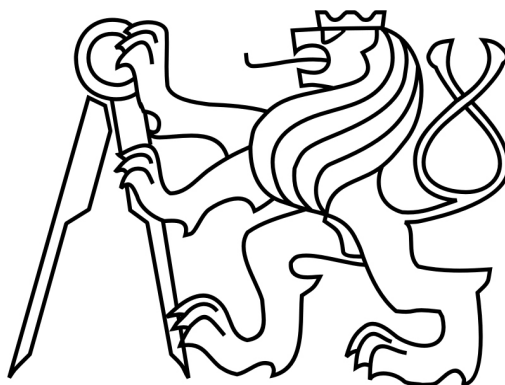


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Bakalářská práce

Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla
experimentální a numerická analýza

Vypracovala:

Eliška Kubíková

Školitel:

Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

Květen 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kubíková Jméno: Eliška Osobní číslo: 438121
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla
Název bakalářské práce anglicky: Design of laminated glass panes

Pokyny pro vypracování:
Úvodní řešerše a stata of art na téma vrstvené sklo, popis a vyhodnocení provedených experimentů desek z vrstveného skla (čtyřbodový ohyb), stanovení součinitele přenosu smykových sil a porovnání s návrhovými postupy dle prEN 16612 a s výsledky numerického modelu RFEM-Glass.

Seznam doporučené literatury:
Draft prEN 16612 Glass in Buildings - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing
J. Wurm: Glass structures, Birkhäuser, 2007, ISBN 978-3-7643-7608-6

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

Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2018 Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018
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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla – experimentální a numerická analýza“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27. května 2018

.....
Eliška Kubíková

Poděkování

Na prvním místě bych ráda poděkovala své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Martině Eliášové CSc., Zdenku Sokolovi Ph.D., a v neposlední řadě Ing. Tomášovi Hánovi za jejich ochotu při tvorbě této práce.

**Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla
experimentální a numetická analýza**

Design of laminated glass panes

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje způsoby návrhu tabulí z vrstveného skla s transparentní viskoelastickou PVB fólií a její chování v závislosti na rychlosti a době trvání zatížení. Práce se zaměřuje na návrh nosných skel pomocí analytického výpočtu popsaného v prEN 16612 [1], dále pomocí sestavení numerického modelu ve statickém programu Dlubal RFEM 5.11 a následném porovnání s daty získanými z experimentálního výzkumu, který probíhal na fakultě stavební ČVUT v Praze. Cílem bylo vyhodnocení jednotlivých metod návrhu a zjištění nejekonomičtějšího a zároveň nej přesnějšího způsobu návrhu tabulí z vrstveného skla.

Klíčová slova

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

Abstract

This bachelor thesis describes the methods of design of laminated glass panes with transparent viscoelastic PVB foil and its dependence on speed and the duration of load. The thesis focuses on the design of the supporting glasses using the analytical calculation described in prEN 16612 [1], the numerical modelling of the Dlubal RFEM 5.11 static program and the comparison with the data from experimental research at the Faculty of Civil Engineering in Prague. The aim was to evaluate individual methods of design and to find the most economic and at the same time the most accurate way of designing laminated glass panes.

Keywords

Laminated glass, deformation, tensile stress, polymeric foil, experimental tests, analytic calculation, numerical model

OBSAH

OBSAH	7
1 ÚVOD.....	9
2 PLAVENÉ SKLO.....	9
2.1 Popis	9
2.2 Chemické složení	9
2.3 Výroba	10
2.4 Vlastnosti plaveného skla	11
2.5 Charakteristické pevnosti plaveného skla.....	12
2.6 Pevnostně upravovaná skla	14
2.6.1 Tepelně tvrzené sklo	14
2.6.2 Tepelně zpevněné sklo	16
2.6.3 Chemicky tvrzené sklo	17
3 VRSTVENÉ SKLO	18
3.1 Popis	18
3.2 Výroba	19
3.3 Druhy používaných fólií	19
3.4 Smykový modul fólie pro vrstvená skla.....	20
3.5 Příklady využití ve stavebnictví.....	22
4 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	23
4.1 Popis	23
4.2 Zkušební tělesa	23
4.3 Uspořádání zkoušky	25
4.4 Vyhodnocení experimentů.....	29
4.5 Shrnutí výsledků pro zkušební tělesa	34
5 ANALYTICKÝ VÝPOČET - ZJEDNODUŠENÁ METODA	36
5.1 Popis	36
5.2 Výpočet podle prEN 16612.....	36
5.3 Součinitel přenosu smykových sil.....	38
5.4 Analytický výpočet vrstvených skel s PVB fólií	42
6 NUMERICKÝ MODEL – RFEM.....	48
6.1 Popis	48

6.2	Shrnutí výsledků pro výpočet pomocí softwaru Dlubal RFEM	50
7	POROVNÁNÍ	55
8	ZÁVĚR	58
9	LITERATURA	59
10	SEZNAM PŘÍLOH	61
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
12	SEZNAM TABULEK	64
13	SEZNAM GRAFŮ	65

1 ÚVOD

Předložená práce shrnuje problematiku návrhu vrstvených skel. Popisuje materiálové vlastnosti tabulí z plaveného skla i jejich výrobu. Dále se zaměřuje na transparentní materiály mezivrstev, které jsou vloženy mezi jednotlivé tabule skel. Mezivrstvy jsou obvykle tvořeny jednou či několika transparentními polymerními fóliemi, jejichž materiálové vlastnosti (modul pružnosti E a smykový modul G) jsou závislé na teplotě a délce trvání zatížení.

Analytický výpočet je v této práci doplněn experimentální částí, která se zaměřuje na vyhodnocení statických zkoušek čtyřbodovým ohybem na skleněných tabulích z dvouvrstvého skla. Cílem provedených zkoušek bylo zjištění chování vrstvených skel s mezivrstvou z polymerní fólie při různých rychlostech zatěžování, zaznamenání svislých deformací, pevnosti tabule v ohybu a rozložení normálového napětí po průřezu tabule z vrstveného skla. Zkoušky probíhaly v Experimentálním centru Fakulty stavební, ČVUT v Praze.

Práce je dále zaměřena na výpočet deformací a normálových napětí pomocí numerického modelu v softwaru Dlubal RFEM 5.11. Numerický model byl následně porovnán s experimentem a zjednodušeným analytickým modelem pro návrh vrstvených skel podle postupu uvedeném v pracovní verzi normy prEN 16612 [1].

2 PLAVENÉ SKLO

2.1 Popis

Použití skla jako stavebního materiálu se datuje již ke konci 10. století. Jeho využití bylo převážně pro výplně menších stavebních otvorů, na které se používaly tzv. okenní destičky.

S vyvíjející se technologií začíná sklo v oboru stavebnictví plnit nejen funkci obalovou či výplňovou, ale i funkci nosných částí konstrukce. V dnešní době se tedy sklo může řadit mezi ostatní, běžně používané materiály, jako je např. beton, ocel či dřevo.

Přestože sklo je jedním z nejstarších materiálů, z hlediska jeho využití pro nosné konstrukční prvky, jako jsou nosníky, sloupy a další, nejsou v současnosti dostatečné znalosti pro spolehlivý návrh a posouzení. Teprve v posledních 15ti letech se rozvíjí výzkum s cílem stanovit materiálové vlastnosti skla pro použití na nosné konstrukce. [2], [3]

2.2 Chemické složení

Z chemického hlediska se jedná o izotropní anorganickou látku, která vznikla postupným ochlazením - ze skupenství kapalného se stává skupenství pevné.

V důsledku rychlého ochlazení nenajdeme v základní struktuře krystalickou mřížku. Samotné chemické složení není vždy stejné a záleží na obsahu různých chemických látek. Základní surovinou téměř všech výrobků ze skla je oxid křemíku. Tento oxid můžeme najít v křemičitém, neboli sklářském písku. Dalšími anorganickými látkami jsou například oxidy bóru, germania, fosforu a arzenu.

Běžné sodnovápenatokřemičité sklo se skládá z křemenného písku (SiO_2) zastoupeného ze 71 – 75%, sody (Na_2O) 12 – 18%, vápence (CaO) 10 – 15% a dalších látek, které ovlivňují zbarvení skla. Jedná se o oxidy kovů jako je železo, chrom, měď, zlato, nikl, kobalt a další. Jejich obsah je však ve složení skla velice malý.

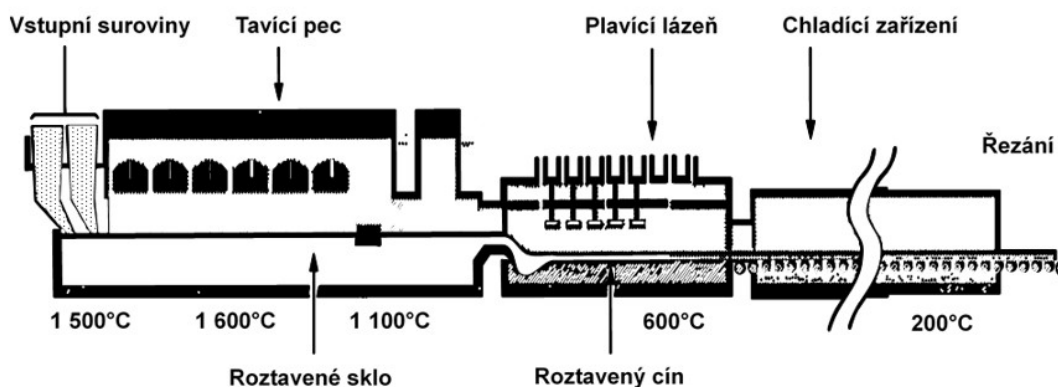
Obecně chemické složení a celková struktura ovlivňuje nejen barvu, ale i další konečné vlastnosti skla. Mezi ně se řadí propustnost světla, tepelné chování, ale i mechanické vlastnosti jako je pevnost. [2], [3]

2.3 Výroba

Nejpoužívanější metodou pro výrobu skla je plavení, konečným výrobkem tohoto procesu je tedy plavené sklo nebo-li „float glass“. Tento proces spočívá v plavení skla po hladině roztaveného cínu díky rozdílné objemové hmotnosti.

Celý proces začíná u vstupních surovin, které jsou v počáteční fázi výroby roztaveny ve vysokoteplotních pecích. Zde teploty sahají až k $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Roztavené suroviny dále pokračují do komory označované jako plavící lázeň, kde se nachází roztavený cín. Sklo se v této fázi začíná po hladině roztaveného cínu plavit a částečně chladnout na teploty okolo $600\text{ }^\circ\text{C}$. Konečné ochlazení ovšem přichází až v poslední části tohoto procesu, a to v chladících boxech, kde se teploty pohybují zhruba na hranici $200\text{ }^\circ\text{C}$. Celý postup výroby je zobrazen na obr. 2.1.

Po kontrole jakosti se sklo řezá na předepsané rozměry a opracovává do konečného tvaru. Výsledkem tohoto procesu jsou ploché tabule skla o maximálních rozměrech $6,0 \times 3,2\text{ m}$. [1], [4]



Obr. 2.1: Postup výroby plaveného skla [5]

2.4 Vlastnosti plaveného skla

K výhodám skla oproti jiným stavebním materiálům patří zejména trvanlivost a odolnost proti velké škále chemických látek, např. odolnost vůči roztokům, kyselinám či různým rozpouštědlům. Sklo je také materiál, který na rozdíl od mnoha ostatních, nekoroduje. Díky svému chemickému složení a skladbě se sklo řadí mezi velice odolné látky, které jsou vůči vodě úplně nepropustné. Sklo je jako jeden z mála stavebních materiálů transparentní, což patří k jeho největším výhodám. Transparentnost je optická vlastnost, která je výsledkem dokonalého zchlazení skla při výrobě. Díky tomu, že skladba skla neobsahuje krystalickou mřížku, dokáže světlo procházet skrz hmotu, ale není dále rozptylováno do vnitřního prostoru. Z hlediska tepelně technických vlastností má sklo velké tepelné ztráty. Materiálové vlastnosti jsou shrnuty v *tab 2.1*. [2], [4]

Tab. 2.1: Materiálové vlastnosti plaveného skla [5]

Vlastnosti skla	hodnota	jednotka
Hustota ρ	2500	kg/m ³
Youngův modul pružnosti E	70 000	N/mm ²
Poissonova konstanta ν	0,23	-
Modul ve smyku G	30 000	N/mm ²
Součinitel teplotní roztažnosti α	9×10^{-6}	1/K
Tepelná vodivost λ	1,0	W/(mK)
Sálavost (intenzita vyzařování) ε	0,89	-
Charakteristická pevnost v tlaku	více než 1 000	MPa
Charakteristická pevnost v tahu	10 – 100	MPa

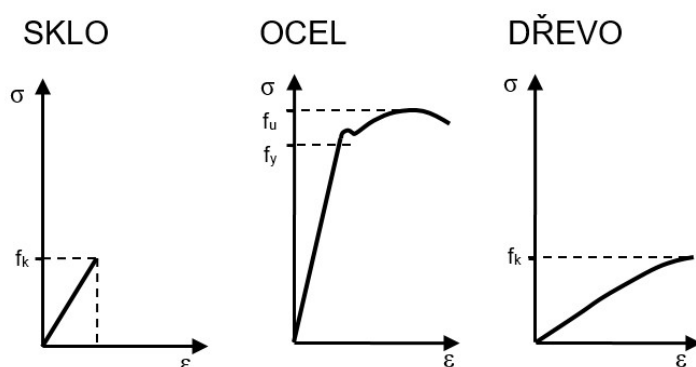
Jednou z dalších materiálových charakteristik skla je pevnost. Pevnost u skla je přímo spjatá s velikostí a dobou trvání zatížení, které působí na danou tabuli skla. Rozhodující pevností u plaveného skla je tahová pevnost, která je násobně nižší ve srovnání s pevností v tlaku, viz *tab. 2.1*.

Ve skutečnosti je povrch skla poškozen, jeho struktura obsahuje nedokonalosti v podobě mikroskopických trhlinek, jež mají také velký podíl na nízké pevnosti v tahu a následném porušení skla. Porušení skla nastává při dosažení kritického napětí nebo pokud trhlina ve skle dosáhne kritické velikosti, která je způsobena relativně malým, ale dlouhodobě působícím napětím. V tomto okamžiku nastává jev zvaný křehký lom. Tento úkaz je definován jako náhlý kolaps či roztříštění tabule skla, které není doprovázeno předchozím varováním.

Do této doby se sklo chová jako pružný materiál, který díky chemickému složení není schopen plastické deformace, jako je tomu u běžných stavebních materiálů. Nedochozí zde tedy k redistribuci lokálních špiček napětí. Na *obr. 2.2* jsou zobrazeny grafy závislosti přetvoření na napětí skla, oceli a dřeva. U skla je tedy

znázorněna lineární elastická část do okamžiku křehkého lomu, při kterém tabule skla praskne. Ocel se chová také lineárně pružně a to do meze kluzu, následně nastává plastická oblast až do porušení. Podobně jsou na tom i dřevěné materiály, které mají stejně jako ocel jak pružnou, tak plastickou oblast.

Sklo je tedy materiál, jehož návrh se od běžných materiálů, používaných na nosné konstrukce, zcela odlišuje. Tím, že nemá plastickou oblast, je třeba věnovat velkou pozornost zejména návrhu detailů. [1], [2], [4]



Obr. 2.2: Porovnání pracovních diagramů skla, oceli a dřeva [5]

2.5 Charakteristické pevnosti plaveného skla

Pevnost v tahu je rozhodující materiálovou charakteristikou pro navrhování nosných konstrukcí ze skla.

U plaveného skla se návrhová pevnost v tahu určí podle prEN 16612 [1] ze vztahu,

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (2.1)$$

- 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. 2.2,
 k_{sp} součinitel zohledňující úpravu povrchu, viz tab. 2.3,
 $\gamma_{M,A}$ dílčí součinitel spolehlivosti pro plavené sklo, viz tab. 2.4,

Tab. 2.2: Modifikační součinitel k_{mod} [1]

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. 2.3: Součinitel povrchové úpravy skla k_{sp} [1]

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. 2.4: Dílčí součinitel spolehlivosti skla γ_M [1]

	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	

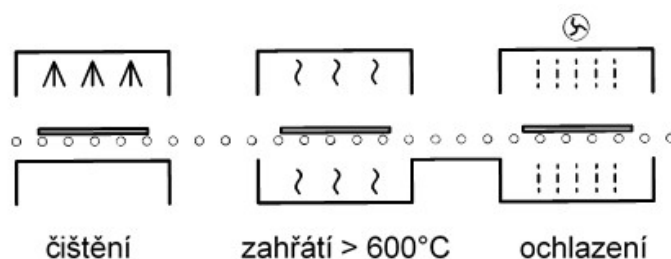
2.6 Pevnostně upravovaná skla

Doposud byla zmínka pouze o plaveném sklu, jakožto o základním výrobku. Plavené sklo ovšem nedosahuje takových pevností v tahu, jaké bychom při návrhu nosných konstrukcí uvítali. Proto se skla začala dále upravovat. Úpravy skel se provádějí buď tepelně nebo chemicky. Mezi tepelně upravovaná skla se řadí tepelně tvrzené sklo (kalené) a tepelně zpevněné sklo (polokalené). Zástupcem chemicky upravovaných skel je chemicky tvrzené sklo. [4]

2.6.1 Tepelně tvrzené sklo

Tepelně tvrzené sklo lze najít i pod zkratkou ESG z německého *Eincheiben-Sicherheitsglas*, což v překladu znamená tvrzené bezpečnostní sklo.

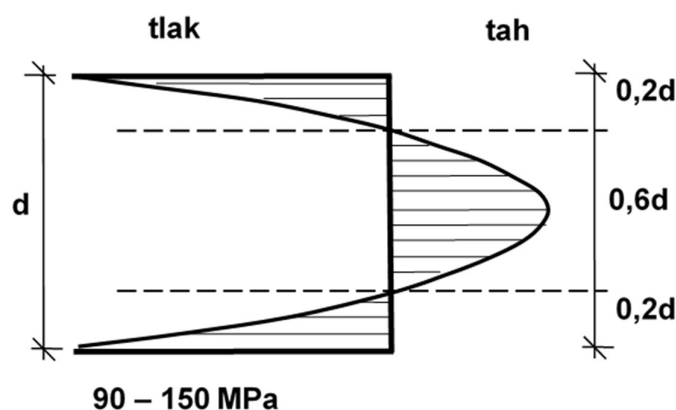
Výrobní postup na obr. 2.3 se skládá z procesu očištění tabule plaveného skla od povrchových nečistot, dále se tabule ze všech stran zahřívá na teplotu, která dosahuje přes 600 °C. V konečné fázi se tabule skla prudkou změnou teploty, zajištěnou vzduchovou sprchou, ochladí. Celý tento výrobní postup je znázorněn na obr 2.3. [6]



Obr. 2.3: Postup výroby tepelně tvrzeného skla (kaleného) [5]

V důsledku prudkého ochlazení se mění rozložení napětí po průřezu skla. Tabule skla na obou površích je rychle ochlazená, zatímco střední část skla je stále zahřátá. Na povrchu tabule skla vzniká z obou stran tlakové napětí, které dosahuje

hodnot až 90 – 150 MPa. V jádru průřezu je tahové napětí, které vyrovnává tlakové napětí na povrchu skla. Průběh napětí po tloušťce tabule má typický parabolický průběh, viz obr. 2.4. [5], [7]



Obr. 2.4: Výsledné rozložení průběhu napětí po průřezu [5]

Úprava tepelně tvrzeného skla, jako je řezání či výroba otvorů, musí být provedena před teplotní úpravou skla, protože jakékoliv narušení povrchového předpětí znamená rozbití celé tabule.

Charakteristická pevnost tepelně tvrzeného skla v tahu za ohybu je podle prEN 16612 [1] stanovena na hodnotu 120 MPa. Pro výpočet návrhové pevnosti, nejen tepelně tvrzeného skla, ale všech pevnostně upravovaných skel, se používá dle prEN 16612 vztah,

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,V}} \quad (2.2)$$

kde $f_{b,k}$ je charakteristická pevnost upravovaných skel, viz tab. 2.5,
 k_v součinitel zpevnění, který zohledňuje způsob výroby, viz tab. 2.6,
 $\gamma_{M,V}$ dílčí součinitel spolehlivosti pevnostně upravovaného skla.

Tab. 2.5: Charakteristické pevnosti upravovaných skel $f_{b,k}$ [1]

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. 2.6: Součinitel zpevnění k_v [1]

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

K vlastnostem tepelně tvrzeného skla patří nejen vysoká tahová pevnost, ale i vyšší odolnost proti nárazu, než je tomu u plaveného skla. Dále je více odolné vůči změnám teploty až do rozdílu teplot 150 °C.

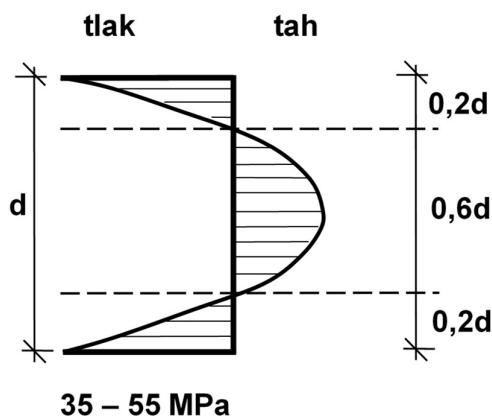
Při překročení maximální pevnosti tepelně tvrzeného skla nastává jeho celkové porušení, které se vyznačuje rozbitím tabule na nespočetně mnoho malých střepů. Zde je patrný rozdíl oproti plavenému sklu, jehož porušení je pouze lokální a střepey jsou ve velkých kusech.

K negativním vlastnostem můžeme zařadit vyšší počáteční deformace a spontánní porušení vměstkem sulfidu niklu. [5], [6]

2.6.2 Tepelně zpevněné sklo

Tepelně zpevněné sklo (TGV) nebo také polokalené sklo, je odolnější vůči mechanickým a tepelným šokům. Jeho výroba je jen nepatrně odlišná od výroby tepelně tvrzeného skla. První fáze výroby je očištění od povrchových nečistot, dále je tabule skla zahřáta na teploty kolem 600 °C a následně je tabule rychle ochlazena. U tepelně zpevněných skel je proces ochlazování pomalejší, celková doba výroby je tedy časově náročnější. [8]

Důsledkem pomalejšího ochlazení je snížení úrovně povrchového předpětí, a to na hodnoty 35 – 55 MPa. Obr 2.5. ukazuje rozložení napětí po průřezu skla u tepelně zpevněného skla. [5]



Obr. 2.5: Rozložení napětí po průřezu tepelně zpevněného skla [5]

Mezi kladné vlastnosti tepelně zpevněného skla patří vysoká odolnost vůči mechanickému a tepelnému namáhání, odolnost vůči rozdílům teplot je až 100 °C.

Při porušení skla se tepelně zpevněné sklo chová stejně jako plavené sklo. Po překročení maximální pevnosti nastává porušení tabule v podobě prasklin, které jsou pouze lokální a střepy jsou velkých rozměrů. V důsledku toho, že sklo je porušeno pouze lokálně, tabule je stále schopna přenášet zatížení. [5], [9]

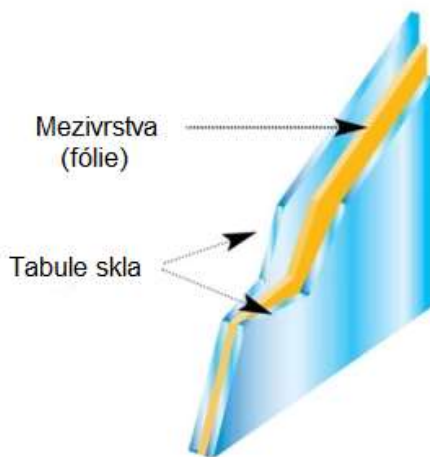
2.6.3 Chemicky tvrzené sklo

Stejně jako předchozími metodami, tak i u této je cílem dosáhnout lepších mechanických vlastností, zejména vyšší pevnosti. Na rozdíl od tepelně tvrzeného a tepelně zpevněného skla je výrobní proces pouze povrchový. Chemické zpevnění skla se provádí namáčením tabule skla do elektronické lázně. Na povrchu dochází k iontové výměně za přítomnosti zvýšené teploty, obvykle v rozmezí 250 – 500 °C. Pokud se v blízkosti tabule skla, za přítomnosti těchto teplot, vyskytuje jiná látka obsahující ionty alkalických kovů, dochází pomocí difúze k výměně těchto iontů. Konkrétním příkladem je výměna iontu sodného za iont draselný, který má větší objem. Tím je opět dosaženo povrchového předpětí, které je vyšší než u tepelně upravovaných skel. Může dosahovat až 200 MPa. [5], [10]

3 VRSTVENÉ SKLO

3.1 Popis

Vrstvené sklo, anglicky „*laminated glass*“, je složeno z několika vrstev. Jedná se o dvě a více vrstev skleněných tabulí, které jsou spojeny transparentními mezivrstvami, viz obr. 3.1. Maximální počet tabulí skel, které lze použít pro vrstvené sklo je 25, v řezu tedy tloušťka celé skladby i s mezivrstvami může dosáhnout až 100 mm. [4], [5]



Obr. 3.1: Popis vrstev u dvouvrstvého skla [11]

Pro vrstvená skla se mohou použít tabule skel jak plavených, tak tepelně upravovaných či jejich kombinace. Nejčastěji se však používají tepelně upravovaná skla, konkrétně tepelně tvrzená či zpevněná, a to v důsledku jejich vyšší pevnosti.

Mezivrstvy jsou nejčastěji tvořeny jednou či více vrstvami fólií. Pro nenosná skla je možnost nahradit transparentní fólii vrstvou lité pryskyřice. Pryskyřice je materiál, který se používá převážně pro své dobré akustické vlastnosti. Pokud však dojde k porušení vrstveného skla s litou pryskyřicí, nezůstanou střepy skla přichyceny na mezivrstvě. Nemůžeme tedy počítat s větší zbytkovou únosností, která nastává například u porušených vrstvených skel s mezivrstvou z polymerní fólie. Další materiály, které se používají jako mezivrstvy, jsou silikáty či intumescentní gely v případě nenosných protipožárních příček.

Pevnost vrstvených skel je dána typem použitého skla, jeho tloušťkou a samozřejmě mezivrstvou. Další výhodou je zbytková únosnost po porušení tabule skla při použití fólie jako mezivrstvy, protože střepy zůstanou přichyceny na fólii.

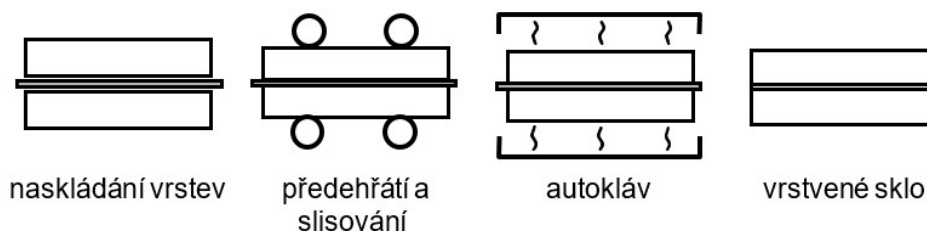
Tvar porušení vrstveného skla je určen typem použitého skla. Porušení tepelně tvrzeného skla se vyznačuje nespočetně mnoha malými střepy rozmístěnými po celé ploše tabule. Naopak tepelně zpevněné sklo se při porušení chová stejně jako

sklo plavené, trhliny se tedy projeví pouze v lokálním měřítku, ve velkých, ostrých kusech. [1], [4], [5]

3.2 Výroba

Výroba vrstveného skla spočívá ve spojení více vrstev skleněných tabulí k sobě. Spojení se provádí pomocí vložené mezivrstvy. U vrstvených skel, která jsou vyráběna především pro nosné konstrukce, se na mezivrstvu transparentní polymerní fólie.

V první fázi výroby se naskládají jednotlivé vrstvy skladby skla na sebe. Vždy se střídá vrstva skla s požadovaným typem mezivrstvy. Obvykle se dávají 2 až 4 vrstvy fólie na sebe, podle požadavků na bezpečnost či únosnost skla. Poté se naskládané souvrství zahřeje na teplotu kolem 70 °C a slisuje se mezi válci, aby došlo k vytlačení vzduchových bublin. Následně je vrstvené sklo umístěno do autoklávu, kde se zahřívá až na 140 °C při tlaku 0,8 MPa. Celý výrobní proces je znázorněn na obr.3.2. [5]



Obr. 3.2: Rozložení napětí po průřezu tepelně zpevněného skla [5]

Nevýhodou vrstvených skel jsou nerovné hrany, které jsou způsobeny posunem tabulí vůči sobě při výrobě. Přípustný posun je 2 mm. [5]

3.3 Druhy používaných fólií

Obecně se vrstvená skla značí jako tzv. bezpečnostní. Pro vrstvy vložené mezi tabule skla se používají transparentní, tenké fólie. Nejčastějšími fóliemi jsou polyvinyl-butyrál (PVB), etylen-vinyl-acetát (EVA), termoplastický polyuretan (TPU), či ionoplast. Základní tloušťka PVB fólie je 0,38 mm, při navrhování nosných konstrukcí ze skla je však předepsána minimální tloušťka mezivrstvy 0,76 mm, tedy dvě fólie. Naopak maximální přípustná tloušťka mezivrstvy je 6 mm. U ostatních typů fólií se jejich základní tloušťky mohou lišit.

Jednotlivé fólie mají rozdílné složení a s ním související materiálové vlastnosti, které jsou ovlivňovány především délkou působícího zatížení a teplotou. [1], [4], [12]

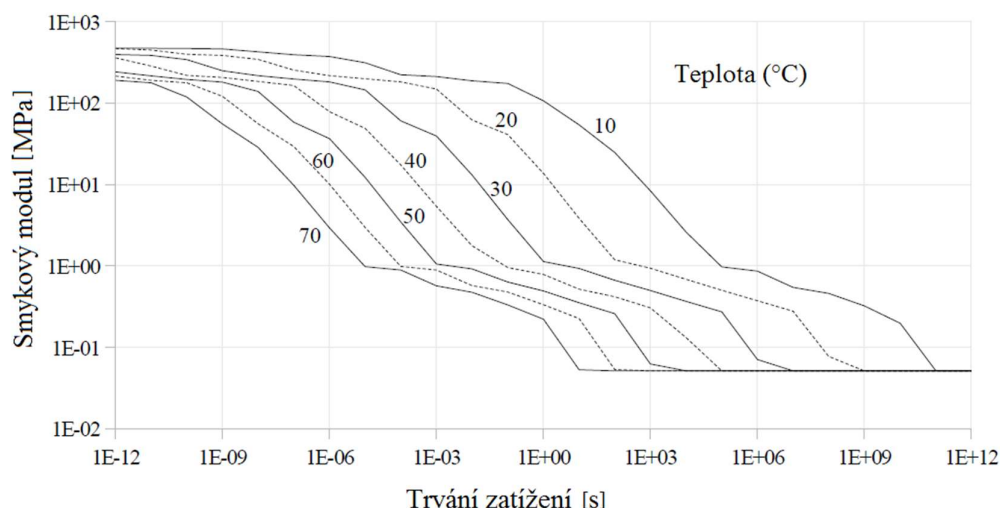
Nejčastěji používanou fólií pro vrstvená nosná skla je PVB fólie. PVB, polyvinylbutyral je termoplastický polymer, který patří do skupiny polyvinylacetalů. Jeho výroba spočívá v hydrolýze polyvinylacetátu na polyvinylalkohol (PVA) a následné reakci s aldehydem, tzv. acetalizaci. Polyvinylbutyral je velice flexibilní v široké škále teplot a stejně jako ostatní vinylacetalové polymery se zpracovává nejlépe s přidáním změkčovadel. Pro výrobu PVB fólie se používají změkčovadla s dobrou snášenlivostí vůči polymeru, malou těkavostí a nesmí snižovat propustnost světla souvrstvím či způsobovat změny fólie v podobě zbarvení. [13], [11]

Využití polyvinylbutyralu je v největší míře pro výrobu vrstvených bezpečnostních skel. Tato skla se dále využívají převážně v automobilovém a stavebním průmyslu. Polyvinylbutyral se ve světě vyrábí zejména v podobě fólií, největším producentem jsou Spojené státy americké a západní Evropa. Obvyklé je, že každý výrobce má vlastní výrobní postupy.

PVB má mnoho výhod, je jimi například houževnatost, transparentnost, odolnost a vysoká přilnavost. Fólie z PVB se vyrábí v šířkách do 3200 mm [14]. Tloušťky se pohybují v rozmezí 0,38–1,52 mm, nejvíce používanou tloušťkou je 0,76 mm.

3.4 Smykový modul fólie pro vrstvená skla

Se změnou teploty a délkou trvání zatížení dochází ke změně smykového modulu G polymerní fólie. Konkrétně, pokud teplota roste a délka trvání se prodlužuje, smykový modul fólie klesá. Závislost smykového modulu fólie na době trvání zatížení při různých teplotách je znázorněna na *obr. 3.3*. Čím nižší je smykový modul fólie, tím menší je spolupůsobení jednotlivých vrstev tabulí, což vede ve výsledku ke snížení celkové únosnosti vrstveného skla. [1], [12]

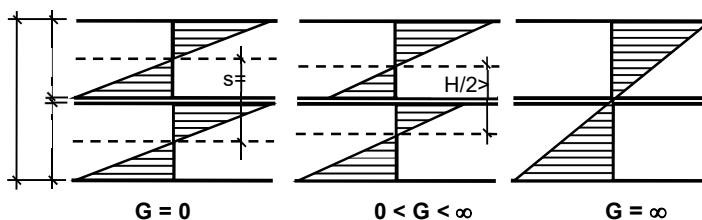


Obr. 3.3: Závislost smykového modulu G na teplotě a době trvání zatížení u PVB fólie [1]

Na obr. 3.4 jsou zobrazeny tři průběhy napětí u dvouvrstvých skel v závislosti na velikosti smykového modulu G fólie. Prvním je případ, kdy se spřažení tabulí vlivem fólie úplně zanedbává, tj. smykový modul fólie $G = 0$. Průběh napětí po průřezu proto vypadá, jako kdyby skla nebyla spojena žádnou mezivrstvou. Tento návrh je sice bezpečný, však z ekonomického hlediska nepříznivý. Takto se dají navrhovat nosné konstrukce z vrstvených skel, které jsou dlouhodobě zatíženy a jsou vystaveny vysokým teplotám, tedy pro nejextrémnější zatížení.

Opačná situace průběhu napětí po průřezu dvouvrstvého skla nastává při úplném spojení tabulí, tedy dokonalém spřažení. Smykový modul se v tomto případě rovná nekonečnu a napětí v místě fólie je nulové. Tento průběh napětí je téměř nereálný tzv. ideální. Dá se použít u konstrukcích, které jsou vystaveny pouze vlivům krátkodobého působení zatížení jako je vítr.

V praxi se smykový modul G u nosných konstrukcí z vrstvených skel pohybují mezi těmito dvěma případy. Číselně se smykový modul reálných konstrukcí dá vyjádřit jako otevřený interval od 0 do nekonečna. [1]



Obr. 3.4: Průběh napětí v závislosti na velikosti modulu ve smyku fólie, dvouvrstvé sklo [1]

Smykový modul fólie je důležitý i pro stanovení celkové deformace tabule vrstveného skla. [1]

3.5 Příklady využití ve stavebnictví

Vrstvená skla se v současné architektuře uplatní jak na nenosné, tak i nosné konstrukční prvky. Nejběžnější uplatnění je pro výplně okenních otvorů, zasklení fasád, nástropní skla, neprůstřelná bezpečnostní skla, vnitřní příčky a další interiérové aplikace. Hojně se vyskytují i u rekonstrukcí budov.

V posledních letech jsou však vrstvená skla stále častěji používána i na nosné prvky stavebních konstrukcí, která kromě vlastní tíhy přenáší zatížení větrem, sněhem a užitém zatížením. Vrstvené sklo se tak dnes stále častěji používá na celoskleněné schodiště, zábradlí, sloupy či nosníky.

Podle směru zatížení lze rozlišit tabule z vrstveného skla zatížené kolmo k povrchu, tj. desky uložené po dvou, třech či čtyřech stranách nebo bodově podepřené. A tabule z vrstveného skla zatížené v rovině, tj. nosníky, sloupy či stěny [5].

4 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

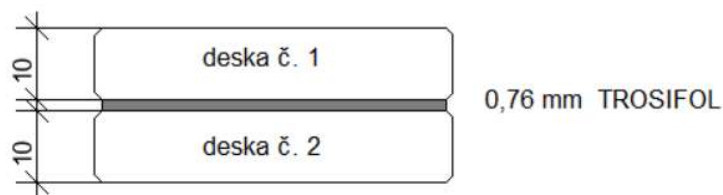
4.1 Popis

V následující části této práce jsou popsány a vyhodnoceny statické zkoušky dvouvrstvých skleněných tabulí zatěžovaných čtyřbodovým ohybem, které byly provedeny podle ČSN EN 1288-3 [15].

Cílem zatěžovacích zkoušek bylo stanovení pevnosti skla v tahu za ohybu, rozložení normálového napětí po výšce a šířce průřezu tabule vrstveného skla a stanovení svislé deformace. Kromě určení únosnosti tabule, tj. do porušení skla při překročení tahové pevnosti, byla stanovena i zbytková únosnost a způsob porušení.

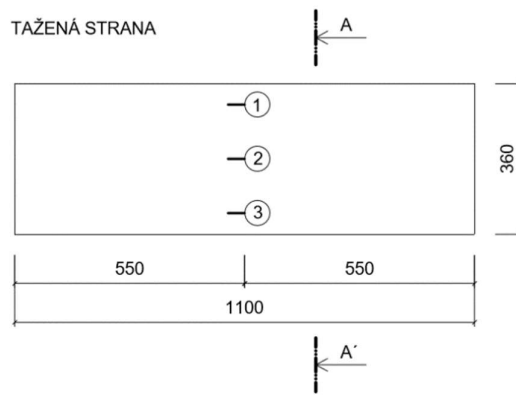
4.2 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa byla vyrobena ze dvou tabulí tepelně tvrzeného skla (ESG), které byly vzájemně spojeny pomocí dvou vrstev transparentní polymerní PVB (polyvinyl-butyrál) fólie Trosifol BG R 20, viz příloha A. Tabule skla měla geometrický rozměr 1100 x 360 mm o tloušťce 10 mm, tloušťka mezivrstvy byla 0,76 mm, tedy celková tloušťka zkušebního tělesa byla 20,76 mm, viz *obr. 4.1*. Celkem bylo vyrobeno 9 zkušebních těles, každé z nich o hmotnosti 20 kg.

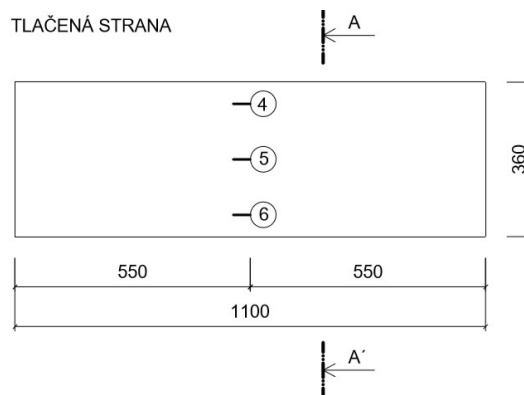


Obr. 4.1: Příčný řez souvrstvím tabule

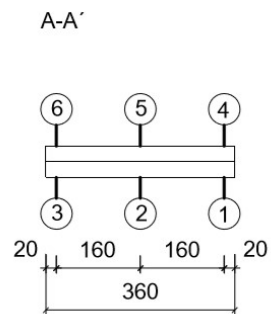
Experimenty byly prováděny za teploty 20 – 22°C. Každé těleso bylo osazeno 6 odporovými jednosměrnými tenzometry 10/120 – LY11 k nepřímému měření normálového napětí, viz příloha B. Tenzometry označené číslem 1, 2, 3 byly umístěny do středu rozpětí vrstvené tabule, viz *obr 4.2*, a sloužily k měření maximálních tahových napětí na spodním povrchu dolní (tažené) tabule skla. Tenzometry označené č. 4, 5, 6 byly umístěny rovněž ve středu rozpětí tabule skla, viz *obr. 4.3*, ale na horním povrchu souvrství. Byly určeny k měření tlakového napětí v horních vláknech horní tabule, viz *obr. 4.4*.



Obr. 4.2: Rozmístění tenzometrů 1,2,3, tažená strana

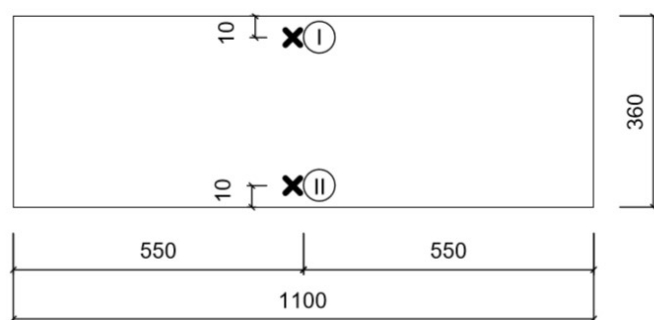


Obr. 4.3: Rozmístění tenzometrů 4,5,6, tlačená strana



Obr. 4.4: Rozmístění tenzometrů v řezu tabule

K zaznamenávání svislých průhybů byly použity 2 kalibrované potenciometry rozsahu (+/- 50 mm) umístěné 10 mm od delší hrany tělesa uprostřed rozpětí. Označení potenciometrů bylo čísly I. a II. Jejich rozmístění je zobrazeno na obr. 4.5.

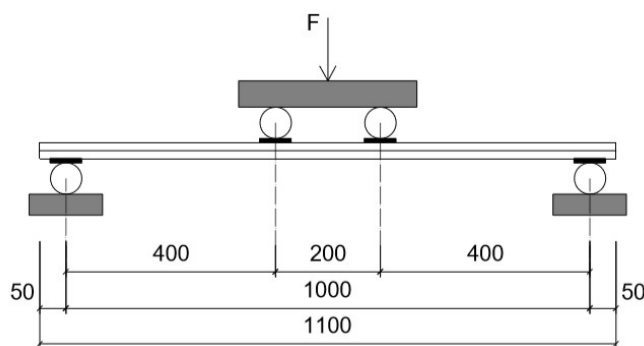


Obr. 4.5: Rozmístění potenciometrů

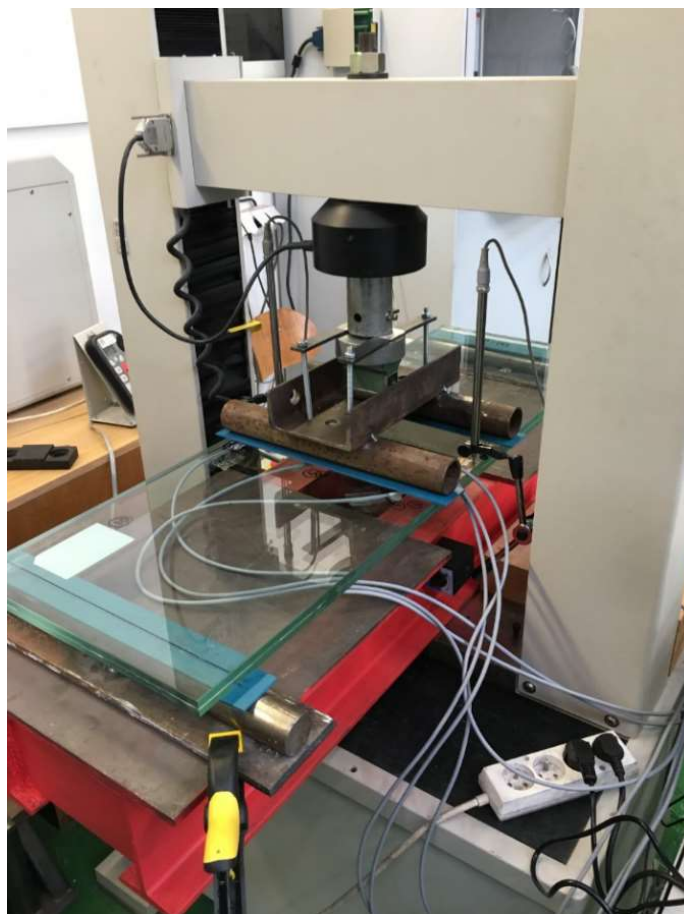
4.3 Uspořádání zkoušky

Zkušební tělesa byla podepřena dvojicí ocelových válců o průměru 40 mm a délce 500 mm, které byly osově od sebe vzdáleny 1000 mm. Zatěžování zkušebních těles bylo prováděno přes dvojici ocelových válců ve středu rozpětí, viz obr. 4.6. Zatěžovací válce měly osovou vzdálenost 200 mm a byly umístěny symetricky vzhledem k ose skleněné tabule. Mezi ocelovými válci a zkušebním tělesem byly umístěny pryžové podložky, které zabraňovaly přímému kontaktu mezi sklem a ocelí. Osazení tělesa ve zkušebním stroji je znázorněno na obr. 4.7 a na obr. 4.8 je patrné uložení skleněné tabule na válcovou podporu.

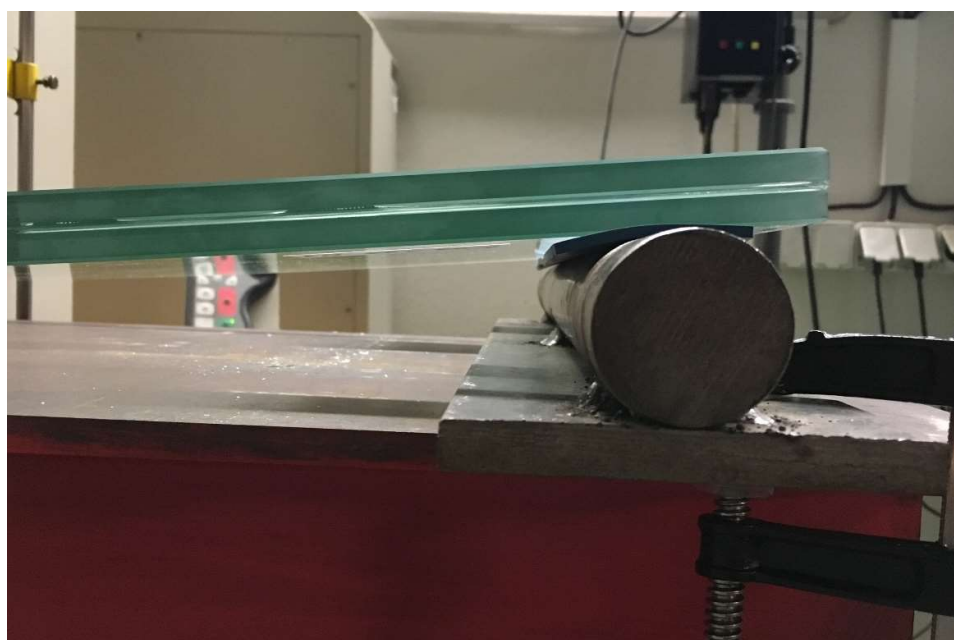
K provedení experimentů bylo použito zkušební zařízení MTS-Q TEST100, které bylo připojeno na měřící ústřednu s počítačem k zaznamenávání a zálohování naměřených dat, viz obr. 4.9.



Obr. 4.6: Statické schéma



Obr. 4.7: Těleso ve zkušebním zařízení



Obr. 4.8: Detail uložení tělesa



Obr. 4.9: Zkušební zařízení MTS-Q, ústředna, počítač

Zkušební tělesa byla zatěžována plynule až do porušení třemi rychlostmi 2 mm/min, 0,5 mm/min, 0,125 mm/min. Každou z rychlostí byla zatěžována vždy 3 zkušební tělesa, viz *tab. 4.1*. Zatěžování vrstvených skel probíhalo ve dvou fázích, první fáze trvala do okamžiku dosažení pevnosti skla v tahu, tedy porušení spodní tažené skleněné vrstvy. Následně byla tabule skla odtížena a dále znovu zatěžována až do dosažení tahové pevnosti horní tabule skla a jejího porušení. Deformace celého souvrství skla je znázorněna na *obr. 4.10*.



Obr. 4.10: Zkušební těleso po porušení celého souvrství

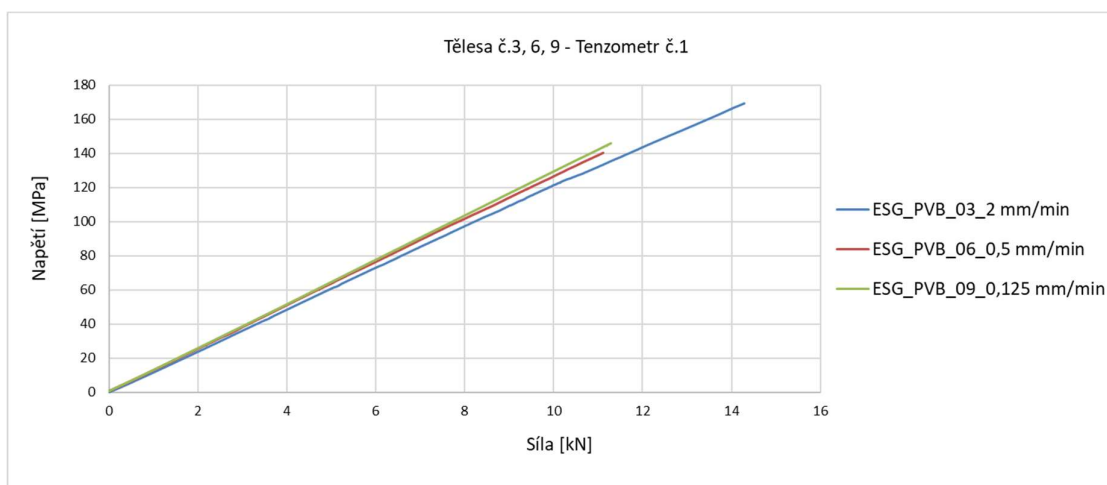
Tab. 4.1: Rychlosti zatěžování jednotlivých skel

Označení zkušebních těles	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

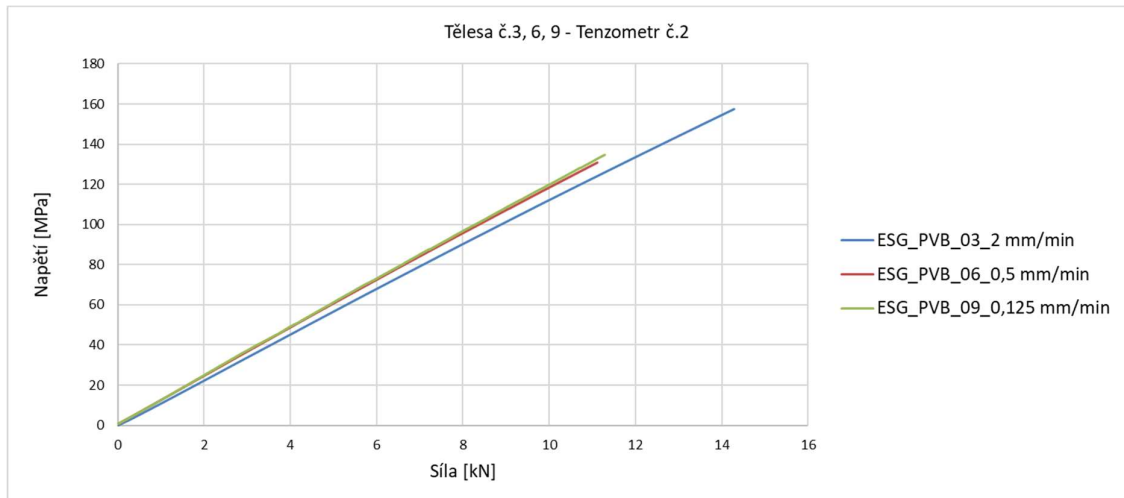
4.4 Vyhodnocení experimentů

Výsledkem experimentálních zkoušek je porovnání deformací a napětí pro jednotlivé zatěžovací rychlosti v závislosti na zatížení vyvolaném posunem příčnicku.

Průběh normálového napětí změřený tenzometrem č.1 v závislosti na síle pro tělesa 3, 6, 9, tedy pro tři různé rychlosti, je znázorněn na *grafu 4.1*. Stejná závislost je popsána i na *grafu 4.2* pro tenzometr č. 2 a tělesa 3,6,9 a na *grafu 4.3* pro tenzometr č. 3 a tělesa 1,4,7. Všechny tyto grafy znázorňují lineární průběhy závislosti síly na napětí pro tři rychlosti zatěžování. Křivka nejrychleji zatěžovaného zkušebního tělesa, tedy rychlost zatěžování 2 mm/min, vykazuje nejmenší hodnoty normálového napětí při stejné úrovni zatížení. V porovnání s tělesy zatíženými rychlostí 0,125 mm/min kde je rozdíl napětí o 5 až 10 MPa menší pro sílu 10 kN. Je tedy zřejmé, že čím rychlejší je zatěžování skleněných tabulí, tím menší je hodnota normálových napětí v tabuli skla na tažené straně. Obdobně vychází i menší hodnoty normálového napětí na povrchu skla namáhaného tlakem.



Graf 4.1: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 3,6,9, tenzometr č.1

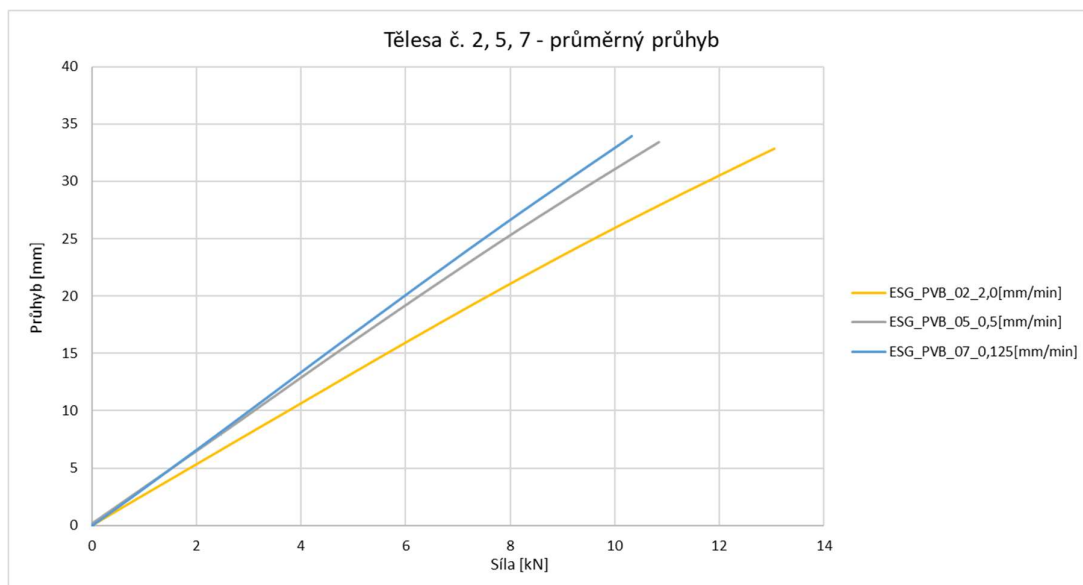


Graf 4.2: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 3, 6, 9, tenzometr č.2

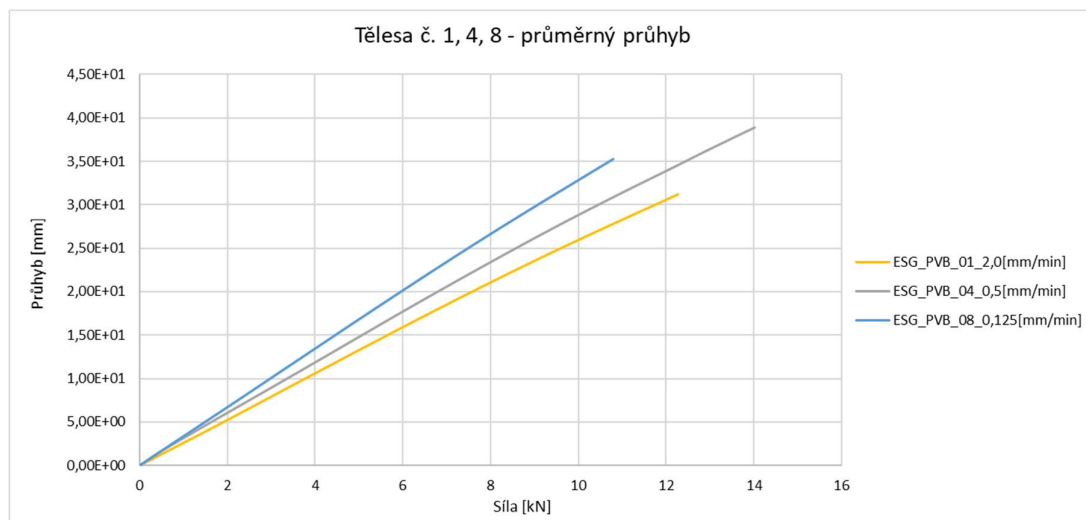


Graf 4.3: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 1, 4, 7, tenzometr č.3

Na *grafech 4.4 a 4.5* jsou znázorněny průběhy deformací v závislosti na síle pro tělesa 2, 5, 7 a 1, 4, 8, tedy pro rychlosti 2 mm/min, 0,5 mm/min a 0,125 mm/min. Při zatěžování rychlostí 2 mm/min je průběh deformací v závislosti na zatěžovací síle nižší než pro rychlost 0,125 mm/min. Pro sílu 10 kN je rozdíl svislé deformace u tělesa zatěžovaného rychlostí 2 mm/min až o 7 mm nižší než u tělesa zatěžovaného rychlostí 0,125 mm/min. Čím rychleji je těleso zatěžováno, tím dosahujeme menších průhybů.

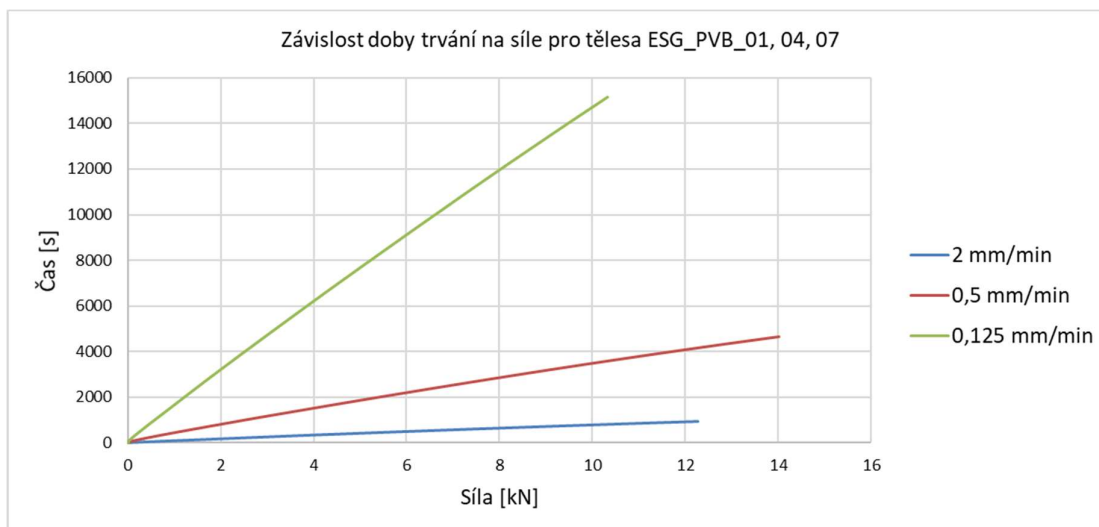


Graf 4.4: Průběh deformací v závislosti na síle pro tělesa 2,5,7

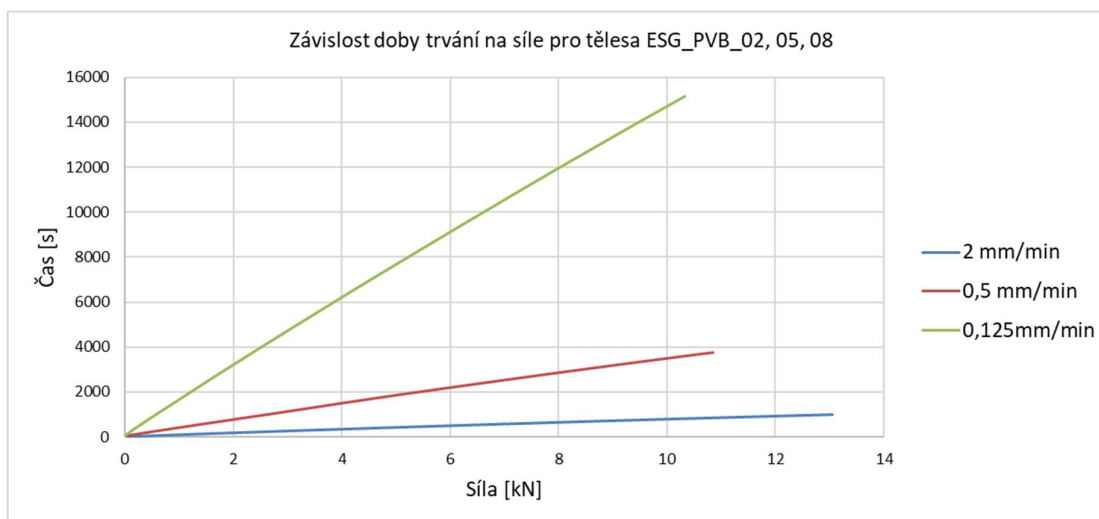


Graf 4.5: Průběh deformací v závislosti na síle pro tělesa 1,4,8

Dalšími výsledky, které jsou z experimentálních zkoušek čtyřbodovým ohybem zřejmé, jsou závislosti působící síly F na době trvání zatížení. Křivky pro tělesa 1, 4, 7 jsou vyneseny v *grafu 4.6*, pro tělesa 2, 5, 8 v *grafu 4.7*. Tělesa pro porovnání byla vždy vybrána tak aby v jednotlivých grafech byla tělesa ze všech tří rychlostí zatěžována. Z *grafů 4.6* a *4.7* je patrné, že čím rychleji se zatěžovalo, tím docházelo k svislé deformaci skleněné tabule dříve.

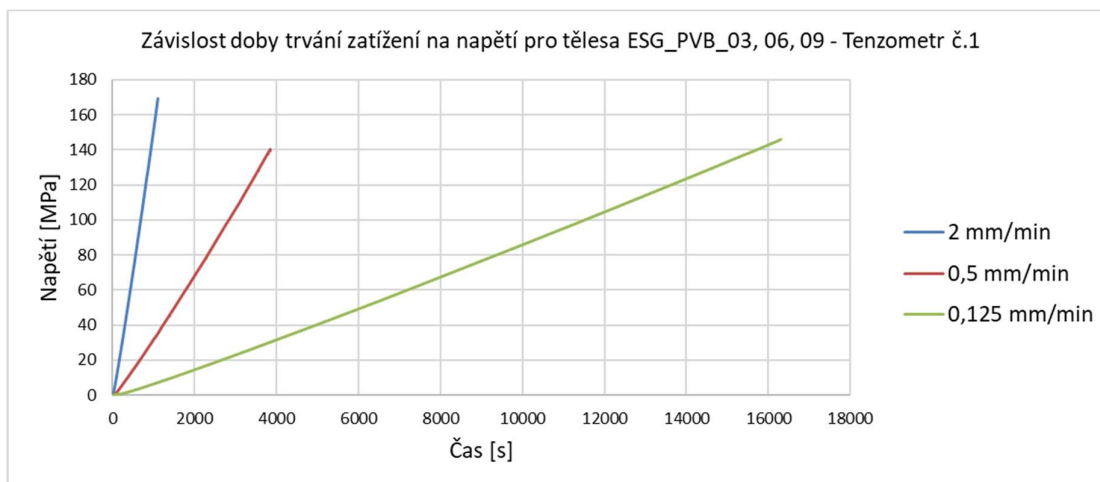


Graf 4.6: Závislost působícího zatížení v čase pro tělesa 1,4,7

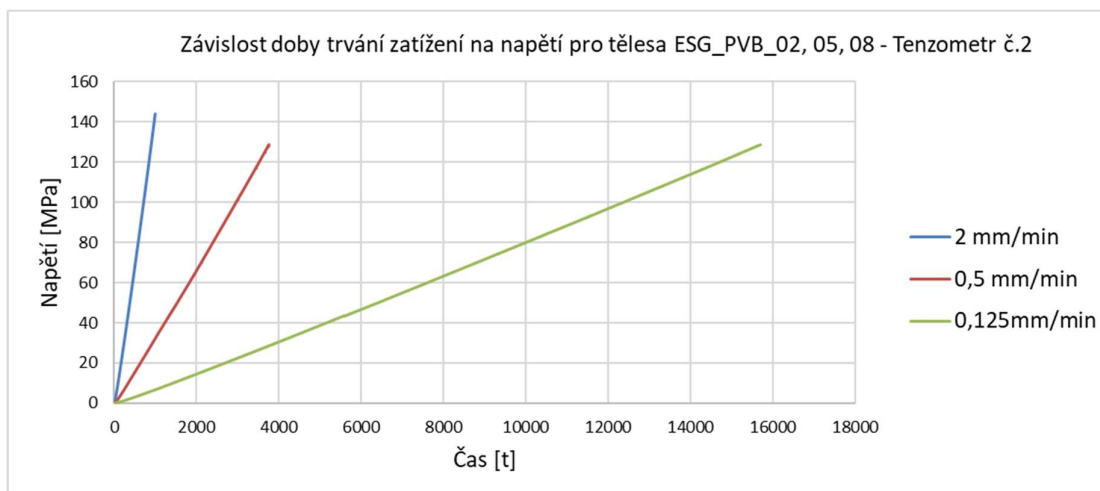


Graf 4.7: Závislost působícího zatížení v čase pro tělesa 2,5,8

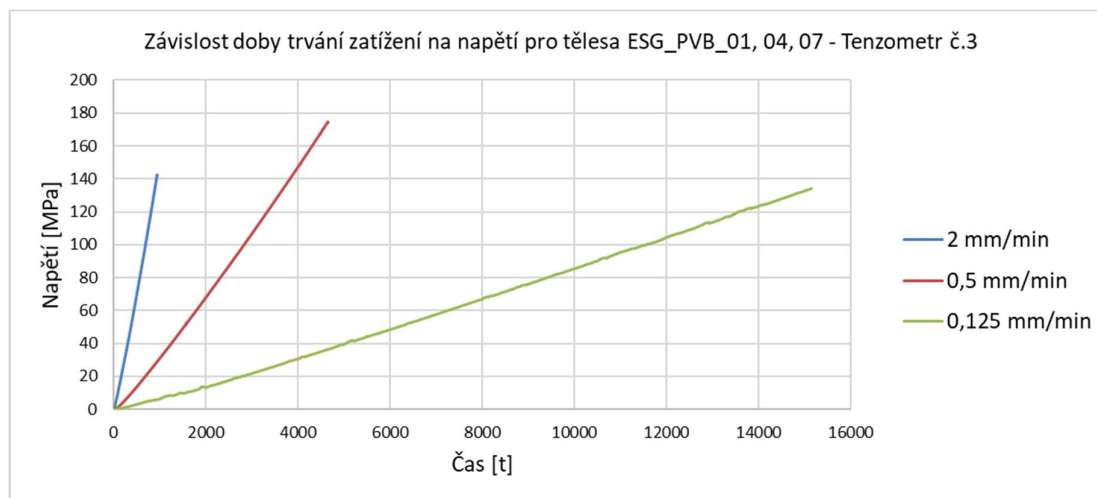
Na grafech 4.8, 4.9, 4.10 je znázorněna závislost doby trvání zatížení na průběhu normálového napětí, vždy pro 3 různé rychlosti - 2 mm/min, 0,5 mm/min a 0,125 mm/min. U zatěžování nejrychlejší rychlostí vznikají v průběhu zatěžování mnohem větší napětí, než je tomu u rychlosti 0,125 mm/min, tedy v případě tělesa zatěžovaného nejmenší rychlostí.



Graf 4.8: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č. 1 pro tělesa 3,6,9



Graf 4.9: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č. 2 pro tělesa 2,5,8



Graf 4.10: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č.3 pro tělesa 1,4,7

4.5 Shrnutí výsledků pro zkušební tělesa

V následujících tabulkách jsou shrnuty data získaná při experimentálních zkouškách. Tab. 4.2 zobrazuje maximální normálové napětí všech těles, které byly naměřené pomocí tenzometrů č. 1 – 6 a síly, při kterých byly maximální napětí naměřeny. Tělesa ESG_PVB_1 – 3 byla zatěžována silou o rychlosti 2 mm/min, tělesa ESG_PVB_4 – 6 byla zatěžována silou o rychlosti 0,5 mm/min a tělesa ESG_PVB_7 – 9 byla za zatěžována silou o rychlosti 0,125 mm/min. Tenzometry č. 1 – 3 měřily normálové napětí na tažené straně tabule. Celkově ze všech devíti zkušebních tabulí bylo naměřeno největší normálové napětí $\sigma_{max} = 177,38 \text{ MPa}$ tenzometrem č. 1 u tělesa ESG_PVB_04 při zatížení působícím posunem příčnicku $F = 14,02 \text{ kN}$.

V tab. 4.3 jsou znázorněny maximální průhyby všech devíti zkušebních těles změřené potenciometry I – II, průhyb a čas ve kterém tabule skla dosáhla maximálního napětí. Největší naměřený průhyb byl změřen potenciometrem č. II $w = 38,89 \text{ mm}$ v čase 4 453,8 s pro těleso ESG_PVB_04. Z naměřených hodnot v tab. 4.3 je patrné, že čím pomaleji se zkušební tělesa zatěžují, tím je dosaženo větších deformací.

Tab. 4.2: Maximální normálová napětí pro tělesa ESG_PVB_1 – 9 a maximální působící zatížení

Těleso	Síla F	Normál. napětí T01	Normál. napětí T02	Normál. napětí T03	Normál. napětí T04	Normál. napětí T05	Normál. napětí T06
	[kN]	[MPa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
ESG_PVB_01	12,27	144,47	135,28	142,55	-138,36	-140,00	-134,97
ESG_PVB_02	13,05	153,98	144,00	151,77	-147,14	-148,52	-144,23
ESG_PVB_03	14,29	169,24	157,50	151,66	-160,99	-165,89	-159,83
ESG_PVB_04	14,02	177,38	x	174,71	x	-169,92	-160,89
ESG_PVB_05	10,85	137,00	128,68	137,26	-130,21	-132,30	-128,99
ESG_PVB_06	11,12	140,31	130,86	139,95	-132,74	-134,92	-130,79
ESG_PVB_07	10,33	135,46	116,69	134,13	-126,10	-134,53	-128,42
ESG_PVB_08	10,80	x	128,62	140,13	-132,79	-138,99	-132,49
ESG_PVB_09	11,29	145,88	134,73	x	-138,34	-142,40	-134,37

x hodnoty normálového napětí nebyly změřeny z důvodu nefunkčních tenzometrů

Tab. 4.3: Maximální naměřené hodnoty průhybů pro tělesa ESG_PVB_1 – 9 v čase

Těleso	Průhyb I.	Průhyb II	Průměrný průhyb	Čas
	[mm]	[mm]	[mm]	[s]
ESG_PVB_01	31,12	31,29	31,21	942,7
ESG_PVB_02	32,90	32,80	32,85	994,1
ESG_PVB_03	36,53	36,68	36,61	1 104,2
ESG_PVB_04	x	38,89	38,89	4 653,8
ESG_PVB_05	33,41	33,42	33,42	3 756,0
ESG_PVB_06	34,05	34,14	34,09	3 845,4
ESG_PVB_07	37,35	38,07	37,71	15 155,0
ESG_PVB_08	35,06	35,49	35,27	15 698,0
ESG_PVB_09	36,24	36,66	36,45	16 309,0

5 ANALYTICKÝ VÝPOČET - ZJEDNODUŠENÁ METODA

5.1 Popis

V následující části je popsán jeden ze způsobů analytického výpočtu dle prEN 16612 [1] vrstvených skel. Jedná se o zjednodušenou metodu návrhu vrstvených skel, která se skládá minimálně ze dvou tabulí skla. Tyto tabule jsou mezi sebou spojeny mezivrstvou, která je tvořena viskoelastickým transparentním materiálem. V závislosti na chemickém složení a tím i na materiálových vlastnostech mezivrstvy lze ve výpočtu uvažovat se spolupůsobením jednotlivých skleněných tabulí. Míra spolupůsobení závisí zejména na pružném modulu fólie ve smyku G , který se u viskoelastických materiálů mění s teplotou a délkou trvání zatížení. Vzhledem k nedostatku informací o materiálových vlastnostech v současnosti používaných fólií, jsou návrhové metody používané v praxi konzervativní. [1]

5.2 Výpočet podle prEN 16612

Při posuzování spolehlivosti konstrukce nemá v mezním stavu únosnosti maximální tahové napětí překročit hodnotu návrhové pevnosti skla, viz vztah (5.1). Maximální tahové napětí je počítáno z nejnepříznivější kombinace návrhového zatížení, které může na konstrukci působit. Návrhová pevnost skla je vypočtena podle vztahu (2.5) pro plavené sklo, (2.6) pro pevnostně upravovaná skla. [1]

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d} , \quad (5.1)$$

kde σ_{max} je maximální tahové napětí,
 $f_{g,d}$ návrhová pevnost skla, viz vztah (2.5), (2.6).

V mezním stavu použitelnosti se porovnávají hodnoty deformací. Maximální deformace nemá být větší než mezní deformace

$$w_{max} \leq w_d , \quad (5.2)$$

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

Zjednodušená metoda pro posouzení vrstvených skleněných tabulí zatížených kolmo ke svému povrchu je založena na metodě účinné tloušťky. Vrstvené sklo se pomocí součinitele přenosu smykových sil ω nahradí sklem monolitickým o tloušťce

rovné efektivní tloušťce. Ve výpočtu je pak pomocí součinitele ω zaveden vliv délky trvání zatížení a teploty. Pro výpočet deformace je možné stanovit účinnou tloušťku ze vztahu [1]

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega (\sum_i h_k h_{m,k}^2)} , \quad (5.3)$$

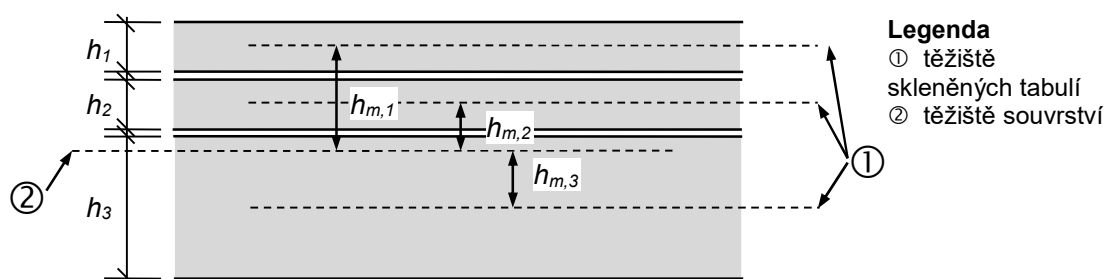
a pro výpočet napětí v mezním stavu únosnosti se účinná tloušťka určí jako

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{(h_{ef,w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m,j})}} , \quad (5.4)$$

kde ω je součinitel přenosu smykových sil, viz *tab. [5.1]*,
 h_l, h_j tloušťky jednotlivých tabulí skla, viz *obr. 5.1*,
 $h_{m,k}, h_{m,j}$ těžiškové vzdálenosti osy tabule k či j , od těžiškové osy souvrství, viz *obr. 5.1*.

Tab. 5.1: Součinitel přenosu smykových sil [1]

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. 5.1: Značení vrstveného skla [1]

5.3 Součinitel přenosu smykových sil

Součinitel přenosu smykových sil ω je jednou z veličin, která významně ovlivňuje návrh vrstvených skel. Součinitel je přímo závislý na typu použité mezivrstvy. Transparentní fólie, které jsou na mezivrstvy používané, se dají podle chemického složení zatřídit do jedné ze čtyř tříd, viz *tab. 5.1*. Třídy 0 – 3 zohledňují závislost modulu pružnosti ve smyku G na délce trvání zatížení. Fólie pro vrstvená skla mohou být typu polyvinyl-butyrál (PVB), etylen-vinyl-acetát (EVA), termoplastický polyuretan (TPU) či ionoplast. Pro zjednodušení se fólie z ionoplastu řadí do třídy 3, fólie z polyvinyl-butyrálu (PVB) se řadí do třídy 2. [1]

Součinitel přenosu smykových sil ω nabývá hodnot od 0, kdy smykové spolupůsobení ve výpočtu není zohledněno, až po hodnotu 1, kdy se počítá s úplným smykovým spolupůsobením. Hodnoty součinitele smykových sil jsou uvedeny v *tab. 5.1*. Podle zjednodušené metody se plné spolupůsobení předpokládá pouze u krátkodobého zatížení, jakým je například vítr. U ostatních zatížení je spolupůsobení vrstev skel téměř zanedbáno. Tento výpočet vede sice k bezpečnému, ale neekonomickému návrhu konstrukcí ze skla. [2]

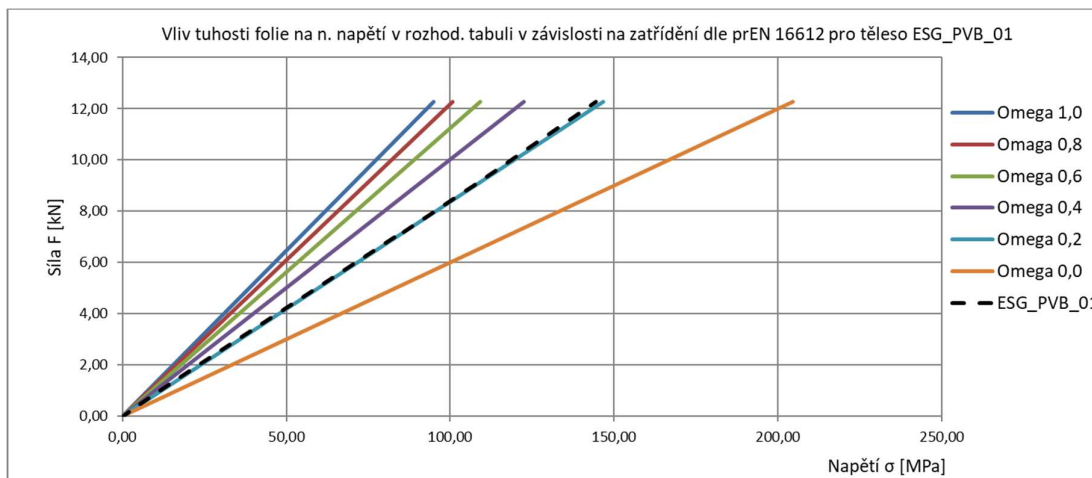
Pro velké množství druhů fólií, které mohou být použity při výrobě vrstvených skel, je vhodnější experimentálně ověřit jejich materiálové vlastnosti.

K přesnějšímu zjištění součinitele přenosu smykových sil, tedy i k ekonomičtějšímu návrhu vrstvených skel slouží parametrická studie dle prEN 16612 [1]. Tato parametrická studie vlivu smykového modulu G na přerozdělení normálového napětí σ a na velikosti svislé deformace je založena na návrhu vrstvených skel pomocí zjednodušené metody, zahrnující metodu efektivních tlouštěk, viz vzorce (5.3) a (5.4). Na grafech níže, tedy 5.1 až 5.6, jsou vyneseny závislosti síly na napětí pro různé součinitele přenosu sil ω v porovnání s provedenými experimenty pro jednotlivé druhy použité mezivrstvy (PVB) a rychlosti zatěžování. Součinitel přenosu smykových sil je brán od $\omega = 0$, kdy se spolupůsobení jednotlivých vrstev zanedbává až po $\omega = 1$ pro úplné spolupůsobení vrstev, dle prEN 16612 [1].

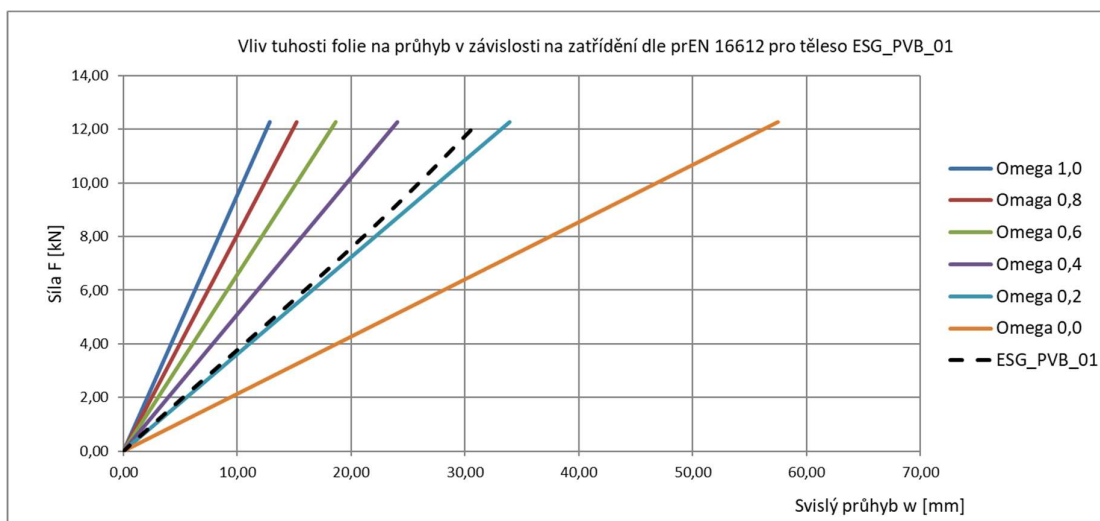
Pro porovnání s analytickým modelem dle prEN 16612 [1] byly použity experimenty z kap. 4 provedené na tabulích vrstveného skla o rozměrech 1100 x 360 mm, které byly zatěžovány dle ČSN EN 1288–3, [15]. Vynesením výsledků pro experimentálně odzkoušené skleněné tabule do grafů pro vliv normálového napětí v závislosti na zatížení a vliv průhybů v závislosti na zatížení, dostáváme téměř lineární průběh křivky. Pomocí tohoto průběhu křivky dokážeme k tělesu přiřadit součinitel přenosu smykových sil.

Na grafu 5.1 je znázorněna závislost normálového napětí na síle pro těleso č.1, které bylo zatěžováno rychlostí 2 mm/min. Křivka tohoto průběhu je shodná s křivkou zobrazující součinitele přenosu smykových sil $\omega = 0,2$. Graf 5.2 zobrazuje závislost deformací na zatížení také pro těleso č.1. Jeho průběh je mírně nad křivkou pro $\omega = 0,2$. Z těchto grafů je tedy patrné, že pro návrh vrstveného skla se

shodnou PVB fólií jako při experimentálních zkouškách a zatížením tabule rychlostí 2 mm/min je podle parametrické studie vhodné volit do výpočtu pro návrh vrstvených skel součinitele přenosu smykových sil $\omega = 0,2$.

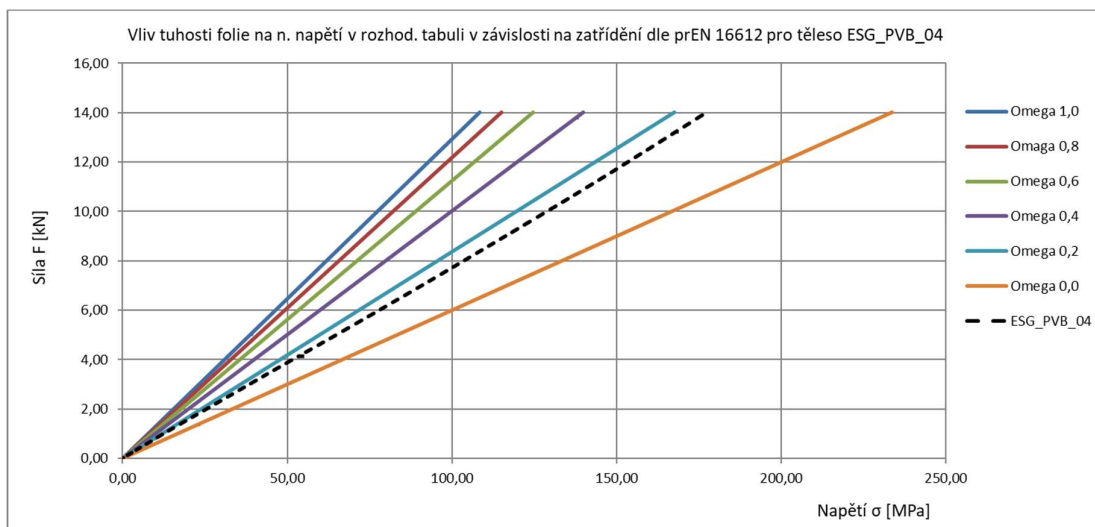


Graf 5.1: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_01 zatěžováno rychlostí 2 mm/min

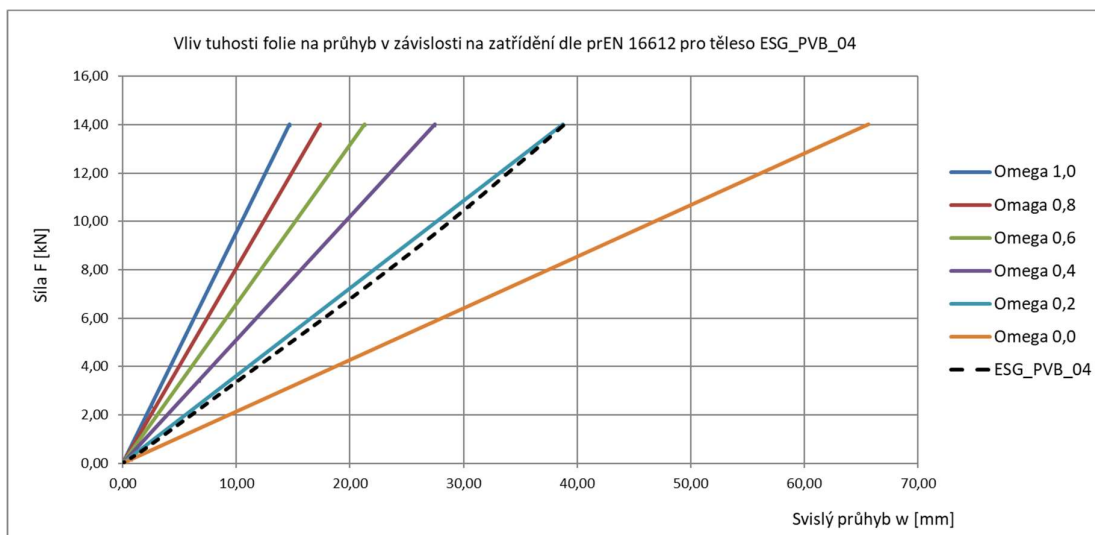


Graf 5.2: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_01 zatěžováno rychlostí 2 mm/min

Pro těleso č.4, zatěžované rychlostí 0,5 mm/min je křivka normálového napětí v závislosti na zatížení zobrazena na *grafu 5.3*. Závislost průběhu svislé deformace na síle je na *grafu 5.4*. U obou grafů se průběh pro těleso č.4 nachází mezi $\omega = 0,2$ a $\omega = 0$. Pomocí parametrické studie se tedy součinitel přenosu smykových sil, pro těleso č.4 pohybuje v rozmezí od 0 do 0,2.

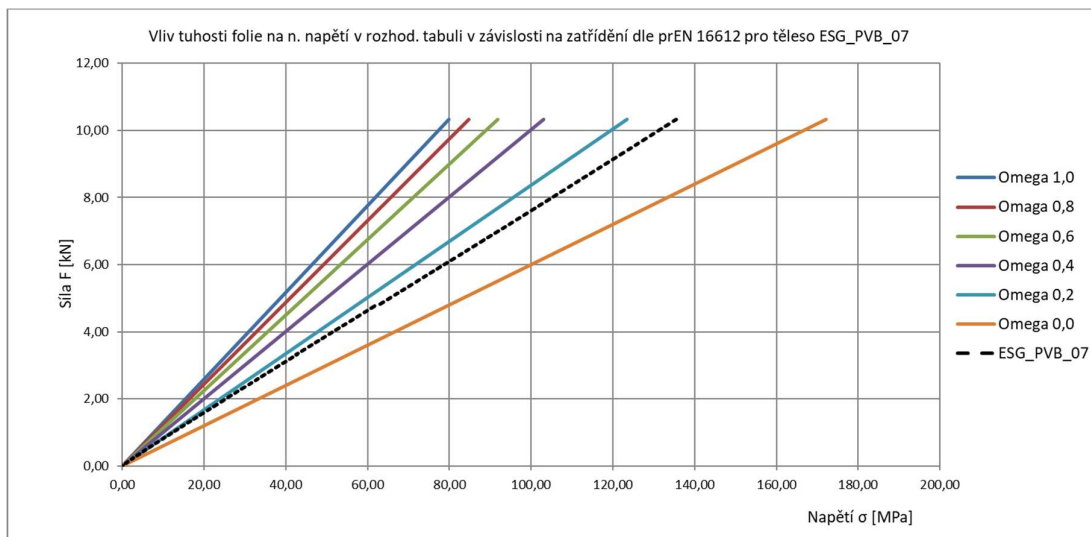


Graf 5.3: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_04 zatěžováno rychlostí 0,5 mm/min

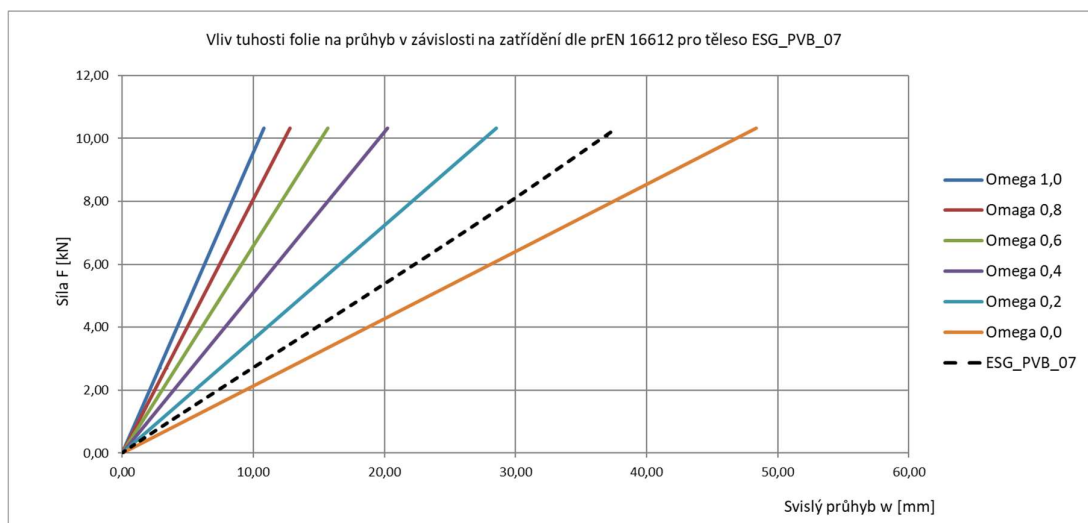


Graf 5.4: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatížení pro těleso PVB_ESG_04 zatěžováno rychlostí 0,5 mm/min

Pro poslední nejpomalejší zatěžování 0,125 mm/min u tělesa č.7 se křivky na grafech 5.5 a 5.6 pohybují také v rozmezí $\omega = 0,2$ až $\omega = 0$. Jejich průběh se nejvíce blíží součiniteli přenosu smykových sil $\omega = 0,1$.



Graf 5.5: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_07 zatěžováno rychlostí 0,125 mm/min



Graf 5.6: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatřídění pro těleso PVB_ESG_07 zatěžováno rychlostí 0,125 mm/min

Výše uvedená parametrická studie dokazuje, že závislost smykového modulu fólie G , který ovlivňuje spolupůsobení jednotlivých vrstev u vrstvených skel, závisí na délce trvání zatížení. Tělesa zatěžovaná nejrychlejší rychlostí (2 mm/min) podle parametrické studie vykazují větší míru spolupůsobení jednotlivých vrstev než u těles zatěžovaných nejpomaleji, tedy 0,125 mm/min.

5.4 Analytický výpočet vrstvených skel s PVB fólií

Na základě metody účinné tloušťky dle prEN 16612, [1], byly provedeny analytické výpočty vrstvené desky: v mezním stavu únosnosti a mezním stavu použitelnosti. Geometrický tvar a statické schéma navržené desky z vrstveného skla odpovídaly zkušebním tělesům popsáním v kapitole 4.3 a *tab. 5.2*. Vypočtené napětí a deformace z analytického modelu sloužily k porovnání s výsledky experimentů a numerickým modelem.

Tab. 5.2: Vstupní údaje pro analytický výpočet

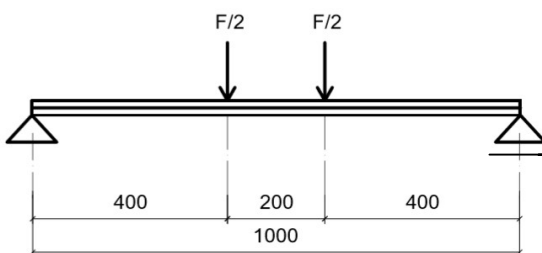
<u>Geometrické charakteristiky nosníku</u>		
Vzdálenost podpor	1 000	mm
Vzdálenost působících sil	200	mm
Vzdálenost působící síly od podpory	400	mm
Šířka tabule	360	mm
Tloušťka tabule	10	mm
Tloušťka souvrství	20,76	mm
Tloušťka folie	0,76	mm
Vzd. těžiště tabule od těžiště souvrství	5,38	mm
<u>Materiálové vlastnosti tepelně tvrzeného skla</u>		
Pevnost v tahu $f_{b,k}$	120	MPa
Modul pružnosti E	70 000	MPa

Nejprve se určí návrhová pevnost skla $f_{g,d}$ podle vztahu (2.6)

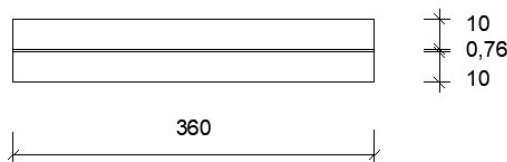
$$f_{g,d} = \frac{0,85 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0 \times (120 - 4)}{1,2}$$

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

Statické schéma řešené desky z vrstveného skla je znázorněno na *obr. 5.2* a na *obr. 5.3* jsou znázorněny rozměry souvrství skleněné tabule v příčném řezu.



Obr. 5.2: Statické schéma



Obr. 5.3: Rozměry tabule v příčném řezu

Pro výpočet efektivních tloušťek stanovíme součinitele přenosu smykových sil pro fólii PVB dle *tab. 5.1*, použité zatížení - normální provoz, pak $\omega = 0,1$ [-]. Účinná tloušťka pro výpočet deformace se stanoví ze vztahu (5.3) jako

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

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

a pro výpočet napětí se účinná tloušťka stanoví ze vztahu (5.4), tedy

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

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

Do obou vzorců pro výpočet efektivní tloušťky byla za součinitele smykových sil dosazována hodnota $\omega = 0,1$ [-]. Tato hodnota se určila podle *tab. 5.1*. Použitím PVB fólie se součinitel smykových sil řadí do Třídy 2. Zatížení zde bylo zvoleno jako užité zatížení s normálním provozem.

V prvním mezním stavu, tedy mezním stavu únosnosti, se maximální napětí určí jako

$$\sigma_{max} = \frac{M_y}{W_y}, \quad (5.5)$$

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].

Průřezový modul souvrství se stanoví z efektivní tloušťky pro dané statické schéma jako

$$W_y = \frac{1}{6} b h_{ef,\sigma}^2 \quad (5.6)$$

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

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

Výpočet maximálního momentu se se zde určí

$$M_y = \frac{F_{Ed}}{2} c \quad (5.7)$$

kde, F_{Ed} je celkové návrhové zatížení nosníku [N],

c vzdálenost podpory od působící síly [mm], $c = 400$ mm.

V této vzdálenosti, která zde je 400 mm, se podle průběhu momentů na nosníku zatěžovaném čtyřbodovým ohybem nachází maximální moment. Jelikož zatížení na nosník působí ve dvou bodech, celkové zatížení je rozděleno na dvě totožné síly viz obr. 5.2.

Použitím rovnic (5.5) a (5.7) a následném dosazení vypočteme maximální návrhovou sílu F_{Ed} , kterou je skleněný nosník na obr. 5.2 schopen přenést. Rovnici pokládáme rovnu hodnotě návrhové pevnosti $f_{g,d}$ spočtenou ze vztahu (2.6), tedy $f_{g,d} = 84,75 \text{ MPa}$.

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

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

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

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

$$F_{Ed} \leq 6 \, 187,43 \, N \sim 6,19 \, kN$$

Po dosazení návrhové pevnosti $f_{g,d}$ dostáváme maximální návrhovou sílu F_{Ed} , která může být menší nebo rovna $6,19 \, kN$. Síla $\frac{F_{Ed}}{2}$, tedy síla, která na nosník působí ve dvou místech podle statického schématu na *obr. 5.2*, je rovna $3,09 \, kN$. Tato síla je tedy maximální možnou návrhovou silou, která může na nosník působit v mezním stavu únosnosti, aniž by došlo k jeho porušení. Po překročení této síly dochází podle zjednodušené metody popsané v prEN 16612 [1] k překročení maximálního napětí σ_{max} .

V druhém mezním stavu (mezní stav použitelnosti), posuzujeme svistou deformaci. Pro její výpočet použijeme efektivní tloušťku desky stanovenou podle vztahu (5.3). Moment setrvačnosti I_y pro monolitickou desku o efektivní tloušťce a šířce $b = 360 \, mm$ se pak určí jako

$$I_y = \frac{1}{12} b h_{ef.w}^3 \quad (5.8)$$

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

$$I_y = 80 \, 839,97 \, mm^4$$

Následně vztah pro maximální průhyb desky je

$$w_{max} = \frac{\frac{F_{Ek}}{2} c}{24 E I_y} \times (3l^2 - 4c^2) \quad (5.9)$$

kde, F_{Ek} je celkové zatížení nosníku [N] od charakteristického zatížení,
 c vzdálenost podpory od působící síly [mm], viz. obr. 5.2,
 E modul pružnosti [MPa],
 l vzdálenost podpor [mm], viz. obr. 5.2.

Podmínkou mezního stavu použitelnosti je limitní průhyb w_d , který musí být menší než průhyb maximální. Limitní průhyb u vrstvených skel je stanoven jako

$$w_d = \frac{l}{250} \quad (5.10)$$

kde, l je vzdálenost podpor [mm].

Pro vypočtení maximální síly od charakteristického zatížení, které na nosník smí působit, aniž by došlo k překročení limitního průhybu musí být splněna podmínka (5.2). Po dosazení do vzorce (5.2) dostáváme

$$\frac{\frac{F_{Ek}}{2} c}{24 E I_y} \times (3l^2 - 4c^2) \leq \frac{l}{250}$$

$$\frac{\frac{F_{Ek}}{2} c}{24 E I_y} \leq \frac{l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)}$$

$$\frac{F_{Ek} \times c}{2} \leq \frac{24 E I_y l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)}$$

$$F_{Ek} \leq \frac{24 E I_y l}{250 \times (3l^2 - 4c^2)} \times 2$$

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

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

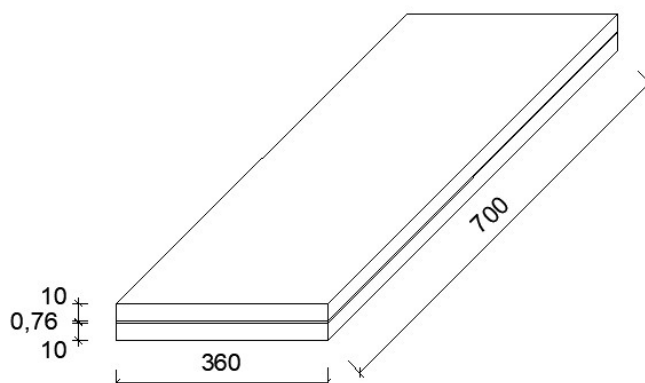
Maximální síla, která na nosník z dvouvrstvého skla při výpočtu mezního stavu použitelnosti může bez jeho porušení působit, musí být menší nebo rovna 1,15 kN, dle postupu uvedeném v prEN 16612, [1].

6 NUMERICKÝ MODEL – RFEM

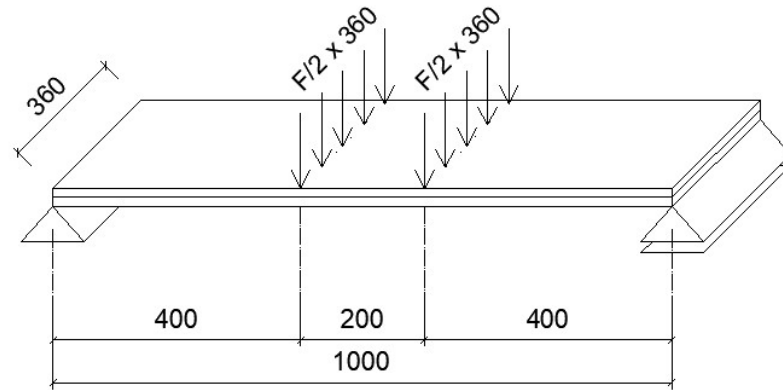
6.1 Popis

Poslední metodou návrhu vrstvených skel, která je v této práci popsána, je návrh pomocí softwaru Dlubal RFEM 5.11. Pro návrh je důležité sestavení numerického modelu, správné zadání vstupních údajů a mechanických vlastností materiálu.

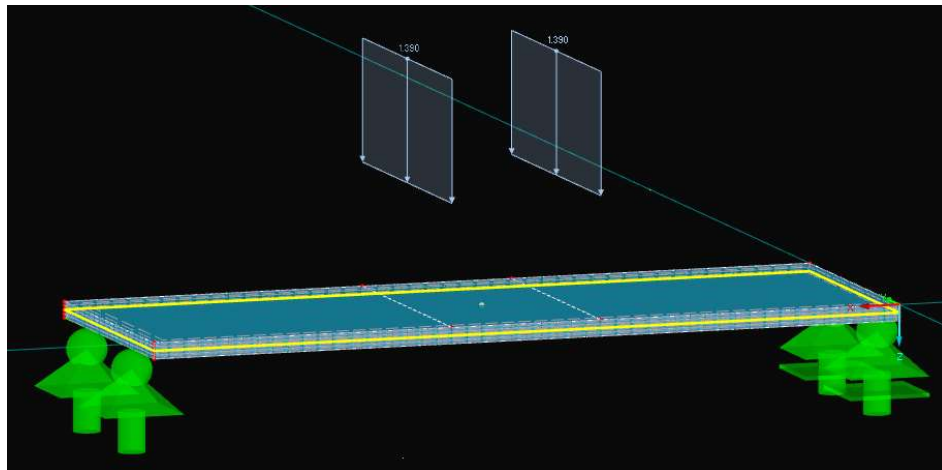
Vstupní data pro sestavení numerického modelu, tedy rozměry tabulí dvouvrstvého skla a fólie jsou stejné jako u návrhu pomocí analytického výpočtu a reálného zatěžování při experimentálních zkouškách pro možnost následného porovnání metod. Rozměry tabulí byly 1 000 x 360 x 10 mm, rozměry fólie byly 1 000 x 360 x 0,76 mm, byly použity materiálové vlastnosti fólie odpovídající PVB fólii - Trosifol použité při experimentálních zkouškách. Rozměry celého souvrství jsou znázorněny na *obr. 6.1*. Namodelované podpory byly liniové, podepření tabule vrstveného skla bylo po dvou kratších stranách. Dosazované zatížení bylo také liniové, ve dvou místech jako při prostém čtyřbodovém ohybu, vždy 400 mm od podpory. Schéma podepření a zatížení je zobrazeno na *obr. 6.2*. *Obr. 6.3* znázorňuje již zkonstruovaný numerický model v softwaru Dlubal RFEM 5.11.



Obr. 6.1: Rozměry vrstveného skla a fólie



Obr. 6.2: Schéma zobrazující rozmístění podpor a zatížení



Obr. 6.3: Numerický model v programu Dlubal RFEM 5.11

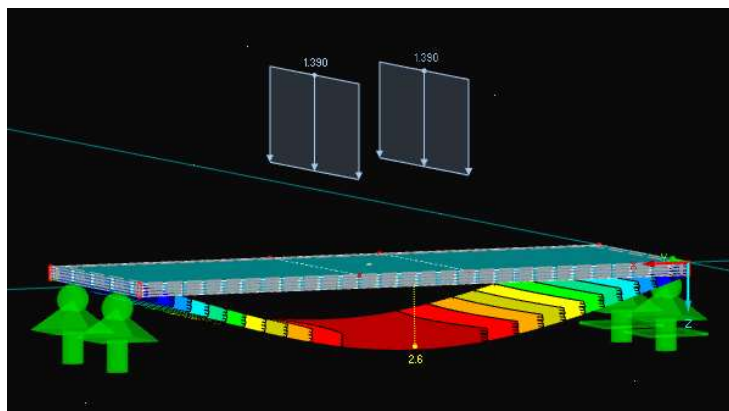
Pro správnost výpočtu pomocí softwaru Dlubal RFEM je důležité použití správného smykového modulu fólie G. Smykový modul fólie byl převzat z výsledků smykových zkoušek, které se konaly v Kloknerově ústavu ČVUT. Použité smykové moduly byly celkem tři z důvodů celkem tří rychlostí zatěžování. Rychlosti zatěžování byly 2 mm/min, 0,5 mm/min, 0,125 mm/min. Použitím těchto tří smykových modulů zavádíme do výpočtu vliv rychlosti, tedy dobu trvání zatížení. Čím rychleji zatěžujeme, tím vyšší je smykový modul fólie G. Smykové moduly G jsou uvedeny v *tab. 6.1*.

Tab. 6.1: Hodnoty smykového modulu fólie G pro různé rychlosti

Vstupní údaje			
Rychlost zatěžování [mm/min]	2	0,5	0,125
Smykový modul fólie G [MPa]	1,7	1,09	0,8

6.2 Shrnutí výsledků pro výpočet pomocí softwaru Dlubal RFEM

Pomocí postupného dosazování zatížení působícího na namodelované vrstvené sklo bylo možné zjistit průběh deformací a normálových napětí vzniklých na tomto nosníku. Taktéž bylo zjištěno maximální možné zatížení, které může na nosník působit při dosažení limitního průhybu. Mimo maximálního zatížení byly zjištěny i maximální deformace a normálová napětí. Na obr. 6.4 je znázorněno vykreslení průhybů na nosníku pomocí programu Dlubal RFEM 5.11.



Obr. 6.4: Vykreslení průhybů pomocí softwaru Dlubal RFEM 5.11

Pro smykový modul fólie $G = 1,7$ MPa, tedy pro rychlost 2 mm/min bylo softwarem spočítáno maximální normálové napětí 74,65 MPa, maximální průhyb 14,3 mm při celkovém zatížení $F = 7$ kN. Celý průběh zatěžování je znázorněn v tab. 6.2.

Tab. 6.2: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 1,7 \text{ MPa}$

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 dosažení smykového modulu fólie $G = 1,09 \text{ MPa}$, pro rychlost $0,5 \text{ mm/min}$ bylo softwarem vypočteno maximální normálové napětí $69,22 \text{ MPa}$ a maximální průhyb $14,3 \text{ mm}$ při celkovém zatížení $F = 6 \text{ kN}$. Celý průběh zatěžování je znázorněn v tab. 6.3.

Tab. 6.3: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 1,09 \text{ MPa}$

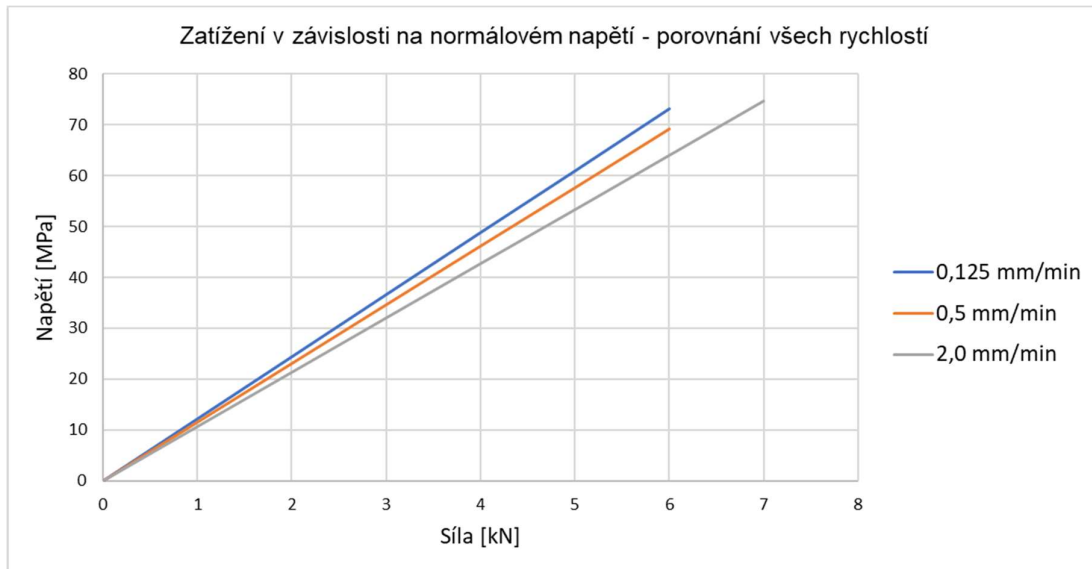
Celkové zatížení F	Síla F/2	Liniové zatížení	Napětí		Průhyb
			max	min	
[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[mm]
0	0	0	0	0	0
1	0,5	1,39	11,55	-11,75	2,4
2	1	2,78	23,10	-23,50	4,8
3	1,5	4,17	34,65	-35,25	7,2
4	2	5,56	46,20	-47,00	9,5
5	2,5	6,94	57,67	-58,67	11,9
6	3	8,33	69,22	-70,42	14,3

Dosažením smykového modulu fólie $G = 0,8 \text{ MPa}$, pro rychlost $0,125 \text{ mm/min}$ bylo programem Dlubal RFEM 5.11 spočítáno maximální normálové napětí $73,24 \text{ MPa}$, maximální průhyb $15,9 \text{ mm}$ při celkovém zatížení $F = 6 \text{ kN}$. Celý průběh zatěžování je znázorněn v tab. 6.4.

Tab. 6.4: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 0,8 \text{ MPa}$

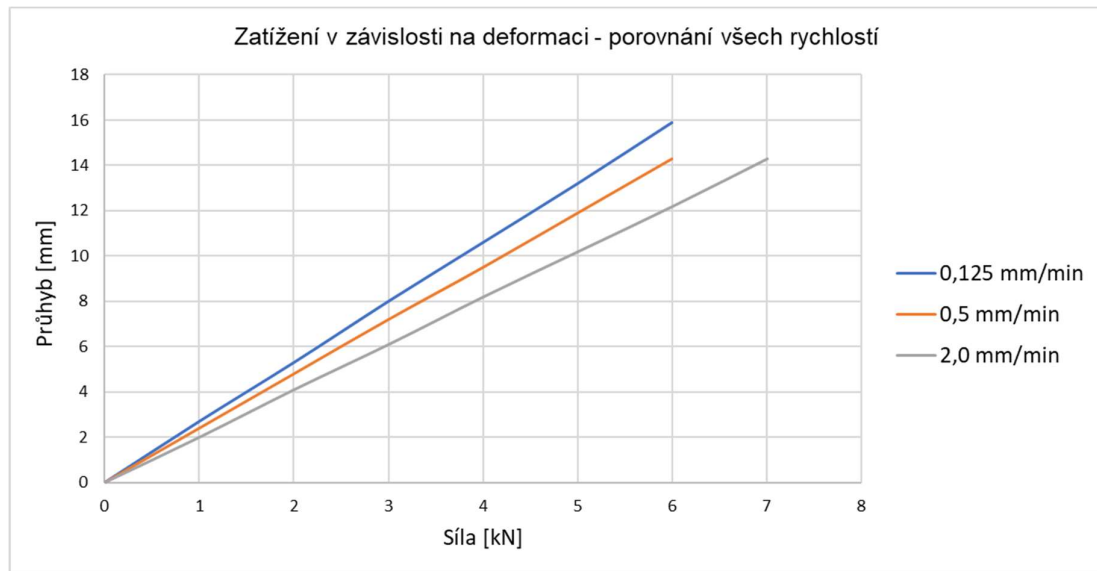
Celkové zatížení F	Síla F/2	Liniové zatížení	Napětí		Průhyb
			max	min	
[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[mm]
0	0	0	0	0	0
1	0,5	1,39	12,22	-12,43	2,7
2	1	2,78	24,44	-24,87	5,3
3	1,5	4,17	36,67	-37,3	8
4	2	5,56	48,89	-49,74	10,6
5	2,5	6,94	61,02	-62,08	13,2
6	3	8,33	73,24	-74,51	15,9

Na *grafu 6.1* je znázorněn průběh normálového napětí v závislosti na zatížení pro všechny tři smykové moduly fólie G, viz. *tab. 6.1*. Křivka popisující průběh s dosazeným smykovým modulem $G = 1,7 \text{ MPa}$, pro nejrychlejší rychlost 2 mm/min , je nejméně strmá, tedy nižší hodnoty normálového napětí při daném zatížení než u ostatních dvou křivek. Čím vyšší je smykový modul fólie (vyšší rychlost zatížení), tím menší je celkový průběh normálového napětí.



Graf 6.1: Průběh zatížení v závislosti na normálovém napětí pro rychlosti 0,125 mm/min, 0,5 mm/min a 2 mm/min

Graf 6.2 znázorňuje průběh deformací v závislosti na působícím zatížení pro tři smykové moduly, tedy pro tři rychlosti zatížení. Křivka pro smykový modul fólie $G = 1,7 \text{ MPa}$ (rychlost 2 mm/min) ukazuje celkově nejmenší průběhy průhybů, které na skleněném nosníku vznikly. Čím je vyšší hodnota smykového modulu fólie, tím menší deformace vlivem zatížení na skleněné tabuli vznikají.



Graf 6.2: Průběh zatížení v závislosti na deformaci pro rychlosti $0,125 \text{ mm/min}$, $0,5 \text{ mm/min}$ a 2 mm/min

7 POROVNÁNÍ

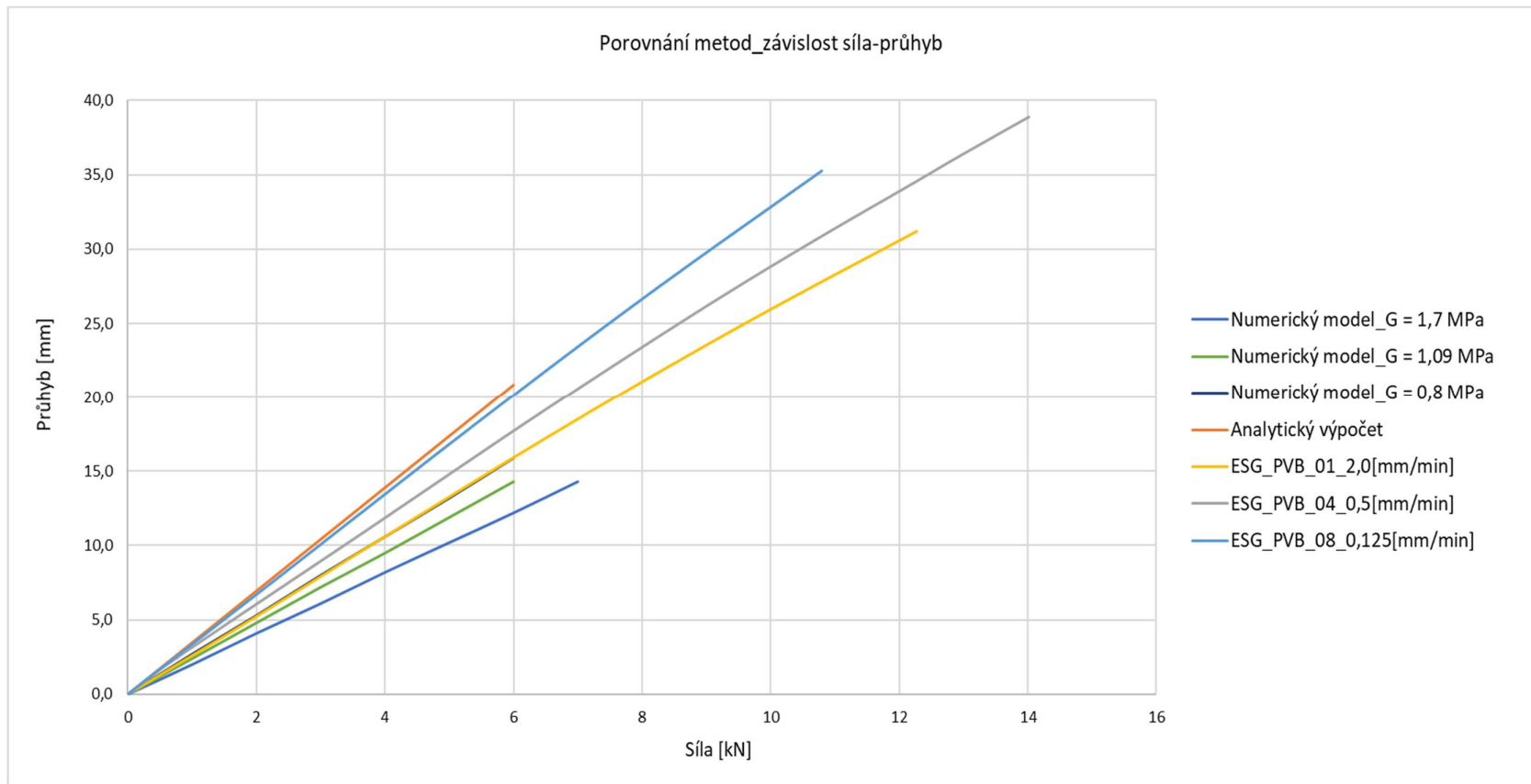
Návrh vrstvených skel byl v této práci proveden pomocí několika metod. Jako první byl použit analytický výpočet následně byl sestaven numerický model v softwaru Dlubal RFEM a dále byly obě metody porovnány s reálným působením vrstvených skel, *graf 7.1, 7.2*, které bylo zjištěno při experimentálních zkouškách.

Pomocí analytického výpočtu vrstvených skel, který je popsán v prEN 16612 [1] jako metoda efektivní tloušťky, se stanovila maximální možná návrhová síla, která na skleněný nosník může působit, aniž by došlo k překročení podmínky v MSÚ navrhované tabule skla. Dopočítáním maximálního možného normálového napětí a deformací dostáváme křivky těchto dvou veličin závislé na síle, viz *graf 7.1, 7.2*.

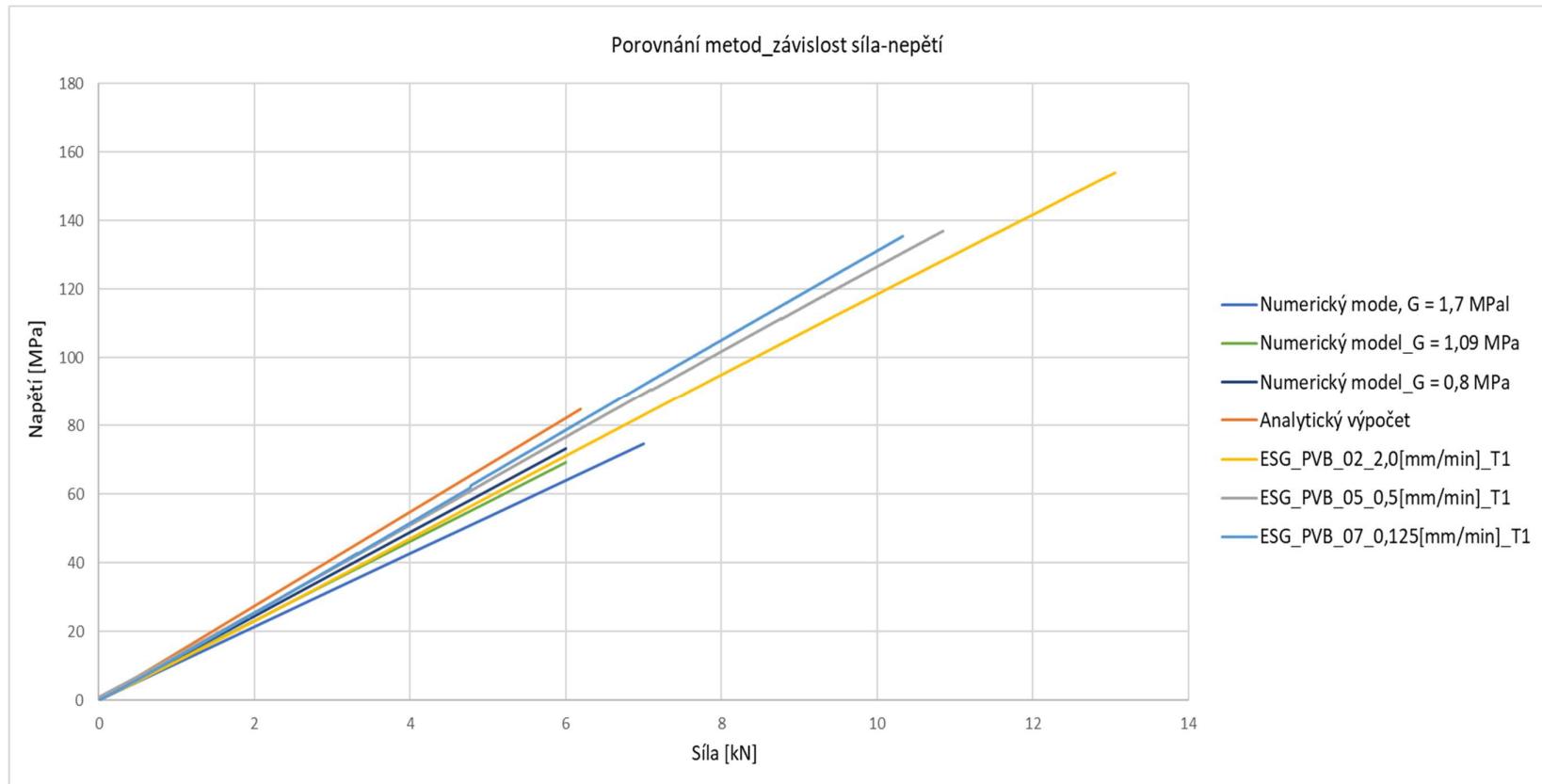
U druhé metody návrhu vrstvených skel pomocí softwaru jsme dosazováním tří různých smykových modulů G , každý pro jinou rychlost, viz *tab. 6.1*, dostali celkem tři křivky s průběhem deformací a normálových napětí závislých na síle, viz *graf 7.1, 7.2*.

Graf 7.1 zobrazuje výsledné průběhy křivek závislosti síly na průhybu. Tyto křivky byly stanoveny pomocí analytického výpočtu, softwaru Dlubal RFEM a pomocí získaných dat z experimentálních zkoušek pro tři tělesa č. 1, 4, 8, každé těleso zatěžováno jinou rychlostí. Z *grafu 7.1* je patrné, že analytickým výpočtem je návrh vrstvených skel konzervativní, tedy bezpečný, ale z ekonomického hlediska nevýhodný. Výpočtem pomocí numerického modelu sestaveného v softwaru se výsledné křivky blíží reálnému, experimentálně změřenému průběhu deformací. Podmínkou sestavení numerického modelu je však správné zadání materiálových vlastností, konkrétně smykového modulu použité fólie G .

Na *grafu 7.2* jsou opět znázorněny výsledky tří metod návrhu vrstvených skel pomocí závislosti normálového napětí na postupném zatěžování. Experimentální výsledky jsou popsány na tělesech č. 2, 5, 7. I zde je patrný konzervativní návrh pomocí analytického výpočtu a přesnější průběh normálového napětí získaného ze statického výpočtu ze softwaru. Jak pro získání průběhu deformací, tak pro normálové napětí ze statického programu je důležité dosazení správných materiálových vlastností PVB fólie.



Graf 7.1: Závislost průběhu deformací na zatížení pro analytický výpočet, software Dlubal RFEM a experimentální zkoušky



Graf 7.2: Závislost průběhu normálových napětí na zatížení pro analytický výpočet, software Dlubal RFEM a experimentální zkoušky

8 ZÁVĚR

Pro návrh vrstvených skel, konkrétně návrh dvouvrstvého skla s transparentní mezivrstvou z PVB fólie – Trosifol, o rozměrech tabule skla 1000 x 360 x 10 mm a rozměrech fólie 1000 x 360 x 0,76 mm, byly použity a následně porovnány tři způsoby návrhu. Prvním z nich byla zjednodušená metoda, tedy analytický výpočet podle prEN 16612 [1], dále návrh v softwaru Dlubal RFEM 5.11, který spočívá ve správném sestavení numerického modelu, a jako poslední bylo zjištěno chování vrstvených skel pomocí experimentálních zkoušek.

Experimentální výzkum prokázal vliv rychlosti zatěžování na přerozdělení napětí a deformací u vrstvených skel, viz *graf 7.1, 7.2*. Smykový modul fólie G je závislý na rychlosti a době trvání zatížení. Čím vyšší rychlost zatížení tím je i smykový modul G viskoelastického materiálu větší, vznikají tedy nižší normálové napětí ve skle a menší deformace.

Návrh nosných vrstvených skel pomocí analytického výpočtu je z porovnání na *grafu 7.1 a 7.2* velice konzervativní. K použití této metody návrhu vede nedostupnost materiálových charakteristik běžně používaných polymerních fólií. Touto metodou je návrh vrstvených skel sice bezpečný, ale neekonomický.

Pro ekonomický návrh je vhodnější použití numerického modelu sestaveného ve statickém programu. Zde je třeba znát závislost smykového modulu G na teplotě a rychlosti zatížení použité fólie. Tyto materiálové vlastnosti je třeba stanovit experimentálně pro konkrétní použitou PVB fólii. V současné době však tyto údaje nejsou odborné veřejnosti k dispozici.

9 LITERATURA

- [1] *Draft prEN 16612: Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing*. CEN. Brussels, 2013.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] WURM, Jan. *Glass structures: Design and construction of self-supporting skins*. Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2007. ISBN 978-3-7643-7608-6.
- [5] 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.
- [6] *Kalení skla* [online]. Lanškroun: Sklenářství Šulák, 2015 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.sklenarstvisulak.cz/>
- [7] *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>
- [8] *Glass* [online]. Europe: AGC Glass Europe, 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.agc-yourglass.com>
- [9] *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>
- [10] *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>
- [11] JIRÁNEK, Tomáš. *Studium degradace měkčeného PVB*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Dagmar Měřinská, Ph.D.
- [12] *Draft prEN 16613: Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Determination of interlayer mechanical properties*. CEN. Brussels, 2013.
- [13] PIŠTĚK, David. *Studium možné technologie k přepracování rekuperované PVB fólie*. Zlín, 2017. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [14] MLEZIVA, Jaroslav. *Polymery*. 2. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 8085920727.

- [15] 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.

10 SEZNAM PŘÍLOH

příloha A.

FOLIE PVB TROSIFOL BG R20

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	± 12	μm	Test method PAPB002 DIN EN ISO 4287		
Moisture content > Certificate <	0,45	$\pm 0,07$	%	Test method PAPB003 (IR - Measurement)		
Pummel test > Certificate <	≥ 6			Test method PAPB004 based auf 2mm float glass		
Compressive Shear Strength > Certificate <	0,76mm 1,14mm 1,52mm	$\geq 16,0$ $\geq 15,0$ $\geq 14,0$	N/mm ²	Test method PAPB007 based auf 2mm float glass		
Shrinkage MD > Certificate <	$\leq 2,0$				%	Test method PAPB005 at 20°C and 10 min. storage

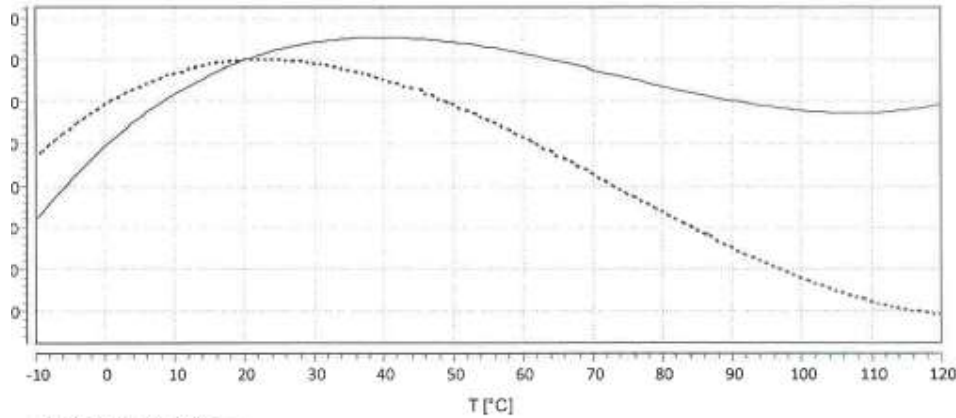
QM TROSIFOL
Rev. 04.2008

příloha B.
POUŽITÉ TENZOMETRY

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 %		Folienis Foil lot Lot de la feuille	A413/16
0.0 %		Herstellungsjahr Production batch Lot de fabrication	812074771
Material: Ferritstahl mit pensation: steel with température: acier avec	$\alpha = 10.8 [10^{-6} / K]$	Max. effekt. Brückenverspannung max. ms bridge excitation voltage tension d'alim. de pont maxi eff.	13.0 V

Daten / Data / Données 

RoHS 



Curve 1 Curve 2 —

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

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 production batch number.

étiqes techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes les demandes, précisez 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 (dimensionsless)

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Postup výroby plaveného skla [5].....	10
Obr. 2.2: Porovnání pracovních diagramů skla, oceli a dřeva [5].....	12
Obr. 2.3: Postup výroby tepelně tvrzeného skla (kaleného) [5].....	14
Obr. 2.4: Výsledné rozložení průběhu napětí po průřezu [5].....	15
Obr. 2.5: Rozložení napětí po průřezu tepelně zpevněného skla [5].....	17
Obr. 3.1: Popis vrstev u dvouvrstvého skla [11].....	18
Obr. 3.2: Rozložení napětí po průřezu tepelně zpevněného skla [5].....	19
Obr. 3.3: Závislost smykového modulu G na teplotě a době trvání zatížení u PVB fólie [1].....	21
Obr. 3.4: Průběh napětí v závislosti na velikosti modulu ve smyku fólie, dvouvrstvé sklo [1].....	21
Obr. 5.1: Značení vrstveného skla [1].....	37
Obr. 5.2: Statické schéma.....	43
Obr. 5.3: Rozměry tabule v příčném řezu.....	43
Obr. 6.1: Rozměry vrstveného skla a fólie.....	48
Obr. 6.2: Schéma zobrazující rozmístění podpor a zatížení.....	49
Obr. 6.3: Numerický model v programu Dlubal RFEM 5.11.....	49
Obr. 6.4: Vykreslení průhybů pomocí softwaru Dlubal RFEM 5.11.....	50

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Materiálové vlastnosti plaveného skla [5].....	11
Tab. 2.2: Modifikační součinitel k_{mod} [1].....	13
Tab. 2.3: Součinitel povrchové úpravy skla k_{sp} [1].....	13
Tab. 2.4: Dílčí součinitel pevnosti skla γ_M [1].....	14
Tab. 2.5: Charakteristické pevnosti upravovaných skel $f_{b,k}$ [1].....	16
Tab. 2.6: Součinitel zpevnění k_v [1]	16
Tab. 4.1: Rychlosti zatěžování jednotlivých skel	28
Tab. 4.2: Maximální normálová napětí pro tělesa ESG_PVB_1 – 9 a maximální působící zatížení	35
Tab. 4.3: Maximální naměřené hodnoty průhybů pro tělesa ESG_PVB_1 – 9 v čase	35
Tab. 5.1: Součinitel přenosu smykových sil [1].....	37
Tab. 5.2: Vstupní údaje pro analytický výpočet	42
Tab. 6.1: Hodnoty smykového modulu fólie G pro různé rychlosti	50
Tab. 6.2: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 1,7$ MPa.....	51
Tab. 6.3: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 1,09$ MPa.....	51
Tab. 6.4: Výsledky normálového napětí a průhybu ze softwaru Dlubal RFEM za použití smykového modulu fólie $G = 0,8$ MPa.....	52

13 SEZNAM GRAFŮ

Graf 4.1: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 3,6,9, tenzometr č.1	29
Graf 4.2: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 3,6,9, tenzometr č.2	30
Graf 4.3: Průběh normálového napětí v závislosti na síle pro tělesa 1,4,7, tenzometr č.3	30
Graf 4.4: Průběh deformací v závislosti na síle pro tělesa 2,5,7	31
Graf 4.5: Průběh deformací v závislosti na síle pro tělesa 1,4,8	31
Graf 4.6: Závislost působícího zatížení v čase pro tělesa 1,4,7	32
Graf 4.7: Závislost působícího zatížení v čase pro tělesa 2,5,8	32
Graf 4.8: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č.1 pro tělesa 3,6,9	33
Graf 4.9: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č.2 pro tělesa 2,5,8	33
Graf 4.10: Závislost doby trvání zatížení na napětí změřeném tenzometrem č.3 pro tělesa 1,4,7	34
Graf 5.1: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_01 zatěžováno rychlostí 2 mm/min	39
Graf 5.2: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatížení pro těleso PVB_ESG_01 zatěžováno rychlostí 2 mm/min.....	39
Graf 5.3: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_04 zatěžováno rychlostí 0,5 mm/min	40
Graf 5.4: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatížení pro těleso PVB_ESG_04 zatěžováno rychlostí 0,5 mm/min.....	40
Graf 5.5: Vliv tuhosti fólie na normálové napětí v závislosti na zatřídění pro těleso ESG_PVB_04 zatěžováno rychlostí 0,125 mm/min	41
Graf 5.6: Vliv tuhosti fólie na průhyb v závislosti na zatížení pro těleso PVB_ESG_04 zatěžováno rychlostí 0,125 mm/min.....	41
Graf 6.1: Průběh zatížení v závislosti na normálovém napětí pro rychlosti 0,125 mm/min, 0,5 mm/min a 2 mm/min	53
Graf 6.2: Průběh zatížení v závislosti na deformaci pro rychlosti 0,125 mm/min, 0,5 mm/min a 2 mm/min	54
Graf 7.1: Závislost průběhu deformací na zatížení pro analytický výpočet, software Dlubal RFEM a experimentální zkoušky	56
Graf 7.2: Závislost průběhu normálových napětí na zatížení pro analytický výpočet, software Dlubal RFEM a experimentální zkoušky.....	57