

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



**Chování vrstveného skla vzhledem k rychlosti
zatěžování**

**Behavior of Laminated Glass Panels with Respect to Load
Speed**

Vypracoval: Bc. Martin Borovský

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

May 2018



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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Borovský Jméno: Martin Osobní číslo: 399138
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební Inženýr
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby - Inženýrské konstrukce

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI


Název diplomové práce: Chování vrstveného skla vzhledem k rychlosti zatížení
Název diplomové práce anglicky: Behaviour of Laminated Glass Panes with Respect to Load Speed

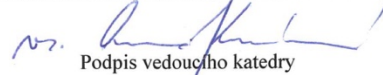
Pokyny pro vypracování:
Spolupráce na provádění experimentů (tabule z vrstveného skla namáhané čtyřbodovým ohybem) a jejich následné vyhodnocení, určení součinitele tuhosti PVB fólie pro různé rychlosti zatížení, vytvoření numerického modelu a jeho s experimenty, ověření návrhového modelu porovnáním s numerickými výpočty.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 28/2/2018 Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku



Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

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“.

28.2.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Statické zatěžovací zkoušky tabulí z vrstveného skla čtyřbodovým ohybem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 10. května 2018

.....

Martin Borovský

Poděkování

Na prvním místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdenku Sokolovi Ph.D., Ing. Tomášovi Hánovi a v neposlední řadě doc. Ing. Martině Eliášové CSc., za jejich ochotu při tvorbě této práce.

Chování vrstveného skla vzhledem k rychlosti zatěžování

Behaviour of Laminated Glass Panels with Respect to Load Speed

Souhrn

Tato diplomová práce popisuje experimentální zkoušky na tepelně upravených vrstvených skleněných tabulích. Spolupůsobení jednotlivých vrstev bylo zajištěno pomocí lepených fólií typu PVB. Měření byla prováděna s proměnnou rychlostí zatížení při destruktivních zkouškách i s konstantním zatížením při zkouškách nedestruktivních. Sledovaným parametrem nedestruktivních zkoušek byla doba trvání zatížení, která se projevila jako rozhodující faktor poddajnosti fólie.

Jako srovnávací metody byly zvoleny výpočty pro navrhování skleněných tabulí dle před-normy prEN 16612 [1] a výpočty pomocí programu (Dlubal RFEM). Pro vytvoření numerického modelu byl použit smykový modul získaný z experimentálních měření. Správnost numerického modelu byla ověřena shodou výsledků s reálnými daty.

Součinitel roznosu smykových sil pro přesnější analytický výpočet byl upřesněn pomocí parametrické studie. Parametrická studie spočívala v porovnání hodnot součinitelů roznosu smykových sil s reálnými hodnotami získanými z experimentálního měření.

Vyhodnocením vhodnosti prověřovaných metod, zjednodušená metoda dle prEN 16612 [1] vždy vycházela jako více konzervativní. Metodou výpočtu pomocí nově vytvořeného numerického modelu bylo dosaženo nejpřesnějších výsledků.

Klíčová slova

Vrstvené sklo, tenzometr, normálové napětí, deformace, polymerní fólie, experimentální zkoušky, numerický model, analytický model

Summary

This diploma thesis describes the experimental tests performed on heat treated laminated glass sheets. Interaction between individual layers was ensured by glued polymeric films of the PVB type. The measurements were carried out with variable load speed during destructive tests and constant loads with non-destructive tests. The non-destructive test parameter was observed the duration of the load, which was a decisive factor in the compliance of the film.

Comparative methods were used to calculate the glass sheet design according to prEN 16612 [1] and calculations using software (Dlubal RFEM). A shear module obtained from experimental measurements was used to create a numerical model. The accuracy of the numerical model has been verified by matching the results with real data.

The coefficient of shear force distribution for a more accurate analytical calculation was specified using a parametric study. The parametric study consisted in comparing the values of the coefficients of shear force distribution with the real values obtained from the experimental measurement.

By evaluating the suitability of the tested methods, the simplified method according to prEN 16612 [1] has always been more conservative. The most accurate results were obtained using the numerical model calculation method. This paper also included the creation of a numerical model.

Keyword

Laminated glass, tensiometr, tension stress, deformation, polymeric film, experimental tests, numerical model, analytic model

OBSAH

OBSAH.....	7
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM ZKRATEK.....	10
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM GRAFŮ.....	12
1 ÚVOD.....	15
2 HISTORIE SKLA.....	15
3 PLAVENÉ SKLO (FLOAT GLASS).....	17
3.1 Popis.....	17
3.2 Historie výroby.....	18
3.3 Chemické složení a výroba.....	19
3.4 Materiálové vlastnosti plaveného skla.....	22
4 VRSTVENÉ SKLO.....	35
4.1 Popis.....	36
4.2 Výroba vrstveného skla.....	36
4.3 Zkoušky vrstveného skla.....	38
4.4 Typy fólií do mezivrstev vrstveného skla.....	41
4.5 Smykový modul fólií pro lepené vrstvy skleněných tabulí.....	42
4.6 Použití vícevrstvých skel ve stavebnictví.....	43
5 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE.....	44
5.1 Experimentální zkoušení těles v závislosti na rychlosti zatěžování.....	44
5.2 Dlouhodobý experiment.....	91
6 ANALYTICKÝ VÝPOČET.....	102
6.1 Popis.....	102
6.2 Výpočet dle normy prEN 16612.....	102
6.3 Součinitel přenosu smykových sil.....	104
6.4 Analytický výpočet vrstvených skleněných tabulí s PVB fólií.....	108
7 NUMERICKÝ MODEL A VÝPOČET – DLUBAL RFEM.....	114
7.1 Popis metody.....	114
7.2 Shrnutí výsledku z výpočetní programu Dlubal RFEM.....	116
7.3 Vyhodnocení.....	118
8 ZÁVĚR.....	119
9 BIBLOGRAFIE.....	124
10 PŘÍLOHY.....	126

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Návrhy výbrusu do skla	16
Obr. 3.1: Schéma nepřetržité výroby skla	17
Obr. 3.2: Plavené sklo [22]	18
Obr. 3.3: Henry Bessmer [18].....	19
Obr. 3.4: Přímé lití skloviny – dávkovací prvek zanořen do cínu.....	20
Obr. 3.5: Přívod skloviny přes nátokový prvek bez ponoření do cínu	20
Obr. 3.6: Tavicí agregát (tavící pec) [19].....	21
Obr. 3.7: Řezací linka [19].....	22
Obr. 3.8: Schéma výroby plaveného skla [20].....	22
Obr. 3.9: Pracovní diagramy skla, oceli a dřeva [6].....	26
Obr. 3.10: Křehký lom [22]	27
Obr. 3.11: Schéma linka na tepelné tvrzení a zpevňování plochého skla	31
Obr. 3.12: Rozdělení napětí po průřezu	32
Obr. 3.13: Ukázka lomového obrazce podle typu tvrzení skla	33
Obr. 3.14: Typ laserové detekce nazývaní se ISRA	35
Obr. 4.1: Příklady vrstveného skla se spojující PVB fólií.....	35
Obr. 4.2: Schéma automatické výrobní linky na výrobu vrstveného skla	36
Obr. 4.3: Kyvadlová zkouška.....	39
Obr. 4.4: Pádová zkouška	39
Obr. 4.5: Zkouška sekyrou	40
Obr. 4.6: Zkouška odolnosti proti střelám.....	40
Obr. 4.7: Zkouška odolnosti proti výbuchovému tlaku.....	41
Obr. 4.8: Průběh napětí v závislosti na smykovém modulu fólie dvouvrstvého skla	42
Obr. 5.1: Schéma zatěžovací soustavy	45
Obr. 5.2: Těleso ve zkušebním zařízení.....	46
Obr. 5.3: Detail uložení tělesa na podporový válec.....	46
Obr. 5.4: Zkušební zařízení MTS-Q se záznamovou ústřednou Dewetron.....	47
Obr. 5.5: Příčný řez souvrstvím tabule	47
Obr. 5.6: Schéma osazení tenzometrů na tažené straně	48
Obr. 5.7: Schéma osazení tenzometrů na tlačené straně	48
Obr. 5.8: Schéma rozmístění tenzometrů v příčném řezu A-A.....	49
Obr. 5.9: Schéma rozmístění snímačů průhybu	49
Obr. 5.10: Těleso ESG-PVB-01 ve zkušebním zařízení	50

Obr. 5.11: Označení zkušebního tělesa dodavatelem	50
Obr. 5.12: Způsob porušení zkušebního tělesa	53
Obr. 5.13: Způsob porušení zkušebního tělesa – bokorys	53
Obr. 5.14: Těleso ESG-PVB-02 ve zkušebním zařízení	54
Obr. 5.15: Označení zkušebního tělesa dodavatelem	55
Obr. 5.16: Způsob porušení zkušebního tělesa	57
Obr. 5.17: Těleso ESG-PVB-03 v průběhu přípravy k měření	58
Obr. 5.18: Označení zkušebního tělesa dodavatelem	58
Obr. 5.19: Způsob porušení zkušebního tělesa	60
Obr. 5.20: Těleso ESG-PVB-04 v průběhu přípravy k měření	61
Obr. 5.21: Označení zkušebního tělesa dodavatelem	62
Obr. 5.22: Způsob porušení zkušebního tělesa	64
Obr. 5.23: Způsob porušení zkušebního tělesa – detail	65
Obr. 5.24: Těleso ESG-PVB-05 ve zkušebním zařízení	66
Obr. 5.25: Označení zkušebního tělesa s popisem rychlosti zatěžování	66
Obr. 5.26: Způsob porušení zkušebního tělesa	69
Obr. 5.27: Těleso ESG-PVB-06 ve zkušebním zařízení	70
Obr. 5.28: Označení zkušebního tělesa s popisem rychlosti zatěžování	70
Obr. 5.29: Způsob porušení zkušebního tělesa	72
Obr. 5.30: Těleso TVG-PVB-07 ve zkušebním zařízení	73
Obr. 5.31: Označení zkušebního tělesa dodavatelem současně i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem	74
Obr. 5.32: Způsob porušení zkušebního tělesa	76
Obr. 5.33: Těleso TVG-PVB-08 ve zkušebním zařízení	77
Obr. 5.34: Označení zkušebního tělesa dodavatelem i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem	78
Obr. 5.35: Způsob porušení zkušebního tělesa	80
Obr. 5.36: Těleso VSG-EVA-09 ve zkušebním zařízení	81
Obr. 5.37: Označení zkušebního tělesa dodavatelem	81
Obr. 5.38: Způsob porušení zkušebního tělesa	84
Obr. 5.39: Záznamové zařízení s ústřednou Spyder	91
Obr. 5.40: Obrázek schéma zapojení	92
Obr. 5.41: Statické schéma ohýbané tabule při experimentu	92
Obr. 5.42: Plné zatížení vzorku	93
Obr. 5.43: Dostatečná délka zatěžovacích válců sestavy	93
Obr. 5.44: Příčný řez zatěžovací soustavy	94

Obr. 5.45: Detail ochrany kontaktů mezi sklem a podporovými válci	94
Obr. 5.46: Detail ochrany kontaktů mezi sklem a roznášecí soustavou	95
Obr. 5.47: Obrázek štítku skla	95
Obr. 6.1: Značení vrstveného skla	103
Obr. 6.2: Statické schéma	109
Obr. 6.3: Příčný řez tabulí	109
Obr. 7.1: Schéma zkušebního tělesa se základními rozměry	114
Obr. 7.2: Schéma rozmístění podpor a zatížení pro výpočtový program Dlubal RFEM	115
Obr. 7.3: Výsledný numerický model v programu Dlubal RFEM	115
Obr. 7.4: Vykreslení výsledků průhybu v programu Dlubal RFEM	116

SEZNAM ZKRATEK

MKP	(Metoda konečných prvků)
PVB	(Polyvinylbutyralová fólie)
ESG	(tepelně tvrzené sklo)
EN	(Evropská norma)
ČSN EN	(Česká technická norma)

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Chemické složení skel	19
Tab. 3.2: Materiálové vlastnosti plaveného skla	23
Tab. 3.3: Součinitel modifikační k_{mod}	25
Tab. 3.4: Součinitel povrchové úpravy skla k_{sp}	25
Tab. 3.5: Součinitel pevnosti skla γ_M	25
Tab. 3.6: Vztažné body viskozity floatového skla	28
Tab. 3.7: Tepelné vlastnosti floatového skla	29
Tab. 3.8: Charakteristické pevnosti upravených skel $f_{b,k}$	34
Tab. 3.9: Součinitel zpevnění k_v	34
Tab. 5.1: Označení těles a jejich rychlosti zatěžování	44
Tab. 7.1: Výsledky normálového napětí a deformace pro určitou sílu a hodnoty smykového modulu fólie $G = 1,09$ MPa podle programu Dlubal RFEM	117
Tab. 7.2: Výsledky normálového napětí a deformace pro určitou sílu a hodnoty smykového modulu fólie $G = 0,8$ MPa podle programu Dlubal RFEM	118
Tab. 8.1: Parametrickou studií zjištěné součinitelé přenosu smykových sil	120
Tab. 8.2: Hodnoty smykového modulu pro různé rychlosti	121

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1: Viskózní křivka floatového skla	28
Graf 3.2: Spektrální propustnost float skel	29
Graf 4.1: Časový průběh teploty při lisování v autoklávu	38
Graf 4.2: Závislost smykového modulu G na teplotě a době trvání zatížení pro fólie PVB	42
Graf 5.1: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	51
Graf 5.2: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	51
Graf 5.3: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí	52
Graf 5.4: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	55
Graf 5.5: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	56
<i>Graf 5.6: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí</i>	<i>56</i>
Graf 5.7: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	59
Graf 5.8: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	59
Graf 5.9: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí	60
Graf 5.10: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	62
Graf 5.11: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	63
Graf 5.12: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí	64
Graf 5.13: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	67
Graf 5.14: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	68
Graf 5.15: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí	68
Graf 5.16: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	71
Graf 5.17: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	71
Graf 5.18: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí	72
Graf 5.19: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	74
Graf 5.20: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	75
Graf 5.21: Závislost svislého průhybu na působící síle	76
Graf 5.22: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	79
Graf 5.23: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	79
Graf 5.24: Závislost svislého průhybu na působící síle	80
Graf 5.25: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí	82
Graf 5.26: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení	82
Graf 5.27: Závislost svislého průhybu na působící síle	83

Graf 5.28: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 1	86
Graf 5.29: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 2	87
Graf 5.30: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 3	88
Graf 5.31: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 4	88
Graf 5.32: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 5	88
Graf 5.33: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 6	89
Graf 5.34: Průběh průměru průhybu v závislosti na svislé síle	89
Graf 5.35: Závislost normálového tlakového napětí na době trvání konstantního zatížení.....	97
Graf 5.36: Závislost normálového tahového napětí na době trvání konstantního zatížení.....	98
Graf 5.37: Závislost svislého průhybu na době trvání konstantního zatížení	98
Graf 5.38: Závislost normálového tlakového napětí na čase po celkovém odtížení ...	99
Graf 5.39: Závislost normálového tahového napětí na čase po celkovém odtížení ..	100
Graf 5.40: : Závislost svislého průhybu na době trvání konstantního zatížení	100
Graf 6.1: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 2,0 mm.min.	105
Graf 6.2: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 2,0 mm.min.	105
Graf 6.3: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,5 mm.min.	106
Graf 6.4: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,5 mm.min.	106
Graf 6.5: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,125 mm.min.	107
Graf 6.6: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušební tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,125 mm.min.	107

Graf 7.1: Závislosti normálovém napětí na působící síle pro různé rychlosti	118
Graf 7.2: Závislosti deformace na působící síle pro různé rychlosti	119
Graf 8.1: Shrnutí výsledných závislostí průhybu na působící svislé síle dle použitých metod a experimentů	121
Graf 8.2: Shrnutí výsledných závislostí normálového napětí na působící svislé síle dle použitých metod a experimentů	122

1 ÚVOD

Sklo jako konstrukční materiál je v této době čím dál více využíváno. V současnosti pro navrhování skleněných konstrukcí (nosných a nenosných) jsou metody značně omezené (např. zjednodušená metoda návrhu dle před-normy prEN 16612 [1]) a nebo zdlouhavé a nákladné. Velmi zásadní zefektivnění práce na dimenzování návrhů je použití výpočetních programů a experimentálních dat. Hlavním problémem je velký nedostatek vstupních parametrů, které jsou pro kvalitní výpočty nezbytné.

Cílem této diplomové práce je určení materiálových vlastností, které jsou klíčovým parametrem pro úspěšné navrhování vrstveného skla a také posoudit vhodnost vybraných metod sloužících k vypracování návrhů.

Ověříme reálnou pevnost a maximální průhyby, které jdou vyvolat na zkoušeném souvrství a následně také pouze na vrstvě jedné. Porovnáme výsledky s návrhovými postupy používané při návrhu dle před-normy prEN 16612 [1] pro navrhování vrstvených skel.

Dále z těchto výstupů upravíme parametry ve výpočtovém programu (Dlubal RFEM 5.11) na numerickém modelu tak, abychom mohli přesněji využívat software pro další návrhy.

Na závěr této práce bylo provedeno další experimentální měření pro definování chování PVB fólie při dlouhodobém zatížení a následném odtžení (cca 3 měsíce).

2 HISTORIE SKLA

Výroba skla má velmi dlouhou a zajímavou historii. Považuje se za jedno z nejstarších známých řemesel. Přesto však dodnes historici nenacházejí shodu o době nebo místě vzniku této výroby. Jako nejpravděpodobnější verze se zdá, že toto řemeslo vznikalo nezávisle na mnoha lokalitách současně v krátkém období.

Sklo jako materiál se užívá ve všech možných oblastech lidské tvořivosti už po celá staletí. V počátcích historie jeho výroby byl tento materiál velmi nedostupný kvůli omezeným technologickým možnostem. Historický vývoj výroby skla, byl doprovázen vzestupy a pády díky výkyvům ekonomiky a dalším historickým okolnostem. První zmínky o prostých skleněných výrobcích se nacházejí už z období Mezopotámie (pol. 3000 př. n. l.). Nejpokročilejší civilizací starověku byli podle archeologických nálezů

Féničané. Osvojili si techniku výbrusu do skla – (Obr. 2.1), dále z jejich dílen pocházejí číše s frity v odlišných odstínech. Veliký rozmach se udál převážně v oblastech významných pro obchod, například v palestinsko-syrském území.



Obr. 2.1: Návrhy výbrusu do skla

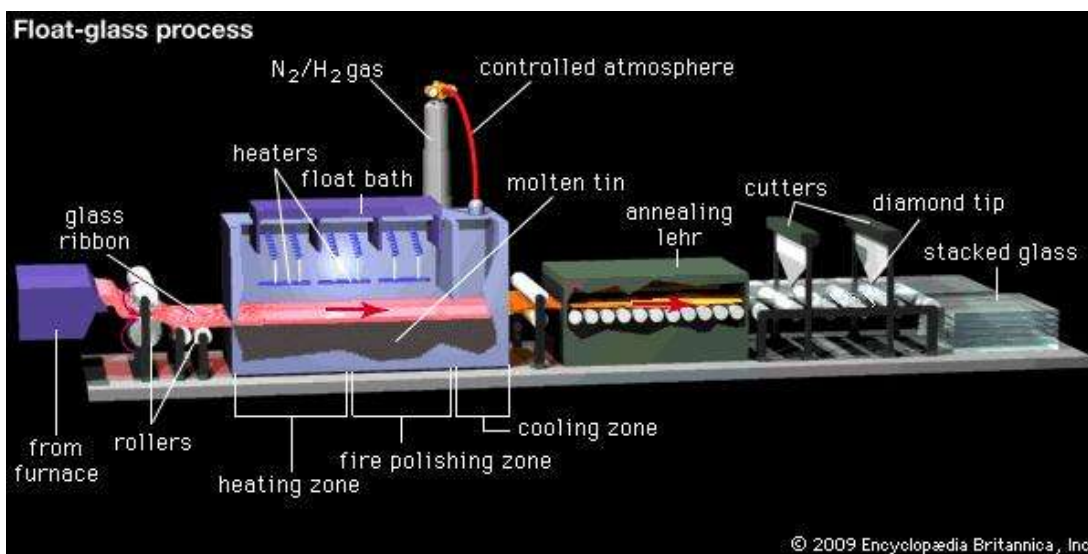
Technologie plochého skla má historicky kratší dobu vývoje. Za nejstarší ruční způsob výroby plochého skla se považuje lití skloviny do ploché formy a její urovnění do tvaru rovinné desky. Jako převratný lze hodnotit vynález sklářské píšťaly a s tím spojenou technikou foukání skla, která se datuje do 1. století našeho letopočtu. Tento postup se rychle stal majoritní technikou výroby veškerých výrobků ze skla.

Dochované informace potvrzují, že na našem území se k výrobě plochého skla používala technologie roztáčením i foukáním válců, a to přibližně od počátku 15. století. Do té doby bylo nutné tyto výrobky dovážet ze zahraničí (pravděpodobně z Benátek) pro zasklívání chrámových oken i oken dalších staveb.

3 PLAVENÉ SKLO (FLOAT GLASS)

3.1 Popis

Technologie plochého skla letos oslavila výročí 97 let od počátku strojní výroby. Počátkem 20. století se řešila otázka, jakým způsobem by bylo možné usnadnit a zefektivnit výrobu plochého skla a zbavit se tak fyzicky velmi náročné technologie foukání skla. Tato cesta postupě vedla přes jednoduchou mechanizaci určitých etap ruční výroby až ke zdařilému vyřešení svislého tažení skleněného pásu s nepřetržitou výrobou (dle Obr. 3.1).

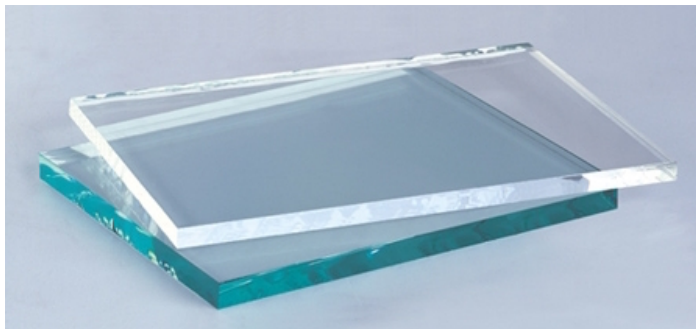


Obr. 3.1: Schéma nepřetržité výroby skla

Tento způsob byl patentován belgickým vynálezcem Emilem Fourcaultem. Další druhy této strojové technologie se objevovaly záhy po tomto vynálezu. Velmi zásadní problém těchto výrobních procesů byla nepříliš dobrá kvalita povrchů vyrobeného skla. Snahou o zvýšení kvality vznikla technologie broušení a následně leštění povrchu vyrobeného plochého skla v zrcadlové kvalitě.

V době, kdy se již zdálo, že tento postup je dotažen do finální podoby, přišli Angličané s vývojem vlastní technologie, jejíž základy a celková koncepce se vyvíjela jiným směrem, a to kontinuálním plavením na hladině roztaveného cínu (tzv. Floating Process). Při této technologii odpadají velmi náročné vedlejší postupy opracování povrchů, jak to bylo zmíněno u předchozího postupu. Za významný mezník v historii výroby skla je považováno datum 20. ledna 1959, kdy v historii výroby skla došlo k zásadnímu kvalitativnímu posunu ve výrobě plochého skla, neboť bylo třeba splňovat stále se zvyšující požadavky na kvalitu a efektivnost výroby.

Sklo vyráběné plavením nekonečného pásu skla po hladině roztaveného kovu je charakterizováno vysokou kvalitou, čírostí a neutrálně lesklým povrchem, který neovlivňuje nebo nezkrásluje průhled skrz. Dva typy plaveného skla jsou zobrazeny na Obr. 3.2. Touto technologií můžeme docílit nej přísnějších požadavků a parametrů, které lze požadovat. Dále zaručuje stálost vlastností, odolnost vůči působení vody, atmosférických vlivů a mnoha dalších fyzikálních vlivů.



Obr. 3.2: Plavené sklo [22]

3.2 Historie výroby

Myšlenka tvarovat tabule skla nalitím skloviny na hladinu roztaveného kovu a následným ochlazením skloviny, až dojde ke změně skupenství do pevného stavu, vznikla už v polovině 19. století. Henry Bessmer [18] – viz (Obr. 3.3) uvažoval o využití některých kovů jako cín, olovo nebo vizmut a redukčního prostředí pro tyto účely.



Obr. 3.3: Henry Bessmer [18]

Prvním americkým patentem výroby plaveného skla byl v r. 1902 patent Williama Heala. Popisuje výrobu plaveného skla litím tekuté skloviny na plochu tvořenou roztaveným kovem a následným tažením vytvořeného skleněného pásu po hladině roztaveného kovu do pece, kde dochází k ochlazení materiálu.

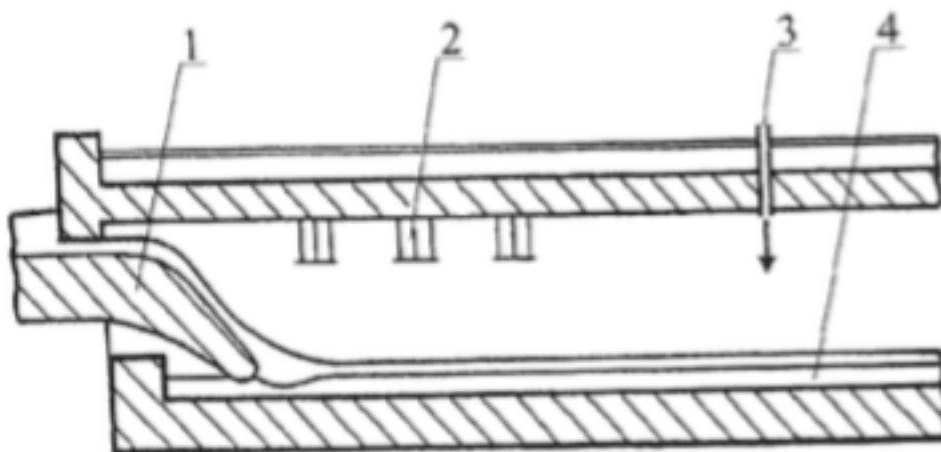
3.3 Chemické složení a výroba

Tento materiál se řadí do kategorie izotropních anorganických látek, který vznikl nejprve ohřátím a následným postupným ochlazením až do pevného skupenství. Chemické složení není přesně dáno. Přesto základní surovinou, obsaženou téměř ve všech skelných produktech, je oxid křemíku, který se nachází v křemičitém písku resp. sklářském písku.

Tab. 3.1: Chemické složení skel

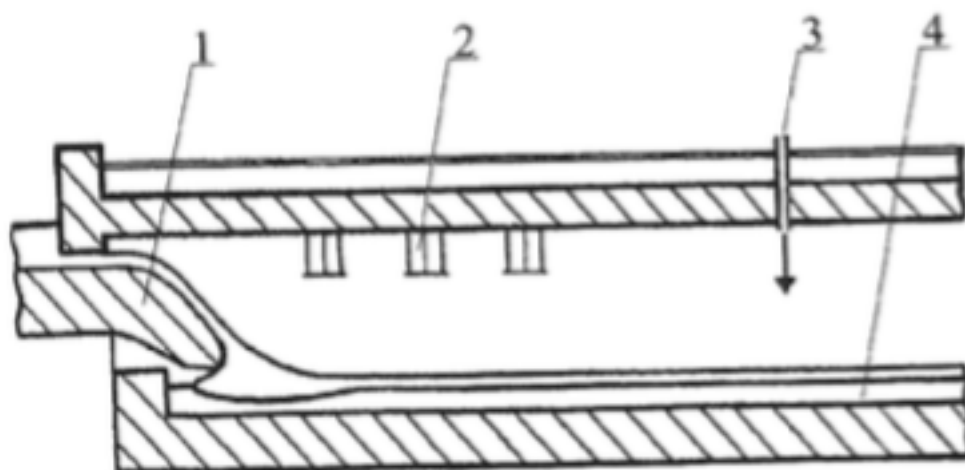
Barva skla	Chemické složení								
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
čiré bezbarvé	71,91	13,57	9,11	4,13	0,075	0,739	0,263	0,139	0,063
zelené normální	71,45	13,60	8,96	4,12	0,599	0,835	0,209	0,165	0,062
tmavě zelené	71,50	13,39	9,0	4,09	0,809	0,81	0,18	0,16	0,06
super tmavě zelené	72,10	13,47	8,5	3,94	0,939	0,659	0,22	0,12	0,05

Vstupní suroviny pro výrobu plaveného skla se především skládají z křemičitého písku (SiO₂) s obsahem 71 – 75%, sody (Na₂O) 12 – 18%, vápence (CaO) 10 – 15% či dolomitu viz – (Tab. 3.1). Veškeré materiály musejí být skladovány odděleně v zásobnících nebo silech. Podle typu receptury jsou suroviny naváženy a přepravovány pomocí dopravních linek. Navážený materiál je smíchán a dopraven do zásobníků před tavící agregát (tavící pec). V průběhu přepravy surovin je přidáno předepsané množství skleněných střepek. Takto vzniká vsázka. Veškerý tento proces je plně zautomatizován a řízen převážně výpočetní technikou.



Obr. 3.4: Přímé lití skloviny – dávkovací prvek zanořen do cínu

1 – dávkovací prvek, 2 – ohřev, 3 – atmosféra, 4 – tavenina cínu



Obr. 3.5: Přívod skloviny přes nátokový prvek bez ponoření do cínu

1 – dávkovací prvek, 2 – ohřev, 3 – atmosféra, 4 – tavenina cínu

Sklářská vsázka (zmněna výše) je roztavena v tavicím agregátu (tavící peci) při teplotách 1550–1600 °C viz Obr. 3.6, pomocí hořáků (plynových nebo olejových). Při tavení dochází k přeměně vsázky na sklovinu, která protéká postupně tavicím agregátem. V pásnu nejvyšších teplot skloviny dochází k vyčeření plynů vzniklých při rozkladných procesech surovin obsažených ve vsázce, a tím dochází k odstranění bublin plynů a také k chemické homogenizaci skloviny.



Obr. 3.6: Tavící agregát (tavící pec) [19]

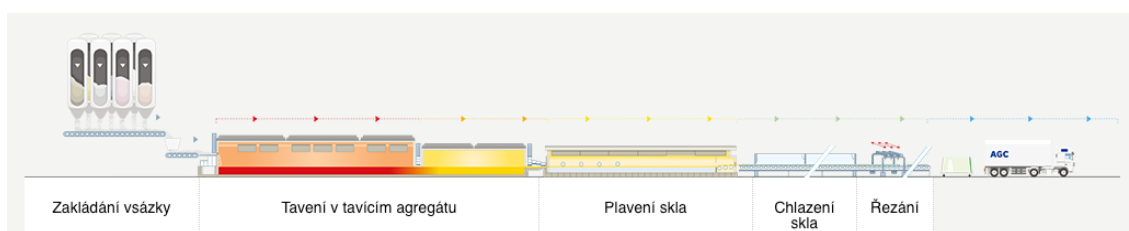
Vytékající sklovina z tavícího agregátu, natéká na hladinu roztaveného cínu v plavící lázni dle (Obr. 3.4 a Obr. 3.5), kde pomocí technologie na plavení je sklovina vytvarována do kontinuálního pásu plochého skla. Na cestě od vtokové strany k výtokové straně klesá hodnota teploty skloviny i cínu z 1100 °C na 600 °C. Pro požadované rozměry, jsou do lázně skrz boční těsnění vloženy tvarovací nástroje - tzv. top rolny, které mechanicky nastavují parametry tažného pásu skla. Pohyb pásu skla je zajištěn pomocí válců chladící pece.

Přetvořená sklovina z hladiny cínu je oddělena pomocí zvedacích válců, a dále pokračuje do tunelu chladící pece, tzv. chladničky. V této části dochází k postupnému ochlazování skleněného pásu dle předem naprogramovaného procesu chlazení. Tímto postupem se předchází eliminaci vnitřního normálového napětí, které by mohlo zapříčinit lomy materiálu. Skleněný pás při opouštění chladící pece dosahuje teploty okolo 60-80 °C a následně dojde k řezání na požadované rozměry viz (Obr. 3.7).



Obr. 3.7: Řezací linka [19]

Vychlazený skleněný pás je dále kontrolován detektorem vad a poté rozřezán na velkorozměrové tabule. Celkové schéma je znázorněno na Obr. 3.8



Obr. 3.8: Schéma výroby plaveného skla [20]

3.4 Materiálové vlastnosti plaveného skla

Plavené sklo je standardizováno dle Evropské normy ČSN EN 572–2: Sklo ve stavebnictví – Základní výrobky ze sodnovápenatokřemičitého skla – Část 2: Sklo float [25], vydáno 1. 11. 2004. Jedná se o sodnovápenaté čiré ploché sklo transparentní s planoparalelním žářem leštěnými povrchy vyrobené kontinuálním litím roztavené skloviny na hladinu kovu (cínu). Běžně se tabule skla vyrábějí v tloušťkách od 1 mm do 25 mm. a šířky 5200 mm (v ČR maximální šířka 3210 mm).

Sklo jako materiál se skládá z velmi široké nabídky typů lišících se pouze způsobem výroby, složením a vlastnostmi. Některé vlastnosti můžeme najít jako společné.

Například:

- Trvanlivost

- Nevodivost
- Recyklovatelnost
- Vysoká pevnost v tlaku
- Malá tepelná vodivost
- Dobrá chemická odolnost
- Odolnost proti průsaku vody

Vysoká pevnost v tlaku dělá z tohoto materiálu velmi atraktivní materiál pro použití ve všech možných technických odvětvích, například jako prvek do nosných konstrukcí, kde dochází k namáhání jak tlakem, tak ohybem. Společně s tím, že materiál je transparentní, dá se dále použít i do interiérů budov atd. V dnešní době se převážně využívá na pochozí plochy lávek pro pěší.

3.4.1 Mechanické vlastnosti

Výsledná pevnost skla je hodnocena skrz jeho mechanické vlastnosti a ve své podstatě rozhodne o jeho využití v daných oblastech. Chemické složení skla ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Shrnuní materiálových vlastností plaveného skla viz – (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Materiálové vlastnosti plaveného skla

vlastnosti	jednotka	rozpětí hodnot
hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2200 - 6000
pevnost v tlaku	MPa	700 - 1200
pevnost v tahu	MPa	30 - 90
pevnost v ohybu	MPa	40 - 190
modul pružnosti	GPa	50 - 90
součinitel délkové teplotní roztažnosti	K^{-1}	$6\cdot 10^{-6}$ - $9\cdot 10^{-6}$
součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,6 - 0,9
měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	850 - 1000
Poissonův součinitel	-	0,14 - 0,32
tvrdost podle Mohse	-	6 - 7
index lomu	-	1,5 - 2,25

3.4.1.1 Hustota

Hustota, je také nazývána jako měrná hmotnost a tato vlastnost je charakterizována jako hmotnost jednotkového objemu látky. U plaveného skla se

informace o objemové hmotnosti rozcházejí. Dle výzkumného ústavu (AGC Flat Glass Europe) je uvedena hodnota objemové hmotnosti 2499 kg.m⁻³.

3.4.1.2 Charakteristická pevnost

Pevnost, jako u všech ostatních materiálů, rozdělujeme dle typu namáhání. Pevnost v ohybu je nejvíce sledována a je velmi spjata s kvalitou povrchu, únavou a stárnutím, rozměry a tvarem tělesa. Chemické složení je bráno jako méně zásadní parametr ovlivňující výsledné chování. Dále existují také technologické postupy na zvýšení mechanických vlastností (zvýšení pevnosti) pomocí tvrzení, tj. zahřátí skla na hodnotu blížíci se bodu měknutí a poté rychlým stejnoměrným ochlazením. Tato technika má za následek vznik tlakového napětí při povrchu skla, a tudíž dochází k zvýšení tahové únosnosti až na pětinasobek původní hodnoty. Dále je tato výsledná pevnost závislá na rychlosti ochlazování. Při pomalejším ochlazení dostaneme sklo, které nazýváme tepelně zpevněné, kde dosahuje oproti původní hodnotě téměř dvojnásobku pevnosti. Veškeré tyto výsledky platí pouze pro ideální povrch skla, který nebyl nijak poškozen.

Pevnost v tahu je většinou rozhodujícím faktorem pro návrh konstrukcí. U plaveného skla se návrhová pevnost určí dle normy prEN 16612 [1] a to ze vztahu,

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (3.1)$$

- kde $f_{g,k}$ je charakteristická pevnost plaveného skla, $f_{g,k} = 45 \text{ N/mm}^2$,
 k_{mod} modifikační součinitel, zohledňující vliv délky trvání hlavního
(dominantního) zatížení, viz Tab. 3.3,
 k_{sp} součinitel zohledňující úpravu povrchu, viz Tab. 3.4,
 $\gamma_{M,A}$ dílčí součinitel pevnosti plaveného skla. viz Tab. 3.5,

Tab. 3.3: Součinitel modifikační k_{mod}

Zatížení	Délka trvání zatížení	k_{mod}
Užitné	Krátkodobé jednorázové ^a	0,89
Vítr	Krátkodobé, jednorázový poryv větru ^b	1,00
Vítr	Krátkodobé, opakované ^b	0,74
Sníh	Střednědobé ^c	0,44
Rozdíl denních teplot	Střednědobé	0,57
Rozdíl barometrického tlaku	Střednědobé	0,50
Rozdíl ročních teplot	Střednědobé	0,39
Stálé zatížení, vlastní tíha	Dlouhodobé	0,29

^a Hodnota $k_{mod} = 0,89$ vychází z délky trvání zatížení 30 s, s ohledem na typ užitného zatížení a účel budovy může být uvažována jiná hodnota.
^b Hodnota $k_{mod} = 0,74$ vychází ze souhrnné délky trvání zatížení 10 min. s ohledem na účinek bouřky, která může trvat několik hodin. Pro vítr může být uvažována vyšší hodnota součinitele.
^c Hodnota $k_{mod} = 0,44$ představuje reprezentativní zatížení sněhem, s délkou trvání mezi jedním týdnem ($k_{mod} = 0,48$) a třemi měsíci ($k_{mod} = 0,41$). Jiné hodnoty mohou být uvažovány v závislosti na místních klimatických podmínkách.

Tab. 3.4: Součinitel povrchové úpravy skla k_{sp}

Druh skla	Součinitel povrchové úpravy skla k_{sp}	
	Bez úpravy ^b	Pískování
Plavené sklo	1,0	0,6
Tažené sklo	1,0	0,6
Smaltované plavené nebo tažené sklo ^a	(1,0)	(0,6)
Vzorované sklo	0,75	0,45
Smaltované vzorované sklo ^a	(0,75)	(0,45)
Leštěné drátosklo	0,75	0,45
Vzorované drátosklo	0,6	0,36

^a Druhy skla, které nejsou z plaveného skla k dispozici, ale hodnoty součinitele k_{sp} mohou být použity při stanovení návrhové pevnosti pevnostně upravených skel
^b Pro skla s povrchovou úpravou leptáním kyselinou má být součinitel k_{sp} uvažován jako pro skla bez povrchové úpravy.

Tab. 3.5: Součinitel pevnosti skla γ_M

	Mezní stav únosnosti
Plavené sklo ^a	$\gamma_{M,A} = 1,8$
Tepelně upravené sklo	$\gamma_{M,V} = 1,2$

^a Dílčí součinitel pevnosti plaveného skla je použit rovněž při výpočtu návrhové pevnosti pevnostně upravených skel

3.4.1.3 Houževnatost

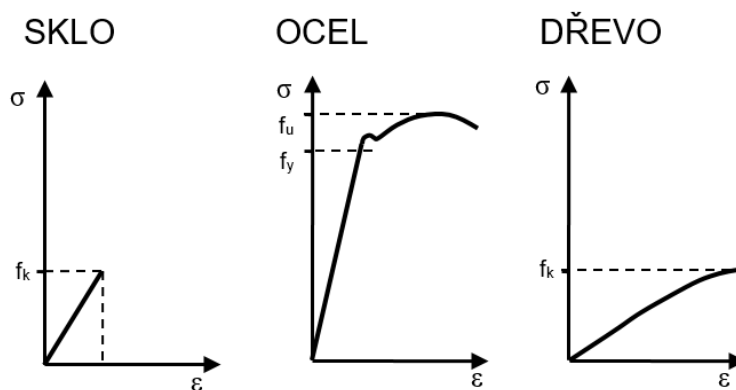
Houževnatost se řadí mezi jednu ze základních materiálových vlastností. Můžeme ji charakterizovat jako odolnost materiálu proti porušení lomem. Tuto vlastnost lze popsat jako schopnost materiálu absorbovat energii šíření trhliny v materiálu.

Houževnatost materiálu především ovlivňuje jeho krystalová mřížka, ale také např. teplota. Dále se také tato vlastnost projeví v charakteru a vzhledu lomové plochy.

Klasifikaci lomů je možné posuzovat dle dvou hlavních kritérií. U prvního se jedná o křehký lom, kde postačuje k šíření jen malé množství energie. Naopak, druhý se nazývá lom houževnatý, a ten se posuzuje dle fraktografie, tedy způsobu porušování.

3.4.2 Křehký lom

Skleněné vzorky se po celou dobu zatěžování chovají jako pružný materiál až do maximálního normálového tahového napětí, které v naprosté většině je dominujícím důvodem porušení. Jakmile dosáhneme této limitní hodnoty, dochází k náhlému kolapsu vzorku (křehkému lomu). V následujícím obrázku (Obr. 3.9) je znázorněn pracovní diagram různých materiálů.

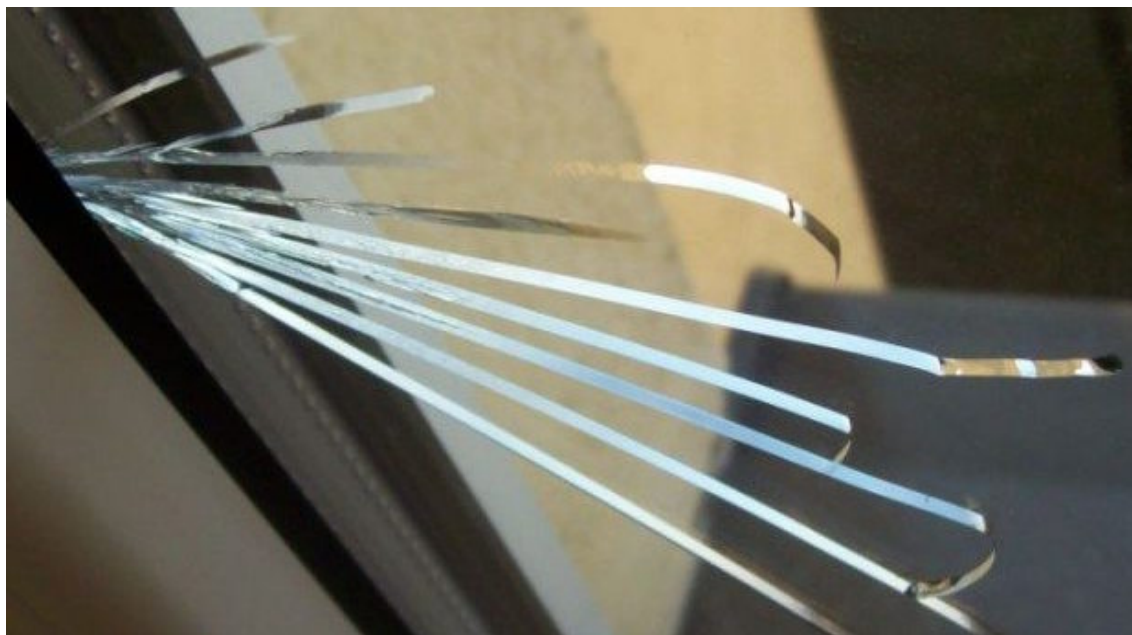


Obr. 3.9: Pracovní diagramy skla, oceli a dřeva [6]

Křehký lom skleněného materiálu je definován jako lom bez viditelného plastického přetvoření. Při tomto typu kolapsu konstrukce téměř nikdy nejsou předem patrné známky varování. Pevnost skleněného materiálu v tlaku je obecně

mnohonásobně (poměr únosností je až dvacetinásobný) vyšší než v pevnost tahu. Jak je zmíněno dále, při experimentálním zkoušení (součást této práce) stejných vzorků byla zjištěna významná proměnlivost v pevnostech těchto vzorků, které jsou důsledkem poruch ve struktuře materiálu nebo drobných mechanických defektů. Z těchto příčin hodnota zjištěná experimentálně je výrazně nižší, než je teoretická hodnota pevnosti. Sílu, při které dojde k náhlému porušení vzorku nelze přesně určit, a tudíž musíme při návrhu vycházet pouze ze statisticky zjištěných maximálních pevností v tahu i v tlaku.

Šíření a rozšiřování trhlin v materiálu u jednoduchých tvarů těles, kde rozložení normálového napětí není složité, je převážně kolmo na směr tahového napětí, což je znázorněno na Obr. 3.10. Maximální rychlost šíření trhliny je experimentálně zjištěná a považována za jasně danou. U běžných skel se pohybujeme rychlostí 1500 m.s-1 naopak u skel křemenných je rychlost vyšší a pohybujeme se rychlostí okolo 2200 m.s-1. Tyto rychlosti jsou teoretické a parametr rychlosti šíření trhliny je dále ovlivněn jednak velikostí napětí, jednak tvarem tělesa. Dále pro šíření trhliny je podstatné, že se zvyšující se lomovou rychlostí se přetváří napěťová oblast v okolí tzv. kořene trhliny a v těsné blízkosti před hlavní (primární) trhlinou se začínají objevovat mikroskopické vedlejší (sekundární) trhliny vytvářející se v místech největšího napětí. Více v kapitole Houževnatost.



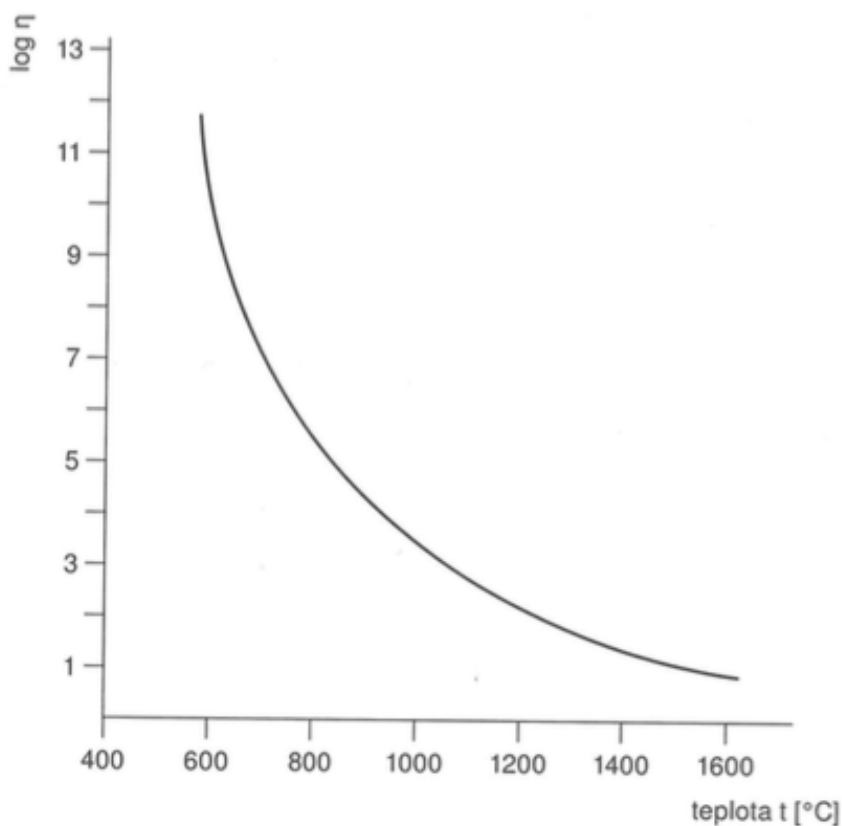
Obr. 3.10: Křehký lom [22]

3.4.3 Tepelné vlastnosti

Jako jedna z hlavních vlastností, stejně jako u jakéhokoliv jiného materiálu, je viskózní křivka. V tabulce (Tab. 3.6) jsou shrnuty základní body pro čiré plavené sklo, z nichž bylo možné vytvořit křivku viskozity jako závislost dekadického logaritmu dynamické viskozity ($\log h$) na teplotě (Graf 3.1).

Tab. 3.6: Vztažné body viskozity floatového skla

Vztažný bod	Viskozita h [Pa.s]	Teplota t [°C]
Bod tavení	10^1	1542,5
Bod zpracování	10^3	1041,5
Littletonův bod měknutí	$10^{6,65}$	732,5
Deformační teplota	10^{10}	593,0
Horní chladicí teplota	10^{12}	556,0
Transformační teplota	$10^{12,3}$	545,0
Dolní chladicí teplota	$10^{13,5}$	480,0



Graf 3.1: Viskózní křivka floatového skla

Další parametry popisující tepelné vlastnosti plaveného skla jsou střední lineární součinitel teplotní roztažnosti, koeficient tepelné vodivosti, odolnost k teplotnímu rázu a měrné teplo (uvedené v Tab. 3.7).

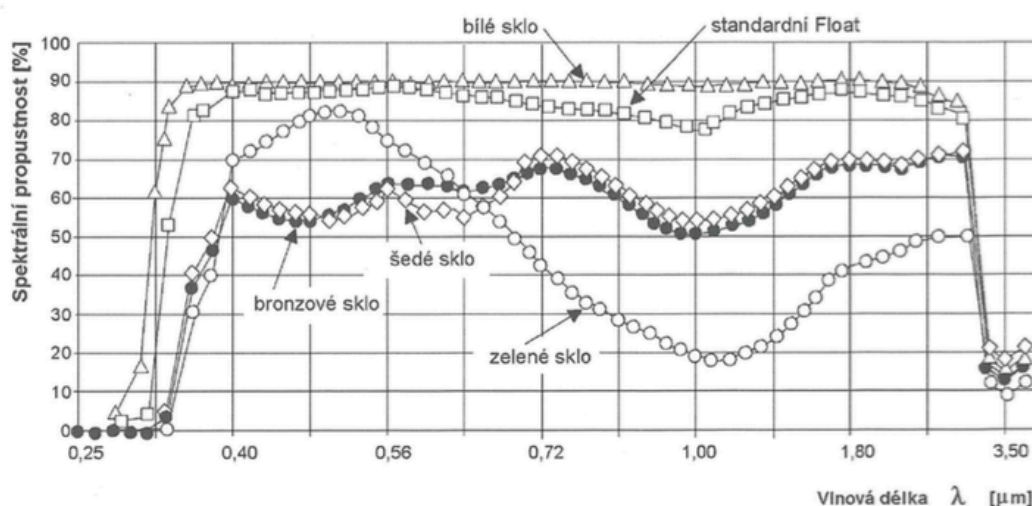
Tab. 3.7: Tepelné vlastnosti floatového skla

Vlastnost	Rozměr	Hodnota
Střední lineární součinitel teplotní roztažnosti $\alpha_{20-300K}$	[K ⁻¹]	9,0.10 ⁻⁶
Koeficient tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	1,0
Odolnost k teplotnímu rázu	[K]	40
Měrné teplo při 23,9 °C	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,88

3.4.4 Optické vlastnosti

Za významnou optickou vlastnost floatového skla se považuje jeho propustnost pro světelné záření. To se řídí převážně čistotou aplikovaných surovin, hlavně obsahem oxidů způsobujících zabarvení čirého skla. Solární propustnost se může zásadně lišit při různých odstínech a intenzit zabarvení daného skla.

Na Graf 3.2 je uveden graf průběhu solární propustnosti a vlnové délky světla pro různá zabarvení float skel. Závislosti byly zjištěny měřením propustnosti solárního záření na tělesech tloušťky 4 mm.



Graf 3.2: Spektrální propustnost float skel

Index lomu světla na běžném plaveném skle je 1,523 při vlnové délce 435 nm.

3.4.5 Elektrické vlastnosti

Pro využití skel i v odvětví elektroniky je nutné znát elektrické vlastnosti tohoto materiálu. A nejen pro elektronické výrobky, ale také například při použití při celoelektrickém tavení skloviny nebo při jejím elektrickém přehřevu.

U plochého skla se pro danou oblast využití převážně zaměřujeme na elektrické vlastnosti za studena. V této oblasti teplot můžeme říci, že běžná skla se chovají jako izolanty. Jako hlavní parametr uvažujeme měrný odpor R (neboli objemový odpor). Experimentálně bylo zjištěno, že měrný odpor při frekvenci 1000 Hz vyjádřený v Ohm.cm, je v závislosti na teplotě následující:

- Teplota 25 °C $\log R = 9,7$
- Teplota 100 °C $\log R = 9,1$
- Teplota 250 °C $\log R = 6,5$

3.4.6 Chemická odolnost

Jako nejběžnější parametr se udává odolnost proti působení vody. Dle www.valleydesign.com/sodalime.htm se počítá, že plavené sodnovápenaté sklo běžného typu řadíme do 3. hydrostatické kategorie dle ISO 719 a DIN 12.111.

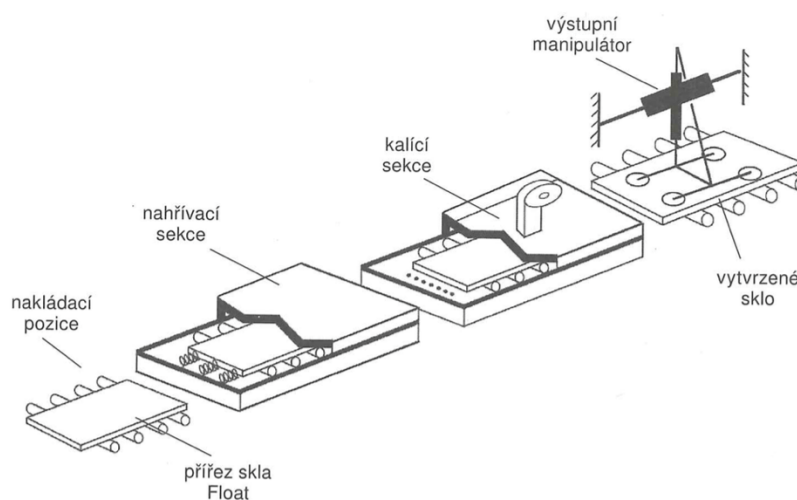
3.4.7 Faktory ovlivňující materiálové vlastnosti plaveného skla

- způsob výroby (vznik zbytkového napětí),
- mikrostruktura materiálu (nehomogenita materiálu),
- tvar a rozměr zkušebních vzorků,
- kvalita povrchu skla (výroba a opracování),
- velikost a druh přiloženého zatížení,
- změna teploty a charakter prostředí,
- rychlost zatěžování vzorku.

U krátkodobého zatížení za teploty 20 °C, kdy se sklo považuje za pružné sklo, se u naprosté většiny případů pohybuje okolo $E = 70\,000$ MPa. Modul pružnosti je ovlivněn krystalickou mřížkou.

3.4.8 Tepelné úpravy plaveného skla

Technologie, kterými je možné modifikovat finální vlastnosti skla, se docílí rozdílnými postupy opětovného zahřátí a následném zchlazením. Těmito různými postupy se dá docílit dalších úprav vlastností plaveného skla. Například se jedná o výrobu tvrzeného skla, skla tepelně zpevněného a skla ohýbaného. Schéma postupu dle Obr. 3.11. Dalšími metodami jsou leštění ohněm, pukáním zapalování a odtavování využívané při výrobě technického a užitkového skla.

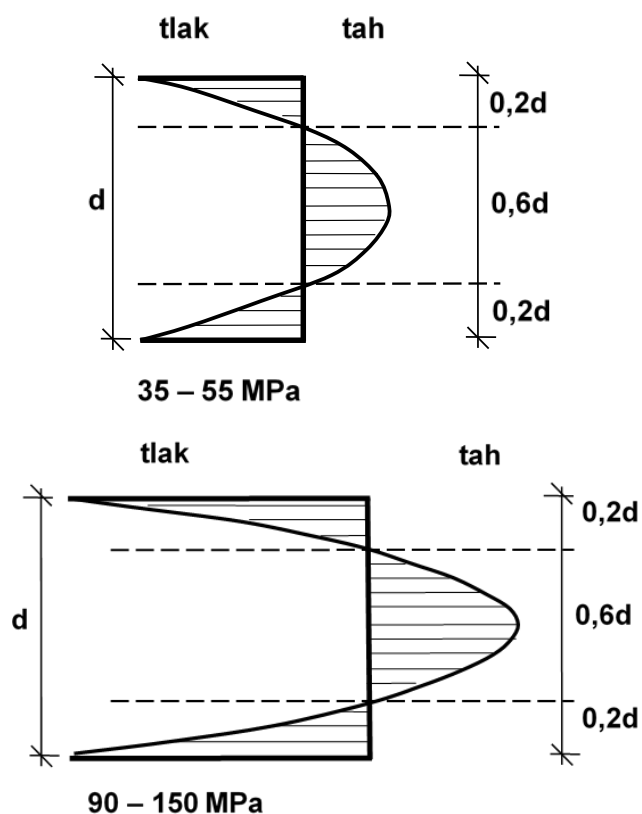


Obr. 3.11: Schéma linky na tepelné tvrzení a zpevnění plochého skla

3.4.8.1 Tepelně tvrzené, zpevněné a chemicky tvrzené sklo

Postup výroby tvrzeného skla, které je určeno jako bezpečnostní, je takový, že se sklo přivede téměř k teplotě měknutí a následně se velice prudce a stejnosměrně ochladí, na rozdíl od klasického postupu, kdy k ochlazování dochází pozvolně.

Hlavní důvod rychlého ochlazení je rovnoměrné vytvoření trvalého tlakového napětí na povrchu skleněných výrobků viz (Obr. 3.12). Takto nazýváme sklo, někdy mylně, jako kalené sklo se zvýšenou mechanickou a tepelnou odolností.

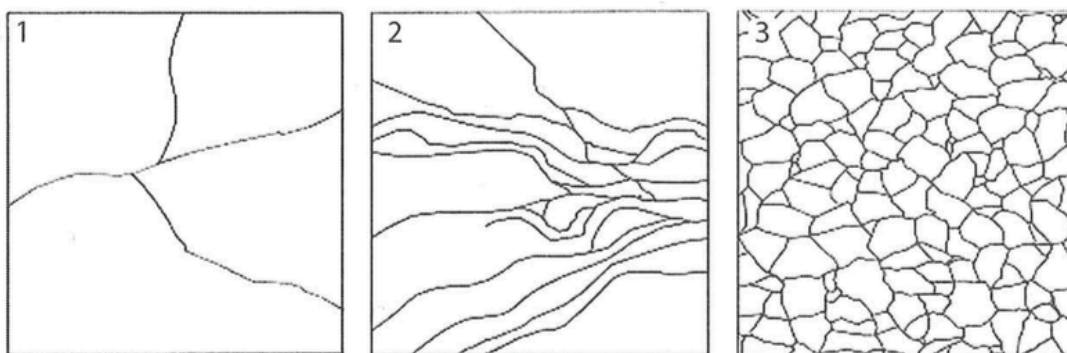


Obr. 3.12: Rozdělení napětí po průřezu

1-tepelně zpevněné; 2-tepelné tvrzené

U tvrzeného skla dochází při porušení k úplnému rozpadu skleněné desky na velké množství tupohranných úlomků. Tepelně vrstvené sklo není možné dále upravovat, jako například řezat, vrtat nebo obrušovat. Výsledný tvar se musí vždy upravit před tepelným tvrzením.

Tepelně zpevněné sklo, neboli polokalené, vzniká při pomalejším ochlazování. U těchto skel předpokládáme nižší pevnost, ale přesto jsou jeho parametry lepší než u běžných skel. Porušení těchto skel spíše připomíná porušení klasického skla, tzn. vznikají větší ostrohranné úlomky.



Obr. 3.13: Ukázka lomového obrazce podle typu tvrzení skla

1-normální sklo; 2-tepelné zpevněné sklo; 3-bezpečnostní sklo (ESG)

Při chemickém tvrzení, stejně jako u předchozích metod, je cílem dosáhnout lepších vlastností než u klasického skla. Především vyšší pevnosti. Ovšem u této metody dochází pouze k úpravě povrchu skla. Chemické zpevnění skla je způsobeno elektronickou lázní, ve které je materiál namáčený, na povrchu přitom dochází k iontové výměně. Vše je urychleno zvýšenou teplotou. Předpokládané zvýšení pevnosti je až na hodnotu 200 MPa. Způsob porušení skleněných tabulí dle Obr. 3.13.

Charakteristická pevnost tepelně tvrzeného skla v tahu za ohybu pro výpočet dle prEN 16612 [1] je nastavena na hodnotu 120 MPa. Pro všechna tepelně upravovaná skla se používá vztah podle normy prEN 16612

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,V}} \quad (3.2)$$

kde $f_{b,k}$, $f_{g,k}$ je charakteristická pevnost upravovaných skel, viz Tab. 3.8,
 k_v , k_{mod} součinitel zpevnění, který zohledňuje způsob výroby, viz Tab. 3.9,
 $\gamma_{M,V}$, $\gamma_{M,A}$ dílčí součinitel pevnosti pevnostně upravovaného skla.

Tab. 3.8: Charakteristické pevnosti upravených skel $f_{b,k}$

Druh skla	Charakteristická pevnost upraveného skla $f_{b,k}$ [MPa]		
	Tepelně tvrzené sklo	Tepelně zpevněné sklo	Chemicky tvrzené sklo
Plavené nebo tažené sklo	120	70	150
Vzorované sklo	90	55	100
Smaltované plavené nebo tažené sklo	75	45	-
Smaltované vzorované sklo	75	45	-

Tab. 3.9: Součinitel zpevnění k_v

Způsob výroby	Součinitel zpevnění k_v
Horizontální způsob výroby (nebo výroba bez použití kleští či jiných úchytů)	1,0
Vertikální způsob výroby (nebo jiný způsob výroby používající kleště či jiná zařízení k úchytu skla)	0,6

3.4.9 Detekce vad skleněných tabulí

Detekce vad u vyrobeného tělesa se provádí laserem dle předepsaného postupu. Aby bylo možné tento postup využít, je nutné, aby povrch skla byl naprosto suchý. Obarvováním povrchu se vyznačují vady, které můžeme zatřídit do pěti kategorií.

Dle počtu, velikosti a rozmístění těchto poruch, systém automaticky zatřídí dané těleso do jasných skupin dle požadavků na kvalitu provedení. Pro tuto technologii je dolní hranice detekce vad 0,5 mm. Při vadě velkého rozsahu je možné vyříznout celý pruh skla, který se následně střepeje.

S rostoucím důrazem na zvyšující se kvalitu skel se tato technologie detekce už jeví jako silně nedostačující a tudíž se postupně do praxe uvádějí další postupy, jako např. metoda ISRA, která detekuje i vady pod rozměr 0,5mm – viz (Obr. 3.14).



Obr. 3.14: Typ laserové detekce nazývající se ISRA

4 VRSTVENÉ SKLO

Vrstvená skla neboli „*laminated glass*“ (Obr. 4.1) jsou definována v normě ČSN EN ISO 12543 [26] a prohlášení o jejich vlastnostech se vydává podle normy ČSN EN 14449 [17]. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších výrobků v současné době.



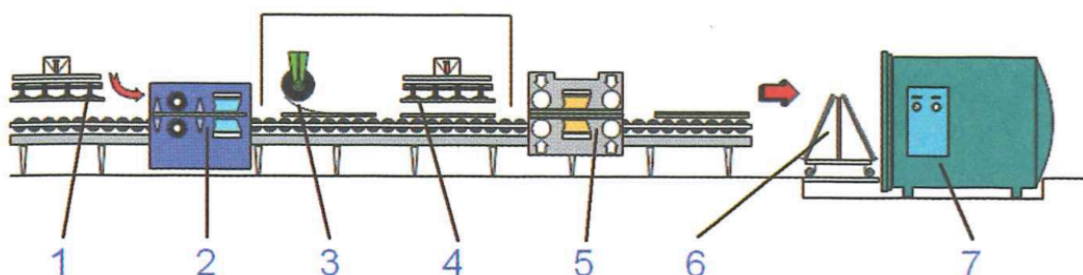
Obr. 4.1: Příklady vrstveného skla se spojující PVB fólií

4.1 Popis

Vrstvené sklo je definováno jako těleso, které je tvořeno dvěma nebo více skleněnými tabulemi vzájemně spojenými jednou nebo více mezivrstvami. Takto vrstvené sklo se společně spřahuje pomocí určitého typu lepené fólie. Dle typu, délce zatížení a typu fólie se spřažené těleso chová jako jeden celek. Z experimentů bylo zjištěno, že délka zatížení zásadně ovlivňuje výsledné spřežení celku.

4.2 Výroba vrstveného skla

Fáze výroby vrstveného skla, lze rozdělit na následující výrobní kroky: příprava skleněné tabule, pokládka fólie, předlisování, popřípadě řezání a lisování při vyšší teplotě zobrazeno na obázku (Obr. 4.2). Nejvýznamnějším požadavkem při výrobě vrstveného skla je důraz na čistotu a bezprašnost prostředí, ale významným ovlivňujícím faktorem je také statická elektřina. Tyto požadavky zásadně ovlivňují výslednou kvalitu souvrství.



Obr. 4.2: Schéma automatické výrobní linky na výrobu vrstveného skla

1 – pokládání skla; 2 – mytí; 3 – aplikace fólie; 4 – pokládka horního skla; 5 – předlisování; 6 – překládání na stojan; 7 – autokláv

4.2.1 Příprava skla

Přípravou skla na výrobu vrstveného skla se rozumí pouze vytvoření přířezů požadovaného tvaru a jejich manipulací - pokládky na pracovní stůl nebo odstranění posypového prášku, mytí a dokonalé osušení.

4.2.2 Příprava fólie a prokládání tabulí

Polyvinylbutyralová fólie (PVB) je nejčastěji používanou fólií, která funguje jako spojovací prvek, a je dodávána ve speciálních hliníkových obalech. V těchto obalech je

fólie uzavřena ve vakuu, což zabraňuje přístupu vlhkosti. Přístupu vlhkosti se musí zabránit z toho důvodu, že fólie PVB chemicky váže podíl vody, čímž by došlo ke změně některých jejích vlastností. Při uchovávání fólií je také nutné dodržovat teploty skladování, ta se pohybuje v rozmezí 8 – 10 C.

Vkládání fólií mezi vrstvy skla je prováděno ručně nebo automaticky. Při výrobě rovinných vrstvených skel se provádí ve specializovaných klimatizovaných halách, kde se odvíjí a nanáší na vrstvy skel. V těchto halách je v mírný přetlak a jsou naplněny filtrovaným klimatizovaným vzduchem o teplotě 25 C a vlhkosti vzduchu 30%.

4.2.3 Předlisování

Následuje předlisování. Provádí se pomocí lisovacích válců ve dvou fázích při teplotě 70 °C. Při první fázi dochází k předlisu a tím dojde k odstranění vzduchu mezi vrstvami. V následné druhé fázi dojde k uzavření okrajů. Důvodem je v co největší možné míře odstranit zbytkový vzduch a předběžně spojit obě tabule skla pomocí fólie. Obdobný postup je i při předlisování ohýbaných tvarovaných skel, ale v tom případě je technologie složitější, protože přítlačné válce musejí být profilované, aby co možná nejvíce kopírovaly tvar skla.

4.2.4 Řezání

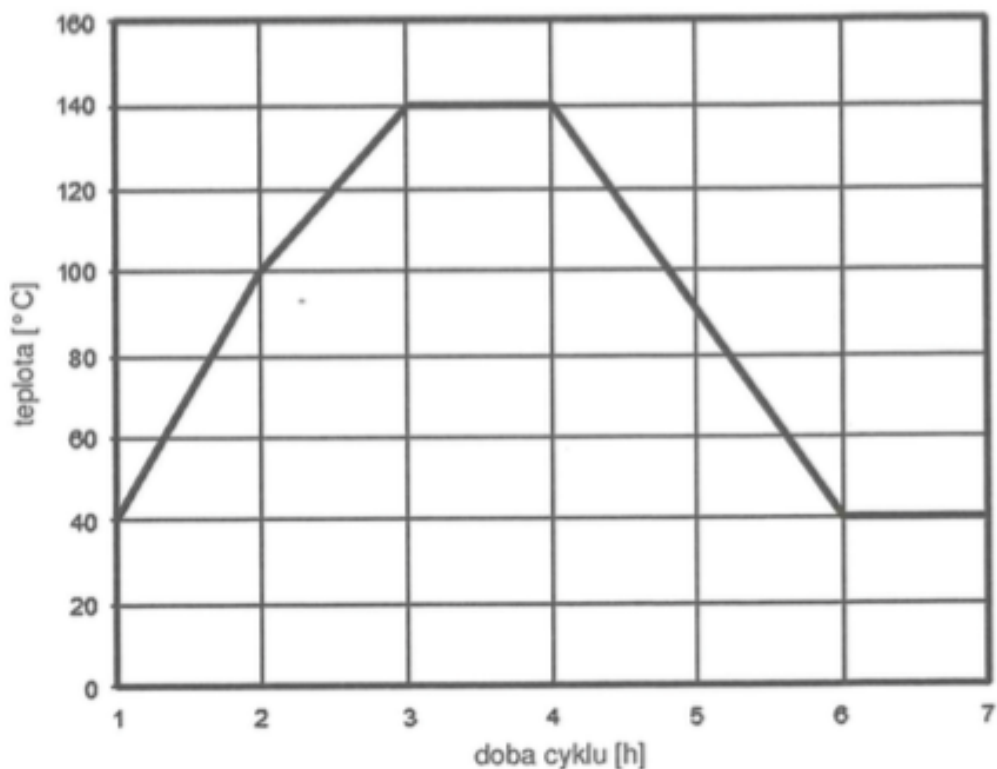
K řezání skla dochází při výrobě menších rozměrů, než jsou základní rozměry na výrobní lince. K řezání se používají řezací kolečka vyrobené z tvrdokovu, která jsou pevně upevněná v řezacích hlavách na řzacím mostě. U dvou vrstvených skleněných tabulí je nutné, aby došlo k řezu na spodní a svrchní straně přesně nad sebou. K řezání se používají kapaliny na bázi oleje. Kapalina musí být dostatečně těkavá a omyvatelná. Pomocí lámacích válců se naříznuté sklo odděluje. Opět u dvouvrstvých skel se postupně odlomí svrchní a následně spodní vrstva.

Abychom zabránili poškození hran tabulí, dochází k odtahování obou lámaných částí při současném ohřevu odporovým drátem. Tímto postupem také dojde k přetavení fólie spojující vrstvy skla.

Speciální postup se používá při odlamování vícevrstevných skleněných tabulí, kde k řezání musí dojít pomocí řezného diamantového kotouče.

4.2.5 Lisování

Finální procedura se nazývá lisování a provádí se v autoklávu pro dosažení dokonalého spojení vrstev skla pomocí fólie PVB. To se provádí po předlisu, abychom mohli jednotně transportovat souvrství, ale také pro efektivnější využití prostoru v autoklávu. V autoklávu dojde k hermetickému uzavření víka a pomocí kompresorů dojde ke zvýšení tlaku současně s ohřevem vnitřních prostor. Celá procedura lisování trvá 5,5 – 6,5 hodiny dle tloušťky fólie. Celou tuto dobu se udržuje vnitřní teplota na 140 C a tlaku 10 barů. Po dokončení lisování se teplota a tlak pozvolně snižuje – viz (Graf 4.1).



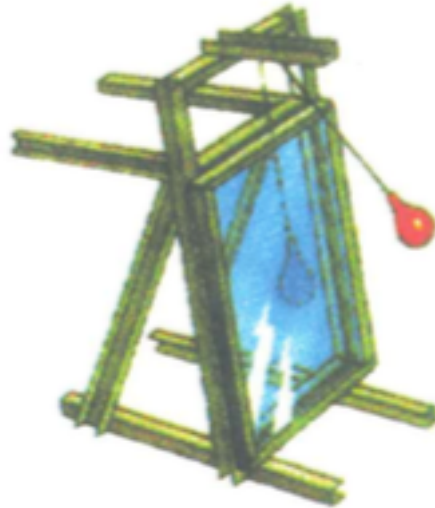
Graf 4.1: Časový průběh teploty při lisování v autoklávu

4.3 Zkoušky vrstveného skla

Z důvodu různých možností využití vrstvených skel - především jako bezpečnostních - je potřeba ověřit jejich vlastnosti. Například to, že úlomky skla po porušení zůstávají spojeny pomocí fólie. Proto provádíme řadu zkoušek těles, které prověří materiál.

1) Kyvadlová zkouška

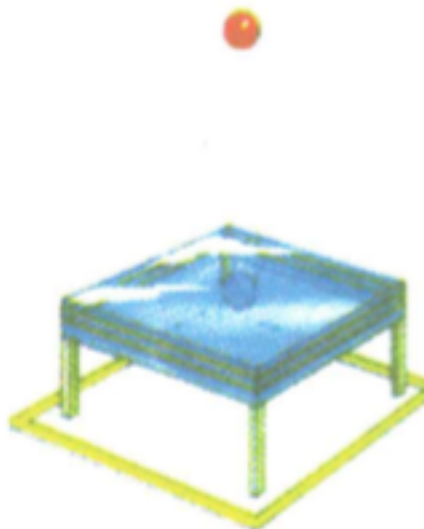
Kyvadlová zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12600 [28]. Simuluje náraz lidského těla do tabule skla – viz (Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Kyvadlová zkouška

2) Pádová zkouška

Pádová zkouška se provádí dle normy ČSN EN 356 [29]. Simuluje náraz tvrdého předmětu na tabuli skla viz – (Obr. 4.4).



Obr. 4.4: Pádová zkouška

3) Zkouška sekerou

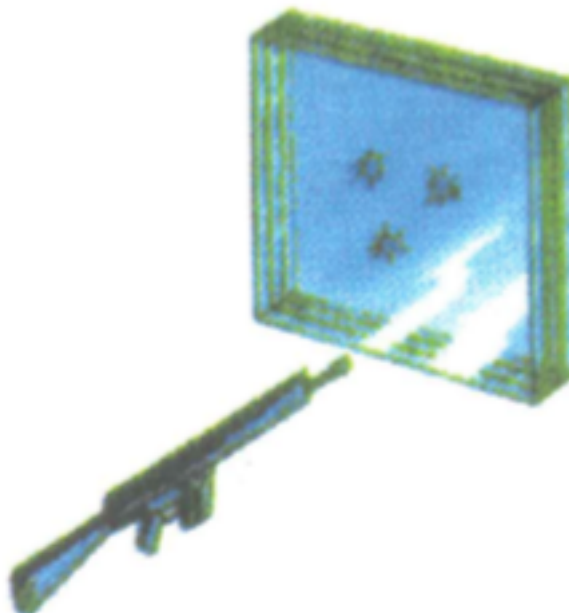
Zkouška sekerou se provádí dle normy ČSN EN 356 [29]. Zkouška odolnosti vniknutí do objektu skrz vrstvené sklo – viz (Obr. 4.5).



Obr. 4.5: Zkouška sekyrou

4) Zkouška odolnosti proti střelám

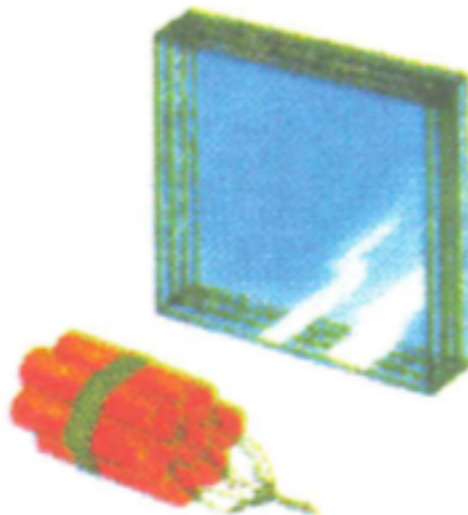
Vzorek při této zkoušce musí odolat typu různých střel a určitý počet zásahů dle ČSN EN 1063 [30] – viz (Obr. 4.6).



Obr. 4.6: Zkouška odolnosti proti střelám

5) Zkouška odolnosti proti výbuchovému tlaku

Zkouška odolnosti proti tlaku vyvolaným výbuchem se provádí dle normy ČSN EN 13541 [31] – viz. (Obr. 4.7).



Obr. 4.7: Zkouška odolnosti proti výbuchovému tlaku

4.4 Typy fólií do mezivrstev vrstveného skla

Hlavní myšlenkou je zajistit bezpečné chování skleněných vrstev při, a také po porušení celé tabule nebo její části, nebo zvýšit odolnost skla. Definici výrobku, výroby a její kvalitu ve stavebnictví stanoví závazná evropská norma EN 14449 [32] popřípadě národní norma ČSN EN 144449 [27].

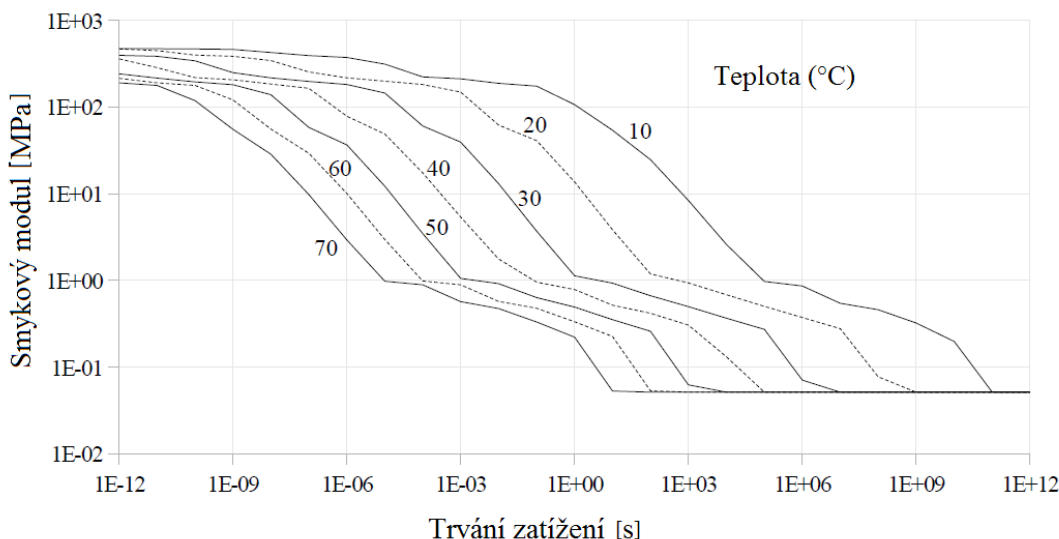
Pružné mezivrstvy nemusejí plnit pouze statickou funkci, ale také mohou plnit funkci dekorativní, např. použitím chemického matování, potisku, ale také barevných úprav.

Standartními elastickými materiály jsou nejčastěji fólie Polyvinylbutyral (PVB) dále etylvinylacetát (EVA) a ionoplast SentryGlassPlus (SGP). V této době, už ne příliš používanou fólií je pak fólie založená na bázi pryskyřice (GH) z důvodu technologicky neautomatizované výroby a dalších zásadních nevýhod.

Jednotlivé typy fólií se liší složením a s tím souvisejícími materiálovými vlastnostmi, které je třeba uvážit již při návrhu konečného produktu.

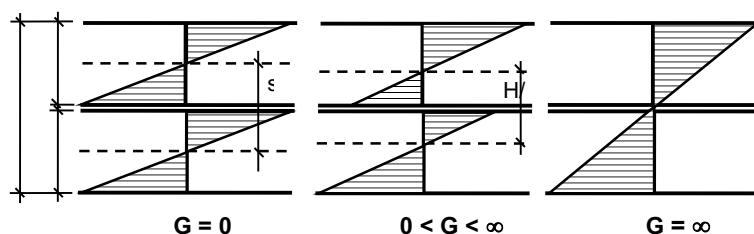
4.5 Smykový modul fólií pro lepené vrstvy skleněných tabulí

Hodnota smykového modulu je proměnná v závislosti na rozdílné teplotě a délce trvání zatížení. Tato závislost je zobrazena na grafu (Graf 4.2), ze kterého lze vyčíst, že hodnoty smykového modulu se se změnou teploty a změnou délky zatížení mění.



Graf 4.2: Závislost smykového modulu G na teplotě a době trvání zatížení pro fólie PVB

Parametr smykového modulu fólie přímo ovlivňuje spolupůsobení jednotlivých vrstev skleněných tabulí a rozdělení napětí po průřezu. Smykový modul také ukazuje konečné deformace daného prvku. Na Obr. 4.8 je zobrazen průběh napětí pro jednotlivé parametry smykového modulu. Od hodnoty $G = 0$ bez jakéhokoliv sprážení až po hodnotu kdy skleněné tabule pomocí fólie tvoří monolitický prvek.



Obr. 4.8: Průběh napětí v závislosti na smykovém modulu fólie dvouvrstvého skla

4.6 Použití vícevrstvých skel ve stavebnictví

Použití vrstvených skel v poslední době nachází obrovské uplatnění ve stavebnictví a jiných oborech. Vrstvená skla se uplatňují jako nenosné i nosné konstrukční prvky. Zatím nejčastěji se používají pro výplně okenních otvorů, celoskleněných fasád, vnitřních příček a dalších doplňků do interiérů.

V poslední době se, ale čím dál častěji setkáváme s vrstvenými skly i u nosníků, sloupů či celoskleněných schodišť a zábradlí a dalších stavebních konstrukcí:

- pochozí skleněné plochy
- skleněné markýzy
- protihlukové stěny
- výtahové šachty
- skleněná zábradlí
- kabiny výtahů
- skleněné dveře
- skleněné příčky
- skleněný nábytek
- zasklení velkých fasád
- skleněné nosníky

5 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Pro účely zkoušení bylo dodáno a následně otestováno deset dvouvrstvých tepelné tvrzených skel (ESG) spojených dvouvrstvou fólií (PVB).

5.1 Experimentální zkoušení těles v závislosti na rychlosti zatěžování

Tato experimentální zkoušení vždy probíhala ve dvou fázích, přičemž v první fázi se vzorek zatěžoval do maximální únosnosti spodní tahové vrstvy a následně současně pořizovaný záznam pokračoval do úplného odtížení tak, abychom zjistili zbytkové napětí.

Fáze druhá probíhala obdobně, pouze s tím rozdílem, že takto docházelo k působení pouze na vrstvy svrchní. V této práci jsem se zabýval pouze fází první, kdy došlo k porušení pouze spodní tabule skla.

5.1.1 Popis experimentu

V této kapitole jsou popsány a vyhodnoceny experimenty statické zatěžovací zkoušky na dvouvrstvých skleněných tabulích, zatížených čtyřbodovým ohybem, které byly provedeny v souladu s normami ČSN EN 1288-3 [16].

Účelem zatěžovacích zkoušek bylo prokázání parametrů skleněných tabulí a lepených fólií a to včetně rozdělení normálového napětí po průřezu a výsledných pevností těchto tabulí v tahu a tlaku za ohybu. Dále při každém měření probíhal záznam zatěžovací síly a průhybů tabulí uprostřed rozpětí.

Postup zatěžování, jak už byl zmíněn výše, se prováděl ve dvou fázích. Při první fázi došlo k zatížení 9 vzorků, z nichž každé tři vzorky byly zatěžovány stejnou rychlostí viz (Tab. 5.1) níže. Následně po porušení spodní tažené vrstvy došlo k úplnému odtížení vzorku a až poté bylo zastaveno měření a tím ukončena první fáze měření. Takovýmto postupem bylo zjištěno i zbytkové napětí v horní vrstvě skleněné tabule.

Postup při druhé fázi byl obecně obdobný, jen při rychlosti zatěžování byla rychlost nastavena u všech těles stejně, a to rychlost 2,0 mm.min. Jakmile došlo k porušení i původně svrchní tlačené vrstvy, byla ukončena i druhá fáze zatěžování.

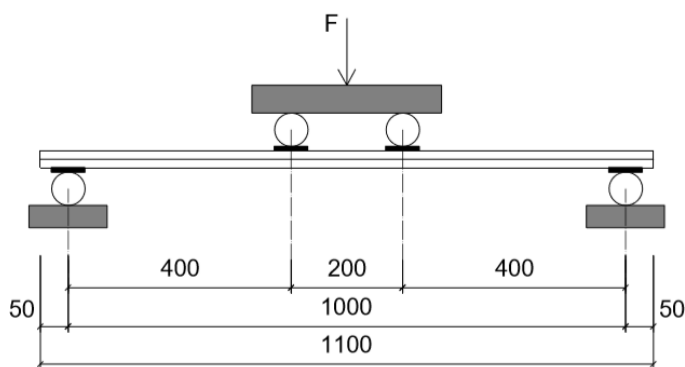
Takovýto postup byl zopakován i u následných zbylých vzorků. Záznam probíhal na záznamové ústředně Dewetron, která zaznamenávala údaje z 6 odporových tenzometrů, dvou snímačů průhybu a vnášené síle od zatěžovacího přístroje MTS-Q.

Tab. 5.1: Označení těles a jejich rychlosti zatěžování

Označení zkušebních	Zatížení vyvolané posunem příčnicku
ESG_PVB_01	2 mm/min
ESG_PVB_02	2 mm/min
ESG_PVB_03	2 mm/min
ESG_PVB_04	0,5 mm/min
ESG_PVB_05	0,5 mm/min
ESG_PVB_06	0,5 mm/min
ESG_PVB_07	0,125 mm/min
ESG_PVB_08	0,125 mm/min
ESG_PVB_09	0,125 mm/min

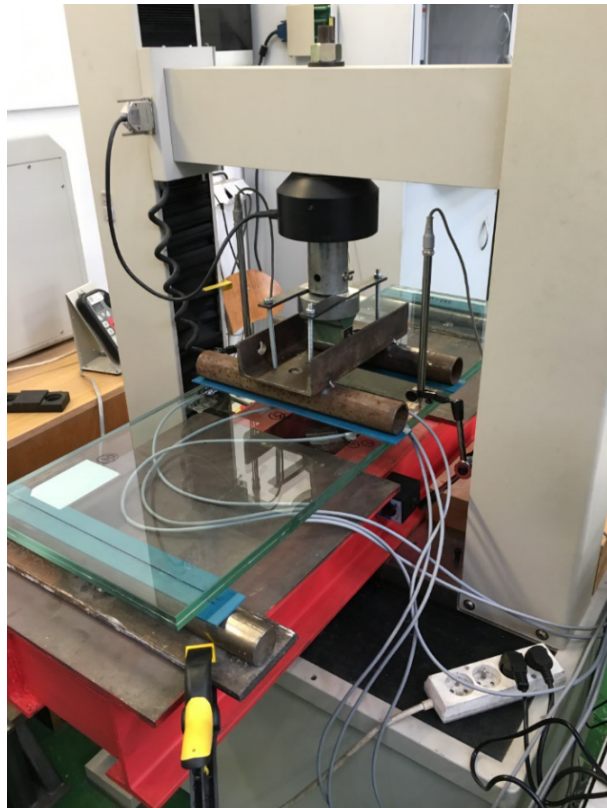
5.1.2 Zatěžovací soustava

Zkoušení probíhalo usazením zkušebního tělesa na dvojici ocelových válců o průměru 40 mm a délce 500 mm - viz foto z experimentu Obr. 5.3, které byly v osové vzdálenosti 1000 mm od sebe. Roznos zatížení ze zatěžovací ústředny MTS byl realizován přes roznášecí soustavu dvou ocelových válců o vnějším průměru 49 mm a osové vzdálenosti 200 mm, jak je zobrazeno na obrázcích Obr. 5.1. Roznášecí soustava byla usazena souhlasně s osou usazení zkušebního tělesa v podélném i příčném směru, tzn. vzdálenost osy podporového válce a osy bližšího válce roznášecí soustavy je 400 mm.

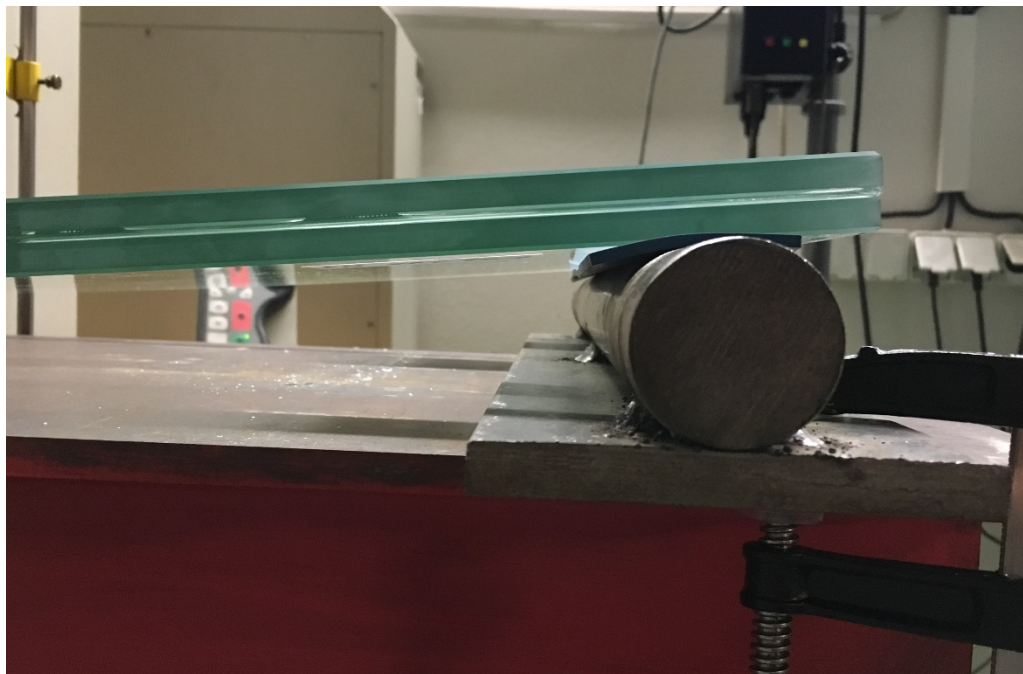


Obr. 5.1: Schéma zatěžovací soustavy

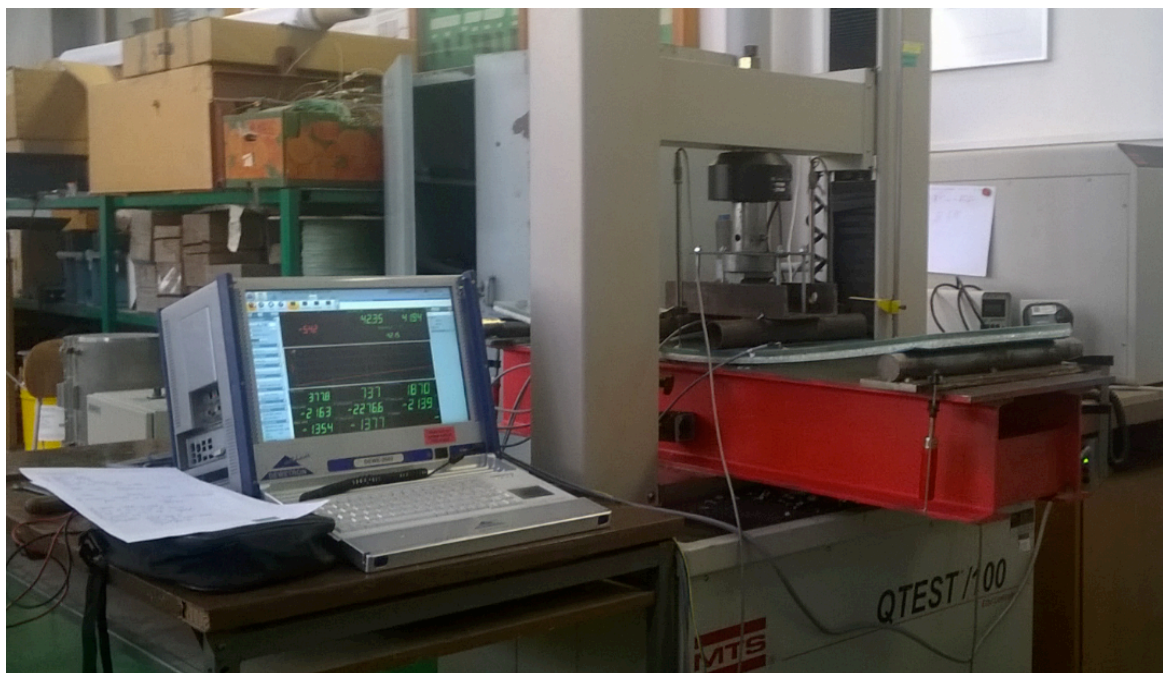
Z důvodu ochrany ocelových a skleněných kontaktních ploch byly mezi tyto materiály vloženy pryžové podložky, které zabraňují mechanickému poškození. Reálné usazení do přístroje je zobrazeno na následujícím obrázku – Obr. 5.2



Obr. 5.2: Těleso ve zkušebním zařízení



Obr. 5.3: Detail uložení tělesa na podporový válec

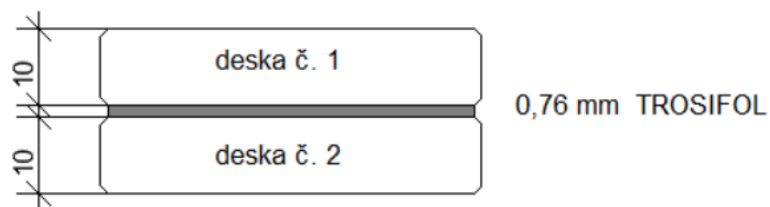


Obr. 5.4: Zkušební zařízení MTS-Q se záznamovou ústřednou Dewetron

Řídící zkušební zařízení MTS-Q zatěžovalo rovnoměrnou rychlostí vždy tři vzory skleněných tabulí rychlostí 2,0 mm.min., 0,5 mm.min. a následně 0,125 mm.min. Celkové schéma zatěžovací soustavy dle (Obr. 5.4).

5.1.3 Zkušební tělesa

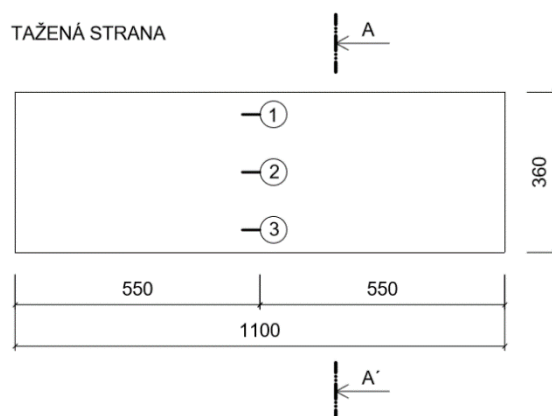
Zkušební tělesa byla vyrobena ze dvou skleněných tabulí tepelně tvrzených skel (ESG) navzájem zmonolitněných pomocí polymerní fólie typu Trosifol BG R 20. Rozměry dodaných vzorků skel byly 1100 x 360 mm o tloušťce 10 mm viz (Obr. 5.5). Tato skla byla spojena pomocí fólie ve dvou vrstvách o celkové tloušťce 0,76 mm viz Obr. 5.5. Tedy celková tloušťka souvrství činí 20,76 mm s udávanou hmotností 20 kg.



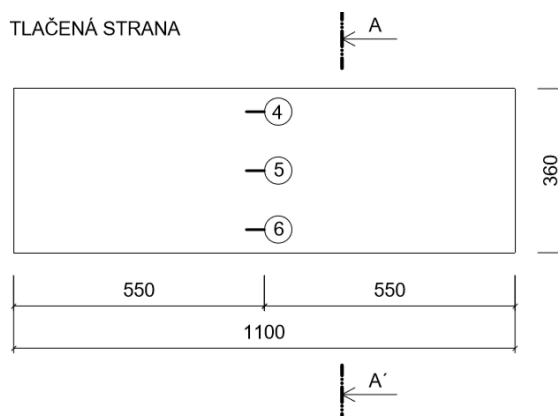
Obr. 5.5: Příčný řez souvrstvím tabule

Experimenty byly prováděny v laboratořích za ustálené teploty v rozmezí 20 – 22 °C, kde také byla skladována veškeré zkušební tělesa chráněna před přímým slunečním zářením a mechanickým poškozením.

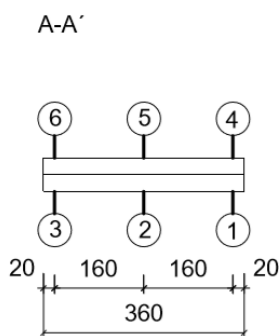
Každé těleso bylo osazeno 6 kusy odporových jednosměrných tenzometrů 10/120 – LY11 k měření normálového napětí. Detailní informace viz Příloha B. Osazení tenzometrů se řídilo schémata dle - Obr. 5.6 a Obr. 5.7. Tenzometry s čísly 1, 2 a 3 jsou určeny pro měření normálových tahových napětí a tenzometry s čísly 4, 5 a 6 měří napětí tlakové. Přičemž tenzometry s čísly 1 a 4, 2 a 5, 3 a 6 byly umístěny u vzorku nad sebou podle Obr. 5.8.



Obr. 5.6: Schéma osazení tenzometrů na tažené straně

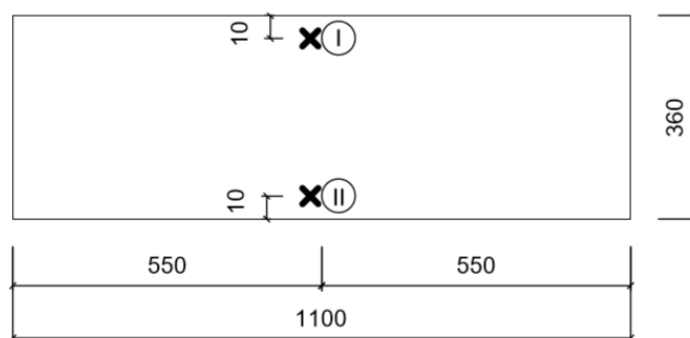


Obr. 5.7: Schéma osazení tenzometrů na tlačené straně



Obr. 5.8: Schéma rozmístění tenzometrů v příčném řezu A-A

K záznamu svislých průhybů skleněné tabule bylo použito dvou kalibrovaných snímačů průhybu s rozsahem ± 50 mm umístěnými uprostřed rozpětí po okrajích podélné strany, 10 mm od kraje dle - Obr. 5.9. Tyto průhybové snímače jsou označeny římskými čísly I. a II.



Obr. 5.9: Schéma rozmístění snímačů průhybu

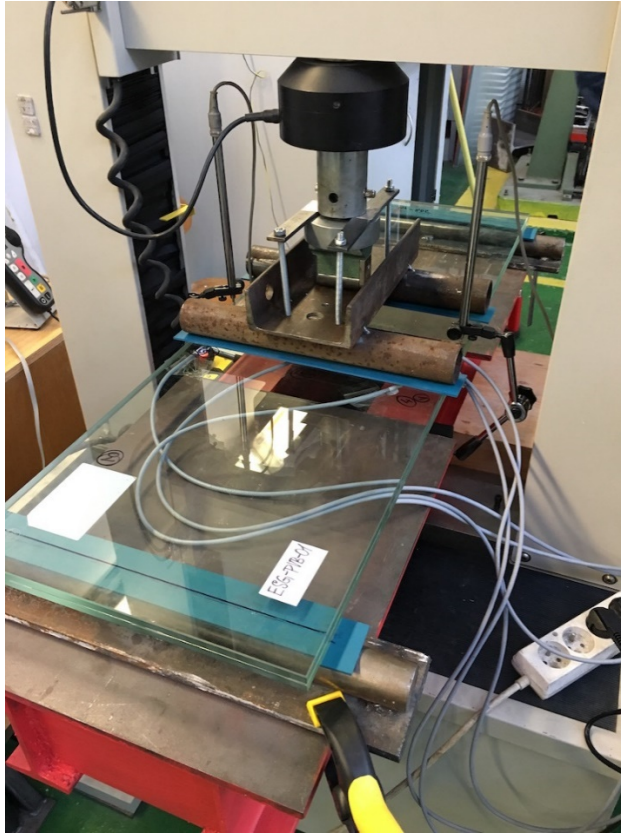
5.1.4 Výsledky měření

V následující kapitole jsou zobrazeny naměřené hodnoty z experimentu popsaného výše. Značení zkušebních těles je popsán v tabulce (Tab. 5.1) Měření proběhlo na 9 vzorcích se třemi rychlostmi. Zatěžování probíhalo ve dvou fázích pro neporušené dvouvrství a následně, když působila pouze jedna vrstva souvrství.

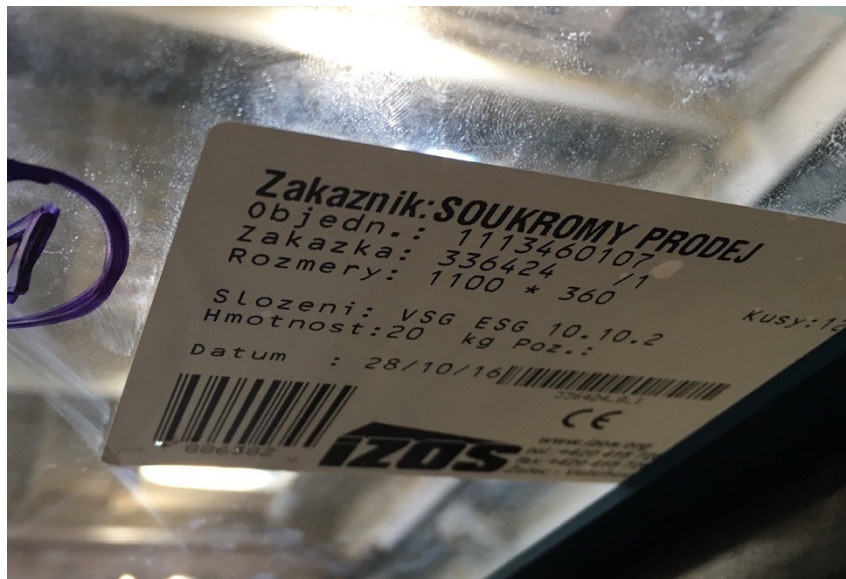
5.1.4.1 ESG-PVB-01

Obr. 5.10 zobrazuje umístění zkušebního tělesa v zatěžovacím zařízení před započítím experimentu. Poloha tělesa odpovídá schématu na obrázku (Obr. 5.1). Na

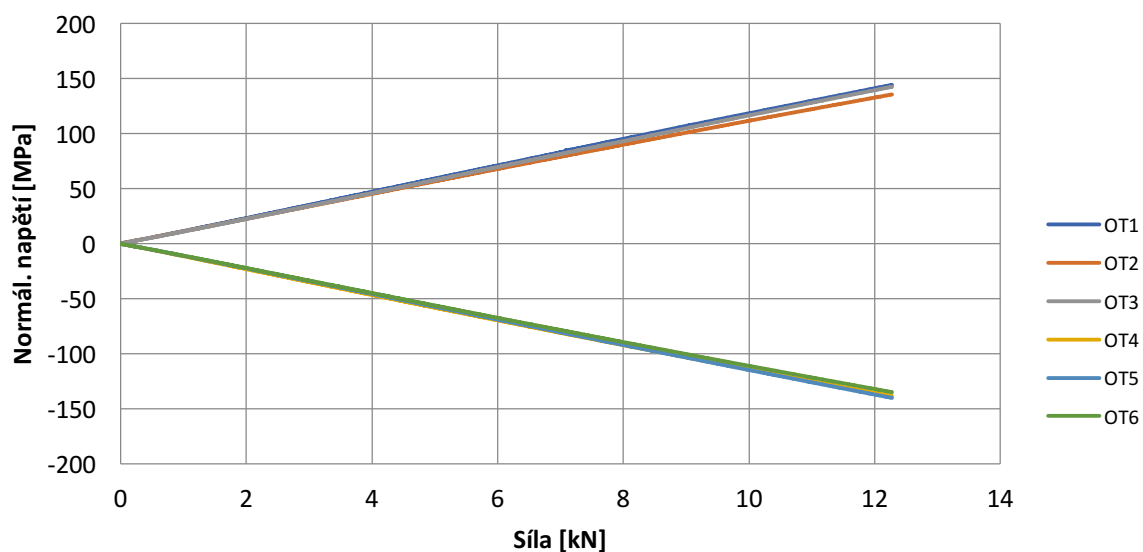
následujícím obrázku (Obr. 5.11) je označení zkušebního tělesa dodavatelem. Rychlost zatěžování 2,0 mm.min. dle (Tab. 5.1).



Obr. 5.10: Těleso ESG-PVB-01 ve zkušebním zařízení

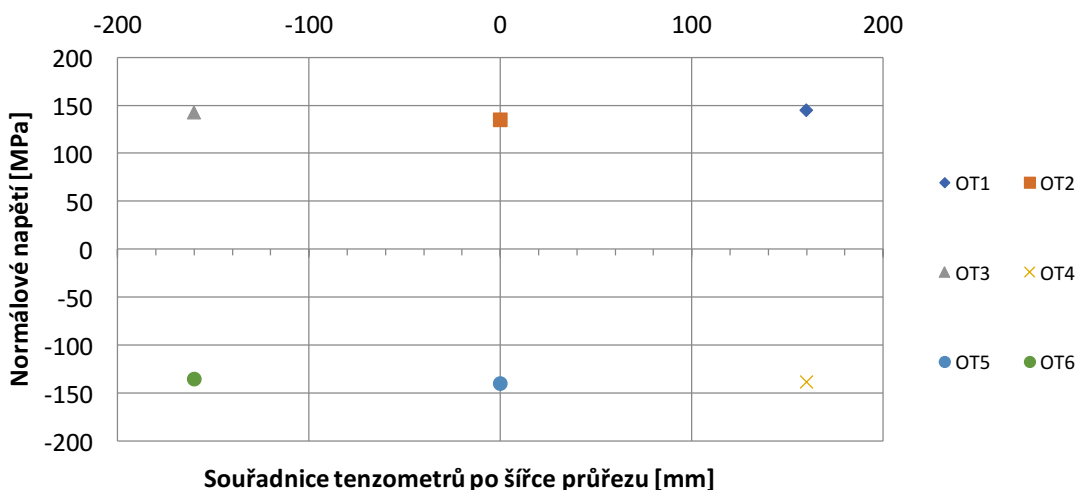


Obr. 5.11: Označení zkušebního tělesa dodavatelem



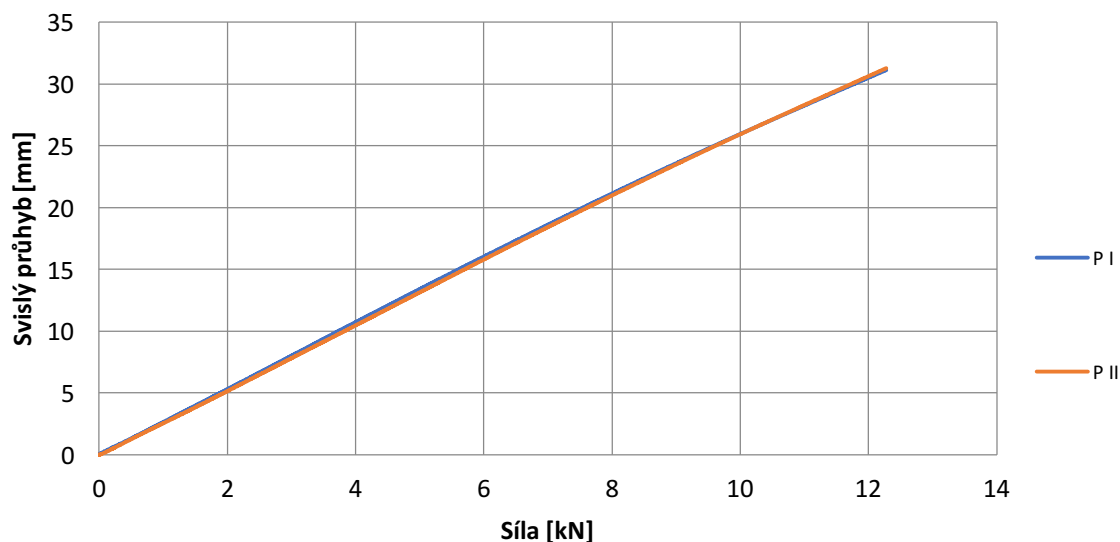
Graf 5.1: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

Graf 5.1 ukazuje naměřené hodnoty první fáze. Průběhy vycházejí lineárně a porušení nastalo při hodnotě síly 12,27 kN. Rozdělení napětí po průřezu je zobrazeno na následujícím grafu (Graf 5.2). Největší normálové tahové napětí, které bylo naměřeno při kolapsu bylo zaznamenáno na tenzometru OT1 a to 144,47 MPa. Pro napětí tlakové byla hodnota porušení 140,0 MPa naměřená u tenzometru č.5.

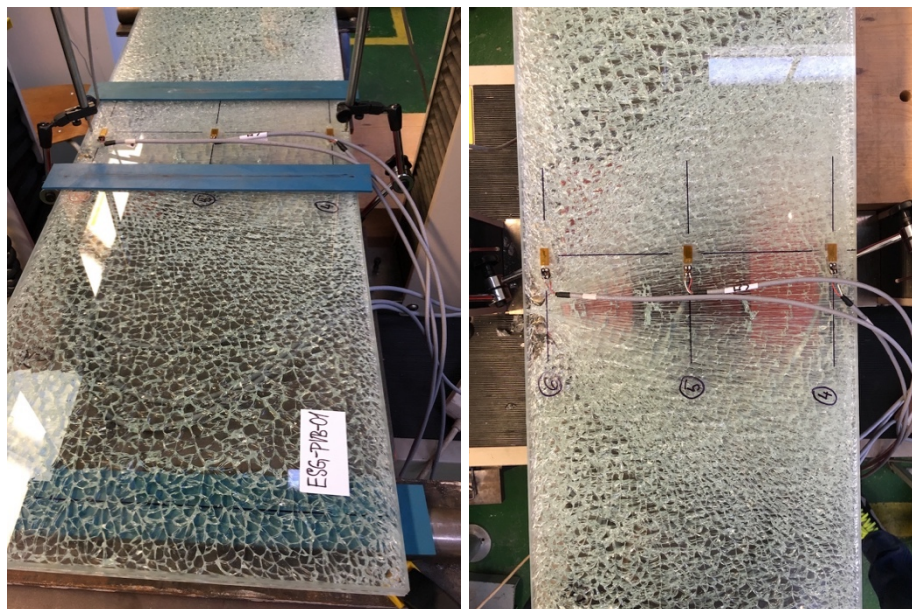


Graf 5.2: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení

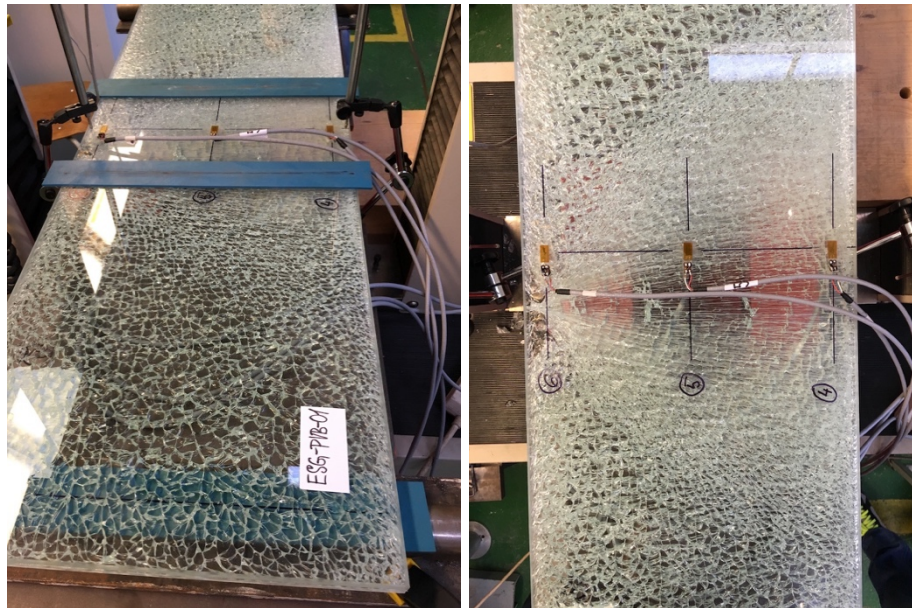
Graf 5.3 znázorňuje průběh nárůstu průhybu v závislosti na svislé síle vyvolané posunem příčnicku při rychlosti 2,0 mm.min. Maximální průhyb v době porušení byl 31,29 mm.



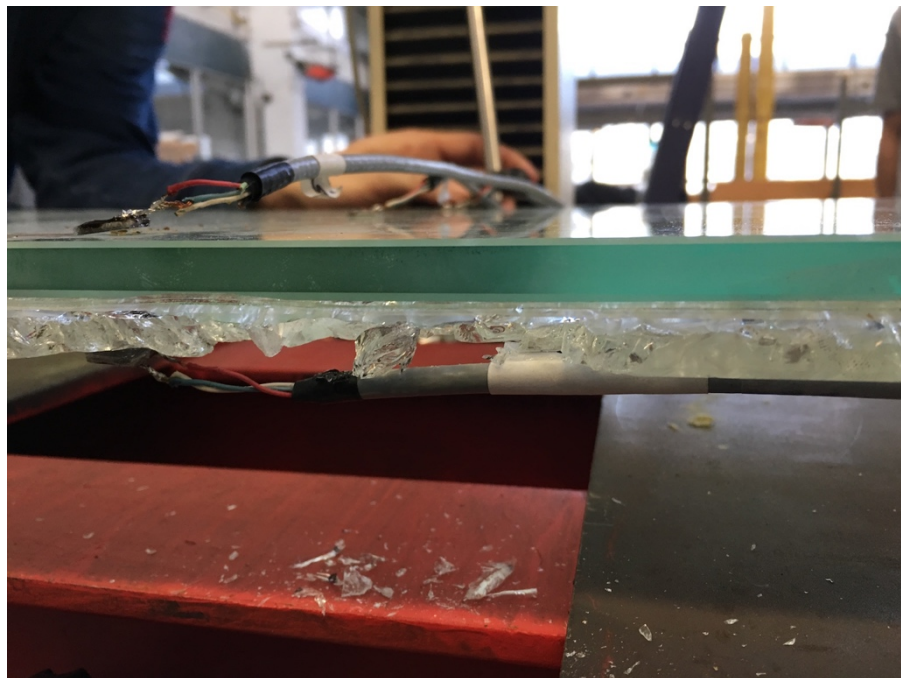
Graf 5.3: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí



Obr. 5.12 a Obr. 5.13 na konci této kapitoly ukazují způsob porušení spodní tabule v okamžiku překročení její tahové pevnosti. Porušení nastává náhle bez jakéhokoliv varování. Porušení nastalo téměř uprostřed mezi zatěžovacími válci a poruchy se šířily všemi směry v celé ploše skleněné tabule. Dle typu porušení je zřejmé, že jde o tepelně tvrzené sklo.



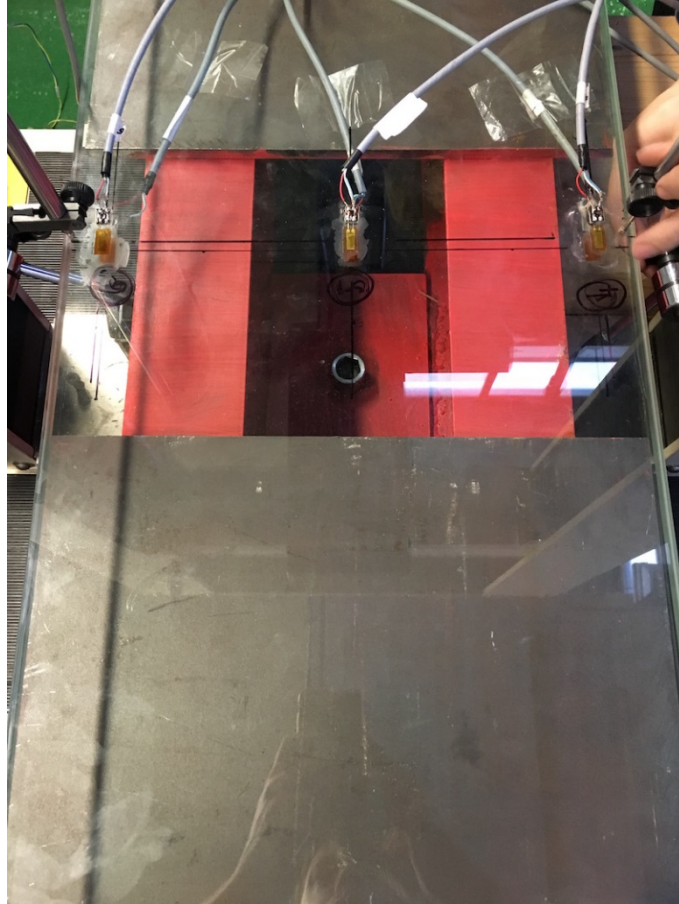
Obr. 5.12: Způsob porušení zkušebního tělesa



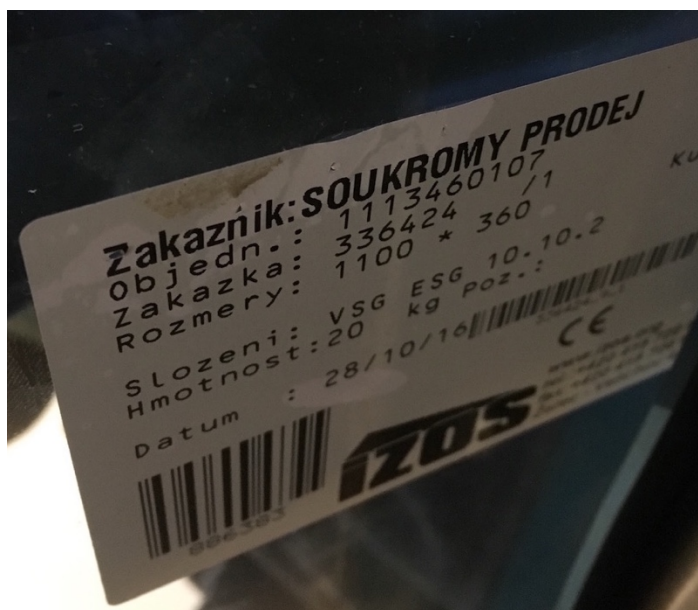
Obr. 5.13: Způsob porušení zkušebního tělesa – bokorys

5.1.4.2 ESG-PVB-02

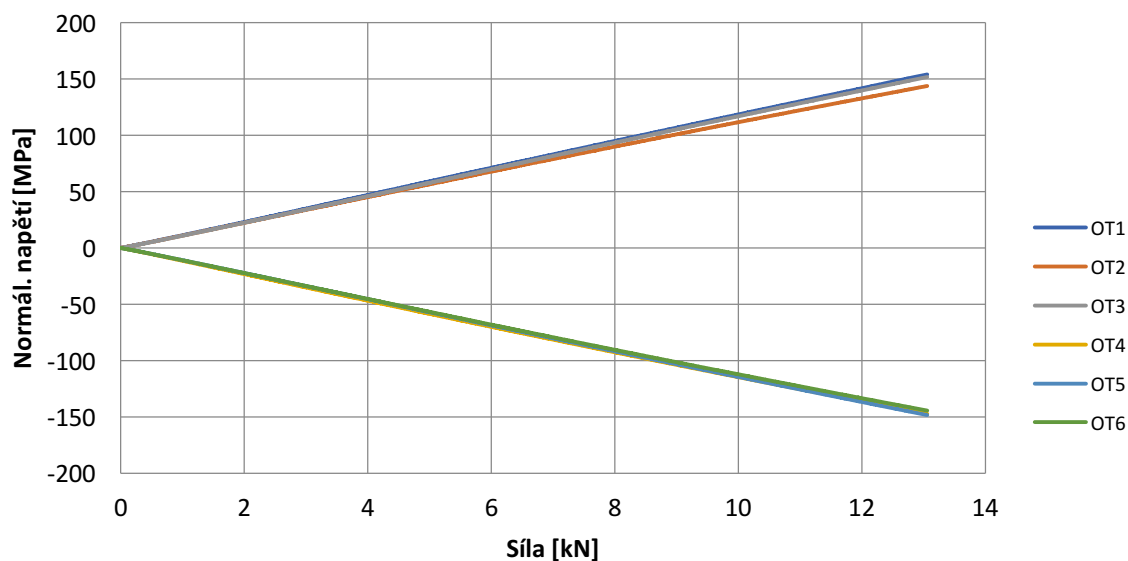
Obr. 5.14 ukazuje rozmístění tenzometrů a snímačů průhybu v příčném řezu zkušebního tělesa. Poloha odpovídá výše zobrazenému schématu. Těleso bylo zatíženo zatěžovací soustavou MTS-Q rychlostí 2,0 mm.min. Dále na obrázku (Obr. 5.15) je zobrazeno označení zkušebního tělesa dodavatelem.



Obr. 5.14: Těleso ESG-PVB-02 ve zkušebním zařízení



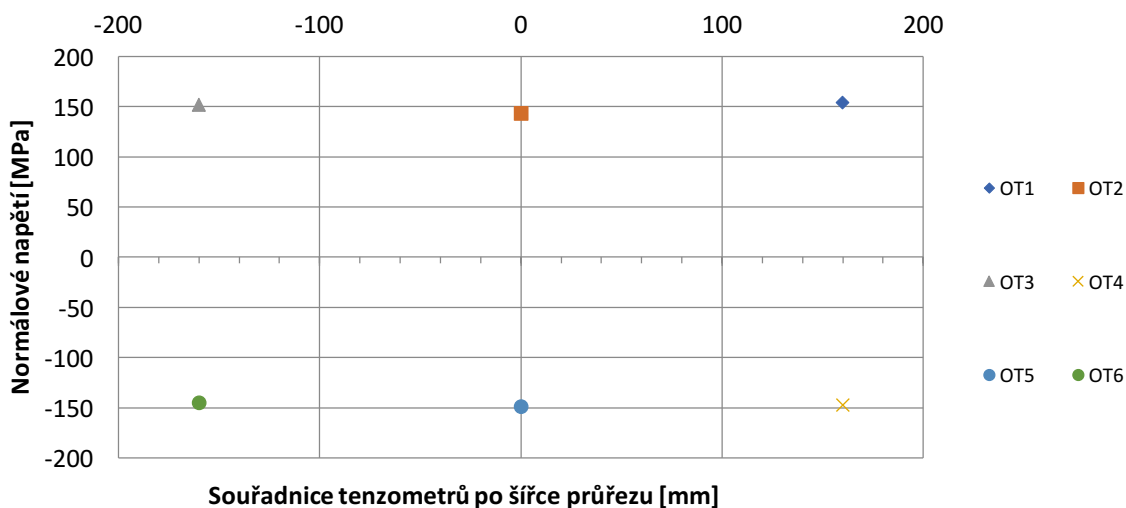
Obr. 5.15: Označení zkušební tělesa dodavatelem



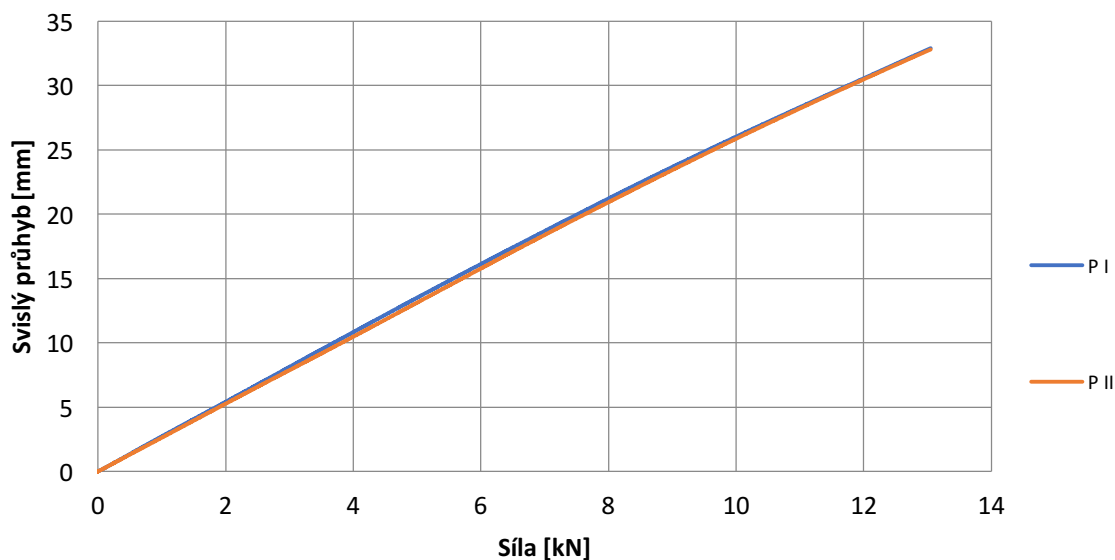
Graf 5.4: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

Graf 5.4 výše popisuje průběh normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí tabule. Dle získaných dat je vidět, že průběh je lineární. Nepatrná odchylna je patrná u tenzometru číslo 2. Zbylé tenzometry měří symetricky dle vodorovné osy nulového napětí. Maximální napětí v tahu u tohoto tělesa nastalo u tenzometru OT1

s hodnotou 153,98 MPa a v tlaku 148,52 MPa, při působící síle 13,05 kN. Rozdělení napětí po průřezu je zobrazeno na grafu (Graf 5.5). Rozdělení napětí je rovnoměrně rozdělený.



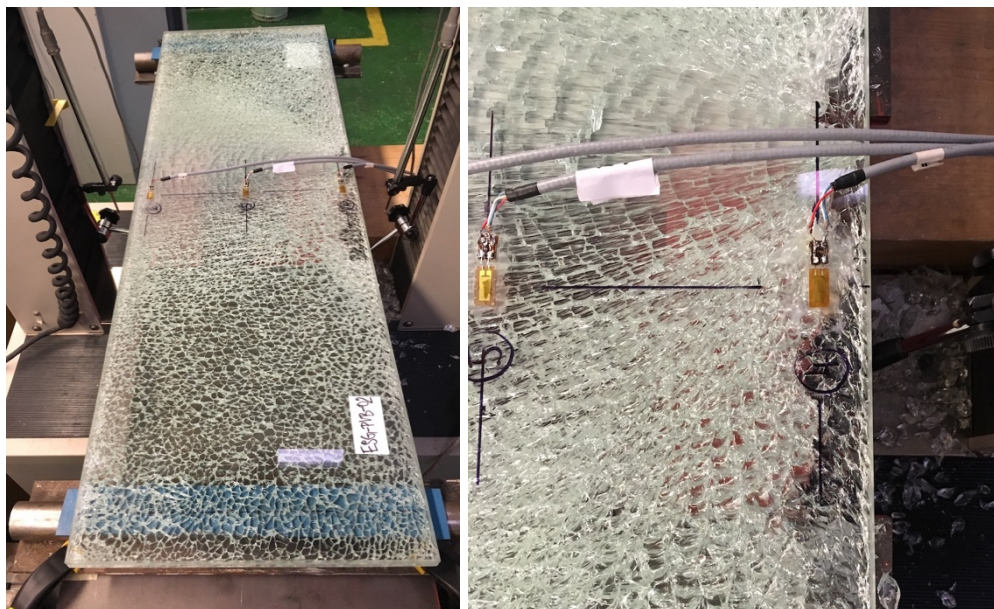
Graf 5.5: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušen



Graf 5.6: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí

Graf 5.6 ukazuje nárůst průhybů u obou průhybových snímačů až do úrovně dosažení maximální tahové pevnosti skleněné tabule. U skleněné tabule došlo k porušení při hodnotě průhybu 32,89 mm.

Obrázek (Obr. 5.16) ukazuje typ porušení spodní tabule při překročení maximální pevnosti. Porušení nastalo bez varování a praskliny se šířily od středu rozpětí. Z naměřené pevnosti a způsobu porušení vyplývá, že se jedná o tepelně tvrzené sklo.



Obr. 5.16: Způsob porušení zkušebního tělesa

5.1.4.3 ESG-PVB-03

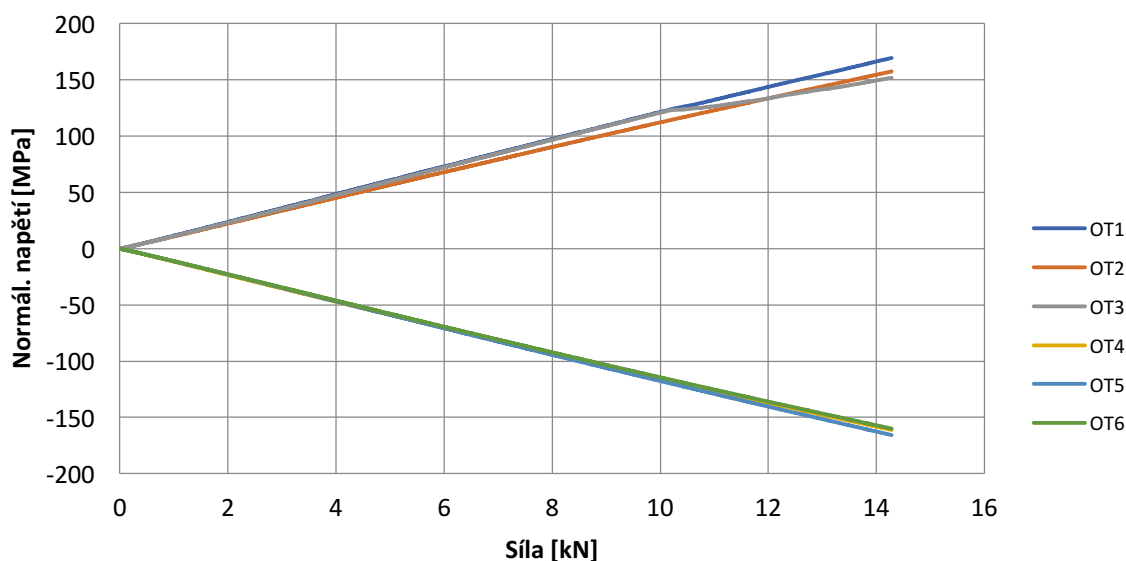
Na Obr. 5.17 je vidět těleso ve fázi přípravy na následující měření. Dále proběhlo zaměření pro správné usazení vzorku. Usazení musí odpovídat výše zmíněnému schématu zapojení. Na obrázku (Obr. 5.18) je štítek dodaný výrobcem s označením. Na začátku každého měření došlo k vynulování veškerých měřičů. Těleso bylo zatěžováno svislým posunem příčnicku s rychlostí 2,0 mm.min.



Obr. 5.17: Těleso ESG-PVB-03 v průběhu přípravy k měření



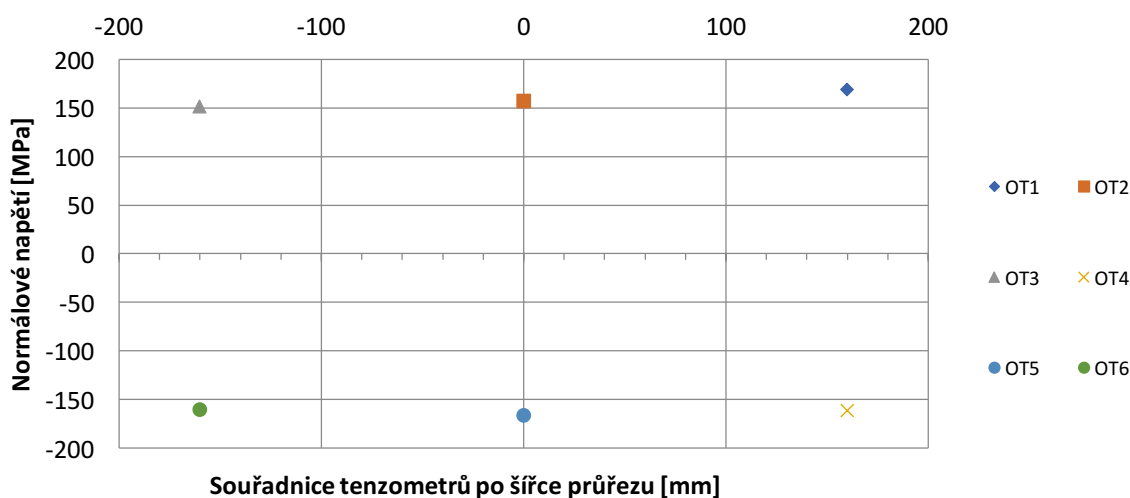
Obr. 5.18: Označení zkušebního tělesa dodavatelem



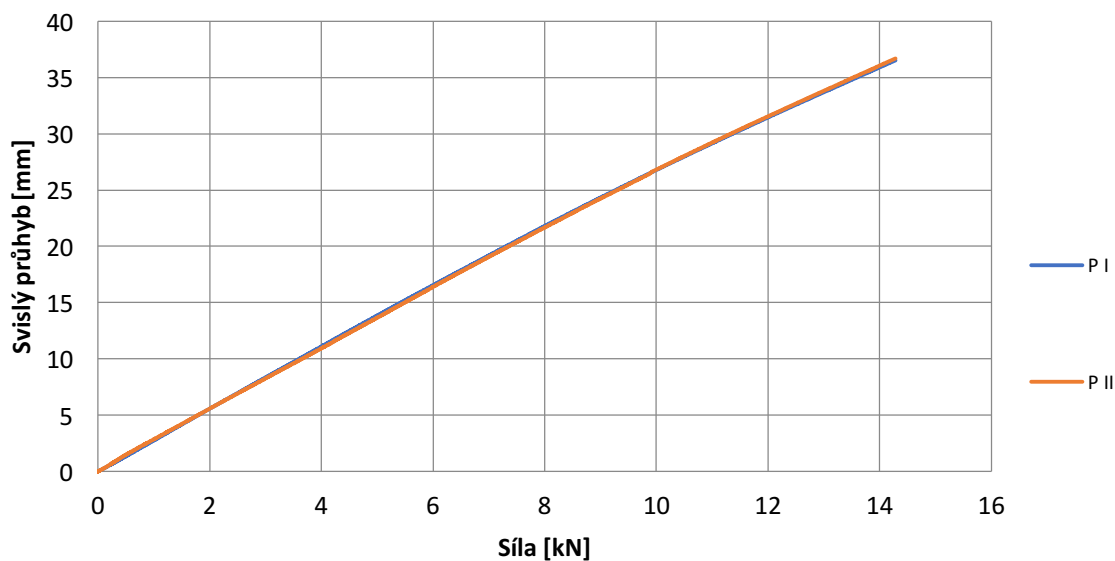
Graf 5.7: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

Na grafu (Graf 5.7) jsou znázorněny naměřené hodnoty ve fázi, kdy došlo k porušení spodní tažené tabule. Zastavení svislého posunu příčnicku nastalo při síle 14,29 kN. Nejvyšší normálové napětí v okamžiku porušení skleněné tabule bylo naměřeno u tenzometru č.1 a to s hodnotou 169,24 MPa. Dále z grafu lze vyčíst, že u OT1 byl nárůst napětí nejstrmější. Nejvyšší tlakové napětí 165,89 MPa bylo naměřeno v podélné ose tělesa u tenzometru č.5.

Rozdělení napětí po průřezu podporuje výše zobrazený graf. Ten ukazuje, že u OT1 se více koncentrovalo normálové napětí.



Graf 5.8: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení



Graf 5.9: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí

Graf 5.9 Závislosti průhybu na svislé síle nám ukazuje souhlasné hodnoty měřené na snímačích průhybu, které při porušení vzorku dosáhly průhybu 36,53 mm jako maximální hodnota deformace.



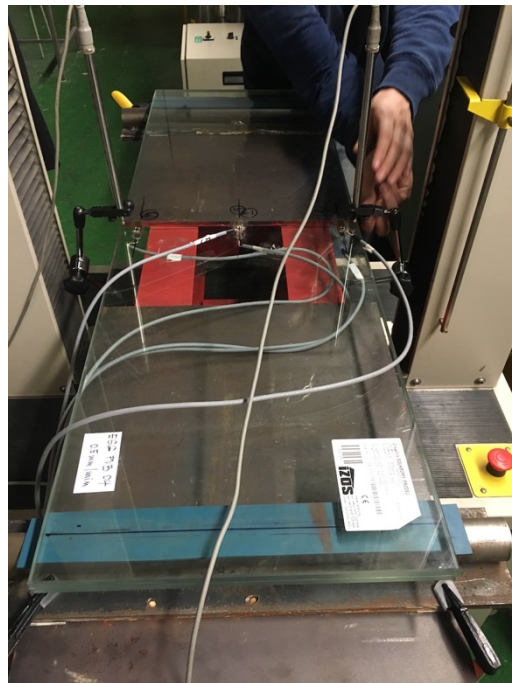
Obr. 5.19: Způsob porušení zkušebního tělesa

Obr. 5.19 ukazuje zkušební těleso porušené čtyřbodovým ohybem. Rozvinutí trhliny začalo u tenzometru č. 1 a šířilo se velmi rychle k opačné straně. Z typu

porušení a výsledných hodnot naměřených normálových napětí vyplývá, že toto souvrství je tvořeno tepelně tvrzeným sklem (kaleným).

5.1.4.4 ESG-PVB-04

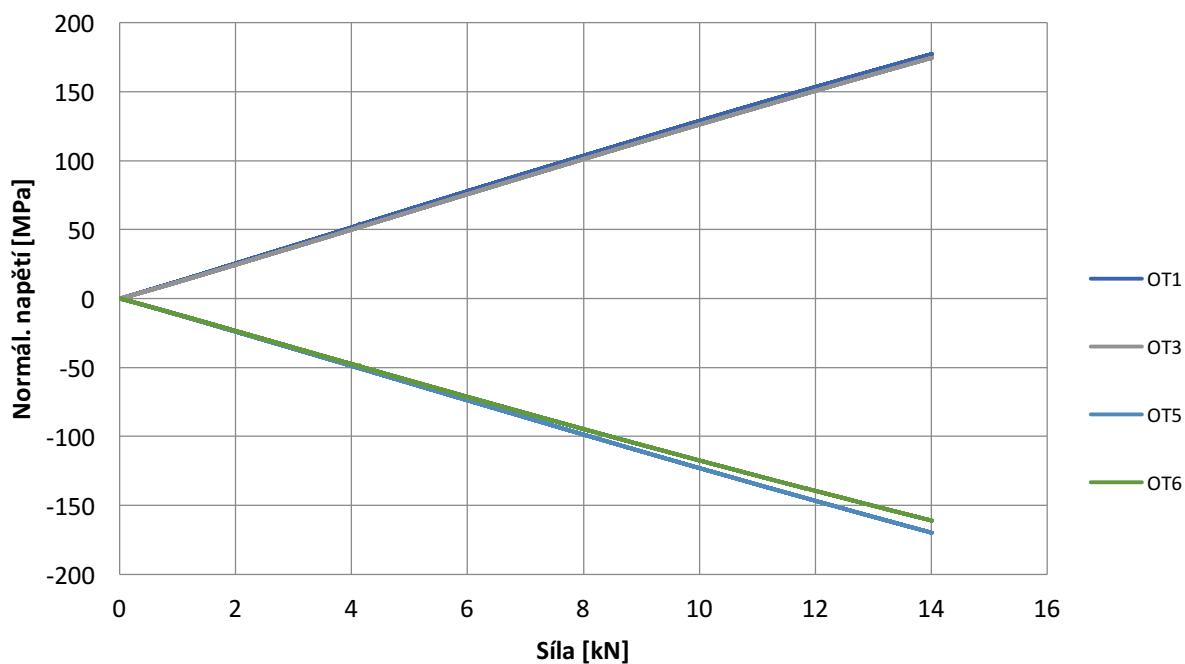
Obrázek (Obr. 5.20) ukazuje těleso ve zkušební soustavě. Těleso bylo usazeno a zaměřeno dle schématu. Na následujícím obrázku viz (Obr. 5.21) je štítek zkušebního tělesa dodaného od výrobce. Na začátku měření došlo k vynulování všech měřících senzorů. Těleso bylo zatěžováno rychlostí 0,5 mm.min.



Obr. 5.20: Těleso ESG-PVB-04 v průběhu přípravy k měření



Obr. 5.21: Označení zkušební tělesa dodavatelem

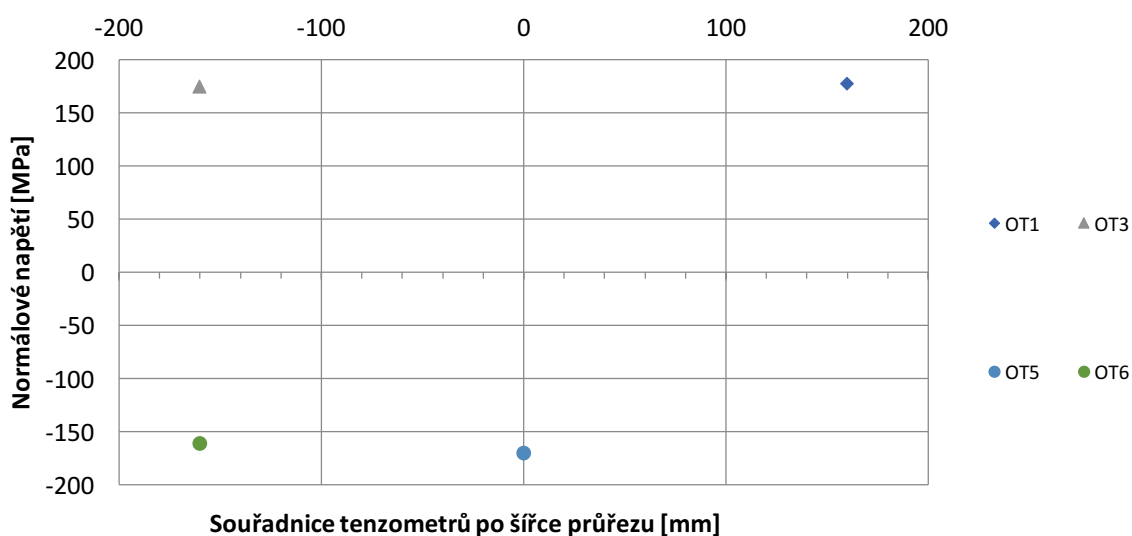


Graf 5.10: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

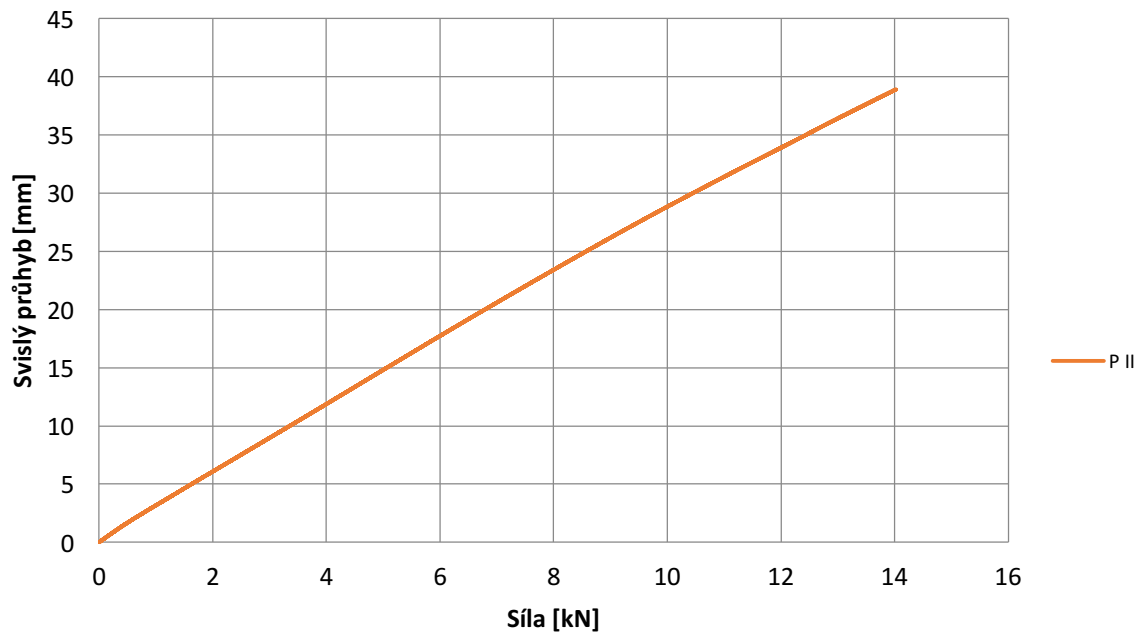
Přechozí obrázek grafu (Graf 5.10) ukazuje závislost normálového napětí na působící svislé síle uprostřed rozpětí materiálu. Tento graf nám potvrzuje lineární závislost těchto dvou veličin. Průběh měření tenzometrů je téměř symetrický, a tudíž rozdělení napětí po výšce průřezu je rovnoměrné rozděleno. Pouze tenzometr č. 6

změřilo mírně menší napětí než ostatní tenzometry. Při tomto měření došlo k výpadku tenzometrů č. 2 a 4.

Maximální dosažené napětí při zatížení silou 14,02 kN bylo naměřeno u tenzometru č. 1 a hodnota naměřená při porušení byla 177,38 MPa. Dále je na grafu (Graf 5.11) rozdělení napětí po průřezu, je zřejmé, že tenzometr OT1 naměřil nejvyšší hodnotu tahového normálového napětí a tenzometr OT5 nejvyšší hodnotu tlakového normálového napětí 169,92 MPa.

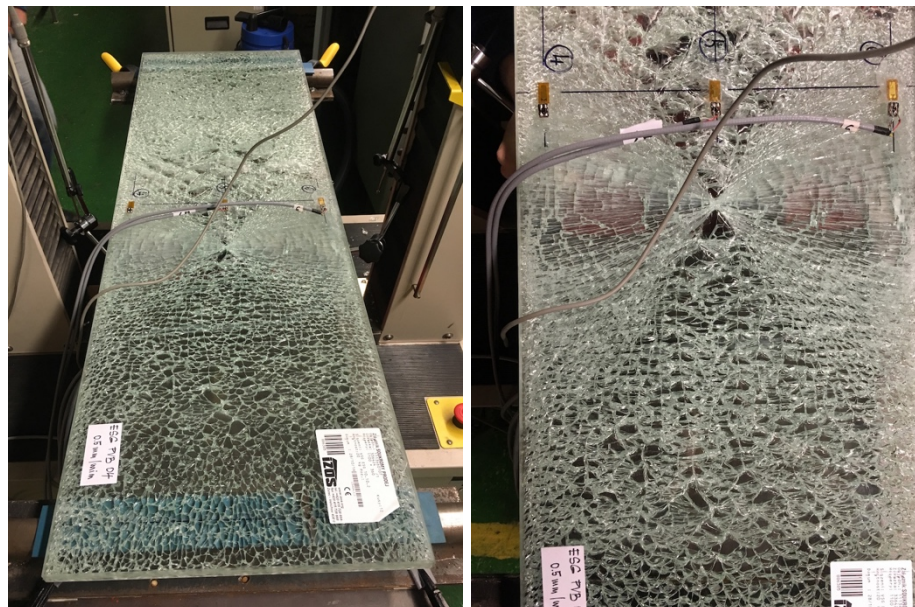


Graf 5.11: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení

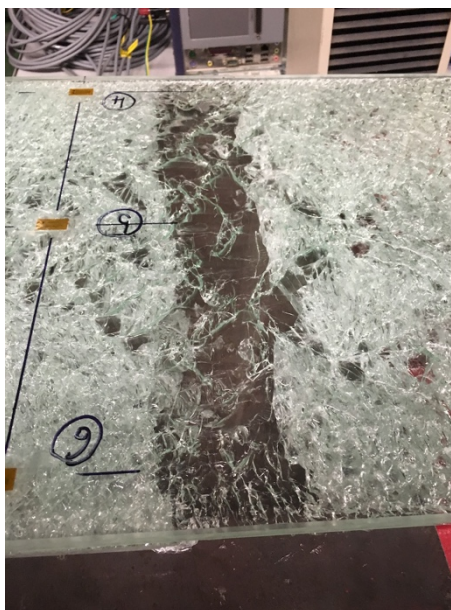


Graf 5.12: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí

Graf závislosti průhybu na působící síle (Graf 5.12) zobrazuje nárůst deformace při zvyšující se síle, až do úrovně porušení spodní tažené tabule. Průhyb při porušení silou 14,02 kN byl 38,89 mm. Snímač průhybu č. I nevykazoval použitelné data.



Obr. 5.22: Způsob porušení zkušebního tělesa



Obr. 5.23: Způsob porušení zkušebního tělesa – detail

Obrázky (Obr. 5.22) ukazují porušení spodní tabule souvrství v okamžiku vyčerpání její pevnosti. Ohnisko porušení vzniklo uprostřed tělesa v příčném směru v oblasti jednoho zatěžovacího válce. Následně se trhliny šířily ve tvaru X do všech směrů. Dle Obr. 5.23 zobrazuje detail porušení v příčném směru, kde došlo ke koncentraci. Podle typu porušení se jednalo o tepelně tvrzené sklo.

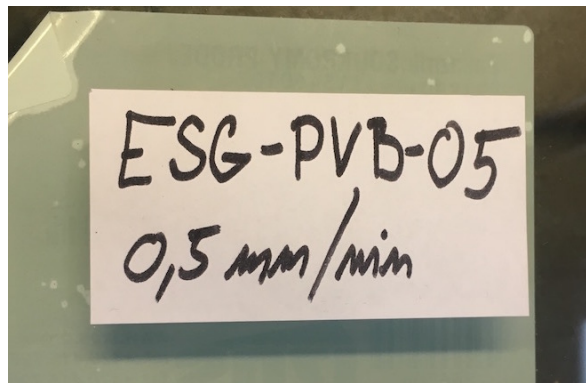
5.1.4.5 ESG-PVB-05

Na

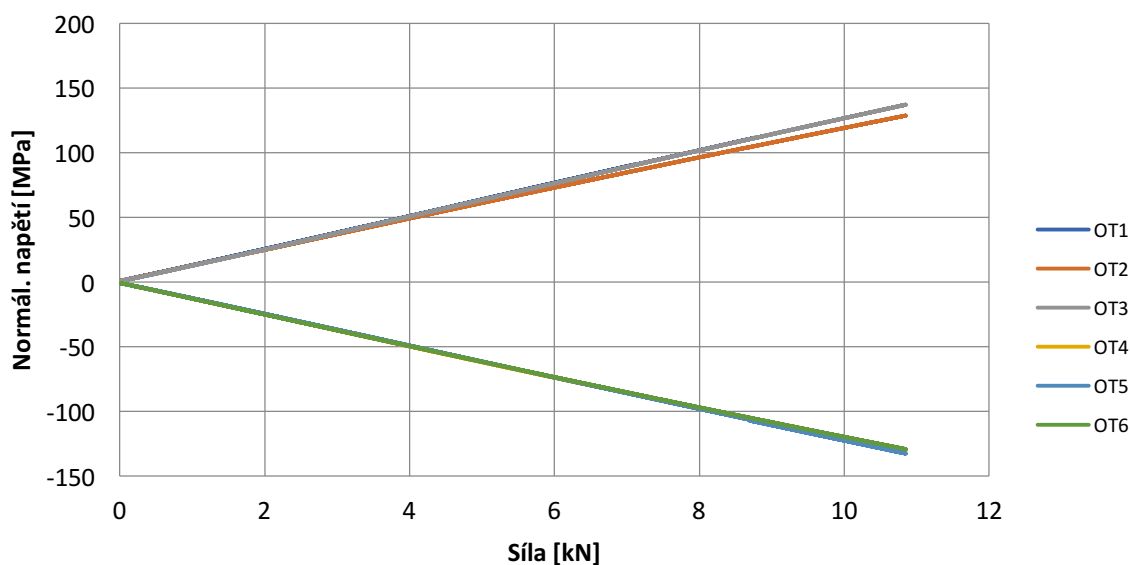
Obr. 5.24 vidíme připravené zkušební zařízení s usazeným vzorkem, který je osazen všemi měřicími senzory dle předepsaného plánu. Další následující obrázek (Obr. 5.25) popisuje naše označení vzorků pro popisování experimentu.



Obr. 5.24: Těleso ESG-PVB-05 ve zkušebním zařízení



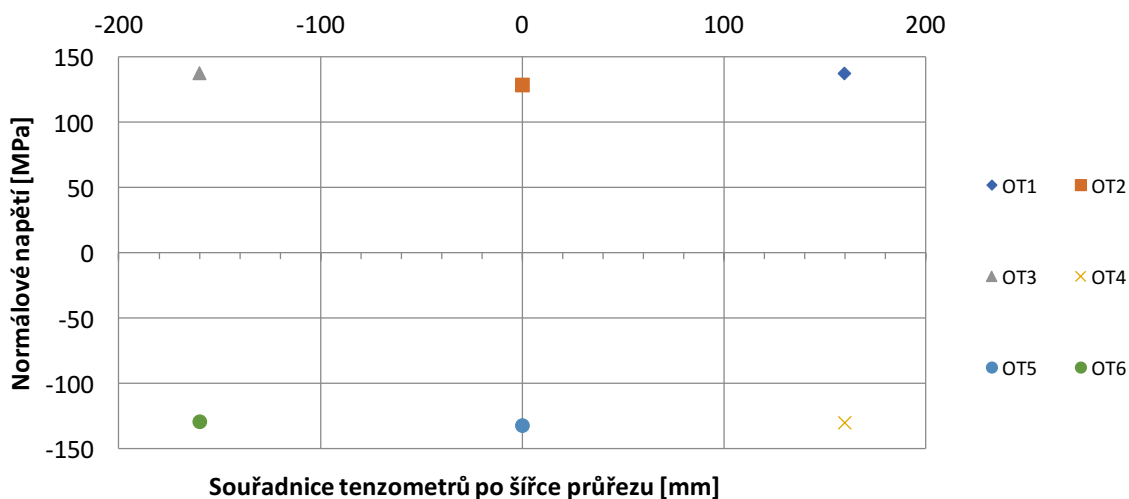
Obr. 5.25: Označení zkušebního tělesa s popisem rychlosti zatěžování



Graf 5.13: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

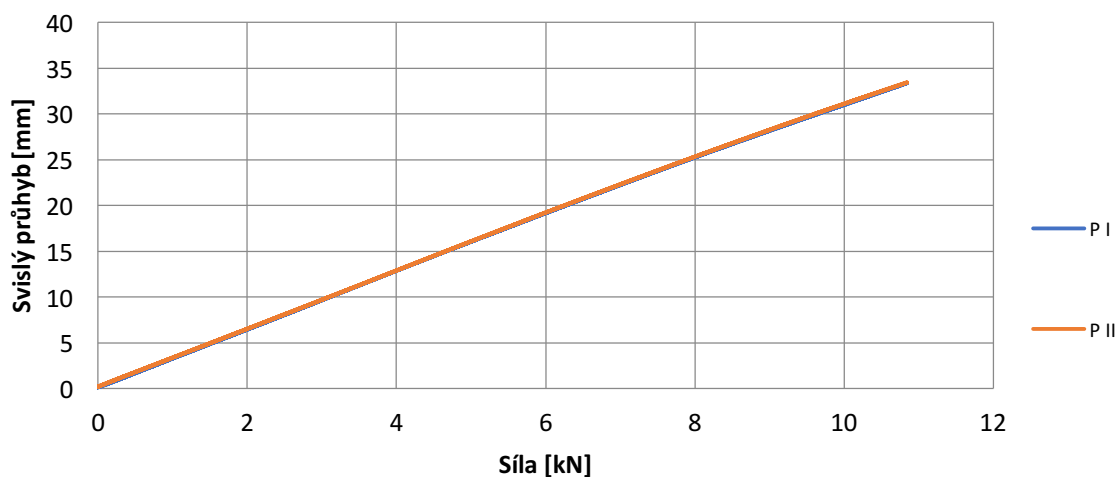
Předchozí graf (Graf 5.13) zobrazuje lineární nárůst normálového napětí s rostoucí svislou silou zapříčiněnou posunem příčnicku zatěžovacího přístroje MTS-Q s rychlostí posunu 0,5 mm.min. Graf je symetrický dle vodorovné osy a jeho maximální hodnota naměřená u tenzometru č. 3 je 137,26 MPa při síle 10,85 kN. Pouze tenzometr č. 2 po celou dobu měření vykazuje až o 8 MPa menší napětí, než jak to je u ostatních tenzometrů na tažené straně souvrství. Maximální tlakové normálové napětí při této zkoušce bylo naměřeno u tenzometru č. 5, kde dosáhlo hodnoty 132,3 MPa.

Obdobně to můžeme vidět na následujícím grafu (Graf 5.14), kde počátek souřadného systému je v podélné ose tělesa. Tento graf ukazuje rozdělení normálového napětí po průřezu uprostřed rozpětí.



Graf 5.14: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení

Graf 5.15 popisuje průběh deformace v závislosti na zatěžovací síle od zatěžovacího přístroje MTS-Q. Průhyby obou se přesně kryjí a dosáhly limitního průhybu 33,42 mm, kdy došlo k porušení tažené vrstvy skla.



Graf 5.15: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí

Graf 5.15 ukazuje způsob porušení tažené tabule v okamžiku dosažení její pevnosti. Porušení nastalo při síle 10,85 kN bez varování a rozvoj trhlin byl velmi rychlý. Z tvaru střepů lze zjistit, že se jednalo o tepelně tvrzené sklo. Počátek porušení

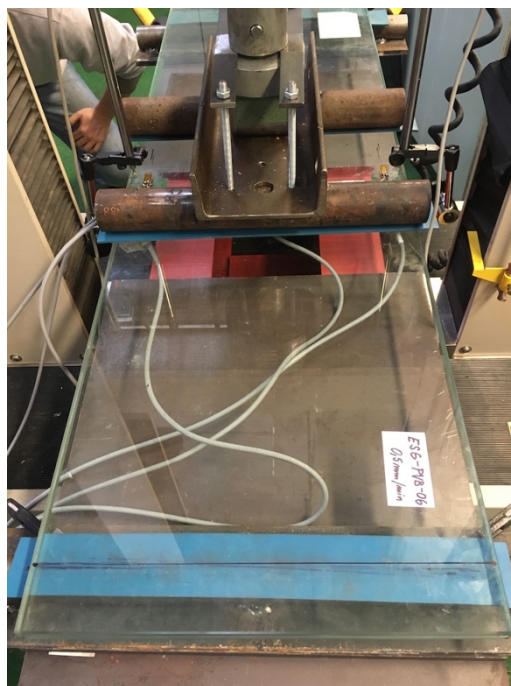
materiálu můžeme dle (Obr. 5.26) lokalizovat v okolí 2/3 od kraje spodní tabule a přibližně uprostřed rozpětí.



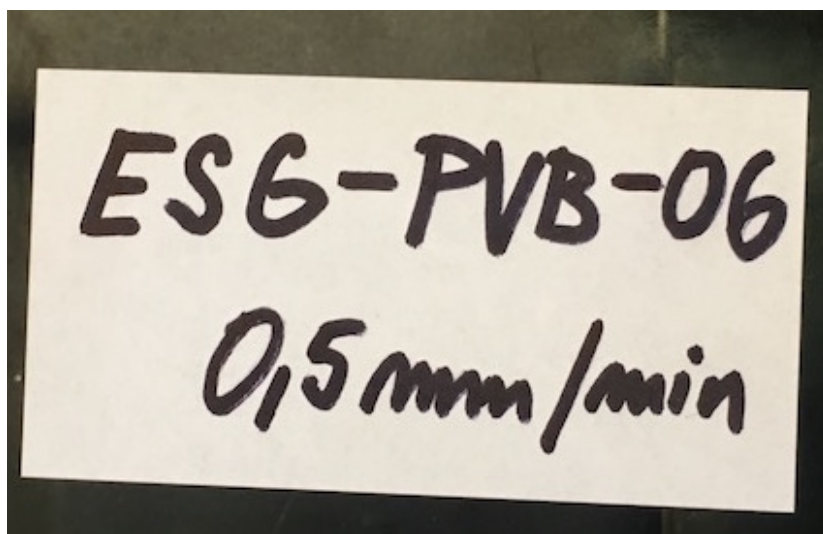
Obr. 5.26: Způsob porušení zkušebního tělesa

5.1.4.6 ESG-PVB-06

Těleso dle schématu bylo změřeno, uloženo a přitíženo ve zkušebním zařízení, jak je zobrazeno na (Obr. 5.27). Vzorek byl zatěžován konstantní rychlostí 0,5 mm.min. Toto zatížení bylo vyvoláno svislým posunem příčnicku. Dále obrázek (Obr. 5.28) popisuje vzorek označením druhu a rychlostí zatěžování.



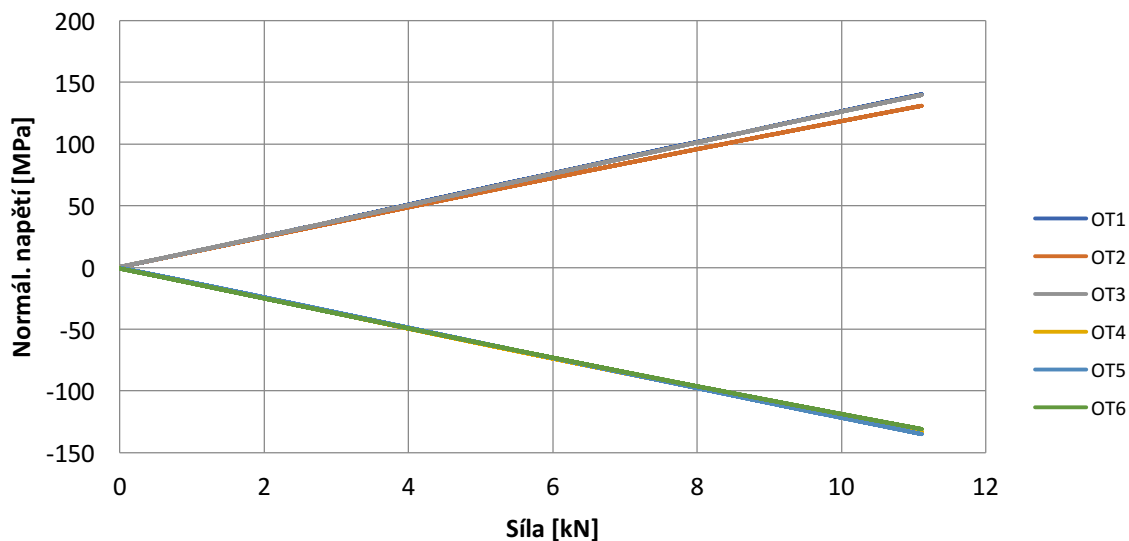
Obr. 5.27: Těleso ESG-PVB-06 ve zkušebním zařízení



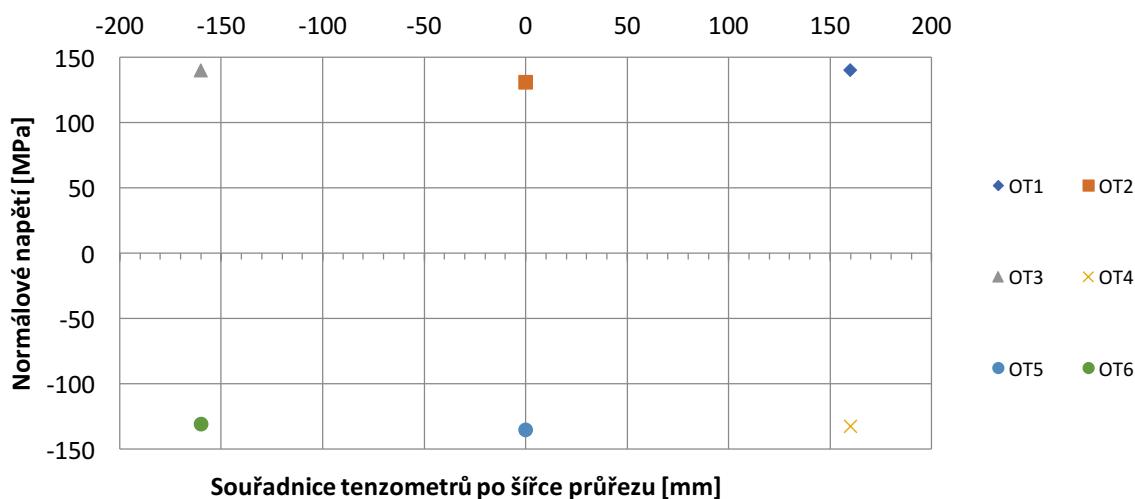
Obr. 5.28: Označení zkušebního tělesa s popisem rychlosti zatěžování

V následujícím obrázku (Graf 5.16) je zobrazena závislost normálového napětí na působící síle. Změřené hodnoty nárůstu napětí jsou lineární a symetrické podle vodorovné osy po celé délce zatížení. Maximální hodnota v momentě porušení spodní tabule souvrství dosáhla normálové napětí o hodnotě 140,31 MPa u tenzometru č. 1 měřící tahové napětí, naopak v tlaku bylo naměřeno napětí 134,92 MPa na tenzometru OT5.

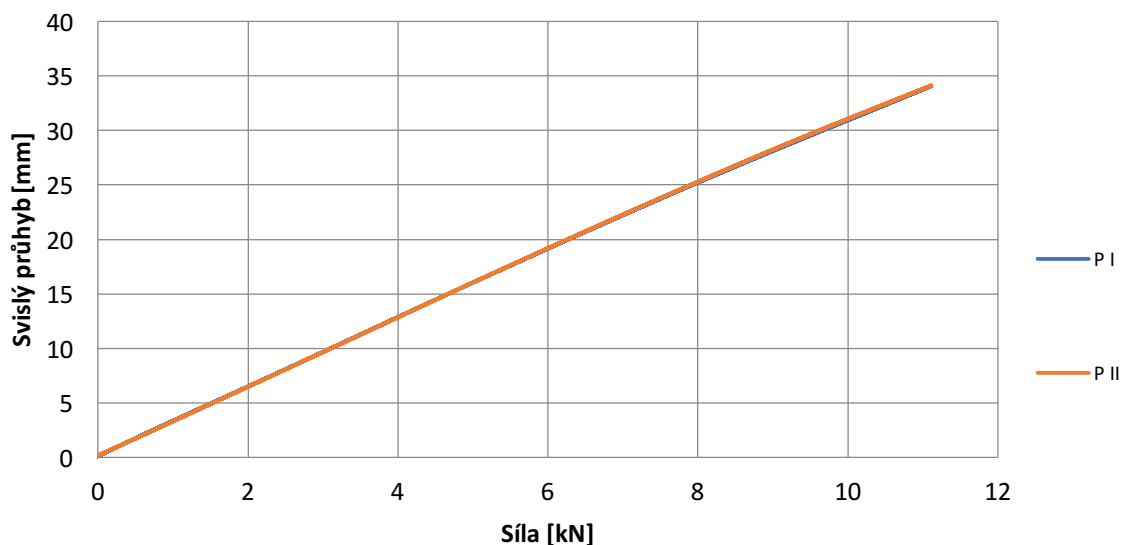
Graf zobrazen dále (Graf 5.17) ukazuje příčné rozdělení normálového napětí po průřezu. (Graf 5.17) , kdy s počátkem souřadného systému je souhlasná jako podélná osa tělesa. Dále můžeme vyčíst, že rozdíl mezi tenzometry OT1, OT3 a OT2 je na konci měření téměř až 10 MPa.



Graf 5.16: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí



Graf 5.17: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení



Graf 5.18: Závislost průhybu na svislé síle uprostřed rozpětí

Deformace souvrství v závislosti na působící síle je zobrazena na grafu (Graf 5.18). Z měřených dat je zřejmé, že oba snímače průhybu naměřily obdobné hodnoty po celou dobu měření. Maximální průhyb tělesa byl změřen při síle 11,12 kN u průhybového snímače č. II s hodnotu 34,14 mm.

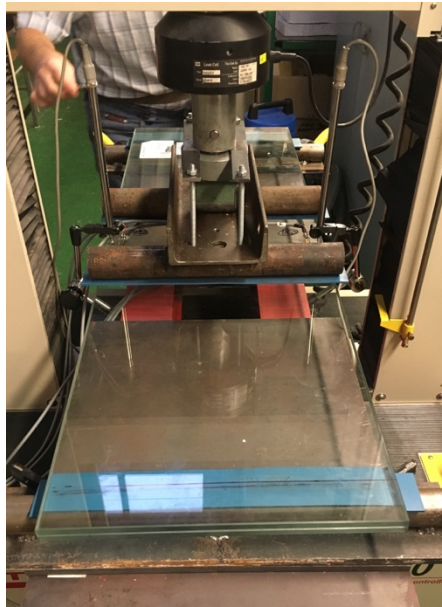


Obr. 5.29: Způsob porušení zkušebního tělesa

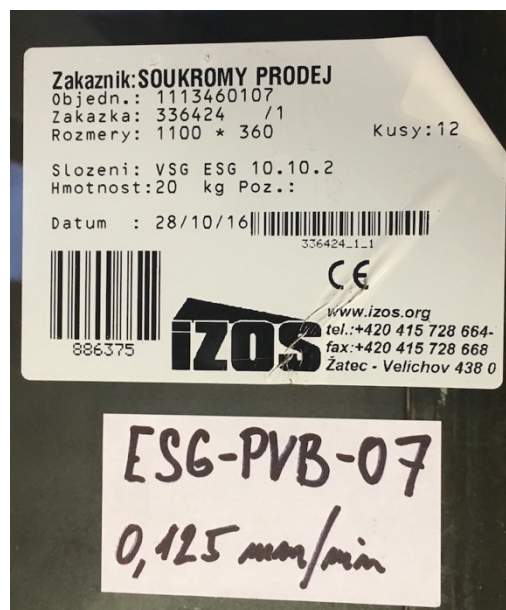
Obr. 5.29 zachycuje způsob porušení tělesa z důvodu dosažení tahové pevnosti spodní vrstvy souvrství. K porušení došlo náhle uprostřed rozpětí v oblasti tenzometru č. 2. Podle dosažení změřených pevností, ale také podle typu porušení tabule se jednalo o tepelně tvrzené sklo. Trhliny se šířily všesměrně po celé ploše.

5.1.4.7 ESG-PVB-07

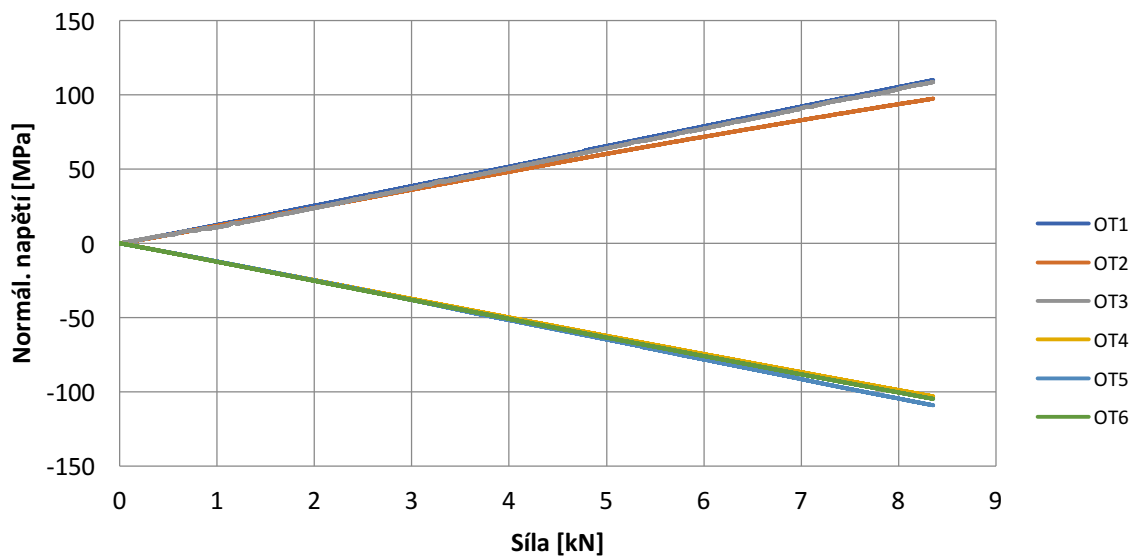
Na obrázku Obr. 5.30 je zobrazeno umístění tělesa ve zkušebním zařízení. Poloha tělesa před začátkem zatěžování byla změřena a odpovídá schématu na Obr. 5.30. Toto těleso bylo zatěžováno rychlostí 0,125 mm.min. Obr. 5.31 Obr. 5.31 zobrazuje označení zkušebního tělesa dodavatelem i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem.



Obr. 5.30: Těleso TVG-PVB-07 ve zkušebním zařízení



Obr. 5.31: Označení zkušebního tělesa dodavatelem současně i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem

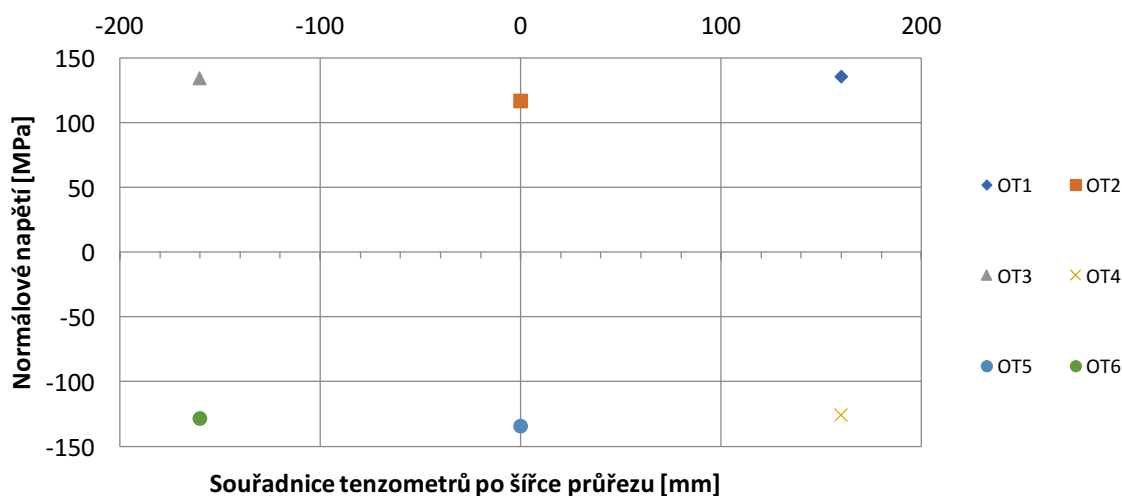


Graf 5.19: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

Graf 5.19 znázorňuje závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí tabule. Tato závislost vychází lineárně pro všechny tenzometry po celou dobu záznamu. Tenzometry č. 4 a 6 u horních vláken měří stejné hodnoty napětí, což odpovídá jejich symetrickému usazení vzhledem k podélné ose tabule. Tenzometry 1 a 3 měří shodné hodnoty po celou dobu měření. Tenzometr č. 2 měří od zatížení 3,5 kN

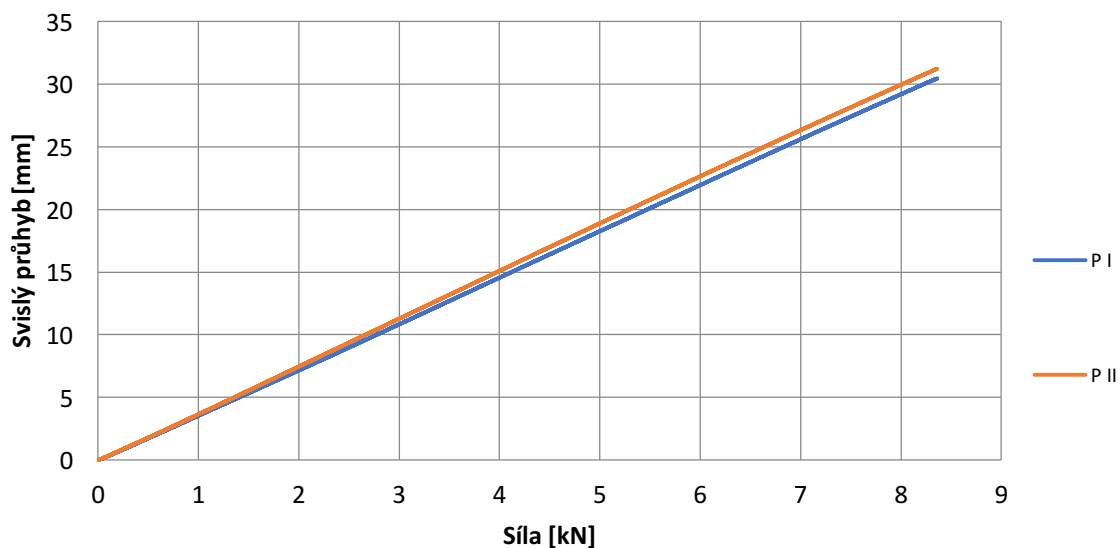
nižší hodnoty tahových napětí než tenzometry č 1 a 3, tenzometr č. 5 měří v porovnání s tenzometry 4 a 6 mírně vyšší hodnoty tlakových napětí.

Z průběhu plyne, že normálové napětí není u krajních vláken průřezu uprostřed rozpětí rozloženo rovnoměrně. Maximální hodnota tahového napětí v okamžiku porušení byla naměřena na tenzometru č. 1 – 135,46 MPa. Maximální hodnota tlakového napětí v okamžiku porušení byla změřena u tenzometru č. 5 –134,53 MPa. Tyto hodnoty odpovídají zatěžovací síle 10,33 kN.



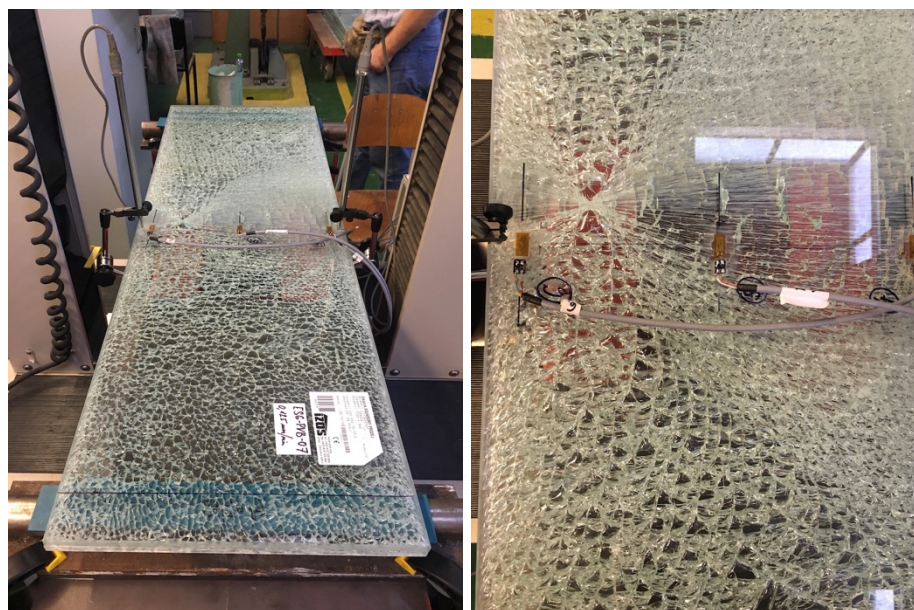
Graf 5.20: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení

Graf 5.20 ukazuje rozložení normálového napětí po šířce průřezu uprostřed rozpětí v okamžiku porušení. Tenzometr č. 2 měří v porovnání s ostatními tenzometry na tažené straně (tenzometry č. 1 a 3) o téměř 19 MPa nižší tahové napětí, tanzometr č. 5 měří v porovnání s tenzometry č. 4 a 6 o 8,5 MPa vyšší tlakové napětí. Napětí tedy není po šířce horních i dolních tlačných vláken rozloženo rovnoměrně. Číselné hodnoty napětí pod tenzometry budou shrnuty v závěrech měření.



Graf 5.21: Závislost svislého průhybu na působící síle

Na obrázku výše Graf 5.21 je zobrazena závislost svislého průhybu na působící síle. Je vidět, že křivky závislostí mají lineární průběh po celou dobu zatěžování. Průhyboměry měří shodnou hodnotu průhybu na začátku měření, poté se rozdíl v měřených průhybech mírně zvětšuje. Maximální naměřený průhyb byl při zatížení 10,33 kN měřen na snímači průhybu č. I s hodnotou 37,35 mm a druhý snímač průhybu č. I naměřil jen hodnotu 38,07 mm.

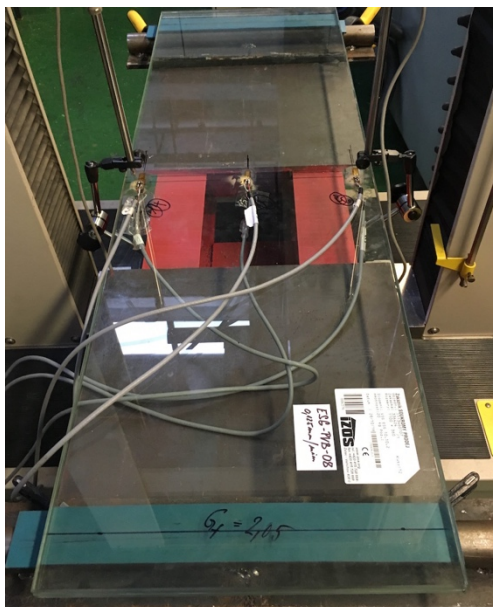


Obr. 5.32: Způsob porušení zkušebního tělesa

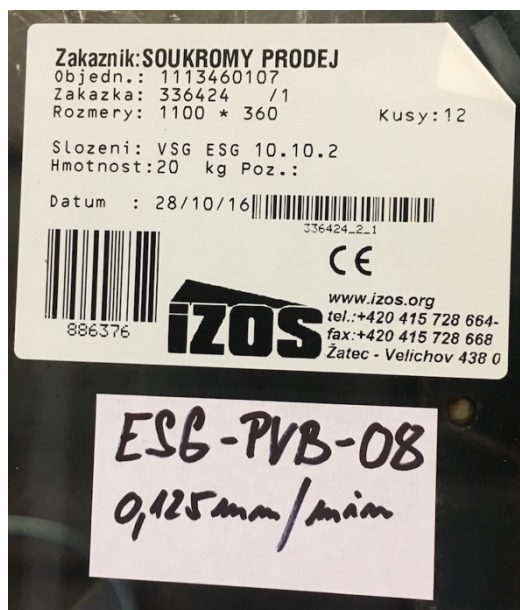
Obr. 5.32 zachycuje způsob porušení a tvar šíření prasklin na spodní tabuli skla, což jasně určuje typ použitého skla. Jedná se o tepelně tvrzené sklo. K porušení došlo bez předchozího varování uprostřed rozpětí tabule. Trhliny se šířily ze středu rozpětí po celé ploše tabule. Střepy zůstaly přichyceny na folii.

5.1.4.8 ESG-PVB-08

Obr. 5.33 zobrazuje umístění tělesa ve zkušebním zařízení. Poloha tělesa před začátkem zkoušení byla zaměřena a poloha odpovídá schématu na Obr. 5.33. Zkušební těleso bylo zatěžováno rychlostí 0,125 mm.min. Na Obr. 5.34 je vyobrazeno označení zkušebního tělesa dodavatelem i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem.

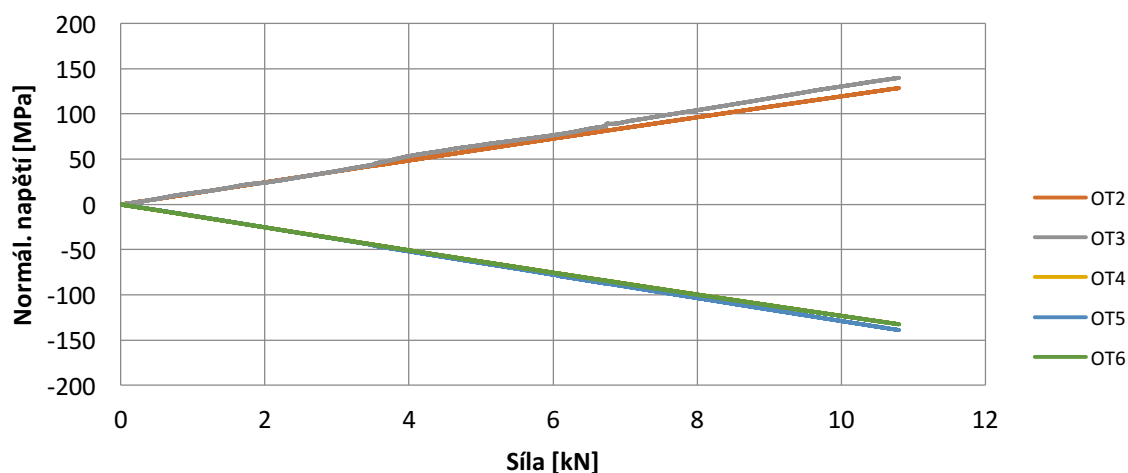


Obr. 5.33: Těleso TVG-PVB-08 ve zkušebním zařízení



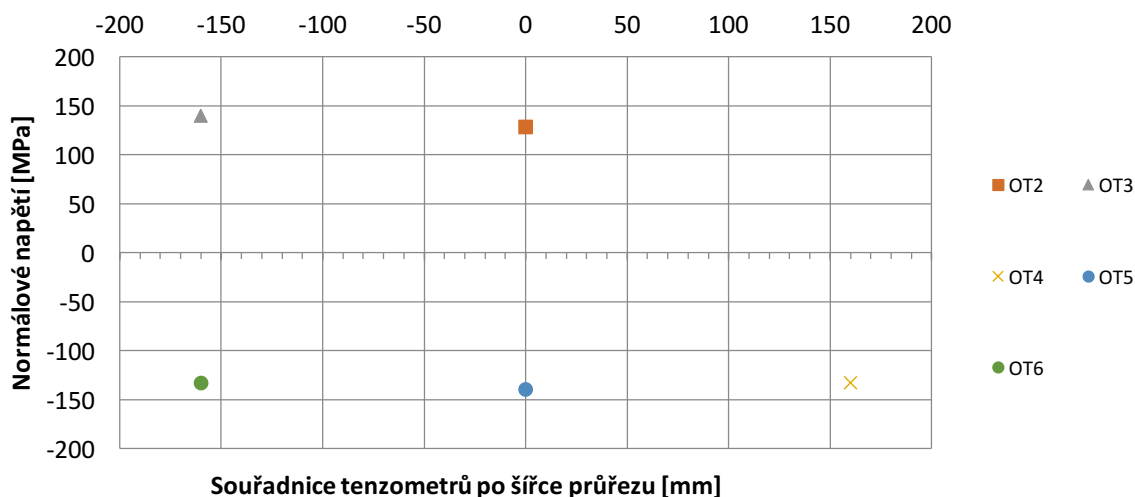
Obr. 5.34: Označení zkušebního tělesa dodavatelem i s označením rychlosti zatěžování a unikátním názvem

Graf 5.22 popisuje záznam závislosti normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí tabule. Je zřejmé, že tato závislost je lineární. Tenzometr č. 1 u tohoto tělesa neměřil. Tenzometry č. 2 a 3 měřili souhlasné hodnoty až do úrovně zatížení 4 kN, poté tenzometr č. 2 začal měřit mírně nižší hodnoty. Obdobně to proběhlo i u tenzometrů č. 4, 5 a 6, kdy tenzometr č. 6 vykazoval menší normálové napětí od hodnoty svislého zatížení 6 kN, resp. tenzometry č. 4 a 5 měří shodné hodnoty napětí, což odpovídá jejich symetrickému usazení vzhledem k podélné ose tabule. Maximální hodnota tahového napětí v okamžiku porušení byla naměřena tenzometrem č. 3, a to 140,13 MPa. Maximální hodnota tlakového napětí v okamžiku porušení byla měřena tenzometrem č. 5 – 138,99 MPa. Hodnoty napětí jsou pro síly 10,79 kN.



Graf 5.22: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí

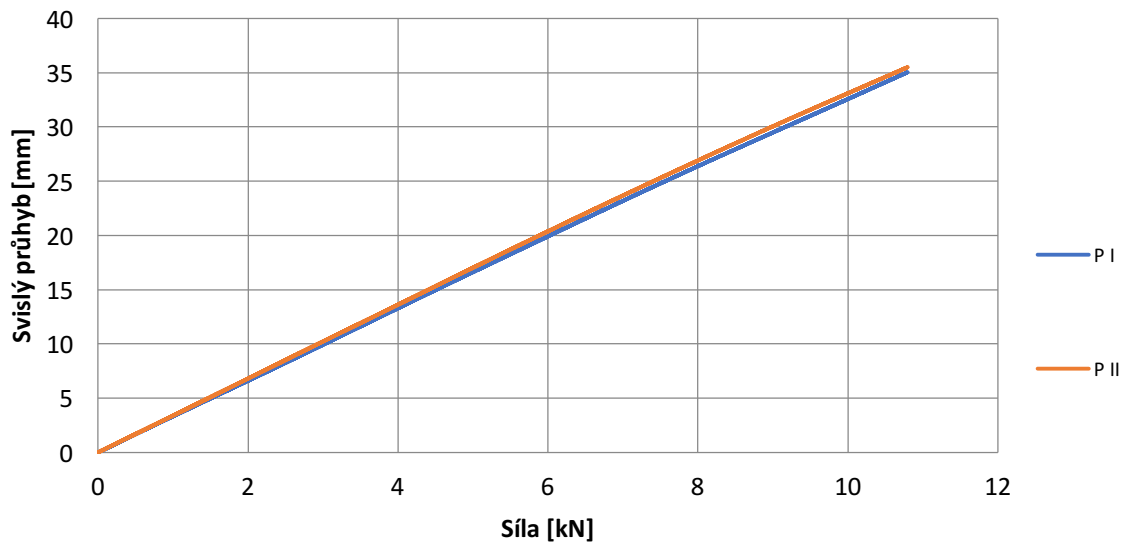
Graf 5.23 ukazuje rozložení normálového napětí po šířce průřezu uprostřed rozpětí v okamžiku porušení souvrství. Tenzometr č. 2 ukazuje v porovnání s tenzometrem č. 3 téměř o 12 MPa nižší hodnoty tahového napětí. Naopak rozdíly normálových napětí na tlačené straně průřezu jsou do 6,5 MPa. Číselné hodnoty napětí pod tenzometry budou shrnuty v závěrech měření.



Graf 5.23: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušení

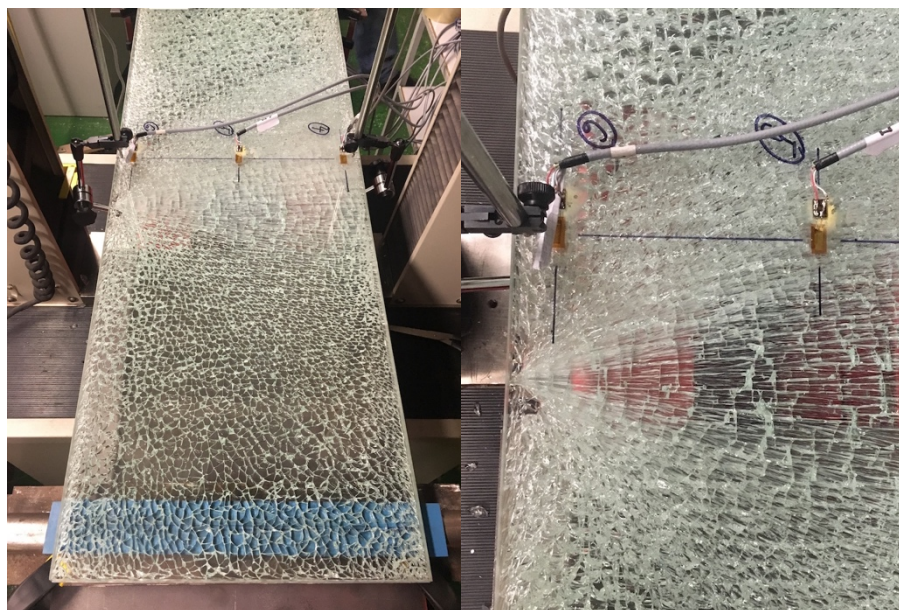
Následující graf (Graf 5.24) zobrazuje závislost svislého průhybu na působící síle. Křivky v grafu vykazují lineární průběh po celou dobu zatěžování. Snímač průhybu měří stejnou hodnotu průhybu od započetí měření až do kolapsu spodní tabule.

Maximální naměřený průhyb byl při zatížení 10,79 kN měřen na snímači průhybu č. I v hodnotě 35,06 mm a na druhém snímači č. II s hodnotou 35,49 mm.



Graf 5.24: Závislost svislého průhybu na působící síle

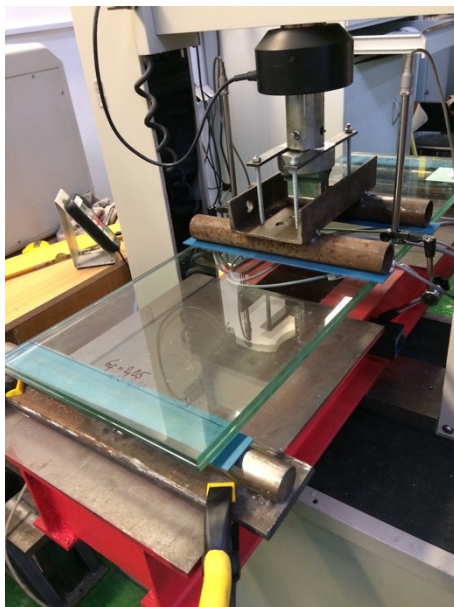
Obr. 5.35 ukazuje porušenou spodní vrstvu tělesa po zkoušce. Porušení tělesa je ve tvaru malých ostrých střípků typických pro porušení tepelně tvrzeného skla. Počátek porušení nastal u kraje tabule uprostřed rozpětí u jednoho zatěžovacího válce. Střípky se odtud šířily po celé ploše souvrství.



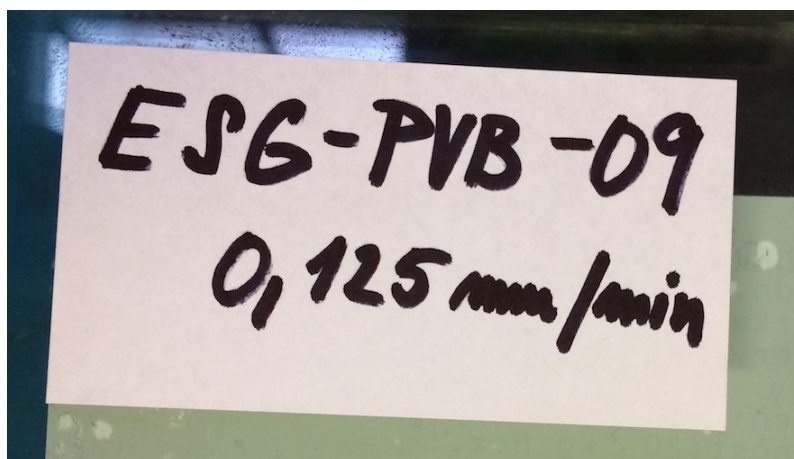
Obr. 5.35: Způsob porušení zkušebního tělesa

5.1.4.9 ESG-PVB-09

Obr. 5.36 ukazuje umístění tělesa ve zkušebním zařízení. Ochrana před kontaktem skla a oceli byla tvořena pryžovými podložkami. Těleso před začátkem zatěžování bylo usazeno dle schématu viz (Obr. 5.36). Vzorek byl zatěžován rychlostí svislého posunu příčnicku 0,125 mm.min. Na Obr. 5.37 je vyobrazeno unikátní označení tělesa dle seznamu vzorků pro měření s uvedením hodnoty rychlosti zatěžování.



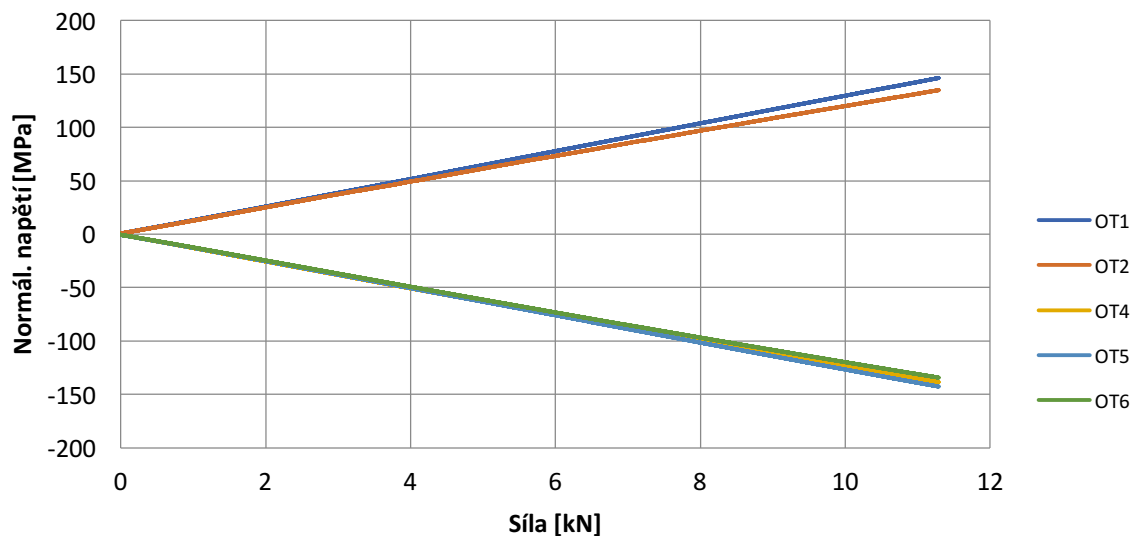
Obr. 5.36: Těleso VSG-EVA-09 ve zkušebním zařízení



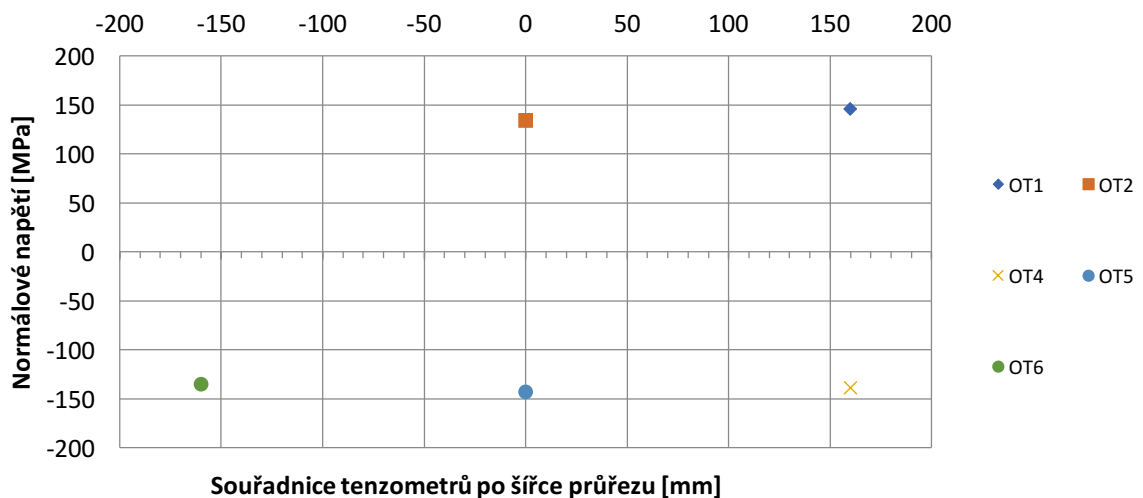
Obr. 5.37: Označení zkušebního tělesa dodavatelem

Graf 5.25 ukazuje závislost normálového napětí na působící svislé síle uprostřed rozpětí tabule. Tenzometry dle naměřených dat vykazují lineární průběh nárůstu napětí v celé délce měření. Tenzometr č. 3 při tomto měření nezaznamenal žádné hodnoty.

Tenzometry č. 1 a 2 od svislé působící síly 4,5 kN vykazovaly mírně odlišné hodnoty napětí, přičemž rozdíl mezi jimi naměřenými hodnotami na konci měření byl 11 MPa. Tenzometry na tlačené straně zaznamenávali téměř shodné hodnoty tlakových normálových napětí. Celkově je graf napětí symetrický podle vodorovné osy nulového napětí. Maximální hodnota tahového napětí v okamžiku porušení při síle 11,29 kN byla naměřena tenzometrem č. 1 - 145,89 MPa a maximální hodnota tlakového napětí ve stejném okamžiku byla měřena tenzometrem č. 4 - 142,40 MPa.

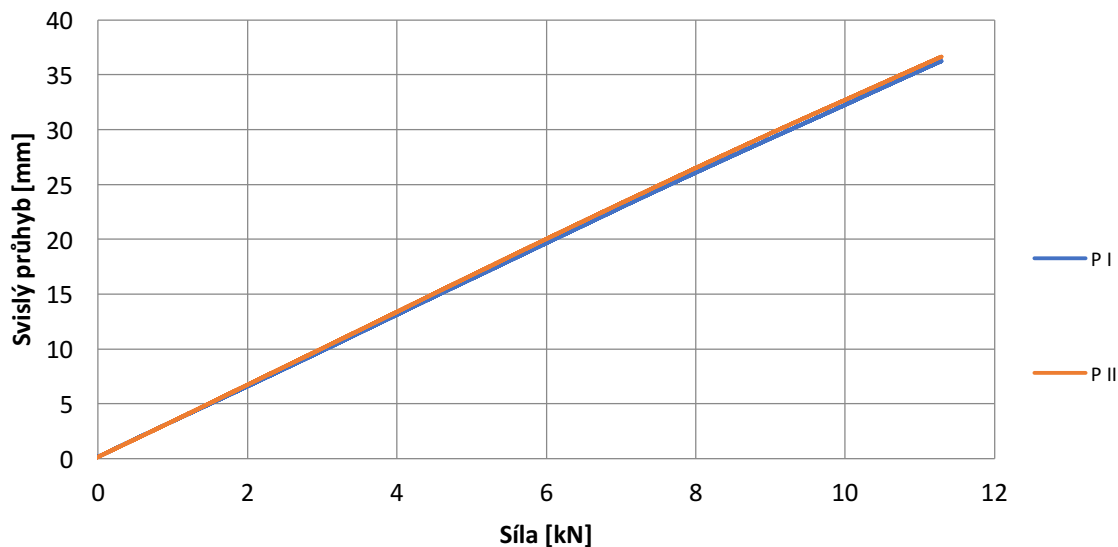


Graf 5.25: Závislost normálového napětí na působící síle uprostřed rozpětí



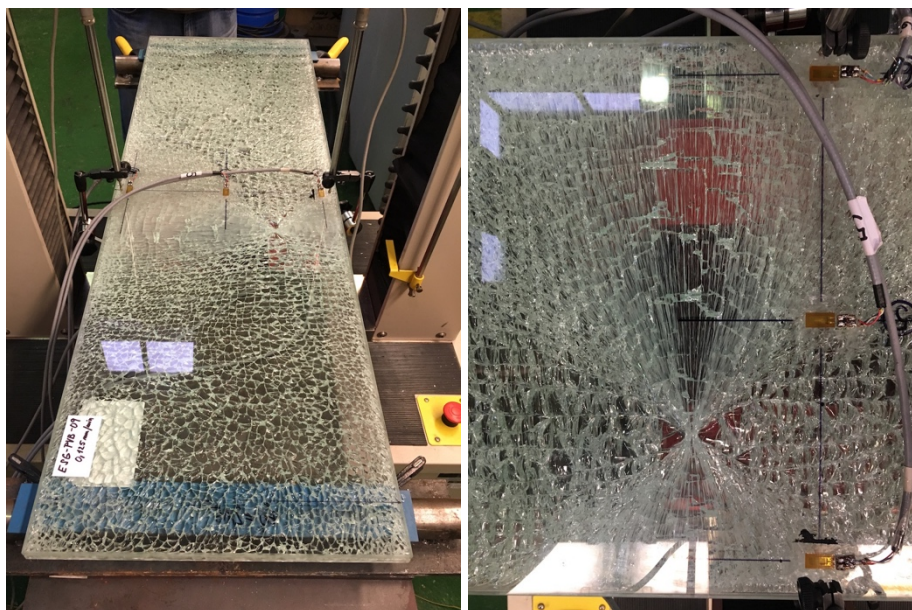
Graf 5.26: Hodnoty napětí uprostřed rozpětí v okamžiku porušen

Graf 5.26 ukazuje rozložení normálového napětí po šířce průřezu uprostřed rozpětí v okamžiku porušení. Z naměřených hodnot je patrné, že normálové napětí u spodních tažených vláken se koncentrovalo především u podélné osy průřezu, ale stále nedocházelo pod žádným tenzometrem k výraznější koncentraci napětí. Rozdíl měřených napětí mezi tenzometry je okolo 4 MPa.



Graf 5.27: Závislost svislého průhybu na působící síle

Na Graf 5.27 je závislost svislého průhybu na působící síle. Snímače průhybu vykazují lineární závislost a oba uvádějí shodné hodnoty průhybů. Průhybový snímač č. I naměřil 36,24 mm, snímač č. II naměřil hodnotu 36,66 mm. Toto jsou maximální změřené průhyby v okamžiku porušení spodní tabule skla při zatížení 11,29 kN.



Obr. 5.38: Způsob porušení zkušebního tělesa

Na obrázku výše (Obr. 5.38) je zobrazeno těleso po porušení spodní tahové tabule skla. Místo vzniku praskliny lze lokalizovat ve 1/4 příčného řezu uprostřed rozpětí. Praskliny se šíří od místa vzniku porušení po celé ploše porušené tabule. Typ tohoto porušení odpovídá porušení tepelně tvrzeného skla.

5.1.5 Vyhodnocení

Následující souhrnná tabulka (Tab. 5.1) shrnuje všechny získané hodnoty při dosažení maximální pevnosti zkušebních těles během zatěžování. Při první fázi zatěžování došlo k dosažení tahové únosnosti spodní tabule. Poté bylo zkušební těleso odtíženo a následně znovu zatíženo až do úplného kolapsu horní tabule. Zatěžovat se začalo vždy s vynulovanými hodnotami snímačů. Všechna tělesa byla vyrobena z tepelně tvrzeného skla.

	Síla	N. Napětí	N. Napětí	N. Napětí	N. Napětí	N. Napětí	N. Napětí	Průhyb I	Průhyb II	Čas
TĚLESO	[kN]	OT 1 [MPa]	OT 2 [Mpa]	OT 3 [Mpa]	OT 4 [Mpa]	OT 5 [Mpa]	OT 6 [Mpa]	[mm]	[mm]	[s]
ESG_PVB_01-1	1,90	22,25	21,50	21,43	-22,25	-21,48	-21,24	6,15	5,83	179,10
ESG_PVB_01-2	12,27	144,47	135,28	142,55	-138,36	-140,00	-134,97	31,12	31,29	942,70
ESG_PVB_01-3	6,40	xxx	xxx	xxx	-178,46	-184,18	-173,78	41,56	42,40	1514,20
ESG_PVB_02-1	13,05	153,98	144,00	151,77	-147,14	-148,52	-144,23	32,90	32,80	994,10
ESG_PVB_02-2	4,47	xxx	xxx	xxx	-135,00	-136,90	-130,41	38,73	38,26	1131,90
ESG_PVB_03-1	14,29	169,24	157,50	151,66	-160,99	-165,89	-159,83	36,53	36,68	1104,20
ESG_PVB_03-2	7,12	xxx	xxx	xxx	-174,34	-184,96	-175,31	43,02	42,29	1539,10
ESG_PVB_04-1	14,02	177,38	xxx	174,71	0,00	-169,92	-160,89	0,00	38,89	4653,80
ESG_PVB_04-2	5,54	xxx	xxx	xxx	xxx	-179,84	-163,94	0,00	44,80	1508,10
ESG_PVB_05-1	10,85	137,00	128,68	137,26	-130,21	-132,30	-128,99	33,41	33,42	3756,00
ESG_PVB_05-2	4,85	xxx	xxx	xxx	-149,84	-154,18	-148,94	41,04	42,41	1302,40
ESG_PVB_06-1	11,12	140,31	130,86	139,95	-132,74	-134,92	-130,79	34,05	34,14	3845,40
ESG_PVB_06-2	4,88	xxx	xxx	xxx	-149,10	-155,99	-147,13	41,18	42,20	1278,40
ESG_PVB_07-1	10,33	135,46	116,69	134,13	-126,10	-134,53	-128,42	37,35	38,07	15155,00
ESG_PVB_07-2	4,98	xxx	xxx	xxx	-145,87	-158,42	-148,87	41,58	42,58	129,10
ESG_PVB_08-1	10,80	xxx	128,62	140,13	-132,79	-138,99	-132,49	35,06	35,49	15698,00
ESG_PVB_08-2	6,55	xxx	xxx	xxx	-189,74	-205,02	-189,07	41,22	42,36	1702,00
ESG_PVB_09-1	5,41	0,00	0,00	0,00	-158,46	-167,11	-153,80	40,60	42,67	1356,00
ESG_PVB_09-2	11,29	145,88	134,73	xxx	-138,34	-142,40	-134,37	36,24	36,66	16309,00
ESG_PVB_09-3	5,41	xxx	xxx	xxx	-158,46	-167,11	-153,80	40,60	42,67	1356,00

Tab. 5.1: Souhrnná tabulka experimentálně naměřených normálových napětí a průhybů

Hodnoty naměřených extrémů při experimentálních zkoušení

TĚLESO	KALENÉ SKLO	[MPa]	F [kN]	w _{z1} [mm]	w _{z2} [mm]
ESG_PVB_04-1	S _{x,max}	177,38	14,02	0,00	38,89
ESG_PVB_07-1	S _{x,min}	116,69	10,33	37,35	38,07

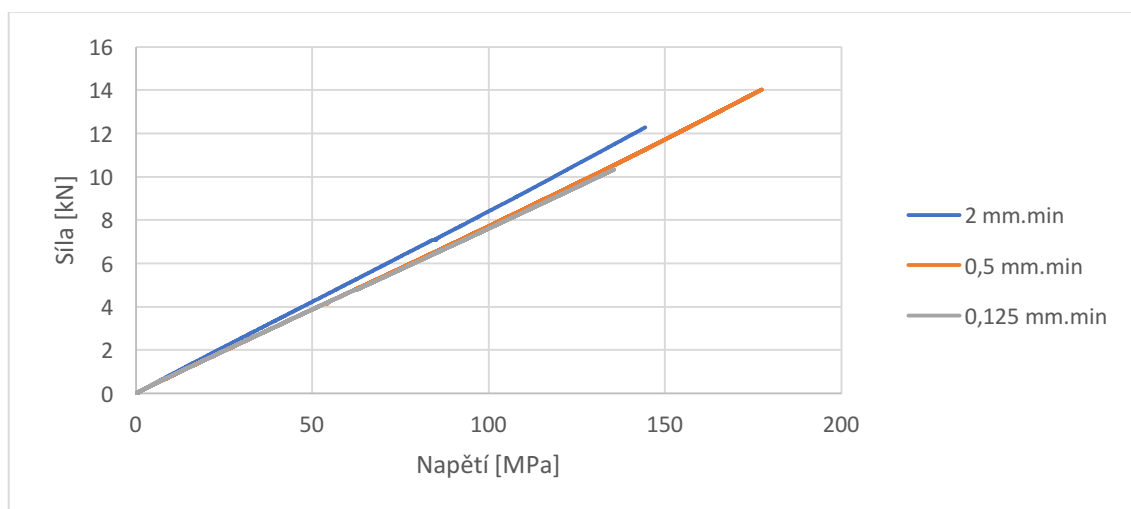
Tab. 5.2: Hodnoty naměřených extrémů

Výsledkem těchto experimentálních zkoušek je porovnání deformací a napětí u jednotlivých zatěžovacích rychlostí v závislosti na vstupující síle vyvolané svislým posunem příčnicku u zatěžovacího přístroje.

Průběh normálového napětí v závislosti na svislé síle od zatěžovacího přístroje je zobrazen na následujících grafech. Znárodně hodnoty jsou vždy průměrem hodnot stejně rychle zatěžovaného vzorku (tzn. těleso č. 1,2. a 3. dále těleso č. 4., 5., 6. a nakonec těleso č. 7.,8. a 9.).

Z následujících grafů v této kapitole jasně vyplývá, že vlastnosti spolupůsobení jednotlivých vrstev skleněného souvrství resp. tuhosti daných fólií PVB, závisí na rychlosti zatěžování, popř. na délce zatížení, což spolu úzce souvisí. Fólie použitá na mezivrstvu vykazuje v průběhu trvání zatížení určitou poddajnost. Tudiž čím déle zatížení působí, tím méně vrstvy tělesa spolu spolupůsobí.

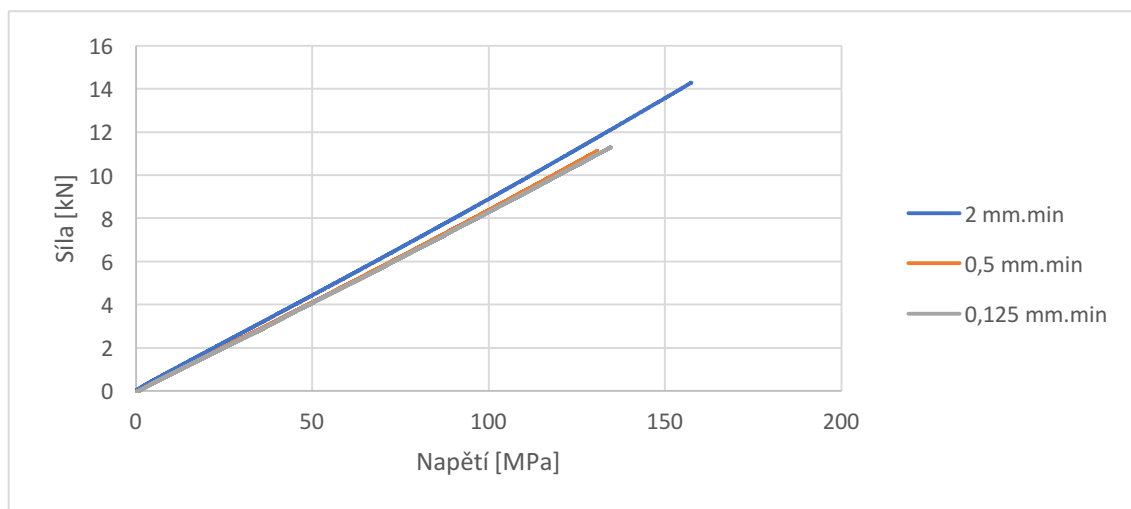
Průřezový modul se tím pádem zmenší a napětí v průřezu vzrůstá při stejném zatížení.



Graf 5.28: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 1

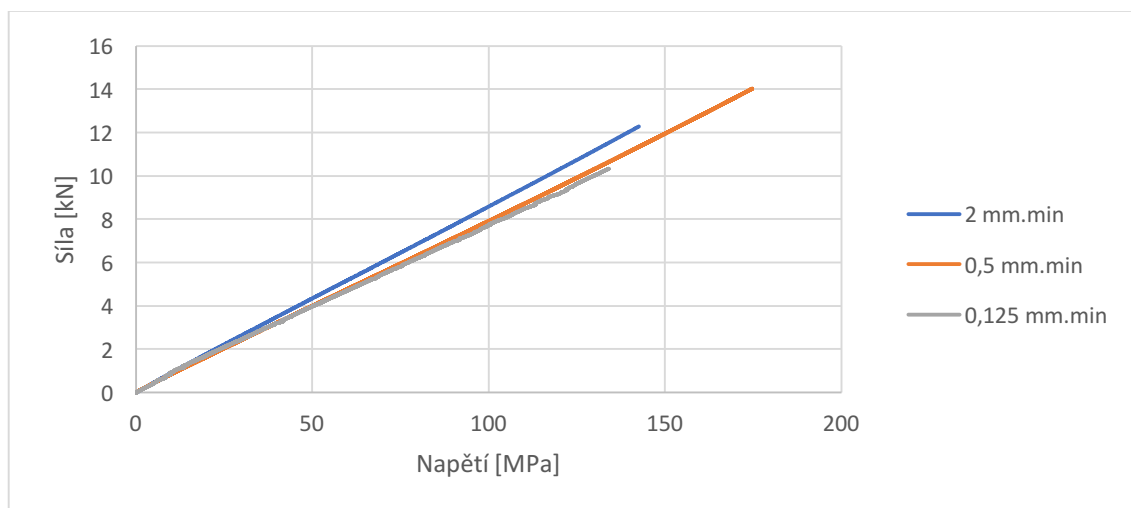
(Graf 5.28) přesně popisuje průběh napětí v závislosti vstupující síly působící na těleso a normálovým napětím koncentrovaným v oblasti tenzometru OT1 dle rozdílných rychlostí.

Je zde vidět vztah mezi rychlostí a normálovým napětím při stejné síle. Vždy vychází, že při určité síle napětí u nejpomaleji zatěžovaného tělesa vychází normálové napětí nejvyšší.



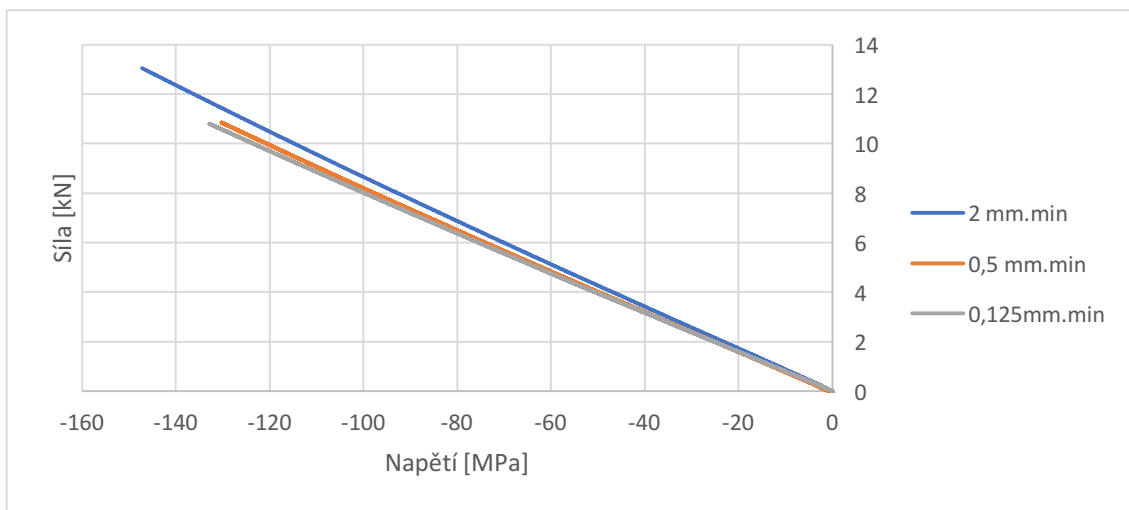
Graf 5.29: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 2

Tyto grafy shrnují závislost mezi silou vyvolanou posunem příčnicku a normálovým napětím v tažené oblasti souvrství. Křivky jsou lineární po celou dobu zatěžování a pro všechny rychlosti. Platí pro všechny tyto grafy (Graf 5.28, Graf 5.29 a Graf 5.30), které se zabývají výstupy z různých tenzometrů po průřezu uprostřed rozpětí.

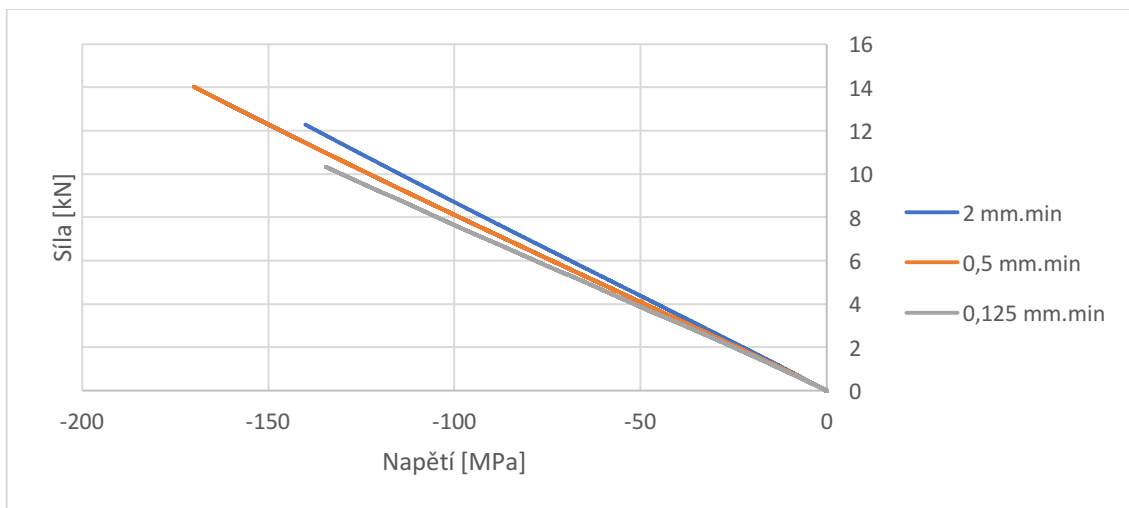


Graf 5.30: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 3

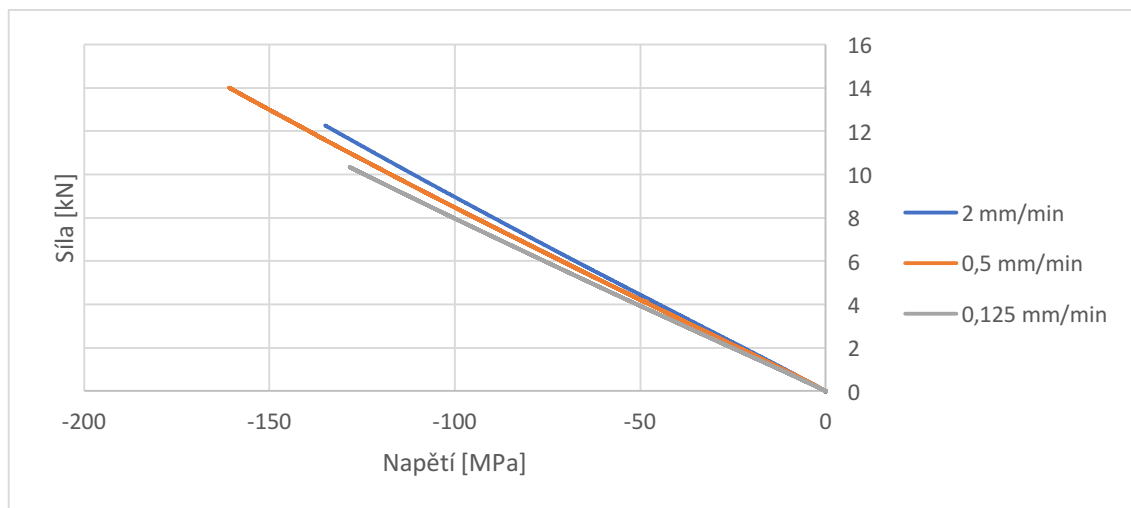
Následující grafy obdobně popisují závislost veličin rychlosti a délky zatížení s hodnotou napětí pro tlačenu oblast průřezu (tz. OT4, OT5 a OT6). Opět zde jasně vyčteme nepřímou úměru mezi rychlostí zatěžování, která se snižuje se zvyšujícím se normálovým napětím viz grafy (Graf 5.31, Graf 5.32 a Graf 5.33).



Graf 5.31: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 4



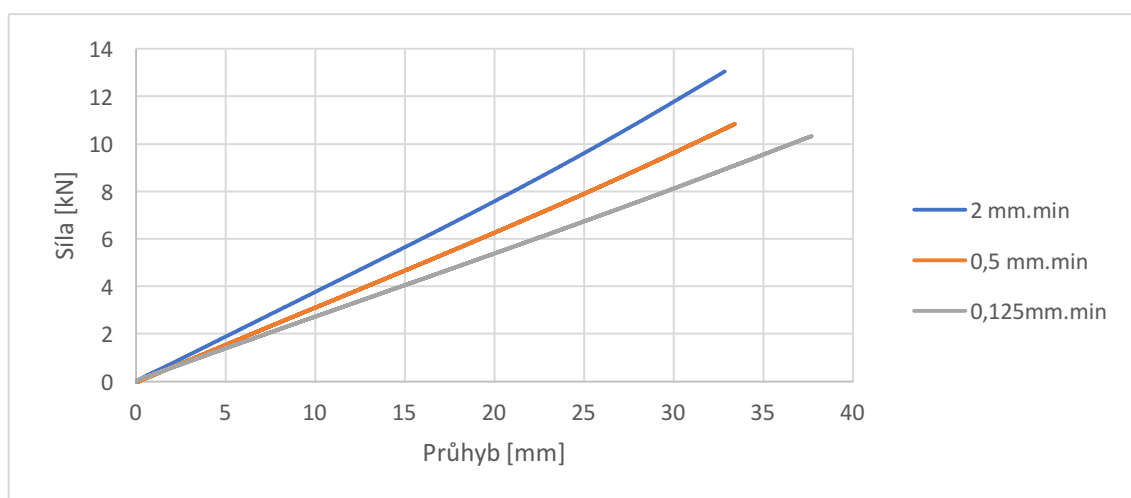
Graf 5.32: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 5



Graf 5.33: Průběh průměru normálového napětí v závislosti na svislé síle u tenzometru č. 6

Grafy nacházející se dále - viz (Graf 5.34) znázorňují průběhy deformací v závislosti na svislé síle a jejím nárůstu dle předem stanovené rychlosti. Hodnoty průhybů jsou zprůměrovány od všech těles zatížených stejnou rychlostí. Obdobně jako u napětí, hodnoty uvedené v grafech jsou průměrné hodnoty napětí u těles se stejnou rychlostí zatěžování.

Také zde můžeme vyčíst stejnou závislost, jako tomu bylo u napětí, a to, že se snižující se rychlostí zatěžování, roste velikost průhybu. Tudíž můžeme opět konstatovat, že zde pro závislost mezi délkou zatížení (rychlostí zatěžování) a velikostí průhybu platí nepřímá úměra. Délka zatížení zapříčiní snížení spolupůsobení vrstev skleněných tabulí mezi sebou a poté moment setrvačnosti a průřezový modul se sníží.



Graf 5.34: Průběh průměru průhybu v závislosti na svislé síle

Na základě vyhodnocení výše popsaných dat z experimentu, lze konstatovat, že vlastnosti lepených fólií používaných při výrobě vrstvených skel zásadně ovlivňuje rychlost a délka zatížení. Délka zatížení se negativně projevuje na tuhosti použité fólie a na spolupůsobení jednotlivých vrstev skleněných tabulí. Tato skutečnost byla zjištěna z těchto grafů, kde při určité síle vychází u pomaleji zatěžovaných vzorků vždy vyšší napětí a také vyšší průhyby z důvodu ztráty spolupůsobení spojených tabulí. Moment setrvačnosti tak i průřezový modul se tímto prokluzem sníží a tím pádem naroste normálové napětí v tělesu.

5.2 Dlouhodobý experiment

Jako doplňující měření k výše zmíněnému experimentu založeném na rychlosti zatěžování, jsem se zaměřil na zjištění dlouhodobého chování, převážně poddajností, skleněného souvrství spojeného pomocí fólie PVB při konstantním zatížení. Při tomto měření jsem měřil veličiny průhybů a napětí po průřezu uprostřed rozpětí při horních a spodních vláknech souvrství.

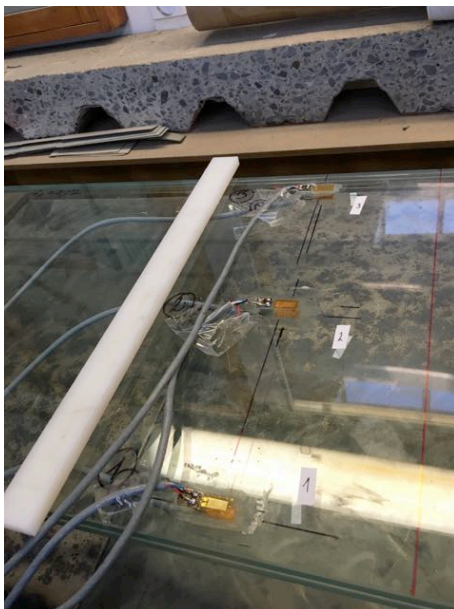
5.2.1 Příprava experimentu

Pro posouzení normálového napětí stejně jako u předchozího experimentu bylo použito tenzometrů pro nepřímé měření normálového napětí, tj. jednosměrné odporové tenzometry 10/120-LY 11 od firmy HBM. Konstanta těchto tenzometrů byla 2,07 a odpor vnitřního můstku 120 Ohmů. Parametry těchto tenzometrů jsou přiloženy v příloze C. Tenzometry měřili normálové napětí (tlakové a tahové) v podélném směru vzorku tabule. Při předpokladu namáhání tabule formou ohybu prostého nosníku budeme pomocí těchto senzorů měřit hlavní normálové napětí a naměřené hodnoty pevnosti budou pak hodnoty reálné pevnosti. Tenzometry jako v předchozím experimentu byly umístěny dle předpisu výrobce tak, aby se docílilo co nejpřesnějších výsledků. Dále byly použity dva snímače průhybu s možností měření dostatečného průhybu (+/- 20 mm) umístěné uprostřed rozpětí pro měření svislého průhybu. Uchycení snímačů ve správné pozici bylo zabezpečeno magnetickými stojinami. Správnost usazení průhybových snímačů byla vizuálně zkontrolována.



Obr. 5.39: Záznamové zařízení s ústřednou Spyder

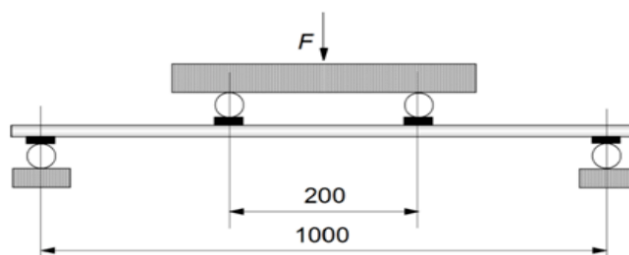
Vzorek byl po celou dobu chráněn před mechanickým poškozením a klimatickými vlivy. Po celou dobu dlouhodobého měření (3 měsíce i s odtížením) byla teplota v laboratoři udržována při stálé teplotě. Těleso bylo opatřeno šesti tenzometry a dvěma indukčními měřidly průhybu viz schéma na obr. (Obr. 5.40).



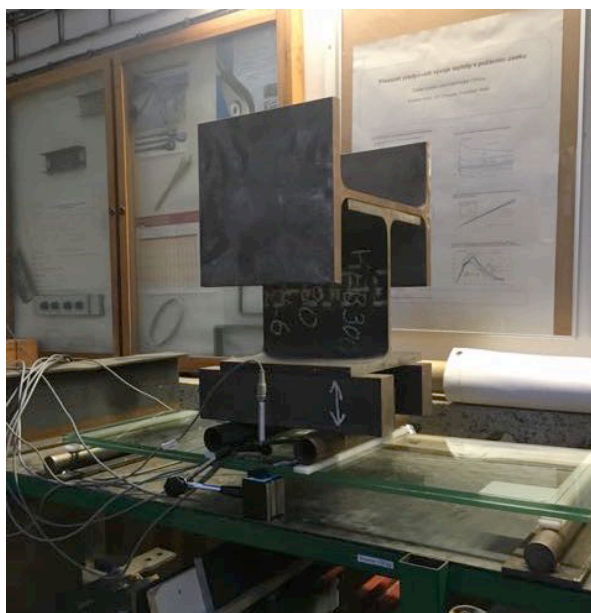
Obr. 5.40: Obrázek schéma zapojení

5.2.2 Zkušební zařízení

Při probíhající dlouhodobém statickém experimentu bylo těleso zatíženo konstantní silou 1,13 kN – viz (Obr. 5.42). Tato hodnota byla stanovena po zkušenostech z minulého měření. Zkušební vzorek byl při experimentu zatížen čtyřbodovým ohybem. Dle schématu odpovídající předpisu v ČSN EN 1288-3 a je zobrazeno na obrázku (Obr. 5.41).

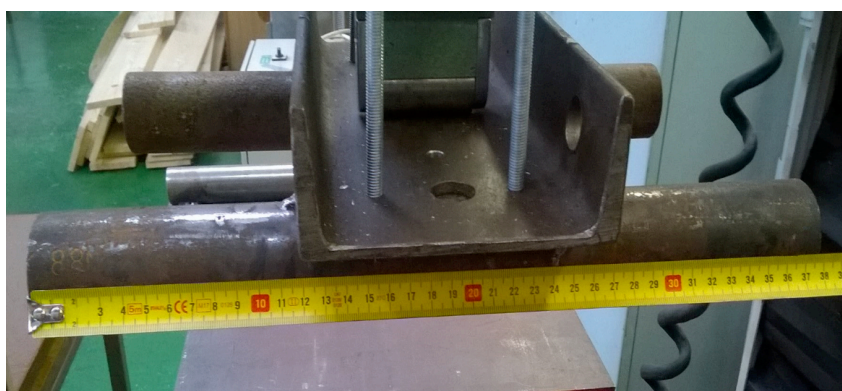


Obr. 5.41: Statické schéma ohýbané tabule při experimentu

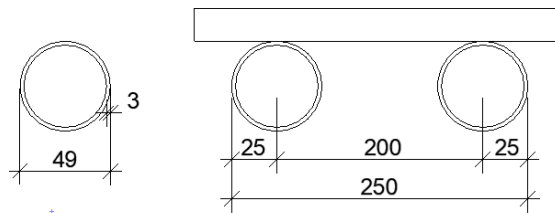


Obr. 5.42: Plné zatížení vzorku

Soustava závaží se skládala z 5 komponentů tak, abychom dosáhli výše zmíněné hmotnosti a tím vyvolali předem předepsanou sílu. Jednotlivá závaží byla na vzorek vkládána ručně a jednotlivě, což je vidět na obrázku grafu průběhu zatížení v kapitole 5.2.5 . Tato soustava závaží byla přenášena na skleněný vzorek pomocí roznášecí soustavy dvou válců o průměru 49 mm s tloušťkou stěny 3 mm. Osová vzdálenost těchto válců je 200 mm a šířka 380 mm. Detail příčného řezu viz (Obr. 5.44)



Obr. 5.43: Dostatečná délka zatěžovacích válců sestavy



Obr. 5.44: Příčný řez zatěžovací soustavy

Jako podpory byly zvoleny válce o průměru 40 mm v osové vzdálenosti 1000 mm a délky, resp. šířky válce 500 mm (tzn. byly použity válce větší šířky než tabule šíře 360 mm). Podporové válce byly pevně přichycené k podkladní konstrukci, aby nedošlo k posunutí. Veškeré kontakty mezi ocelovými prvky a sklem byly ochráněny plastovými podložkami z důvodu ochrany skleněné tabule proti mechanickému poškození viz (Obr. 5.45 a Obr. 5.46).

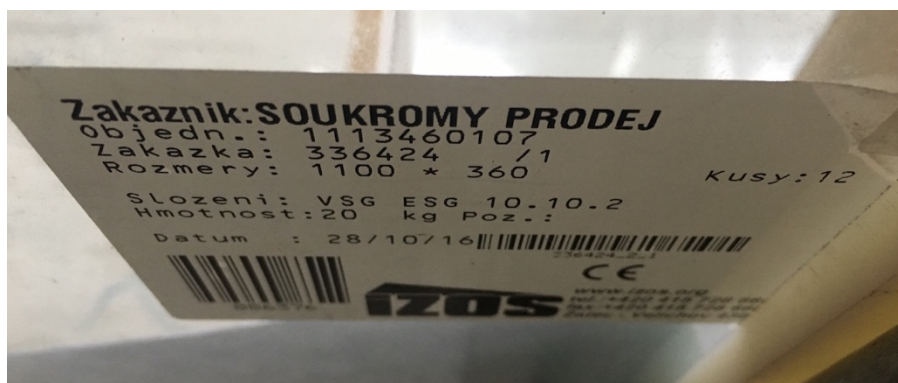


Obr. 5.45: Detail ochrany kontaktů mezi sklem a podporovými válci



Obr. 5.46: Detail ochrany kontaktů mezi sklem a roznášecí soustavou

Při experimentu bylo použité vrstvené sklo, které bylo tepelně upravené a spojené pomocí fólie PVB.



Obr. 5.47: Obrázek štítku skla

Celý záznam experimentu probíhal na zařízení Spyder8 a naměřená data se ukládala do připojeného notebooku. Data z notebooku byla průběžně zálohována a vyhodnocována.

5.2.3 Průběh dlouhodobé zatěžovací zkoušky

Jakmile těleso bylo správně usazené a finální poloha zaměřena, mohlo dojít k zapojení veškerých senzorů (tenzometrů a snímačů průhybu) do záznamové

ústředny řízené programem v připojeném notebooku. Před započítáním záznamu došlo k vynulování veškerých čidel, tudíž vlastní tíha skla nebyla do záznamu zahrnuta a hodnota zatížení vychází pouze z hmotnosti závaží, kterými jsem zatížil vzorek. Normálové napětí uprostřed rozpětí tabule skla bylo zjištěno pomocí výpočtu. Tato hodnota vyšla jako 1 MPa.

Záznam měření ve fázi zatěžování byl spuštěn, když bylo těleso nezatížené. A následně, v určitých krocích, bylo postupně těleso zatěžováno přidáváním předem zvážených závaží až k předepsanému zatížení. Abychom zachytili v počátku měření veškeré nárůsty napětí i průhybů tak bylo nastaveno vzorkování po jedné sekundě. Po dvou hodinách záznamový program automaticky přešel na vzorkování jednou za 10 minut a takto běžel až do konce měření z důvodu omezení množství zpracovávaných dat. Měření bylo minimálně jednou týdně zálohováno.

Ve fázi odtěžování bylo postupováno obdobně. Měření bylo spuštěno, aniž bychom senzory vynulovali a v dílčích krocích došlo k odtěžování až zbyla pouze tabule skla zatížená vlastní tíhou. Opět záznam v prvních dvou hodinách prováděl zápis každou vteřinu (předpoklad zásadních změn na senzorech) a následně po dvou hodinách se vzorkování změnilo na zápis jednou za 10 minut.

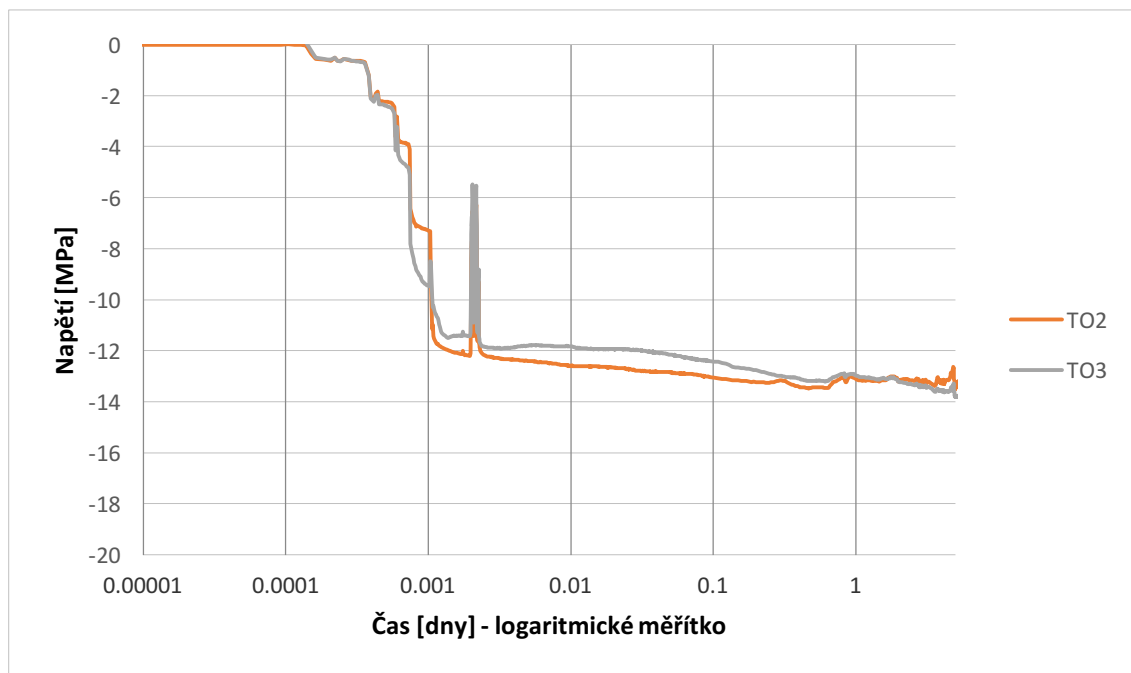
5.2.4 Výsledky měření

V této kapitole je shrnutí naměřených dat z dlouhodobého měření vrstveného skla. Vyhodnocení se týká jak fáze přetížení, tak fáze druhé, kdy došlo k odtížení vzorku a sledování poddajnosti PVB fólie v závislosti na čase.

5.2.4.1 Těleso ESG-PVB-10

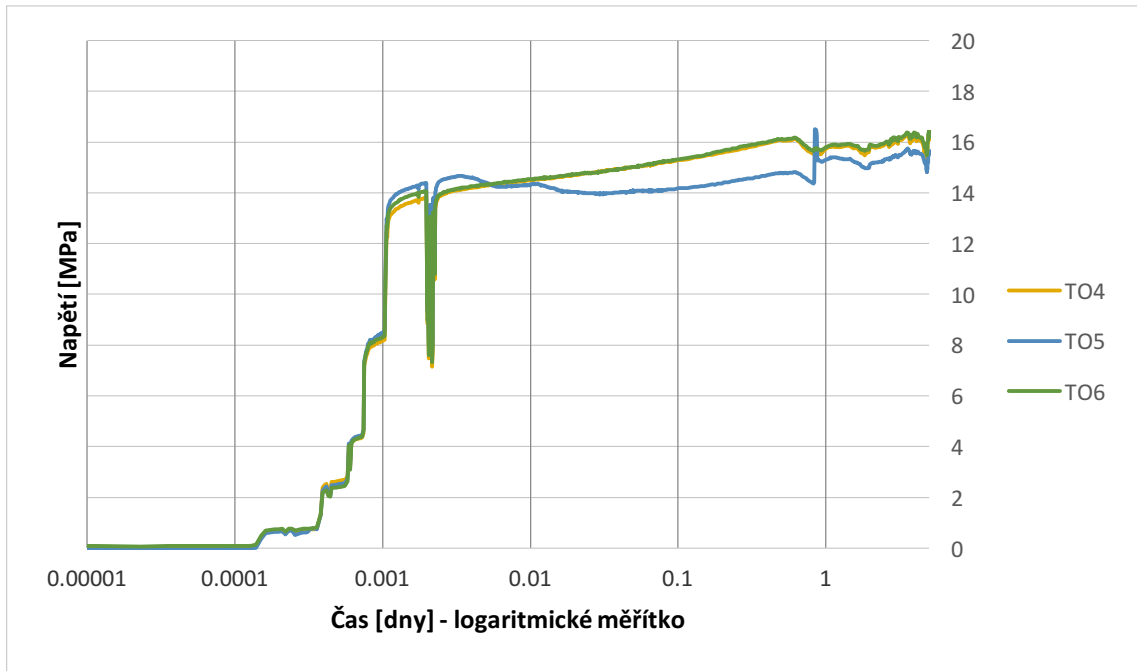
1. Fáze - zatížení

V této fázi grafy (Graf 5.35, Graf 5.36, Graf 5.37) ukazují závislost normálového napětí a průhybu skla na čase v logaritmickém měřítku, abychom mohli zohlednit intenzivní rychlost nárůstu normálového napětí a průhybu v době na začátku měření a pozvolné zvětšování v průběhu velmi dlouhé doby, až do doby ukončení měření v 51. dni.

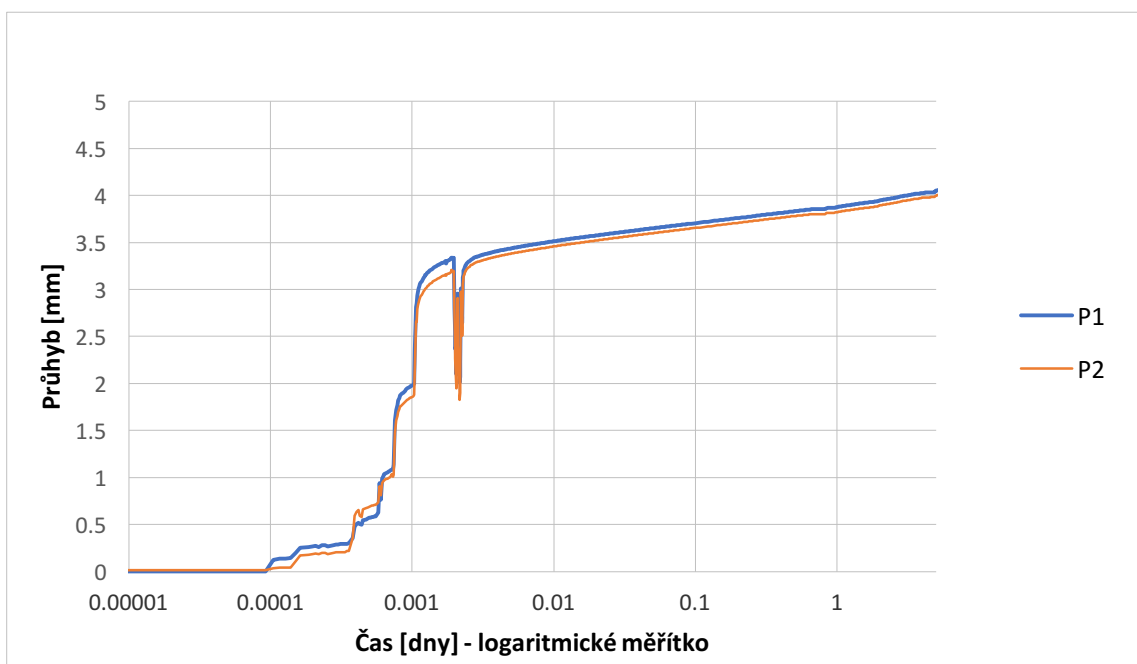


Graf 5.35: Závislost normálového tlakového napětí na době trvání konstantního zatížení

Na grafu (Graf 5.35 a Graf 5.36) je znázorněn nárůst normálového napětí (tlakového a tahového) při konstantním zatížení. Dále jsou zde patrné kroky postupného přidávání zatížení v počátku měření a v čase 0,002 dne je zřetelný chvilkový pokles normálového napětí, což zapříčinilo momentální odlehčení tělesa. Maximální tlakové normálové napětí bylo naměřeno na ose tělesa v podélném směru uprostřed rozpětí s hodnotou 12,72 MPa. Na straně tažených vláken je maximální hodnota normálového napětí ve stejném místě s naměřenou hodnotou 16,38 MPa - viz graf (Graf 5.36).



Graf 5.36: Závislost normálového tahového napětí na době trvání konstantního zatížení



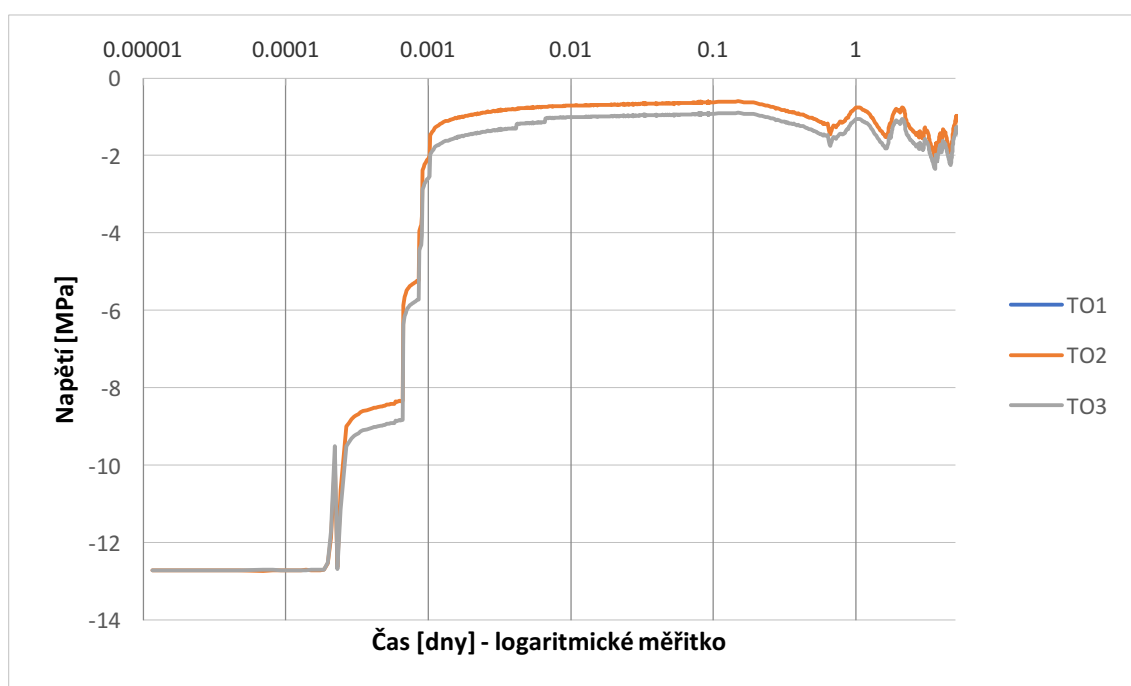
Graf 5.37: Závislost svislého průhybu na době trvání konstantního zatížení

Graf 5.37 znázorňuje záznam průběhu svislého průhybu tělesa. V první části jsou zřejmé okamžiky, kdy došlo k usazení závaží a následně v čase 0,002 dne došlo k jejich úpravě ve smyslu posunutí a úpravě. Měření v této fázi probíhalo 51 dní a dle grafů nebylo nedosaženo asymptoty průhybu.

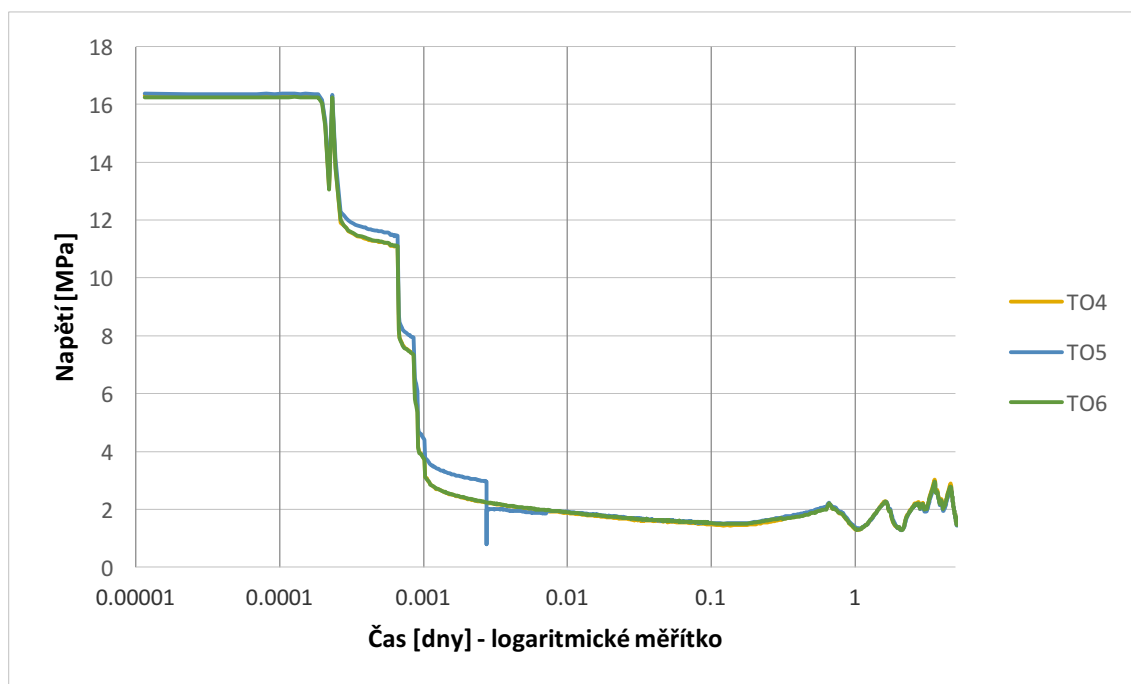
2. Fáze - odtížení

Druhá fáze odtížení proběhla tak, že aniž došlo k vynulování senzorů tak v průběhu záznamu bylo postupně po dílčích krocích odtěžováno, což lze seznat na výsledných obrazcích.

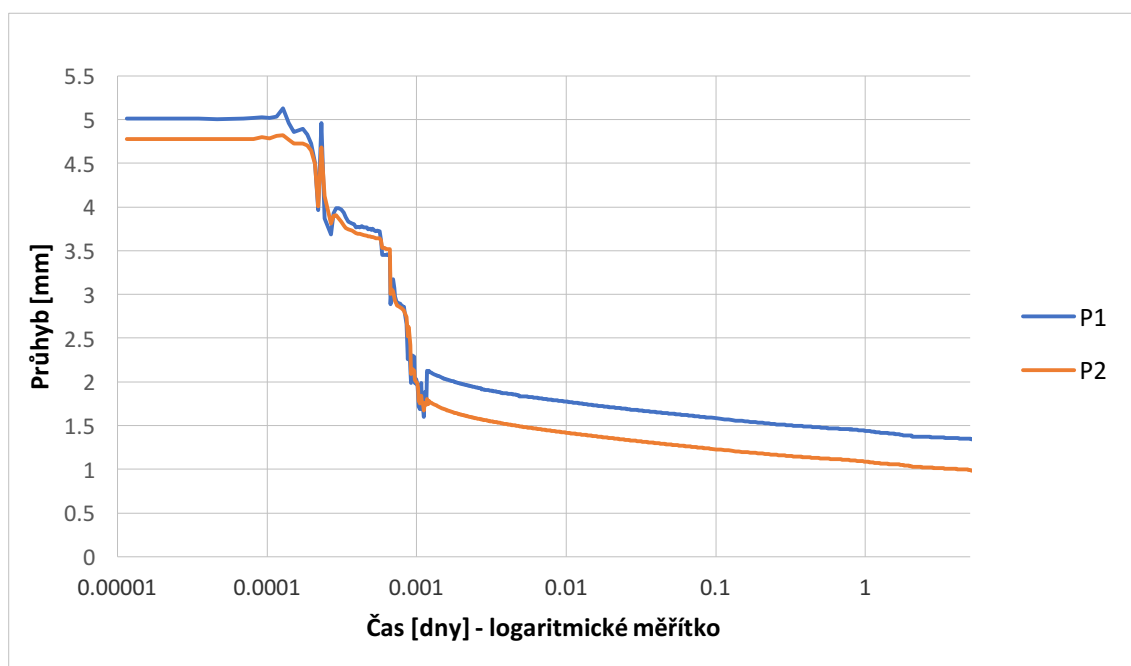
Na následujícím grafu (Graf 5.38) je patrný vývoj snižujícího normálového tlakového napětí. Jsou zde fáze postupného odtěžování tělesa až do úplného odtížení. Výsledná hodnota zbytkového napětí byla u všech tenzometrů stejná v oblasti mezi 1,5 – 2,0 MPa. Obdobně tomu bylo také u grafu (Graf 5.39), který znázorňuje hodnoty odtížení na straně tahu.



Graf 5.38: Závislost normálového tlakového napětí na čase po celkovém odtížení



Graf 5.39: Závislost normálového tahového napětí na čase po celkovém odtížení



Graf 5.40: : Závislost svislého průhybu na době trvání konstantního zatížení

Graf 5.40 popisuje průběh odtížení vzorku. Na počátku záznamu jsou zřejmé fáze postupného odstraňování zatížení. Konečný stav při přerušení záznamu po 21 dnech, zůstalo těleso s průhyby od 1,25 – 0,80 mm. Přičemž snímače průhybu měřily odlišné hodnoty v řádu 0,45 mm po celou dobu záznamu.

5.2.5 Vyhodnocení dlouhodobého experimentu

Výsledky získané při dlouhodobém experimentu potvrdily předpoklad o poddajném chování PVB fólie, která pro různé doby trvání zatížení má různou tuhost, jak je zřejmé z grafů v kap. 5.2.4. Ani po relativně dlouhé době záznamu hodnota normálového napětí a průhybu uprostřed rozpětí stále rostla. Zkouška v 1. fázi probíhala 51 dní.

Porovnávány byly hodnoty z předchozího experimentálního měření, přičemž zkoušení trvalo relativně krátkou dobu, s hodnotami dlouhodobého měření. Měřením bylo zjištěno, že při stejném zatížení byla hodnota maximálního tahového normálového napětí u dlouhodobého měření 16,38 MPa a u měření těles v závislosti na rychlosti zatěžování byla hodnota 14,58 MPa. Obdobné rozdíly byly zaznamenány i při měření deformací skleněných tabulí. Výsledkem měření byl rozdíl hodnot průhybů 0,72 mm.

Ze zjištěných údajů je patrné, že při zatížení vrstveného skla dochází k prokluzu jednotlivých vrstev a jejich spolupůsobení není úplné.

Další část dlouhodobého experimentu se zabývala celkovým odtížením a měřeno bylo zbytkové normálové napětí a průhyb. Z výsledných hodnot je zřejmá tendence tělesa se vrátit do původního stavu před vnesením zatížení, avšak dle měření po téměř 25 dnech, je stále na zkušební tělese zachován průhyb 1 mm s normálovým napětím 1,65 MPa u spodních vláken.

6 ANALYTICKÝ VÝPOČET

6.1 Popis

V této části je popsána jedna z možných zjednodušených metod analytického výpočtu. Jedná se o návrh vrstvených skel ze dvou nebo více skleněných tabulí. Tyto vrstvy tabulí jsou spojeny vrstvou viskoelastického materiálu. Dle typu, materiálových vlastností a chemického složení lze ve výpočtu uvažovat spolupůsobení daných skleněných tabulí v celém souvrství. Velikost spolupůsobení závisí zejména na smykovém modulu G , který je v největší míře závislý na délce trvání zatížení a teplotě, jak je tomu u všech viskoelastických materiálů. Problém návrhových metod je, že vlastnosti používaných fólií jsou již v této době nedostačující a nekompletní a tudíž tyto návrhové hodnoty jsou velmi konzervativní.

6.2 Výpočet dle normy prEN 16612

Pro posouzení spolehlivosti konstrukce nesmí v mezním stavu únosnosti překročit maximální tahové napětí hodnotu návrhové pevnosti skla, viz podmínka - 6.1. Maximální tahové napětí je vypočítáno z kombinace nejnepríznivějšího návrhového zatížení, které může na konstrukci nastat. Pro plavené sklo platí vztah – 6.2 a pro upravovaná skla s úpravou pevnosti dle vztahu [1]

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d}, \quad (6.1)$$

kde σ_{max} je maximální tahové napětí,
 $f_{g,d}$ návrhová pevnost skla.

Dle mezního stavu použitelnosti se při posuzování ověřují hodnoty deformací, kde maximální deformace musí být menší než mezní hodnota deformace [1].

$$w_{max} \leq w_d, \quad (6.2)$$

kde w_{max} je maximální deformace,
 w_d mezní deformace.

Zjednodušená metoda pro posuzování vrstvených skleněných tabulí se zatížením působícím kolmo k povrchu tabulí je postavena na metodě zohledňující

účinnou tloušťku. Pro přenos smykových sil ω se nahrazuje vrstvené sklo pomocí monolitické tabule o tloušťce, která se rovná tloušťce efektivní. Dále se pomocí součinitele ω zavádí a zohledňuje vliv délky působení zatížení a také teploty. Účinnou tloušťku pro výpočet deformace lze zjistit ze vztahu dle výpočtu [1]

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega (\sum_i h_k h_{m,k}^2)} , \quad (6.3)$$

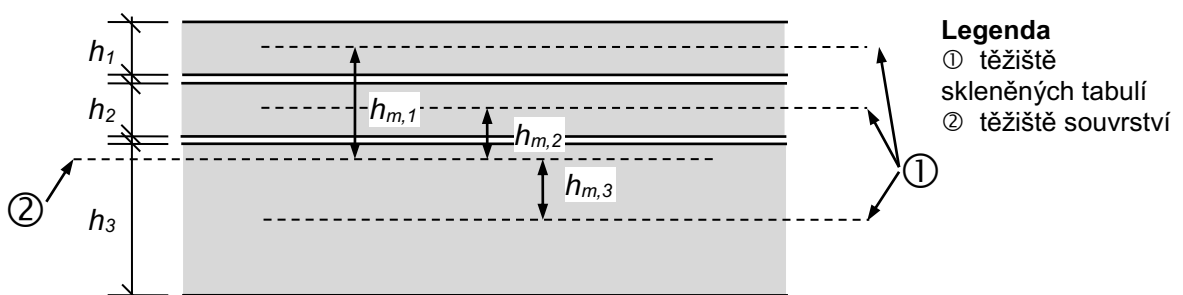
a dále je možné použít následující vzorec (6.4) a tím dostaneme účinnou tloušťku pro mezní stav únosnosti

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{(h_{ef,w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m,j})}} , \quad (6.4)$$

kde ω je součinitel přenosu smykových sil, viz Obr. 6.1,
 h_l, h_j tloušťky jednotlivých tabulí skla, viz Obr. 6.1,
 $h_{m,k}, h_{m,j}$ těžiškové vzdálenosti osy tabule k či j , od těžiškové osy souvrství, viz Obr. 6.1.

Tab. 6.1: Součinitel přenosu smykových sil

Zatížení	Třída 0	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Vítr – vnitrozemské oblasti	0	0	0,1	0,6
Vítr – ostatní oblasti	0	0,1	0,3	0,7
Užitné zatížení – normální provoz	0	0	0,1	0,5
Užitné zatížení – davy	0	0	0	0,3
Sklo s přístupem údržby	0	0	0	0,1
Sníh – externí markýzy	0	0	0,1	0,3
Sníh - střechy	0	0	0	0,1
Stálé zatížení	0	0	0	0



Obr. 6.1: Značení vrstveného skla

6.3 Součinitel přenosu smykových sil

Součinitel přenosu smykových sil ω je jedním z parametrů, který zásadně ovlivňuje konečný návrh vrstvených skel. Součinitel je přímo závislý na typu použité vrstvy spojující jednotlivé vrstvy skleněných tabulí. Typy čirých fólií používaných do mezivrstev se dle chemického složení dají zařadit do čtyř kategorií. Kategorie 0 – 3 přihlíží k závislosti Youngova modulu pružnosti E na teplotě. Typy fólií používaných pro vrstvená skla mohou být, jak bylo zmíněno výše kap. 4.4 , např. PVB, EVA, TPU či ionoplast.

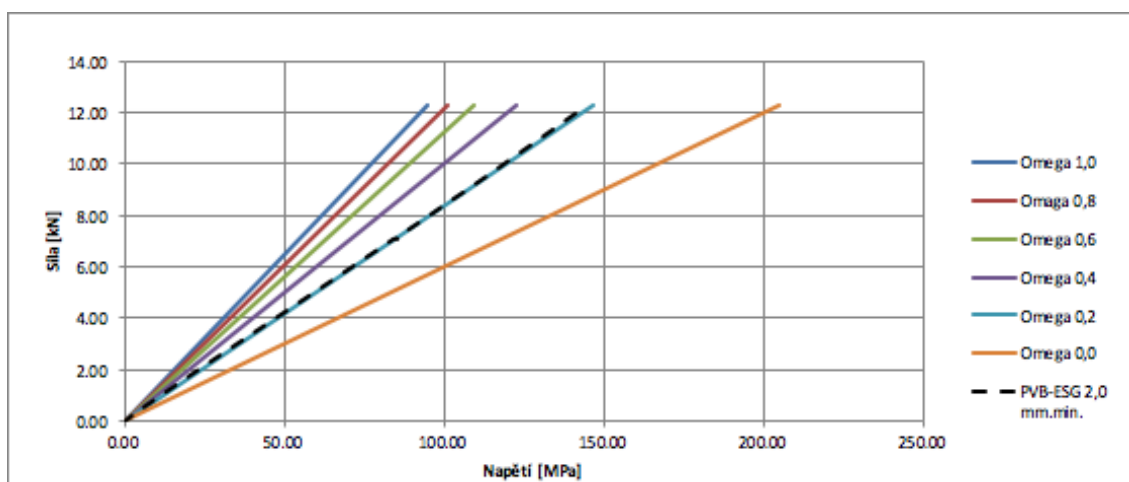
Tento součinitel přenosu smykových sil může nabývat hodnot 0 (bez smykového spolupůsobení) – 1 (s plným spolupůsobením). Hodnoty součinitele smykových ploch jsou shrnuty v tabulce (Tab. 6.1). Tyto hodnoty dle zjednodušené metody uvažují pouze s krátkodobým působením zatížení, jako je například zatížení větrem. U dlouhodobých zatížení se spolupůsobení vrstev téměř zanedbává. Tímto postupem dostáváme konstrukci na sice bezpečnou, ale neekonomickou.

Z důvodů obrovské variability a spoustě typů fólií používaných při výrobě, zde vychází výhodněji ověření vlastností dané fólie pomocí experimentálního zkoušení.

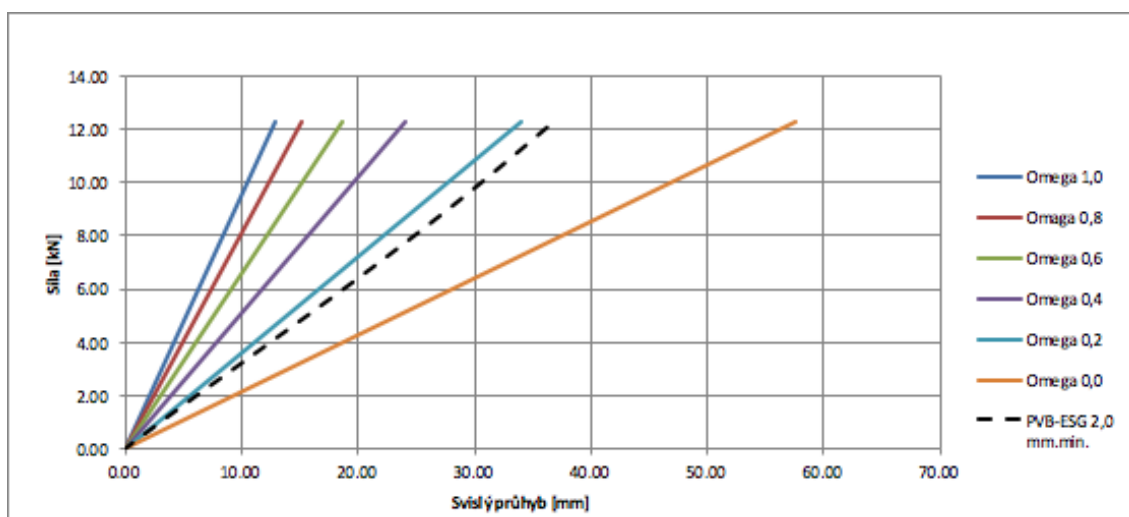
Pro přesnější získání součinitele přenosu smykových sil, a tudíž i k efektivnějšímu návrhu vrstvených skel, slouží parametrická studie dle prEN 16612 [1]. Parametrická studie účinku smykového modulu G na přerozdělení normálového napětí σ a velikosti smykové deformace se opírá o zjednodušenou metodu návrhu vrstvených skel obsahující metodu efektivních tloušťek, viz vzorce (6.3) a (6.4). Následující grafy zobrazují křivky jednotlivých součinitelů přenosu smykových sil dle prEN 16612 [1].

Pro přesné určení součinitele přenosu smykových sil podložíme do níže zobrazených grafů křivky s výsledky z experimentálního měření (viz kapitola 5.1.4). Vynesením těchto křivek s výsledky dokážeme přiřadit danému tělesu přiřadit správný součinitel smykových sil.

Na grafu (Graf 6.1) je zobrazena závislost síly a normálového napětí na zprůměrovaných tělesech zatížených svislým posunem příčnicku 2,0 mm.min. Z tohoto grafu jasně vyplývá, že součinitel smykových sil pro toto těleso je $\omega = 0,2$. Graf 6.2 znázorňuje obdobnou závislost jako předešlý, ale s rozdílem závislosti síly na průhybu tělesa. Zde křivka tělesa kopíruje křivku pro $\omega = 0,2$ jen z části. K odklonu dochází až při vyšších hodnotách průhybu. Tudíž můžeme konstatovat, po porovnání s experimentálním zkoušením, že tabule vrstveného skla při zatěžování 2,0 mm.min. má součinitel přenosu smykových sil $\omega = 0,2$.

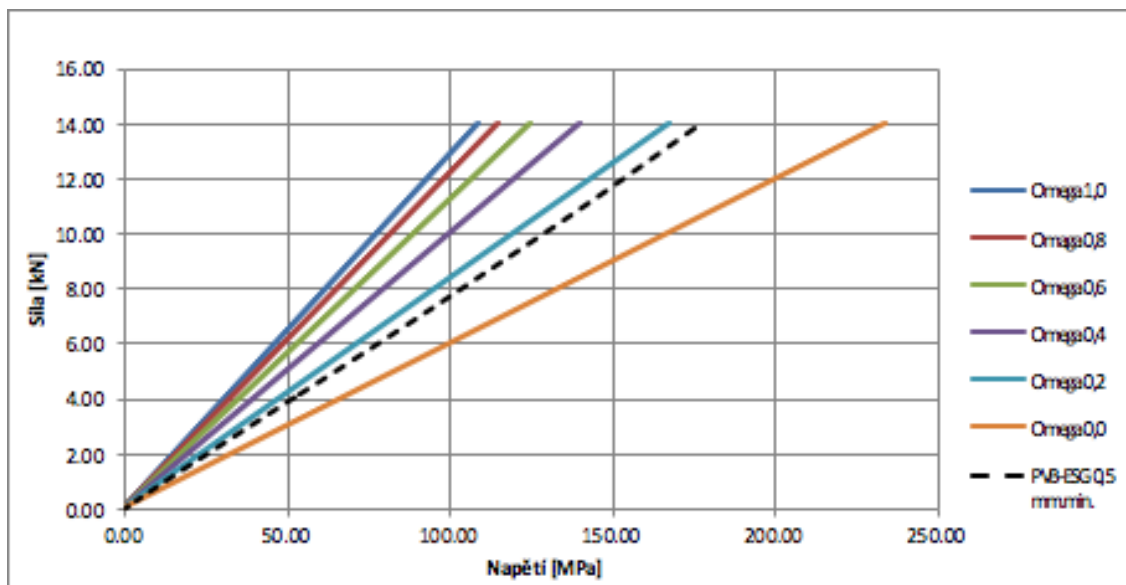


Graf 6.1: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 2,0 mm.min.

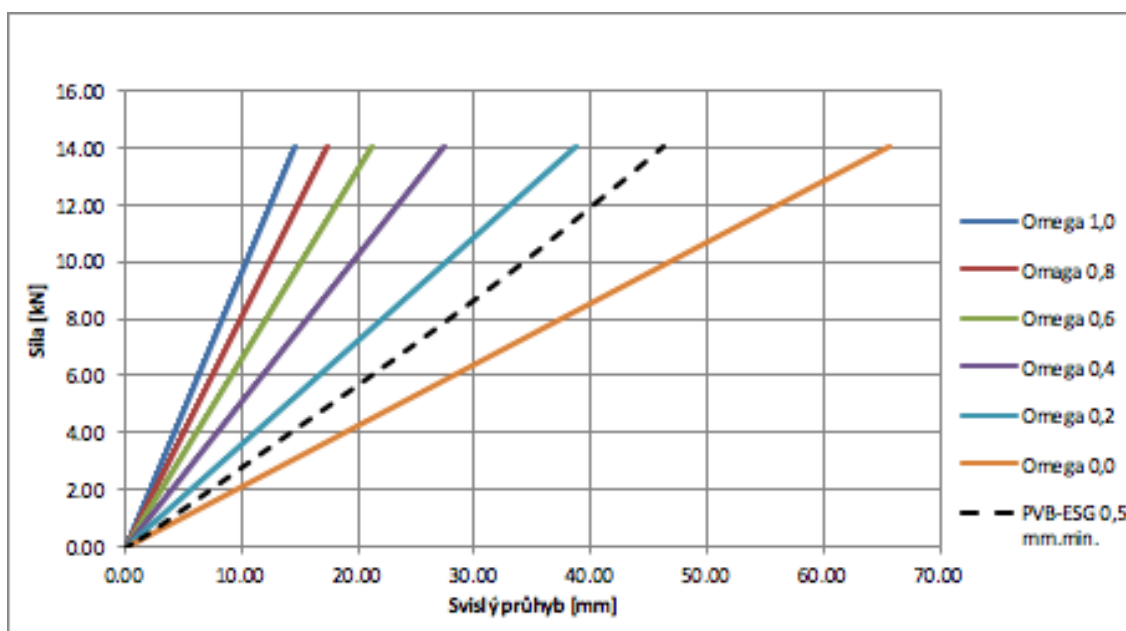


Graf 6.2: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 2,0 mm.min.

Stejným způsobem provedeme zatížení i ostatních těles dle jejich rychlostí zatěžování. Tělesa zatěžována rychlostí 0,5 mm.min. jsou popsána křivkou normálového napětí v závislosti na svislém posunu příčniku viz - (Graf 6.3). A obdobně závislost na průhybu a síly je na grafu (Graf 6.4). U obou grafů těles zatěžovaných rychlostí 0,5 mm.min. se pohybujeme v rozmezí mezi $\omega = 0,2$ a $\omega = 0$.



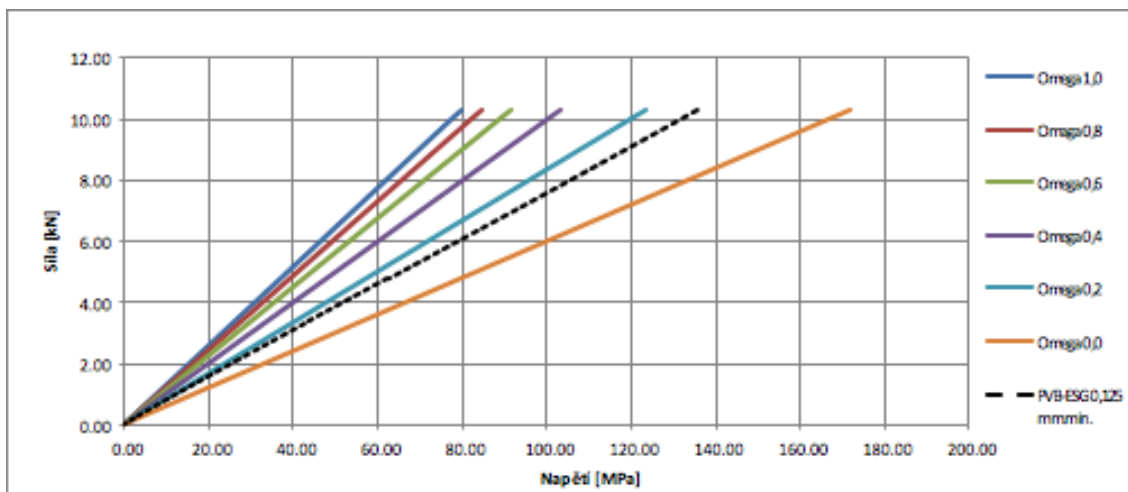
Graf 6.3: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,5 mm.min.



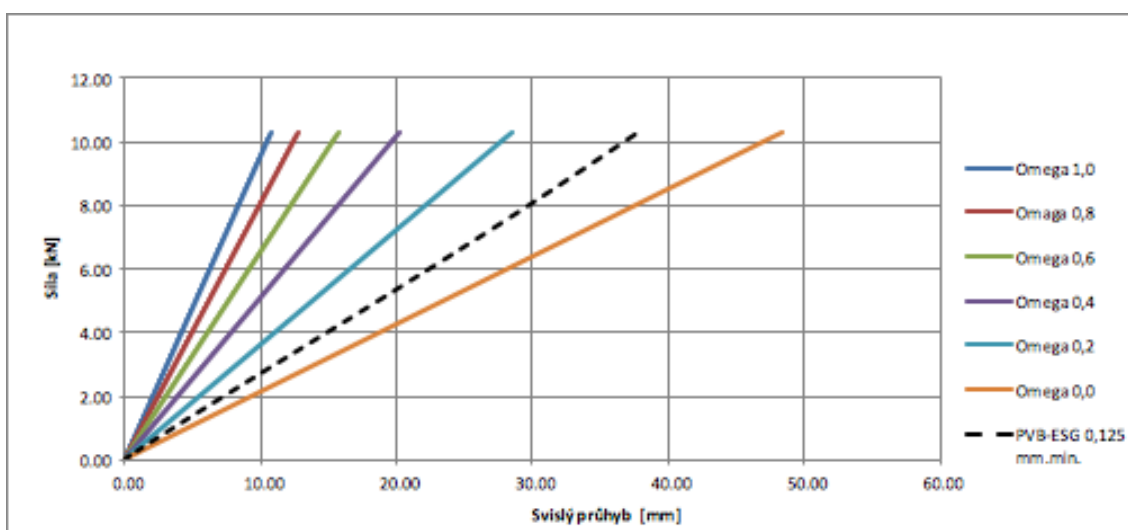
Graf 6.4: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,5 mm.min.

Závislost normálového napětí a síly, také závislost průhybu a síly u nejmaleji zatěžovaných tělesa (tz. 0,125 mm.min.) je vykreslena na následujících grafech (Graf 6.5 a Graf 6.6), kde vychází obdobně jako u těles s rychlostí zatěžování 0,5 mm.min.

součinitel přenosu smykových sil v rozmezí mezi $\omega = 0,2$ a $\omega = 0$, přičemž u těchto těles se více blížíme hodnotě $\omega = 0,1$.



Graf 6.5: Závislost tuhosti fólie na normálového napětí dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,125 mm.min.



Graf 6.6: Závislost tuhosti fólie na průhybu dle součinitele ω a zatížení zkušebního tělesa dle experimentálně zjištěných parametrů při rychlosti 0,125 mm.min.

Touto metodou jasně dokazujeme, že smykový modul G daných fólií, který ovlivňuje spolupůsobení jednotlivých vrstev tabulí skla, závisí na rychlosti a délce zatížení. U těles která byla zatížena nejvyšší rychlosti 2,0 mm.min. dle parametrické studie byla jejich soudržnost vyšší než u těles zatěžovaných rychlostí pomalejší.

6.4 Analytický výpočet vrstvených skleněných tabulí s PVB fólií

Podle výše zmíněné metody s teorií založené na účinné tloušťce podle prEN 16612 [1], byly provedeny analytické výpočty vrstvených desek. Geometrický tvar a statické schéma odpovídají tělesům použitých při experimentálních zkouškách popsaných v kapitole 5. Následně výsledky experimentálního zkoušení a numerického modelu byly použity k porovnání s vypočítanými napětími a deformacemi z analytického modelu.

Tab. 6.2: Vstupní údaje pro analytický výpočet

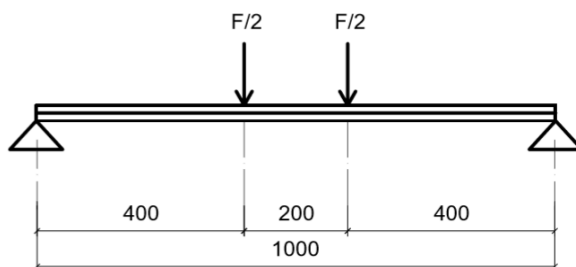
GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY VRSTVENÉHO SKLA	
Vzdálenost podpor	1 000 mm
Vzdálenost působících sil	200 mm
Vzdálenost působící síly od podpory	400 mm
Šířka tabule	360 mm
Tloušťka tabule	10 mm
Tloušťka souvrství	20,76 mm
Tloušťka fólie	0,76 mm
Vzdálenost těžiště tabule od těžiště souvrství	5,38 mm
MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI TEPELNĚ TVRZENÉHO SKLA	
Pevnost v tahu $f_{b,k}$	120 MPa
Modul pružnosti E	70 000 MPa

Určení návrhové pevnosti skla $f_{g,d}$ dle vztahu

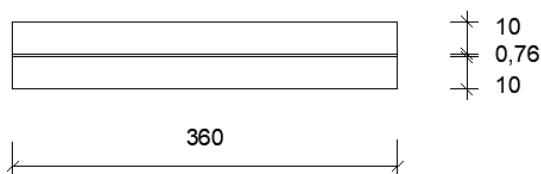
$$f_{g,d} = \frac{0,85 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0 \times (120 - 45)}{1,2}$$

$$f_{g,d} = 84,75 \text{ MPa}$$

Statické schéma tabule z vrstveného skla na Obr. 6.2. Příčný řez a rozměry skleněného souvrství jsou na Obr. 6.3.



Obr. 6.2: Statické schéma



Obr. 6.3: Příčný řez tabulí

Abychom spočítali efektivní tloušťku materiálu, stanovíme součinitele přenosu smykových sil pro folii PVB podle tabulky (Tab. 6.1) pro použité zatížení – normální provoz, vychází pak $\omega = 0,1$. Pro výpočet deformace stanovíme účinnou tloušťku ze vztahu

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{(10^3 + 10^3) + 12\omega (10 \times 5,8^2 + 10 \times 5,8^2)}$$

$$h_{ef,w} = 13,92 \text{ mm}$$

a účinná tloušťka pro výpočet napětí se dostane ze vzorce

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{13,92^3}{(10 + 2 \times 0,1 \times 5,38)}}$$

$$h_{ef,\sigma,j} = 15,60 \text{ mm}$$

Pro výpočet efektivních tloušťek materiálu byla za součinitel smykových sil dosazena hodnota $\omega = 0,1$. Hodnota $\omega = 0,1$ se určila dle **Error! Reference source not found.** Podle použité fólie se součinitel roznosu smykových sil rozřídí do určitých tříd. PVB fólie patří do třídy 2. Zatížení bylo voleno jako užité zatížení s normálním provozem.

Maximální napětí podle mezního stavu únosnosti se stanoví ze vzorce

$$\sigma_{max} = \frac{M_y}{W_y}$$

kde, M_y je maximální moment [Nmm], který vznikne na prostě uloženém nosníku při zatížení dvojicí osamělých břemen, viz obr. 5.2.

W_y průřezový modul souvrství [mm³].

Pro řešené statické schéma se průřezový modul souvrství stanoví z efektivní tloušťky

$$W_y = \frac{1}{6} b h_{ef,\sigma}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} \times 360 \times 15,60^2$$

$$W_y = 14\,601,6 \text{ mm}^3$$

Maximální moment se vypočítá ze vzorce

$$M_y = \frac{F}{2} c$$

kde, F je celkové zatížení nosníku [N],
 c vzdálenost podpory od působící síly [mm], $c = 400 \text{ mm}$.

Ve vzdálenosti 400 mm od podpory vychází největší ohybový moment dle průběhu vnitřních sil na zatěžovacím schématu čtyřbodovým ohybem. Působící síla je rozdělena na dvě stejné síly viz Obr. 6.2.

Použitím rovnic výše vypočteme maximální sílu F , kterou vrstvený nosník (viz Obr. 6.2) je schopen přenést. Rovnici porovnáme s návrhovou pevností $f_{g,d} = 84,75 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{max} = \frac{M_y}{W_y} \leq f_{g,d}$$

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{F \times c}{2}}{W_y} \leq f_{g,d}$$

$$F \leq \frac{2W_y \times f_{g,d}}{c}$$

$$F \leq \frac{2 \times 14\,601,6 \times 84,75}{400}$$

$$F \leq 6\,187,43 \text{ N} \sim 6,19 \text{ kN}$$

Jakmile se do vzorců dosadí návrhová pevnost $f_{g,d}$, dostaneme maximální sílu F , která musí být menší nebo rovna síle 6,19 kN. Síla působí ve dvou místech, tudíž síla, která může působit na nosník, je síla $F/2$ dle schématu (Obr. 6.2), aniž by nedošlo k deformaci. Po překročení této síly dochází dle metody v prEN 16621 k překročení maximálního napětí σ_{max} a následně deformaci nosníku při tomto zatěžovacím schématu.

V mezním stavu použitelnosti posuzujeme svislou deformaci nosníku. Pro výpočet mezního stavu použijeme efektivní tloušťku, která se dá stanovit dle vztahu (6.3). Moment setrvačnosti I_y se určí jako

$$I_y = \frac{1}{12} b h_{ef.w}^3$$

$$I_y = \frac{1}{12} \times 360 \times 13,92^3$$

$$I_y = 80\,839,97 \text{ mm}^4$$

Vztah pro maximální průhyb desky je

$$w_{max} = \frac{\frac{F}{2} c}{24 EI_y} \times (3l^2 - 4c^2)$$

kde, F je celkové zatížení nosníku [N],
 c vzdálenost podpory od působící síly [mm],
 E modul pružnosti [MPa],
 l vzdálenost podpor [mm].

Pro mezní stav použitelnosti je limitní průhyb w_d , který musí být menší než je průhyb maximální. Limitní průhyb u vrstvených skel je definován jako

$$w_d = \frac{l}{250}$$

kde, l je vzdálenost podpor [mm].

Aby nedošlo k překročení limitní deformace a poškození tabule musí být splněna podmínka (6.2), ze které se zjistí maximální síla, která může působit na prvek. Po dosazení do vzorce dostáváme

$$\frac{\frac{F}{2} c}{24 EI_y} \times (3l^2 - 4c^2) \leq \frac{l}{250}$$

$$\frac{\frac{F}{2} c}{24 EI_y} \leq \frac{l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)}$$

$$\frac{F \times c}{2} \leq \frac{24 EI_y l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)}$$

$$F \leq \frac{\frac{24 EI_y l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)} \times 2}{c}$$

$$F \leq \frac{\frac{24 \times 70\,000 \times 80\,916,85 \times 1\,000}{250 \times (3 \times 1\,000^2 - 4 \times 400^2)} \times 2}{400}$$

$$F \leq 1\,152,04\text{ N} \sim 1,15\text{ kN}$$

Z výše zmíněné rovnice dostáváme hodnotu maximální síly, která na nosník může působit bez jeho porušení při výpočtu mezního stavu použitelnosti. Síla musí být menší nebo rovna 1,15 kN.

Pro celkový návrh vrstvených skleněných tabulí dle zjednodušené metody v prEN 16621 [1], je nutné, aby podmínky mezního stavu únosnosti a použitelnosti platily zároveň.

Maximální hodnoty síly pro mezní stav únosnosti

$$F \leq 6\,187,43\text{ N} \sim 6,19\text{ kN}$$

Maximální hodnoty síly pro mezní stav použitelnosti

$$F \leq 1\,152,04\text{ N} \sim 1,15\text{ kN}.$$

Abychom splnili podmínku, že platí oba mezní stavy, tak platí, že podmínka pro mezní stav použitelnosti je chápána jako podmínka nepřekročitelná, což je maximální hodnota síly 1,15 kN.

7 NUMERICKÝ MODEL A VÝPOČET – DLUBAL RFEM

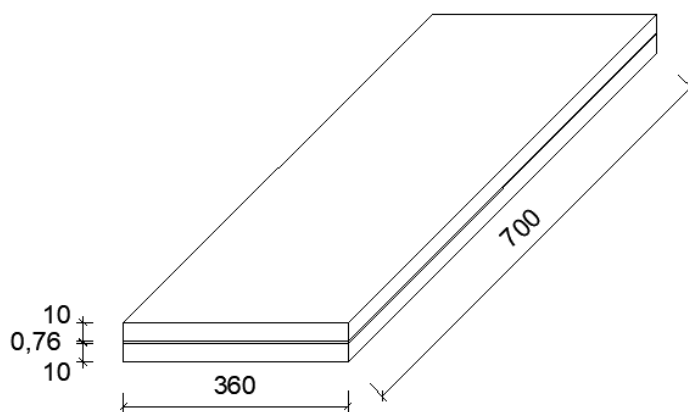
7.1 Popis metody

Jako poslední metodu návrhu vrstvených skel jsem zvolil návrh pomocí výpočtového programu od firmy Dlubal s názvem RFEM. Pro správný návrh numerického modelu je nezbytné zadání správných vstupních dat a vlastností materiálu.

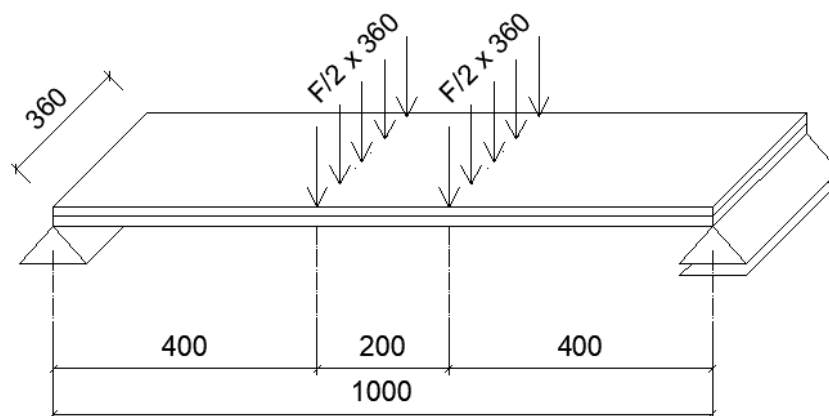
Za vstupní data pro tyto účely považujeme rozměry tělesa, typ fólie a reálného použitého zatížení při experimentálních zkouškách, abychom mohli následně vše dle metod porovnat.

Jelikož bylo pracováno s modelem ve 3D bylo nutné zahrnout i šířkový rozměr tabule. Rozměry tabule byly 1000 x 360 x 10 mm a fólie 1000 x 360 x 0,76 mm. Dalšími důležitými vstupními parametry byly charakteristiky použité fólie. Celkový model je zobrazen na obrázku (Obr. 7.1).

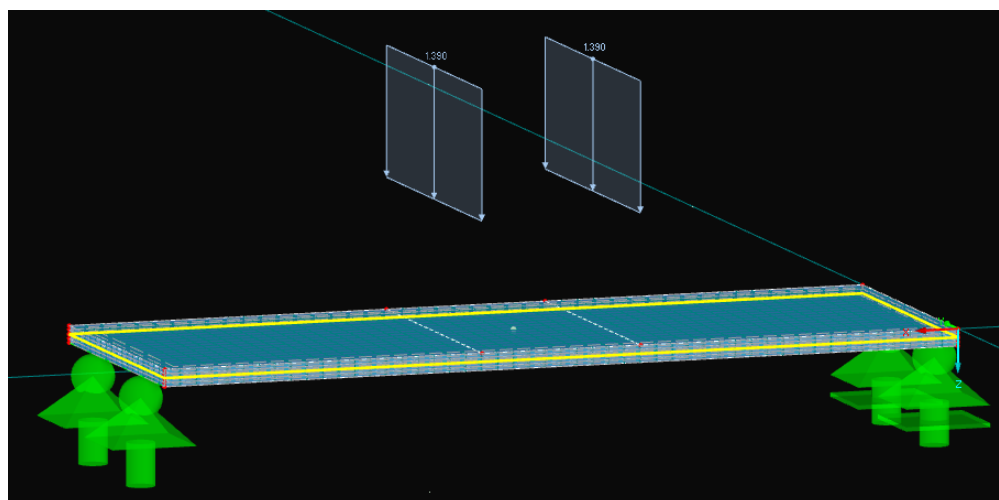
Pro výpočet byly použité liniové podpory po kratších stranách obdobně jako při experimentálních zkouškách. Stejně tak vstupující zatížení. Jednalo se čtyřbodový ohyb, tudíž i model měl ve dvou místech liniové zatížení 400 mm od každé z podpor. Jak přesně to bylo provedeno je ukázáno na obrázcích níže viz (Obr. 7.2 a Obr. 7.3), přičemž druhý ze zmíněných obrázků je model přímo z programu Dlubal RFEM.



Obr. 7.1: Schéma zkušebního tělesa se základními rozměry



Obr. 7.2: Schéma rozmístění podpor a zatížení pro výpočtový program Dlubal RFEM



Obr. 7.3: Výsledný numerický model v programu Dlubal RFEM

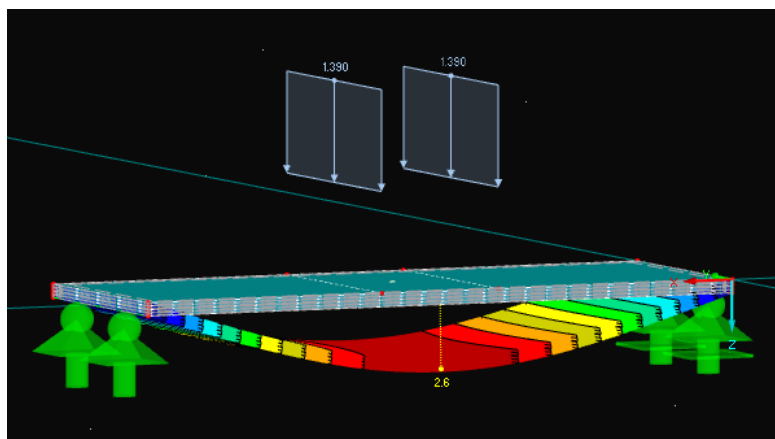
Abychom z výpočtového programu dostali reálné výsledky, musel se správně upravit smykový modul G použité fólie. Smykový modul byl převzat ze smykových zkoušek, které byly vedeny Kloknerovým ústavem ČVUT [23]. Použité smykové moduly byly rozdílné pro rozdílné rychlosti zatížení. Použitím těchto smykových modulů dokážeme do výpočtů vnést vliv rychlosti a doby trvání zatížení. Jak již bylo zjištěno v kap. 5.1.4. Smykový modul je zásadně ovlivněn rychlostí zatěžování. Čím rychleji zatěžujeme, tím vyšší smykový modul dostáváme. Smykové moduly jsou shrnuty v následující tabule viz (Tab. 7.1).

Tab. 7.1: Hodnoty smykového modulu pro různé rychlosti

VSTUPNÍ ÚDAJE SMYKOVÉHO MODULU	
Rychlost zatěžování	Smykový modul fólie
[mm.min.]	[MPa]
2,0	1,7
0,5	1,09
0,125	0,8

7.2 Shrnutí výsledku z výpočetní programu Dlubal RFEM

Normálové napětí a deformace numerického modelu byly zjištěny pomocí postupného dosazování hodnot působící síly přepočítané na liniové zatížení. Tímto postupem také bylo zjištěno maximální zatížení, které je přípustné, aby na těleso působilo. Také byly zjištěny maximální hodnoty normálového napětí a deformací. Vykreslení průhybů numerického modelu je na obrázku viz (Obr. 7.4).



Obr. 7.4: Vykreslení výsledků průhybu v programu Dlubal RFEM

Výpočtovým programem Dlubal RFEM bylo spočítáno jako maximální normálové napětí 74,65 MPa a deformace 14,3 mm při síle 7 kN pro rychlost 2,0 mm.min. se smykovým modulem fólie $G = 1,7$ MPa viz (**Error! Reference source not found.**).

Tab. 7.2: Výsledky normálového napětí a deformace pro určitou sílu a hodnoty smykového modulu fólie $G = 1,7$ MPa podle programu Dlubal RFEM

Celkové zatížení F	Síla F/2	Liniové zatížení	Napětí		Průhyb
			max	min	
[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[mm]
0	0	0	0	0	0,0
1	0,5	1,39	10,68	-10,89	2,0
2	1	2,78	21,35	-21,77	4,1
3	1,5	4,17	32,03	-32,66	6,1
4	2	5,56	42,70	-43,55	8,2
5	2,5	6,94	53,30	-54,36	10,2
6	3	8,33	63,98	-65,24	12,2
7	3,5	9,72	74,65	-76,13	14,3

Po změně hodnot smykového modulu fólie na $G = 1,09 \text{ MPa}$ pro rychlost $0,5 \text{ mm.min.}$ byla programem přepočtena maximální hodnota normálového napětí na $69,22 \text{ MPa}$ a deformace $14,3$ při celkové působící síle 6 kN dle (Tab. 7.1).

Tab. 7.1: Výsledky normálového napětí a deformace pro určitou sílu a hodnoty smykového modulu fólie $G = 1,09 \text{ MPa}$ podle programu Dlubal RFEM

Celkové zatížení F	Síla F/2	Liniové zatížení	Napětí		Průhyb
			max	min	
[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[mm]
0	0	0	0	0	0
1	0,5	1,39	11,55	-11,75	2,4
2	1	2,78	23,10	-23,50	4,8
3	1,5	4,17	34,65	-35,25	7,2
4	2	5,56	46,20	-47,00	9,5
5	2,5	6,94	57,67	-58,67	11,9
6	3	8,33	69,22	-70,42	14,3

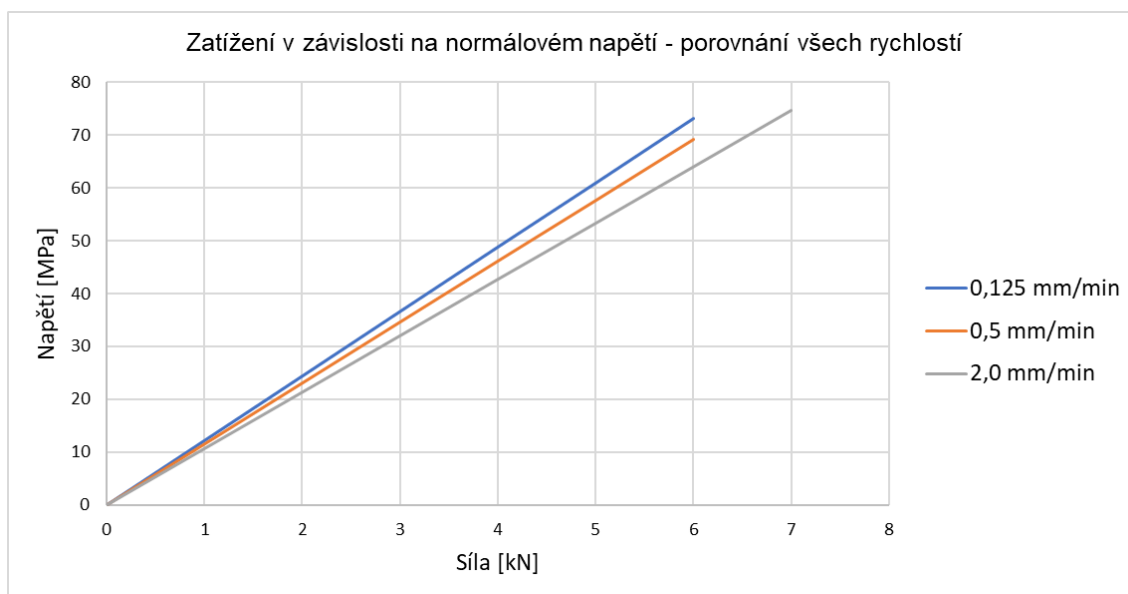
Při další změně smykového modulu fólie na $G = 0,8 \text{ MPa}$, bylo poté dosaženo hodnoty maximálního normálového napětí $73,24 \text{ MPa}$ a maximální deformaci $15,9 \text{ mm}$ při celkové síle 6 kN . Souhrn všech výstupních dat viz následující tabulka (Tab. 7.2).

Tab. 7.2: Výsledky normálového napětí a deformace pro určitou sílu a hodnoty smykového modulu fólie $G = 0,8 \text{ MPa}$ podle programu Dlubal RFEM

Celkové zatížení F	Síla F/2	Liniové zatížení	Napětí		Průhyb
			max	min	
[kN]	[kN]	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	[mm]
0	0	0	0	0	0
1	0,5	1,39	12,22	-12,43	2,7
2	1	2,78	24,44	-24,87	5,3
3	1,5	4,17	36,67	-37,3	8
4	2	5,56	48,89	-49,74	10,6
5	2,5	6,94	61,02	-62,08	13,2
6	3	8,33	73,24	-74,51	15,9

Grafy, které shrnují výsledky z výpočtového programu, jsou uvedeny v následující kapitole tak, aby byl jasně viditelný vliv změny chování souvrství změnou smykového modulu. Graf 7.1 zobrazuje tuto závislost normálového napětí na působící svislé síle získané z výpočtového programu Dlubal RFEM. Každá křivka popisuje těleso s jinou hodnotou smykového modulu pro danou rychlost viz - Graf 7.1.

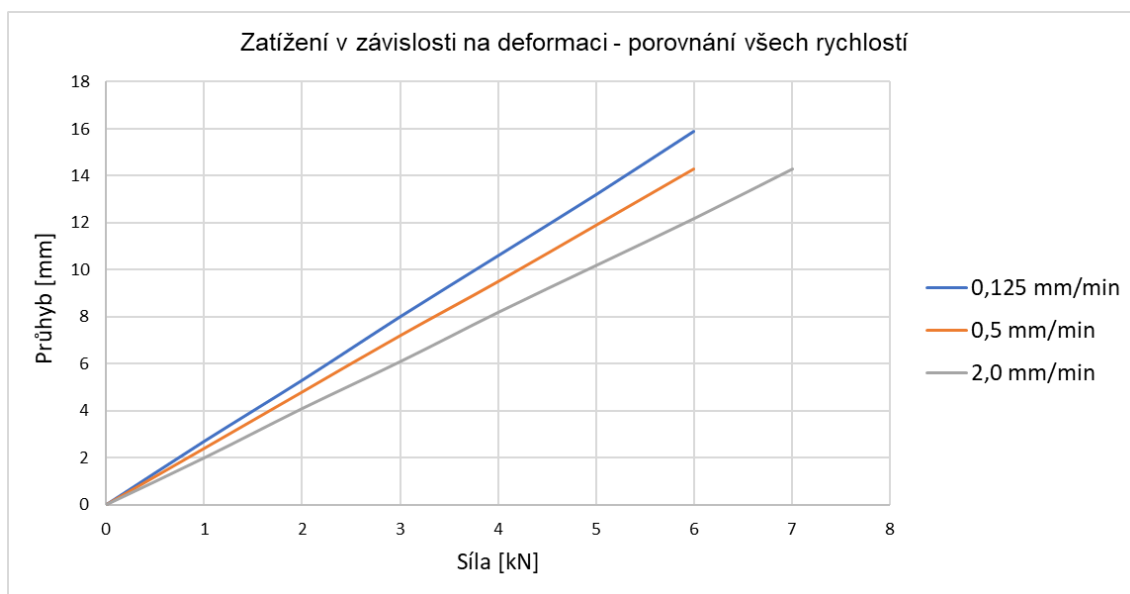
7.3 Vyhodnocení



Graf 7.1: Závislosti normálovém napětí na působící síle pro různé rychlosti

Graf 7.1 demonstruje výsledky získané z numerického modelu spočteného pomocí programu Dlubal RFEM na kterém je znázorněn pomocí křivek průběh normálového napětí na působící síle v závislosti na zvoleném smykovém modulu pro různé rychlosti viz (Tab. 7.1)

Graf 7.2 pomocí křivek znázorňuje průběh nárůstu deformací v závislosti na působící síle. Graf 7.2 zobrazuje pro každou rychlost zatěžování jiný smykový modul.



Graf 7.2: Závislosti deformace na působící síle pro různé rychlosti

8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnání vhodnosti zvolených metod pro vypracování návrhů k ověření únosnosti vrstvených skel a spolupůsobení jednotlivých vrstev, které je ovlivněno poddajností fólie.

K získání výstupních dat byly použity následující metody: experimentální zkoušení, návrh dle normy „prEN 16612“, numerický výpočet pomocí software Dlubal.

Nejdříve byly provedeny experimentální zkoušky pod vedením katedry ocelových a dřevěných konstrukcí na ČVUT. Dále byly využity normy a před-normy pro metodu zjednodušeného výpočtu navrhování vrstvených skleněných tabulí. Poslední metodou bylo vytvoření numerického modelu za pomoci výpočetního programu RFEM od společnosti Dlubal.

Pro vypracování této práce jsem prováděl experimenty v laboratorních podmínkách. Experimenty byly rozděleny na dva typy. První experiment založený na

rychlosti zatěžování probíhal až do vyčerpání únosnosti zkoušených těles, při kterých probíhal záznam normálového napětí a průhybů tabule uprostřed rozpětí. Experiment druhý více zmíněný jako experiment dlouhodobí probíhal za předem stanovené deformace, kterou jsem zvolil na základě zkušenosti z předchozího experimentu. Provedením experimentálních zkoušek bylo doloženo, že smykový modul G viskoelastického materiálu je výrazně ovlivněn rychlostí, resp. délkou zatížení a teplotou. Čím rychleji je těleso zatěžováno, tím vyšší je hodnota smykového modulu a vznikají nižší normálová napětí a deformace.

Následně jsem se zaměřil na zjednodušenou metodu podle před-normy pro návrh vrstvených skleněných tabulí prEN 16612 a posoudil vhodnost použití této metody. Dospěl jsem k závěru, že použití této metody je na straně bezpečné. Nevýhoda použití této metody je její neekonomičnost, jelikož před-norma předepisuje pouze přibližný koeficient přenosu smykových sil, což vede k předdimenzovaným návrhům prvků. Pomocí parametrické studie, za použití dat z experimentálního měření, jsem dospěl k přesnějšímu koeficientu dle (Tab. 8.1).

Tab. 8.1: Parametrickou studií zjištěné součinitelé přenosu smykových sil

Parametrickou studií zjištěné součinitelé přenosu smykových sil	
Těleso dle rychlosti zatěžování	[-]
2,0 mm.min.	0,2
0,5 mm.min.	0,1
0,125 mm.min.	0,1

Po získání dat z výše zmíněných experimentů a výpočtů bylo možné provést odladění numerického modelu při použití výpočetního programu (Dlupal) a umožnit tak zjednodušení a zefektivnění dalších prací při návrhu. Pro výpočet numerického modelu byla použita metoda MKP s hodnotami smykového modulu pro danou teplotu a rychlost zatěžování. Přičemž smykový modul je proměnný v závislosti na diferenciaci výše zmíněných veličin – viz (Tab. 8.2).

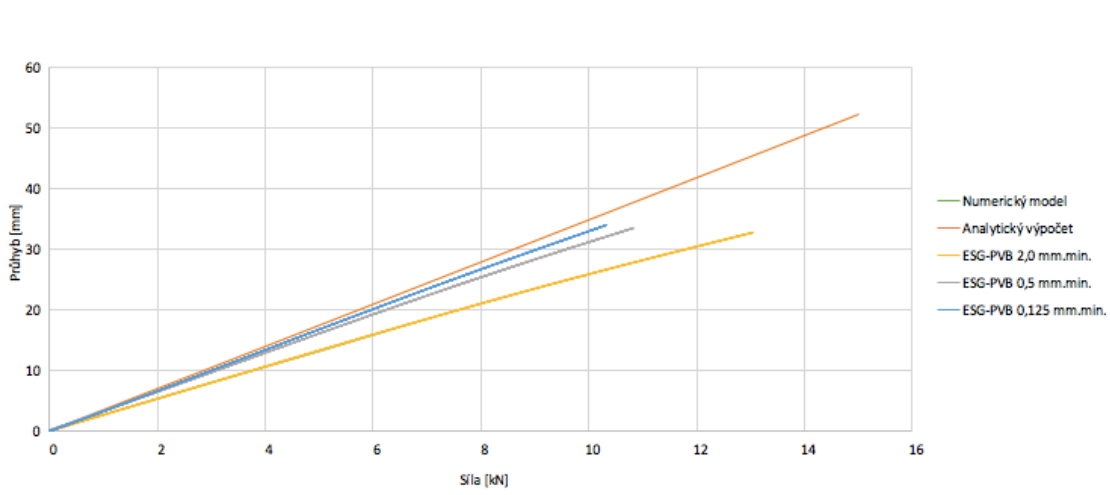
Tab. 8.2: Hodnoty smykového modulu pro různé rychlosti

Smykový modul PVB fólií	
Rychlost zatěžování	Smykový modul fólie
[mm.min.]	[MPa]
2,0	1,7
0,5	1,09
0,125	0,8
pozn. smykový modul pro teplotu 20°C	

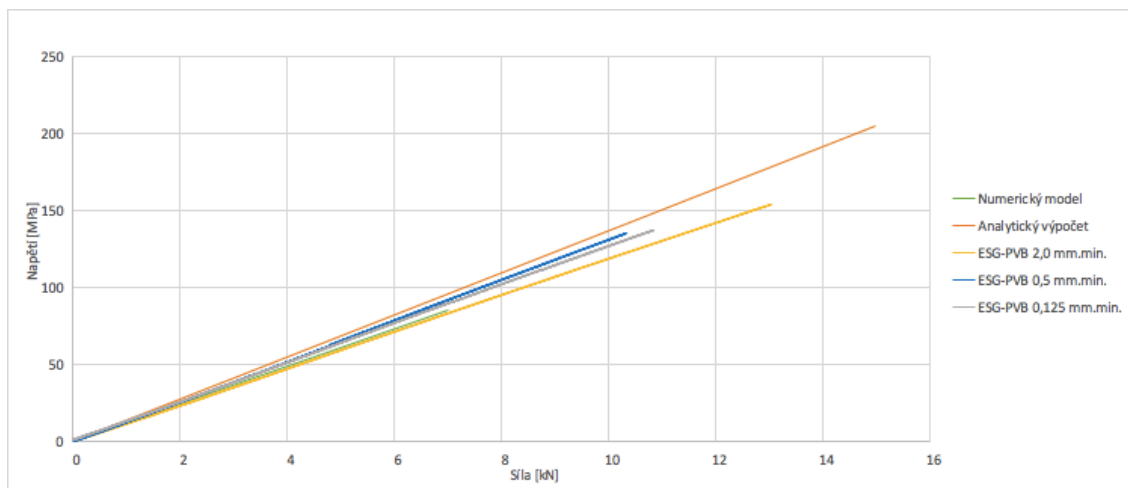
Výsledné shrnutí experimentálně zjištěných a vypočítaných dat zobrazují na grafech (Graf 8.1 a Graf 8.2). Z průběhu křivek „Analytický výpočet“ v obou grafech, lze konstatovat, že návrh dle analytického výpočtu „zjednodušené metody návrhu vrstvených skel“ obsažené v prEN 16621 [1] je postup konzervativní a tím pádem na straně bezpečné.

Ostatní křivky popisují reálné vlastnosti naměřené při experimentálním zkoušení v závislostech na různých rychlostech zatěžování.

Křivky „numerický model“ přesně překrývají křivky „ESG-PVB 2,0 mm.min.“ znázorňující hodnoty získané z experimentálního zkoušení. Tato shoda dokazuje správnost numerického modelu a jeho vhodnost použití pro výpočty při navrhování skleněných souvrství.



Graf 8.1: Shrnutí výsledných závislostí průhybu na působící svislé síle dle použitých metod a experimentů



Graf 8.2: Shrnutí výsledných závislostí normálového napětí na působící svislé síle dle použitých metod a experimentů

9 BIBLIOGRAFIE

- [1] Draft prEN 16612: Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing. CEN. Brussels, 2013.
- [2] POPOVIČ, Štěpán. Výroba a zpracování plochého skla. Praha. 2009. ISBN 978-80-247-3154-4
- [3] FLORIÁN, Miloš. Inteligentní skleněné fasády. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1, 160 41 Praha 6, v červnu 2005 jako svou 10 589 publikaci. Praha, 2005. ISBN 80-01-03195-0.
- [4] VACÍK, Jiří, Jana BARTHOVÁ, Josef PACÁK, Bohuslav STRAUCH, Miroslava SVOBODOVÁ a František ZEMÁNEK. Přehled středoškolské chemie. 2. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1993. ISBN 80-04-36388-7.
- [5] WURM, Jan. Glass structures: Design and construction of self-supporting skins. Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2007. ISBN 978-3-7643-7608-6.
- [6] ELIÁŠOVÁ, Martina. Sklo - materiál pro nosné konstrukce =: Glass - material for load-bearing structures. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 28 s. Habilitační přednášky. 2014. ISBN 9788001055083.
- [7] Kalení skla [online]. Lanškroun: Sklenářství Šulák, 2015 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.sklenarstvisulak.cz/>
- [8] ESG kalené sklo [online]. Praha: Stavební sklo s.r.o., 2004 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.stavebni-sklo.cz/esg-kalene-sklo.php>
- [9] Glass [online]. Europe: AGC Glass Europe, 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.agc-yourglass.com>
- [10] Safety glazing [online]. Verden: FRERICHS GLAS GMBH, b.r. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.frerichs-glas.de/en/products/glass-application/safety-glazing/index.html>
- [11] Chemicky zpevněné sklo [online]. Polyconsult, s.r.o., 2002 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=552&cid=6.html>
- [12] JIRÁNEK, Tomáš. Studium degradace měkčeného PVB. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.
- [13] Draft prEN 16613: Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Determination of interlayer mechanical properties. CEN. Brussels, 2013.
- [14] PIŠTĚK, David. Studium možné technologie k přepracování rekuperované PVB fólie. Zlín, 2017. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [15] MLEZIVA, Jaroslav. Polymery. 2. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 8085920727.
- [16] ČSN EN 1288-3 Sklo ve stavebnictví- stanovení pevnosti skla v ohybu: Část 3: Zkouška se vzorkem podepřeným ve dvou bodech. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [17] ČSN EN 14449 Sklo ve stavebnictví - Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo - Hodnocení shody/Výrobová norma. Praha: Český normalizační institut, 2006.

- [18] Sklo [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2012 [2018-04-28]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>
- [19] Ploché sklo [online]. Europe: AGC Glass Europe, 2016 [2018-04-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy-pricky-povrchy/14077-ploche-sklo>
- [20] Od písku ke sklu [online]. Europe: AGC Glass Europe, 2014 [2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.agc-glass.eu/cs/produkty/od-pisku-ke-sklu>
- [22] Lom skla a určování jeho příčin [online]. Glassrevue, 2008 [2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=1311&cid=6.html>
- [23] HÁNA, Tomáš - ústní sdělení (student ČVUT FSV, Thákurova 7, 166 29, Praha) [2018-04-04].
- [24] Sklo pro proužití [online]. Praha, 2014 [2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.vikovo.cz/navody.php?sklo>
- [25] ČSN EN 572-2: Sklo ve stavebnictví – Základní výrobky ze sodnovápenatokrémicitého skla – Část 2: Sklo float. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [26] ČSN EN ISO 12543: Sklo ve stavebnictví - Vrstvené sklo a vrstvené bezpečnostní sklo - Část 2: Vrstvené bezpečnostní sklo. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [28] ČSN EN 12600: Sklo ve stavebnictví - Kyvadlová zkouška - Metoda zkoušení nárazem a klasifikace pro ploché sklo. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [29] ČSN EN 356: Sklo ve stavebnictví - Bezpečnostní zasklení - Zkoušení a klasifikace odolnosti proti ručně vedenému útoku. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [30] ČSN EN 1063: Sklo ve stavebnictví - Bezpečnostní zasklení - Zkoušení a klasifikace odolnosti proti střelám. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [31] ČSN EN 13541: Sklo ve stavebnictví - Bezpečnostní zasklení - Zkoušení a klasifikace odolnosti proti výbuchovému tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [32] HÁNA, Tomáš. Determination of PVB interlayer's shear modulus and its effect on normal distribution in laminated glass panels. Praha, 2017. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague

10 PŘÍLOHY

(fólie, odporové tenzometry)

FÓLIE PVB TROSIFOL BG R20

kuraray		TROSIFOL		
		PVB film for laminated safety glass		
Specification TROSIFOL BG R 20 Film thickness 0,76mm – 1,52mm				
Property	Value	Tolerance	Unit	Method TROSIFOL
Film thickness > Certificate <	0,78	+ 0,04 - 0,04	mm	Test method PAPB001
	1,14	+ 0,06 - 0,04		
	1,52	+ 0,07 - 0,05		
Roughness R_z λ 2,5mm > Certificate <	40	\pm 12	μ m	Test method PAPB002 DIN EN ISO 4287
Moisture content > Certificate <	0,45	\pm 0,07	%	Test method PAPB003 (IR - Measurement)
Pummel test > Certificate <	\geq 6			Test method PAPB004 based auf 2mm float glass
Compressive	0,76mm	\geq 16,0	N/mm ²	Test method PAPB007 based auf 2mm float glass
Shear Strength	1,14mm	\geq 15,0		
> Certificate <	1,52mm	\geq 14,0		
Shrinkage MD > Certificate <	\leq 2,0		%	Test method PAPB005 at 20°C and 10 min. storage

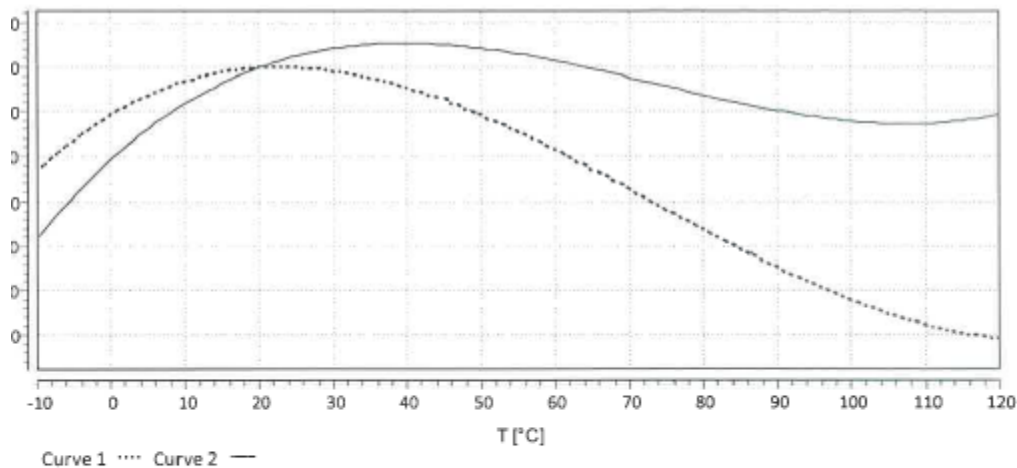
QM TROSIFOL
Rev. 04.2008

POUŽITÉ TENZOMETRY PRO EXPERIMENTY S ŘÍZENOU RYCHLOSTÍ

Dehnungsmessstreifen		Bestellnummer Order No No. de référence	1-LY11-10/120
Strain gages		Typ Type Type	10/120 LY11
Jauges d'extensométrie		Stückzahl Contents Quantité	10
120 Ω ±0.35 %		Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	93 ±10 [10⁻⁶ / K] (-10°C ... +45°C)
2.05 ±1.0 %		Folienlos Foil lot Lot de la feuille	A413/16
0.0 %		Herstellungslot Production batch Lot de fabrication	812074771
Material: Ferritischer Stahl mit pensation: steel with température: acier avec	$\alpha = 10.8 [10^{-6} / K]$	Max effekt. Brückenspeisespannung max. rms bridge excitation voltage tension d'alim. de pont maxi eff.	13.0 V

Daten / Data / Données 

RoHS 



$$21.33 + 1.98 \cdot T - 5.14E-02 \cdot T^2 + 2.33E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 [\mu\text{m}/\text{m}] + 0.03330 \cdot L \cdot (T-20) [\mu\text{m}/\text{m}]$$

Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und n.

In accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate duction batch number.

ristiques techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlussbändchen

Kennlinie 2: DMS mit Anschlussbändchen (30mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm (einfachdimensioniert)

POUŽITÉ TENZOMETRY PRO EXPERIMENTY SE STATICKÝM ZAŘIŽENÍM



Dehnungsmessstreifen
Strain gages
Jauges d'extensométrie

Bestellnummer
Order No.
No. de référence

1-LY11-10/120



Typ
Type
Type

10/120 LY11



Stückzahl
Contents
Quantité

10



Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gage factor
Coefficient de température
du facteur k

93 ± 10 [10⁻⁶ / K]

(-10°C ... +45°C)

Folienlos
Foil lot
Lot de la feuille

A417/23



Herstellungslot
Production batch
Lot de fabrication

812069328



Daten / Data / Données



Widerstand
Resistance
Résistance

120 Ω ± 0.35 %

k-Faktor
Gage factor
Facteur k

2.07 ± 1.0 %



Querempfindlichkeit
Transverse sensitivity
Sensibilité transverse

0.0 %

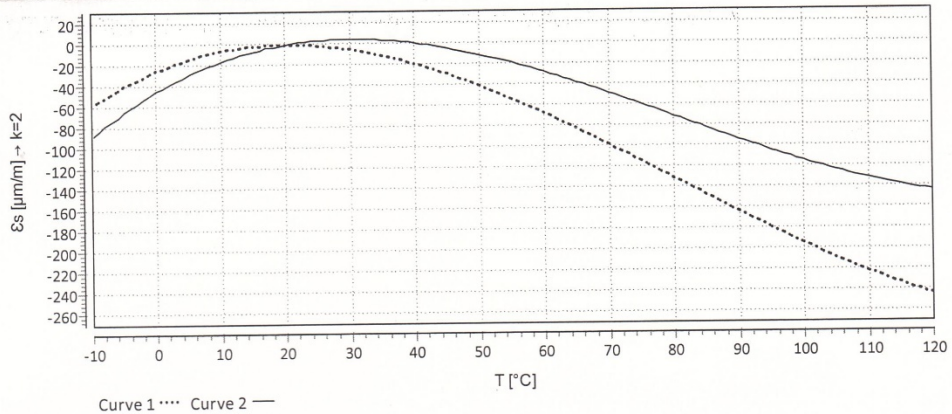


Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit
Temperature compensation: steel with
Compensation de température: acier avec

α = 10.8 [10⁻⁶ / K]

Max. effekt. Brückenspeisung
max. rms bridge excitation voltage
tension d'alim. de pont maxi eff.

13.0 V



$$\epsilon_s(T) = -25.88 + 2.58 * T - 7.29E-02 * T^2 + 3.02E-04 * T^3 \pm (T-20) * 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.03330 * L * (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

Alle technischen Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslos an.

All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes les caractéristiques techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes communications, prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

Curve 1: Jauges sans pattes de raccordement.

Curve 2: Jauges avec pattes de raccordement (longueur unitaire de la patte de 30 mm). Lorsque les pattes sont plus courtes, la réponse en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. La représentation numérique permet de calculer exactement la réponse en température pour chaque longueur de patte.
T = température en °C L = longueur unitaire de la patte en mm (sans dimension)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.

Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlussbändchen.

Kennlinie 2: DMS mit Anschlussbändchen (30mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm (dimensionslos)

The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α. Values are measured with continuous temperature variation.

Curve 1: Strain gages without leads.

Curve 2: Strain gages with leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, the temperature response lies between curve 1 and 2. The numeric representation allows exact calculation of the temperature response for any lead length.
T = temperature in °C L = simple lead length in mm (dimensionless)