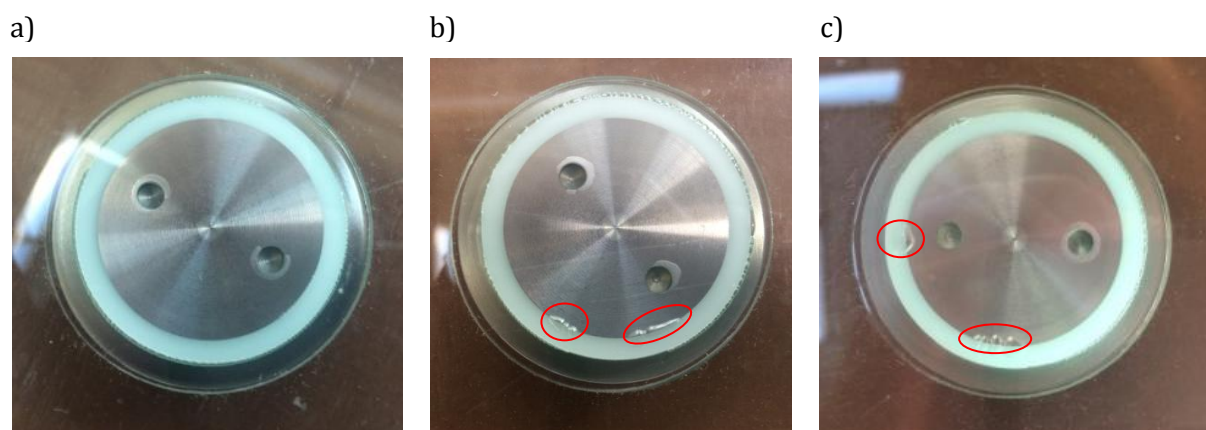


Obr. 36 Vzorek po tahové zatěžovací zkoušce [10]

c) Tahová zatěžovací zkouška 2018 – vzorky T1-01, T1-02, T1-03

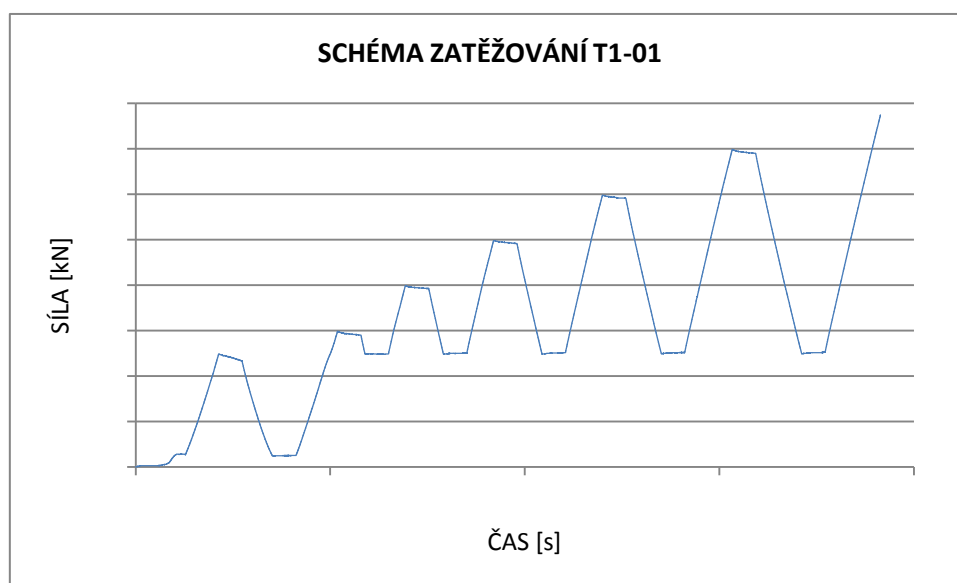
Vzorky pro tuto zkoušku byly označeny T1-01, T1-02 a T1-03 a skládaly se z 10 mm plaveného skla, 2 vrstev folie EVA LCI (každá o tloušťce 0,38 mm) a 10mm tvrzeného (ESG) skla s otvorem uprostřed, vloženého kotevního bodu z oceli o průměru 32 mm a šroubu M14. Zkoušky probíhaly při teplotě 33°C.

Všechny dodané vzorky měly být identické, nicméně dva z nich (T1-02 a T1-03) obsahovaly viditelné výrobní vady. U obou vzorků byly pozorovatelné dvě bubliny na rozhraní kotevního bodu a HDPE (vysoko hustotový polyetylen) vložky (viz obrázek 37).



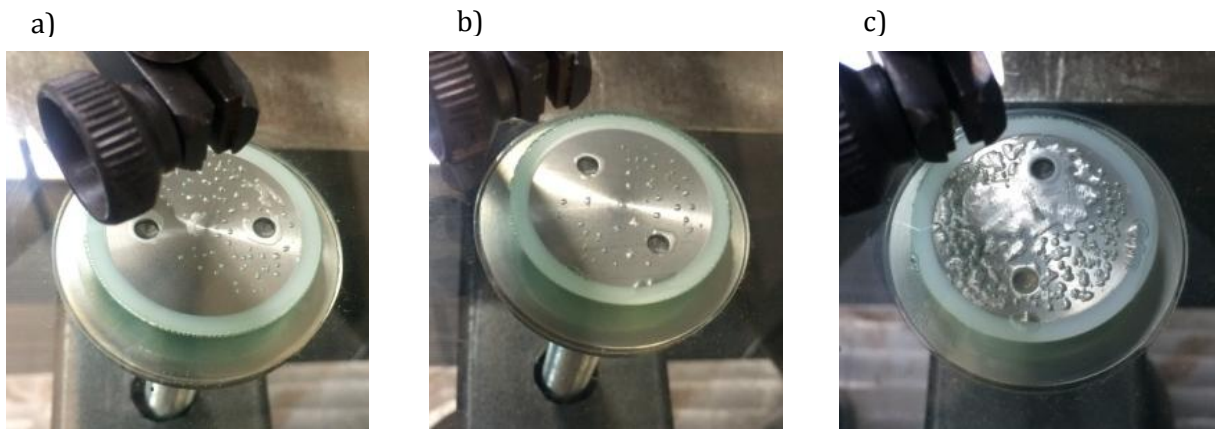
Obr. 37 Stav vzorků před zkouškou **a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03**

Všechny tři vzorky byly postupně zatěžovány a odtěžovány až do porušení rychlostí 1 mm/min. Po každém zatížení i odtížení () byla síla 1 minutu držena na konstantní hodnotě (viz graf 2).



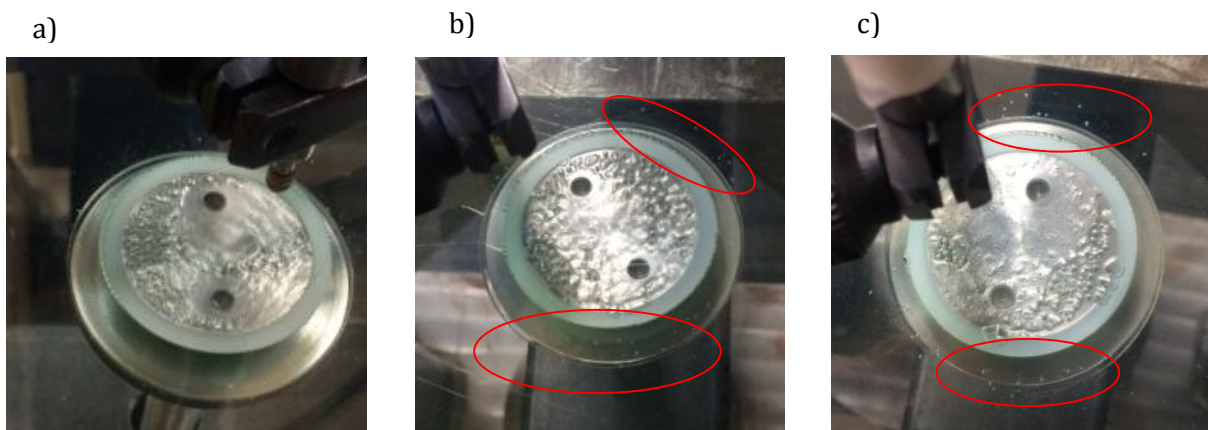
Graf 2 Závislosti síly na čase pro vzorky T1

Již při dosažení síly 100 kN se u všech vzorků začaly v ploše kotevního bodu objevovat malé bublinky, které se při dalším zatěžování začaly slévat (viz obrázek 38).



Obr. 38 Stav vzorků při síle 100 kN a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03

U vzorků T1-02 a T1-03 se při dosažení síly 100 kN objevily malé bublinky i mimo plochu kotevního bodu (viz obrázek 39).



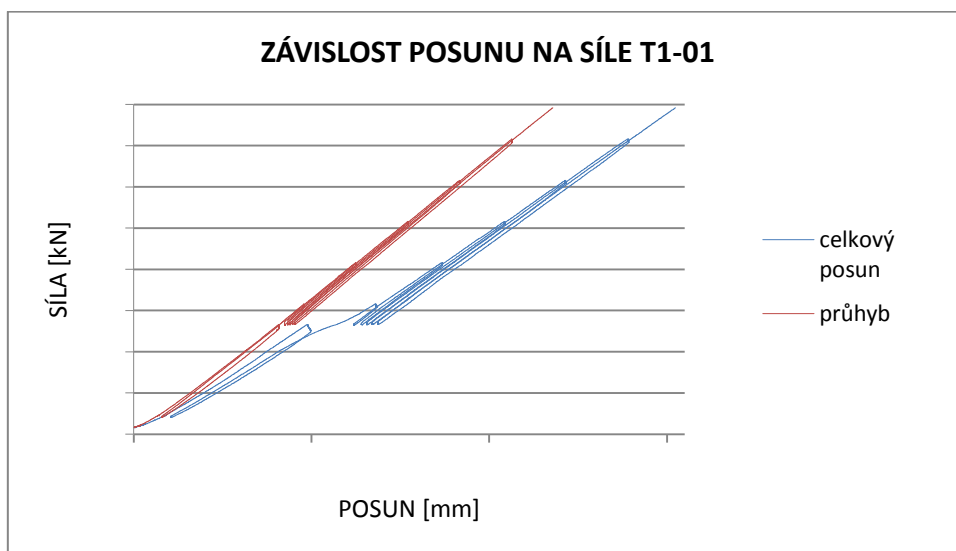
Obr. 39 Stav vzorků při síle 100 kN a) T1-01 b) T1-02 c) T1-03

Při zatěžování na kN došlo u všech tří vzorků k náhlému porušení spodní tabule z tvrzeného skla a vytržení terče (viz obrázek 40).



Obr. 40 Vzorek T1-01 po porušení

Během zkoušky byl zaznamenáván čas, zatížení a posun ve dvou místech vzorku. První bod byl umístěn na spodní hraně tabule tak, aby jeho posun představoval průhyb skleněné tabule. Druhý bod byl umístěn na hlavě šroubu a jeho posun tak reprezentuje celkovou deformaci, to znamená průhyb skleněné tabule a zároveň i delaminaci ocelového bodu od folie. Závislosti obou posunů na síle jsou znázorněny v grafu 3.

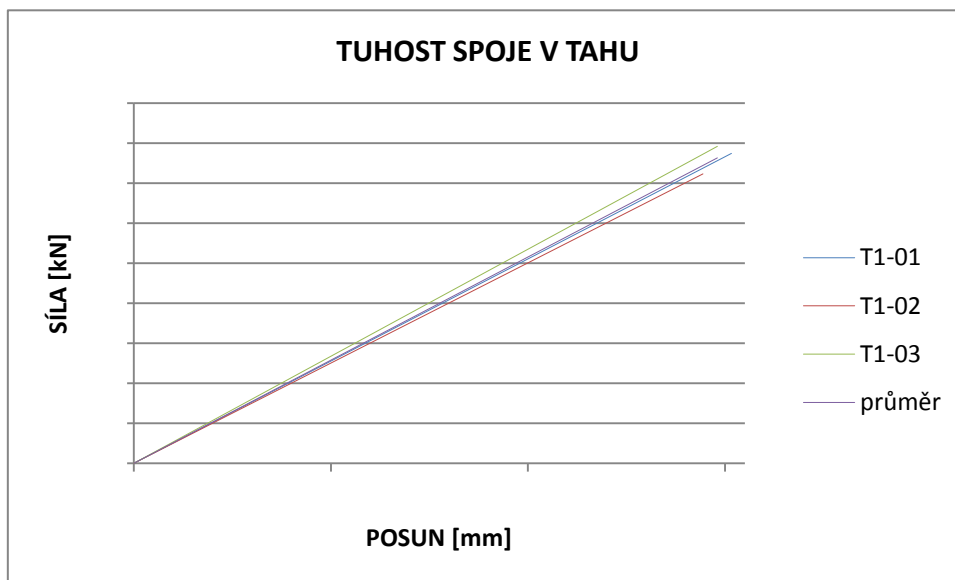


Graf 3 Závislosti posunu na síle pro vzorek T1-01

Na základě získaných dat (viz tabulka 1) byla určena tuhost vzorků, jako průměr síly a celkového posunu jednotlivých zatěžovacích větví a poté i průměrná tuhost všech vzorků. Porovnání tuhostí je znázorněno v grafu 4.

Tabulka 1: Výsledky zkoušky pro vzorky T1

Vzorek	Síla při porušení	Celkový posun při porušení	Průhyb tabule při porušení	Rozdíl	Tuhost
-	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN/mm]
T1-01					
T1-02					
T1-03					
Průměr					



Graf 4 Tuhosti vzorků T1 v tahu

4. Cíl diplomové práce

Tato diplomová práce svým obsahem navazuje na experimenty provedené na Českém vysokém učení technickém v Praze v letech 2016 – 2018. Stejně jako u zkoušek popsaných v kapitole 3.2 byla zjišťována únosnost spoje vrstveného skla.

Práce je rozdělena do dvou částí:

- Experimentální analýza
- Numerická analýza

První část se zabývá provedením experimentů na vzorcích laminovaného skla se skrytým kotevním bodem. Na rozdíl od předchozích zkoušek, kde byl spoj zatěžovaný tahem a byla tedy zjišťována tahová únosnost, byl v tomto případě spoj zatěžován smykem s excentricitou. V průběhu zkoušek byla zaznamenávána deformace předem určených bodů vzorků v závislosti na velikosti zatížení, a to až do porušení. Zároveň byly zapisovány i všechny pozorovatelné změny, ke kterým během zatěžování došlo.

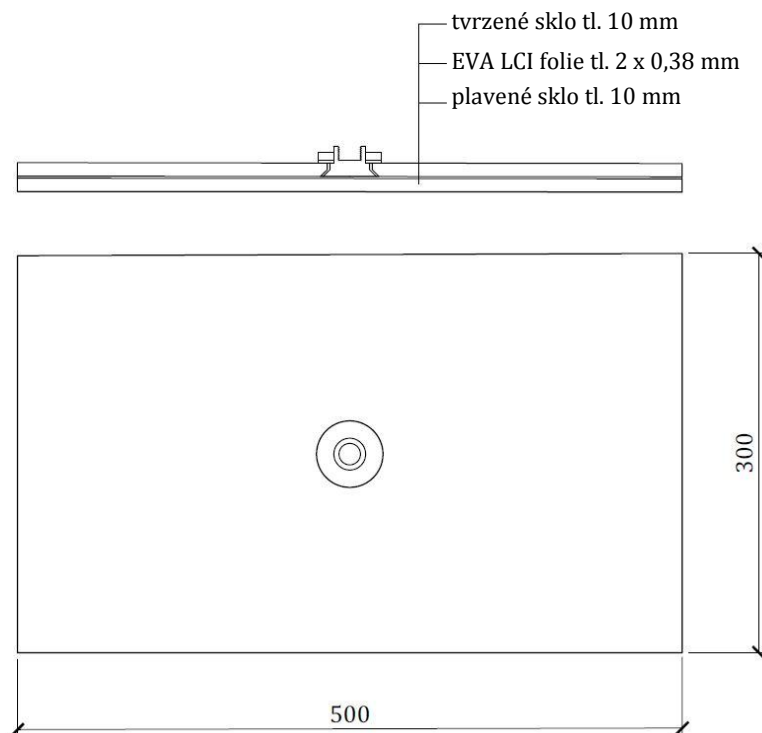
V druhé části je popsána geometrie, kontakty, síť, okrajové podmínky a zatížení numerického modelu. Správnost vytvořeného modelu byla ověřena pomocí dat získaných experimenty. Ověřený model byl v dalším kroku použit pro parametrickou studii, ve které byl zjišťován vliv excentricity smykové síly na celkovou tuhost spoje.

5. Experimentální analýza

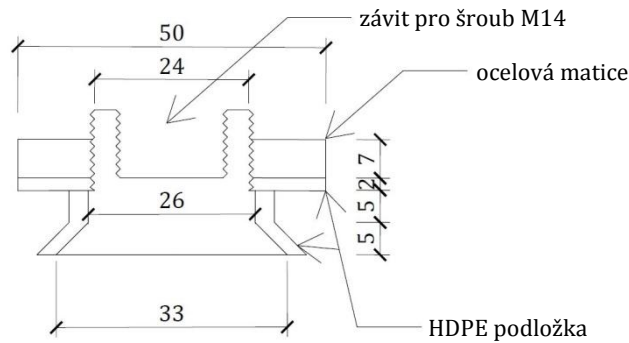
Provedené zkoušky byly zaměřeny na stanovení únosnosti tabulí z laminovaného skla se skrytým kotevním bodem namáhaných smykem s excentricitou. Zjišťována byla síla, při které dojde k vytržení kotevního bodu nebo k porušení skleněných tabulí a také síla, při které případně dojde k delaminaci.

5.1 Popis zkušebních vzorků

Celkem byla vyzkoušena 3 zkušební tělesa, která byla označena jako S1-01, S1-02 a S1-03 a stejně jako vzorky pro tahové zkoušky z roku 2018 se i tyto vzorky skládaly z 10mm plaveného skla, 2 vrstev folie EVA LCI (každá o tloušťce 0,38mm) a 10mm tvrzeného skla s otvorem uprostřed, vloženého kotevního bodu z oceli o průměru 33 mm a šroubu M14. Aby bylo zabráněno přímému kontaktu skla a oceli, byly mezi ně umístěny dvě podložky z HDPE (vysokohustotní polyethylen). Rozměry všech vzorků byly 300 x 500 mm (viz obrázky 41 a 42).



Obr. 41 Schéma zkušebního vzorku



Obr. 42 Detail kotevního bodu

Všechny vzorky byly před zkouškou zkontrolovány, aby byly zjištěny a popsány případné výrobní vady.

a) Vzorek S1-01

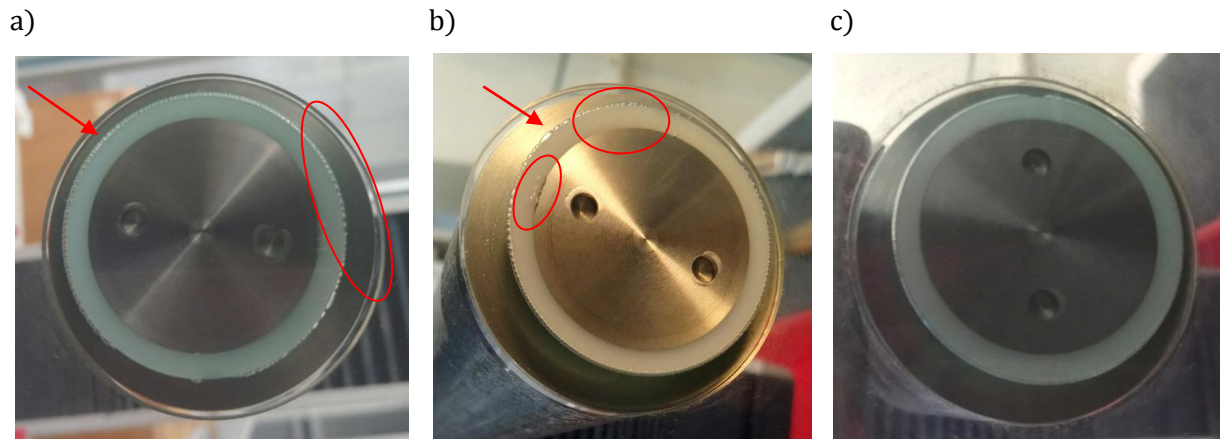
U vzorku S1-01 byly viditelné malé bublinky téměř podél celého obvodu HDPE podložky a také několik bublinek na rozhraní podložky a ocelového bodu (viz obrázek 43a).

b) Vzorek S1-02

U vzorku S1-02 byly stejně jako u prvního vzorku viditelné bublinky po téměř celém obvodu podložky a několik bublinek na rozhraní ocelového bodu a podložky (viz obrázek 43b).

c) Vzorek S1-03

Na třetím vzorku nebyly žádné viditelné vady (viz obrázek 43c).



Obr. 43 Výrobní vady vzorku a) S1-01, b) S1-02, c) S1-03

5.2 Popis zkušebního zařízení a uspořádání zkoušek

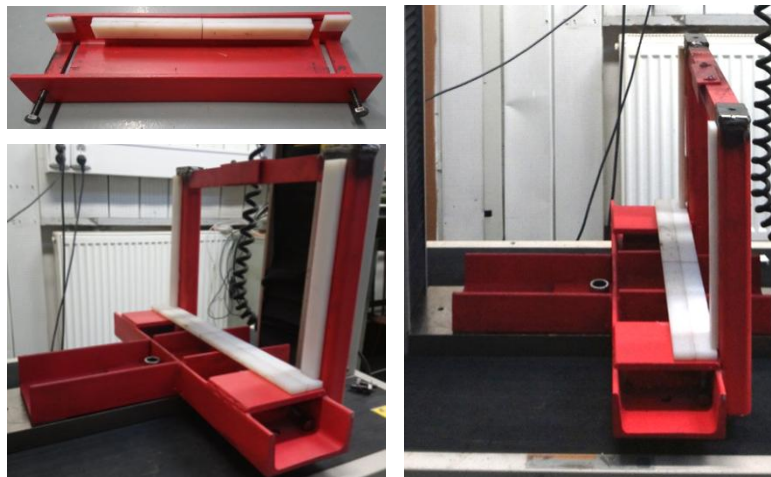
Stejně jako u tahových zkoušek bylo použito zařízení MTS QTest 100 se softwarem TestWorks 4 a se snímačem měřícím posun příčnicku.

Dva symetricky umístěné snímače měřily vodorovný posun 160 mm od okraje skleněné tabule (viz obrázek 44).



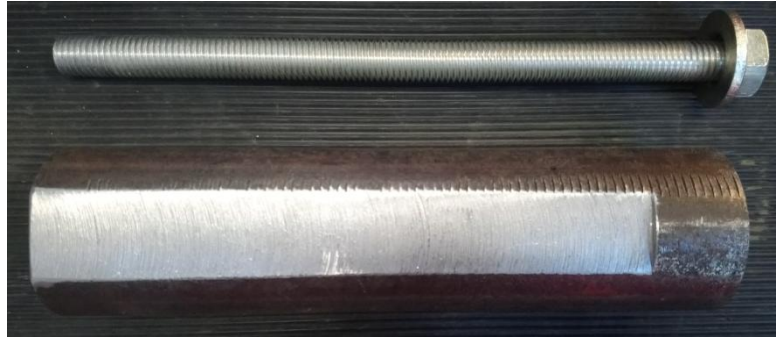
Obr. 44 Snímač

Skleněná tabule byla vertikálně upnuta do ocelového rámu s odnímatelnou vrchní částí. Svislé hrany byly po celé délce uloženy na plastových podložkách připevněných na rám (viz obrázek 45).

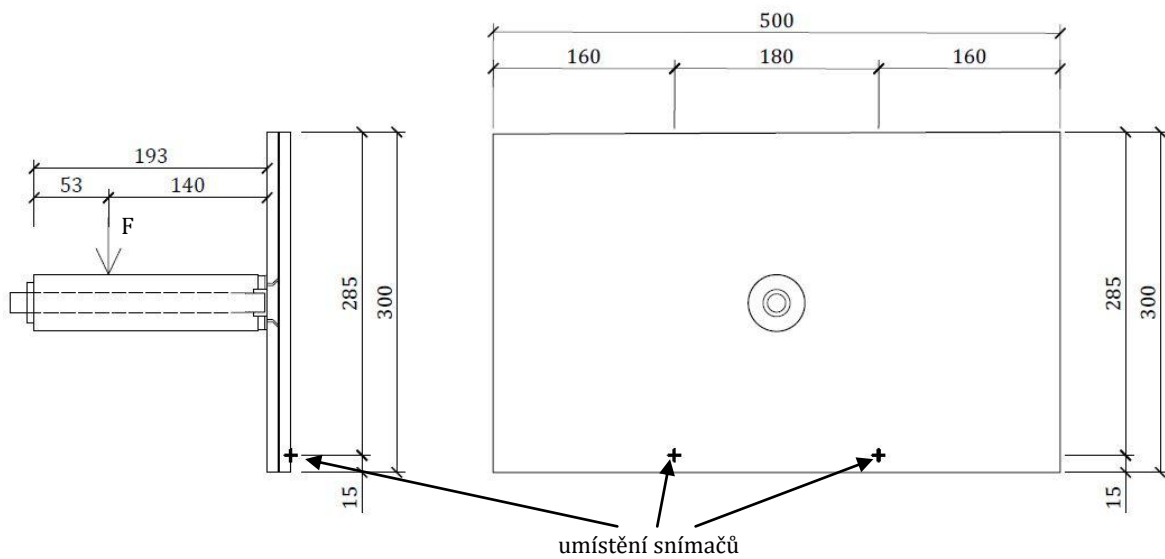


Obr. 45 Ocelový rám

Pro vytvoření zatížení odpovídajícímu smyku s excentricitou musel být vyroben speciální přípravek o délce 193 mm, průměru 50 mm a s plochou částí širokou 25 mm, který byl před každou zkouškou nasazen na šroub připevněný do kotevního bodu. Excentricita vytvořená pomocí přípravku byla 140 mm (viz obrázky 46, 47 a 48).



Obr. 46 Přípravek



Obr. 47 Schéma experimentu pro vzorky S1



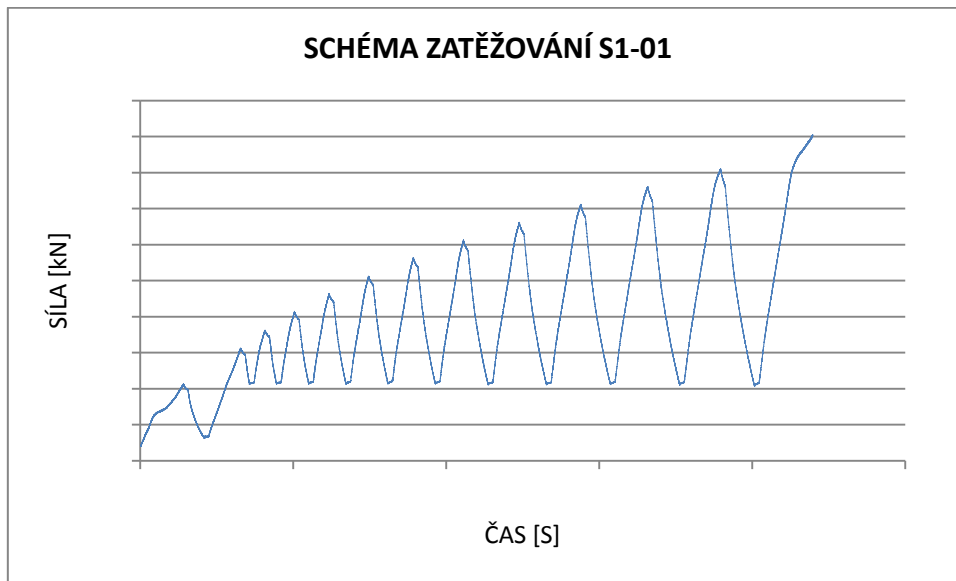
Obr. 48 Vzorek připravený ke zkoušce

5.3 Popis průběhu zkoušek

Všechny vzorky byly nejdříve zatíženy silou \quad kN, opět odtíženy a zatíženy na \quad kN. Poté se postupně přitěžovalo o \quad kN a odtěžovalo zpět na \quad kN. Síla byla vždy \quad minutu držena na konstantní hodnotě. Tento postup probíhal až do \quad kN, kdy byl vzorek naposledy odtížen a poté zatěžován až do porušení.

a) Vzorek S1-01

První vzorek byl zatěžován výše popsaným způsobem rychlostí \quad mm/min. Zkouška probíhala při teplotě 21,3°C. Závislost síly na čase je znázorněna v grafu 5.



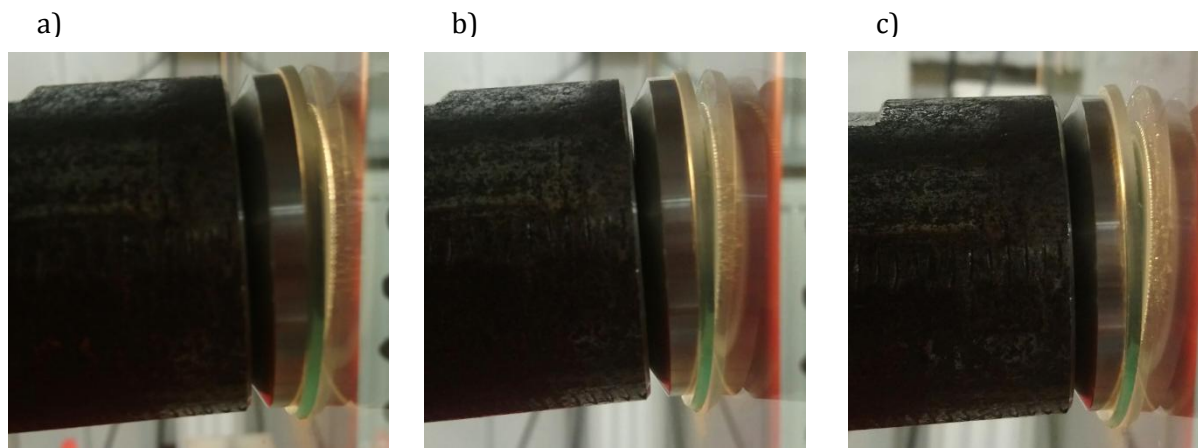
Graf 5 Schéma zatěžování vzorku S1-01

Již na začátku prvního zatěžovacího cyklu na hodnotu kN se v horní části plochy kotevního bodu začaly objevovat první bublinky. Během zatěžování jejich počet rostl a při dosažení kN už pokrývaly přibližně 75% plochy a začaly se slévat do sebe. Na obrázku 49 je patrný jasný předěl mezi taženou a tlačnou částí. Bublinky se objevily pouze v tažené oblasti, v oblasti tlačené nebyly zjištěny.



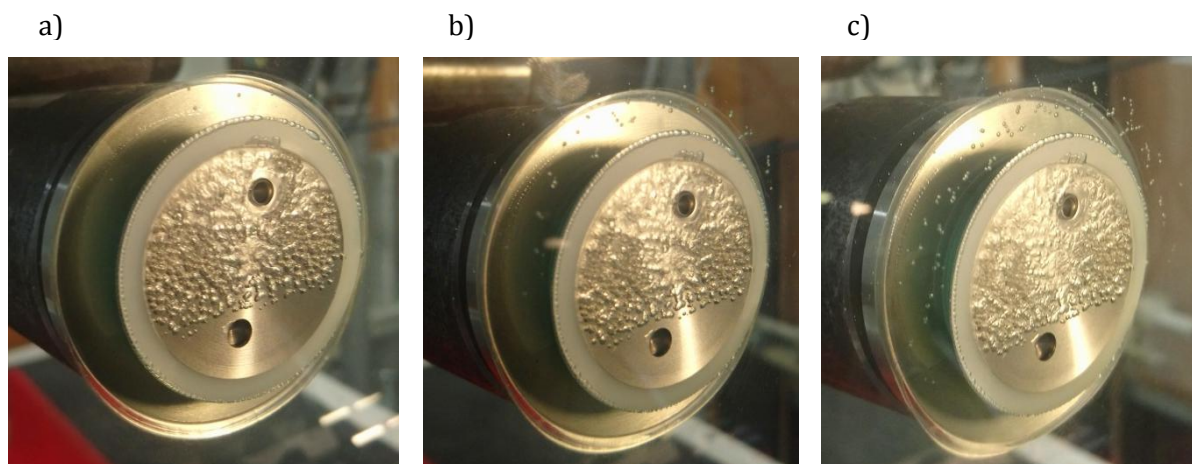
Obr. 49 Stav vzorku S1-01 při zatěžování na kN

Při zatěžování na \quad kN se začala ve spodní části vzorku deformovat HDPE podložka a v horní části začala vznikat mezera mezi kotevním bodem a sklem, která se při dalším zatěžování zvětšovala (viz obrázek 50).



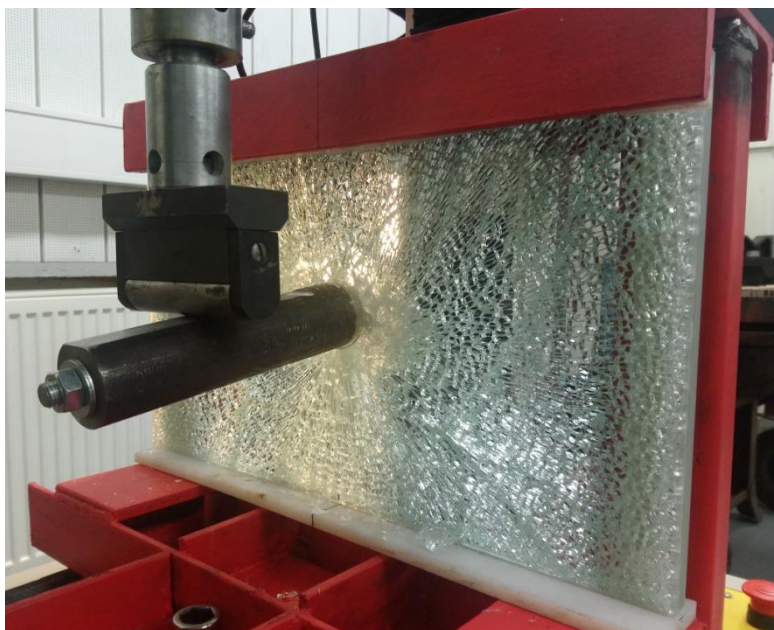
Obr. 50 Stav HDPE podložky vzorku S1-01 při zatížení **a)** \quad kN **b)** \quad kN **c)** \quad kN

Při zatížení \quad kN se objevilo několik bublinek mimo plochu kotevního bodu. Jejich počet se zatížením rostl, až obklopily kotevní bod do úrovně předělu mezi taženou a tlačnou částí kotevního bodu (viz obrázek 51).



Obr. 51 Stav vzorku S1-01 při zatížení **a)** \quad kN **b)** \quad kN **c)** \quad kN

K porušení vzorku došlo náhle při zatížení \quad kN. Nejdříve se vytvořila prasklina tvaru pavučiny na plaveném skle a vzápětí prasklo i tvrzené sklo, ve kterém byl vyvrtán otvor pro kotevní bod. Na obrázku 52 je znázorněno celé porušené zkušební těleso umístěné v rámu, na obrázku 53 lze vidět detail porušení plaveného skla a na obrázku 54 detail porušení tvrzeného skla s kotevním bodem.



Obr. 52 Vzorek S1-01 po porušení

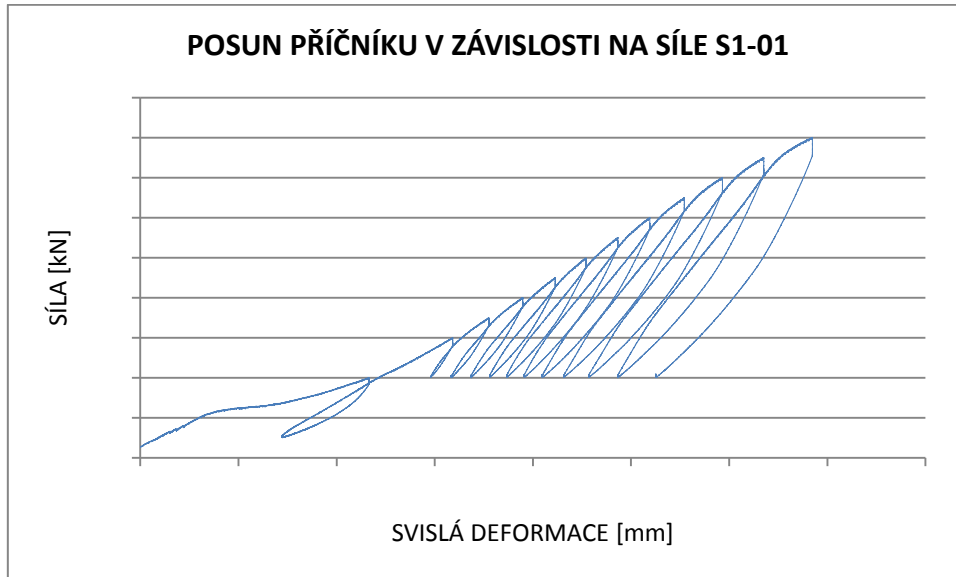


Obr. 53 Detail plaveného skla vzorku S1-01 po porušení

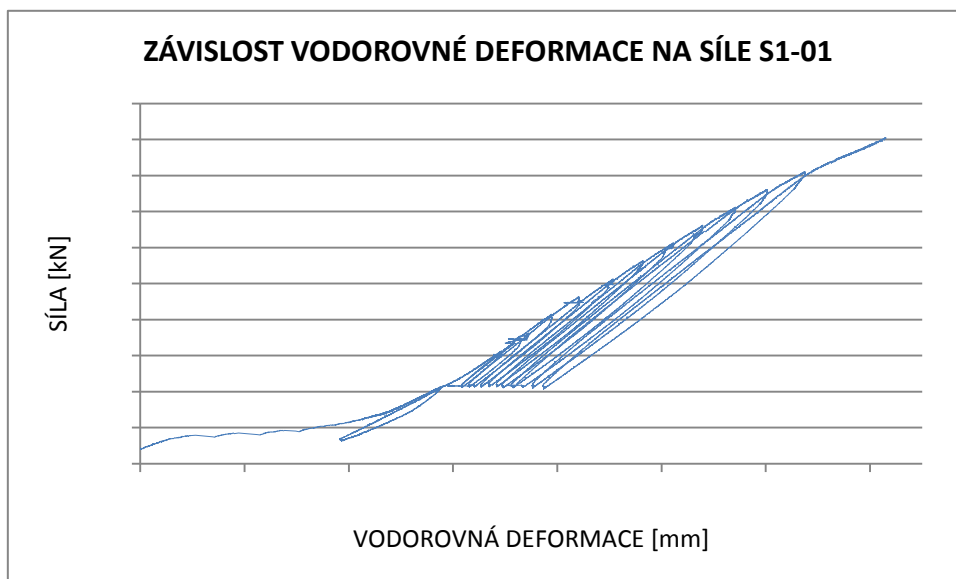


Obr. 54 Detail tvrzeného skla vzorku S1-01 po porušení

Během zkoušky byl zaznamenáván svislý posun příčnicku až do posledního odtížení ze kN na kN (viz graf 6). Vodorovný posun skleněné tabule měřený externími snímači byl zaznamenáván až do porušení. Hodnoty získané snímači byly zprůměrovány a vyneseny do grafu v závislosti na působící síle (viz graf 7).



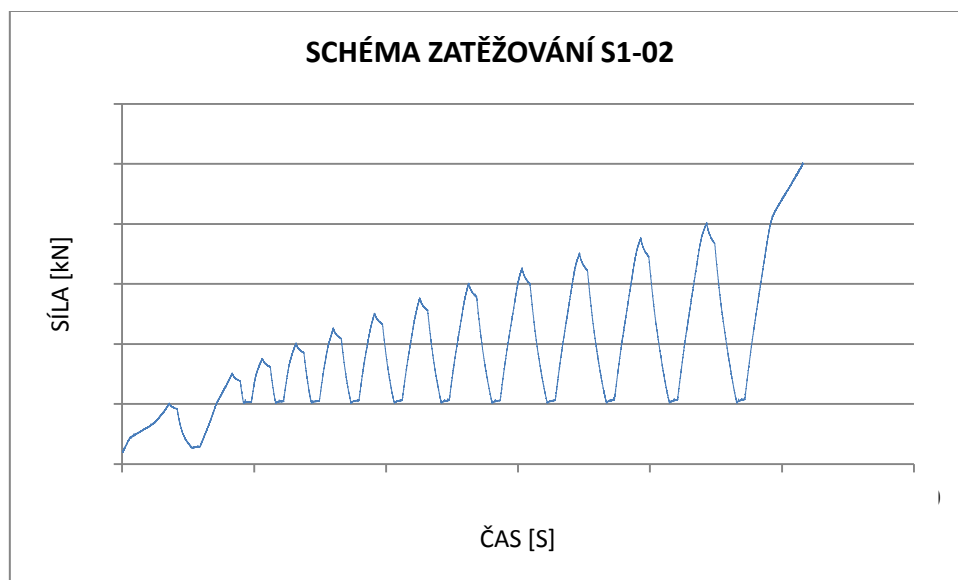
Graf 6 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-01



Graf 7 Vodorovná deformace v závislosti na síle pro vzorek S1-01

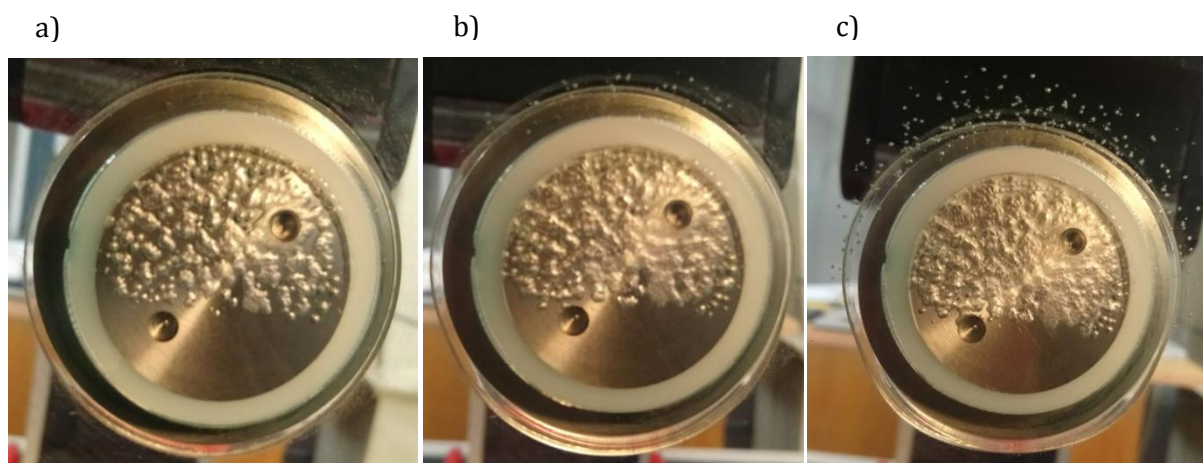
b) Vzorek S1-02

Druhý vzorek byl zatěžován stejným způsobem jako vzorek S1-01, Zatěžování probíhalo po krocích s prodlevou min při dosažení předepsané síly a při odtížení (viz graf 8). Rychlost zatěžování byla mm/min. Zkouška probíhala při teplotě 22°C.



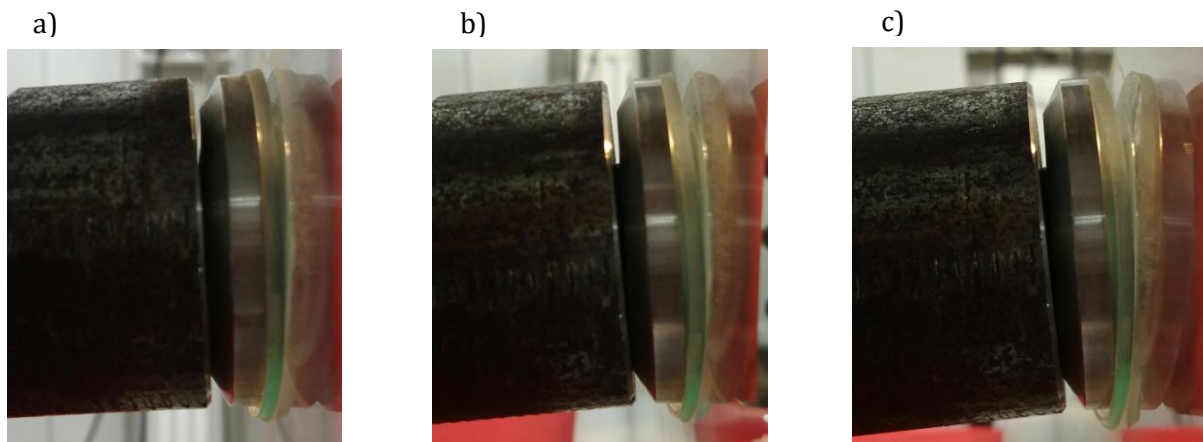
Graf 8 Schéma zatěžování pro vzorek S1-02

Stejně jako v předchozím případě se hned od začátku zatěžování začaly v ploše kotevního bodu vytvářet bublinky. Jejich počet se zatížením rostl a postupně se začaly slévat. Při síle kN se začaly objevovat bublinky i nad plochou ocelového bodu. Ty se dále šířily, až se při síle kN dostaly přibližně do stejné úrovně jako bublinky uvnitř terče. Opět se vytvořilo viditelné rozhraní mezi taženou a tlačnou částí terče (viz obrázek 55).



Obr. 55 Stav vzorku S1-02 při zatížení **a)** kN **b)** kN **c)** kN

Také došlo k zvětšující se deformaci HDPE podložky v dolní části vzorku a vzniku a rozšíření mezery mezi sklem a kotevním bodem v horní části (viz obrázek 56).



Obr. 56 Stav HDPE podložky vzorku S1-02 při zatížení a) kN b) kN c) kN

K porušení vzorku došlo náhle při zatížení kN. Prasklo pouze tvrzené sklo s otvorem pro kotevní bod, tabule z plaveného skla zůstala neporušená. Po odtížení se kotevní bod spolu s přípravkem vylomil vlastní tíhou.

Na obrázku 57 je znázorněn detail porušeného vzorku před vytržením kotevního bodu, dále lze na obrázku 58 vidět celý vzorek po vyjmutí z rámu a na obrázku 59 zdeformovaný kotevní bod.



Obr. 57 Detail porušeného vzorku S1-02

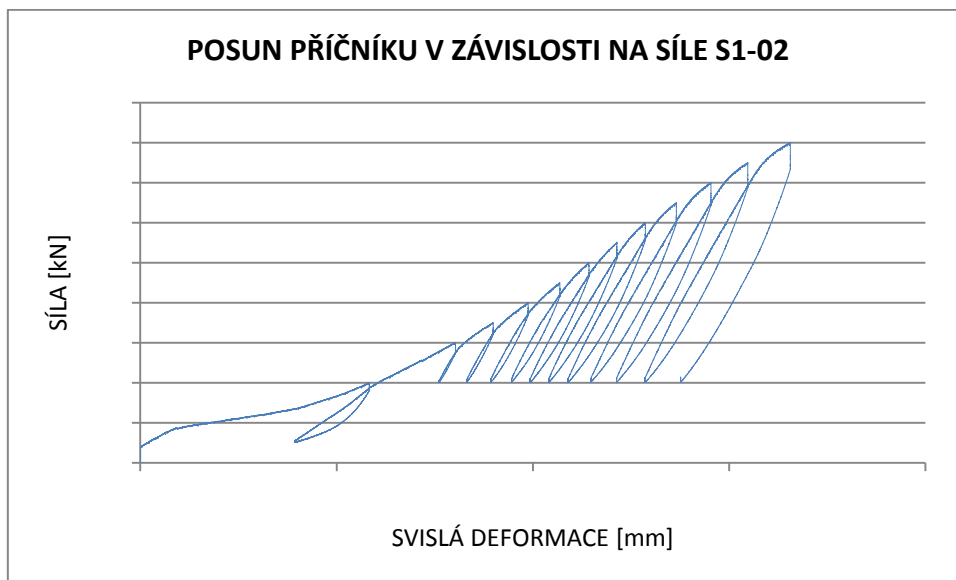


Obr. 58 Vzorek S1-02 po porušení

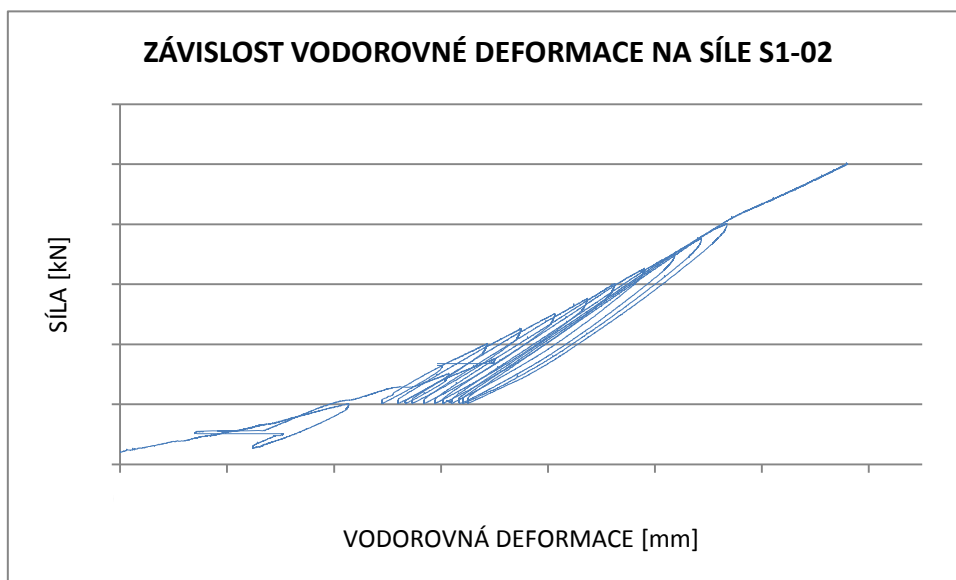


Obr. 59 Detail zdeformovaného kotevního bodu vzorku S1-02

Stejně jako u předchozí zkoušky byl zaznamenáván svislý posun příčnicku až do posledního odtížení ze kN na kN (viz graf 9). Vodorovný posun skleněné tabule měřený externími snímači byl zaznamenáván až do porušení. Hodnoty získané snímači byly zprůměrovány a vyneseny do grafu v závislosti na působící síle (viz graf 10).



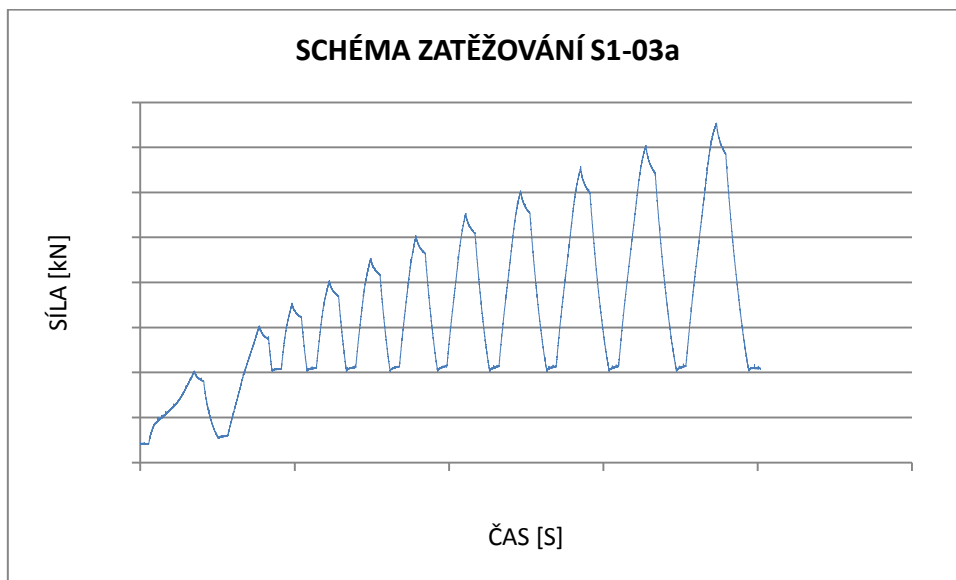
Graf 9 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-02



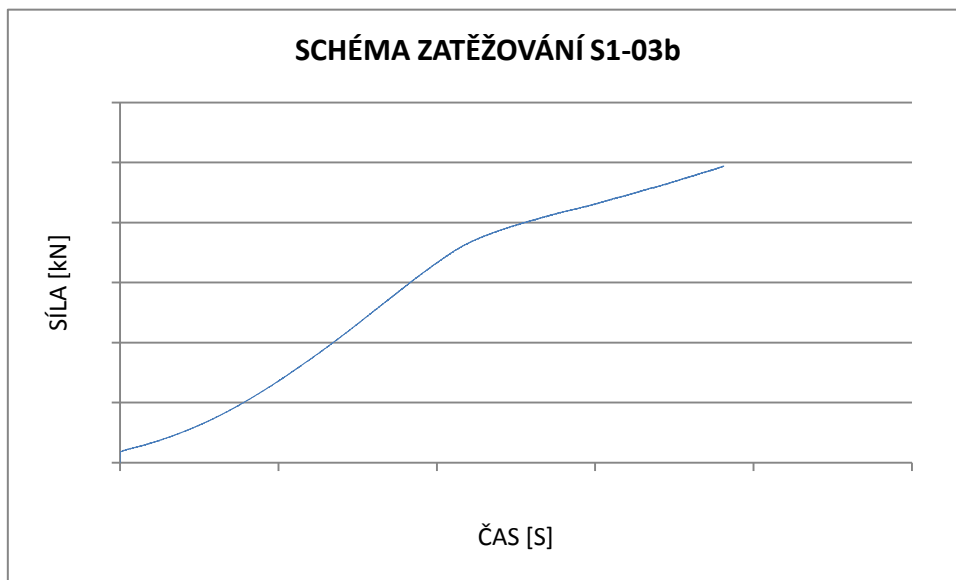
Graf 10 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-02

c) Vzorek S1-03

Třetí vzorek byl zatěžován při teplotě 22°C, rychlostí mm/min stejným postupem jako předchozí dva vzorky. Nicméně při čekání na síle kN po odtížení z kN došlo k nečekané chybě softwaru a zkouška byla přerušena (viz graf 11). Vzorek byl poté odtížen a znovu zatěžován kontinuálně až do porušení (viz graf 12).

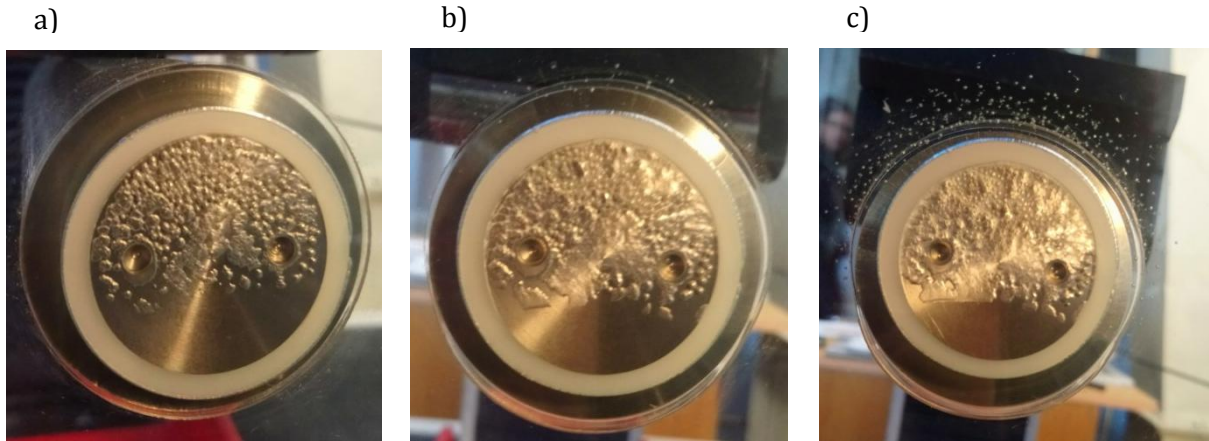


Graf 11 Schéma zatěžování vzorku S1-03a



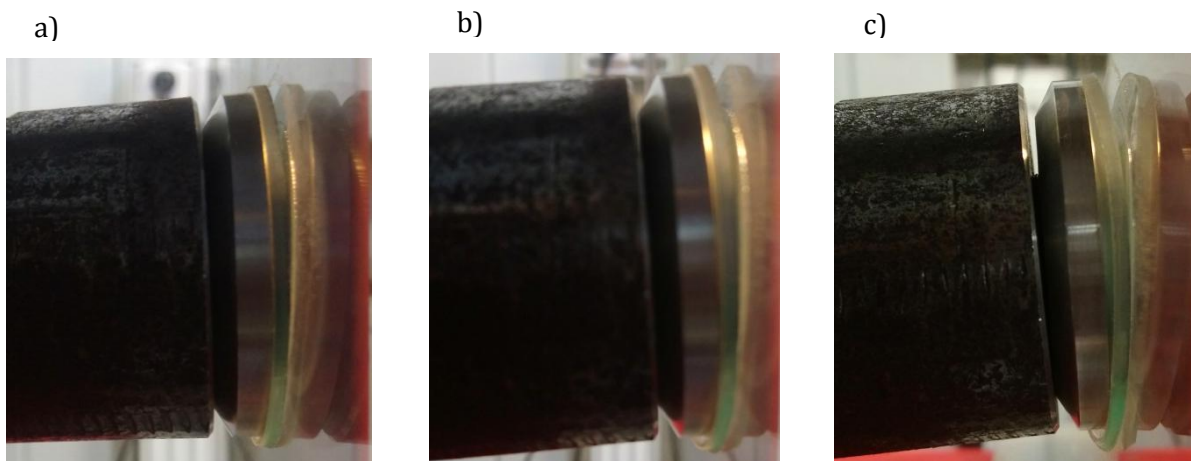
Graf 12 Schéma zatěžování vzorku S1-03b

I u třetího vzorku se v horní tažené části kotevního bodu začaly tvořit bublinky hned po začátku zatěžování. Bublinky postupně přibývaly a začaly se slévat ještě před dosažením hodnoty zatížení kN. Při síle kN se objevily první bublinky v ploše nad terčem a při síle kN již dosahovaly úrovně bublinek uvnitř terče (viz obrázek 60).



Obr. 60 Stav vzorku S1-03 při zatížení **a)** 0 kN **b)** 10 kN **c)** 20 kN

Také došlo k deformaci HDPE podložky a vzniku mezery mezi sklem a kotevním bodem (viz obrázek 61). Pohled shora na mezeru vzniklou mezi sklem a podložkou lze vidět na obrázku 62.

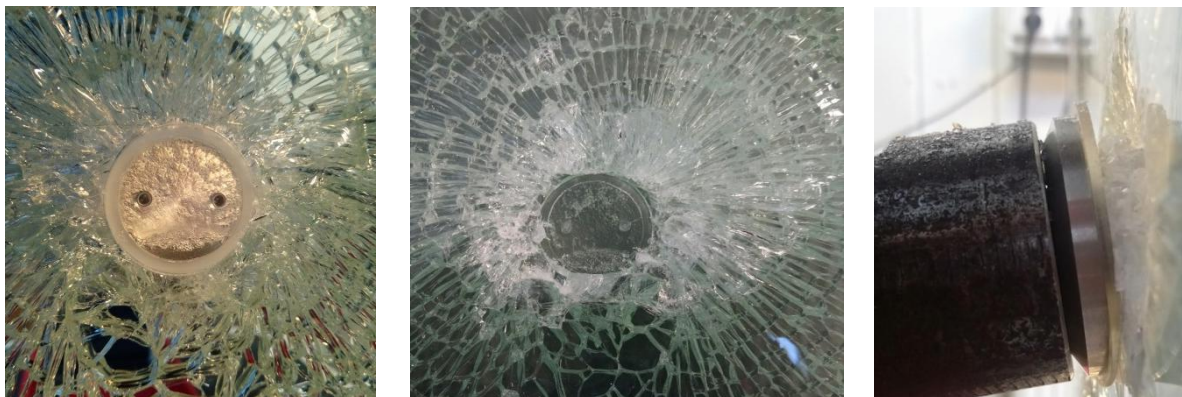


Obr. 61 Stav HDPE podložky vzorku S1-03 při zatížení **a)** 0 kN **b)** 10 kN **c)** 20 kN

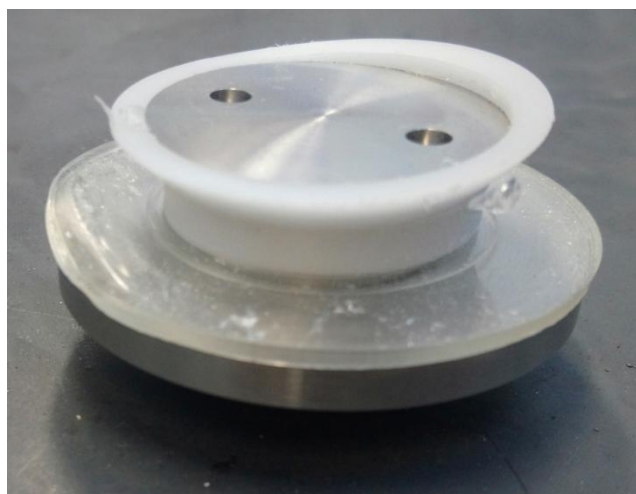


Obr. 62 Pohled shora na vzorek S1-03 při zatížení 20 kN

Při zatížení 10 kN došlo k náhlému porušení tabule z tvrzeného skla. Tabule z plaveného skla zůstala neporušena. Po odtížení došlo k vylomení terče s přípravkem vlastní tíhou. Detaily porušeného vzorku jsou znázorněny na obrázku 63. Na obrázku 64 lze vidět deformaci HDPE podložek vyplývající ze vzniku tažené a tlačené oblasti.

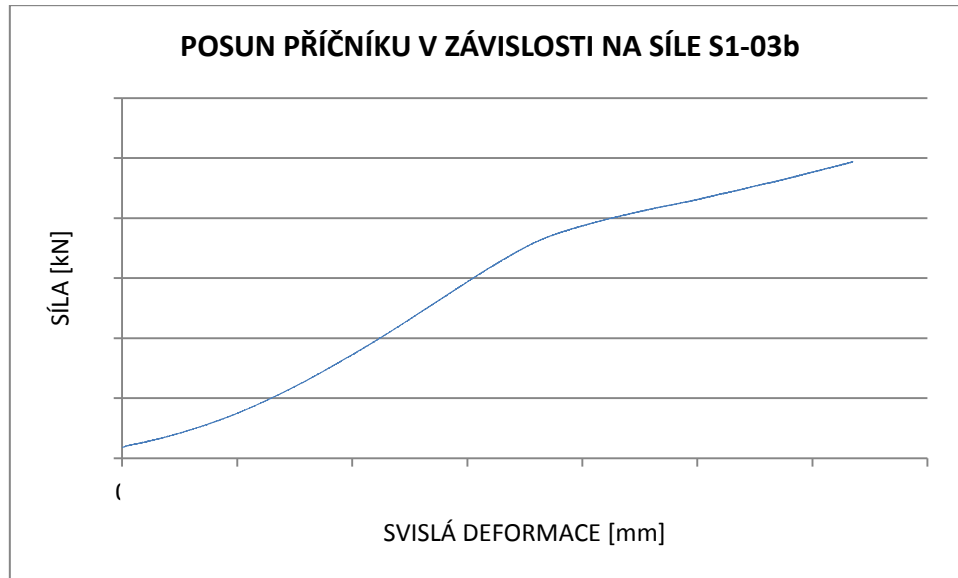


Obr. 63 Detaily vzorku S1-03 po porušení

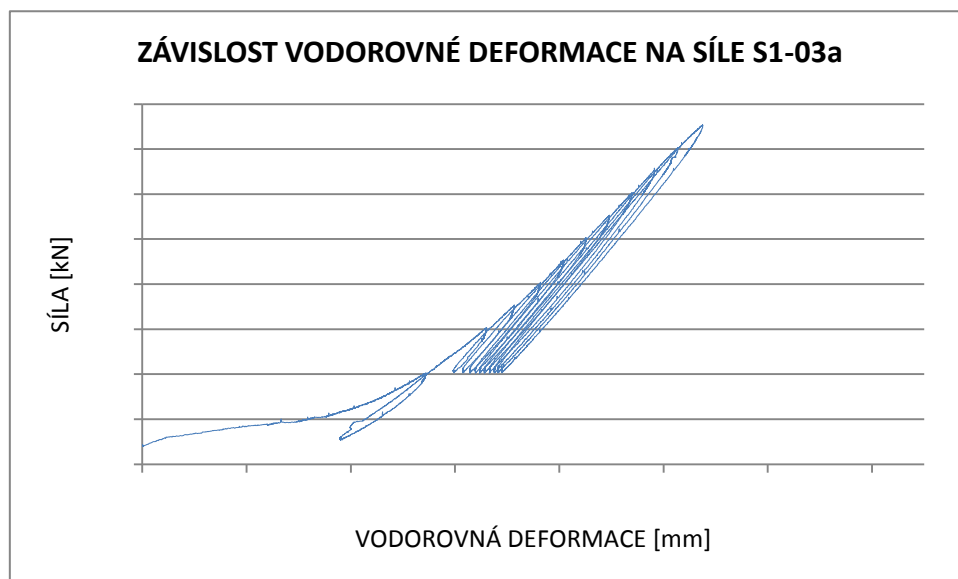


Obr. 64 Detail zdeformovaného kotevního bodu vzorku S1-02

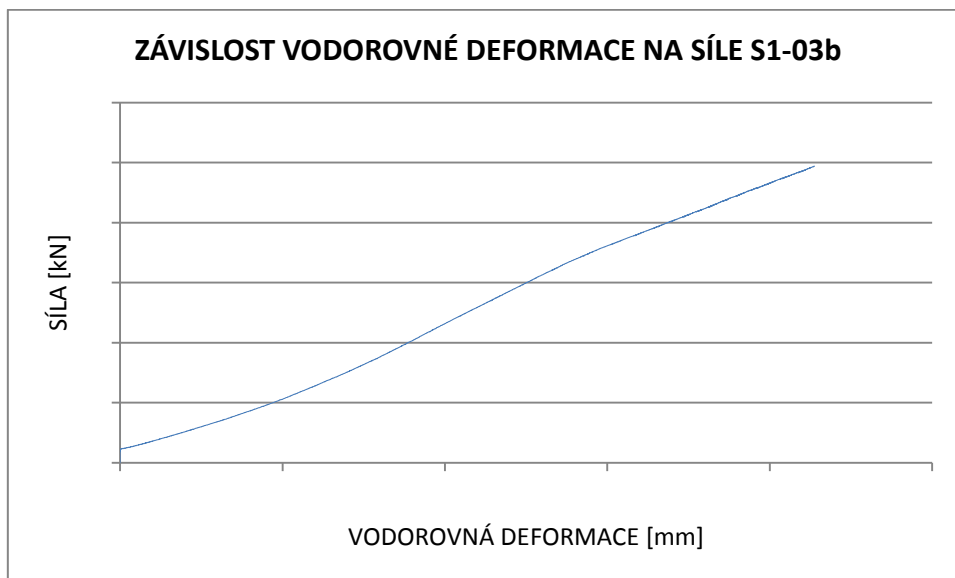
V tomto případě byl zaznamenán posun příčnicku pouze pro zatěžování odpovídající schématu S1-03b (viz graf 13). Vodorovný posun byl zaznamenán v obou případech (viz grafy 14 a 15).



Graf 13 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-03



Graf 14 Posun příčnicku v závislosti na síle pro vzorek S1-03, zatěžovací schéma a



Graf 15 Vodorovná deformace v závislosti na síle pro vzorek S1-03, zatěžovací schéma b

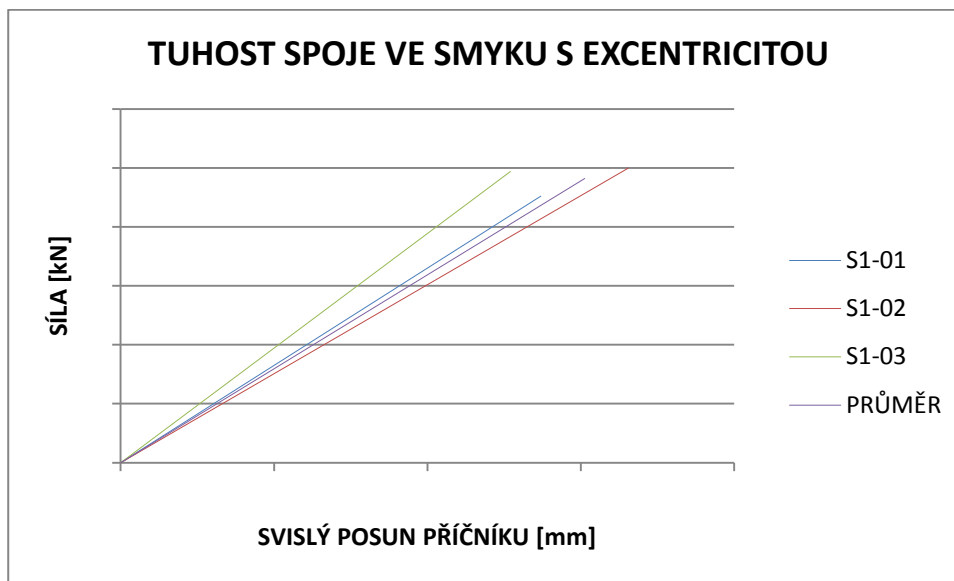
5.4 Vyhodnocení zkoušek

Ze získaných dat bylo určeno průměrné zatížení, při kterém došlo k porušení zkušebních vzorků, průměrná vodorovná deformace a průměrný posun příčnicku při síle kN a totéž při porušení. Protože není zřejmé, jaký byl svislý posun příčnicku vzorku S1-03 v okamžik přerušení zkoušky, nejsou naměřené hodnoty uvažovány (viz tabulka 2).

Pro následné využití v numerické analýze byla ze zatěžovacích větví závislosti síly na svislém posunu příčnicku určena průměrná hodnota tuhosti spoje pro tento typ zatížení. Grafické porovnání výsledků pro jednotlivé vzorky lze vidět v grafu 16.

Tabulka 2: Výsledky zkoušky pro vzorky S1

Vzorek	Síla při porušení	Vodorovná deformace		Svislý posun příčnicku		Průměrné $F_i/u_{i,příčnick}$
		kN	při porušení	kN	při porušení	
-	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN/mm]
S1-01						
S1-02						
S1-03						
Průměr						



Graf 16 Porovnání tuhostí spoje ve smyku s excentricitou

Průměrná hodnota únosnosti laminovaného spoje se skrytou kotevní hlavou při zatížení smykem s excentricitou odpovídá kN. Protože byla pro stanovení této hodnoty použita data pouze ze tří zkoušek, bylo by vhodné po zpřesnění výsledku experimenty zopakovat na větším počtu vzorků.

5.5 Porovnání tahových zkoušek a zkoušek na smyk s excentricitou

Jelikož byl pro tento typ zkoušek použit vzorek stejných vlastností jako pro tahové zkoušky, je možné porovnat chování vzorků při zatížení tahem a při zatížení smykem s excentricitou.

Z výsledků je na první pohled zřejmé, že spoj odolává mnohem lépe zatížení tahem, než smykem s excentricitou. Zatímco u vzorků S1 se bublinky začaly tvořit téměř ihned, u vzorků T1 byly zpozorovány až při zatížení kN a bublinky mimo plochu terče se objevily dokonce pouze u jednoho ze vzorků z této řady (viz tabulka 3). Porušení bylo u obou typů zkoušek náhlé, bez jakýchkoli předchozích známek blížícího se kolapsu.

Tento rozdíl v únosnosti lze vysvětlit nepoměrem plochy spoje, která je při zatěžování namáhaná tahem. Při namáhání pouze tahem, jako tomu bylo u vzorků T1, je pro přenos sil využita celá plocha spoje. V případě zatížení smykem s excentricitou je do oblasti spoje vnášen moment, který způsobuje vznik jak tažené, tak i tlačené oblasti. Pro přenos tahového zatížení je tedy využita pouze část (cca 75%) plochy kotevního bodu, což způsobuje nižší únosnost spoje.

Tabulka 3: Porovnání výsledků zkoušek vzorků T1 a S1

Pořadí vzorku	První bublinky v ploše kotevního bodu		První bublinky mimo plochu kotevního bodu		Porušení vzorku	
	síla [kN]		síla [kN]		síla [kN]	
	T	S	T	S	T	S
1-01						
1-02						
1-03						
Průměr						

6. Numerická analýza

Dalším krokem bylo vytvoření výpočetního modelu s využitím metody konečných prvků a jeho následné ověření pomocí skutečných výsledků získaných z experimentů.

Pro tvorbu 3D numerického modelu zkušební vzorku byl použit program ANSYS Workbench 18.0. Cílem bylo vytvořit numerický model, který bude využitelný pro následnou parametrickou studii. Nejdříve byl vytvořen model odpovídající uspořádání a výsledkům tahových zkoušek. Tento model byl pak dále upraven tak, aby odpovídal experimentům, které se zabývaly smykem s excentricitou. Ověření modelu bylo provedeno jak pro tahové, tak i smykové zkoušky.

6.1 Numerický model pro zatížení tahem

6.1.1 Materiálové vlastnosti

Uvažované materiálové vlastnosti skla, fólie EVA, oceli a HDPE, které byly zavedeny do numerického modelu, jsou shrnuty v tabulce 4, tabulce 5, tabulce 6 a tabulce 7.

Tabulka 4: Materiálové vlastnosti skla

SKLO			
Objemová hmotnost	ρ	2500	[kg/m ³]
Youngův modul pružnosti	E	60000	[MPa]
Poissonovo číslo	μ	0,23	[-]
Modul pružnosti ve smyku	G	24400	[MPa]
Pevnost v tahu plaveného skla	f_t	40	[MPa]
Pevnost v tahu tvrzeného skla	f_t	100	[MPa]

Tabulka 5: Materiálové vlastnosti EVA fólie

FOLIE			
Youngův modul pružnosti	E	85	[MPa]
Poissonovo číslo	μ	0,42	[-]
Modul pružnosti ve smyku	G	30	[MPa]
Pevnost v tahu	f_t	34,5	[MPa]

Tabulka 6: Materiálové vlastnosti oceli

NEREZOVÁ OCEL			
Objemová hmotnost	ρ	7750	[kg/m ³]
Youngův modul pružnosti	E	193000	[MPa]
Poissonovo číslo	μ	0,31	[-]
Modul pružnosti ve smyku	G	73664	[MPa]

Tabulka 7: Materiálové vlastnosti HDPE

HDPE			
Objemová hmotnost	ρ	950	[kg/m ³]
Youngův modul pružnosti	E	1100	[MPa]
Poissonovo číslo	μ	0,42	[-]
Modul pružnosti ve smyku	G	387	[MPa]

Kvůli modelování odtržení kotevního bodu od folie musel být vytvořen fiktivní materiál, který při použití v lepeném kontaktu představuje oblast s možností delaminace.

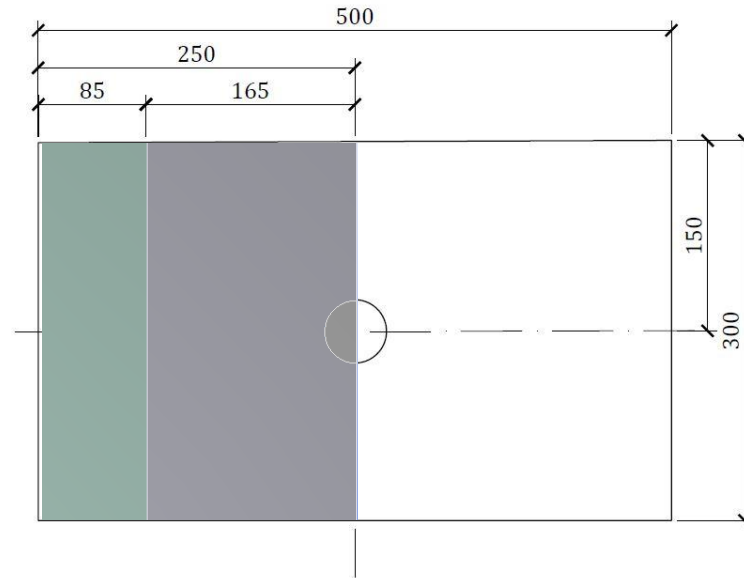
Protože během experimentu nebyly zpozorovány známky delaminace až do momentu, kdy došlo k náhlému porušení skleněné tabule a vytržení kotevního bodu, bylo jako maximální normálové napětí v kontaktu uvažováno napětí MPa odpovídající síle kN, což je průměrná hodnota, při které došlo k porušení zkušebních těles namáhaných tahem. Materiálové vlastnosti materiálu pro delaminaci terče jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Materiálové vlastnosti materiálu pro delaminaci

MATERIÁL PRO DELAMINACI			
Maximální normálové napětí v kontaktu	σ		[MPa]
Mezera mezi prvky kontaktu při kompletním oddělení	δ		[mm]

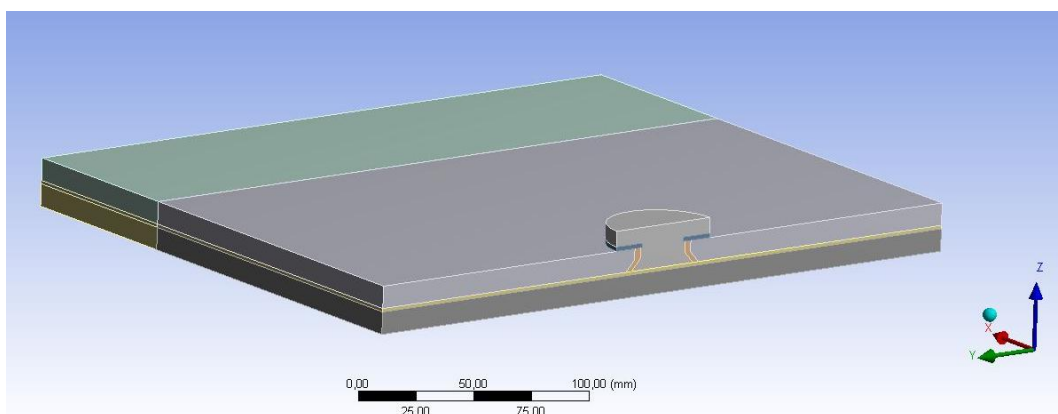
6.1.2 Geometrie

Díky symetrii zkoušeného prvku a zatížení bylo možné modelovat pouze polovinu tělesa s odpovídajícími okrajovými podmínkami (viz obrázek 65).



Obr. 65 Půdorysné schéma modelu

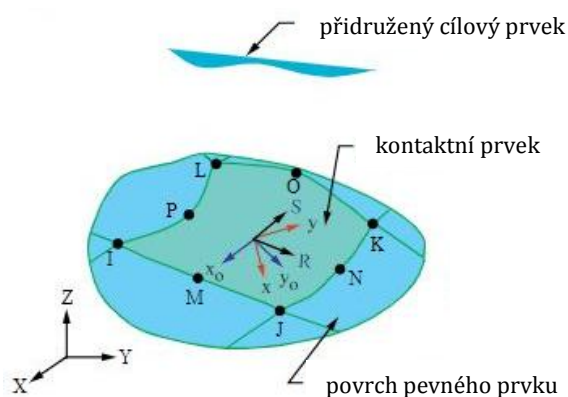
Model se stejně jako reálný vzorek skládá ze šesti částí (dvou skleněných tabulí, folie, ocelového kotevního bodu a dvou HDPE podložek) vzájemně propojených kontakty. Kotevní bod byl vymodelován jako plný prvek bez vnitřního závitu, protože je při umístění do konstrukce vyplněn šroubem (viz obrázek 66).



Obr. 66 Geometrie modelu

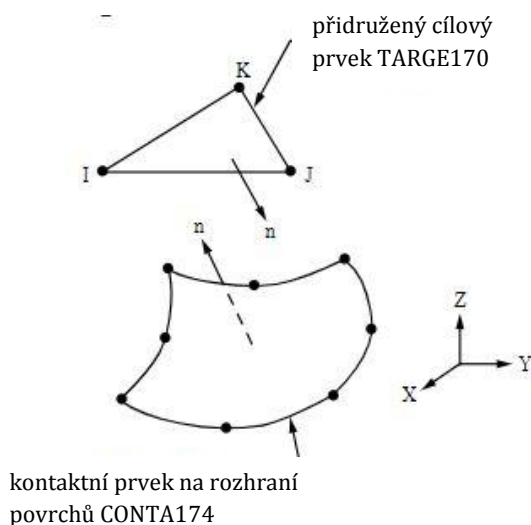
6.1.3 Kontakty a síť

Jednotlivé prvky modelu byly mezi sebou spojeny pomocí kontaktů. Lepené kontakty byly vloženy mezi skla a folii a mezi ocelový terč a folii. Spojení mezi ocelovým terčem a HDPE podložkami bylo vytvořeno pomocí *no separation* kontaktu. Pro oba typy byl použit prvek CONTA174 (viz obrázek 67), který je vhodný pro spojení a znázornění vzájemného posunu povrchů 3D prvků. V případě použití s lepeným kontaktem umožňuje oddělení (delaminaci) na rozhraní prvků. Nakonec byla s použitím materiálu pro delaminaci na rozhraní folie a kotevního bodu zadána možnost jejich vzájemného oddělení.



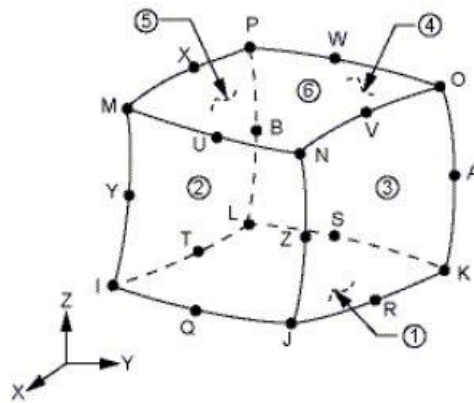
Obr. 67 CONTA174 [11]

S vytvořením kontaktu pomocí prvku CONTA174 souvisí prvek TARGE170, který překryje pevné prvky (v tomto případě SOLID186, viz níže) na rozhraní a představuje tak cílový povrch pro prvek CONTA174 (viz obrázek 68). [11]

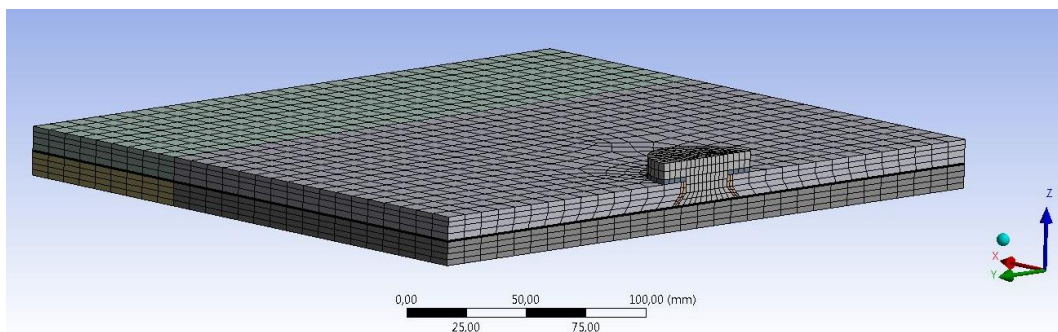


Obr. 68 TARGE170 [11]

Pro vytvoření sítě byly pro všechny části vzorku použity 3D prvky SOLID186. SOLID186 je pevný prvek vyššího řádu s dvaceti uzly a třemi stupni volnosti v každém uzlu (posuny ve směru x, y, z), viz obrázek 69. Jelikož se jedná o kvadratický prvek, rozložení hodnot posunů na prvku je popsáno kvadratickou funkcí. Výhodou kvadratických prvků je, že i při použití hrubší sítě vystihují lokální koncentrace napětí lépe, než prvky lineární. [11] Hustota sítě byla tedy s ohledem na rychlost výpočtu zvolena jako *střední (medium)* a zpřesněna byla pouze v okolí otvoru pro kotevní bod v tvrzeném skle, kde byl předpokládán vznik koncentrace napětí. Výsledná síť je znázorněna na obrázku 70.



Obr. 69 SOLID186 [11]



Obr. 70 Síť

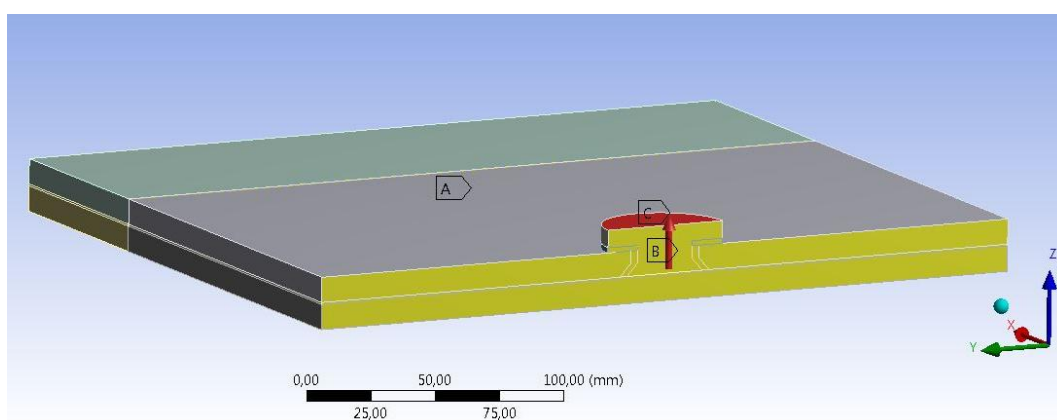
6.1.4 Podepření a zatížení

Vzhledem k tomu, že byla pro model použita pouze polovina zkušební vzorku, byly použity následující okrajové podmínky:

- okrajová podmínka A umožňující posun ve směru osy x a pootočení kolem osy y,
- okrajová podmínka B umožňující posun ve směru osy z.

Obě okrajové podmínky byly aplikovány na celou plochu řezu.

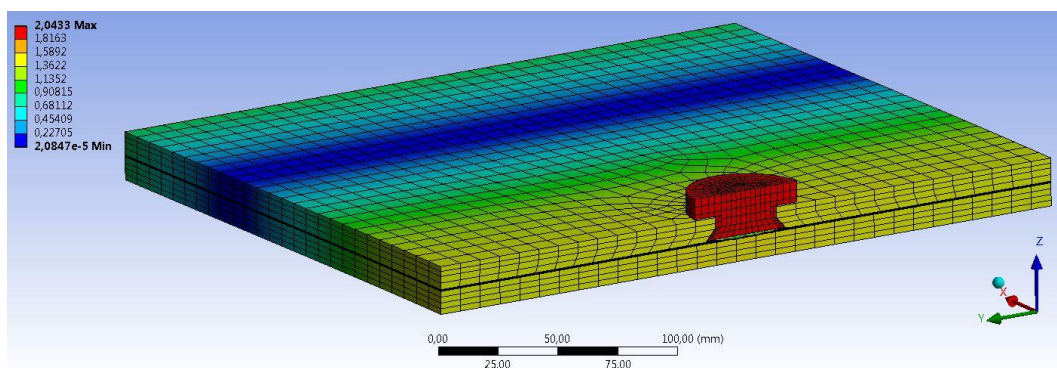
Síla, kterou byl numerický model zatěžován, byla v modelu vnesena na celou plochu kotevního bodu (v modelu označená jako C, viz obrázek 71).



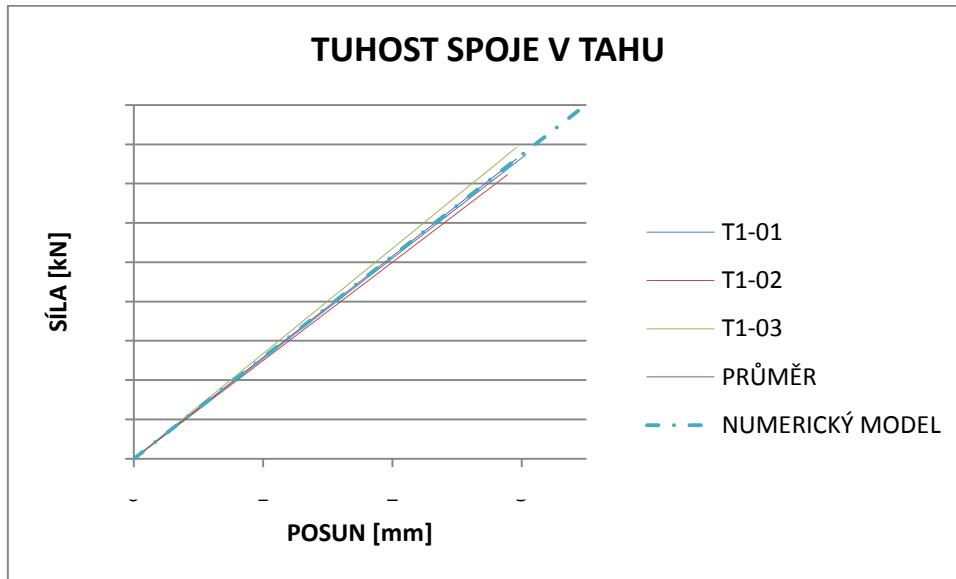
Obr. 71 Okrajové podmínky a zatížení T1

6.1.5 Vyhodnocení

Numerický model byl nejprve zatížen silou \quad kN, při které dosáhl maximální deformace v oblasti kotevního bodu \quad mm. Jeho tuhost tedy odpovídá \quad kN/mm, což je stejná hodnota jako průměrná tuhost všech tří vzorků podrobených zkoušce. Deformovaný model je znázorněn na obrázku 72 a porovnání tuhosti modelu s reálnými vzorky v grafu 17.

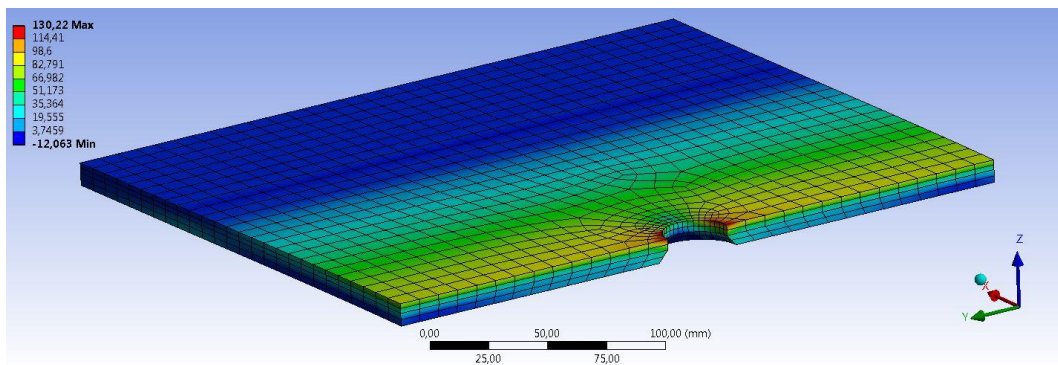


Obr. 72 Svislá deformace numerického modelu při zatížení \quad kN



Graf 17 Porovnání tuhostí numerického modelu a vzorků T1

Po ověření správnosti byl model zatížen silou \quad kN, která odpovídá průměrné hodnotě síly při porušení získané ze zkoušek. Cílem bylo zjistit maximální hodnotu tahového napětí, které vzniká v tvrzeném skle v okolí kotevního bodu. Toto napětí odpovídá hodnotě MPa (viz obrázek 73).



Obr. 73 Rozložení maximálního tahového napětí v tvrzeném skle

6.2 Numerický model pro zatížení smykem s excentricitou

Jelikož se jedná o totožné vzorky jako v předchozím případě, zůstala geometrie, kontakty i síť numerického modelu pro zatížení smykem s excentricitou beze změny.

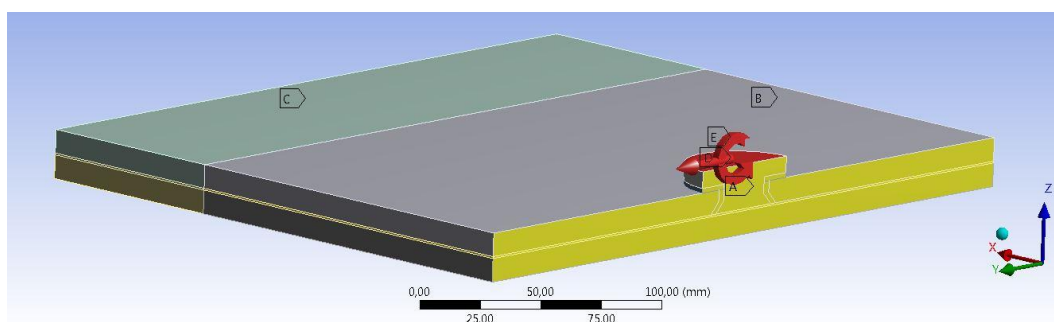
6.2.1 Podepření a zatížení

Pro modelování tohoto typu zkoušky byly použity následující okrajové podmínky:

- okrajová podmínka A umožňující posun ve směru os y a z,
- okrajová podmínka B neumožňující žádný posun,
- okrajová podmínka C umožňující posun ve směru os x a y a pootočení kolem osy y.

Všechny okrajové podmínky byly aplikovány na celou plochu řezu (viz obrázek 74).

Síla, kterou byl vzorek při reálné zkoušce zatěžován, byla pro účely numerického modelu rozložena na sílu (v modelu označena jako E) působící na plochu ocelového bodu ve směru osy y a na moment (v modelu označen jako D) definovaný jako síla na rameni 131 mm (rameno bez tloušťky vrchní části kotevního bodu a HDPE podložky, viz obrázek 49).

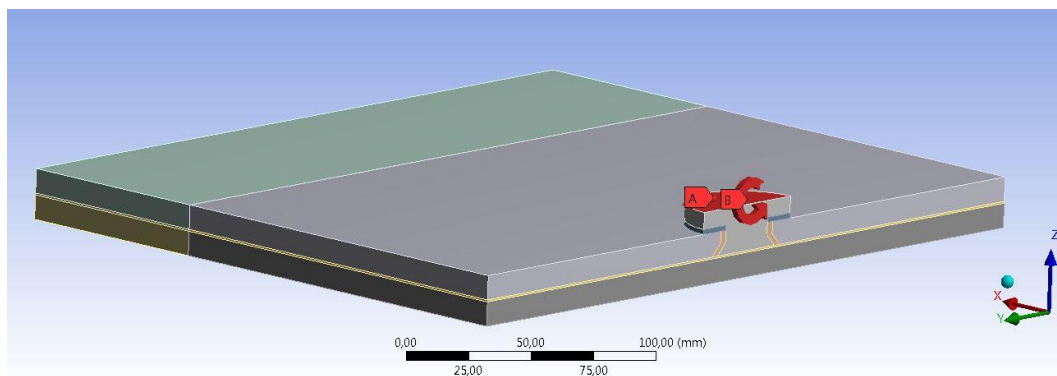


Obr. 74 Okrajové podmínky a zatížení S1

Protože při modelování nebyl uvažován ocelový přípravek, bylo působící zatížení zvětšeno o účinky způsobené vlastní tíhou přípravku (viz tabulka 9 a obrázek 75).

Tabulka. 9: Vlastnosti přípravku

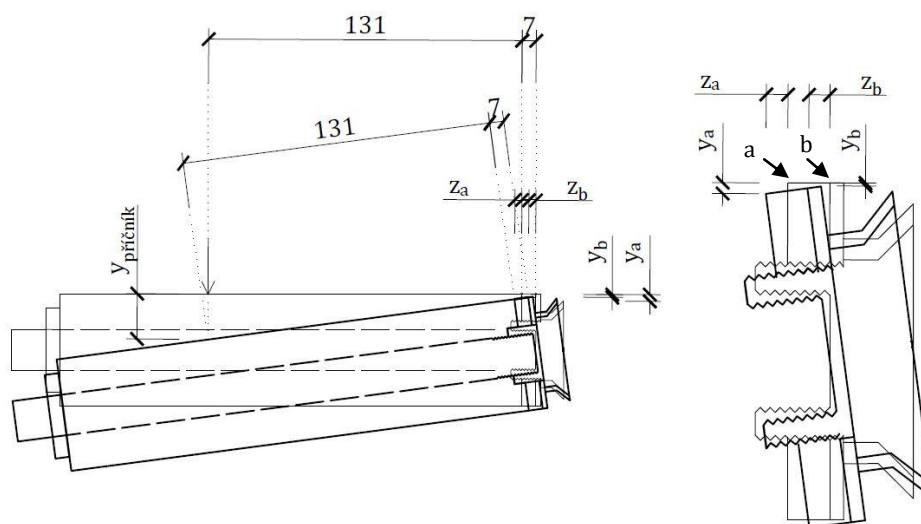
PŘÍPRAVEK			
Objemová hmotnost	ρ	7850	[kg/m ³]
Průměr	r	50	[mm]
Délka	l	193	[mm]
Vlastní tíha	g	154,13	[N/m]
Odpovídající síla (A)	F	29,75	[N]
Odpovídající moment (B)	M	2870,68	[Nmm]



Obr. 75 Zatížení vyplývající z vlastní tíhy přípravku

6.2.2 Úprava materiálových charakteristik a vyhodnocení

Protože při experimentech byl zjišťován svislý posun příčnicku, který v modelu nebyl uvažován, pro porovnání s numerickým modelem musely být získané hodnoty vodorovného a svislého posunu kotevního bodu přepočítány. Pro tento účel byly z modelu získány hodnoty vodorovných a svislých posunů ve dvou místech (označeny jako a, b, viz obrázek 76) kotevního bodu, díky kterým mohl být určen svislý posun v místě snímaném příčnickem. Ocelový přípravek byl při výpočtu uvažován jako tuhé rameno. Způsob přepočtu je znázorněn na obrázku 76.



Obr. 76 Schéma přepočtu posunu

Pro ověření správnosti byl model nejprve zatížen silou \quad kN. Při tomto zatížení byl maximální svislý posun příčnicku \quad mm, což odpovídá tuhosti spoje \quad kN/mm. Průměrná tuhost získaná ze zatěžovacích větví zkušebních vzorků je ovšem \quad kN/mm a materiálové vlastnosti musely být proto upraveny (viz tabulka 10).

Tento rozdíl lze vysvětlit jak idealizací modelu, který nezahrnuje ocelový přípravek, tak i nízkým počtem vzorků, které byly pro určení průměrných hodnot posunu použity. Velký vliv mohou mít také rozdílné teploty při jednotlivých zkouškách. Protože rozdílná teplota ovlivňuje především vlastnosti folie, charakteristiky ostatních materiálů byly ponechány beze změn.

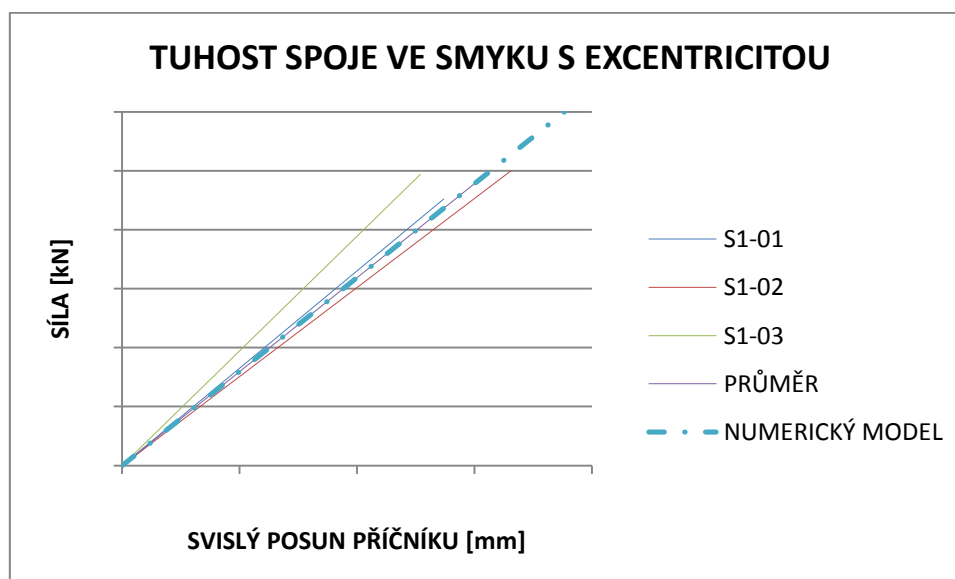
Tabulka 10: Materiálové vlastnosti folie pro vzorky S1

FOLIE			
Youngův modul pružnosti	E	548	[MPa]
Poissonovo číslo	μ	0,42	[-]
Modul pružnosti ve smyku	G	193	[MPa]
Pevnost v tahu	f_t	34,5	[MPa]

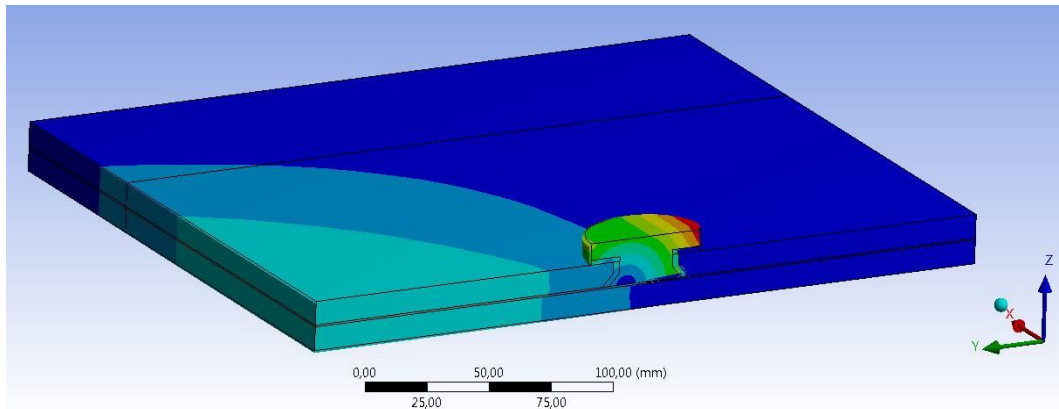
Po provedené úpravě odpovídá svislý posun příčnicku mm a tuhost spoje při tomto typu zatížení kN/mm, což je zároveň i průměrná hodnota získaná z reálných zkoušek (viz tabulka 11). Na obrázku 77 lze vidět obrys nedeformovaného vzorku a zároveň i jeho celkovou deformaci. V grafu 18 je tuhost modelu graficky porovnána s tuhostmi reálných vzorků.

Tabulka 11: Deformace při zatížení 3 kN

Síla	Posun bodu a		Posun bodu b		Posun příčnicku	$F_i/u_{i,příčnick}$
	osa y	osa z	osa y	osa z	osa y	
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN/mm]

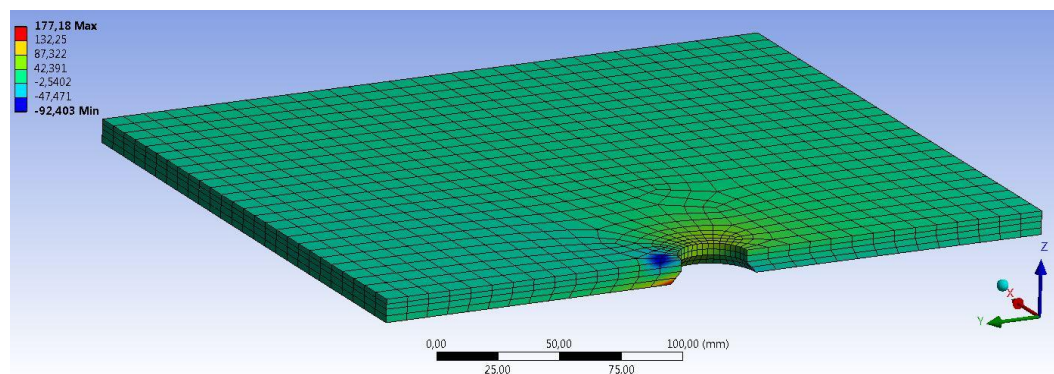


Graf 18 Porovnání tuhostí numerického modelu a vzorků S1



Obr. 77 Deformovaný model

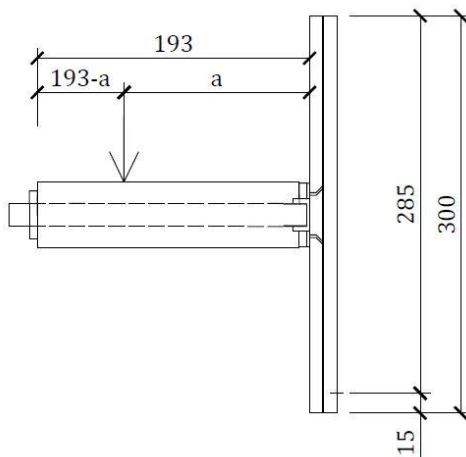
Model byl dále zatížen průměrnou hodnotou síly, při které došlo k porušení vzorků (kN). Poté bylo zjišťováno rozložení napětí ve skle. Jak je z obrázku 78 zřejmé, maximální napětí vzniká ve spodní části skleněné tabule, kde vlivem zatlačování hlavy kotevního bodu došlo ke vzniku tažené oblasti. V horní části skleněné tabule vzniká největší napětí v místech, kde byla při zkouškách pozorována tažená oblast projevující se tvorbou bublinek. Maximální hodnota napětí odpovídá MPa.



Obr. 78 Rozložení maximálního napětí v tvrzeném skle

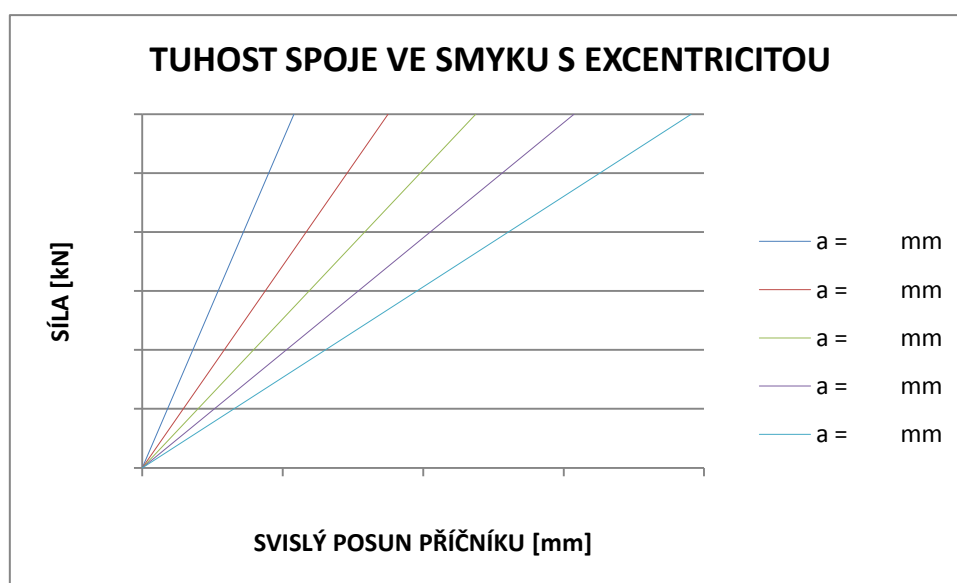
6.3 Parametrická studie

Pro účely parametrické studie byl využit model popsany a ověřeny v kapitole 6.2. Jako parametr ovlivňující chování vzorku byla vybrána excentricita působící smykové síly (označena jako a , viz obrázek 79). Vlastnosti vzorku i přípravku zůstaly nezměněny.



Obr. 79 Parametr a

Postupně byly zjišťovány hodnoty vodorovných a svislých posunů kotevního bodu při zatížení kN a excentricitě mm . Ze získaných hodnot byl poté určen svislý posun příčnicku v působišti síly a a tuhost spoje při jednotlivých hodnotách excentricity (viz graf 19).

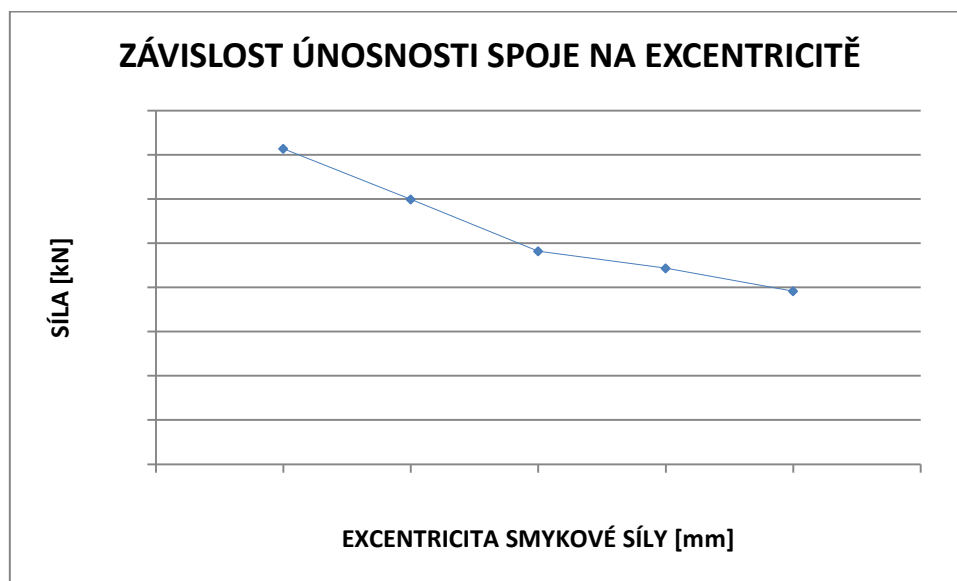


Graf 19 Porovnání tuhostí pro různé excentricity zatížení

Pro každý případ byla také pomocí maximálního napětí zjištěného v kapitole 6.2.2 určena maximální síla, kterou lze prvek pro danou excentricitu zatížit (viz tabulka 12). Jak je ze získaných hodnot zřejmé, se snižující se excentricitou roste únosnost spoje a zvyšuje se tedy i jeho tuhost. Z výsledků také vyplývá, že únosnost spoje se nezvyšuje lineárně. Pro excentricity menší než 10 mm roste strměji než pro excentricity větší. Závislost únosnosti spoje na excentricitě je zobrazena v grafu 20.

Tabulka. 12: Tuhosti a maximální možné zatížení spoje pro různé hodnoty excentricity

Excentricita	Posun příčnicku při kN	$F_i/u_{i,příčnick}$	Maximální zatížení
	Ve směru y		



Graf 20 Závislost únosnosti spoje na excentricitě smykové síly

7. Závěr

V rámci této práce byly provedeny experimenty zabývající se chováním spoje vrstvené skleněné konstrukce se skrytým kotevním bodem zatíženým smykem s excentricitou. Zkoušky byly podrobeny tři vzorky laminovaného skla se skrytým kotevním bodem spojené EVA LCI folií. Vzorky byly zatěžovány do porušení a v průběhu byly sledovány změny v oblasti spoje a jeho těsné blízkosti. Zároveň byly zaznamenávány vodorovné deformace skleněné tabule a svislý posun ramene příčnicku, kterým byly vzorky zatěžovány.

Získané hodnoty byly porovnány s hodnotami získanými z tahových zkoušek vzorků s totožnými vlastnostmi. Z hodnot vyplývá, že spoj přeneše mnohem vyšší zatížení tahem (kN), než smykem s excentricitou (). Tento rozdíl způsobuje rozdělení plochy spoje na taženou a tlačnou oblast, ke kterému v případě smyku s excentricitou dochází.

Na základě získaných dat byl v programu ANSYS Workbench 18.0 vytvořen numerický model simulující chování reálných vzorků.

Numerický model byl dále použit pro parametrickou studii, ve které byl zjišťován vliv excentricity smykové síly na tuhost a únosnost spoje. Studie ukazuje, že s rostoucí excentricitou se tuhost i únosnost spoje snižují.

Vzhledem k tomu, že k určení výše zmiňovaných hodnot byla použita data pouze ze tří (respektive dvou) experimentů, není možné výsledky statisticky zpracovat a lze je považovat pouze za orientační. Bylo by proto žádoucí zkoušky zopakovat na větším množství vzorků. Pro přesnější popis vlastností spoje by také bylo vhodné snímat nejen svislý posun příčnicku, ale i posuny hlavy kotevního bodu, které by lépe charakterizovaly postupné oddalování horní části kotevního bodu a tvrzeného skla.

8. Literatura

1. WURM, Jan. *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*. Basel: Birkhäuser, c2007. ISBN 978-3-7643-7608-6.
2. LAUFS, W.; LUIBLE, A. *Introduction on Use of Glass in Modern Buildings*, EPFL-ICOM, Lausanne, 2003, ISBN 80-01-02849-6.
3. BEDON, CH.; SANTARISEIRO, M. *Transparency in structural glass systems via mechanical, adhesive and laminated point fixings - Existing research and developments*, Manuscript Draft.
4. CARVALHO, P.L.L.; CRUZ, P.J.S.; SILVA, E.; CASAL, C. *Embedded glass fixing system*, In Jens Schneider & Bernhard Weller (eds.), *Engineered Transparency; Proc. intern. symp*, Düsseldorf, Germany, 29-30 September 2010, 213-220.
5. RYAN, P.; OTLET, M.; OGDEN, R.G. *Steel supported glazing systems: interfaces*. Ascot, Berkshire: Steel Construction Institute, 1997, ISBN 1-85942-070-2.
6. Metro Performance Glass, *Catalogue* [online]. [2. 1. 2019]. Dostupné z: <https://www.metroglass.co.nz/catalogue/140.aspx>
7. HALDIMANN, Matthias, Andreas LUIBLE a Mauro OVEREND. *Structural use of glass*. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, c2008. ISBN 3857481196.
8. LORENZ, J. *Numerical analysis of glass pane: a blind point connection*, Praha, Česká Republika, 2016. České vysoké učení technické v Praze.
9. ELIÁŠOVÁ, Martina. *Přednášky Navrhování skleněných konstrukcí*, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické. 2015.
10. MINDA, B. *Analýza skrytého kotevního bodu pre sklenené konštrukcie*, Praha, Česká Republika, 2018. České vysoké učení technické v Praze.
11. Dokumentace ANSYS Workbench 18.0
12. DROZDA, Jiří. *Příručka ANSYS Workbench*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.