

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

Matej Frlan

Mehanske lastnosti lameliranega stekla

Diplomska naloga št.: 423

Mentor:
prof. dr. Roko Žarnić

Somentor:
David Antolinc

Ljubljana, 17. 6. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Matej Frlan izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Mehanske lastnosti lameliranega stekla«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 10.6.2011

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO ó DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLE EK

UDK:	624.012.6(043.2)
Avtor:	Matej Frlan
Mentor:	prof. dr. Roko fiarni , univ. dipl. infl grad.
Somentor:	David Antolinc, univ. dipl. infl grad.
Naslov:	Mehanske lastnosti lameliranega stekla
Obseg in oprema:	89 str., 24 pregl., 47 sl.
Ključne besede:	lamelirano steklo, osna tla na obremenitev, stekleni panel

Izve ek

Namen diplomske naloge je raziskati vertikalno osno tla no nosilnost steklenega panela v kombinaciji z lesom. Izhodi-e raziskav je ideja, da bi uporabili steklo kot del nosilne konstrukcije v stavbah. V laboratoriju Katedre za presku-anje materialov in konstrukcij na Fakulteti za gradbeni-tvo in geodezijo v Ljubljani smo izvedli tla ni preskus steklenega panela v naravni velikosti. fieleli smo ugotoviti kak-no nosilnost ima tak-en stekleni panel, kako se obna-a pod tla no obremenitvijo, do kak-nega uklona pride pri poru-itvi in kak-na je sama poru-itev. Glede na podatke iz literature smo pri akovali, da bo steklo preneslo velike tla ne obremenitve, problem pa je seveda njegova vitkost. Zaradi uklona pride na steklu do nateznih deformacij, ki jih pa slabo prena-a, saj ima steklo zelo majhno natezno trdnost.

V uvodnem delu te diplomske naloge je predstavljena zgodovina stekla, vrste in njihova pridelava ter dosedanji razvoj. Osredoto il sem se predvsem na stekla, ki se uporabljajo kot konstrukcijska, to so lamelirane in toplotno obdelane vrste stekla. Sledi kratek pregled pridelave in porabe stekla v gradbeni-tvu glede na svetovni trg ter pregled najve jih proizvajalcev stekla in njihovi trfni deleffi. Pred poglavjem o laboratorijskih preskusih so predstavljeni -e zadnji arhitekturni pogledi z nekaj primeri objektov, v katerih se je fle v preteklosti uporabilo steklo kot nosilni del konstrukcije. S tem poglavjem sem dal nekako tudi smisel na-im raziskavam, zato je primerno kot uvod v -esto poglavje, kjer so predstavljeni rezultati in ugotovitve vseh na-ih preskusov.

BIBLIOGRAPHIC ó DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.6(043.2)
Author: Matej Frlan
Supervisor: Prof. Ph. D. Roko fiarni , b. s. c. e.
Co-supervisor: David Antolinc, b. s. c. e.
Title: Mechanical properties of laminated glass
Notes: 89 p., 24 tab., 47 fig.
Key words: laminated glass, in plane compression load, glass panel

Abstract

The goal of this thesis is to research vertical in-plane compression load bearing capacity of a glass panel combined with wood. The basis of my research is the idea to use glass as a part of the load bearing construction of buildings. A test of in-plane compression of a life-sized glass panel has been carried out in the laboratory of Chair for material and construction testing at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. The aim was to determine the panel's load bearing capacity, its performance under in-plane compression force, what kind of bending occurs when failure happens and what the failure is like. Considering the information available in literature the glass is expected to withstand high in-plane compression force and that its slenderness is a problem. Since the glass has very low tensile strength the buckling of the compressed elements represents crucial failure mode because bending occur and as such tensile deformations.

In the first part of my thesis the history of glass, different types of glass and their production as well as existing development are described. I focused on the types of glass which are used in construction, namely laminated and heat-treated glass. This is followed by a presentation of glass production and its use in construction in the world market. It also includes a catalogue of the world's biggest glass producers and their market shares. Before thoroughly describing the laboratory test my thesis displays the newest architectural views using examples of buildings that have incorporated glass as a part of load bearing construction. As this chapter in a way gives meaning to my research it is appropriately placed as an introduction to the next one, which includes results and findings of our tests.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Roku fiarni u in somentorju Davidu Antolincu za strokovno pomo in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge. Zahvalil bi se tudi Franciju eponu za pomo v laboratoriju, ter Fakulteti za gradbeni-tvo iz Zagreba in podjetju Steklarstvo Marjan Frlan s.p. za finan no pomo in pomo pri pripravi presku-ancev.

Zahvale gredo tudi mojima star-ema, ki sta mi tekom -tudija nudila pomo in moralno podporo.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	LASTNOSTI KONSTRUKCIJSKEGA STEKLA	2
2.1	Zgodovina stekla	2
2.2	Vrste stekel	4
2.3	Stekleni proizvodi	12
2.4	Obdelava robov	13
2.5	Reciklafa stekla	15
3	LAMELIRANO STEKLO	17
3.1	Splo-no o lameliranem steklu	17
3.2	Razlika med PVB in EVA folijo	17
3.2.1	Tehni ne karakteristike PVB in EVA folije	19
3.2.2	Postopek lameliranja s PVB folijo	19
3.2.3	Postopek lameliranja z EVA folijo	21
3.3	Obstoje i standardi za lamelirano steklo	23
3.3.1	SIST EN ISO 12543:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo	23
3.3.2	SIST EN 14449:2005 Steklo v gradbeni-tvu ó Lepljeno steklo in lepljeno varnostno steklo ó Ovrednotenje skladnosti/standard za izdelek	24
4	PROIZVODNJA IN PORABA RAVNEGA STEKLA V GRADBENITMTVU NA SVETOVNEM TRGU	25
4.1	Svetovni trg ravnega stekla	25
4.2	Svetovni proizvajalci in njihovi trfni deleffi	27
4.3	Rast uporabe stekla v stavbah	29

5	POMEN LAMELIRANEGA STEKLA ZA SODOBNO ARHITEKTURO IN GRADBENI^TTVO	31
5.1	Primeri povsem prozornih paviljonov	33
6	LABORATORIJSKI PRESKUSI	37
6.1	Izvajanje visoko temperaturnega preskusa	38
6.2	Izvajanje vlafnostnega preskusa s kondenzacijo	42
6.3	Izvajanje upogibnega preskusa	45
6.3.1	Upogibni preskus enojnega ravnega stekla	45
6.3.2	Upogibni preskus lameliranega stekla	48
6.4	Izvajanje tla nega preskusa	56
6.4.1	Tla ni preskus stekla	56
6.4.2	Tla ni preskus stekla z naleganjem v lesenih leffi– ih zgoraj in spodaj, steklo pravokotno na lesena vlaka	61
6.4.3	Tla ni preskus stekla z naleganjem v lesenih leffi– ih zgoraj in spodaj, steklo vzporedno z lesenimi vlakni, cikli ni preskus	66
6.4.4	Tla ni preskus stekla z naleganjem v lesenih leffi– ih zgoraj in spodaj, steklo vzporedno z lesenimi vlakni, monotoni preskus	68
6.4.5	Tla ni preskus steklenega panela z naleganjem v lesenih leffi– ih zgoraj in spodaj	72
7	ZAKLJU EK	86
	VIRI	88

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemi na sestava stekla in njegove mehanske lastnosti	5
Preglednica 2: Tehni ne karakteristike EVASAFE in PVB folije	19
Preglednica 3: Poraba stekla v gradbeni-tvu glede na svetovni trg	26
Preglednica 4: Poraba stekla v avtomobilski industriji glede na svetovni trg	26
Preglednica 5: Rezultati upogibnega preskusa ravnega rezanega stekla	45
Preglednica 6: Rezultati upogibnega preskusa ravnega stekla z bru-enimi robovi	46
Preglednica 7: TM tevilo preskusnih vzorcev lameliranega stekla za upogib	48
Preglednica 8: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo	49
Preglednica 9: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVASAFE folijo	50
Preglednica 10: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo, predhodno	52
Preglednica 11: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVA folijo, predhodno	52
Preglednica 12: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo, predhodno	54
Preglednica 13: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVA folijo, predhodno	54
Preglednica 14: Rezultati povpre nih vrednosti zdrsov z_{max}	55
Preglednica 15: Rezultati tla nega preskusa samega stekla	57
Preglednica 16: Rezultati tla nega preskusa stekla pravokotno na lesena vlakna	63
Preglednica 17: Rezultati tla nega cikli nega preskusa stekla vzporedno na lesena vlakna	67
Preglednica 18: Rezultati tla nega preskusa stekla vzporedno na lesena vlakna	69
Preglednica 19: Rezultati sile P in pomika V_{skupni} za tla ni preskus steklenega panela	76
Preglednica 20: Rezultati sile P in uklona U za tla ni preskus steklenega panela	76
Preglednica 21: Deformacije prvega presku-anca pri P_{max} in P_{poru-}	79
Preglednica 22: Deformacije drugega presku-anca pri P_{max} in P_{poru-}	79
Preglednica 23: Deformacije tretjega presku-anca pri P_{max} in P_{poru-}	80
Preglednica 24: Primerjalne vrednosti deformacij pri poru-itvi vseh preskusov stekla	80

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Trdnost povezave EVA in PVB na različne materiale	18
Grafikon 2: Rezultati preizkusa odpornosti na vlažnost in toploto	18
Grafikon 3: Primerjava rasti indeksov realnega BDP in povpraševanja po steklu	25
Grafikon 4: Uporaba ravnega stekla po področjih na svetovnem trgu	26
Grafikon 5: TM Štirje največji proizvajalci visoko kakovostnega ravnega stekla na svetu	27
Grafikon 6: Svetovne kapacitete proizvajalcev visoko kakovostnega ravnega stekla	27
Grafikon 7: Prikaz porabe ravnega stekla v državi na svetovnem trgu	28
Grafikon 8: Prikaz sile P v odvisnosti od pomika V	46
Grafikon 9: Prikaz napetosti σ v odvisnosti od deformacij ϵ	47
Grafikon 10: Prikaz napetosti σ v odvisnosti od deformacij ϵ za preskušence lepljene z EVASAFE folijo in PVB folijo	50
Grafikon 11: Prikaz sile P v odvisnosti od pomika V	51
Grafikon 12: Prikaz napetosti σ v odvisnosti od deformacij ϵ za preskušence lepljene z EVASAFE in PVB folijo, predhodno preskušene z VTP	53
Grafikon 13: Prikaz zdrs z v odvisnosti od sile P za tlačni preskus lameliranega stekla	58
Grafikon 14: Prikaz deformacij ϵ v odvisnosti od napetosti σ za tlačni preskus lam. stekla	59
Grafikon 15: Prikaz uklon U v odvisnosti od napetosti σ za tlačni preskus	59
Grafikon 16: Prikaz sile P v odvisnosti od pomika V_{skupni} za tlačni preskus stekla z naleganjem pravokotno na vlakna v lesenem ležniku	63
Grafikon 17: Prikaz deformacij ϵ v odvisnosti od napetosti σ v steklu za preskusec 1, za tlačni preskus stekla z naleganjem pravokotno na vlakna v lesenem ležniku	64
Grafikon 18: Prikaz sile P v odvisnosti od pomika V_{skupni} pri cikličnem tlačnem preskusu stekla v kombinaciji z lesom	67
Grafikon 19: Sila P v odvisnosti od pomika V_{skupni} za monotoni tlačni preskus stekla z naleganjem vzporedno na lesena vlakna	69
Grafikon 20: Prikaz deformacij ϵ v odvisnosti od napetosti σ za Preskusec 1 pri tlačnem preskusu stekla vzporedno z lesenimi vlakni	70
Grafikon 21: časovni potek enakomernega obremenjevanja in razbremenjevanja tretjega preskušanca, sila P v odvisnosti od časa t	75
Grafikon 22: Sila P v odvisnosti od pomika V_{skupni} pri tlačnem preskusu steklenega panela	77

Grafikon 23: Sila P v odvisnosti od uklona U_2 pri tla nem preskusu steklenega panela	78
Grafikon 24: Pomik V_{skupni} v odvisnosti od uklona U_2 pri tla nem preskusu panela	78
Grafikon 25: Prikaz najve jih deformacij v odvisnosti od napetosti za stekleni panel	81
Grafikon 26: Prikaz deformacij $poru$ –glede na vi–ino steklenega panela h_{steklo}	82

KAZALO SLIK

Slika 1: Proizvodnji proces ravnega stekla s plavajo o talino	5
Slika 2: Obi ajne vrste stekel glede na vrsto loma, lamelirana z PVB folijo in njihovimi vrednostmi natezne trdnosti	7
Slika 3: Notranje napetosti v kaljenem steklu	9
Slika 4: Stekljeni izdelki	13
Slika 5: Majhne razpoke v rezanem steklu	14
Slika 6: Poliran trapezno bru-en rob	14
Slika 7: Standardne oblike bru-enih robov	15
Slika 8: Dekorativne oblike bru-enih robov	15
Slika 9: Lameliranje stekla v avtoklavu	20
Slika 10: Vstavljanje EVASAFE folije med dve stekli	21
Slika 11: Steklo v stroju za lameliranje	22
Slika 12: Kon anje postopka lameliranja	23
Slika 13: Glass House, New Canaan	31
Slika 14: Farnsworth House, Plano	31
Slika 15: Rheinbach Museum, Rheinbach	32
Slika 16: Univerz. center Novartis, Basel	32
Slika 17: Obteflba na posameznem steklenem panelu	32
Slika 18: Jekleno streho podpira osem pravokotnih steklenih kvadrov	33
Slika 19: Rheinbach glass museum paviljon, Rheinbach	34
Slika 20: Café Lichtblick, Innsbruck	35
Slika 21: Detajl stika podkonstrukcija - steklo	36
Slika 22: Preskusni vzorec	38
Slika 23: Postavitev preskusnih vzorcev v pe i	39
Slika 24: Visoko temperaturni preskus v pe i	40
Slika 25: Postavitev poskusnih vzorcev v vodi	41
Slika 26: Vzorci med preskusom v vodi	42
Slika 27: Kon ni pregled morebitnih	42
Slika 28: Postavitev preskusnih vzorcev v komoro	43
Slika 29: Vidna delaminacija na presku-ancu	44

Slika 30: Skica postavitve podpor na presku-anec in merjenje sile, pomika in deformacij	45
Slika 31: Presku-anec pri upogibnem preskusu	47
Slika 32: Skica postavitve podpor presku-anca in merjenje sile, pomika, deformacij	49
Slika 33: Lameliran presku-anec pri upogibnem preskusu	54
Slika 34: Merska mesta na presku-ancu	56
Slika 35: Preskus tla ne trdnosti stekla	60
Slika 36: Dimenzije presku-anca	61
Slika 37: Merska mesta na presku-ancu	62
Slika 38: Tla ni preskus	65
Slika 39: Razporeditev merskih mest	66
Slika 40: Razporeditev merskih mest	68
Slika 41: Monotoni tla ni preskus, steklo vzporedno z lesenimi vlakni	71
Slika 42: Detajl zgornjega in spodnjega dela presku-anca steklenega panela	72
Slika 43: Merska mesta na prvem presku-ancu	73
Slika 44: Merska mesta na drugem in tretjem presku-ancu	74
Slika 45: Detajl uklona stekla z merilnimi listi i za deformacije	83
Slika 46: Tla ni preskus steklenega panela I	84
Slika 47: Tla ni preskus steklenega panela II	85

1 UVOD

Osnovni namen diplomske naloge je raziskati vertikalno osno tla no nosilnost steklenega panela v kombinaciji z lesom. Izhodi-e raziskav je ideja, da bi uporabili steklo kot del nosilne konstrukcije v stavbah. K temu teffijo zadnji arhitekturni trendi, ki feliijo v notranjost objektov prenesti im ve naravne svetlobe. V laboratoriju Katedre za presku-anje materialov in konstrukcij na Fakulteti za gradbeni-tvo in geodezijo v Ljubljani smo izvedli tla ni preskus steklenega panela v naravni velikosti. Panel je bil lameliran iz dveh 10 mm debelih stekel toplotno oja anih. Z lameliranjem smo zadovoljili varnostni funkciji stekla, s toplotno obdelavo pa se mu je pove ala trdnost. fieleli smo ugotoviti kak-no nosilnost ima tak-en stekleni panel, kako se obna-a pod tla no obremenitvijo, do kak-nega uklona pride pri poru-itvi in kak-na je sama poru-itev. Glede na podatke iz literature smo pri akovali, da bo steklo preneslo velike tla ne obremenitve, problem pa je seveda njegova vitkost. Zaradi uklona pride na steklu do nateznih deformacij, ki jih pa slabo prena-a, saj ima steklo zelo majhno natezno trdnost. Z predhodnimi preskusi manj-ih presku-ancev smo poskusili ugotoviti kje so meje nosilnosti stekla in nosilnosti lesa. Pri nosilnosti lesa je pomembno kako steklo nalega na smer vlaken v lesu. Les ima precej ve jo nosilnost v smeri lesenih vlaken kot pravokotno na njih.

V uvodnem delu te diplomske naloge je najprej predstavljena zgodovina stekla, vrste stekla in njihova pridelava ter dosedanji razvoj. Osredoto il sem se predvsem na stekla, ki se uporabljajo za konstrukcijska, to so lamelirane in toplotno obdelane vrste stekla. Proces njihove proizvodnje je opisan in slikovno predstavljen. Potem sledi kratek pregled pridelave in porabe stekla v gradbeni-tvu glede na svetovni trg ter pregled najve jih proizvajalcev stekla in njihovi trfni deleffi. Pred poglavjem o laboratorijskih preskusih so predstavljeni -e zadnji arhitekturni pogledi z nekaj primeri objektov v katerih se je fle v preteklosti uporabilo steklo kot nosilni del konstrukcije, brez kak-nihkoli jeklenih, betonskih ali lesenih vertikalnih nosilnih elementov. S tem poglavjem sem dal nekako tudi smisel na-im raziskavam zato je primerno kot uvod v -esto poglavje, kjer so predstavljeni rezultati in ugotovitve vseh na-ih preskusov.

2 LASTNOSTI KONSTRUKCIJSKEGA STEKLA

2.1 Zgodovina stekla

Eno najstarej-ih gradiv, ki jih je naredil lovek, je steklo. Nekatere kamnine so se ob pojavih, ki povzro ajo visoko temperaturo, kot na primer vulkanski izbruhi, udarci strele in podobno, stopile nato pa hitro ohladile in strdile. Med temi kamninami v naravi je zelo pogosto tudi obsidian, ki nastaja v vulkanih pri visokih temperaturah in je obi ajno rne barve, v odvisnosti od primesi pa lahko tudi zelen, rde ali rjav. V kameni dobi je lovek uporabljal obsidian kot orodje za rezanje, nakit ali oroffje. Po mnenju zgodovinarjev so steklo za eli proizvajati na obmo ju dana-nje Sirije in sicer 5000 let pr. n. -t. Po naklju ju naj bi ga izna-li Feni anski trgovci, ko so postavili lonec za kuhanje na nekaj kosov natrona, ki so ga prevafali kot tovor, ter zakurili ogenj pod njim, da bi pripravili obrok. Na njihovo presene enje se je pesek pod njim stopil v teko ino, nato pa ohladil in strdil v steklo. V obmo ju vzhodne Mezopotamije in Egipta so na-li posode, steklenice in steklene bisere iz obdobja 4000 let pr. n. -t. Okoli leta 1500 pr. n. -t. naj bi Egip ani prvi za eli izdelovati votla steklena telesa s tehniko pe- enega jedra. Na kovinsko palico so dali me-anico gline in gnoja ter jo oblikovali tako kot naj bi izgledal notranji del posode. Nato so tako imenovano pe- eno jedro potopili v posodo s stekleno raztopino. Med postopkom so izdelek greli in gladili na plo- atem kamnu. Na koncu so odstranili palico, izpraskali pe- eni del in dobili posodo ali vazo. V Babilonu so okoli 200 let pr. n. -t. izna-li postopek pihanja, kar je bistveno poenostavilo proizvodnjo steklenih izdelkov, saj so lahko steklo oblikovali na mnogo razli nih na inov. Steklarska cev, ki je obi ajno dolga 1,5 m, ima na enem koncu okroglo zadebelitev, ki jo pihalec pomo i v teko e steklo. S po asnim, enakomernim pihanjem skozi ustnik in vrtenjem cevi se na drugem koncu oblikuje votel steklen balon. Na ta na in se lahko oblikujejo predmeti poljubne simetri ne oblike. Z vpihavanjem v kalupe se lahko oblikujejo cele serije enakih izdelkov. Pihanje stekla je ostala do 19. stoletja najpomembnej-a tehnika oblikovanja steklenih posod. Pihanje stekla je iz Sirije pri-lo do Rima in postopoma izpopolnilo stare tehnike. Ker je bilo s pihanjem mo izdelati veliko koli ino izdelkov je steklo iz cenjenega postalo vsakdanje blago, ki ga je mo uporabljati za okensko steklo, kozarce in posode vseh vrst. Medtem, ko so

prej-nje metode poudarjale barvo in vzorec, so s pihanjem dobili tanko in prozorno steklo. Prve ravne plo- e so posku-ali narediti s pomo-jo kamnitih valjev posutih s peskom, kar je na povr-ini stekla ustvarilo zna ilne vzorce. Tovrstno steklo -e ni bilo primerno za zasteklitev oken. Po propadu Rimskega cesarstva se je razvoj stekla nadaljeval v Islamskem svetu. Zelo znani Bizantinski mojstri so okoli leta 1000 za eli izdelovati barvno prozorno steklo za cerkve. Pred tem so v Siriji v 7. stoletju n. -t. izna-li enostaven in cenen na in izdelave okenskih stekel. Na drugo stran napihnjeneega steklenega balona so pritaknili palico imenovano *puntil*, odlomili balon od pihalke in ga hitro vrteli okoli puntila. Tako se je ustvarila plo- a v obliki prozornega krofnika, ki je imel na mestu odstranitve puntila »krono« - »kronsko steklo«. Ta na in izdelovanja okenskih stekel se je ohranil do 19. stoletja. Metoda je kasneje doflivela izpopolnitev. Izdelali so stekleno cev dolfline 3 m in -irine do 45 cm z dnom na katerem je bil puntil. Dno so odrezali, pla- pa prerezali po dolgem in izravnali. Tako so isto asno dobili krofno kronsko plo- ico in pravokotno plo- o. Obe sta bili uporabni za zasteklitev oken. Do konca 19. stoletja so steklo izdelovali po tem postopku.

Po kriflarskih vojnah se je umetnost izdelovanja stekla preselila v Benetke. Na izoliranem in dobro zastraflenem otoku Murano so razvili proizvodnjo ogledal edinstvene kakovosti. Zato je selitev steklarjev iz otoka bila strogo prepovedana z groflnjo smrti. V 16. stoletju so prvi na svetu proizvedli prozorno brezbarvno steklo imenovano *crystallo*. Temu je sledila iznajdba mikroskopa in teleskopa okoli leta 1600, kar je privedlo do nesluteneega razvoja znanosti in odkritij. Zato velja, da sodobna proizvodnja izvira iz -estnajstega in sedemnajstega stoletja. Steklo so za eli masovno proizvajati -ele proti koncu industrijske revolucije. Klju na osebnost in eden izmed o etov modernega raziskovanja stekla je bil nem-ki znanstvenik Otto Schott (1851-1935), ki je z znanstvenimi metodami preu eval u inke -tevilnih kemijskih elementov na opti ne in termi ne lastnosti stekla. Libbey-Owens je leta 1905 patentiral postopek neposrednega vle enja steklenih trakov iz pe i in hlajenje z vodno prho. Trakove so ponovno segrevali in ravnali. Po drugi svetovni vojni pa je v izdelavi ploskega stekla najve-ji pomen dobila flotacijska metoda izdelave ravnih stekel, ki so jo razvili v britanski tovarni Pilkington, in uvedli leta 1959. Pri tej tehniki se teko e steklo iz pe i zlije na staljen kositer ob isto asnem segrevanju obeh ploskev stekla. Ravno steklo se hladi in ob tem dobi zna ilen lesk.

V zadnjih petdesetih letih se tehnolo-ki razvoj pridelave stekla nadaljuje. Tudi v hitro se razvijajo i informacijski tehnologiji je steklo postalo skoraj nenadomestljiv material. V prihodnosti bo steklo ostal pomemben material, saj do sedaj niso odkrili nobene snovi s tako enkratnimi lastnostmi kot steklo, ki bi jo lahko tako mnogostransko uporabili.

2.2 Vrste stekel

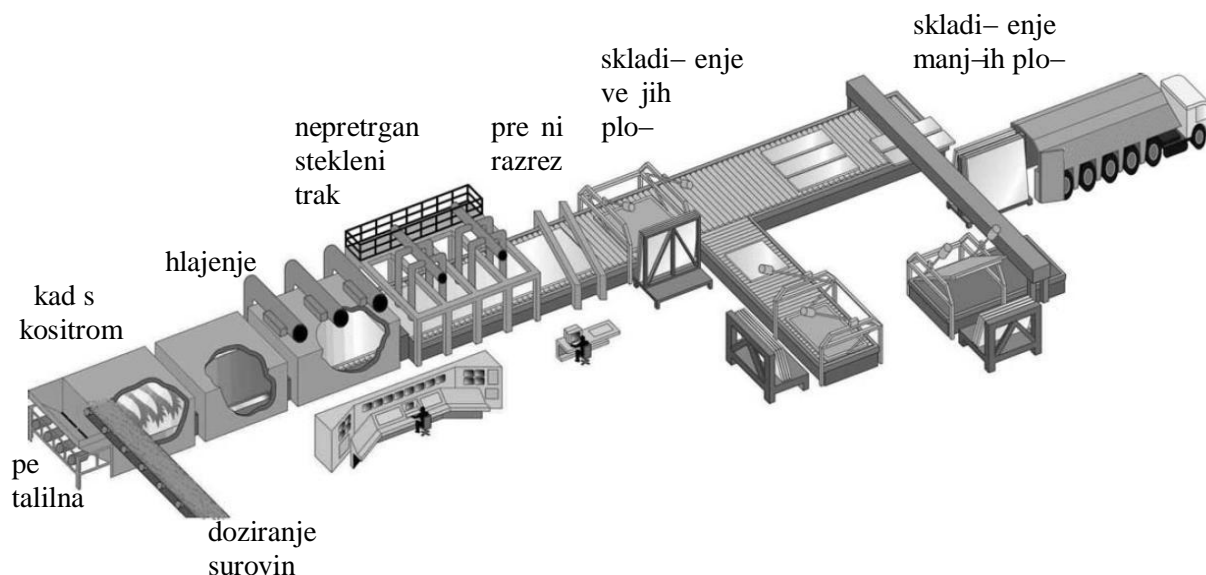
Steklo je molekularna ohlajena teko ina ó trda snov, ki tvori prozornost v kombinaciji z trdnostjo. V gradbeni-tvu se najve uporabljajo natrij-kalcijeva silikatna stekla. Po na inu izdelave lo imo ve vrst stekel:

- izdelava stekel z vle enjem (plosko steklo)
- postopek izdelave stekla s plavajo o talino (plosko float steklo)
- vlivanje - valjanje (plosko steklo, profili iz stekla)
- stiskanje (stekleni votlaki, stekleni stre-niki, pohodne talne plo- e)
- pihanje ó vrtenje (steklena vlakna, mineralna vlakna, steklena tkanina)
- penjenje (penjeno steklo: plo- e, bloki)

Natrij-kalcijevo silikatno steklo ó float steklo

Ploska float stekla danes izdelujejo predvsem po postopku s plavajo o talino (Slika 1). Najprej se ustrezno pripravljene surovine, v dolo enih utefnih razmerjih, vsipa v talilno pe . Pomembna je isto a in granulacija surovin. Proces me-anja, doziranja in vsipa je v celoti avtomatiziran. Surovine se stalijo na temperaturi med 1600°C in 1800°C. Temperatura je odvisna glede na kvaliteto povr-ine in sestavo stekla. Pri 1100°C se steklena talina zbistri, kar pomeni, da se odstranijo vsi mehur ki plina in se homogenizira. V naslednji fazi se jo vlije v kad s kositrom, kjer zaradi manj-e gostote steklo plava na povr-ini v obliki sloja in enakomerne debeline. Stekleni trak se ohladi na 500°C in hkrati se mu zgornjo povr-ino s plamenskimi poliranjem tudi zgladi. Steklenemu traku nato sledi hladilni kanal v katerem se temperatura znifla približno na 250°C. Po asno ohlajanje se nadaljuje -e na prostem. Da dobimo stekleno plo- o brez notranjih napetosti, je potrebno hitrost ohlajanja nadzirati. Ohlajeni stekleni trak se na koncu pre no prerefle na standardne dimenzije 6000 x 3210 mm.

V Preglednici 1 je opisana kemi na sestava stekla ter njegove mehanske lastnosti. Ravno steklo se izdeluje v standardnih debelinah plo– 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 in 25 mm.



Slika 1: Proizvodnji proces ravnega stekla s plavajo o talino

Preglednica 1: Kemi na sestava stekla in njegove mehanske lastnosti

Kemi na sestava		
Kremen ev pesek	SiO ₂	73 %
Natrijev karbonat	Na ₂ O	14 %
Apnenec	CaO	9 %
Magnezij	MgO	4 %
Aluminij	Al ₂ O ₃	0,15 %
Kalijev oksid	K ₂ O	0,03 %
Titanov dioksid	TiO ₂	0,02 %
fielezov oksid	Fe ₂ O ₃	0,1 %

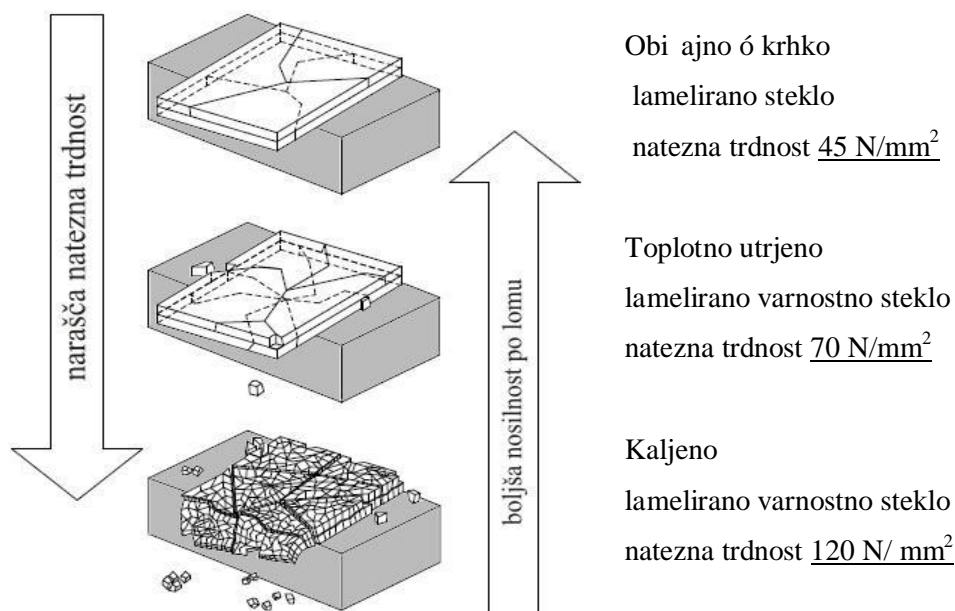
Mehanske lastnosti		
Prehodna temperatura	T_g [°C]	564
Temp. uteko injenja	T_l [°C]	1000
Koeficient temp. raztezka	α [K ⁻¹]	9·10 ⁻⁶
Gostota	[kg/m ³]	2500
Elasti ni modul	E [MPa]	70000
Strifni modul	G [MPa]	28000
Poissonovo –teviló	[-]	0,22
Trdota po Mohs-u		6,0

Steklo ima –e naslednje lastnosti:

- ne gori, niti ni vnetljivo,
- ima homogene in gladke površine, zlahka ga čistimo in je zelo higienično,
- je zelo odporno na kemijske vplive (obstoje v večini kislin in lugov),
- v vodi ni topno, hkrati pa je korozijsko zelo obstojno,
- ne absorbira in ne oddaja vlage, se ne izsuši ter se ne zvija,
- ko pridobi določeno obliko je ne izgubi,
- ni občutljivo na mraz in temperaturne spremembe,
- ne spreminja barve in ne postane motno,
- ne navzame se vonja, niti ga ne oddaja.

Običajno - krhko steklo

Običajno steklo je ravno krhko steklo brez notranjih napetosti, ki jih povzročijo kaljenje ó temperaturno gretje in hitro ohlajanje. Običajno steklo se od taline do konca nega proizvoda ohlaja po asi, brez hitrih sprememb temperature. Vsa ploska float stekla postanejo krhka šele v procesu proizvodnje in hkrati imajo tudi nizko upogibno trdnost. Takšna stekla se razbijejo na velike ostre kose, ki lahko povzročijo resne poškodbe in smrti. Takšnih, monolitnih stekel se ne sme uporabljati za vse, je zasteklitve oziroma nikjer tam, kjer je velika nevarnost poškodovanja ljudi ob njegovem lomu. Zaradi varnosti so se začeli uporabljati kaljena ali lamelirana stekla. Lamelirano varnostno steklo je zlepljeno iz dveh ali več slojev stekla, z vmesno folijo iz elastične polimerne umetne mase. Zlepi se lahko skupaj običajna, toplotno utrjena ali kaljena stekla (Slika 2).



Slika 2: Obi ajne vrste stekel glede na vrsto loma, lamelirana z PVB folijo in njihovimi vrednostmi natezne trdnosti

Kaljeno steklo

Ve jo oviro pri uresni evanju novih zamisli bi lahko predstavljala le odsotnost varnostne funkcije stekla. Obi ajno okensko steklo je zelo krhek material. Kljub temu, da prenese velike tla ne napetosti, ima izredno nizko natezno trdnost. Natezne napetosti na povr-ini stekla nastanejo, kadar ga upogibamo ali e na njem nastanejo temperaturne spremembe: nenadna sprememba za 40 do 50 K je dovolj, da se steklo zlomi. Kosi zlomljenega stekla so srpaste oblike in imajo izredno ostre robove.

Vzrok za tak-no obna-anje stekla je posebnost njegove notranje zgradbe. Pri steklu poteka prehod iz teko ega v trdno stanje brez nastanka kristalizacije, rezultat tega pa je neurejena kristalna mreža. Posamezne molekule so sicer stabilne, vendar pa je vez med sosednjimi molekulami -ibka in ve krat tudi prekinjena. Tako nastanejo mikroskopsko majhni prelomi (predvsem na povr-ini), zaradi katerih se fle ob minimalni natezni obremenitvi sprofi zlom celotne strukture. Ti prelomi se kafejo v obliki mikroskopskih zarez, ki so vzrok za to, da je dejanska upogibna trdnost stekla mnogo nifja od teoreti ne.

e flimo, da bo steklo bolj trdno in varnej-e, moramo zmanj-ati -teviló in velikost povr-inskih lomov. To dosefemo s kaljenjem stekla. Pod pojmom kaljeno steklo razumemo

termi no utrjeno varnostno steklo, ki ga strokovno-tehni no imenujemo tudi termi no prednapeto steklo. Kot je razvidno fle iz imena, doseflemo prednapetost s toplotno obdelavo stekla, ki poteka tako, da obe povr-*ini* stekla najprej segrejemo do dolo ene temperature, nato pa ju hitro ohladimo. Ker zaradi amorfne zgradbe steklo nima klasi ne to ke tali- a, ni mogo e natan no dolo iti, pri kateri temperaturi ni ve v trdnem stanju oziramo pri kateri je fle v teko em. Med enim in drugim stanjem je transformacijsko temperaturno obmo je: steklo se najprej omeh a, zatem postane testasto in kon no teko e. Za kaljenje plo- atega okenskega stekla so v tem obmo ju najprimernej-e tiste temperature, pri katerih je steklo v za etni fazi meh anja. Pri teh temperaturah, to je med 610°C in 660°C, se vezi med posameznimi molekulami zrahljajo oz. niso ve toge. Med ogrevanjem se posamezne molekule raztegnejo. Ko je doseflena zahtevana temperatura, moramo z dovajanjem komprimiranega atmosferskega zraka steklo im hitreje ohladiti. Molekule v zunanjih plasteh stekla se hitro ohladijo, pri emer se skr ijo in utrdijo. Zaradi slabe toplotne prevodnosti pa te molekule zadržujejo ohlajevanje in s tem kr enje molekul v srednji plasti. Posledica je pove ana gostota molekul na povr-*ini* in redkej-a v sredini stekla. Rezultat pove ane gostote pa je zmanj-anje -tevila oziroma velikosti povr-*inskih* razpok. Ta proces poteka med ohlajanjem s cca. 640°C na 470°C oziroma do temperature, ko se tudi molekule v notranjih plasteh stekla vrnejo v trdno stanje. Kaljenje je u inkovito le v primeru, e se med ohlajanjem ustvari dovolj velika temperaturna razlika med povr-*ino* in notranjostjo. V nadaljevanju moramo steklo ohladiti do temperature, pri kateri je mogo a ro na manipulacija.

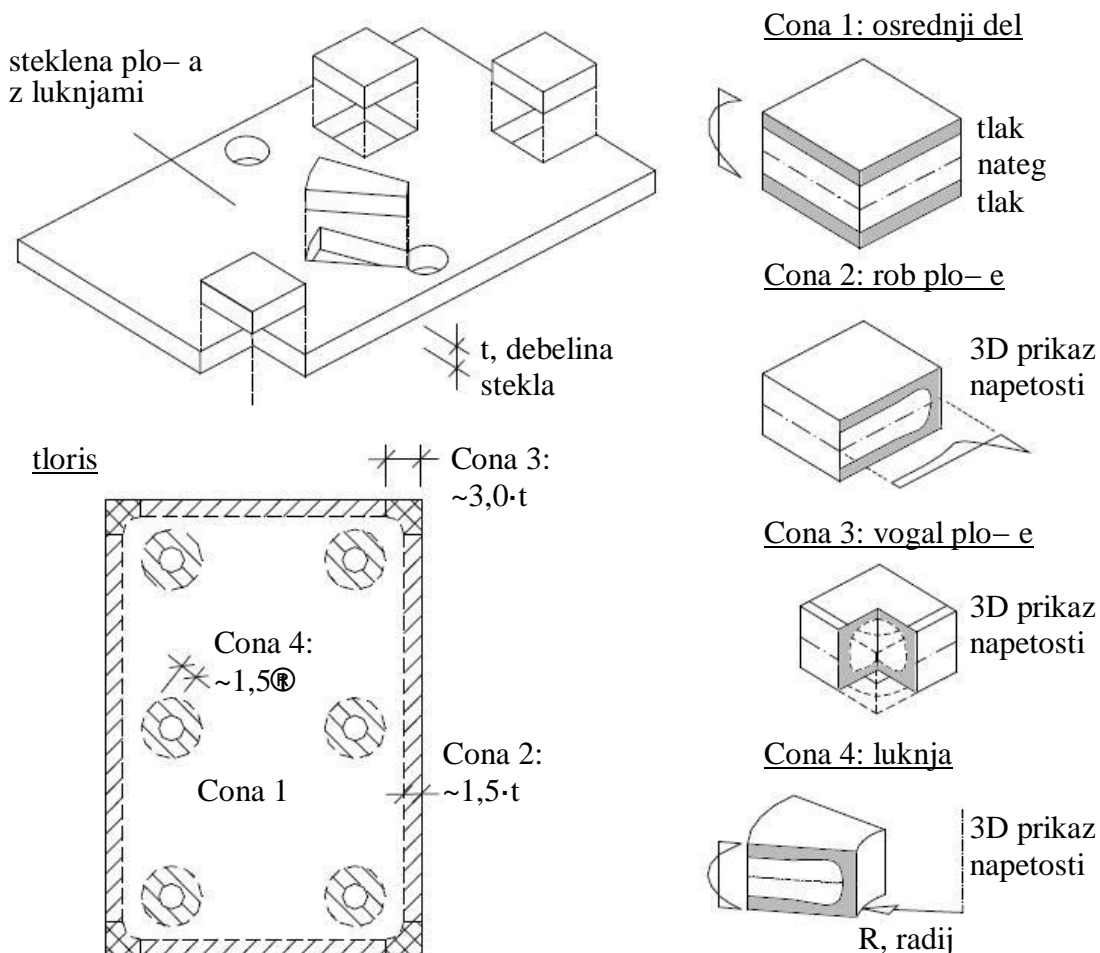
V opisanem procesu nastane v kaljenem steklu zna ilna porazdelitev napetosti: molekule na povr-*ini* so trajno izpostavljene tla nim, molekule v notranjosti pa nateznim napetostim (Slika 3). Te napetosti morajo biti v ravnovesju, saj je to pogoj za stabilno stanje, ki zagotavlja ustrezne varnostne lastnosti kaljenega stekla.

V okviru za etnega preizkusa in notranje kontrole proizvodnje se nadzira dve najpomembnej-i lastnosti kaljenega stekla po standardu EN 12150:

- **struktura loma**: v primeru poru-enja napetostnega ravnovesja oziroma loma se v hipu sprosti vsa med kaljenjem nakopi ena energija. Nastane fina mrefla drobnih delcev s topimi robovi. Zaradi tega je nevarnost po-kodb mo no zmanj-ana.
- **mehanska trdnost** (upogibna trdnost): izmerjena vrednost $> 120 \text{ N/mm}^2$ (kaljeno float steklo), pri nekaljenem steklu je vrednost 45 N/mm^2 .

Poleg omenjenih varnostnih lastnosti odlikujejo kaljeno steklo tudi naslednje prednosti:

- **pove ana udarna trdnost:** nihajni preizkus po standardu EN 12600.
- **pove ana obstojnost na temperaturne razlike:** obstojnost na temperaturne razlike po površini stekla znaša 200 K. Normalno float steklo je veliko bolj občutljivo na temperaturne razlike (40 K).



Slika 3: Notranje napetosti v kaljenem steklu

Zaradi značilne razporeditve napetosti kaljenega stekla, ga po kaljenju ne moremo več obdelovati (na primer rezati, brusiti, vrtati, í). Vsak tak poseg bi namreč lahko povzročil porušitev napetostnega ravnovesja in steklo bi se zlomilo. To pomeni, da smemo termično obdelavo izvesti šele potem, ko so končane vse druge vrste obdelave. Kaljena stekla so lahko vsa od debeline 4 mm do 19 mm.

Mofno je tudi numerično modelirati proces kaljenja [Laufs 2000], [Schneider 2001], [Bernard et al. 2002]. Razporeditev zaostalih napetosti v srednjem delu kaljene steklene ploče je parabolne oblike. Zato morajo biti notranje napetosti v ravnotežju kar pomeni, da je vsota površinskih tla nih napetosti na obeh straneh in notranje natezne napetosti enaka nič. Na robovih, vogalih in okoli lukenj so te napetosti pozitivne (Slika 3).

Steklo ima na robu, vogalih in okoli lukenj različne vrednosti notranjih napetosti [Laufs 2000]. Razlika med navadnim ó krhkim in kaljenim steklom je le v tem, da ima slednje večjo natezno trdnost, ostale lastnosti pa ostanejo nespremenjene. Zunanje delujejo e sile na kaljeno steklo se morajo najprej izenačiti z zaostalimi napetostmi preden se sprofi natezna napetost. Poleg tega, e pride, na primer zaradi udarca, razpoka preko tla ne plasti v osrednji natezni del se vsa natezna energija silovito razširi po vsem steklu in povzroči lom le-tega na drobne koške.

Po preteku dolo enega asa (po nekaj urah ali nekaj letih) se lahko kaljeno steklo brez vidnih zunanjih vplivov zlomi. Omenjeni pojav imenujemo spontani lom. Povzročitelj je molekula NiS (nikljev sulfid), ki ima negativni temperaturni raztezek. Ko se molekule stekla med ohlajanjem skrčijo, se molekula nikljevega sulfida razširi. e je molekula na sredini stekla (v polju nateznih napetosti), nastane lokalna napetost, ki lahko presefle natezno trdnost stekla in steklo se zlomi. eprav je pojav zelo redek ga moramo skladno z zahtevami po EN 14179 preprečiti, predvsem pri uporabi teh stekel v prezraevanih (hladnih) fasadah. To dosefemo tako, da stekla izpostavimo »vroi obremenitvi«. Pri tem preizkusu, ki ga imenujemo tudi **Heat Soak Test (HST)**, steklo v posebni komori po asi ogrejemo do $290^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Tej temperaturi so stekla izpostavljena 48 ur. V tem asu bodo tista, ki vsebujejo molekulo nikljevega sulfida, z zelo veliko verjetnostjo popila. Spontanega loma ne smemo zamenjevati z lomom, ki nastane zaradi mehanskih vplivov oziroma pokodovanja robov pri premeanju in namestitvi stekla. Vedeti moramo, da se kaljeno varnostno steklo kljub poveani trdnosti lahko zlomi, vzrok pa je ponavadi neustrezno ravnanje (na primer nepravilen prevoz).

Toplotno utrjeno steklo

Postopek proizvodnje toplotno utrjenega stekla (imenovanega tudi *delno kaljeno*) je podoben postopku za kaljeno steklo. Tako tudi to steklo segrejemo hitro in enakomerno nad 600°C, razlika pa je v tem, da pri ohlajanju z vpihovanjem hladnega zraka ravnamo bistveno drugače. V steklu tako nastane trajen potek napetosti, zaradi česar je v primerjavi z običajnim float steklom obutno bolj odporno na termične in mehanske obremenitve. Upogibna trdnost in sposobnost prenašanja temperaturnih razlik ležita nekje med navadnim nekaljenim in kaljenim steklom. Na toplotno ojačano steklo se nanaša standard EN 1863.

V okviru zahtevnega preizkusa in stalne notranje kontrole proizvodnje se nadzirata dve najpomembnejši lastnosti toplotno utrjenega stekla:

- **mehanska trdnost** (upogibna trdnost): 70 N/mm² leži med vrednostmi nekaljenega float stekla in kaljenega float stekla
- **struktura loma** posameznega stekla ustreza oziroma je enaka kot pri normalnem float steklu, zaradi tega toplotno ojačano steklo ni varnostno steklo.

Toplotno ojačano steklo je v prednosti pred kaljenim steklom takrat, ko upogibna napetost in obstojnost na temperaturne razlike navadnega float stekla ne zadošča in kaljeno steklo zaradi svoje strukture loma (veliko števil majhnih kov) ne izpolnjuje zahtevanega pogoja varnosti po lomu letega.

V največjih primerih se toplotno utrjeno steklo uporablja kot varnostno lepljeno steklo. S to kombinacijo dobimo steklo, ki optimalno združuje konstruktivno, predvsem pa aktivno in pasivno varnost. Ta kombinacija povečuje upogibne trdnosti, temperaturne obstojnosti in lastnosti prenašanja obremenitev po lomu nam da idealne izdelke za to kovno vpete zasteklitve in nosilne steklene elemente.

Kot pri kaljenem steklu moramo tudi tukaj obdelavo (rezanje, brušenje, vrtanje, ...) izvesti pred proizvodnim procesom. Toplotno utrjena stekla pa so lahko samo stekla od debeline 4 mm do 12 mm, debelejša so lahko le kaljena.

Kemi no utrjeno steklo

Kemi no utrjeno steklo ima izredno veliko trdnost. Steklo se kemi no utrdi tako, da se ga potopi v kad s kalijevim kloridom pri 450°C. Pri tem se natrijevi ioni na površini stekla zamenjajo s kalijevimi ioni. Ti ioni so veji kot natrijevi in s tem ustvarijo površino stekla tla no, v jedru pa nastanejo natezne napetosti. Tla na površina kemi no utrjenega stekla lahko doseže vrednost do 690 N/mm². Pri procesu kemi nega utrjevanja ni velikih temperaturnih sprememb in posledično je takšno steklo malo oziroma ni ukrivljeno ali zvito in nima ni optične popa enja. Kemi no utrjeno steklo je mogoče rezati in obdelovati tudi po končanem postopku utrjevanja, vendar izgubi svojo trdnost v območju približno 20 mm od reza. Če ima površina stekla globoko rano prav tako izgubi svojo trdnost v tem območju. Ko se razbije nastanejo veliki, ostri kosi, kot pri običajnem steklu. Iz tega razloga se ga ne uporablja kot varnostno steklo oziroma se ga mora za ta namen lamelirati.

2.3 Stekljeni proizvodi

Monolitno steklo

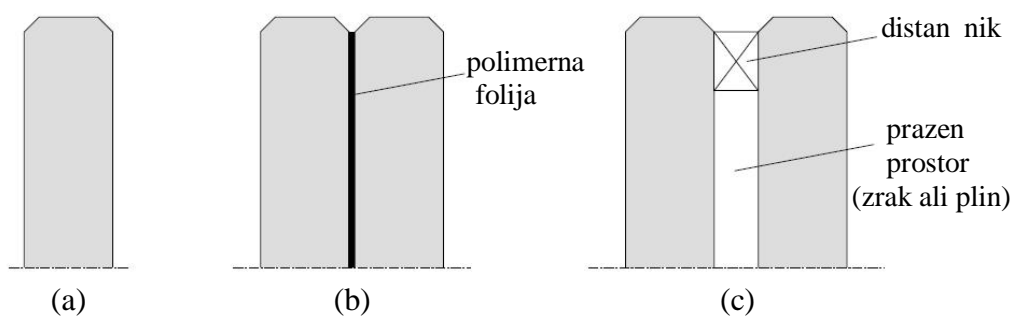
Monolitno steklo je steklo iz enega kosa (Slika 4(a)).

Lamelirano steklo

Lamelirano steklo (Slika 4(b)) je steklo, kjer sta dve ali več plasti steklenih plošč površinsko zlepljeni skupaj z elastično polimerno folijo. Zračne mehurčke se izloči s stiskanjem steklenih plošč, z gretjem pa se doseže transparentnost ter lepljivost in na koncu izgleda kot en kos stekla. Takšno steklo je mehansko bolj robustno, če pa pride do loma pa kosi ostanejo prilepljeni na vmesno polimerno plast in je nevarnost poškodb manjša. Lamelirano steklo se uporablja v varnostne namene, več pa je opisano v sledenem poglavju 3.

Toplotno izolacijsko steklo

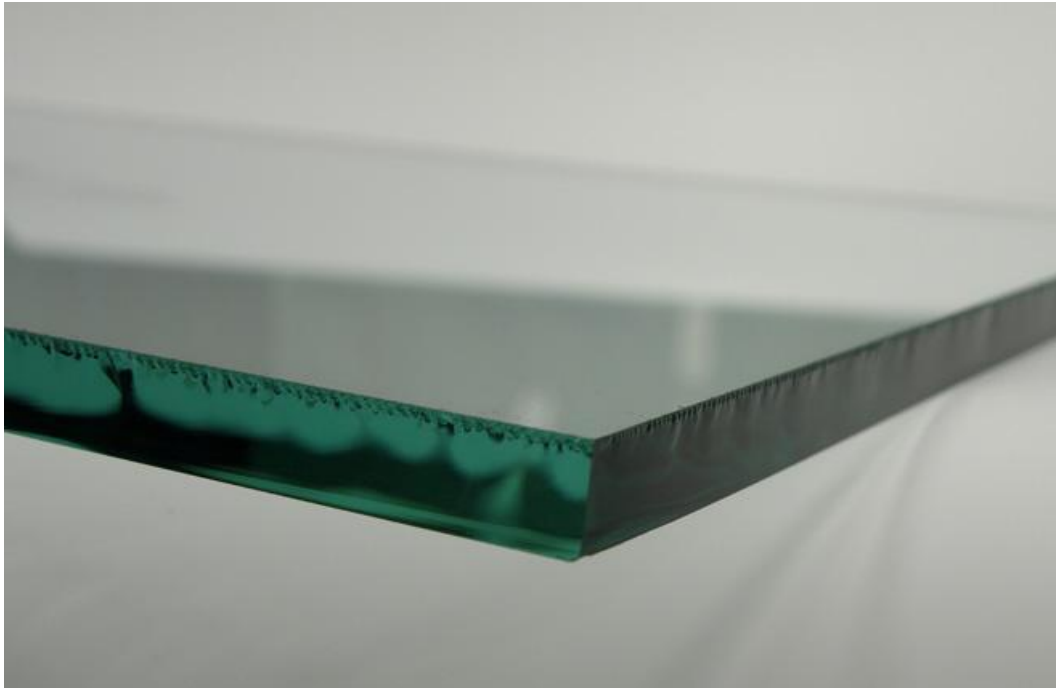
Toplotno izolacijsko steklo (Slika 4(c)) je sestavljeno in dveh ali ve plasti stekel nepredu-no zatesnjenih s praznim prostorom med plastmi. Ta prostor je napolnjen z zrakom ali plinom, kot je argon ali kripton, in slufi kot toplotni izolator. Najoptimalnej-a debelina prostora med stekli je 16 mm, sicer pa je odvisna od velikosti okna, temperaturne razlike med stekloma in ali stoji steklo vertikalno ali ne. Najpogostej-a uporaba toplotno izolacijskih stekel je iz dveh plasti stekel, tri plasti se uporabljajo v klimatsko zelo hladnih okoljih. Hkrati pa plast zraka slufi tudi kot zvo na izolacija.



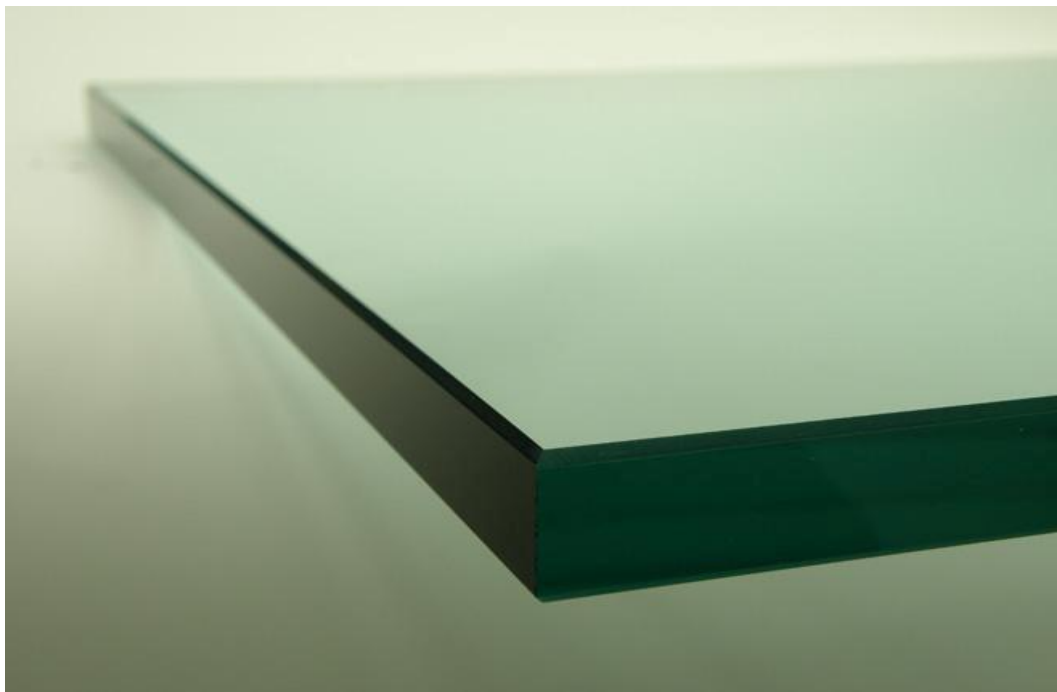
Slika 4: Stekljeni izdelki (a) monolitno steklo, (b) lamelirano steklo,
(c) toplotno izolacijsko steklo

2.4 Obdelava robov

Ko je enkrat steklo narezano se lahko robove –e dodatno obdela. Obdelava robov je odvisna od funkcije stekla; e so robovi stekla, pri vgradnji, za– iteni z okvirjem in niso direktno izpostavljeni jih na eloma ni potrebno brusiti; v nasprotnem primeru, kjer so robovi vidni, na dosegu rok ali se steklo toplotno obdela (kaljeno ali delno kaljeno) pa je potrebno ostre robove rezanega stekla –e obrusiti. Obrusi se jih z diamantnim orodjem razli nih granulacij in v ve stopnjah ter po potrebi tudi polira, s imer se odstranijo in zgladijo manj–e razpoke hkrati pa se doseffe tudi sijaj. Pri rezanju stekla nastanejo ostri robovi z majhnimi razpokami (Slika 5). Ob obremenitvi stekla vsaka tak–na razpoka predstavlja potencialni za etek loma in le-ta se –iri eksplozivno. Z bru–enjem in poliranjem robov pa te majhne razpoke odstranimo in zgladimo (Slika 6).



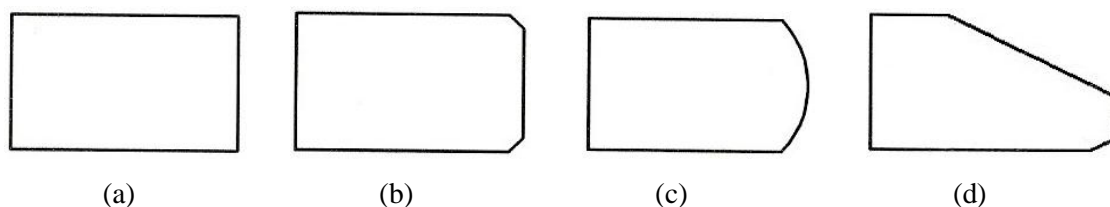
Slika 5: Majhne razpoke v rezanem steklu



Slika 6: Poliran trapezno bru-en rob

Standardne oblike obdelave robov

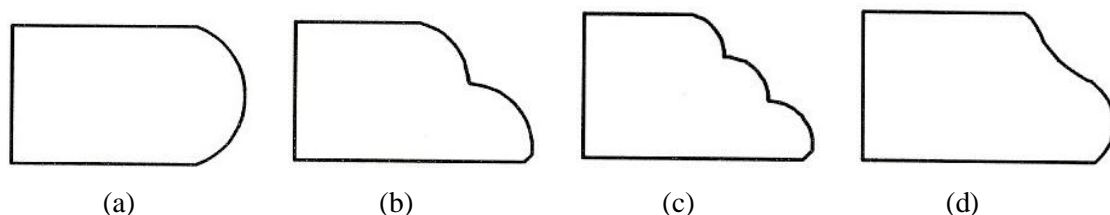
Na Sliki 7 so predstavljene standardne oblike bru-enih robov pri steklu.



Slika 7: Standardne oblike bru-enih robov (a) raven rob, (b) trapezni rob, (c) delno polkrofní rob, (d) faseta

Dekoratívne oblike obdelave robov

Na Sliki 8 so predstavljene nekatere dekoratívne oblike bru-enih robov pri steklu.



Slika 8: Dekoratívne oblike bru-enih robov (a) polkrog, (b) dvojni slap, (c) trojni slap, (d) OG.

2.5 Reciklafla stekla

Recikliranje je predelava fe uporabljenih, odpadnih snovi v proizvodnem procesu z namenom zmanj-anja tro-enja potencialno uporabnih snovi, zmanj-anja porabe sveflih surovin in porabe energije ter prepre evanja onesnaflenja zraka, vode in zemlje. Recikliranje v primerjavi s konvencionalno proizvodnjo, zmanj-uje tudi izpuste toplogrednih plinov.

Z recikliranjem odpadkov zagotavljamo ponovno uporabo odpadnih snovi oz. materialov iz industrije, kmetijstva in gospodinjstev z namenom zmanj-evanja izrabe naravnih virov ter zmanj-evanja izdelave v naravi nerazgradljivih ali celo strupenih materialov oz. izdelkov. Pogoje za uspe-no reciklafla je v prvi vrsti ustrezen sistem zbiranja in sortiranja odpadnih snovi, v nadaljevanju pa tehnolo-ki proces za predelavo materiala v obliko, ki je uporabna za izdelavo novih produktov.

Koristi pri ponovni uporabi materiala:

- zniža se potreba po komunalnih deponijah,
- zmanjša se tveganje onesnaževanja,
- ohranjajo se naravne dobrine,
- prihrani se energija v proizvodnji in pri transportu,
- zniža se količina komunalnih odpadkov.

Proizvodnja reciklalnega stekla porabi manj energije kot proizvodnja novega stekla in hkrati prihrani primarne surovine. Ena tona odpadnega stekla nadomesti približno 1,2 tone surovin. Poleg tega se prihrani tudi energija. Če se pri surovinah uporabi 25% odpadnega stekla se s tem prihrani pri energiji 5%, pri sto odstotnem deležu odpadnega stekla pa je prihranek 15 % energije. V zbrano steklo bi lahko katerakoli druga vrsta stekla vmešala ne isto količino, in sicer zato, ker je steklo za embalažo natrij-kalcijevo steklo, ki vsebuje kremenov pesek, sodno in apnenec. Druge vrste stekla vsebujejo številne druge primesi, ki povzročijo teflave v talilni kadi. Pri tem je posebno nevarno laboratorijsko steklo, ki vsebuje borosilikate, pa tudi razne kemikalije, ki ostanejo v kemijskem posodju in lahko onesnažijo reciklirano steklo. Iz odpadnega stekla se izloči smeti in druge nečiste snovi na tekočem traku, nato se zmelje na košček velike od 1 do 16 mm. S pomočjo magnetov se iz del kov izloči kovine. Preko sesanja izpod sita se odstrani še poslednje delce papirja, plastike in lahkih kovin. Kljub vsem postopkom, pa nekaj kovin ostane v steklu, ki jih potem v jarku izloči detektorji kovin. Če repinje so nato dovolj čiste, da lahko prihranijo s taljenjem.

Odpadno steklo je edini material, ki ga je mogoče sto odstotno reciklirati, saj pri tem procesu skoraj ni odpadkov ali nečistih stranskih produktov. Za uspešno recikliranje je prvi pogoj ločeno zbiranje rjavega, zelenega in brezbarvnega odpadnega stekla.

a) Viri stekla za recikliranje:

- steklenice, kozarci za pijačo in hrano
- steklo za laboratorijsko steklovino

b) Izdelki iz recikliranega stekla:

- steklenice, kozarci za pijačo in hrano

3 LAMELIRANO STEKLO

3.1 Splo-no o lameliranem steklu

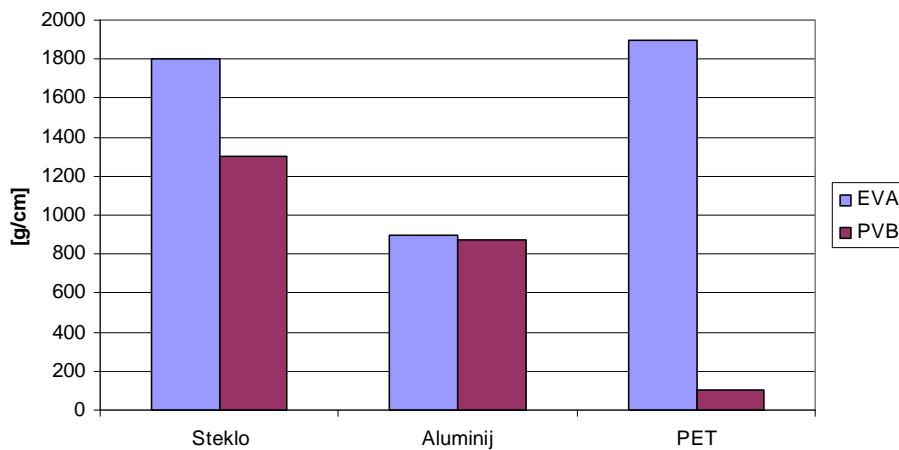
Lamelirano steklo je izumil francoski kemik Eduard Benedictus leta 1903. Je varnostno steklo, ki je sestavljeno iz ve plasti stekel povr-insko zlepljenih skupaj s prozorno polimerno folijo. Folija je vstavljena med dve plasti stekel, nato se s pomo jo gretja in tlaka iztisne ves zrak ter zlepi stekla skupaj. Poznamo ve vrst folij, najbolj pogosto se uporablja PVB (polyvinyl butyral) ó debelina ene plasti 0,38 mm, EVA (ethylen vinyl acetate) ó debelina ene plasti 0,4 mm. Uporabi se lahko ve plasti folij, odvisno od namena uporabe tak-nega stekla. Za varnostno steklo, je priporo ljiva minimalna debelina 0,76 mm folije (dve plasti), saj lahko v primeru loma steklo prerefle folijo, e je le-ta pretanka. Bistvo polimerne folije je, da v primeru loma stekla, ostanejo kosi zlepljeni na vmesni foliji, onemogo en je preboj vrfljenih predmetov, za ustvarjanje odprtine je potreben izdaten as, itd. Prav tako ima folija tudi to dobro lastnost, da ne prepu-a UV svetlobe (99%) ter nudi zvo no za- ito. Lamelirana stekla se uporabljajo tam, kjer obstaja nevarnost po-kodovanja ljudi ob lomu stekla, za za- ito pred vandalizmom ali strelnim orofljem. Uporablja se na primer za izloflbe v trgovinah, zasteklitev balkonov, pohodna stekla, stopni-ne in balkonske ograje, predelne stene, nadglavne zasteklitve (nadstre-ke in strehe), bazene, itd.

3.2 Razlika med PVB in EVA folijo

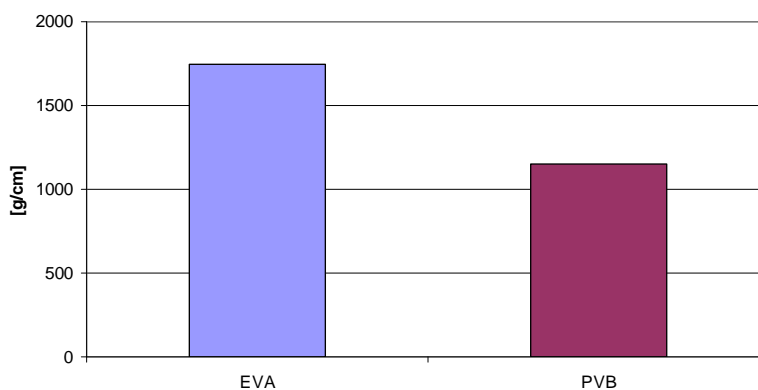
V ve kot polovici primerov lameliranih stekel se uporablja PVB (polyvinyl butyral) folija. Bolj je uporabna zato, ker je cenej-a njena izdelava in cenej-i postopek lameliranja. Ima pa tudi nekatere slabe lastnosti in steklo lamelirano s to folijo ni primerno v vseh primerih uporabe. EVA (ethylen vinyl acetate) folija je v primerjavi s PVB folijo bolj lepljiva s steklom, aluminijem, PET plastiko (Grafikon 1) in tudi bolj odporna na temperaturne spremembe in povsem odporna na vlafnost (Grafikon 2). Zato je zelo priporo ljiva pri uporabi vseh lameliranih stekel, ki se vgrajujejo tam, kjer so le-ta izpostavljena vremenskim vplivom. Obe foliji sta bili presku-eni za Evropske, Japonske in Ameri-ke standarde. Glavni

proizvajalec EVA folije je Japonsko podjetje Bridgestone (proizvod *EVASAFE*), PVB folijo pa izdeluje ameri-ko podjetje DuPont (proizvod Butacite). Obe vrsti folij izdelujejo tudi drugi proizvajalci po svetu.

In-titut DIBT (Deutsches Institut für Bautechnik) je edina Nem-ka poobla- ena organizacija za izdajanje certifikatov materialom, ki se lahko uporabljajo kot konstrukcijski materiali. V za etku leta 2010 je folija *EVASAFE* dobila certifikat za uporabo v varnostnih lameliranih steklih. Do tedaj se je lahko za varnostna lamelirana stekla uporabljala le PVB folija. *EVASAFE* je prav tako uspe- no prestala Rusko GOST certificiranje, ki je podobno Evropskemu CE le, da ima dodatno -e preskus zmrzovanja pri temperaturah -40°C in -70°C , ki je pomembno za zunanjo vgradnjo in hkrati se je bolje izkazala kot PVB folija.



Grafikon 1: Trdnost povezave EVA in PVB na razli ne materiale.



Grafikon 2: Rezultati preizkusa odpornosti na vlažnost in toploto (po 500 urah na temperaturi 50°C in relativni vlažnosti 90 %)

3.2.1 Tehni ne karakteristike PVB in EVA folije

V Preglednici 2 so prikazane tehni ne karakteristike EVASAFE in PVB folij. Proizvajalci ne podajo vedno vseh karakteristik materialov, zato so zbrane tiste, ki jih je bilo mogo e pridobiti.

Preglednica 2: Tehni ne karakteristike EVASAFE in PVB folije

Lastnost	Enota	EVASAFE	PVB
Debelina	mm	0,4	0,38
Natezna trdnost	MPa	26	22,2
Young-ov modul (23°C)	MPa	18	
Poisson-ov koli nik	-	0,32	0,49
Specifi na te0a	-	0,95	1,07
Trdota	Shore A	82	
Prehodna temperatura v steklu	°C	-28	
Taljiva temperatura	°C	79	
Volumska odpornost	cm	$5,4 \times 10^{15}$	
Izolacijska konstanta (1kHz)	-	3,4	
Odpor na elektri no napetost	kV/mm	19	
žar ni Index	-	1,491	1,48
Odpornost na UV svetlobo	nm	380 (99%)	380 (99%)
Termi na prevodnost (K vrednost)		0,1 kcal/mh°C	0,12 Btu/(ft2hr°F)
Termi no raztezanje		$3,5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$2,6 \times 10^{-4} \text{ in./in.}^\circ\text{F}$
Vodna absorbcija (20°Cx24Hours)	%	<0,01	
Vodna propustnost (40°Cx90%RH)	g/m ² x24HR	64,3	
Gel vrednost	%	95	
Vidna svetlobna prepustnost	%	87	89
Sen ni koeficient, istost	-		0,92
Natezni raztezek	%	350	205
Specifi na toplota	J/kgK		0,88
Emisivnost	-		0,9
Stri0ni modul	MPa		0,5
Elasti ni modul	MPa		1,5

3.2.2 Postopek lameliranja s PVB folijo

S PVB folijo se lahko lamelira v avtoklav stroju (nepredu-no zaprta komora za gretje pod zvi-anim tlakom in zvi-ano temperaturo ó Slika 9) ali v stroju s postopkom vakuumskih vre . Steklo se lahko lamelira v vertikalni ali horizontalni poziciji.



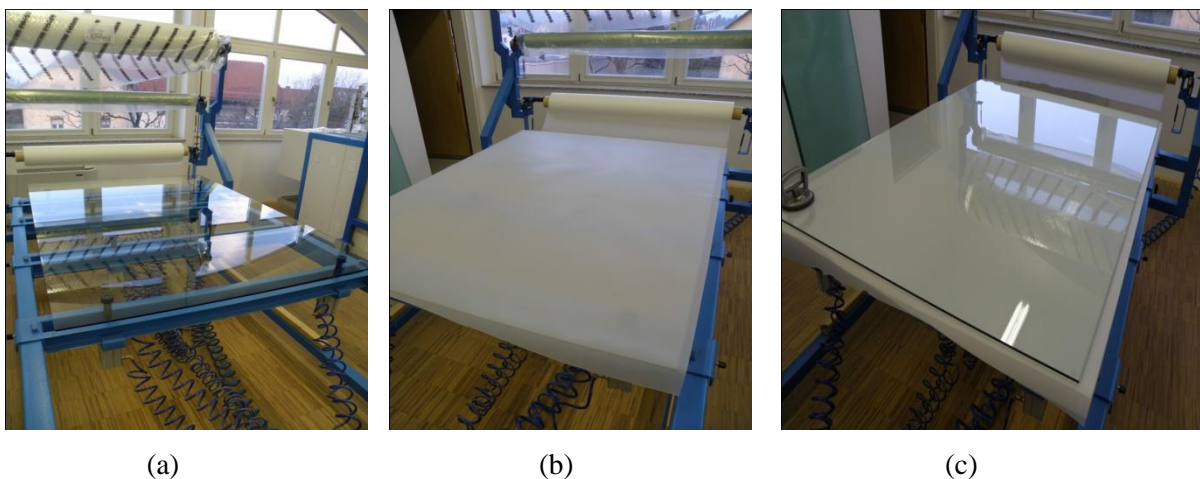
Slika 9: Lameliranje stekla v avtoklavu

Prvi korak je razrez stekla na kon ne dimenzije, bru-enje robov, izdelovanje izvrtin, kaljenje, ipd. Nato se steklo varno dostavi do pralnega stroja, ki steklo o isti vseh madefov, razmasti ter posu-i in preko transportnega traku dostavi do mize, kjer se nato vstavi folija. Folija je shranjena v posebni nepredu-ni komori, kjer je stalna temperatura 18°C in relativna vlafnost 12%, prav tako je prostor v katerem se folija vstavlja med stekla zaprt, ist, brez prahu in klimatiziran pod enako temperaturo in relativno vlafnostjo kot komora v kateri je shranjena folija. V primeru, da prostor ni ist in v njem ni prave temperature in vlafnosti, lahko pride do delaminacije ali meglice v foliji. Ko imamo enkrat folijo vstavljen med dve stekli se po teko em traku pelje skozi stroj, ki segreje steklo in folijo ravno toliko, da se sprimeta skupaj, se iztisnejo vsi zra ni mehur ki in steklo ostane na poziciji. Nato se steklo naloffi na poseben vozi ek, ki se ga zapelje v avtoklav. V avtoklavu je temperatura med 100°C in 150°C (odvisno od debeline stekla in debeline folije), tlak je pa med 8 in 10 bar. Po kon anem postopku v avtoklavu je steklo zlepljeno skupaj, folija pa postane transparentna.

3.2.3 Postopek lameliranja z EVA folijo

Postopek lameliranja z EVA folijo je v nadaljevanju bolj podrobno predstavljen, saj smo za naše laboratorijske preskušance uporabili EVASAFE folijo Japonskega proizvajalca Bridgestone.

Shranjevanje te folije ni potrebno pod tako strogimi pogoji kot PVB folijo. Med shranjevanjem mora biti EVASAFE folija zaščitena pred UV svetlobo in prahom v prostoru. Med uporabo pa mora biti prostor čist, roke morajo biti zaščitene s čistimi rokavicami, ki ne puščajo sledi in prav tako primerna in čista mora tudi obleka. Z EVA folijo se lahko lamelira v avtoklavu ali v stroju s postopkom vakuumskih vre, steklo pa mora vedno ležati horizontalno med lameliranjem, saj pri visoki temperaturi folija postane bolj viskozna od PVB in lahko izteče ven. V našem primeru smo uporabili lameliranje v vakuumskih vrečah. Prvi korak je razrez stekla na prave dimenzije nato po potrebi brušenje robov, izdelava izvrtin, kaljenje, ipd. Potem se ga varno transportira do pralnega stroja, ki ga očisti, razmasti in posuši. Nato se steklo položi na delovno mizo v istem prostoru, kjer se nato vstavi folija med dve plasti stekla (Slika 10). Pred gretjem je folija mlečna - ni prozorna.



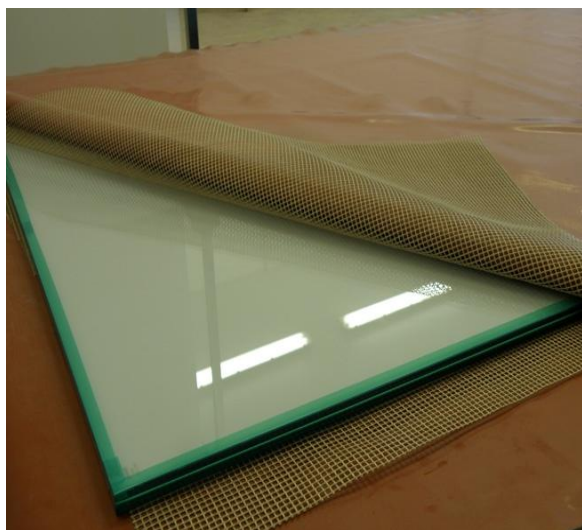
Slika 10: Vstavljanje EVASAFE folije med dve stekli (a) isto steklo, (b) vstavljanje folije, (c) folija med dvema stekloma

Ko je folija vstavljena med dve plasti stekla, je potrebno robove zalepiti z lepilnim trakom, da stekla ni mogoče premakniti iz pozicij, ko se manipulira z njim. Stroj ima pripravljene silikonske vakuumске vreče, ki so odporne na visoke temperature, v njih sta pa dve plasti

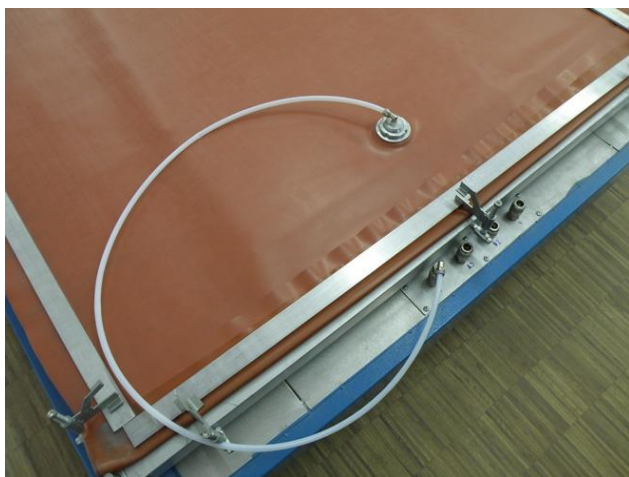
PVC mrežice med kateri se vstavi steklo, ti mrežici pa omogočata pretok zraka, ki se izsesava iz vakuumskih vre in s tem stiska stekli skupaj (Slika 11). S tem se doseže, da se iztisne ves zrak, ki je ujet med steklom in folijo. Glavni proces lameliranja v stroju je odvisen od debeline, števila stekel in od debeline folije. V povprečju traja okoli tri ure in pol. Stroj se segreje do temperature 138°C, zrak ki se izsesava iz vakuumski vre pa doseže 1 bar podtlaka.



(a)



(b)



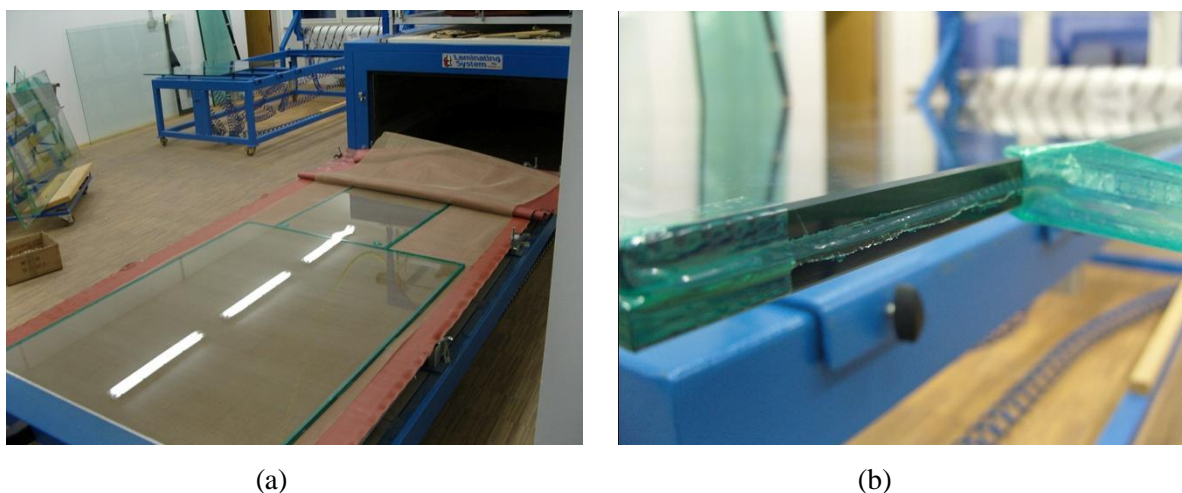
(c)



(d)

Slika 11: Steklo v stroju za lameliranje (a) steklo polofeno v stroj, (b) steklo med PVC mrežico, (c) priključek za izsesavanje zraka, (d) stiskanje stekel z izsesavanjem zraka.

Po kon anju procesa lameliranja je zelo pomembno, da se podtlak v vre ah ohrani tudi pri ohlajanju stekla (vsaj dokler mu ne pade temperatura pod 50°C). Ko se ohladi, postane folija prozorna. Nato se odstrani lepilni trak in po potrebi o isti robove folije, ki se iztisne med gretjem (Slika 12).



Slika 12: Kon anje postopka lameliranja (a) prozornost folije, (b) odstranitev lepilnega traku in i- enje robov

3.3 Obstoje i standardi za lamelirano steklo

Obstajata dva veljavna Evropska standarda o lameliranem steklu:

- SIST EN ISO 12543:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo
- SIST EN 14449:2005 Steklo v gradbeni-tvu ó Lepljeno steklo in lepljeno varnostno steklo ó Ovrednotenje skladnosti/standard za izdelek

3.3.1 SIST EN ISO 12543:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo

Standard *SIST EN ISO 12543:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo* je razdeljen na –est delov:

- SIST EN ISO 12543-1:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 1. del: Definicije in opis sestavnih delov

- SIST EN ISO 12543-2:1999/A1:2005 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 2. del: Lamelirano varnostno steklo
- SIST EN ISO 12543-3:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 3. del: Lamelirano steklo
- SIST EN ISO 12543-4:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 4. del: Metode presku-anja trajnosti
- SIST EN ISO 12543-5:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 5. del: Mere in robovi
- SIST EN ISO 12543-6:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 6. del: Izgled

Prvi del standarda definira strokovne izraze in opi-e sestavne dele lameliranega stekla in lameliranega varnostnega stekla za uporabo v stavbah. Drugi in tretji del specificirata kvaliteto lameliranega stekla in lameliranega varnostnega stekla. Razlika med lameliranim in lameliranim varnostnim steklom je le v *Preskusu z nihalom* (SIST EN 12600:2004 Steklo v stavbah ó Preskus z nihalom ó Preskusna metoda z udarcem in klasifikacija ravnega stekla), kjer mora lamelirano varnostno steklo po tem standardu dose i najmanj stopnjo 3B. etri del standarda dolo a preskusne metode za odpornost proti visoki temperaturi, vlafnosti in svetlobnem sevanju. Peti del specificira dimenzije, dovoljena odstopanja in kon no obdelavo robov lameliranega in lameliranega varnostnega stekla. Zadnji del standarda pa specificira nepravilnosti v kon nem izdelku in testne metode glede na videz skozi steklo. Posebno pozornost posve a zadovoljivim kriterijem v vidnem obmo ju stekla.

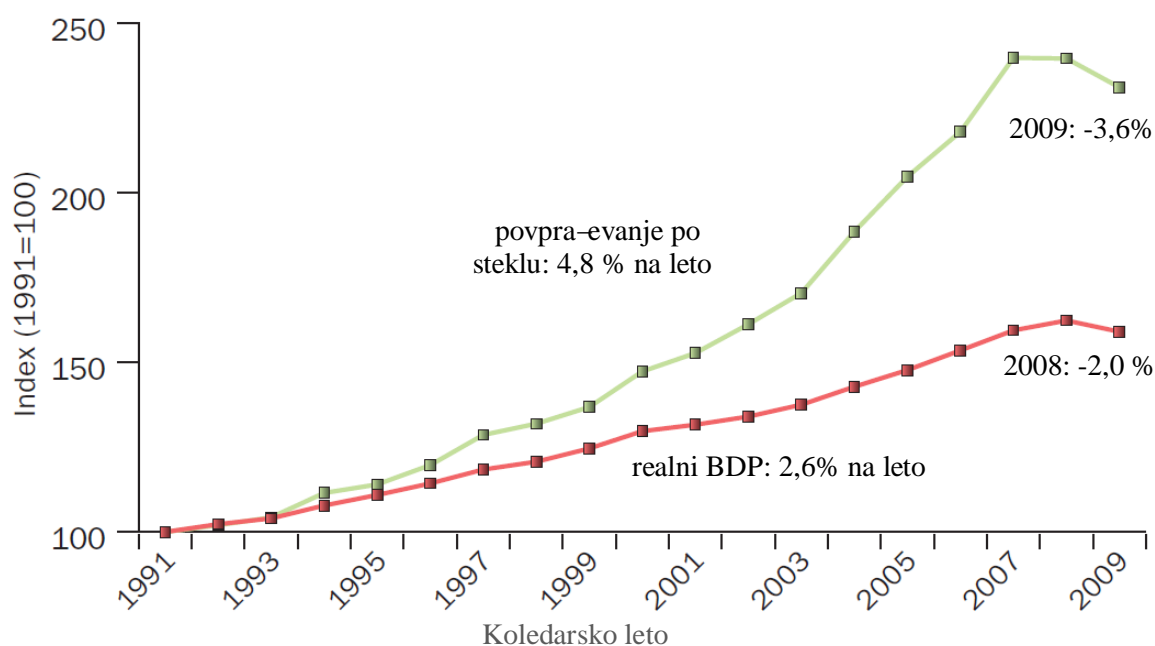
3.3.2 SIST EN 14449:2005 Steklo v gradbeni-tvu ó Lepljeno steklo in lepljeno varnostno steklo ó Ovrednotenje skladnosti/standard za izdelek

Ta dokument obsega ovrednotenje skladnosti in kontrolo proizvodnje v podjetju, ki izdeluje lamelirano in lamelirano varnostno steklo. Ovrednotenje skladnosti je rezultat kontrole proizvodnje in za etnih tipskih presku-anj. Specificira odgovornost proizvajalca za pripravo in vzdrflevanje podatkov, opisov izdelka ali skupine izdelkov ter ozna evanje izdelkov z CE oznako.

4 PROIZVODNJA IN PORABA RAVNEGA STEKLA V GRADBENITMTVU NA SVETOVNEM TRGU

4.1 Svetovni trg ravnega stekla

Proizvodnja ravnega stekla na svetovnem trgu v letu 2009 zna-a približno 52 milijonov ton (~6,6 bilijonov m²). Po veljavnih cenah stekla, na nivoju glavnih proizvajalcev, to zna-a približno 22 bilijonov evrov. Gledano na dalj-e obdobje, trg raste približno 4 - 5 % letno (Grafikon 3). V letu 2009 pa se je pojavil znaten upad povpra-evanja zaradi vpliva svetovne gospodarske krize.



Grafikon 3: Primerjava rasti indeksov realnega BDP in povpra-evanja po steklu

Od vrednosti 52 milijonov ton zna-a dobrih 29 milijonov ton proizvedenega visoko kakovostnega ravnega stekla. Okoli 3 milijone ton je proizvedenega ploskega stekla (proizvodnji proces z vle enjem), 2 milijona ton je izdelanega po postopku valjanja (postopek, kjer se stekleno talino potiska skozi valje, obi ajno imajo tak-na stekla vzorec na povr-ini). Ostalih 19 milijonov ton je slab-e kakovostno ravno steklo, proizvedeno predvsem na Kitajskem. Delefl visoko kakovostnega ravnega stekla in nekaj valjanega stekla gre v

nadaljnjo obdelavo, kot je lameliranje, kaljenje, površinska prevleka (prevleka s srebrom ó oglekala), itd. Uporabljajo se pri obi ajnih zasteklitvah in v avtomobilski industriji. Na tej stopnji ima vrednost približno 51,3 bilijonov evrov.

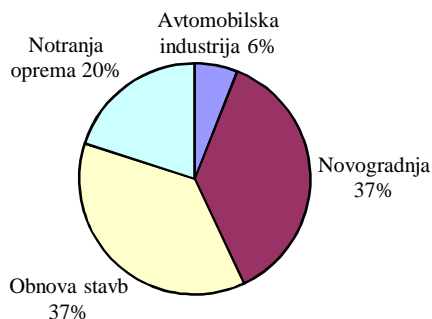
Dale najve stekla se uporabi v stavbah (~ 45 milijonov ton) medtem, ko za avtomobilsko industrijo približno 5 milijonov ton. Stekel za posebne namene je zelo malo, vendar je opaziti rast pri razvoju stekel za pridobivanje son ne energije. Stekla, uporabljena v stavbah, gredo skozi nekaj procesov preden se jih vgradi v okna, uporabi v pohi-tvu ali beli tehniki. V avtomobilski industriji se stekla uporabljajo kot originalna oprema v vozilu ali kot rezervni deli. V Preglednici 3 je v odstotkih prikazana poraba stekla v gradbeni-tvu, Preglednica 4 pa prikazuje porabo stekla v avtomobilski industriji. Grafikon 4 prikazuje porabo ravnega stekla po podro jih, glede na svetovni trg.

Preglednica 3: Poraba stekla v gradbeni-tvu glede na svetovni trg

Podro je	Koli ina	Odstotek
novogradnja	2200 milijonov m ²	40%
obnova	2200 milijonov m ²	40%
notranja oprema	1100 milijonov m ²	20%
SKUPAJ	5500 milijonov m²	100%

Preglednica 4: Poraba stekla v avtomobilski industriji glede na svetovni trg

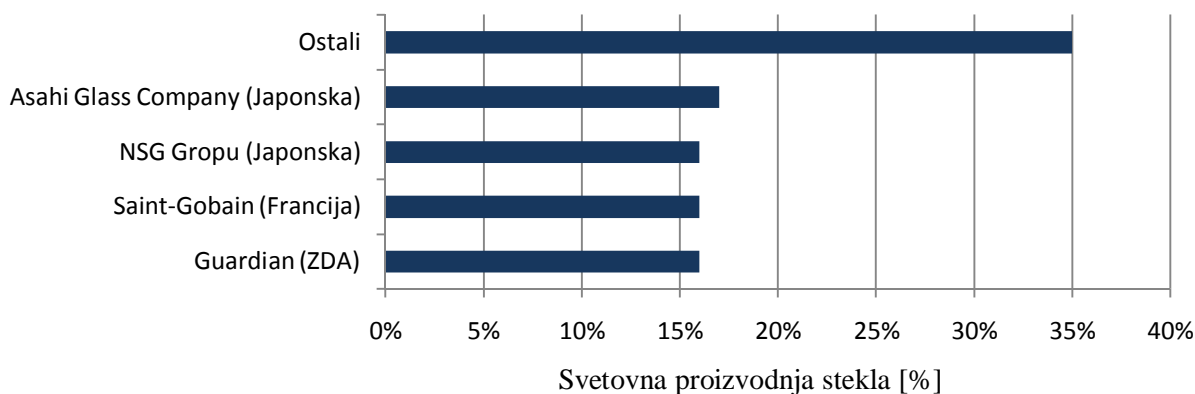
Podro je	Koli ina	Odstotek
original oprema	320 milijonov m ²	82%
rezervni deli	70 milijonov m ²	18%
SKUPAJ	390 milijonov m²	100%



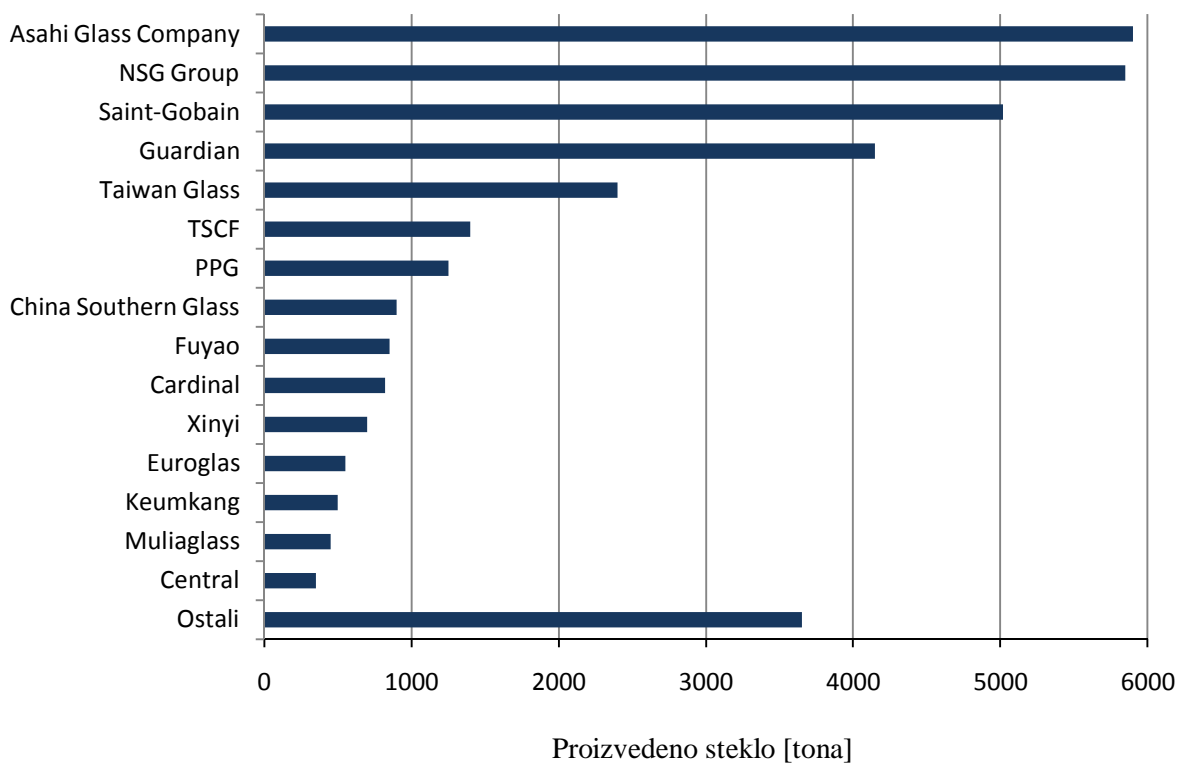
Grafikon 4: Uporaba ravnega stekla po podro jih na svetovnem trgu

4.2 Svetovni proizvajalci in njihovi trfni delefi

e se osredoto imo le na visoko kakovostno ravno steklo, je industrija relativno utrjena z -tirimi najve jimi podjetji, ki proizvedejo skupaj ve kot 60 % visoko kakovostnega ravnega stekla na svetu in trije med njimi okoli tri- etrtine stekla za avtomobilsko industrijo (Grafikon 5). Na Grafikonu 6 so prikazane kapacitete proizvedenega ravnega stekla v letu 2009, glede na posamezna podjetja. Od -tirih najve jih svetovnih proizvajalcev visoko kakovostnega stekla sta dva iz Japonske, eden iz Francije in eden iz Amerike.



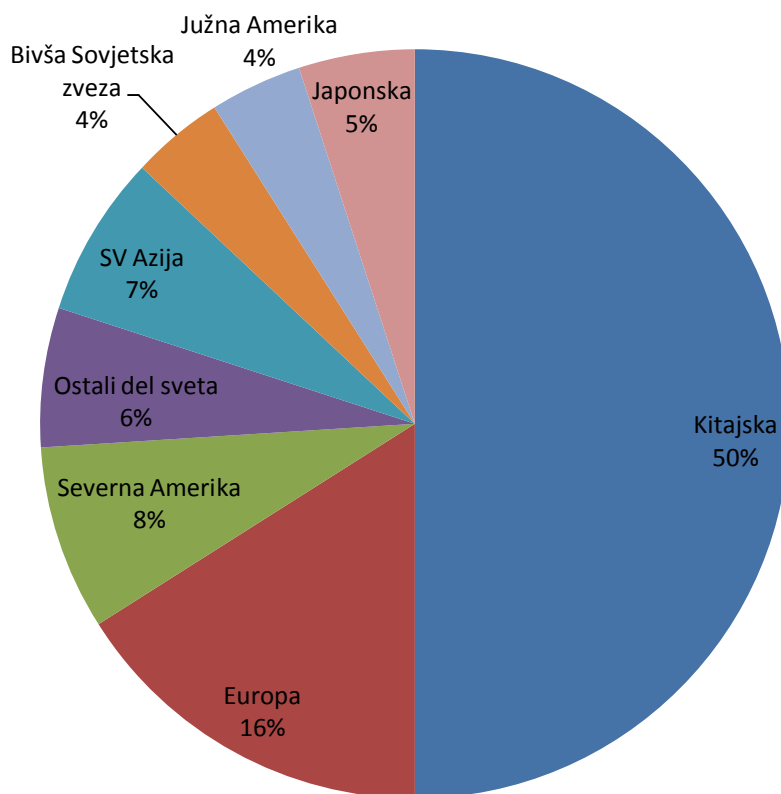
Grafikon 5: Trje najve ji proizvajalci visoko kakovostnega ravnega stekla na svetu, 2009



Grafikon 6: Svetovne kapacitete [ton] proizvajalcev visoko kakovostnega ravnega stekla, 2009

Generalni pregled porabe stekla

Na svetovnem trgu ravnega stekla je bilo v letu 2009 proizvedenega približno 50 milijonov ton. Pri tem so bile glavne Evropa, Kitajska in severna Amerika, ki so skupaj proizvedle ve kot 70 % od skupnega povpra- evanja. Pomemben delefl na trffi- u ima Kitajska, ki se zelo hitro razvija. V zgodnjih 90-ih letih je porabila približno eno petino proizvedenega svetovnega stekla, danes pa porabi skoraj 50 odstotkov (Grafikon 7).



Grafikon 7: Prikaz porabe ravnega stekla v drflavah na svetovnem trgu

4.3 Rast uporabe stekla v stavbah

Uporaba stekla v stavbah je odvisna od več dejavnikov:

Funkcija stavbe

Steklo je material, ki je vgrajen v več ino gradbenih objektov. Dejansko vsaka nova stavba potrebuje steklo. Nove stavbe in obnove obstoječih stavb zahtevajo vedno več količin steklenih proizvodov.

Arhitekturni trend

Arhitekti vedno bolj in bolj iščejo rešitve, da bi okoliki naravni faktor pripeljali v notranjost stavbe in pri tem maksimalno izkoristili naravno svetlobo. To se lahko doseže z uporabo velikih steklenih površin na fasadah ali strehah in z uporabo celotnih steklenih fasad, kjer je steklo konstrukcijski del stavbe. V bolj vročih klimatskih delih, kjer se uporabljajo velike površinske zasteklitve, je dobro uporabiti stekla s sonno zaščito, ki dovolijo vstop sonne svetlobe v stavbo in hkrati preprečijo njeno vstopno svetlobo.

Obnova stavb

Za obnovo stavb se po vsem svetu porabi približno 40% proizvedenega stekla. Na dobro razvitih trgih se okna in stanovanjske zgradbe v povprečju prenavljajo vsakih 10 do 20 let.

Energijska učinkovitost

Zadnjih 25 let so bolj razvite države, kot so Evropa, Japonska in Severna Amerika, ugotovile, da morajo nameniti več pozornost energijski učinkovitosti stekla in so hitro prišle iz enojne zasteklitve na dvojno. S tem se je tudi povečala proizvodnja stekla, saj za zasteklitev odprtine potrebujemo dvakrat več stekla.

S tem je naša panoga korak naprej, saj so se, zaradi klimatskih sprememb, rasti cene nafte in splošne skrbi za varčevanje z energijo, razvila nova toplotno-izolativna stekla, v mnogih Evropskih državah pa je takšna zasteklitev postala z zakonom obvezna. Po vsem svetu se povečuje zanimanje in investiranje držav za razvoj alternativnih energijskih virov, tudi solarnih. Zaradi tega se več pozornosti namenja razvoju stekla in hkrati se mu povečuje vrednost, saj ima na primer steklo *low-E* 40% večjo vrednost kot navadno ravno steklo. Steklo

low-E (low-emissivity) je ravno steklo, enostransko prekrito z nizko emisivnim prozornim slojem, ki pripomore k nižji toplotni prehodnosti stekla.

Zakonodaja

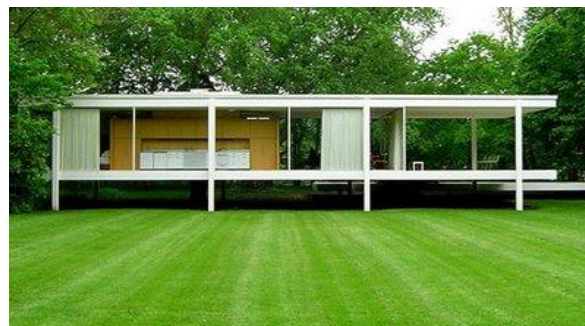
Stroški porabe energije v stavbah segajo približno do polovice vseh stroškov stavbe, kar je postalo tudi vodilo za usmerjanje pri pisanju zakonodaje. V Evropi so zastavljeni cilji zmanjšanja porabe energije za 20%, zmanjšanje toplogrednih plinov za 20% in proizvesti 20% energije iz obnovljivih virov. Spremenjena Evropska direktiva o energijski učinkovitosti stavb nalaga mnogo novih obveznosti državam članicam, med njimi tudi, da svojo zakonodajo prilagodijo vsaj vsakih pet let energijskim zahtevam stavb. Nadalje zahteva, da se vse nove stavbe v Evropi gradijo po zelo visokih standardih energijske učinkovitosti.

5 POMEN LAMELIRANEGA STEKLA ZA SODOBNO ARHITEKTURO IN GRADBENITMTVO

Revolucionarni dosefek se je zgodil leta 1949, ko je bila dokon ana stavba Philip Johnson's Glass House v New Canaan (ZDA). Prozorni paviljon je bil arhitekturni eksperiment v obliki, materialu, ideji in bistveni razliki od stavb, ki so jih gradili v tistem asu (Slika 13). Lahka streha je podprta z vitkim jeklenim okvirjem. Hkrati je dovolj mo na, da prenese vso obteflbo, vertikalno in horizontalno, ter dovolj vitka, da ne zakriva pogleda v notranjost stavbe. Prozorne steklene stene so uporabljene kot fizi na pregrada med okoli-ko naravo in notranjim bivalnim prostorom. V istem asu (leta 1951) je arhitekt Ludwig Mies van der Rohe oblikoval Farnsworth House v Planu (ZDA). Bivalni prostor, zaprt s istimi steklenimi paneli od tal do stropa, jasno lo ujeta dve horizontalni plasti, streha in tla (Slika 14). Stavba zgloda kot, da bi breztefnostno lebdela nad tlemi.



Slika 13: Glass House, New Canaan (ZDA)



Slika 14: Farnsworth House, Plano (ZDA)

Delo Johnson-a in van der Rohe-a je navdu-ilo –e mnoge kasnej-e arhitekthe. Sku-ali so oblikovati prozorne paviljone v fljji, da bi minimalizirali tefnostni vpliv konstrukcije in dosegli pravi vtis istosti in svetlosti stavbe. V sledenju temu trendu se je konec prej-njega stoletja pojavila ideja o odstranitvi vseh vertikalnih nosilnih okvirjev in uporabiti steklene stene, ne le kot pregrade med prostori ampak tudi kot primarni del konstrukcije, nosilni element zmofen prenesti dano obremenitev. Koncept o povsem prozornih paviljonih se je rodil leta 1991 s stavbo Rheinbach Glass Museum v Rheinbach-u (Nem ija), delo Juergen-a Marquardt-a. Steklene stene, ki so oblikovale fasado, postavljene v vrsto z nalogo, da

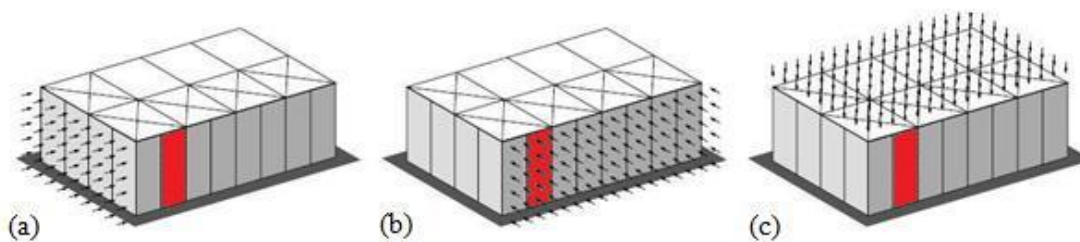
prenesejo obteflbo jeklene strehe in bo nega vetra, s pomo jo togega vpetja, na temelje (Slika 15).

Ne davno je bilo v Evropi zgrajenih ve povsem prozornih paviljonov kot na primer vhod v univerzitetni center Novartis v Basel-u (TMVica) (Slika 16). Zaradi pomanjkanja znanja in izku-enj, o obna-anju stekla pri konstrukcijskih zasteklitvah, so bili oblikovalci prisiljeni v raziskovanje in preskuse. Vsi ti postopki so terjali veliko asa, kar je hkrati povezano tudi z velikimi stro-ki.



Slika 15: Rheinbach Museum, Rheinbach (D) Slika 16: Univerz. center Novartis, Basel (CH)

Stekleni paneli so unikatni vertikalni konstrukcijski elementi, ki morajo podpirati in prenesti vso obteflbo stavbe (lastno, stalno in spremenljivo) na temelje ter prav tako stabilizirati in oja ati celotno stavbo oz. del nje. Posamezen stekleni panel je izpostavljen vzdolflni pre ni sili (stranski veter, potres), pre ni sili (veter pravokotno na panel) in osni tla ni sili (lastna tefla strehe, sneg) (Slika 17). Medtem, ko fle obstajajo raziskave o obna-anju stekla obremenjenega s pre no silo ó upogibna trdnost, se pripravljajo norme in standardi za na rtovanje tovrstnih objektov. Raziskave potekajo v zelo majhnem, omejenem obsegu za osno striflno in tla no obremenitev steklenih panelov.



Slika 17: Obteflba na posameznem steklenem panelu (obarvan rde e)

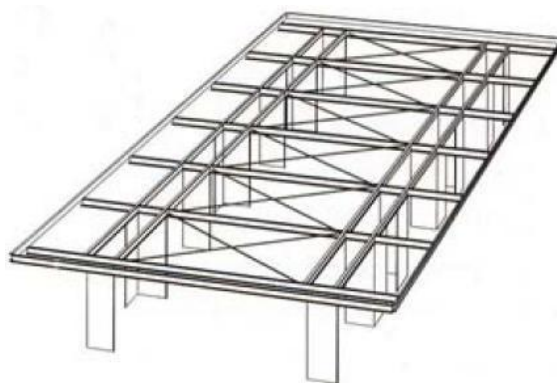
(a) vzdolflna pre na sila (b) pre na sila (c) osna tla na sila

5.1 Primeri povsem prozornih paviljonov

Ime povsem prozorni paviljon se uporablja, ko ima stekleni panel vlogo nosilnega in podpornega elementa vgrajenega v zgradbi, ki je brez jeklenih ali betonskih vertikalnih konstrukcijskih elementov. Arhitekturni in konstrukcijski izziv za na rtovanje tovrstnih steklenih stavb izhaja iz ideje, da bi se v konstrukciji odstranili vsi vidni vertikalni elementi in se uporabili vgrajeni stekleni paneli za prevzem vertikalne obteflbe in za stabilizacijo celotnega paviljona. Zaradi pomanjkanja znanja o uporabi stekla za nosilne dele konstrukcije, kot pomanjkanja analiti nih ali empiri nih re-itev o obna-anju stekla pod osno obremenitvijo, so povsem prozorne paviljone spremljale drage laboratorijske preiskave prototipov in asovno zamudno numerično modeliranje. V tem poglavju sta predstavljena dva konstrukcijska primera povsem prozornega paviljona.

Rheinbach glass museum paviljon, Rheinbach (Nem ija)

Novi paviljon na tehni ni univerzi v Reinbach-u so zgradili leta 1999 kot razstavni prostor ter prostor za seminarje in kongrese. Na rtoval ga je arhitekt Juergen Marquardt in gradbeni inženir Ludwig Ingenieure. Osem pravokotnih kvadrov, zgrajenih iz velikih steklenih panelov (vi-ine 3,80 m in -irine 1,25 m) oblikujejo fasado in imajo nalogo, da prikafjejo prostore ter podprejo skoraj 500 m² veliko jekleno streho (Slika 18). Streha izgleda kot, da bi lebdela nad razstavnim prostorom (Slika 19(a)).

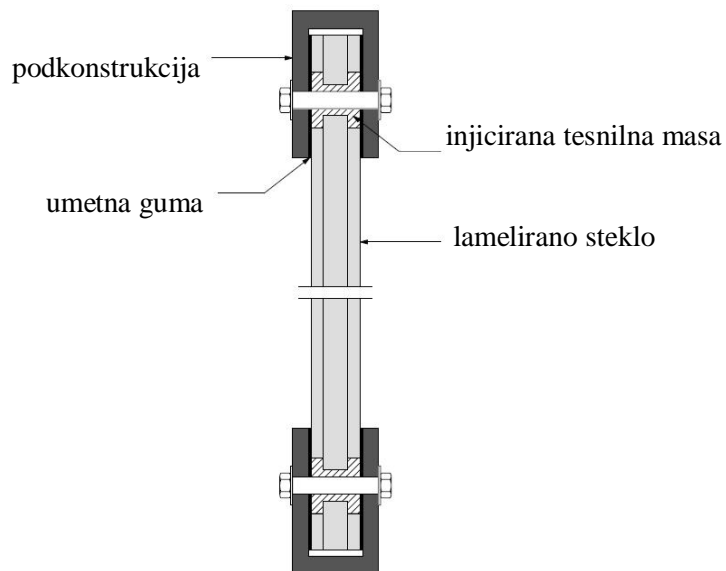


Slika 18: Jekleno streho podpira osem pravokotnih steklenih kvadrov

Steklene stene so sestavljene iz lameliranega tri slojnega stekla. Zunanja sta vsak iz 10 mm debelega toplotno utrjenega stekla, notranje je pa iz kaljenega stekla debeline 19 mm. Za lameliranje je bila uporabljena PVB folija debeline 1,52 mm. Pritrditev steklenega panela na podkonstrukcijo je prikazana na Sliki 19(b). Podkonstrukcija je spodaj skrita v temelje, zgoraj pa v streho in daje videz kot, da se steklo dviguje iz tal in izgine v strehi. Steklo je na podkonstrukcijo pritrjeno z vijaki. Prazen prostor med vijakom in steklom je zapolnjen z injicirano tesnilno maso, med podkonstrukcijo in steklom pa je name- ena umetna guma. Obteflba se prena-a od strehe, stekla in nato v temelje, preko stika podkonstrukcija - steklo. Stekljeni panel je spodaj, vzdoljno in pre no, togo pritrjen na plo- o.



(a)



(b)

Slika 19: Rheinbach glass museum paviljon, Rheinbach (Nem ija)

(a) pogled na paviljon (b) detajl stika podkonstrukcija ó steklo

Café Lichtblick, Innsbruck (Avstrija)

Na vrhu mestne hi-e v Innsbruck-u je arhitekt Dominique Perrault na rtoval Café Lichtblick (Slika 20(a)). Arhitekta je navdu-il 360 stopinjski pogled na Avstrijske Alpe, zato je zgradil paviljon iz nosilnih steklenih panelov brez vertikalne vidne podpore. Glede na obliko paviljona so bila uporabljena edinstvena ukrivljena lamelirana stekla, ki podpirajo streho. Steklene stene so bile na rtovane tako, da se jih polovica lahko odpre kot drsna vrata in hkrati -e vedno sluffijo kot podpora strehe (Slika 20(b)). Lahka streha je narejena iz tekstilne membrane, ki je napeta in pritrjena na jekleno podkonstrukcijo na vrhu steklenih panelov.

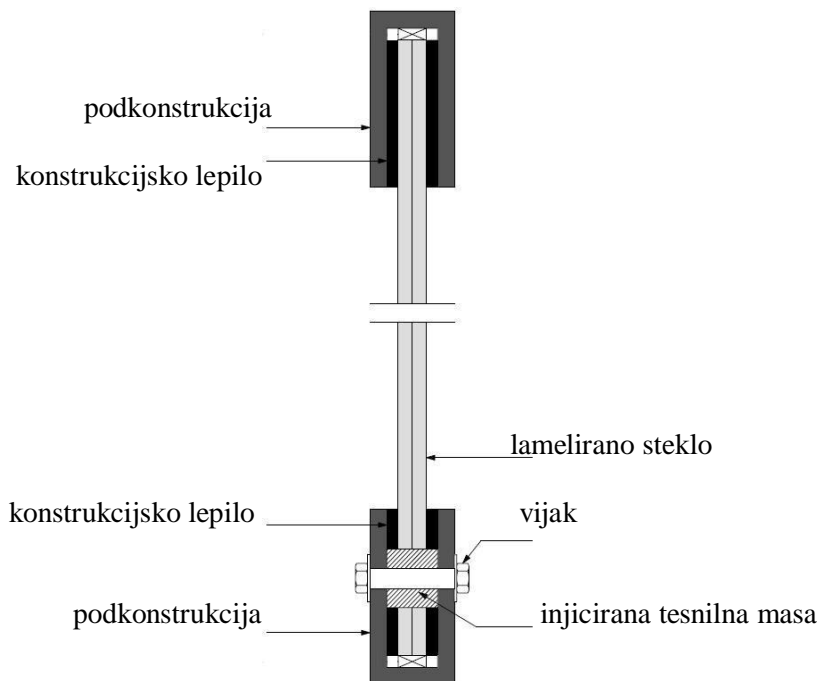


(a)



(b)

Slika 20: Café Lichtblick, Innsbruck (Avstrija), (a) pogled na paviljon,
(b) drsna nosilna steklena stena



Slika 21: Detajl stika podkonstrukcija - steklo

Uporabljeni sta bili dve plasti stekel, kjer je vsako debeline 10 mm in toplotno utrjeno. Lamelirano je z PVB folijo debeline 1,52 mm. Spodnji del steklenega panela je privija en na podkonstrukcijo, prostor med vijakom (M16) in izvrtino v steklu (premer 40 mm) je zapolnjen z injicirano tesnilno maso Hilti HIT HY 50 [Hilti 2003]. Aluminijasta podkonstrukcija je prilepljena na steklo s konstrukcijskim lepilom DC 983 [Dow Corning]. Zgornji del steklenega panela je druga e pritrjen kot spodnji. Zgoraj je aluminijasta podkonstrukcija le prilepljena na steklo s konstrukcijskim lepilom po vsej njeni dolflini, brez vijakov. Detajl je prikazan na Sliki 21.

6 LABORATORIJSKI PRESKUSI

Z laboratorijskimi preskusi smo fleleli izvedeti kako se obna-a vertikalno tla no obremenjen stekleni panel lameliran iz dveh 10 mm stekel toplotno utrjenih. Ideja je, da bi tak-en panel uporabili kot nosilni del konstrukcije ó na primer kot stena pri leseni monta-fni hi-i. Ker o steklu vemo zelo malo in je relativno malo raziskan, in da bi ugotovili kak-ne tla ne obremenitve prenese, do kak-ne vrste poru-itve pride, kako se obna-a v kombinaciji z lesom, skratka ali je steklo sploh primerno za tak-en namen, smo morali za eti z raziskavami na za etku. Prvi preskus lameliranega stekla je bil izveden po standardu SIST EN ISO 12543 s katerim smo ugotovili razliko med PVB (polyvinyl butyral) in EVA (ethylen vinyl acetate) folijo oz. smo poskusili dokazati, da je EVA folija bolj primerna za tak-ne vrste stekel. Nato so sledili upogibni preskusi s katerimi smo ugotavljali vpliv bru-enih robov stekla na upogibno trdnost. Poleg tega smo preskusili tudi vzorce iz lameliranega stekla, ki so bili predhodno fle presku-eni po standardu SIST EN ISO 12543 in smo bili predvsem pozorni na zdrs med stekli, ker nas je zanimalo, e so preskusi po tem standardu kaj vplivali na folijo.

Nato so sledili tla ni preskusi. Najprej preskus lameliranega stekla velikosti 300 x 300 mm (iz dveh 10 mm stekel, toplotno utrjenih) za ugotovitev tla ne nosilnosti samega stekla. Potem so pri-li na vrsto tla ni preskusi stekla z naleganjem v lesenih leffi-ih zgoraj in spodaj, pri katerih smo izvajali preskuse, ko enkrat steklo nalega pravokotno na lesena vlakna in drugi , ko nalega vzporedno s smerjo vlaken v lesu. S temi preskusi smo ugotovili obna-anje stekla in lesa ter kje so meje nosilnosti enega in drugega. S temi podatki smo se laffje pripravili za zadnji preskus v katerem smo uporabili stekleni panel, prav tako lameliran iz dveh 10 mm stekel toplotno utrjenih, velikosti 1250 x 2400 mm, v kombinaciji z lepljenim lesom. S tem zadnjim preskusom pa smo fleleli ugotoviti kak-no tla no silo prenese tak-en stekleni panel, do kak-nega uklona in do kak-ne poru-itve bo pri-lo ó stekla in/ali lesa. Pri dvoeta-fni leseni monta-fni hi-i je tla na obremenitev okoli 30 kN/m zunanje stene v pritli ju in to silo smo si fleleli prese i oz. dokazati, da jo je steklo sposobno prenesti.

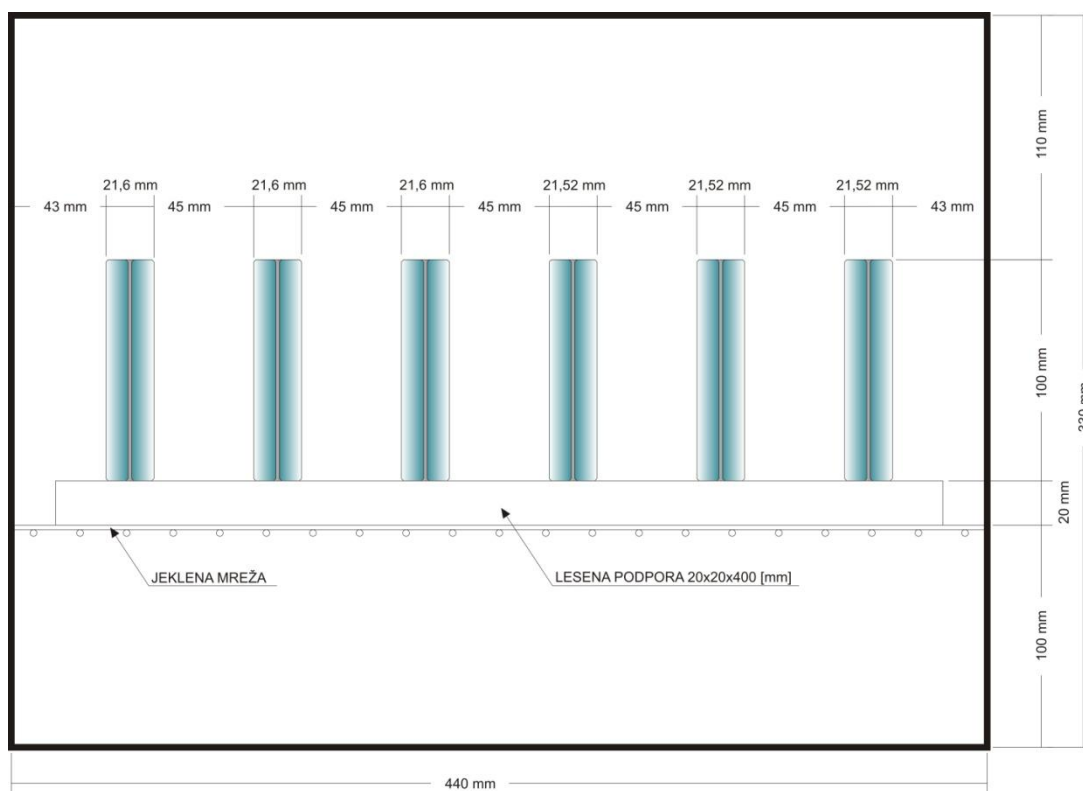
6.1 Izvajanje visoko temperaturnega preskusa

Visoko temperaturni preskus smo izvedli po standardu *SIST EN ISO 12543-4:1999 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 4. del: Metode presku-anja trajnosti*. S tem preskusom smo ugotavljali, e visoka temperatura kaj in kako vpliva na lamelirano steklo. Pri tem smo bili predvsem pozorni na delaminacijo, meglico v foliji in morebitne nastale mehur ke. Za preskus smo uporabili -est vzorcev velikosti 300 mm x 100 mm (Slika 22). Vsi so bili lepljeni iz dveh stekel debeline 10 mm s trapezno bru-enimi robovi. Od tega so bili trije vzorce lepljeni z EVASAFE folijo debeline 1,60 mm in trije z PVB folijo debeline 1,52 mm.

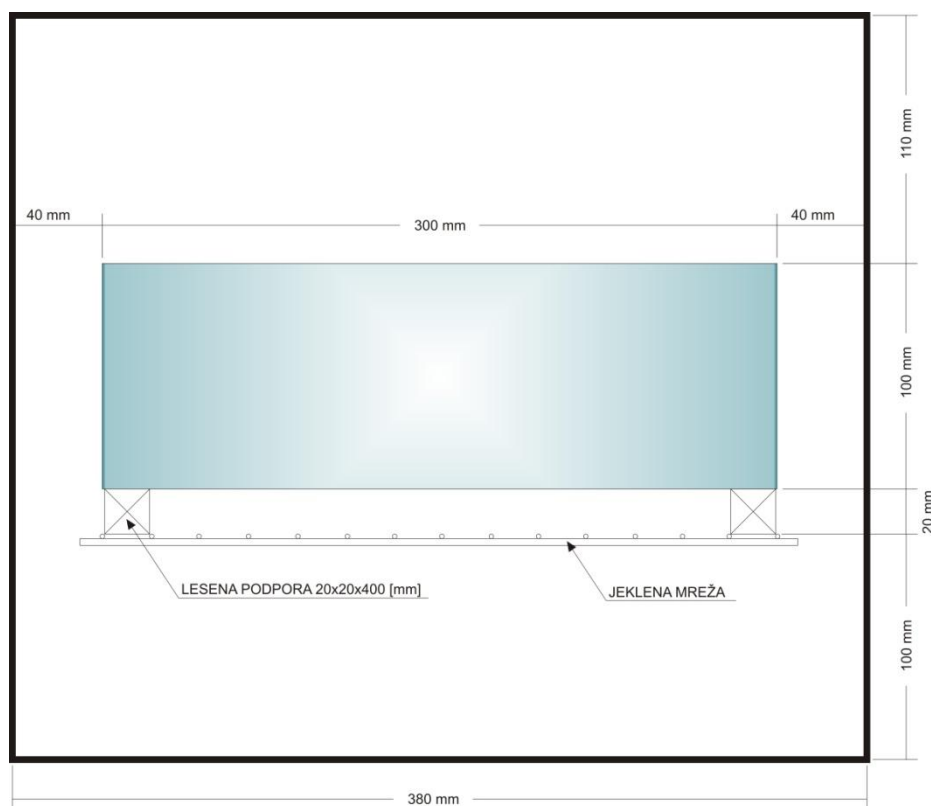
Preskus je potekal tako, da smo vzorce vstavili vertikalno v pe , razdalja med njimi je bila 45 mm. Nad in pod vzorci je bilo približno 100 mm prostora za krofljenje vro ega zraka (Slika 23). Za etna temperatura vzorcev in pe i je bila 22°C. Robovi so bili podprti z lesenimi podporami 20 mm x 20 mm (Slika 24(a)). Pe je dosegla temperaturo 100°C v asu 11 min, nato so bili vzorci na tej temperaturi 2 uri. Temperaturo v pe i smo kontrolirali vsakih 15 min z IR termometrom (FLUKE, 566 IR TERMOMETER ó (Slika 24(b)) in zabeleffili nihanje $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Po kon anem gretju so se vzorci -e 2 uri po asi ohlajali na sobno temperaturo.



Slika 22: Preskusni vzorec lepljen iz dveh 10 mm stekel velikosti 300 x 100 mm



(a)



(b)

Slika 23: Postavitev preskusnih vzorcev v pe i (a) pre ni pogled, (b) vzdoljni pogled

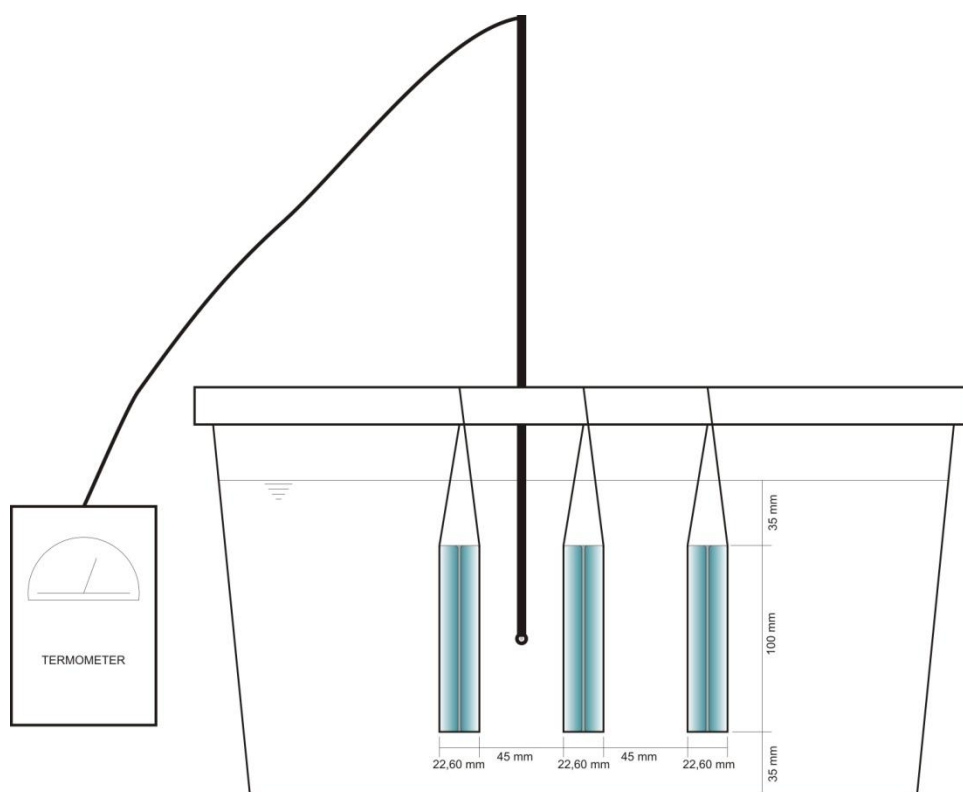


(a)

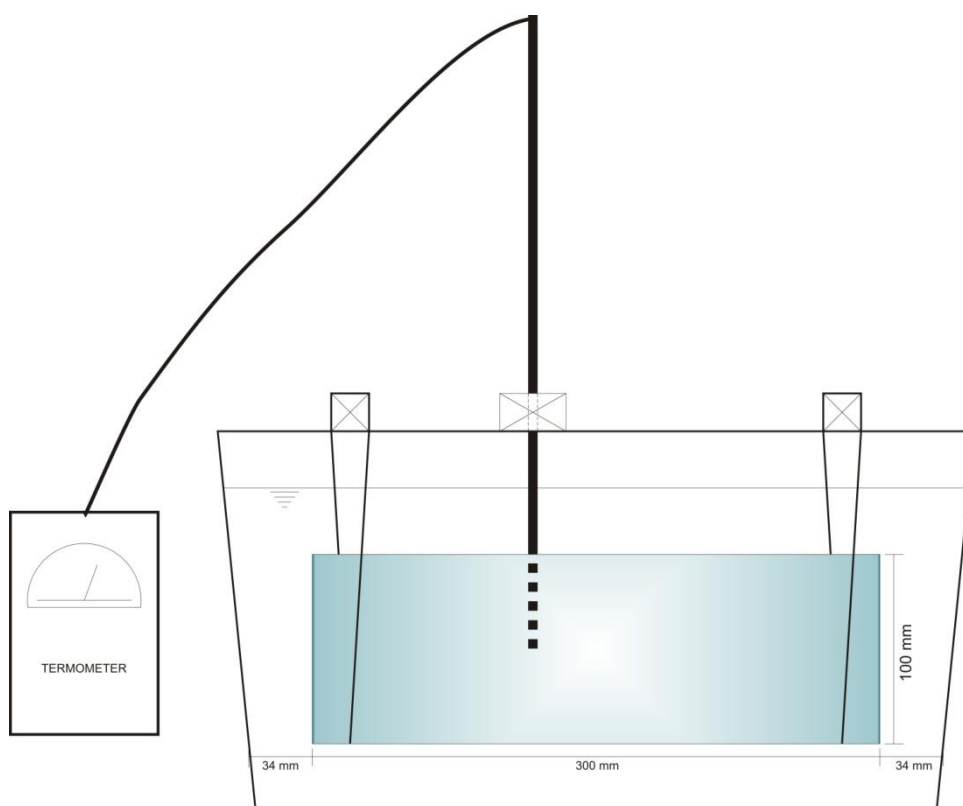
(b)

Slika 24: Visoko temperaturni preskus v pe i (a) preskusni vzorci, (b) IR termometer

Preskus smo nadaljevali z istimi vzorci. Njihova za etna temperatura je bila 22°C. Navezali smo jih na flico premera 2 mm in jih najprej za 5 min potopili v vodo s temperaturo 60°C (s tem smo prepre ili temperaturni -ok) nato pa -e za 15 min v vodo z 99°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) (Slika 26). Temperaturo vode smo merili z analognim termometrom s tipalom, temperaturo na vzorcih pa z IR termometrom (FLUKE, 566 IR TERMOMETER ó (Slika 24(b)). Temperatura izmerjena na vzorcih, med preskusom je bila 99°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). Vzorci so bili na medsebojni razdalji približno 45 mm, globina vrele vode pa je bila približno 170 mm (nad in pod vzorci cca. 35 mm) (Slika 25). Po kon anem preskusu smo po akali dve uri, da so se vzorci ohladili na sobno temperaturo. Potem pa smo vsakega posebej postavili vertikalno pred belo ozadje in ga iz razdalje 30 ó 50 cm opazovali in beleffili morebitne napake (Slika 27), ki bi nastale v foliji med preskusom (mehur ki, delaminacija, meglica). V nobenem od 6. vzorcev ni bilo opaziti sprememb. Po tem pregledu lahko zaklju imo, da spremembe temperature ne vplivajo na lamelirano steklo oz. da obe foliji ustrezata temu delu standarda.



(a)

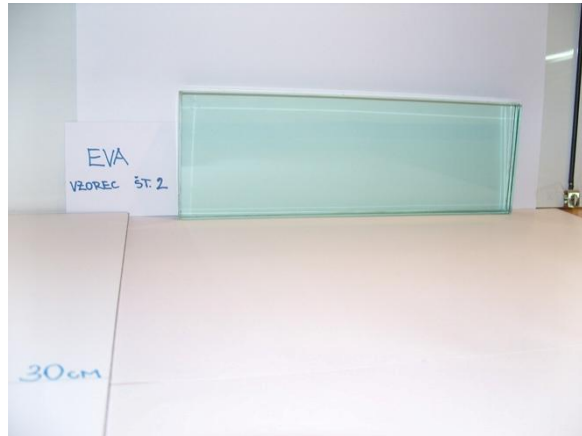


(b)

Slika 25: Postavitev poskusnih vzorcev v vodi, (a) pre ni pogled, (b) vzdoljni pogled



Slika 26: Vzorci med preskusom v vodi
s temperaturo 99 °C



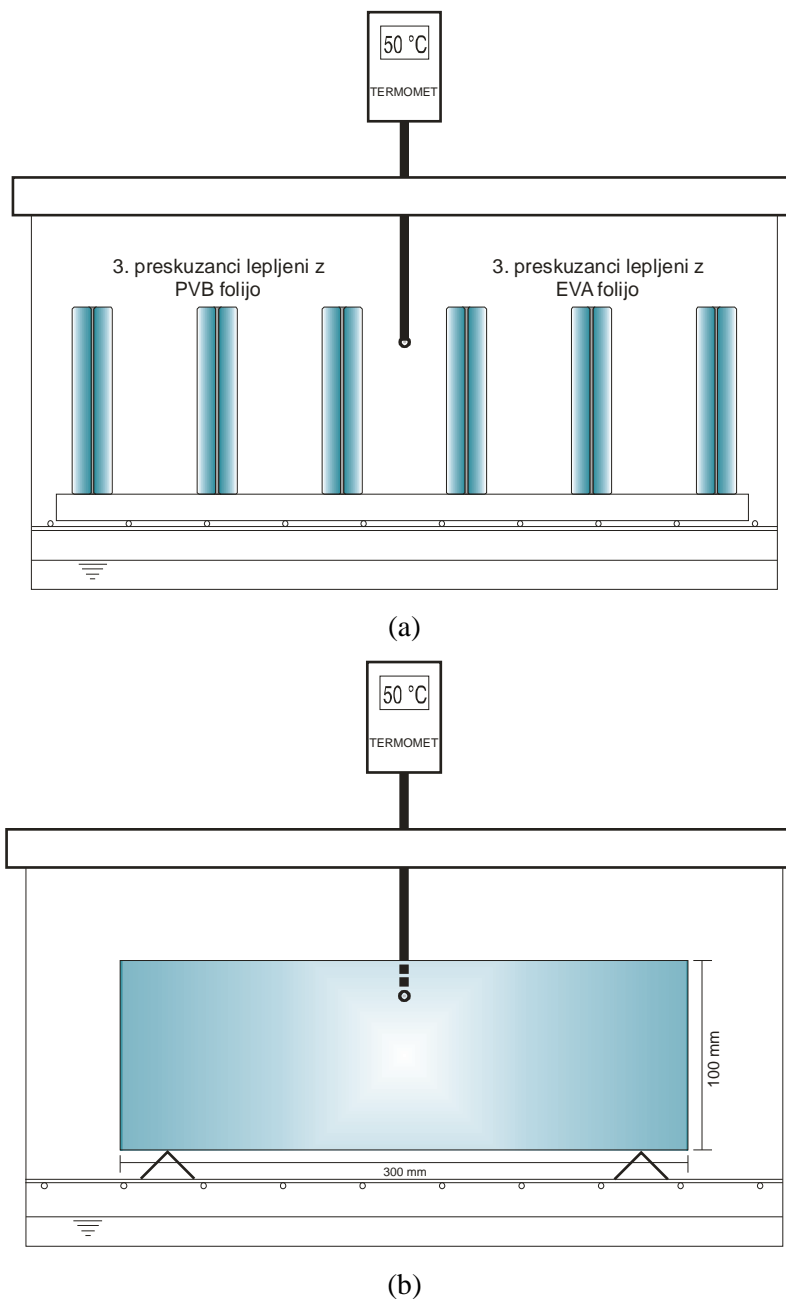
Slika 27: Končni pregled morebitnih
sprememb v vzorcih

6.2 Izvajanje vlahnostnega preskusa s kondenzacijo

Vlahnostni preskus s kondenzacijo smo izvedli po standardu *EN ISO 12543-4:1999 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 4. del: Metode preskušanja trajnosti*. S preskusom smo hoteli dokazati, da je PVB folija res bolj higroskopna kot EVA, kot naj bi bilo splošno znano. To pomeni, da absorbira molekule vode iz zunanjega okolja in jih veče nase. Absorpcija vodnih molekul v PVB folijo med stekli povzroči delaminacijo ali meglico v foliji na robovih lameliranega stekla, zato takšna stekla niso primerna tam, kjer so izpostavljena vremenskim vplivom oz. nimajo zaščitnih robov proti njim medtem, ko je EVA folija odporna na te vplive. Uradnih podatkov o tem od proizvajalcev nismo pridobili, zato smo sami preverili trditve s preskusom.

Za preskus smo uporabili šest vzorcev velikosti 300 mm x 100 mm (Slika 22). Vsi so bili lepljeni iz dveh stekel debeline 10 mm s trapezno brušenimi robovi. Od tega so bili trije vzorci lepljeni z EVASAFE folijo debeline 1,60 mm in trije z PVB folijo debeline 1,52 mm. Preskus je potekal v komori, kamor smo vertikalno vstavili vzorce. Razdalja med njimi je bila 50 mm (Slika 28), za etna temperatura pa 20°C. Vzorce so bili postavljeni nad segreto vodo, ki je oddajala toploto v komoro, kjer je imel zrak okoli preskušancev temperaturo 50°C. S temi pogoji smo dosegli kondenzacijo, ki se je videla v obliki vodnih kapljic na površini stekla. Robovi so bili podprti s podporami iz aluminijastih L profilov velikosti 20 mm x 20 mm. Preskušanci so bili pod konstantnimi pogoji v komori dva tedna. Temperaturo v pe i

smo kontrolirali z digitalnim termometrom s tipalom. Po kon anem gretju so se vzorci po asi ohlajali na sobno temperaturo.

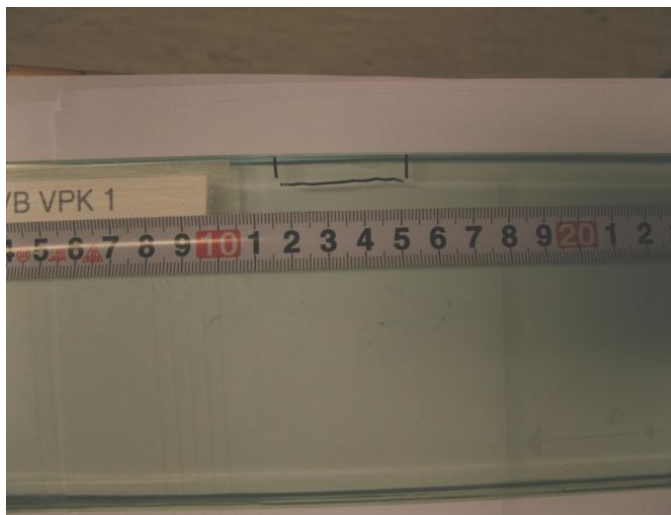


Slika 28: Postavitev preskusnih vzorcev v komoro, (a) pre ni pogled, (b) vzdoljni pogled

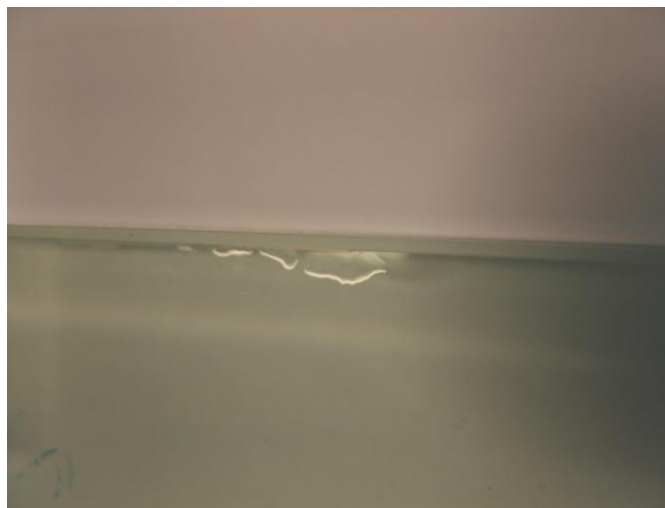
Nato smo presku-ance vsakega posebej postavili vertikalno pred belo ozadje in ga iz razdalje 30 ó 50 cm opazovali in beleffili morebitne napake, ki bi nastale v foliji med preskusom (mehur ki, delaminacija, meglica).

Sprememba je bila vidna v dveh od –estih vzorcev, kjer je pri–lo do delaminacije (Slika 29(b)), kar pomeni, da je folija odstopila od stekla. V obeh primerih je bilo steklo lepljeno z PVB folijo. Delaminacija je bila velikosti približno 3 mm x 20 mm na enem presku–ancu in 4 mm x 10 mm na drugem. Pojavila se je na robu in približno na polovici dalj–e stranice presku–anca ó 300 mm dalj–a stranica (Slika 29(a)).

Rezultat nas ni presenetil, ko je pri–lo do delaminacije PVB folije s steklom. S tem preskusom smo dokazali, da je PVB folija res higroskopen material, ki veffe vlago nase. Nasprotno pa je z EVA folijo pri kateri ni bilo opaziti sprememb po kon anem preskusu.



(a)



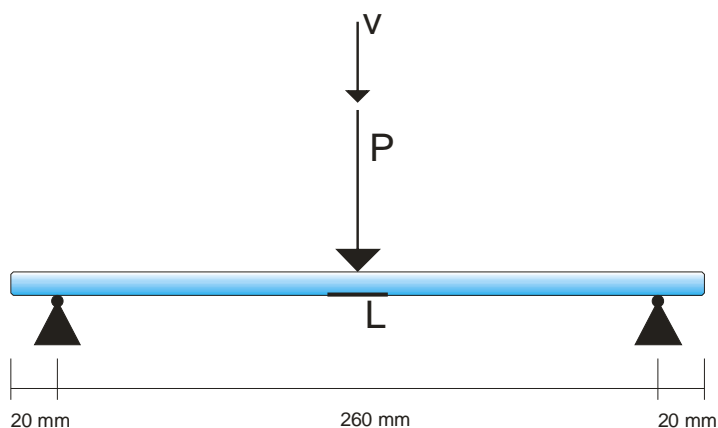
(b)

Slika 29: Vidna delaminacija na presku–ancu, (a) na robu in približno na polovici dalj–e stranice, (b) delaminacija velikosti 3 mm x 20 mm

6.3 Izvajanje upogibnega preskusa

6.3.1 Upogibni preskus enojnega ravnega stekla

Upogibno smo preskusili sedem presku-ancev stekla debeline 10 mm, kjer so bili trije samo rezani (oster rob z majhnimi razpokami) in -tirje s poliranimi trapezno bru-enimi robovi. Namen preskusa je ugotoviti vpliv bru-enih robov stekla na upogibno trdnost. Pri preskusu smo merili deformacije na spodnji povr-ini stekla ó L (natezna stran), pomik oz. povese le tega na sredini in silo (Slika 30), ki je bila vodena s pomiki po 0,03 mm/s, monotono nara- ajo e.



Slika 30: Skica postavitve podpor na presku-anec in merjenje sile P , pomika V in deformacij

Rezultati preskusa

Rezultati preskusa so predstavljeni v dveh preglednicah iz katerih lahko razberemo to ne vrednosti pri najve- ji sili. Nato so pa rezultati predstavljeni -e v dveh grafikonih in sicer v prvem odnos med silo in pomikom, v drugem pa odnos med napetostmi in deformacijami.

Preglednica 5: Rezultati upogibnega preskusa ravnega rezanega stekla

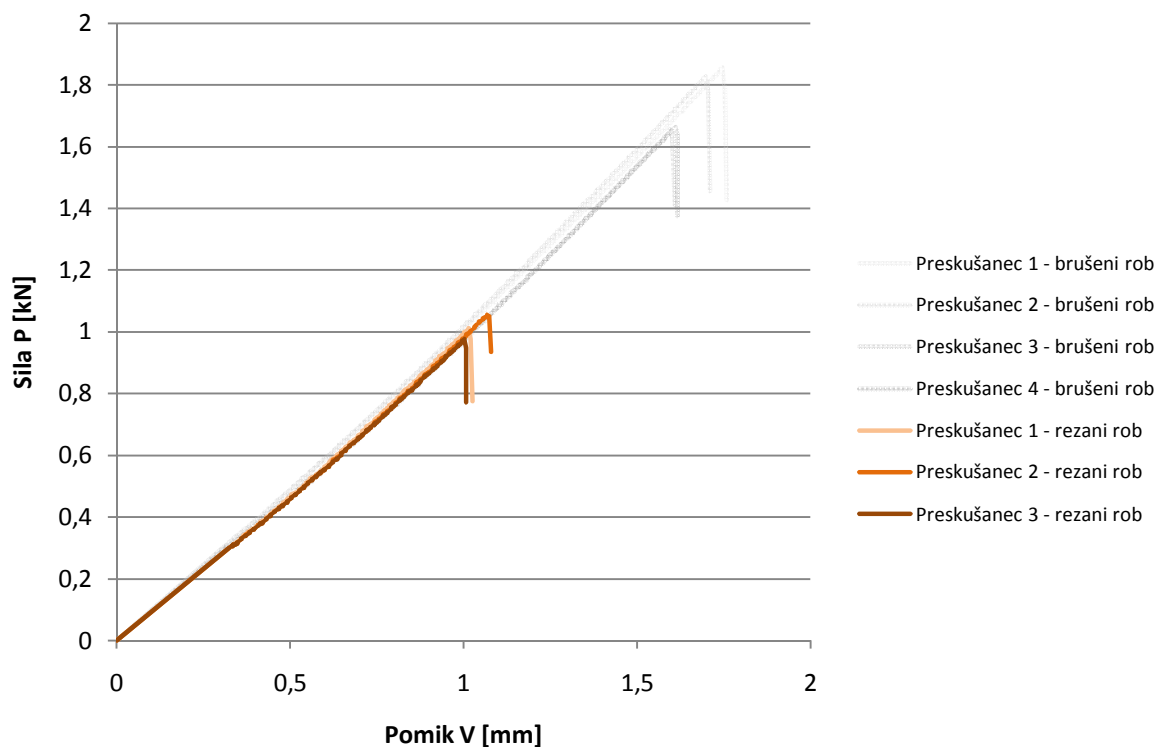
Preskušane	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	ϵ_{max} [‰]	σ_{max} [kN/cm ²]
1	1,012	1,014	0,565	3,947
2	1,056	1,068	0,605	4,118
3	0,976	1,002	*	*
povprečje	1,015	1,028	0,585	4,033

* podatkov za 3. presku-anec o deformacijah ni, ker niso bile merjene, saj so bili rezultati pri prvih dveh blizu skupaj

Preglednica 6: Rezultati upogibnega preskusa ravnega stekla z bru-enimi robovi

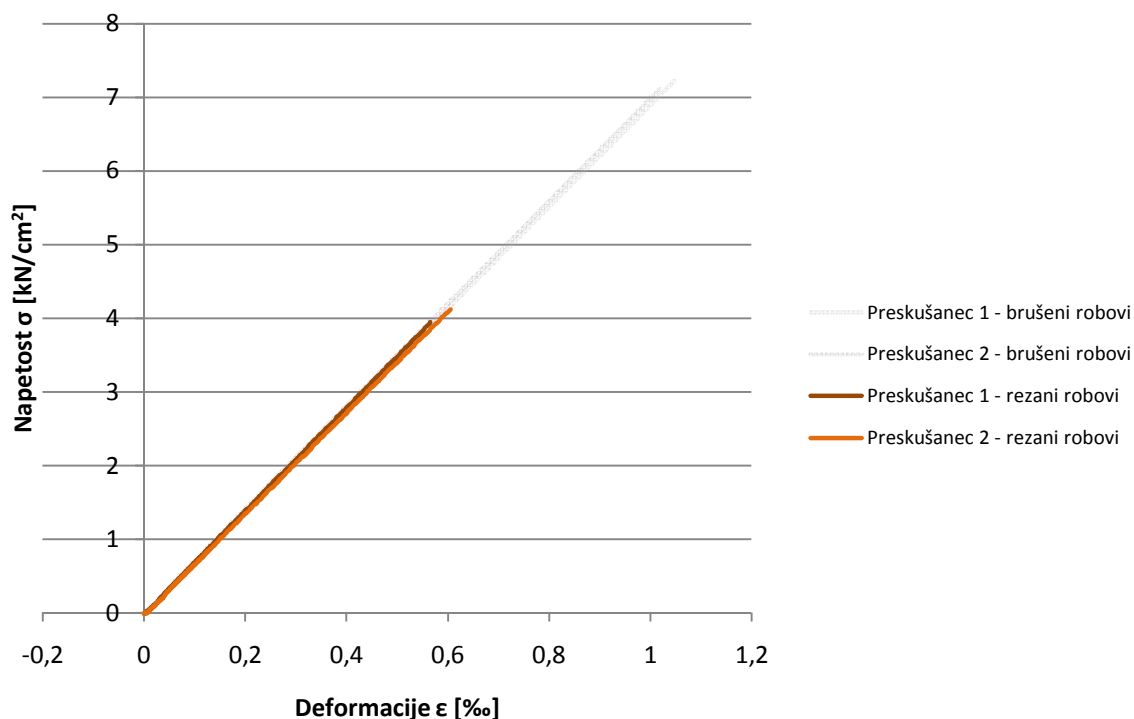
Preskušaneec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	δ_{max} [‰]	σ_{max} [kN/cm ²]
1.	1,856	1,746	1,047	7,238
2.	1,828	1,698	1,018	7,129
3.	1,656	1,596	*	*
4.	1,664	1,611	*	*
povprečje	1,751	1,663	1,033	7,184

* ni podatkov, ker niso bili merjeni med preskusom



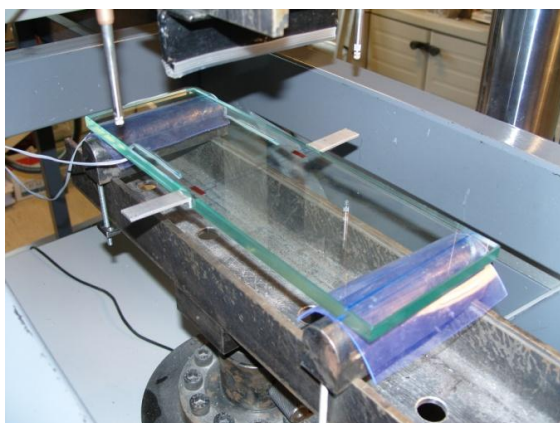
Grafikon 8: Prikaz sile P [kN] v odvisnosti od pomika V [mm]

Iz Grafikona 8 je razvidno, da so se preskušanece z rezanimi/ostrimi robovi porušili pri vrednosti pomika $V \sim 1$ mm (razdalja med podporami 260 mm), kar pa je veliko nižja vrednost kot pri preskušaneceh z bru-enimi robovi (porušitev pri $\sim 1,7$ mm). Pri vsaki skupini posebej je opaziti podobne vrednosti sila ó pomik, kar smo tudi pri akovali, saj je steklo izredno homogen material.

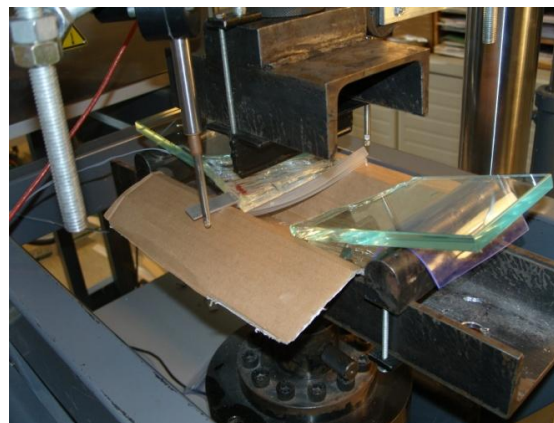


Grafikon 9: Prikaz napetosti [kN/cm²] v odvisnosti od deformacij [‰]

Rezultati preskusa so nam pokazali, da je steklo z rezanimi/ostrimi robovi doseglo ~56% vrednosti deformacij pri poru-itvi glede na steklo z bru-enimi robovi. Naklon premic je pri vseh presku-ancih podoben (minimalna odstopanja), zato lahko po linearni zvezi med napetostmi in deformacijami izra unamo modul elasti nosti stekla ~70 000 MPa ($E_{steklo} = /$).



(a)



(b)

Slika 31: Presku-anec pri upogibnem preskusu, (a) pozicioniranje presku-anca, (b) poru-itev presku-anca

Z upogibnim preskusom stekla smo dokazali, da je obdelava robov zelo pomembna za natezno trdnost stekla. Rezano steklo ima veliko majhnih razpok na robu, ki predstavljajo nevarnost loma stekla fle pri manj-ih obremenitvah. Z bru-enjem in poliranjem robov stekla pa le-te odstranimo oz. jih zmanj-amo in zgladimo.

6.3.2 Upogibni preskus lameliranega stekla

Namen tega preskusa je bil ugotoviti kako temperaturni -ok oz. vlafnost vpliva na folijo pri povesu ó zdrs med stekli. Upogibno smo preskusili petindvajset vzorcev lepljenega stekla (Preglednica 7). Trinajst vzorcev je bilo lepljenih z PVB folijo (1,6 mm) in dvanajst z EVASAFE folijo (1,52mm). Od tega jih je bilo sedem -e predhodno presku-enih z visoko temperaturnim preskusom (glej poglavje 6.1) in -est z vlafnostnim preskusom s kondenzacijo (glej poglavje 6.2). Stekla so bila lepljena iz dveh stekel debeline 10 mm in z bru-enimi robovi. Med preskusom smo merili pomik na sredini - povs stekla, deformacije na spodnji povr-ini (natezna stran), zdrs med stekli in silo, ki je delovala pre no na sredini stekla (Slika 32). Vodena je bila po pomiku 0,03 mm/s, monotono nara- ajo a.

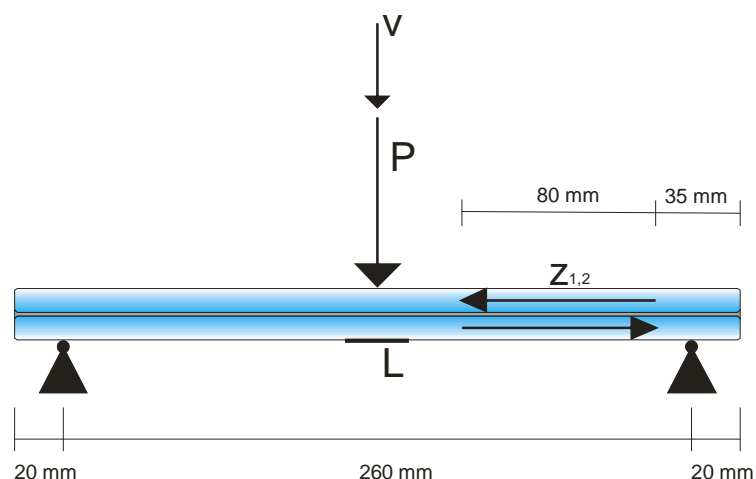
Preglednica 7: TMtevilo preskusnih vzorcev lameliranega stekla za upogib

Folija Steklo	OBI AJNA	VTP	VPK
10+PVB 1,52mm+10	6	4	3
10+EVA 1,6mm+10	6	3	3

OBI AJNA í lepljeno steklo s PVB ali EVA folijo

VTP í lepljeno steklo s PVB ali EVA folijo, predhodno presku-eno z *Visoko temperaturnim preskusom*

VPK í lepljeno steklo s PVB ali EVA folijo, predhodno presku-eno z *Vlafnostnim preskusom s kondenzacijo*



Slika 32: Skica postavitve podpor presku-anca in merjenje sile P , pomika V , deformacij in zdrsa med stekli z

Rezultati preskusa

Rezultati preskusa so predstavljeni spodaj v estih preglednicah. Iz vsake preglednice lahko natan no od itamo vrednosti povesa - pomika V , deformacij , zdrsa z in napetosti pri najve ji sili P_{max} . Najve ja sila je sila, ki je bila dosefena tik pred poru-itvijo presku-anca. Predstavljeni so pa tudi grafikoni *napetost - deformacija* posebej za »obi ajne« presku-ance, presku-ance predhodno presku-ene z *visoko temperaturnim preskusom* in tiste predhodno presku-ene z *vlafnostnim preskusom s kondenzacijo*. Na koncu pa je tudi primerjalna tabela zdrsov za posamezno skupino presku-ancev.

Preglednica 8: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo

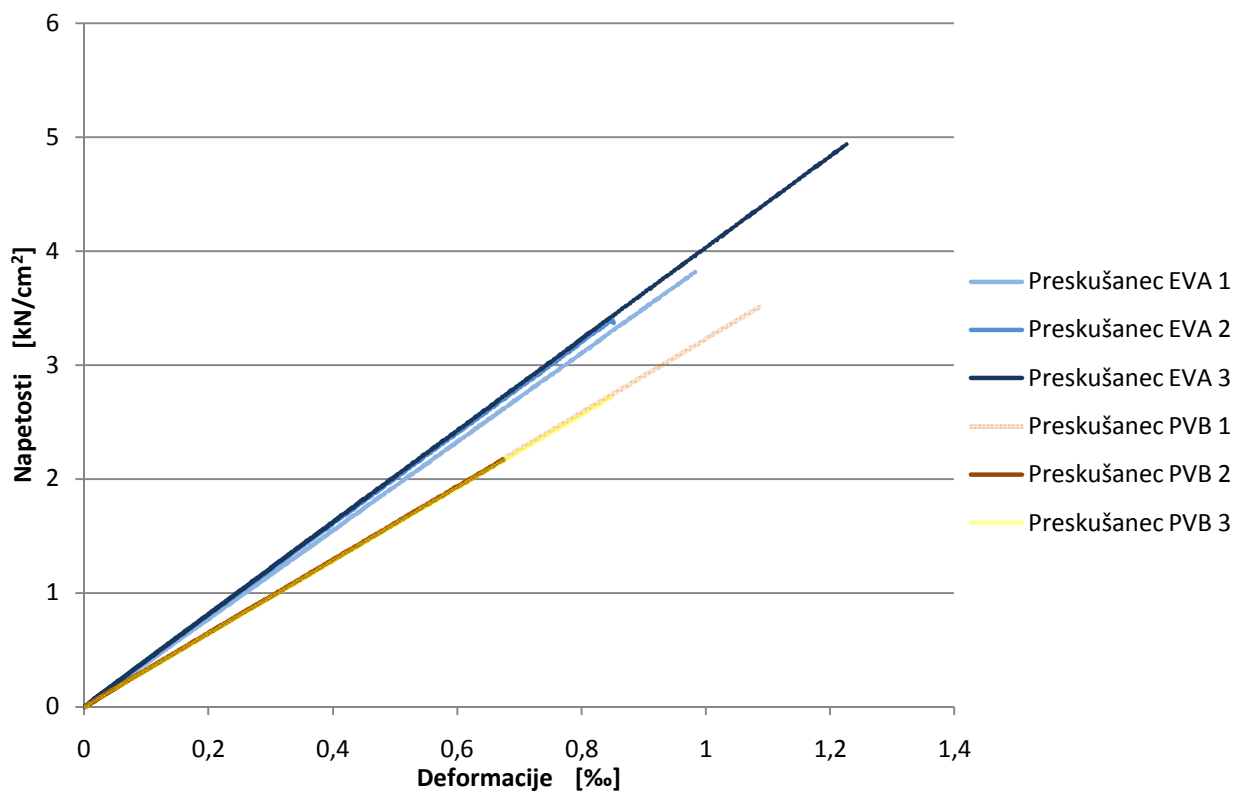
Presku-aneč	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	ϵ_{max} [‰]	z_{max} [mm]	[kN/cm ²]
PVB 1	4,168	2,244	1,087	*	3,484
PVB 2	2,58	1,467	0,674	*	2,157
PVB 3	3,236	1,768	0,847	*	2,705
PVB 11	3,42	1,747	*	0,011	/
PVB 22	3,48	1,727	*	0,063	/
PVB 33	3,56	1,776	*	0,015	/
povpre je	3,407	1,788	0,869	0,030	2,782

* ni podatkov, ker niso bili merjeni med preskusom

Preglednica 9: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVASAFE folijo

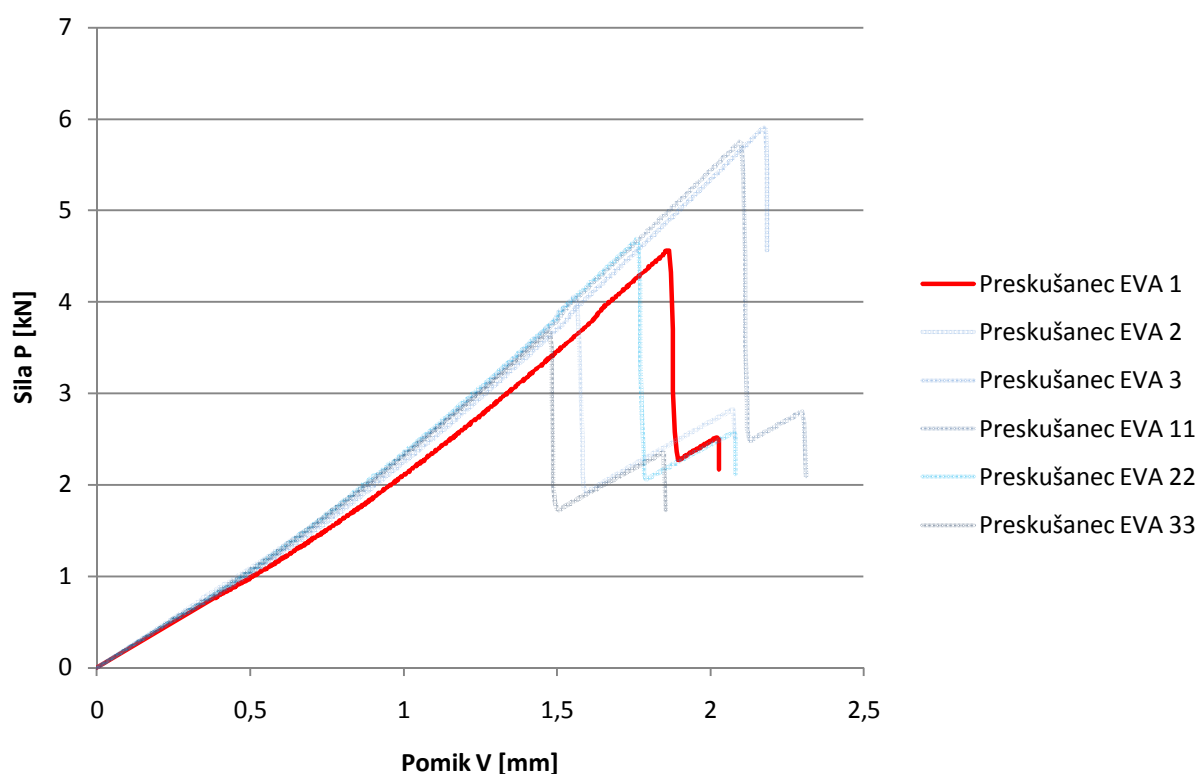
Preskušaneec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	\ddot{Y}_{max} [mm]	z_{max} [mm]	[kN/cm ²]
EVA 1	4,564	1,865	1,001	*	3,815
EVA 2	4,06	1,558	0,852	*	3,394
EVA 3	5,908	2,173	1,227	*	4,939
EVA 11	5,752	2,095	*	0,008	/
EVA 22	4,688	1,759	*	0,013	/
EVA 33	3,668	1,476	*	0,003	/
povpre je	4,773	1,821	1,027	0,008	4,049

* ni podatkov, ker niso bili merjeni med preskusom



Grafikon 10: Prikaz napetosti [kN/cm²] v odvisnosti od deformacij [mm] za preskušance lepljene z EVASAFE folijo in PVB folijo

Na Grafikonu 10 je prikazan odnos med napetostmi in deformacij iz katerega je razvidno, da so presku-anci lepljeni z PVB folijo dosegli niŒje vrednosti pri poru-itvi kot presku-anci lepljeni z EVASAFE folijo. Na ta rezultat je bistveno vplivala kvaliteta stekla in ne folija. Presku-anci lepljeni z EVASAFE folijo in tisto lepljeno z PVB folijo niso bili od istega proizvajalca stekla.



Grafikon 11: Prikaz sile P [kN] v odvisnosti od pomika V [mm] za presku-ance lepljene z EVASAFE folijo

Na Grafikonu 11 je prikazan odnos sile P z pomikom V (povesom), kjer se lepo vidi skok sile (glej na primer presku-ane EVA 1 ó rde e obarvan) iz najve je doseŒene pade do neke vrednosti nato pa za ne ponovno nara-ati do poru-itve. To se pojavi, ker je presku-ane lepljen iz dveh stekel in pride najprej do poru-itve spodnjega stekla (v nateznem obmo ju) nato pa nekaj sile prenese -e zgornje steklo (v tlalnem obmo ju) do poru-itve le-tega. Presku-ane 3 pa nima skoka sile, ker sta se poru-ila oba stekla hkrati. Podoben rezultat je pri vseh presku-ancih pri tem preskusu, zato niso prikazani vsi grafikoni.

Preglednica 10: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo, predhodno presku-eno z *Visoko temperaturnim preskusom*

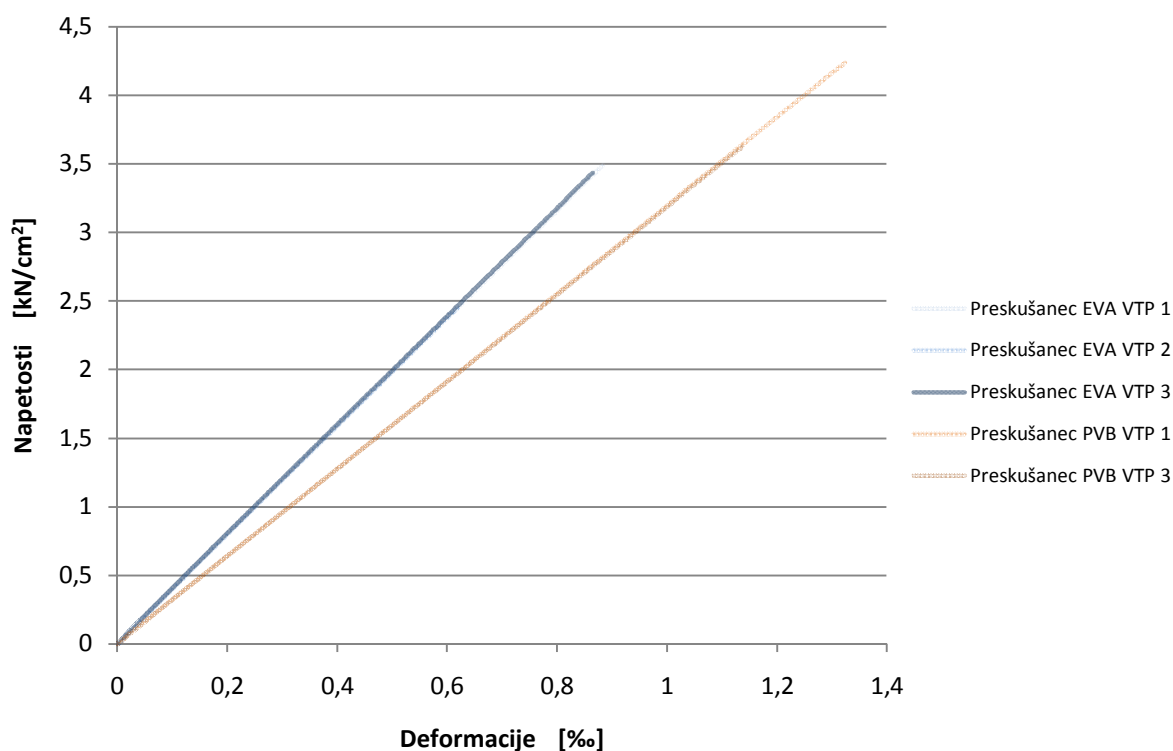
Presku-anec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	\ddot{Y}_{max} [Y]	z_{max} [mm]	[kN/cm²]
PVB VTP 1	5,032	2,43	1,324	*	4,206
PVB VTP 3	4,304	2,136	1,137	*	3,598
PVB VTP 4	3,132	1,706	*	0,04	/
PVB VTP 5	2,416	1,395	*	0,018	/
<i>povpre je</i>	<i>3,721</i>	<i>1,917</i>	<i>1,231</i>	<i>0,029</i>	<i>3,902</i>

* ni podatkov, ker niso bili merjeni med preskusom

PVB VTP 2 manjka, ker je bilo steklo po-kodovano pred preskusom in zato rezultati niso primerljivi

Preglednica 11: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVA folijo, predhodno presku-eno z *Visoko temperaturnim preskusom*

Presku-anec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	\ddot{Y}_{max} [Y]	z_{max} [mm]	[kN/cm²]
EVA VTP 1	4,188	1,73	0,916	0,086	3,501
EVA VTP 2	2,932	1,314	0,619	0,041	2,451
EVA VTP 3	4,12	1,659	0,865	0,063	3,343
<i>povpre je</i>	<i>3,747</i>	<i>1,568</i>	<i>0,800</i>	<i>0,063</i>	<i>3,098</i>



Grafikon 12: Prikaz napetosti [kN/cm²] v odvisnosti od deformacij [%] za preskušaneč lepljene z EVASAFE in PVB folijo, predhodno preskušaneč z visoko temperaturnim preskusom

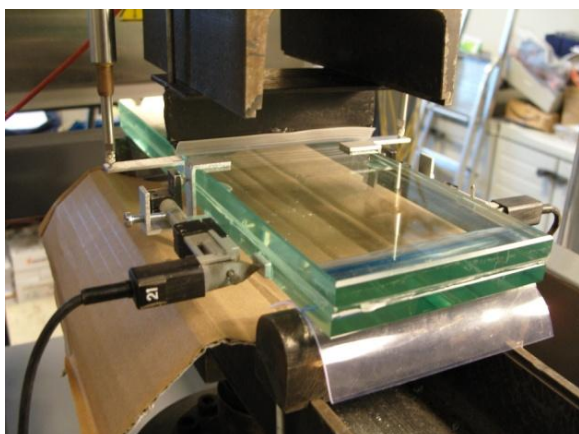
Na Grafikonu 12 so prikazane napetosti v odvisnosti od deformacij za vseh pet preskušanečev lepljenih z EVA in PVB folijo ter predhodno preskušanih z visoko temperaturnim preskusom. Opaziti je, da so rezultati, vsake skupine preskušanečev posebej, zelo skupaj. Razlika je pri deformacijah oz. napetostih pri poru-itvi ter v naklonu premic vsake skupine. Razlika v naklonu se pojavi zaradi razli ne kvalitete stekla, saj so bili preskušanci lepljeni z EVASAFE folijo iz stekla drugega proizvajalca, kot tisti lepljeni z PVB.

Preglednica 12: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla s PVB folijo, predhodno presku-eno z *Vlafhostnim preskusom s kondenzacijo*

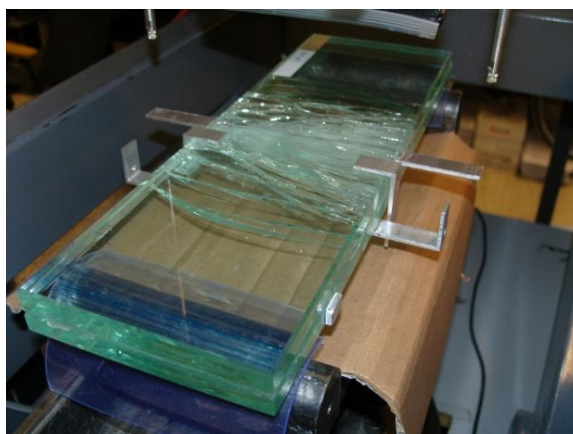
Presku-anec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	z_{max} [mm]
PVB VPK 1	3,532	1,923	0,031
PVB VPK 3	4,112	2,133	0,04
PVB VPK 4	2,948	1,644	0,009
<i>povpre je</i>	<i>3,531</i>	<i>1,900</i>	<i>0,027</i>

Preglednica 13: Rezultati upogibnega preskusa lepljenega stekla z EVA folijo, predhodno presku-eno z *Vlafhostnim preskusom s kondenzacijo*

Presku-anec	P_{max} [kN]	V_{max} [mm]	z_{max} [mm]
EVA VPK 1	3,404	1,536	0,011
EVA VPK 2	4,088	1,736	0,005
EVA VPK 3	3,36	1,478	0,012
<i>povpre je</i>	<i>3,617</i>	<i>1,583</i>	<i>0,009</i>



(a)



(b)

Slika 33: Lameliran presku-anec pri upogibnem preskusu, (a) pozicioniranje presku-anca, (b) poru-itev presku-anca

Primerjalna preglednica

Preglednica 14: Rezultati povpre nih vrednosti zdrsov z_{max} [mm]
med stekli pri upogibnem preskusu

Presku-anec	z_{max} [mm]	Presku-anec	z_{max} [mm]
PVB	0,030	EVA	0,008
PVB VTP	0,029	EVA VTP	0,063
PVB VPK	0,027	EVA VPK	0,009

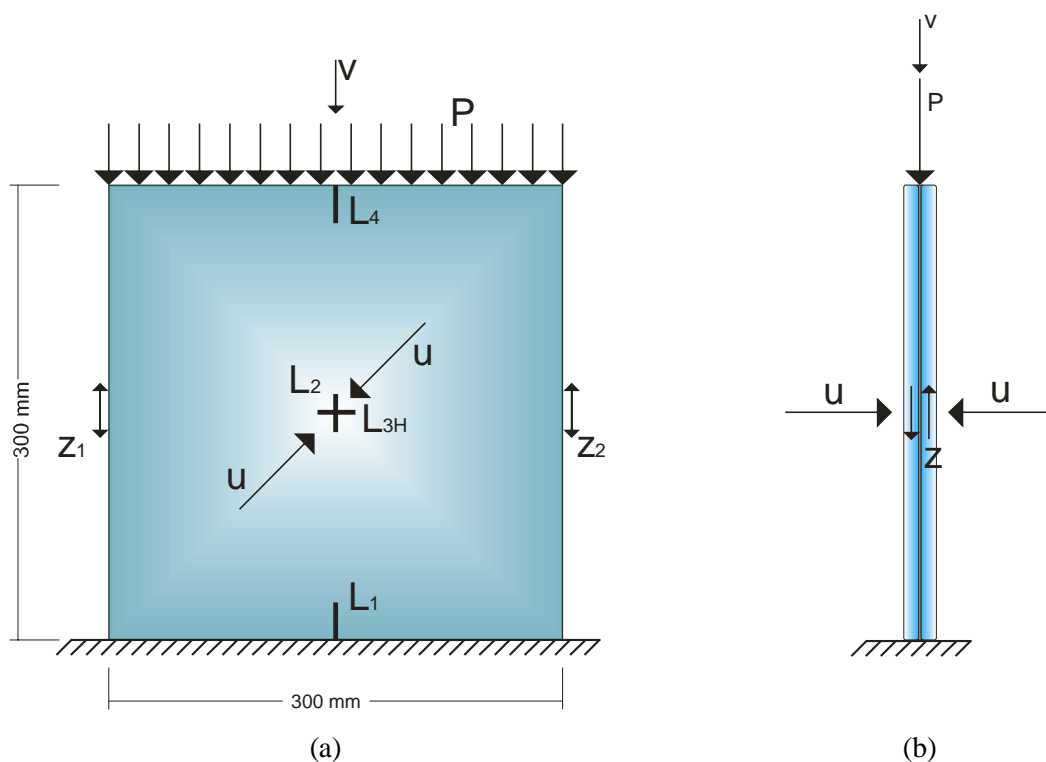
Glede na rezultate v primerjalnih preglednicah lahko vidimo, da na PVB folijo ni vplival ne *Visoko temperaturni preskus* in ne *Vlafnostni preskus s kondenzacijo*, saj so rezultati v vseh treh primerih povsem skupaj. Pri EVASAFE foliji pa je opaziti vpliv *Visoko temperaturnega preskusa*, saj je bil pri tem zdrs ~8 krat ve ji kot pri ostalih dveh. e odmislimo zdrs zaradi *Visoko temperaturnega preskusa* pri EVASAFE foliji vidimo, da je zdrs pri PVB foliji priblifno 3 krat do 4 krat ve ji kot pri EVA. Iz tega lahko sklepamo, da je PVB bolj elasti na ali pa da ima slab-o lepljivost s steklom v primerjavi z EVASAFE folija.

6.4 Izvajanje tla nega preskusa

6.4.1 Tla ni preskus stekla

S preskusom želimo ugotoviti tla no nosilnost lepljenega, toplotno utrjenega stekla. Z rezultati tega preskusa smo lažje predvideli kaj se bo dogajalo z nadaljnjiimi tla nimi preskusi, kjer bo steklo v kombinaciji z lesom. Predvideli smo lahko ali se bo med kasnej-imi preskusi poru-ilo najprej steklo ali les.

Za tla ni preskus samega stekla smo uporabili tri presku-ance iz dveh 10 mm debelih stekel, toplotno utrjenih in lepljenih z EVASAFE folijo debeline 1,6 mm. Dimenzije presku-ancev so bile 300 mm x 300 mm. Zgornji in spodnji robovi so bili podprti tako, da je bil prepre en zasuk. Na spodnjem in zgornjem robu stekla je bila pozicionirana lesena de-ica debeline 2 mm, ki je prepre evala neposreden stik stekla s kovino. Pri prvem preskusu smo merili vertikalne deformacije na sredini, zgornjem in spodnjem robu ter horizontalne deformacije in pomik na sredini, uklon, zdrs med stekli in tla no vertikalno silo (Slika 34). Pri drugem in tretjem preskusu pa so se merile le tri vertikalne in ena horizontalna deformacija, pomik in tla na vertikalna sila, ki je bila v vseh primerih monotono nara- ajo a.



Slika 34: Merska mesta na presku-ancu, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled

Rezultati preskusa

Rezultati so predstavljeni v Preglednici 15, kjer lahko natančno odčitamo vrednosti pri največji sili (P_{max}) in vrednosti pri sili porušitve ($P_{poru\dot{s}}$). Največja sila je večja kot porušitvena, zato so vrednosti za pomik, zdrs, uklon, deformacije in napetosti različne pri posamični sili. Za pomik ($V_{poru\dot{s}}$), uklon ($U_{poru\dot{s}}$) in napetosti ($\epsilon_{poru\dot{s}}$) lahko odčitamo vrednosti pri porušitvi, vrednosti pri največji sili pa lahko odčitamo za zdrs (z_{max}), deformacije (ϵ_{max}) in napetosti (σ_{max}). Napetosti pri največji in porušitveni sili so predstavljene za mersko mesto L₂ (na sredini stekla), kjer so bile največje natezne vertikalne deformacije.

Rezultati so nato predstavljeni v Grafikonih za razmerja zdrs - sila, deformacije ó napetosti in uklon ó napetosti.

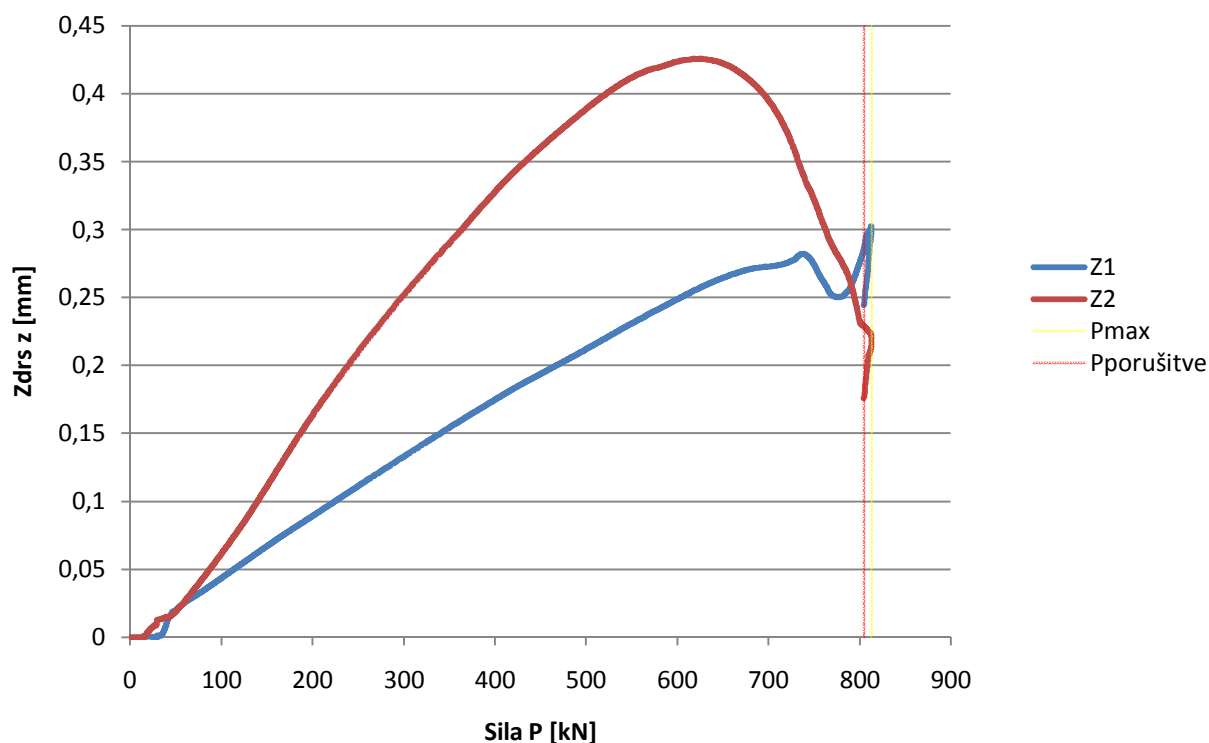
Preglednica 15: Rezultati tlačnega preskusa samega stekla

Preskušaneec	P_{max} [kN]	$P_{poru\dot{s}}$ [kN]	$V_{poru\dot{s}}$ [mm]	z_{1max} [mm]	z_{2max} [mm]	$U_{poru\dot{s}}$ [mm]
1	812,793	804,375	3,069	0,217	0,298	4,675
2	670,032	639,056	2,907	*	*	*
3	631,985	570,706	2,521	*	*	*
povprečje	704,937	671,379	2,832	0,217	0,298	4,675

* ni podatkov, ker niso bili merjeni med preskusom

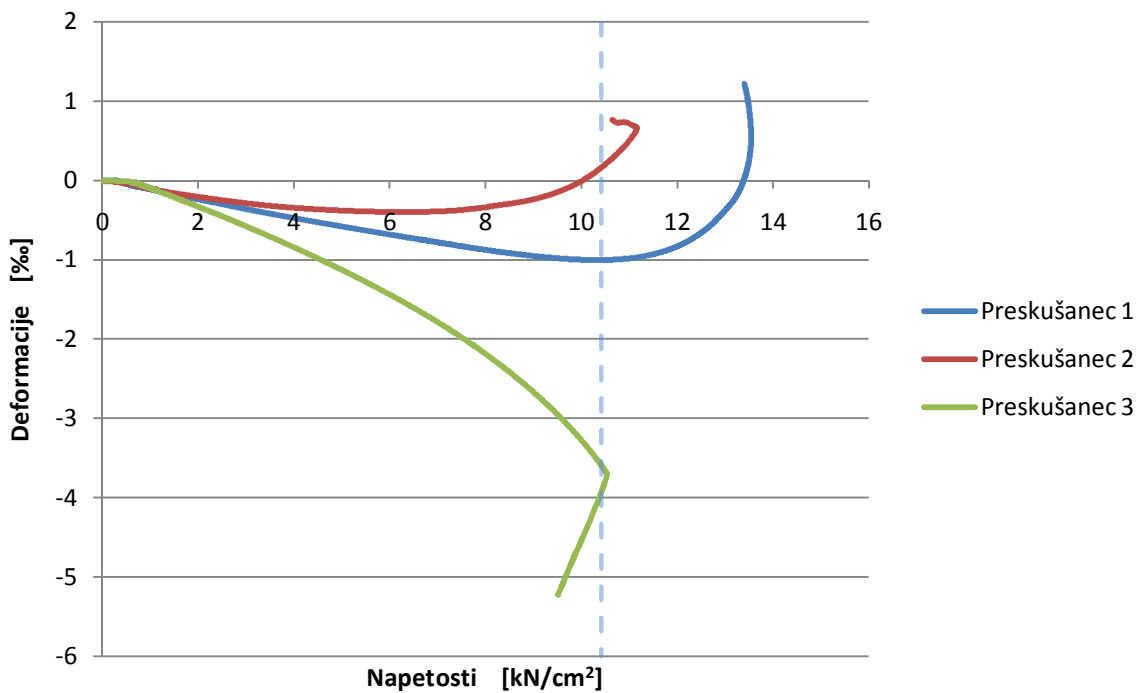
Preskušaneec	ϵ_{max} [‰]				P_{max} [kN]	$P_{poru\dot{s}}$ [kN]	$\sigma_{max,L2}$ [kN/cm ²]	$\sigma_{poru\dot{s},L2}$ [kN/cm ²]
	L ₁	L ₂	L _{3H}	L ₄				
1	-2,599	0,602	0,364	/	812,793	804,375	13,547	13,406
2	-2,151	0,661	/	-0,739	670,032	639,056	11,167	10,651
3	/	-3,718	0,448	-0,614	631,985	570,706	10,533	9,512
povprečje	-2,375		0,406	-0,677	704,937	671,379	11,749	11,190

L₂ ó predznak je odvisen od smeri uklona preskušaneca (merilni listi L₁ in L₄ na natezni oz. tlačni strani)

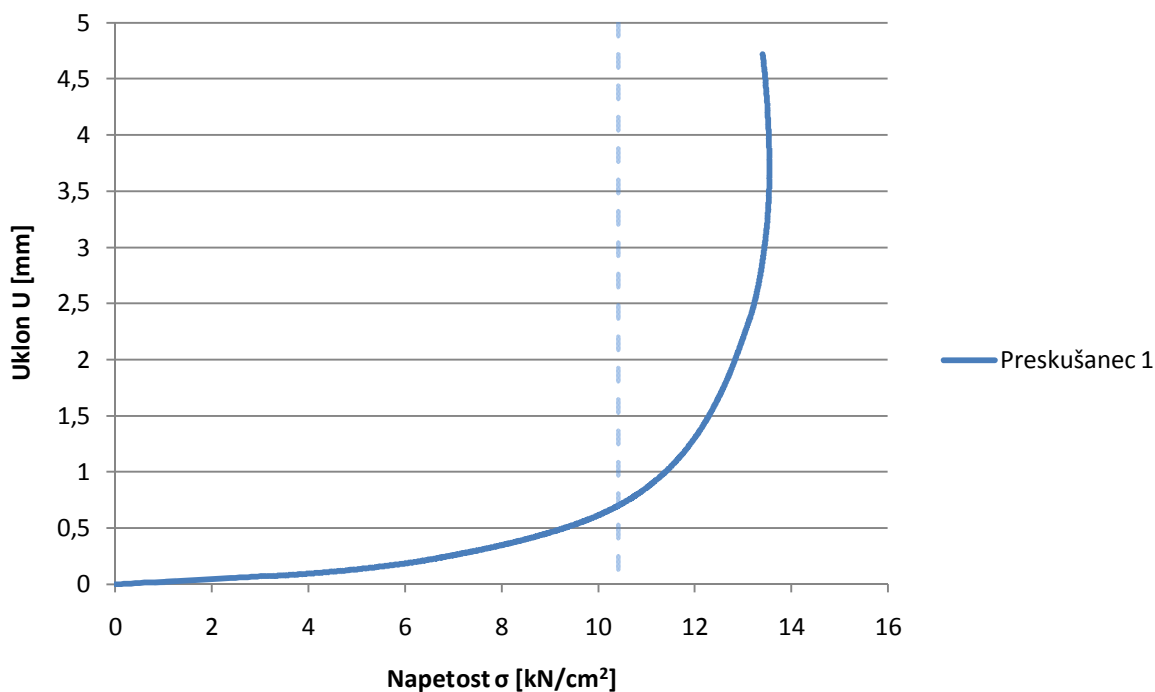


Grafikon 13: Prikaz zdrsa z [mm] v odvisnosti od sile P [kN] za tla ni preskus lameliranega stekla

Iz Grafikona 13 se vidi, da je do zdrsa med stekli pri- lo pred dosefeno najve jo silo, kar pomeni, da nimata ta dva parametra neposredne povezave. Do samega zdrsa pa je verjetno pri- lo, ker je bil presku- anec lameliran iz dveh stekel, ki sta bila malenkost zamaknjena med seboj ó do najve jega zdrsa je pri- lo na robu Z_2 in -e to le $\sim 0,42$ mm. Pri sili približno 630 kN pa se je nenadoma spremenila smer zdrsa Z_2 in se za ela vra ati proti za etnemu stanju. Pri tej sili je napetost $\sim 10,5$ kN/cm² in ravno pri tej vrednost se zgodi, da uklon stekla za ne naglo nara- ati (Grafikon 15), zato lahko spremembo zdrsa pripi- emo temu.



Grafikon 14: Prikaz deformacij [‰] v odvisnosti od napetosti [kN/cm²] za tla ni preskus lameliranega stekla

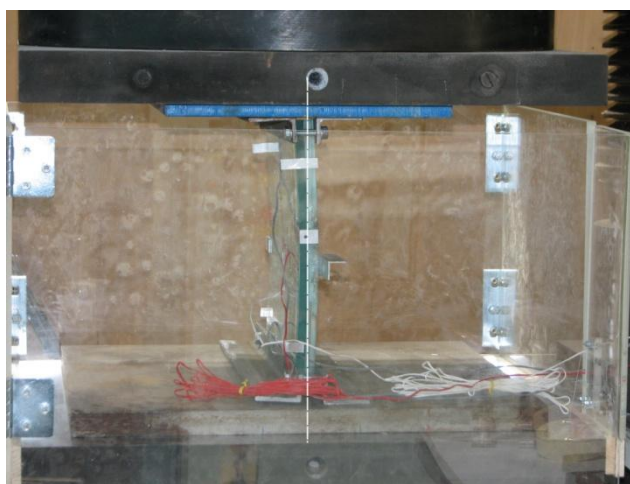


Grafikon 15: Prikaz uklon U [mm] v odvisnosti od napetosti [kN/cm²] za tla ni preskus lameliranega stekla

Iz Grafikona 14 in Grafikona 15 se lepo vidi vzrok spremembe deformacij iz tla nih v natezne za presku-anec 1. Približno do napetosti $\sigma = 10,5 \text{ kN/cm}^2$ (meja ozna ena z modro rtkano rto) je steklo prena-alo tla no obremenitev po vsem svojem prerezu, saj tudi uklona pri tej vrednosti ni bilo veliko. Od tu naprej se je uklon za el naglo pove evati, napetostno stanje na sredini presku-anca pa se je za elo spreminjati iz tla nega v natezno. Poru-itev presku-anca je bila pri natezni deformaciji $\epsilon \sim 1 \text{ ‰}$, kar lahko primerjamo tudi z rezultati upogibnega preskusa bru-enege 10 mm stekla in lameliranega stekla, kjer so bile poru-itve prav tako pri natezni deformaciji $\epsilon \sim 1 \text{ ‰}$.



(a)



(b)



(c)

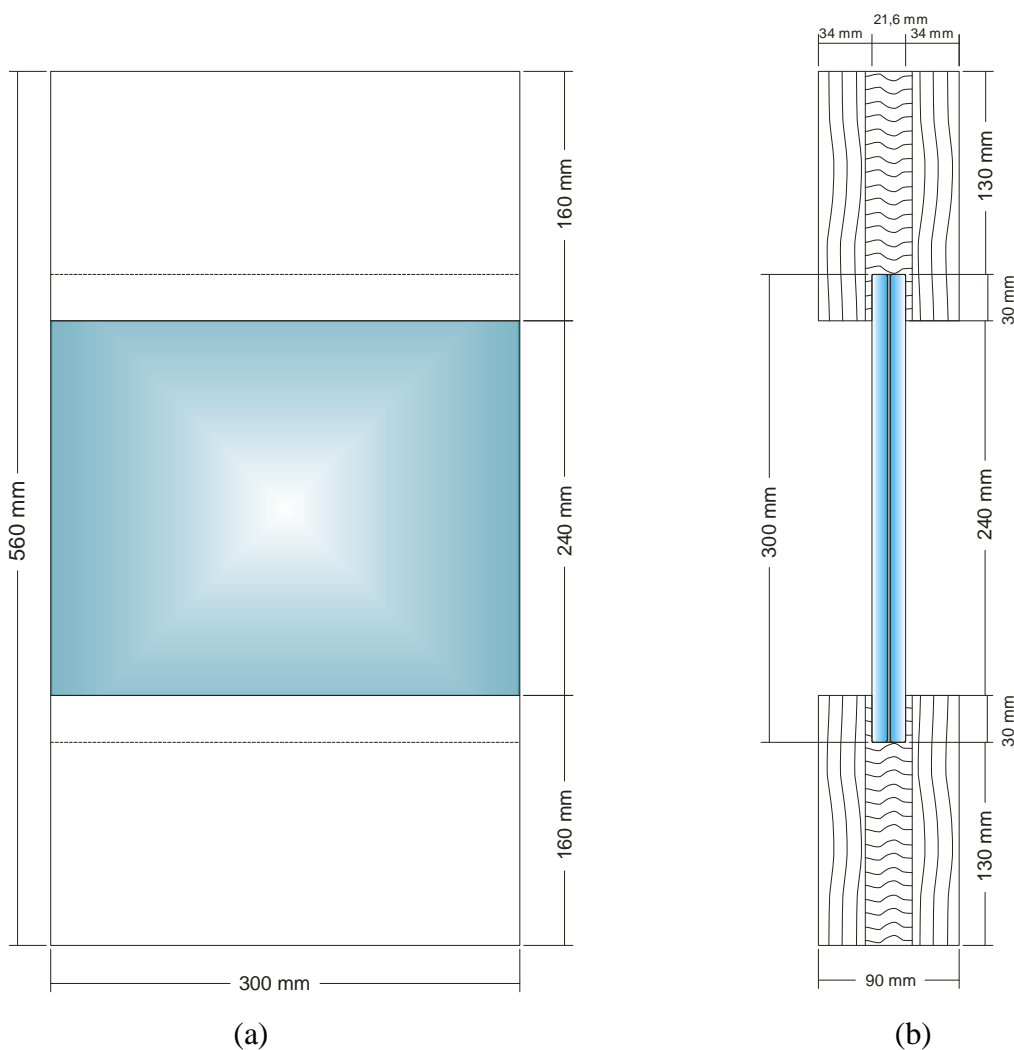


(d)

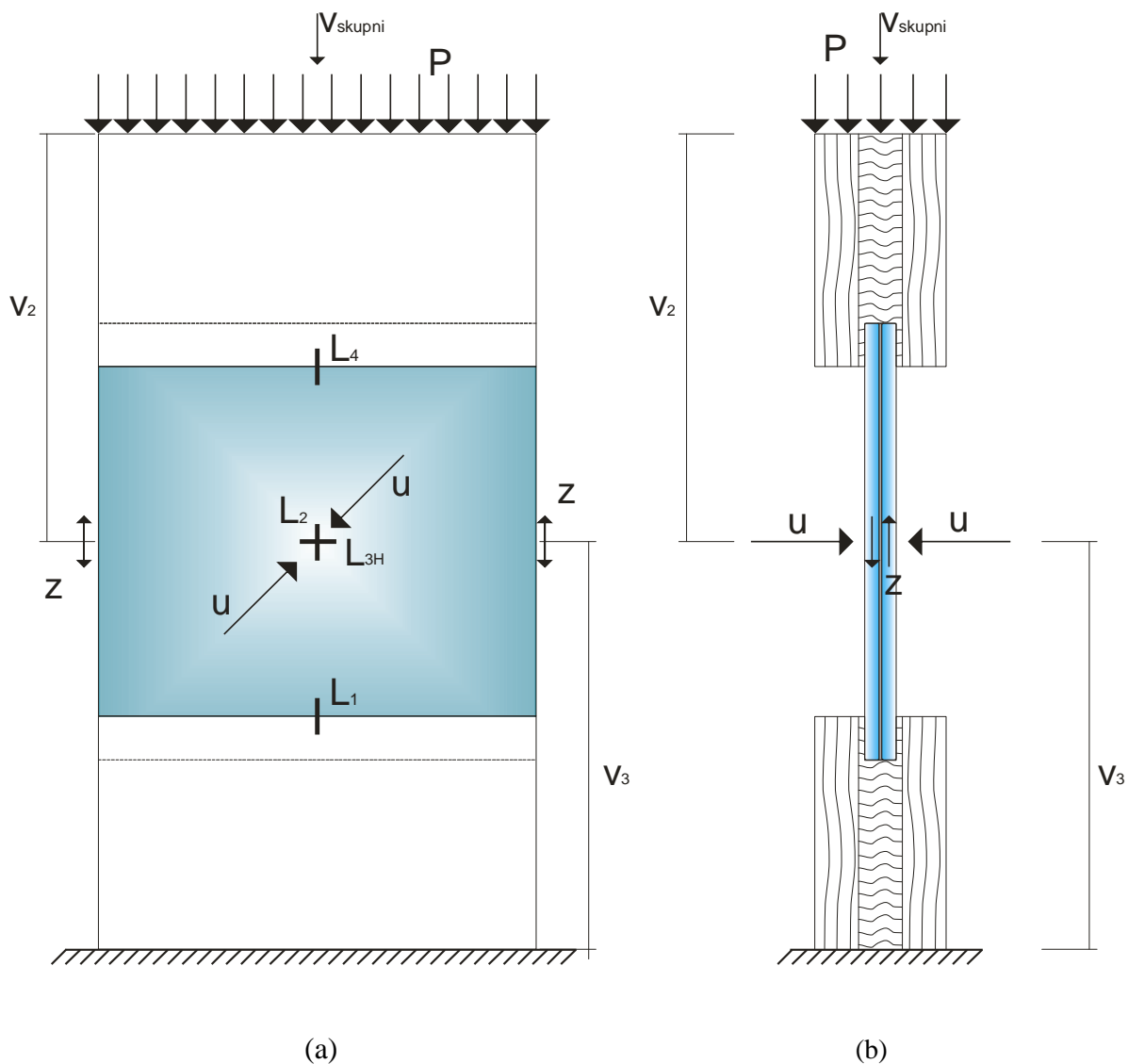
Slika 35: Preskus tla ne trdnosti stekla, (a) presku-anec z vsemi merskimi napravami, (b) upogib in poru-itev najprej natezne strani, (c) poru-itev, (d) poru-eni presku-anec

6.4.2 Tla ni preskus stekla z naleganjem v lesenih leffi– ih zgoraj in spodaj, steklo pravokotno na lesena vlaka

Izvedli smo tla ni preskus, kjer je steklo nalegalo v lesenih leffi– ih pravokotno na lesena vlakna. Pri preskusu smo fleleli ugotoviti pri kateri sili se poru–i les oz. steklo. Leffi– a sta bila iz lepljenega lesa, kjer je bila smer letnic tak–na, da je steklo nalegalo pravokotno na njih. Steklo je bilo dimenzij 300 mm x 300 mm, lepljeno iz dveh 10 mm debelih stekel, toplotno utrjenih (Slika 36). Merjene so bile deformacije v treh to kah (3x vertikalno, 1x horizontalno), zdrs med stekli, pomik zgornjega dela in spodnjega dela presku–anca (od sredine stekla do zgornjega oz. spodnjega robu lesa), skupni pomik, uklon in sila (Slika 37). Prvi preskus je bil voden monotono nara– ajo e po sili 0,5 kN/s, drugi in tretji pa monotono nara– ajo e po pomiku 0,0 5 mm/s.



Slika 36: Dimenzije presku–anca, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled



Slika 37: Merska mesta na presku-ancu, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled

Rezultati preskusa

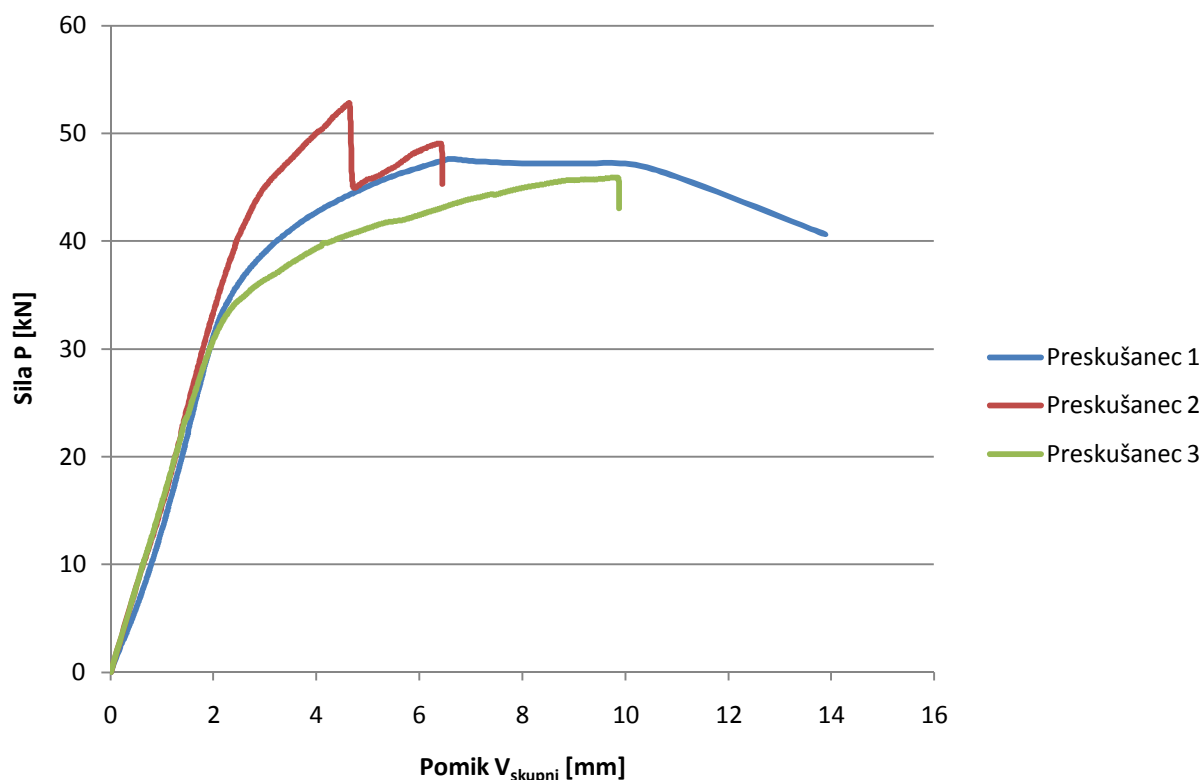
Vsi rezultati meritev, ki so bili merjeni na presku-ancih, so predstavljeni v Preglednici 16. Vrednosti meritev za Presku-aneč 3 niso povsem primerljive z ostalimi, ker je bil preskus prekinjen –e pred poru-itvijo, saj je bil uklon stekla (U) precej velik in bi ob poru-itvi lahko pri-lo do po-kodovanja merilne naprave. Sicer so pa bile vrednosti najve je sile P_{max} precej ni flje od najve je sile doseffene pri tla nem preskusu samega stekla ($\sim 7\% P_{max, samega stekla}$ ó Preglednica 16) kar pomeni, da je »-ibki len« v tak-nem primeru les, steklo prenese veliko ve je tla ne obremenitve. Pomika V_2 in V_3 (vtis stekla v les in skupni skr ek zgornjega oz. spodnjega dela lesa) sta razli na zaradi neenakomernega vtiska stekla v les, ki ni izotropen

material. Rezultati so prikazani tudi v dveh grafikonih (Grafikon 16 in 17). Na koncu poglavja so tudi fotografije (Slika 38) priprave presku-ancu in razli ne oblike poru-itve lesa.

Preglednica 16: Rezultati tla nega preskusa stekla pravokotno na lesena vlakna

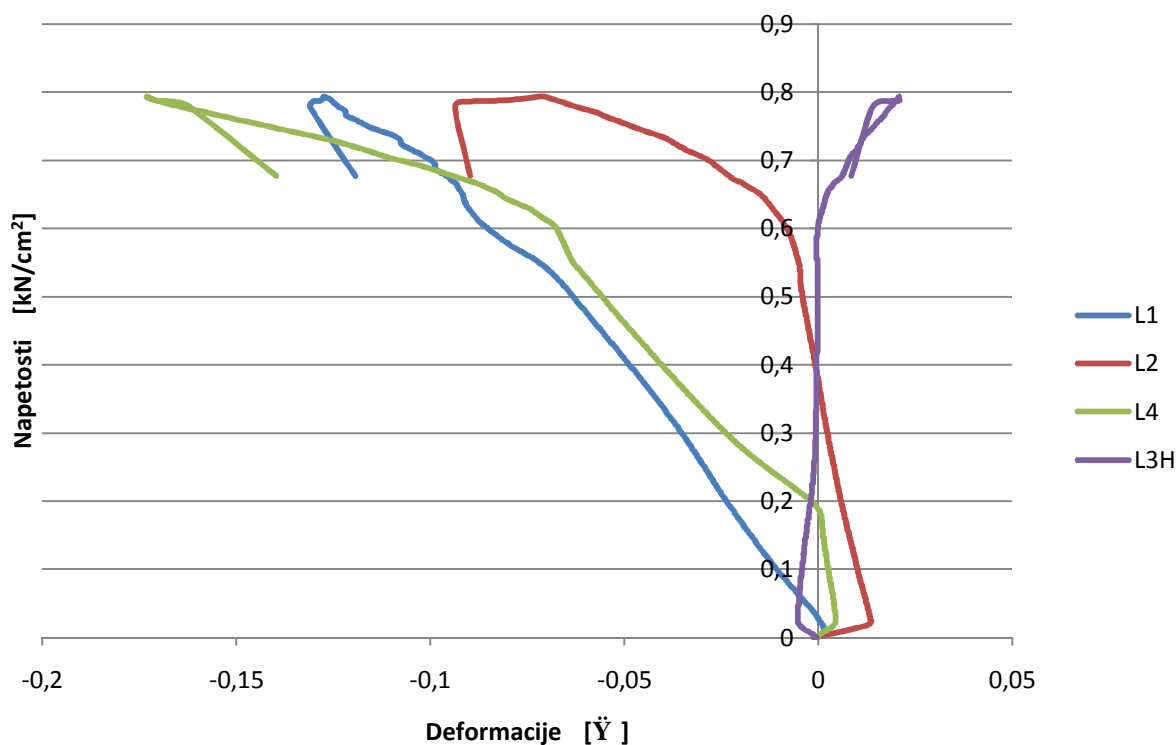
Preskušaneec	P_{max} [kN]	V_{skupni} [mm]	V_2 [mm]	V_3 [mm]	ϵ_{max} [‰]				z_{max} [mm]	U_{max} [mm]
					L_1	L_2	L_{3H}	L_4		
1	47,6	6,551	6,559	1,988	-0,127	-0,07	0,021	-0,173	0,012	0,817
2	52,856	4,639	1,566	3,225	-0,132	-0,191	0,040	-0,106	0,022	1,707
3*	45,888	9,856	4,266	6,216	-0,223	-0,161	0,056	-0,104	0,028	2,737
povprečje	48,781	7,015	4,130	3,810	-0,161	-0,141	0,039	-0,128	0,020	1,262

* pri presku-ancu 3 je bila preiskava ro no prekinjena pred poru-itvijo, zaradi prevelikega uklona U



Grafikon 16: Prikaz sile P [kN] v odvisnosti od pomika V_{skupni} [mm] za tla ni preskus stekla z naleganjem pravokotno na vlakna v lesnem lefi- ih

Grafikon 16 prikazuje silo v odvisnosti od skupnega pomika, kjer lahko vidimo skok sile pri Presku-ancu 2. To se je zgodilo, ker se je les najprej poru-il na eni strani presku-anca nato pa je del sile prenesla neporu-ena stran, do kon ne poru-itve -e te.

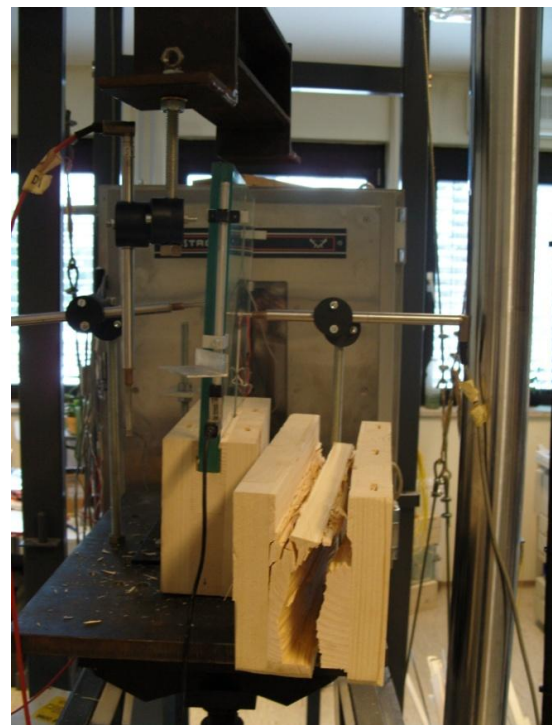


Grafikon 17: Prikaz deformacij $[\epsilon]$ v odvisnosti od napetosti $[\sigma]$ v steklu za presku-anece 1, 2, 3, 4, za tla ni preskus stekla z naleganjem pravokotno na vlakna v lesenem leffi-ih

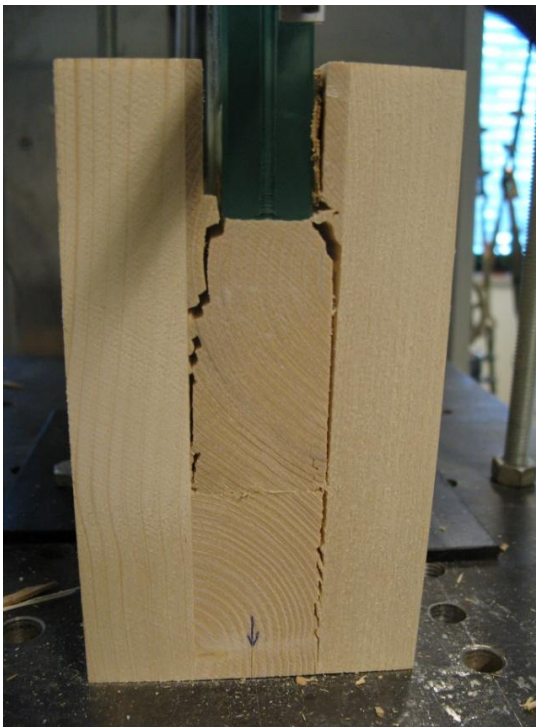
Grafikon 17 prikazuje odnos med napetostmi in deformacijami, iz katerega se vidi, da je steklo po vsem svojem prerezu prena-alo tla no obremenitev in doseglo zelo nizke vrednosti napetosti in deformacij v primerjavi z vrednostmi pri tla nem preskusu samega stekla (Preglednica 15). Pri vseh presku-ancih je podoben diagram, zato je ta prikazan le za prvega. Pri vseh treh presku-ancih je pri-lo do poru-itve lesa. Na steklu ali v foliji ni bilo vidnih nobenih po-kodb ali sprememb. Pri lesu je bila poru-itev tak-na, da ga je prelomilo ali pa so se lesena vlakna, med letnicami v lesu, pretrgala (Slika 38). Deformacije v steklu so bile zelo majhne, kar pomeni, da je steklo sposobno prenesti veliko ve je tla ne obremenitve kot les. Zdrs med stekli pa lahko pripri-emo minimalnemu zamiku med lameliranima stekloma, kot tudi razli ni trdoti lesa in zato moflnosti stekla, da se razli no vtisne v les.



(a)



(b)



(c)

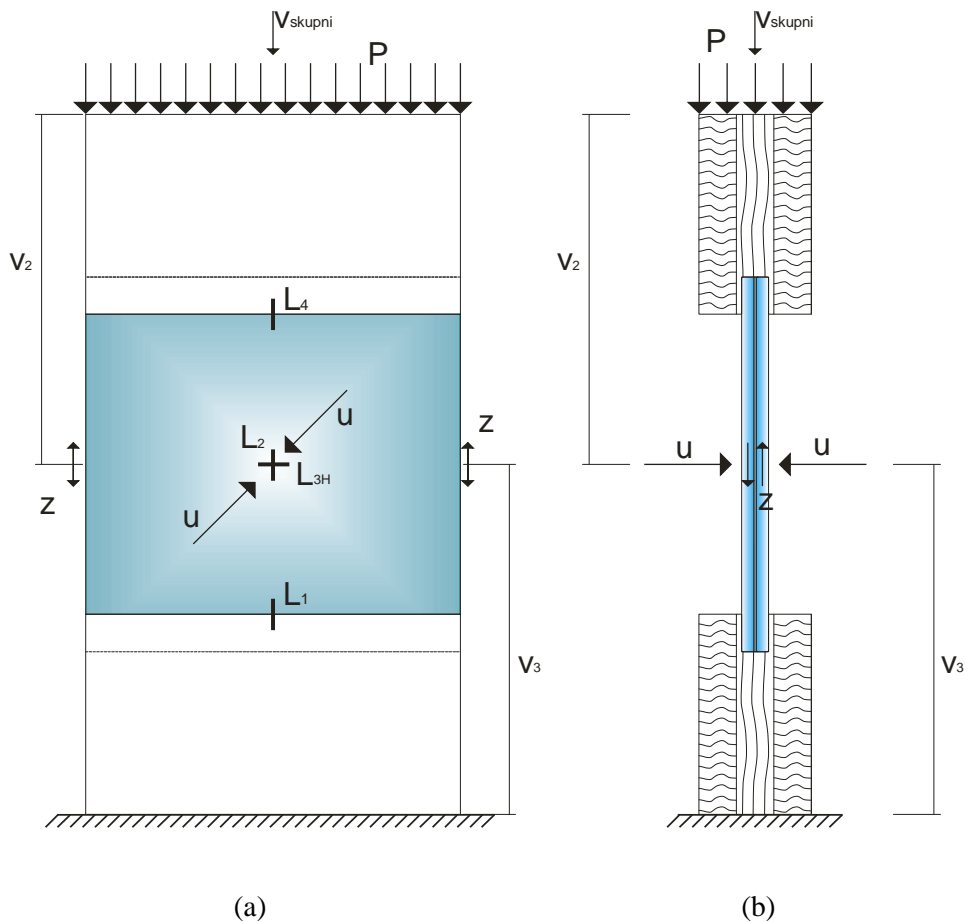


(d)

Slika 38: Tlačni preskus, (a) pozicioniranje presku-anca, (b) poru-itev lesa 1.,
(c) poru-itev lesa 2., (d) poru-itev lesa 3.

6.4.3 Tla ni preskus stekla z naleganjem v lesenih leffi-ih zgoraj in spodaj, steklo vzporedno z lesenimi vlakni, cikli ni preskus

Izvedli smo tla ni preskus, kjer je steklo nalegalo vzporedno s smerjo lesenih vlaken v leffi-ih. Ugotavljali smo obna-anje lesa in stekla pri enakomernem obremenjevanju in razbremenjevanju, ter pri kateri sili pride do poru-itve. Leffi- i sta bili iz lepljenega lesa, kjer je bila smer letnic v lesu tak-na, da je steklo nalegalo vzporedno glede na njih. Steklo je bilo dimenzij 300 mm x 300 mm, lepljeno iz dveh 10 mm debelih stekel, toplotno utrjenih. Merjene so bile deformacije v treh to kah (3x vertikalno, 1x horizontalno), zdrs med stekli, posebej pomik zgornjega dela in spodnjega dela presku-anca (od sredine stekla do zgornjega oz. spodnjega robu lesa), skupni pomik, uklon in sila (Slika 39). Prvi preskus je potekal v petih ciklih in je bil voden po pomiku 0,01 mm/s. Obremenjevanje prvega presku-anca je potekalo med silo 0 in 90 kN. Drugi in tretji preskus pa je potekal v -tirih ciklih in bil voden s silo 0,5 kN/s (med silo 0 in 95 kN).



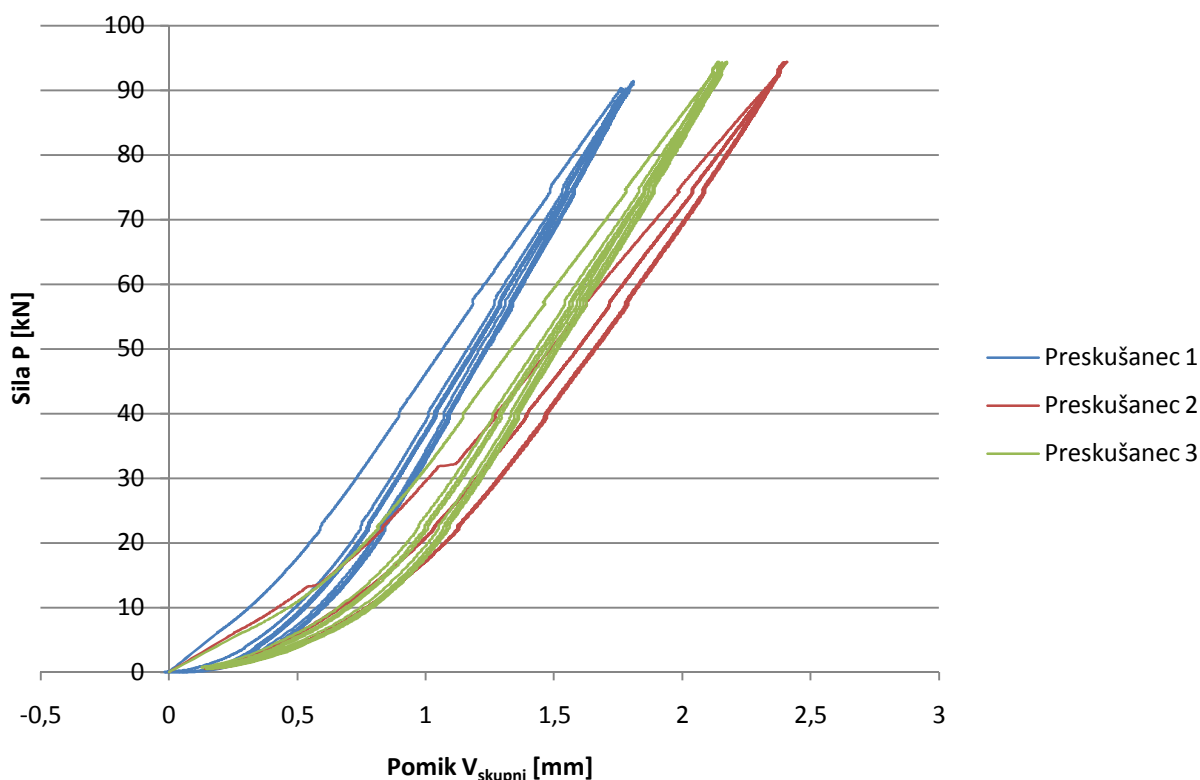
Slika 39: Razporeditev merskih mest, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled

Rezultati preskusa

V Preglednici 17 so predstavljeni rezultati preskusa iz katerih je razvidno, da se je pomik z vsakim ciklom spreminjal za ~0,01 mm, kar je zelo majhna vrednost in pomeni, da sta les in steklo sposobna prenesti tak-no obremenitev brez ve jih posledic. To se lepo vidi tudi v Grafikonu 18, da z vsakim naslednjim ciklom ni pri-lo do ve jega pomika oz. vtiska stekla v les. Med preskusom ni pri-lo do poru-itve ne lesa in ne stekla. V nobenem od njiju ni bilo vidnih sprememb ali deformacij zaradi enakomernega obremenjevanja in razbremenjevanja.

Preglednica 17: Rezultati tla nega cikli nega preskusa stekla vzporedno na lesena vlakna

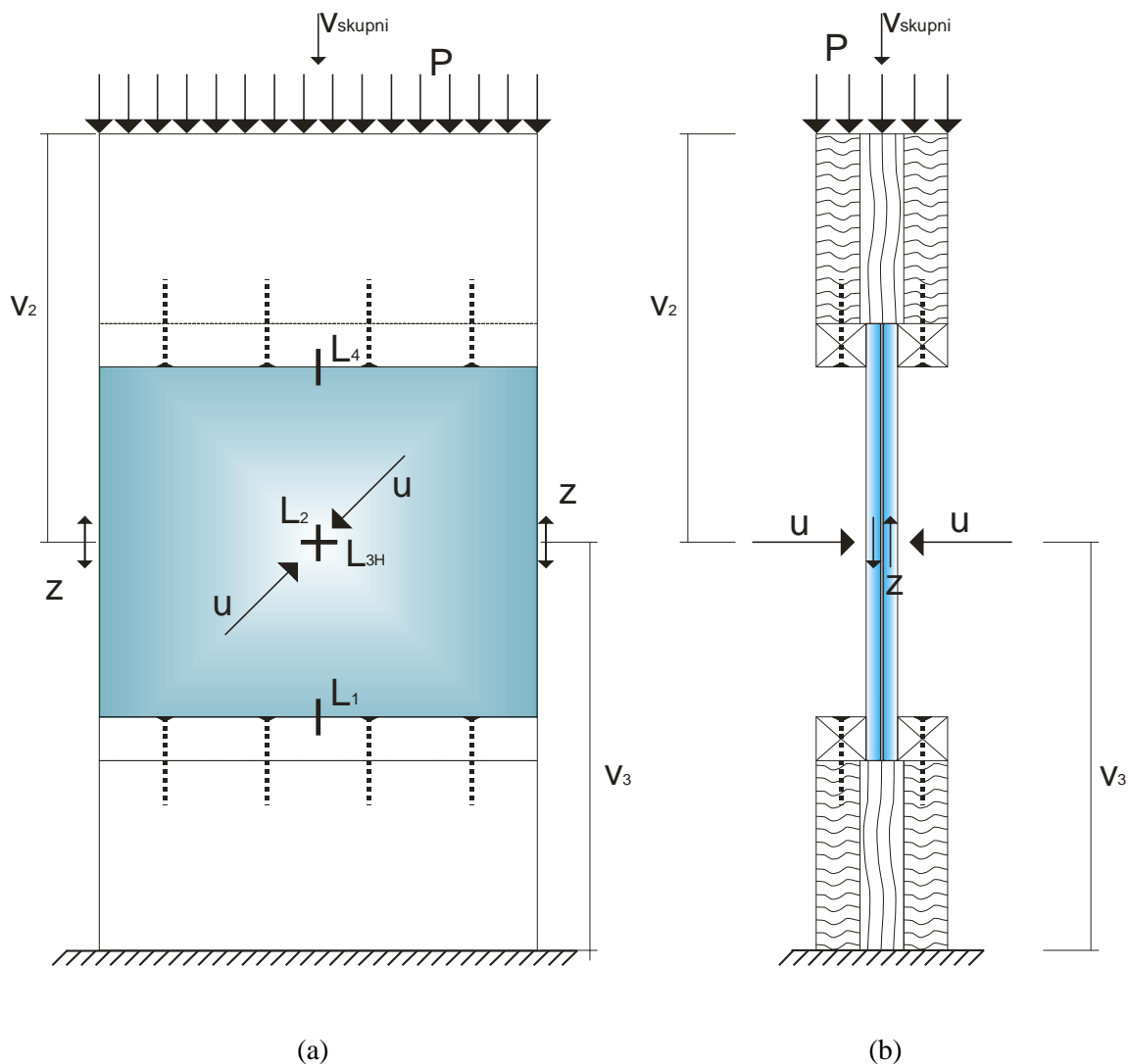
Preskušaneec	Cikel 1	Cikel 2	Cikel 3	Cikel 4	Cikel 5	P [kN]	Vodenje preskusa po:
	V_{skupni} [mm]	V_{skupni} [mm]	V_{skupni} [mm]	V_{skupni} [mm]	V_{skupni} [mm]		
1	1,760	1,784	1,808	1,790	1,790	0-90	pomik 0,01mm/s
2	2,409	2,403	2,403	2,397	/	0-95	sila 0,5 kN/s
3	2,142	2,154	2,166	2,172	/	0-95	sila 0,5 kN/s



Grafikon 18: Prikaz sile P [kN] v odvisnosti od pomika V_{skupni} [mm] pri cikli nem tla nem preskusu stekla v kombinaciji z lesom

6.4.4 Tlačni preskus stekla z naleganjem v lesenih ležajih – iz zgoraj in spodaj, steklo vzporedno z lesenimi vlakni, monotoni preskus

Pri monotonom tlačnem preskusu smo morali ugotoviti pri kateri sili pride do porušitve lesa, kjer steklo nalega vzporedno na vlakna v njem. Ležaji sta bili iz lepljenega lesa, steklo dimenzij 300 mm x 300 mm, lepljeno iz dveh 10 mm debelih stekel, toplotno utrjenih. Zgornji in spodnji robovi lesa so bili podprti z jeklenimi L profili dimenzije 80 mm x 80 mm tako, da je bil preprečen zasuk (zvrnitev) (Slika 41(a)). Merjene so bile deformacije v treh točkah (3x vertikalno, 1x horizontalno), zdrs med stekli, posebej pomik zgornjega dela in spodnjega dela preskušanca (od sredine stekla do zgornjega oz. spodnjega roba lesa), skupni pomik, uklon in sila (Slika 40). Obremenjevanje je bilo monotono naraščajoče.



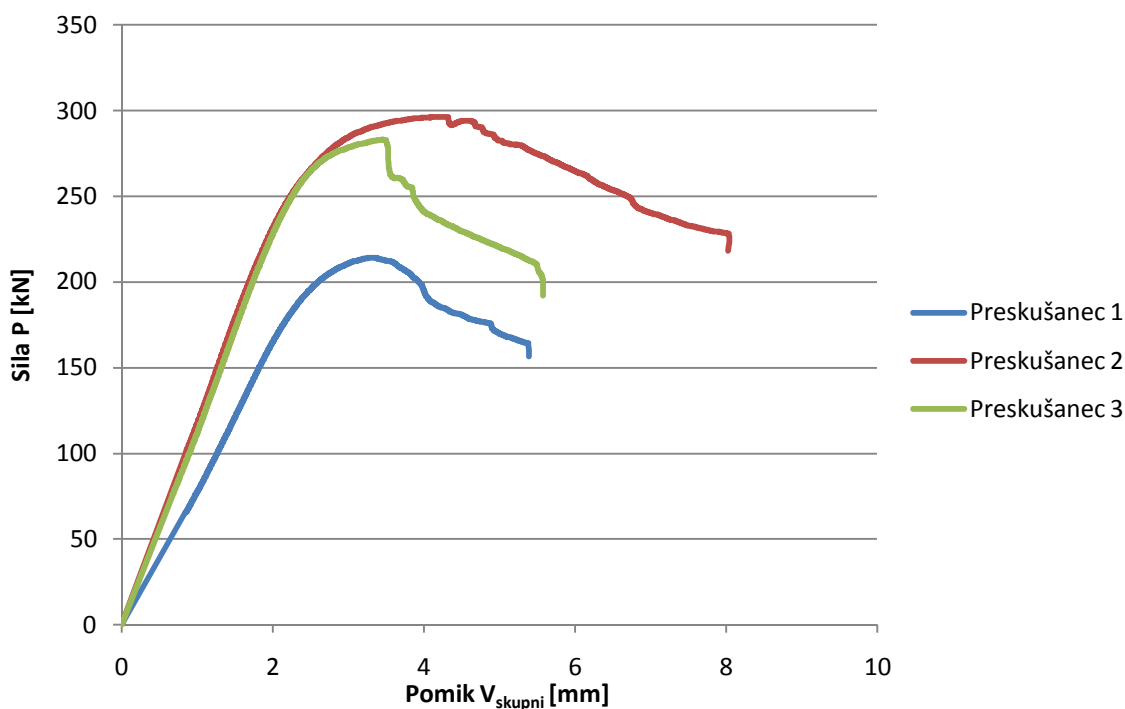
Slika 40: Razporeditev merskih mest, (a) bočni pogled, (b) prečni pogled

Rezultati preskusa

Rezultati preskusa so predstavljeni v Preglednici 18 z natan nimi vrednostmi meritev. Za vse meritve so podane vrednosti dosefene pri najve ji sili P_{max} . Preskusi so bili ustavljeni, ko je sila padla za 20% od dosefene P_{max} . Tudi pri tem preskusu je opaziti zelo majhne vrednosti zdrsa med stekli in uklona. Zdrs lahko pripri-emo zamaknjenosti lameliranih stekel, ki se pod obremenitvijo uravnata, ter nehomogenosti lesa. Iz rezultatov vertikalnih deformacij (L_1 , L_2 in L_4) se vidi, da je bilo steklo ves as tla no obremenjeno, to je tudi posledica majhne vrednosti uklona, saj bi v nasprotnem primeru bile na eni strani stekla natezne deformacije. V nadaljevanju so rezultati predstavljeni tudi v dveh grafikonih.

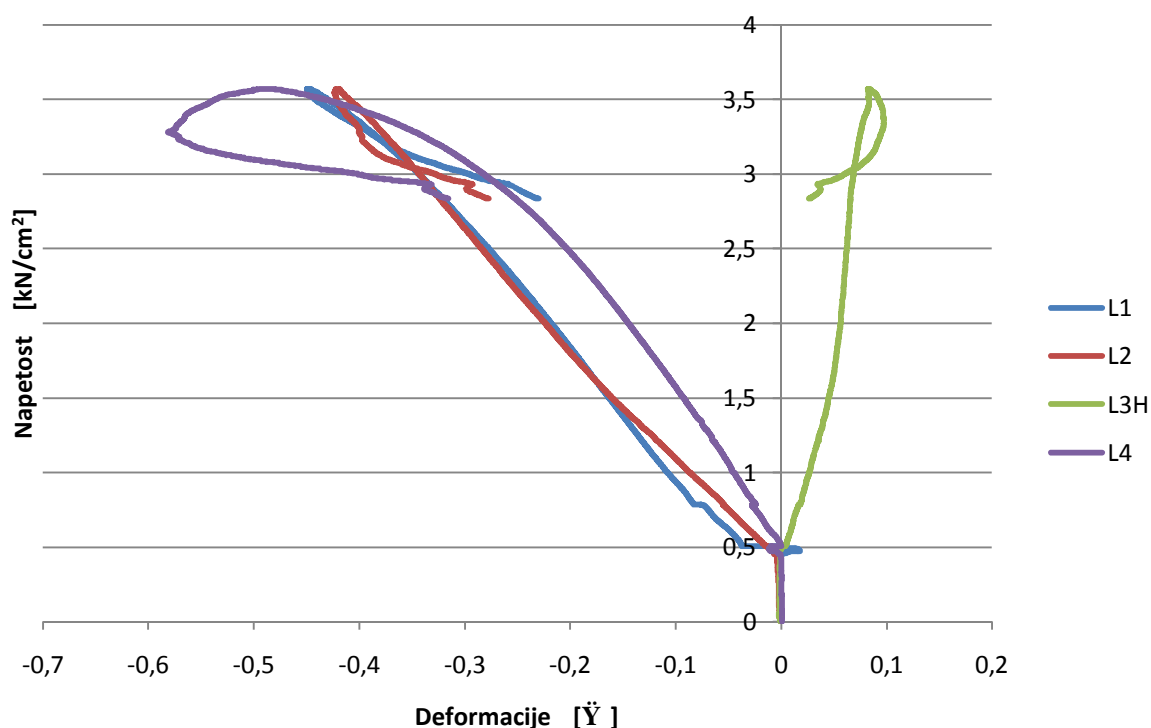
Preglednica 18: Rezultati tla nega preskusa stekla vzporedno na lesena vlakna

Preskušaneec	P_{max} [kN]	V_{skupni} [mm]	$V_{2,max}$ [mm]	$V_{3,max}$ [mm]	ϵ_{max} [%]				z_{max} [mm]	U_{max} [mm]
					L_1	L_2	L_{3H}	L_4		
1	214,141	3,371	0,075	0,850	-0,449	-0,422	0,084	-0,497	0,068	0,540
2	296,296	4,318	1,288	2,672	-0,912	-0,762	0,130	-0,717	0,123	0,775
3	283,164	3,457	2,006	1,056	-0,645	-0,476	0,103	-0,947	0,083	0,599
povprečje	264,534	3,715	1,123	1,526	-0,669	-0,553	0,106	-0,720	0,091	0,638



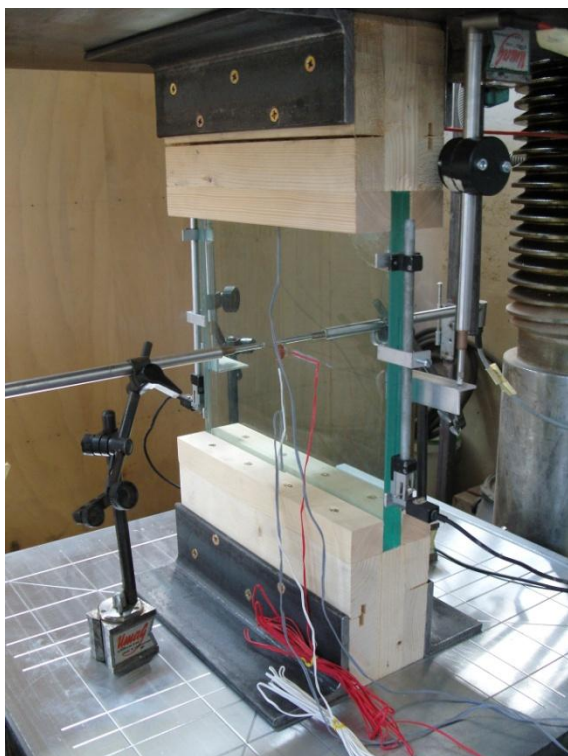
Grafikon 19: Sila P [kN] v odvisnosti od pomika V_{skupni} [mm] za monotoni tla ni preskus stekla z naleganjem vzporedno na lesena vlakna

Na Grafikonu 19 lahko vidimo prikaz sile P v odvisnosti od skupnega pomika V_{skupni} , kjer je opaziti, da pomik nara- a zelo enakomerno s pove evanjem sile do vrednosti $\sim 90\% P_{max}$ nato pa pomik hitro naraste. Od P_{max} naprej sila za ne padati, pomik pa naglo nara- ati kar pomeni, da je pri- lo do za etka poru- itve lesa, kjer se za nejo v lesu pojavljati razpoke zaradi vtiskanja stekla vanj. Na Grafikonu 20 pa so prikazane napetosti v steklu v odvisnosti od deformacij za prvi presku- anec, kjer lahko potrdimo fle zgoraj omenjeno, da so bile v steklu ves as vertikalne deformacije tla ne.

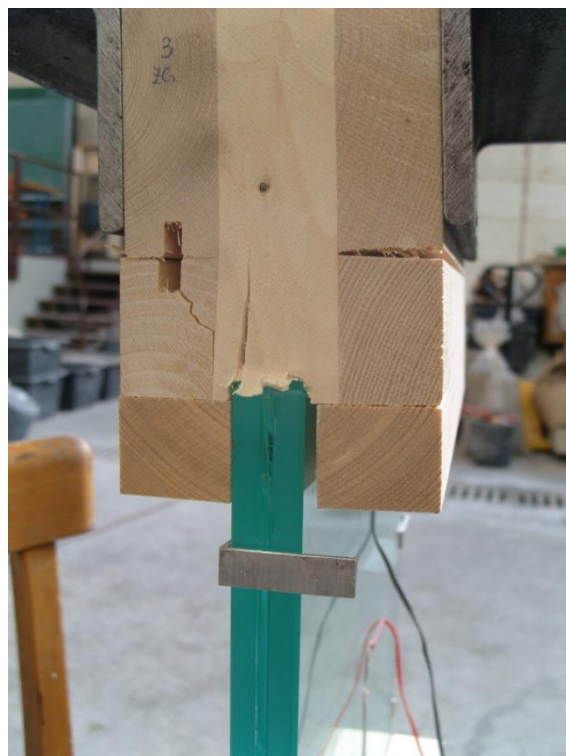


Grafikon 20: Prikaz deformacij $[\Ÿ]$ v odvisnosti od napetosti $[kN/cm^2]$ za Presku- anec 1 pri tla nem preskusu stekla vzporedno z lesenimi vlakni

Pri vseh treh preskusih je pri- lo do poru- itve lesa. V njem so se pojavile razpoke ali pa se je steklo vtisnilo vanj in s tem povzro ilo razpoke v okolici vtiska (Slika 41(b) in (c)). Zaradi nehomogenosti lesa, so vrednosti vtiska razli ne glede na zgornji ali spodnji del in levo ali desno stran. Zaradi obremenitve so se v lameliranem steklu pojavile sledi ó mehur ki v vmesni foliji (Slika 41(d)). Deformacije v foliji so se pojavile na zgornjem in spodnjem robu presku- anca, kjer je bil le-ta vpet v les. Njihov obseg je po vsej dolffini in sicer cca. od 8 mm do 17 mm od roba.



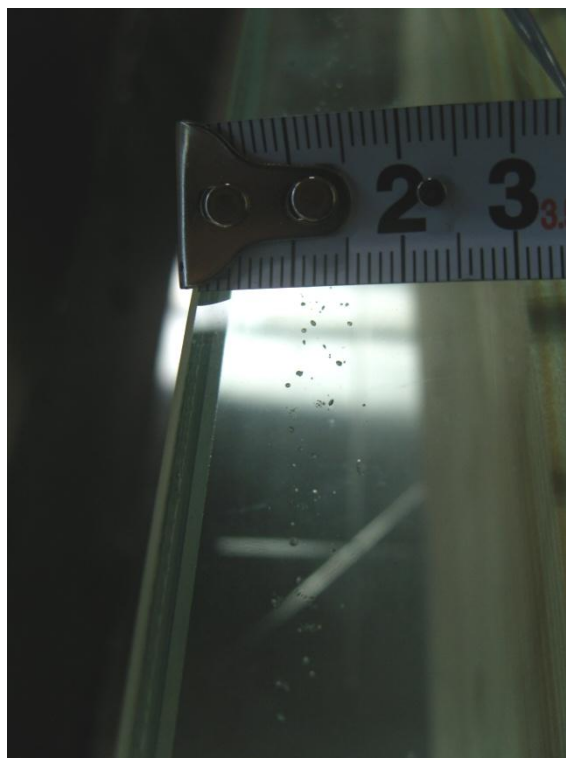
(a)



(b)



(c)

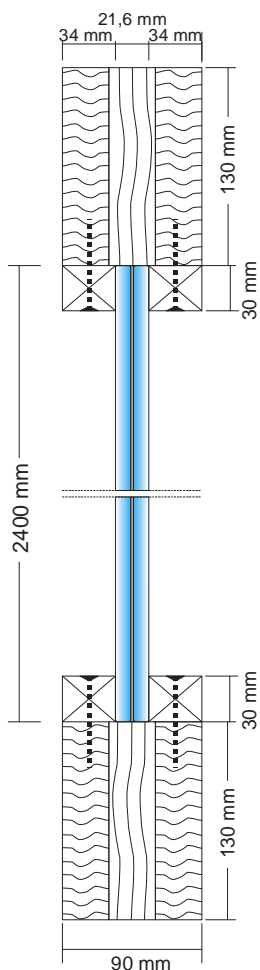


(d)

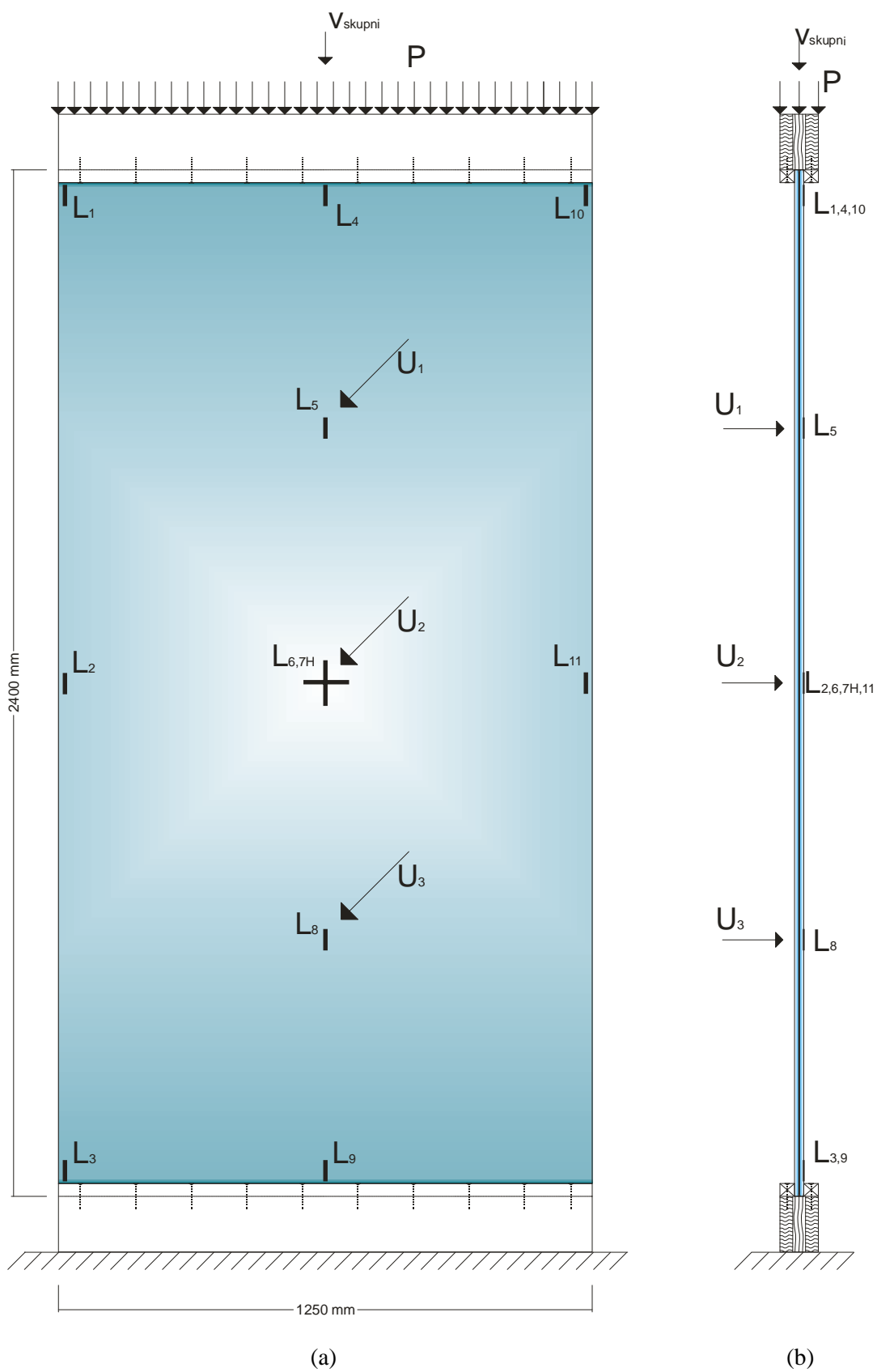
Slika 41: Monotoni tlačni preskus, steklo vzporedno z lesenimi vlakni, (a) pozicioniranje presku-anca, (b) tipična porušitev lesa, (c) vtis stekla v les, (d) sledi mehurčkov v vmesni foliji

6.4.5 Tla ni preskus steklenega panela z naleganjem v lesenih leffi-ih zgoraj in spodaj

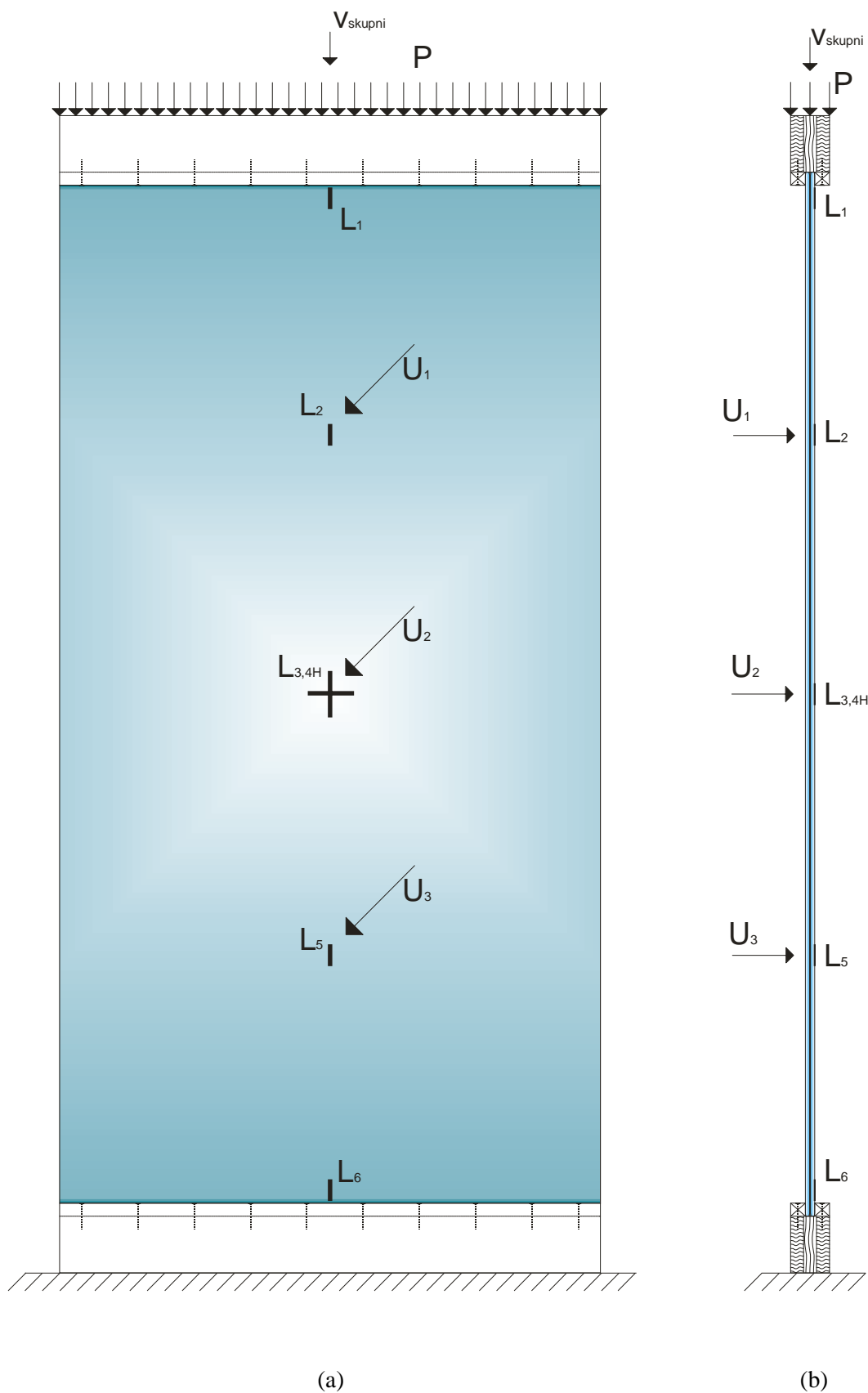
Preskusili smo stekleni panel vi-ine 2400 mm in -irine 1250 mm iz dveh toplotno utrjenih lepljenih stekel debeline 10 mm. Leffi-i sta bili iz lepljenega lesa, kjer je v prvih dveh primerih steklo pritiskalo na leffi-i vzporedno s smerjo lesenih vlaken, v tretjem primeru pa pravokotno na lesena vlakna (Slika 42). Ugotoviti smo morali pri kateri sili pride do poru-itve, kaj se bo prej poru-ilo (les ali steklo, kak-na bo poru-itev, kolik-en bo uklon stekla, ipd.). V prvem primeru smo merili deformacije v 10. to kah (10x vertikalne, 1x horizontalne), uklon v treh to kah (na vsaki etrtini vi-ine stekla), pomik in silo (Slika 43), ki je bila vodena s pomiki s korakom 0,013 mm/s. Pri drugem in tretjem preskusu so se deformacije merile le v petih to kah (5x vertikalne, 1x horizontalne). Uklon, pomik in sila pa enako kot v prvem primeru (Slika 44). Pri prvih dveh preskusih je bila obremenitev monotona nara-ajo a, v tretjem pa cikli na (Grafikon 21).



Slika 42: Detajl zgornjega in spodnjega dela presku-anca steklenega panela

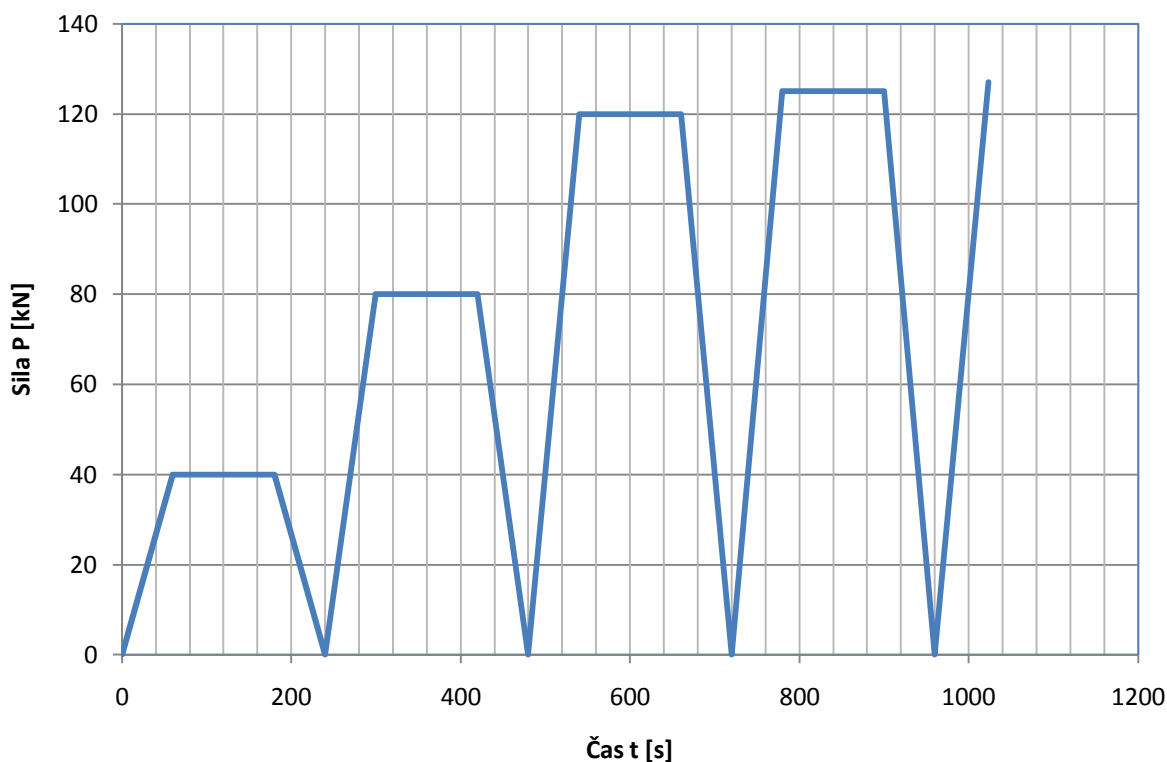


Slika 43: Merska mesta na prvem presku-ancu, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled



Slika 44: Merska mesta na drugem in tretjem presku-ancu, (a) stranski pogled, (b) pre ni pogled

Z enakomernim obremenjevanjem in razbremenjevanjem je bil presku-en le tretji presku-anec. Potekalo je v -tirih ciklih, peti cikel na koncu pa gre do poru-itve, kakor je prikazano spodaj na Grafikonu 21. Po vsakem ciklu se je sila spustila do 0 in ponovno dvignila, najprej do 40 kN, drugi do 80 kN, tretji do 120 kN nato do 125 kN in zadnji do poru-itve. Na vrhu vsakega cikla je bila sila konstantna 120 s. Obremenjevanje je potekalo po pomiku s hitrostjo 0,013 mm/s.



Grafikon 21: časovni potek enakomernega obremenjevanja in razbremenjevanja tretjega presku-anca, sila P [kN] v odvisnosti od časa t [s]

Rezultati preskusa

V Preglednici 19 so predstavljeni rezultati za skupni vertikalni pomik V_{skupni} pri največji sili P_{max} in pri sili porušitve P_{poru} , za vse tri presku-anca. Preglednica 20 pa predstavlja rezultate meritev uklona prav tako pri največji sili in sili porušitve. Nato so vsi ti rezultati predstavljeni v treh grafikonih.

V preglednicah 21, 22 in 23 so pa predstavljene deformacije za vsa mesta, kjer so bile merjene na steklenih panelih. Za vse tri presku-ance so vrednosti deformacij pri najve-ji sili in pri poru-itvi. Ti rezultati so tudi predstavljeni v Grafikonu 6.21 za deformacije na sredini stekla (glede na vi-ino), kjer so bile njihove vrednosti najve-je zaradi uklona. Zadnji grafikon pa prikazuje deformacijsko linijo pri poru-itvi na sredini steklenega panela, glede na -irino.

Preglednica 19: Rezultati sile P in pomika V_{skupni} za tla ni preskus steklenega panela

Preskušaneec	P_{max} [kN]	$P_{poruš}$ [kN]	V_{skupni} [mm]	
			V_{max}	$V_{poruš}$
1	172,440	150,480	6,399	8,370
2	182,880	151,560	4,586	6,544
3*	126,600	125,760	8,160	9,198

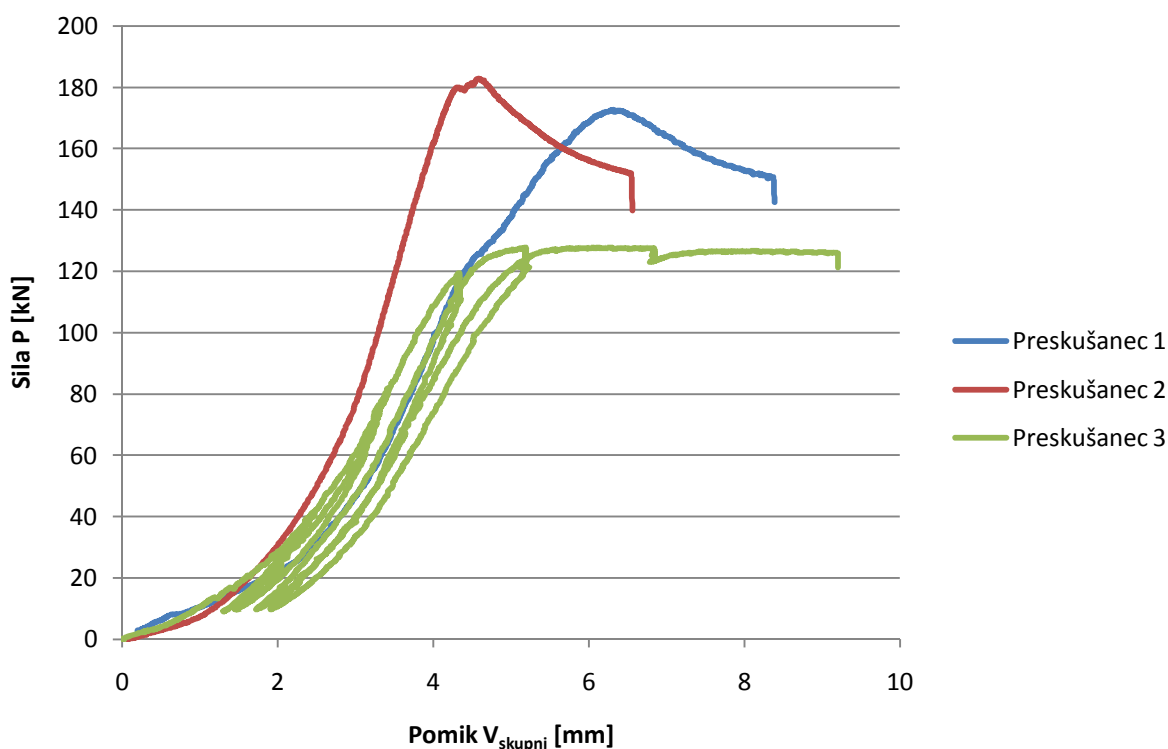
Preglednica 20: Rezultati sile P in uklona U za tla ni preskus steklenega panela

Preskušaneec	P_{max} [kN]	$P_{poruš}$ [kN]	U_{max} [mm]			$U_{poruš}$ [mm]		
			U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
1	172,440	150,480	15,797	23,613	17,500	38,225	55,044	39,934
2	182,880	151,560	9,651	13,331	8,917	36,339	52,450	37,389
3*	126,600	125,760	37,522	52,744	36,424	43,064	60,838	42,126

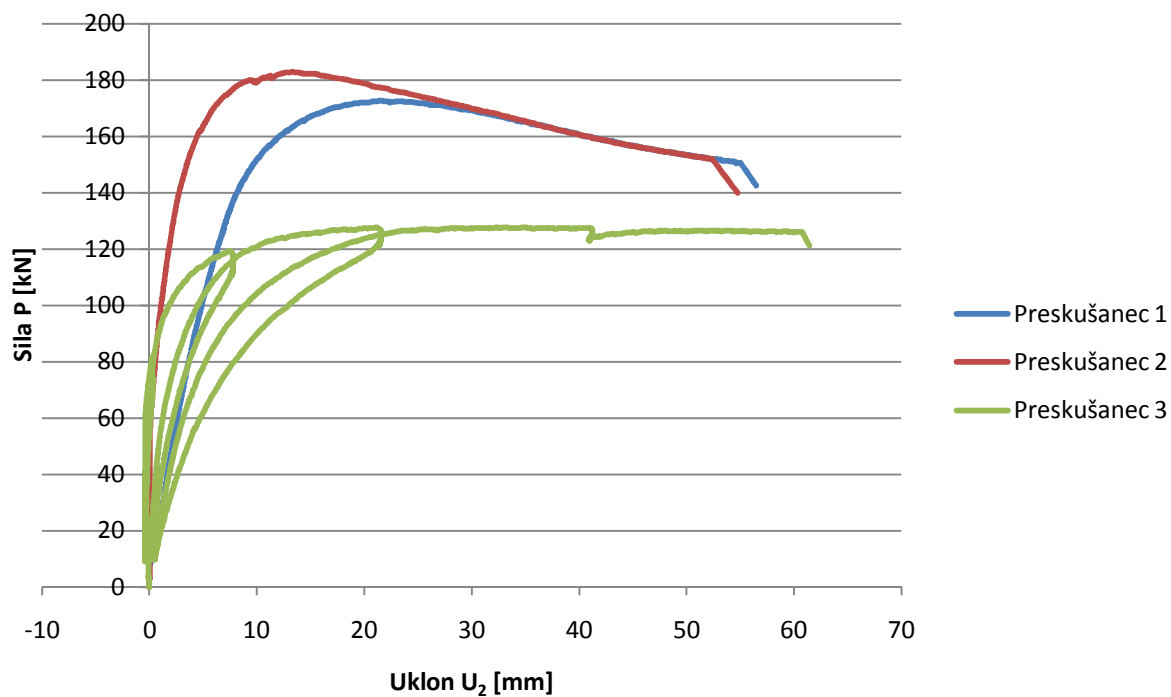
* preskus je bil ciklični, zato rezultati niso povsem primerljivi s prvima dvema preskusoma, kjer je sila do poru-itve nara-ala enakomerno monotono

Grafikon 23 nam prikazuje razmerje med silo P in uklonom U_2 , ki pa je bil merjen na sredini stekla, kjer se je le-to najbolj uklonilo/izbo ilo. Iz tega grafikona je razvidno, da je bila (pri monotonem obremenjevanju) najve-ja sila P_{max} dosefena tik preden je uklon stekla za el naglo nar-ati. Do P_{max} je bilo uklona pri prvem presku-ancu ~40% pri drugem pa ~25% glede na najve-ji dosefeni uklon pri poru-itvi U_{poru-} . To pomeni, da je sila za ela padati zaradi pove evanja uklona steklenega panela, na tej to ki pa sledi tudi hitro pove anje skupnega pomika V_{skupni} , kar se lepo vidi na Grafikonu 24. Ta trditev je razvidna tudi iz zgornjih dveh preglednic, e pogledamo uklon (U_2) pri najve-ji sili P_{max} in uklon pri poru-itvi, ki je za ve kot enkrat ve-ji, sila pa manj-a. Enako se zgodi s skupnim pomikom, ki je pri poru-itvi najve-ji, poru-itvena sila pa manj-a od P_{max} .

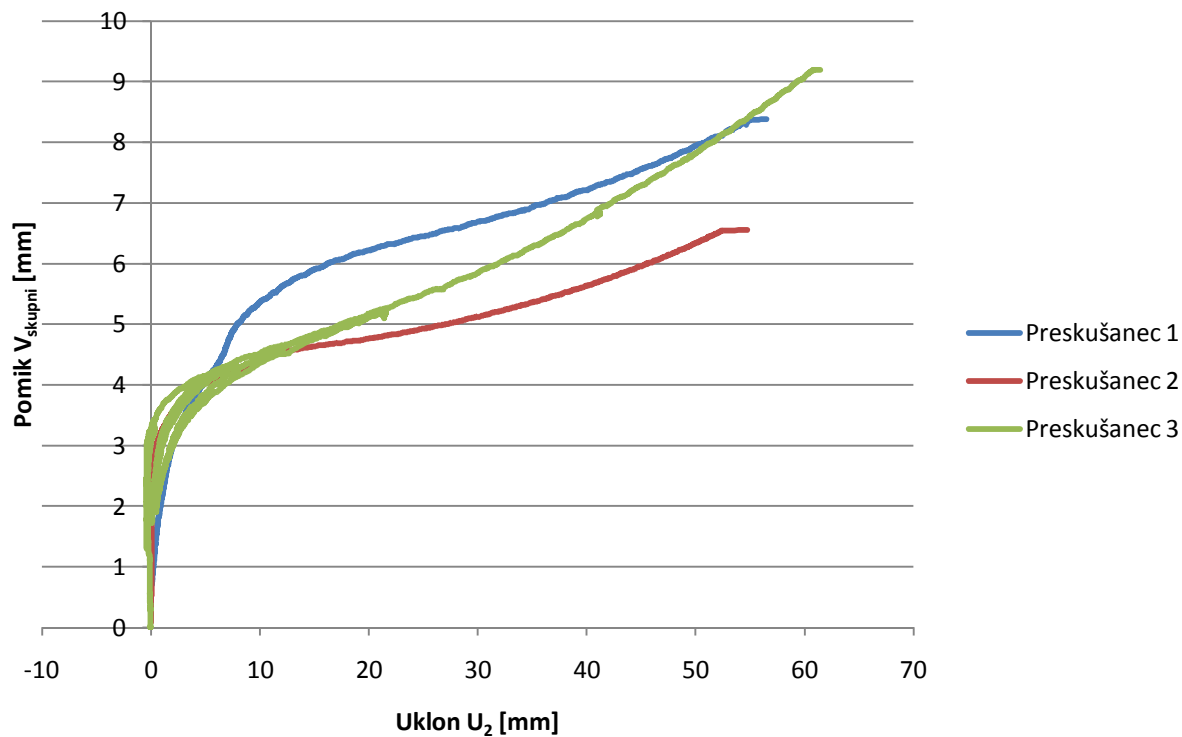
Pri cikli nem obremenjevanju tretjega presku-anca ni pri-lo do ve jega uklona v prvih dveh ciklih (do 40 kN in do 80 kN) ó Grafikon 23. Pri ostalih pa je bil uklon relativno velik pri manj-i sili, e primerjamo s prvima dvema presku-ancema, ki sta bila enakomerno monotono obremenjena. Pri njiju je pri-lo do poru-itve le stekla, ki je bilo na zunanji strani uklona, zaradi prekora itve natezne trdnosti medtem, ko je notranje steklo, ki je bilo na tla ni strani, ostalo nepo-kodovano. Pri cikli nem obremenjevanju tretjega presku-anca pa je pri-lo do poru-itve obeh stekel hkrati (notranjega tla nega in zunanjega nateznega).



Grafikon 22: Sila P [kN] v odvisnosti od pomika V_{skupni} [mm] pri tla nem preskusu steklenega panela



Grafikon 23: Sila P [kN] v odvisnosti od uklona U_2 [mm] pri tla nem preskusu steklenega panela (U_2 je na sredini steklenega panela, kjer je uklon največji)



Grafikon 24: Pomik V_{skupni} [mm] v odvisnosti od uklona U_2 [mm] pri tla nem preskusu steklenega panela

Preglednica 21: Deformacije prvega preskušanca pri največji sili P_{max} in sili porušitve P_{poru}

Preskušavec		h_{steklo} [mm]	ϵ_{max} [%o]				ϵ_{poru} [%o]			
1			L_1	L_4		L_{10}	L_1	L_4		L_{10}
		2400	0,115	0,052		0,044	0,137	0,108		0,144
P_{max} [kN]	P_{poru} [kN]		L_5				L_5			
172,44	150,48	1800		-0,319				-0,689		
			L_2	L_6	L_{7H}	L_{11}	L_2	L_6	L_{7H}	L_{11}
		1200	-0,457	-0,529	0,054	-0,479	-0,890	-1,067	0,053	-0,924
			L_8				L_8			
		600		-0,372				-0,713		
			L_3	L_9			L_3	L_9		
		0	0,061	0,035			0,148	0,115		

Preglednica 22: Deformacije drugega preskušanca pri največji sili P_{max} in sili porušitve P_{poru}

Preskušavec		h_{steklo} [mm]	ϵ_{max} [%o]		ϵ_{poru} [%o]	
2			L_1		L_1	
		2400	-0,091		0,202	
P_{max} [kN]	P_{poru} [kN]		L_2		L_2	
182,880	151,560	1800	-0,280		-0,665	
			L_3	L_{4H}	L_3	L_{4H}
		1200	-0,340	0,043	-1,011	0,053
			L_5		L_5	
		600	-0,188		-0,673	
			L_6		L_6	
		0	0,023		0,087	

Preglednica 23: Deformacije tretjega presku-ancu pri najve-ji sili P_{max} in sili poru-itve P_{poru-}

Preskušaneec		h_{steklo} [mm]	ϵ_{max} [%o]		ϵ_{poru-} [%o]	
3			L_1		L_1	
		2400	-0,160		-0,174	
P_{max} [kN]	P_{poru-} [kN]		L_2		L_2	
126,600	125,760	1800	0,526		0,617	
			L_3	L_{4H}	L_3	L_{4H}
		1200	0,809	-0,043	0,941	-0,045
			L_5		L_5	
		600	0,533		0,628	
			L_6		L_6	
		0	-0,072		-0,093	

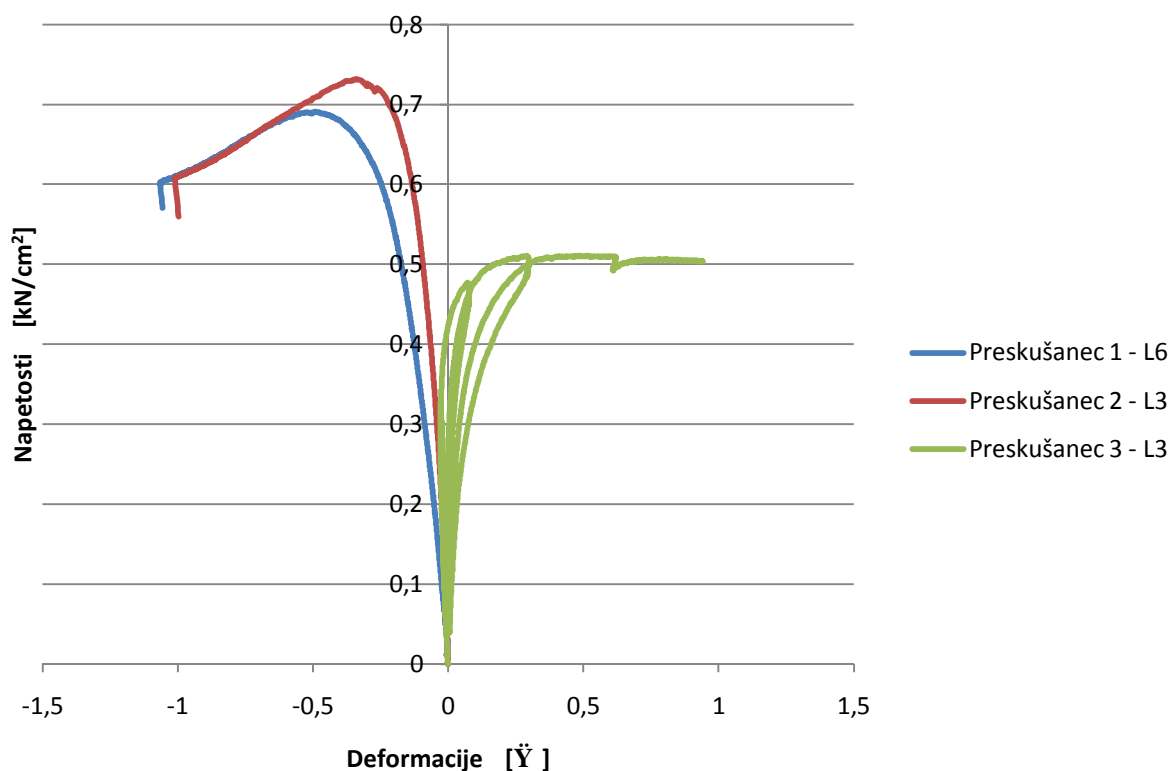
Preglednica 24: Primerjalne vrednosti deformacij pri poru-itvi vseh preskusov stekla

	preskušaneec deformacije	preskušaneec						povpre-je
		1	2	3	4	5	6	
1	ϵ_{poru-}	1,047	1,018	/	/	/	/	1,033
2	ϵ_{poru-}	1,087	0,674	0,847	1,324	1,137	/	1,014
3	ϵ_{poru-}	1,001	0,852	1,227	0,916	0,619	0,865	0,913
4	ϵ_{poru-}	1,214	0,766	-5,22	/	/	/	*0,990

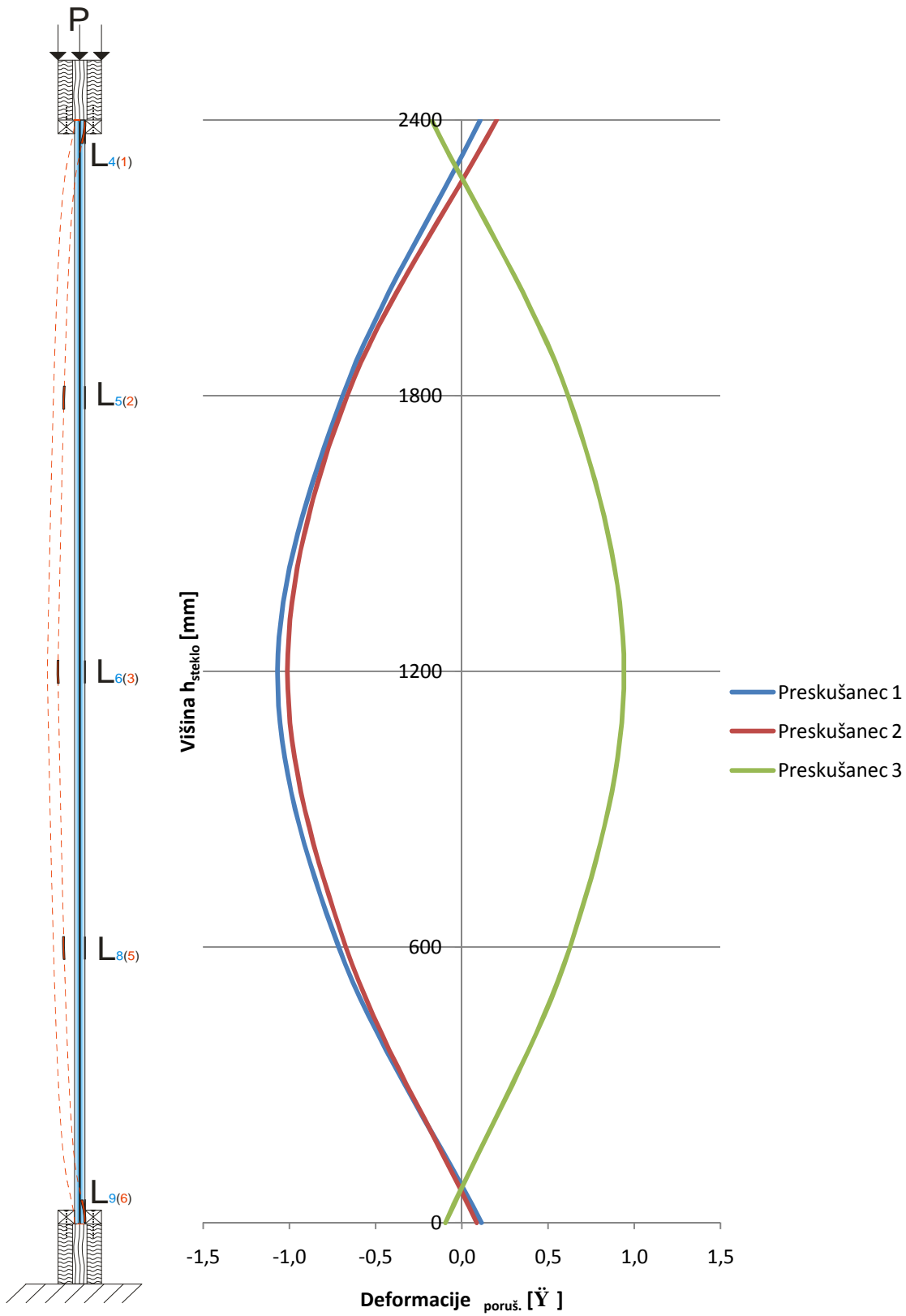
* povpre-je med presku-ancem 1 in 2

- 1í upogibni preskus enojnega ravnega stekla z bru-enimi robovi (poglavje 6.3.1)
- 2í upogibni preskus lameliranega stekla lepljenega z PVB folijo (poglavje 6.3.2)
- 3í upogibni preskus lameliranega stekla lepljenega z EVA folijo (poglavje 6.3.2)
- 4í tla ni presus stekla (poglavje 6.4.1)

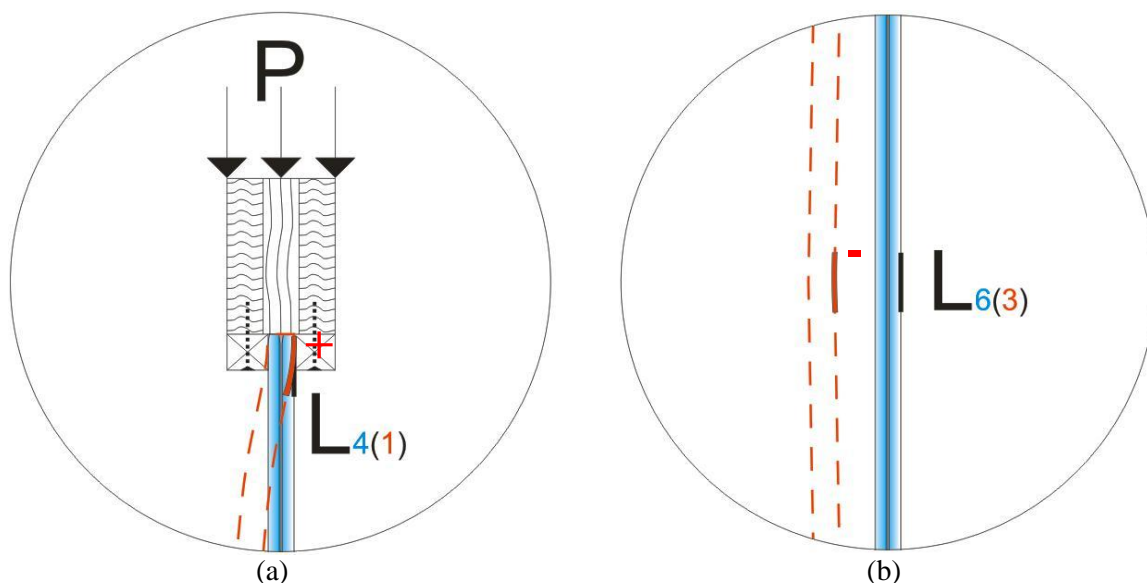
Z Grafikonom 25 so prikazane deformacije v odvisnosti od napetosti za stekleni panel, kjer je graf za Preskušane 3 obrnjen v pozitivno smer (natezne deformacije), grafa za preskušane 1 in 2 pa sta obrnjena v negativno smer (tlačne deformacije). Vzrok za to je smer uklona steklenega panela med preskusom, saj so se deformacije merile le na eni (desni) ploskvi steklenega preskušane. V vseh treh primerih je prišlo do porušitve pri vrednosti deformacije $\sim 1 \text{ ‰}$ (pozitivne ali negativne). Ta rezultat lahko primerjamo tudi z rezultati upogibnega preskusa enojnega bručnega (poglavje 6.3.1 *Upogibni preskus enojnega ravnega stekla*) in lameliranega stekla (poglavje 6.3.2 *Upogibni preskus lameliranega stekla*), kot tudi z rezultati tlačnega preskusa samega stekla (poglavje 6.4.1 *Tlačni preskus stekla*), kjer je vedno prišlo do porušitve pri $\sim 1 \text{ ‰}$ deformacije (Preglednica 24). Za hitro povečanje deformacij, pri vrednosti $-0,53 \text{ ‰}$ za prvi preskušane in vrednosti $-0,34 \text{ ‰}$ za drugega, je vzrok uklon stekla (Grafikon 25). Zaradi tega se ravno takrat v lameliranem steklu povečajo na eni strani tlačne in na drugi strani natezne deformacije.



Grafikon 25: Prikaz največjih deformacij [‰] v odvisnosti od napetosti [kN/cm²] za stekleni panel



Grafikon 26: Prikaz deformacij $\dot{\gamma}_{\text{poruš.}}$ [γ̇] glede na vi-ino steklenega panela h_{steklo} [mm]



Slika 45: Detajl uklona stekla z merilnimi listi i za deformacije (a) rob stekla - natezne ,
(b) sredina stekla - tla ne

Na Grafikonu 26 je prikazana vertikalna deformacijska linija pri poru-itvi steklenega panela za vse tri presku-ance. Poleg grafikona je -e slika steklenega panela za laffjo predstavo. Na njej so tudi ozna ena merska mesta za prvi presku-ane (L₄, L₅, L₆, L₈, L₉) ter za drugega in tretjega (L₁, L₂, L₃, L₅, L₆) ó glej tudi Sliko 43 in 44. Merilni listi i deformacij so bili v vseh treh primerih na desni strani (glej sliko poleg grafikona), prva dva panela sta se uklonila na levo stran (zato so listi i pokazali tla ne deformacije), tretji panel pa se je uklonil na desno stran (zato so deformacije pozitivne ó natezne). Na zgornjem in spodnjem robu, kjer je steklo vpeto v les, pa so deformacije ravno nasprotnega predznaka kot na sredini panela. Merilni listi je bil 5 mm od roba steklenega panela, tam pa je bilo steklo bolj »togo« vpeto v les in zaradi uklona steklenega panela pride na robovih do nateznih napetosti na sredini pa tla nih (na primer Presku-ane 1 in 2) ó detajl na Sliki 45.

Na naslednji strani lahko vidimo na Sliki 46 in 47 prikazane poru-itve steklenih panelov. Na Sliki 46(a) je tipi en vzorec poru-itve zaradi nateznih deformacij toplotno oja anega stekla. Zaradi uklona so bile na sredini najve je natezne deformacije, zato tudi vzorec poru-itve izhaja iz sredine, kjer je najbolj na drobno poru-eno steklo. V tem primeru je poru-eno samo steklo na zunanji strani uklona. Notranje, ki je prena-alo tla ne napetosti, pa je ostalo celo (Slika 47(a)). Ker je steklo lamelirano, so kosi poru-eneega stekla ostali prilepljeni na vmesni foliji in se obdrflali na notranjem celem steklu, kar je tudi bistvo varnostnega lameliranega

stekla. Na Sliki 46(b) pa lahko vidimo uklon stekla tik po poru-itvi, ki je pri tem presku-ancu zna-al dobrih 52 mm, tla na sila P_{poru-} pa nekaj ve kot 151 kN.

Slika 47(b) pa prikazuje poru-itev tretjega presku-anca, ki je bil ciklino obremenjen. Pri njem sta se poru-ila oba stekla hkrati in zaradi tla ne sile prelomila na sredini. Na obeh steklih je bil tipi en vzorec poru-itve, kot na Sliki 46(a), ki je izhajal iz sredine. Pri tej poru-itvi je odtrgalo spodnjo leseno letev s katero je bilo steklo vpeto v les, kar se pri prvih dveh preskusih ni zgodilo. Zaradi tega bi morali v prihodnje lesene letve pritrditi z dalj-imi in debelej-imi vijaki in mogo e uporabiti tudi debelej-e letve, da bi bilo steklo mo neje vpeto v les.



(a)



(b)

Slika 46: Tla ni preskus steklenega panela I., (a) poru-eni presku-ane, (b) viden uklon stekla



(a)



(b)

Slika 47: Tla ni preskus steklenega panela II., (a) poru-eno le steklo na natezni strani, (b) poru-ena oba stekla (Presku-anec 3)

7 ZAKLJU EK

Ta diplomska naloga je raziskovalne narave, ki se predvsem osredoto a na fle omenjeni problem konstrukcijskega stekla. V uvodnem delu je steklo predstavljeno bolj na splo-no, se pravi od njegovega nastanka do razvoja in uporabe v sedanjem asu. Pri tem sem se bolj osredoto il na vrste stekla, ki se uporabljajo kot konstrukcijska. To so lamelirana stekla iz kaljenih ali toplotno utrjenih stekel, predstavljeni so postopki toplotne obdelave (kaljenje in toplotno utrjevanje) ter najbolj zna ilna postopka lameliranja. V etrtem poglavju je pregled trenutne proizvodnje in porabe stekla v gradbeni-tvu glede na svetovni trg. Predstavljeni so najve ji svetovni proizvajalci stekla in njihovi trfni deleffi ter poraba stekla v svetu glede na najve je drflave.

Potem sledi peto poglavje v katerem je na kratko prikazana uporaba lameliranega stekla kot nosilni del konstrukcije. Iz arhitekturnega pogleda, je opaziti zadnji trend sodobne arhitekture, ki streimi k im ve jim odprtinam v stavbah zapolnjenimi s steklom. Tak-en primer so povsem prozorni paviljoni, kjer so uporabljeni stekleni paneli kot vertikalni nosilni del konstrukcije, brez kakr-nihkoli jeklenih, betonskih ali lesenih vertikalnih nosilnih elementov. Stekleni paneli morajo prenesti vso dano obteffbo, teflo strehe in obremenitev vetra, na temelje ter stabilizirati in oja ati celoten objekt. Obstaja kar nekaj raziskav in standardov o upogibni trdnosti stekla, podro je o osni nosilnosti (strifni, tla ni, natezni) stekla je pa zelo malo raziskano. To poglavje je primeren uvod v zadnje, kjer so predstavljeni rezultati in ugotovitve vseh na-ih laboratorijskih preskusov.

Za eli smo z osnovnimi preskusi upogibne trdnosti stekla, kjer smo presku-ali razliko med rezanimi in bru-enimi robovi stekla. Ugotovili smo, da imajo stekla z bru-enimi robovi veliko ve jo upogibno nosilnost kot samo rezana. Z bru-enjem in poliranjem robov se odstranijo in zgladijo vse majhne razpoke, ki vsaka posebej predstavlja potencialni za etek loma stekla. Nato smo nadaljevali z upogibnim preskusom lameliranega stekla, kjer smo bili predvsem pozorni na zdrs med stekli pri upogibu. Pri tem preskusu smo uporabili dve razli ni foliji za lameliranje, to sta bili PVB in EVASAFE. Obe sta bili predhodno presku-eni tudi z visoko temperaturnim preskusom in vlatnostnim preskusom s kondenzacijo. Pri-li smo do zaklju ka, da je EVASAFE folija bolj primerna. Vrednosti zdrsa so bile manj-e, kar se pravi, da je bolj

lepljiva s steklom in poleg tega je –e odporna na vlago, saj je pri vlažnostnem preskusu s kondenzacijo pri–lo do delaminacije pri PVB foliji. Potem so sledili tla ni preskusi najprej samega lameliranega toplotno utrjenega stekla pri katerem smo ugotavljali njegovo tla no trdnost, ki je bila pomembna za usmeritev nadaljnih preskusov. Presku–anec 300 x 300 mm je prenesel 705 kN tla ne sile, zato smo vedeli, da bo pri nadaljnih preskusih –ibek len les. Nadaljni tla ni preskusi stekla v kombinaciji z lesom so potekali predvsem v ugotavljanju nosilnosti, ko je steklo nalegalo pravokotno na lesena vlakna ali vzporedno z njimi. Izkazalo se je, da je nosilnosti pravokotno na lesena vlakna ~20% glede na nosilnost vzporedno z lesenimi vlakni. Na koncu smo pa preskusili –e stekleni panel iz lameliranega, toplotno utrjenega stekla dimenzije 2400 x 1250 mm v kombinaciji z lesom. Zaradi vi–ine steklenega panela je bil pri tem preskusu problem uklon. Do poru–itve je pri–lo, ko je steklo, na zunanji strani uklona, prekora ilo natezne deformacije ~1ÿ . Kljub temu je tak–en stekleni panel dosegel v povpre ju najve jo tla no silo 177 kN s imer smo dosegli na– namen in dokazali, da je steklo zmofno prenesti tla no obteflbo 30 kN/m in bi se ga lahko uporabilo kot nosilni del konstrukcije glede na ta pogoj. Vendar pa bi bile potrebne –e dodatne preiskave na osni strifni nosilnosti (obteflba potresa, obteflba vetra), da bi lahko steklo sluffilo temu namenu. Zaklju il bi z mislijo, da je steklo sodoben gradbeni material z dolgoletno tradicijo in –e obetavnej–o prihodnostjo.

VIRI

Bridgestone EVASAFE Interlayer Film ó User Information, izdaja januar 2006.

EVASAFE interlayer adhesive film. Bridgestone.

<http://www.evasafe-nordic.com/evasafe/index.php?latest> (1.9.2009).

Glass Guide edition 2000, Saint Gobain Glass. Str. 4-6, 258-268, 270-280.

Grobov-ek, B. Uporaba stekla v gradbeni-tvu.

<http://gcs.gi-zrmk.si/svetovanje/clanki/grobovsek/pt155.html> (9.6.2009).

Hajdinjak, R. 2009. Gradimo s steklom, tretja izdaja. Gornja Radgona, Reflex d.o.o.: str. 23-27, 135-169.

High Performance Film EVASAFE. Bridgestone.

<http://www.bridgestone.com/products/diversified/evasafe/index.html> (28.6.2009).

Kobentar, J. Reciklaža in zgodovina stekla.

<http://www.kemija.org/index.php/kemija-mainmenu-38/24-kemijacat/55-reciklaa-in-zgodovina-stekla> (18.1.2010).

Mocibob, D. 2008. Glass Panel under Shear Loading ó Use of Glass Envelopes in Building Stabilization. Doktorska disertacija. Nem ija, Ruhr-Universität Bochum: 143 str.

Pilkington and the Flat Glass Industry 2010.

<http://www.nsggroup.net/about/index.html> (15.11.2010).

PVB Laminated Glass.

http://www.aisglass.com/pvb_laminated.asp (26.7.2009).

SIST EN ISO 12543-4:2008 Steklo v stavbah ó Lamelirano steklo in lamelirano varnostno steklo ó 4. del: Metode presku-anja trajnosti

Weller, B., Härth, K., Tasche, S., Unnewehr, S. 2009. Detail practice Glass in building, prva izdaja. Munich, Architektur-Dokumentation GmbH&Co. KG: 112 str.

