

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Černoša, M., 2015. Leseno stekleni stenasti konstrukcijski elementi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 68 str.

Datum arhiviranja: 20-07-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Černoša, M., 2015. Leseno stekleni stenasti konstrukcijski elementi. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 68 p.

Archiving Date: 20-07-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

MAJA ČERNOŠA

**LESENO STEKLENI STENASTI KONSTRUKCIJSKI
ELEMENTI**

Diplomska naloga št.: 3442/KS

TIMBER GLASS WALL STRUCTURAL ELEMENTS

Graduation thesis No.: 3442/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

doc. dr. Matevž Dolenc

doc. dr. Franc Sinur

Ljubljana, 24. 06. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVE

Podpisana MAJA ČERNOŠA izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom
»LESENO STEKLENI STENASTI KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ponikva, 12. junij 2015

Maja Černoša

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.07:691(497.4)(043.2)
Avtorica: Maja Černoša
Mentor: prof. dr. Boštjan Brank
Naslov: Leseno stekleni stenasti konstrukcijski elementi
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 68 str., 12 pregl., 6 graf., 42 sl., 39 en.
Ključne besede: leseno stekleni stenasti konstrukcijski elementi, les, steklo, adhezivi, mehanski model, vzmeti, togost sistema

Izvleček

V diplomski nalogi smo uporabili mehanski model, ki vključuje vzmeti, za izračun mejnega stanja nosilnosti leseno steklenega stenastega elementa z adhezivnim stikom med steklom in lesom (imenovanega tudi panel). Mehanski model smo povzeli po Huveners, E. M. P. 2009, Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Façades, Doctoral Dissertation. Eindhoven University of Technology, the Netherlands, kjer je model izpeljan za preračun jekleno steklenega panela. Želeli smo preveriti, če se izpeljani model lahko uporablja tudi za leseno steklene panele. Uporabili smo ga za izračun leseno steklenega panela, ki ga proizvaja Kager Hiše d.o.o. in ki so ga eksperimentalno preizkusili na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru. Osredotočili smo se na eno vrsto lepljenega stika med steklom in lesom, na obodni lepljen stik. Eksperimenti so bili namreč izvedeni le za to vrsto stika, pa tudi enačbe modela so bile izpeljane le za ta tip. Ugotovili smo, da se v primeru ustrezne izbire elastičnega in strižnega modula adheziva (na podlagi delovnega diagrama uporabljenega adheziva), togost sistema, dobljena z uporabljenim mehanskim modelom, zelo lepo ujema s togostjo sistema izmerjeno med eksperimenti.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDK: 624.07:691(497.4)(043.2)
Author: Maja Černoša
Supervisor: Prof. Boštjan Brank, Ph. D.
Title: Timber glass wall structural elements
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 68 p., 12 tab., 6 graph., 42 fig., 39 eq.
Keywords: timber glass wall structural elements, timber, glass, adhesives, mechanic model, springs, stiffness of the system

Abstract

Thesis deals with mechanic model with springs to calculate the plastic limit state of timber glass wall with an adhesive bonded joint between glass and timber (also called panel). The mechanic model was taken from the doctoral dissertation Huveners, E. M. P. 2009, Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Façades, Doctoral Dissertation. Eindhoven University of Technology, the Netherlands, who carried out the equations for calculating the steel glass panel. We wanted to check if the derived mechanic model can also be used for timber glass panels. We used it to calculate the timber glass panel produced by Kager Hiše d.o.o. and which was experimentally tested by the Faculty of Civil Engineering, University of Maribor. We focused only on one type of the adhesive joint between timber and glass, on circumferential adhesive joint. Experiments were carried out only for this type of adhesive joint and also the equations for mechanic model were derived only for this type of adhesive joint. We found out that the stiffness of the system calculated with mechanic model is in good agreement with the stiffness of the system got from experimental results in the case of appropriate selection of the modulus of elasticity and shear modulus of the adhesive (based on the working diagram of the adhesive).

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Za vsa pomoč, koristne nasvete, spodbudo, usmeritve in potrpežljivost tekom pisanja diplomske naloge se najlepše zahvaljujem mentorju *prof. dr. Boštjanu Branku*. Za vse informacije, koristne nasvete, popravke in pomoč se zahvaljujem *Sari Piculin*.

Zahvaljujem se tudi vsem sošolkam, sošolcem in prijateljem, s katerimi smo skupaj preživljali nepozabne študijske dni.

Posebna zahvala gre mojemu možu *Primožu*, ki mi je med študijem in pisanjem diplomske naloge stal ob strani in me spodbujal v najbolj napornih trenutkih.

Največja zahvala pa gre seveda *mami Martini* in *očetu Jožetu*, ki sta mi študij omogočila in me pri tem venomer spodbujala, finančno podpirala ter ves čas verjela vame.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	LESENO STEKLENE KONSTRUKCIJE	3
2.1	Splošno o leseno steklenih konstrukcijah.....	3
2.2	Primeri uporabe nosilnih leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov na izvedenih stavbah	8
2.3	Primeri uporabe nenosilnih leseno steklenih konstrukcij	10
2.4	Leseno stekleni nosilci	12
3	LESENO STEKLENE STENE	15
3.1	Lesen okvir	16
3.1.1	Les in njegove lastnosti	16
3.1.2	Sestava lesenega okvirja.....	17
3.2	Steklena plošča	17
3.2.1	Vrste stekla.....	17
3.2.2	Steklo kot nosilni material	18
3.3	Adhezivi.....	20
3.3.1	Epoksidi.....	23
3.3.2	Poliuretani	23
3.3.3	Silikoni	24
3.4	Vrste lepljenih stikov	24
3.4.1	Stik tipa 1.....	24
3.4.2	Stik tipa 2.....	25
3.4.3	Stik tipa 3.....	26
4	MODELIRANJE OBNAŠANJA LESENO STEKLENE STENE	27
4.1	Osnovni mehanski model.....	27
4.2	Oznake	29
4.3	Kriteriji	30
4.4	Razlaga enačb.....	31
4.4.1	Normalna togost lepljenega stika ($k_{j,\xi}$).....	31
4.4.2	Strižna togost lepljenega stika ($k_{j,\eta}$).....	32
4.4.3	Razporeditev normalnih in strižnih vzmeti (K_1 do K_{12})	33
4.4.4	Normalna togost normalnih vzmeti (K_1 do K_4 in K_7 do K_{10})	34

4.4.5	Strižna togost strižnih vzmeti (K_5 , K_6 , K_{11} in K_{12})	35
4.4.6	Pomik in zasuk leseno steklene stene (u_{RTC} , φ)	36
4.4.1	Ravninska togost sistema (K_S).....	37
4.4.2	Največji relativni ravninski pomiki.....	39
4.4.3	Normalne in strižne napetosti v lepljenem stiku	39
4.4.4	Prvi stik stekla in lesa	41
5	EKSPERIMENTI Z LESENO STEKLENIMI STENAMI	43
5.1	Podatki eksperimenta s Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru.....	43
5.1.1	Leseni del preizkušancev	43
5.1.2	Stekleni del preizkušancev	45
5.1.3	Uporabljeni adhezivi za lepljene spoje preizkušancev.....	45
5.1.4	Potek eksperimenta	49
5.1.5	Rezultati eksperimenta	50
6	RAČUN PO MEHANSKEM MODELU IN PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTALNIMI TESTI	53
6.1	Izhodišče	53
6.1.1	Dvo-komponentni silikon.....	53
6.1.2	Eno-komponentni poliuretani	54
6.1.3	Dvo-komponentni epoksi	55
6.2	Osnovni parametri modela.....	56
6.2.1	Dimenzije modela	57
6.2.2	Razporeditev vzmeti	57
6.3	Izračun za primer uporabe silikonskega adheziva.....	58
6.4	Izračun za primer uporabe poliuretanskega adheziva	61
6.5	Primerjava med poliuretanom in silikonom.....	63
7	ZAKLJUČEK.....	65
VIRI	67

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primeri kategorij togosti na nekaj izbranih adhezivih znanih proizvajalcev [7]	21
Preglednica 2: Materialne karakteristike uporabljenega lesa [2].....	44
Preglednica 3: Materialne karakteristike uporabljenega stekla [2].....	45
Preglednica 4: Mehanske lastnosti dvo-komponentnega silikona (Ködiglaze S) [2].....	46
Preglednica 5: Mehanske lastnosti eno-komponentnega poliuretana (Ködiglaze P) [2].....	47
Preglednica 6: Mehanske lastnosti dvo-komponentnega epoksija (Körapox 558) [2].....	48
Preglednica 7: Osnovne dimenzije sestavnih delov obravnavanega modela.....	57
Preglednica 8: Oddaljenost posamezne vzmeti od središča stekla.....	57
Preglednica 9: Rezultati za posamezno količino za tangentno in sekantno vrednost modulov v primeru uporabe silikonskega adheziva.....	59
Preglednica 10: Primerjava izračunanih in eksperimentalnih pomikov in sil za silikon.....	60
Preglednica 11: Rezultati za posamezno količino za tangentno in sekantno vrednost modulov v primeru uporabe poliuretanskega adheziva.....	61
Preglednica 12: Primerjava izračunanih in eksperimentalnih pomikov in sil za poliuretan	62

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Delovni diagram za silikon, skupaj s tangentno in sekantno določitvijo modula elastičnosti.....	53
Grafikon 2: Delovni diagram za poliuretan, skupaj s tangentno in sekantno določitvijo modula elastičnosti.....	54
Grafikon 3: Delovni diagram za epoksi, skupaj s tangentno in sekantno določitvijo modula elastičnosti.....	56
Grafikon 4: Grafikon sila-pomik za silikon, ki zajema podatke iz eksperimenta in izračuna ..	60
Grafikon 5: Grafikon sila-pomik za poliuretan, ki zajema podatke iz eksperimenta in izračuna ..	62
Grafikon 6: Primerjava grafov sila-pomik za silikon in poliuretan.....	64

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO SLIK

Slika 1: Leseno steklena montažna stena - nadomestilo klasičnih obložnih plošč s steklom [6]	4
Slika 2: Predlog prenove delovnega prostora na Tehnični univerzi Dunaj in detajl povezave (Avtor: A. Januzzi) [6].....	4
Slika 3: Ojačitvene leseno steklene kompozitne stene in podpore za notranjo uporabo (levo) ter rekonstruiran balkon z varnostno ograjo in leseno steklenimi kompozitnimi podporami (desno) (Avtor: A. Januzzi) [6].....	4
Slika 4: Notranji pogled na stekleno mrežasto lupino in na mrežasto leseno lupino s stekleno oblogo na avtobusnem terminalu Hütteldorf na Dunaju (Avtor: V. Schedl) [6]	5
Slika 5: Predlog prenove fasade stanovanjskega objekta, zgrajenega v šestdesetih letih (Avtor: E. Bavirli) [6].....	6
Slika 6: Prikaz postopka postavitve montažnih leseno steklenih fasadnih elementov (Avtor: E. Bayirli) [6].....	6
Slika 7: Različni modeli stanovanjskih lesenih hiš z delavnice "Lesena nizkoenergijska hiša", ki je leta 2010 potekala na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, Slovenija (Žegarac Leskovar, 2010) [6]	7
Slika 8: Modeli vrtcev in večnamenskih dvoran z delavnice »Energetsko učinkovita javna lesena stavba«, ki je leta 2011 potekala na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, Slovenija (Žegarac Leskovar, 2011) [6].....	8
Slika 9: Dvonadstropna enodružinska hiša s stekleno lesenimi stenastimi elementi, zgrajena v mestu Eichgraben, Avstrija (Vir: Žegarac Leskovar, 2013) [6]	9
Slika 10: Raziskovalna stavba v obliki bungalova s severno in južno stekleno fasado [6]	10
Slika 11: Stavba ojačena z leseno stekleno kompozitno konstrukcijo, postavljeno s strani podjetja Creative Box Company Gaulhofer [6]	10
Slika 12: Stanovanjska hiša Vitanova [14].....	11
Slika 13: Vrtec Jelka v Ljubljani [15].....	11
Slika 14: Hotel Terme Čatež [16]	12
Slika 15: Leseno stekleni I nosilec [5]	12
Slika 16: Leseno stekleni I nosilci za strešno obtežbo v hotelu na jezeru Neuenburg, Švica [6]	13
Slika 17: Leseno steklena stena	15
Slika 18: Idealizirane materialne smeri lesa. Radialna in tangencialna smer sta označeni z r in t [5].....	16
Slika 19: Tipična razporeditev napetosti vzdolž debeline v toplotno ojačenem steklu [5].....	18
Slika 20: Primer troslojne zasteklitve [6].....	19

Slika 21: Modeli za testiranje na potresni mizi v Skopju [6]	19
Slika 22: Povprečne krivulje natezna napetost-deformacija za tri SIKA adhezive EP (SD 330), PU (S-Force 7851, $v=5$ mm/min) in ADP (SikaFast 5221, $v=5, 10, 100$ mm/min) [7].....	21
Slika 23: Obremenitev ob pretrgu in izračunane obremenitve ($H/500$) ter primerjava med enostransko dvostransko obloženo steno z OSB ploščo [4]	22
Slika 24: Skica stika tipa 1 [6]	25
Slika 25: Skica stika tipa 2 [6]	26
Slika 26: Skica stika tipa 3 [6]	26
Slika 27: Geometrija mehanskega modela in obnašanje le-tega pod vplivom obtežbe v zgornjem desnem kotu (RTC)	28
Slika 28: Geometrija mehanskega modela in obnašanje le-tega pod vplivom obtežbe v zgornjem desnem kotu (RTC)	31
Slika 29: Oznake za lepljen stik [1].....	33
Slika 30: Razporeditev vzmeti	34
Slika 31: Prikaz pomikov in zasukov stekla oziroma okvirja	36
Slika 32: Prikaz določitve ravninske togosti sistema na polovici okvirja glede na središče stekla	38
Slika 33: Deformacije, ki jih meri merilni listič [8]	40
Slika 34: Prikaz prvega stika med steklom in lesom	41
Slika 35: Tehnična risba koncepta eksperimenta [2]	44
Slika 36: Delovni diagram dvo-komponentnega silikona [2].....	46
Slika 37: Delovni diagram eno-komponentnega poliuretana [2].....	47
Slika 38: Delovni diagram dvo-komponentnega epoksija [2]	48
Slika 39: Dispozicija preizkusa [2]	49
Slika 40: Normirane srednje vrednosti pomikov preizkušancev z različnimi oblogami [2]	50
Slika 41: Upogibna togost preizkušancev z različnimi steklenimi oblogami in adhezivi [2]....	50
Slika 42: Skica panela z označenimi položaji vzmeti.	58

1 UVOD

Sodobna arhitektura se nagiba k projektiranju energijsko učinkovitih stavb in k upoštevanju principov trajnostne gradnje. Gradnja z lesom omogoča oboje, poleg tega pa les vnaša v bivalno okolje pristnost in toplino narave. V zadnjih letih se je v Sloveniji precej razširila gradnja montažnih hiš, ki temelji na uporabi lesa kot osnovnega gradbenega materiala.

Uporaba stekla je postala v zadnjem desetletju vse pogostejše zastopana, saj so se z uporabo nizkoenergijskih nanosov, večplastnih zasteklitev in z dodajanjem žlahtnih plinov med plasti stekla močno izboljšale njegove fizikalne lastnosti. Steklene površine že nekaj časa ne predstavljajo le vizualne povezave prostora z okolico in vira naravne osvetlitve prostorov. Bistveno lahko prispevajo tudi k energijski učinkovitosti stavbe, saj ob pravilni izbiri orientacije in deleža zastekljenih površin omogočajo izkoriščanje solarnih toplotnih dobitkov. To predstavlja velik potencial za gradnjo okolju prijaznih in energijsko učinkovitih lesenih stavb. Steklo lahko tako zaradi svojih karakteristik postane novodobni gradbeni material, ekvivalenten nekaterim klasičnim gradbenim materialom, vendar ga je potrebno ustrezno in preiščeno uporabiti. Plosko steklo je v kombinaciji z lesenim okvirjem nosilno v svoji ravnini in lahko doprinese k horizontalni nosilnosti in togosti konstrukcije. Porušitev leseno steklenih sten je hipna, zato je potrebno pri projektiranju posebno pozornost posvetiti dilatacijam med steklenimi elementi ali med spoji z lesom. Steklo zaradi nezmožnosti doseganja plastičnih deformacij ne disipira napetosti, zato se želimo izogniti koncentracijam napetosti, kar dosežemo s primernimi spoji [2].

Vedno večje steklene površine so na področju projektiranja stavb pripeljale inženirje do velikih tehničnih izzivov. Stenasti konstrukcijski elementi morajo prenašati vertikalne obtežbe, kot so: lastna teža, koristna obtežba, obtežba snega in dodatno zagotavljati bočno stabilnost v primeru obtežbe vetra in potresa. V primeru, da velike dele ali pa kar celotne stene nadomestimo s stekleno fasado, lahko vertikalne obtežbe prenesejo sistemi vencev in pokončnikov, vendar manjka komponenta bočne ojačitve. Rezultat odprave bočne ojačitve na eni strani stavbe je v primeru horizontalnih obtežb neugodna ekscentričnost, ki povzroča dodatne torzijske napetosti na preostalih stenastih elementih. Za preprečitev takšnih statičnih problemov je potrebno uporabiti ojačitvene elemente, kar je pri leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementih precej velik izziv, saj ne želimo, da se ojačitveni elementi kjerkoli vidijo in ovirajo samo transparentnost stene [4].

Konstrukcijska izvedba steklenih fasad v trenutnih predpisih ni definirana, vendar so stekleni stenasti konstrukcijski elementi združljivi z obremenitvami v ravnini. Ideja, da se pri računu

togosti konstrukcijskega elementa upošteva tudi togost zasteklitve, ni nova. V 19. stoletju so bile tako imenovane zelene hiše stabilne ravno po zaslugi steklenih plošč in kita. Danes se za stike namesto kita uporabljajo lepila. Uporaba neprekinjenih stikov ima dve prednosti. Prva je, da lepljen stik razporedi napetosti, druga pa, da predstavlja sloj za preprečitev direktnega stika med steklom in lesom [3].

V diplomski nalogi bom predstavila leseno steklene stenaste elemente, lastnosti osnovnih sestavnih elementov, eksperiment na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, enačbe za račun odziva takšnih sten na horizontalno točkovno obtežbo in primerjavo med eksperimentom in izračunom.

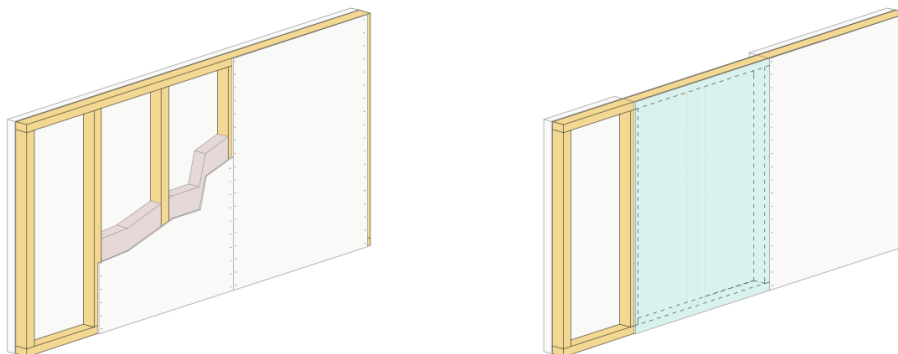
2 LESENO STEKLENE KONSTRUKCIJE

2.1 Splošno o leseno steklenih konstrukcijah

Les kot gradbeni material ima tako ugodne kot neugodne lastnosti. Z namenom, da bi zmanjšali njegove neugodne lastnosti in pridobili več uporabnih rešitev, so bile razvite različne vrste inženirskih lesenih proizvodov. Ti proizvodi imajo povečano homogenost, zmanjšano število napak, kar vpliva na trdnost in izpopolnjeno stabilnost glede na obliko. Primer takšnih inženirskih lesenih proizvodov so lepljen lameliran les, lameliran lepljen furnir (LVL) in OSB plošče (večslojno lepljene iveri) [5].

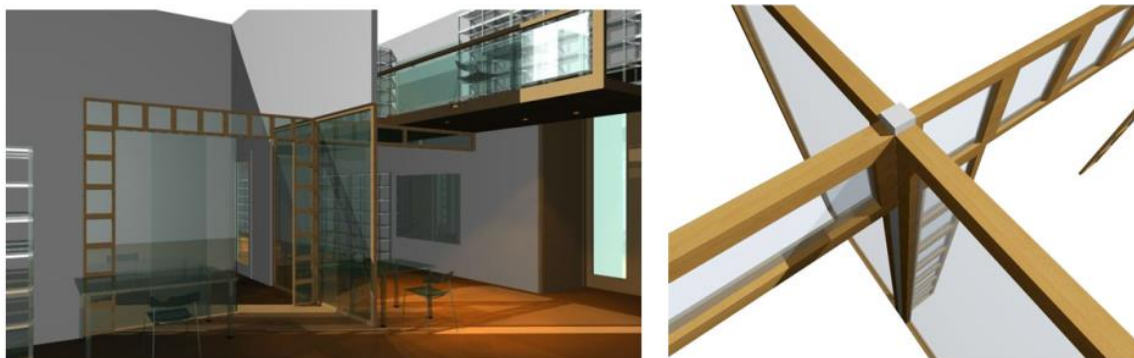
Različne vrste inženirskih lesenih proizvodov so v uporabi že kar nekaj časa in inženirji vedno znova stremijo k njihovim izboljšavam ter izpopolnitvam. K temu jih na nek način sili oziroma spodbuja tudi sodobna arhitektura, ki narekuje uporabo velikih steklenih površin v stavbnem ovoju. Zaželeno je, da steklene površine prekinja minimalno število netransparentnih členov v obliki lesenih horizontalnih in vertikalnih vezi, ki so potrebne za stabilnost stavbe. Zaradi potrebe po velikih transparentnih površinah se je pojavila potreba po uvedbi nosilnih leseno steklenih sten, kjer namesto klasičnih obložnih plošč in netransparentnih členov nastopa steklo. Leseno steklene stene morajo zato imeti sposobnost, da se uprejo ravninskim obremenitvam in tako nadomestijo lesene vezi [1].

Uporaba stekla v stavbah ima veliko pozitivnih učinkov. Eden izmed njih je izboljšanje energijske učinkovitosti stavbe, kar zlahka dosežemo z namestitvijo večine stekla na južno orientirane fasade in čim manj na severno orientirane. Ta ukrep vodi tudi do posebnih tehničnih izzivov na področju konstrukcijskega obnašanja nosilnih stenastih elementov z veliko zasteklitvijo, saj so lahko takšni konstrukcijski sistemi zelo problematični. Težave se pojavijo predvsem v primeru, ko je stavba z velikimi steklenimi površinami izpostavljena horizontalnim obtežbam. Glavna ideja, ki jo bom širše obravnavala v nadaljevanju diplomske naloge, je uporaba steklenih panelov kot nosilnih konstrukcijskih elementov. Na primer steklo na montažnih lesenih stenastih elementih, ki bi zamenjalo klasične obložne plošče ali vidne diagonale, kar prikazuje slika 1 [6].



Slika 1: Leseno steklena montažna stena - nadomestilo klasičnih obložnih plošč s steklom [6]

Veliko novih inženirskih idej začne svojo razvojno pot na različnih seminarjih in delavnicah, kjer sodelujejo študentje, profesorji, različna podjetja in ostali raziskovalci. Vse ideje se začnejo z zasnovno oblike in določitvijo funkcije, nato pa sledi detajlni tehnični razvoj skozi katerega se ugotovi konstrukcijsko smiselnost same ideje. Spodnje slike prikazujejo nekaj prvih oblikovalskih idej možnih aplikacij nosilnih in ojačenih leseno steklenih kompozitov, ki so bile razvite na seminarjih na Tehnični univerzi Dunaj [6].



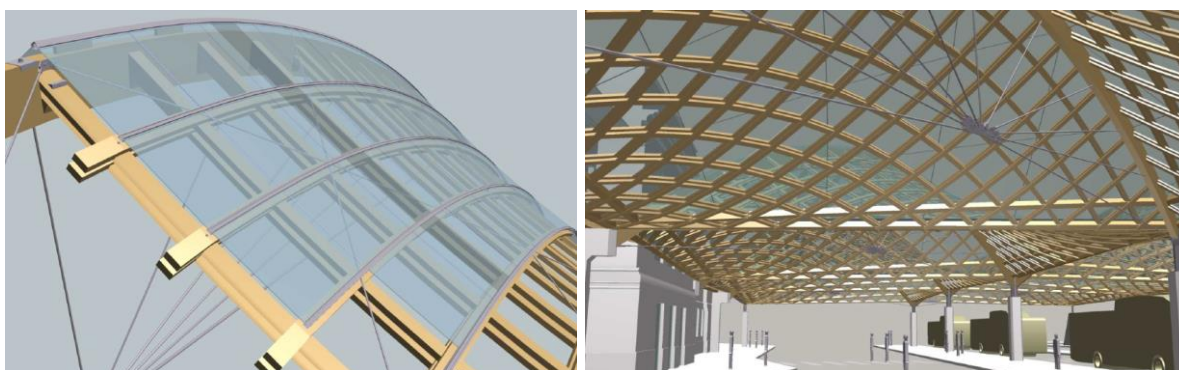
Slika 2: Predlog prenove delovnega prostora na Tehnični univerzi Dunaj in detajl povezave (Avtor: A. Januzzi) [6]



Slika 3: Ojačitvene leseno steklene kompozitne stene in podpore za notranjo uporabo (levo) ter rekonstruiran balkon z varnostno ograjo in leseno steklenimi kompozitnimi podporami (desno) (Avtor: A. Januzzi) [6]

Sliki 2 in 3 prikazujeta predlog, ki je bil razvit za izvedbo prenove delovnega prostora Tehnične univerze Dunaj. Zaradi obstoječega stropa in 4,3 m višine prostora, je bila ideja, da se v nadstropju v knjižnici izvede leseno steklena galerija, saj bi se s tem povečal uporaben prostor. Porušiti bi bilo potrebno nekatere obstoječe nosilne predelne opečnate stene in jih nadomestiti z nosilnim sistemom leseno steklenih nosilcev in okvirjev [6].

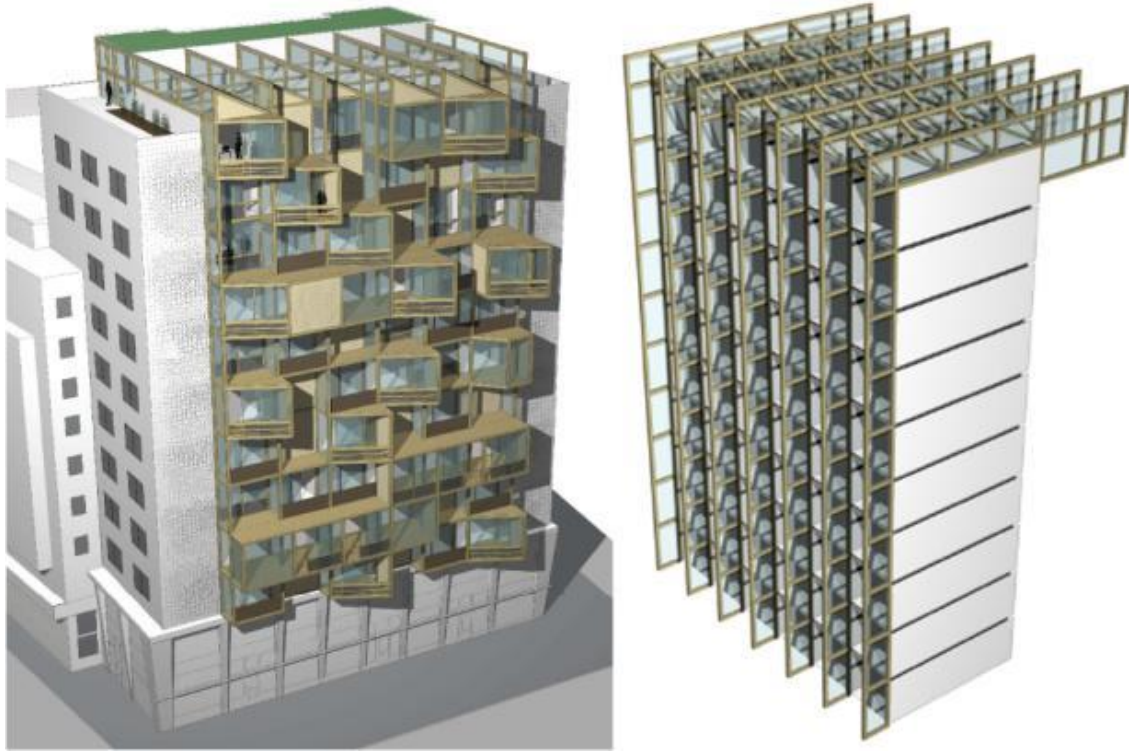
Poleg ostalih oblikovalskih idej se je nekaj študentov ukvarjalo tudi z leseno steklenimi lupinastimi konstrukcijami, kar prikazuje slika 4 [6].



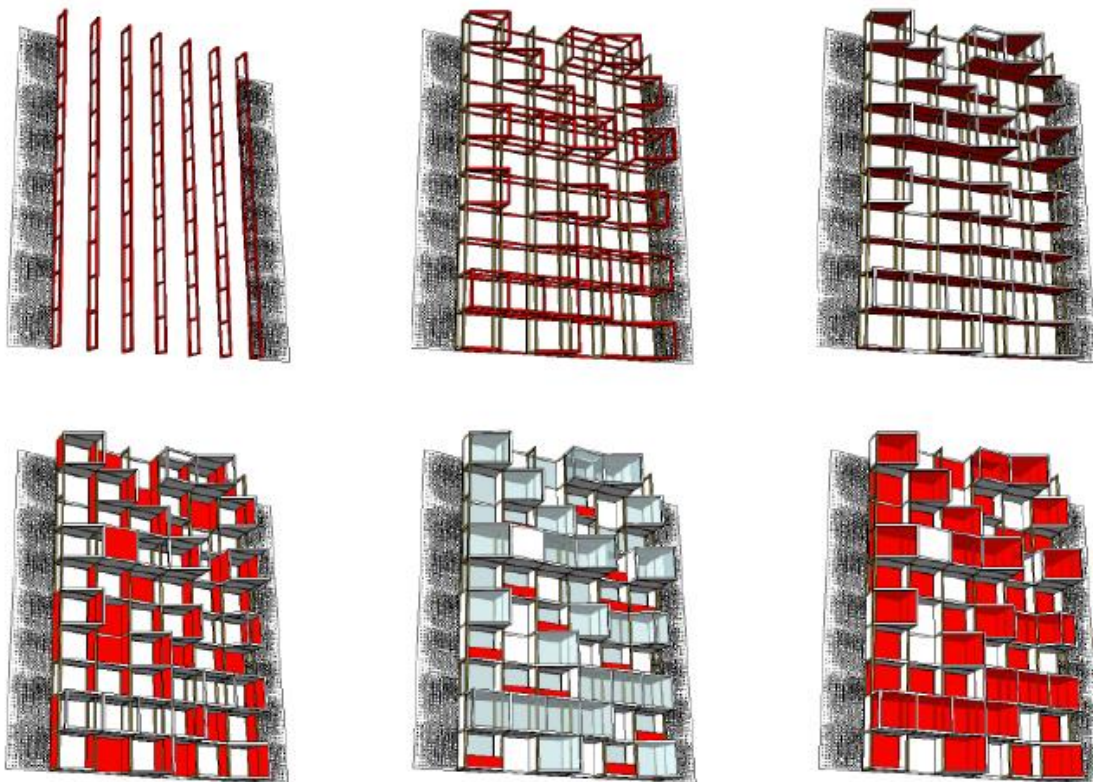
Slika 4: Notranji pogled na stekleno mrežasto lupino in na mrežasto leseno lupino s stekleno oblogo na avtobusnem terminalu Hütteldorf na Dunaju (Avtor: V. Schedl) [6]

Leseno steklene lupinaste konstrukcije so zelo uporabne pri velikih stavbah kot so letališki, avtobusni ali železniški terminali. Terminali so sestavljeni iz več velikih prostorov, kjer se gnetejo množice ljudi, zato morajo biti tudi primerno osvetljeni. V skladu z ekološko ozaveščenostjo je, da se za osvetljevanje porabi čim več naravne svetlobe, kar omogočajo ravno »steklene strehe«. Za takšne strehe je izredno uporabna kombinacija lesa in stekla, kar vidimo tudi na sliki 4.

V arhitekturi ima fasada stavbe že iz zgodovine izredno velik pomen. Ni pomembna le barva in njene kombinacije ter drugi »okraski«, temveč tudi njen doprinos k energijski učinkovitosti stavbe. Ravno uporaba leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov nam omogoča izvedbo transparentnih fasad, ki omogočajo izkoriščanje sončne energije kot toplote in hkrati tudi za naravno osvetlitev prostorov. S to vrsto fasade je močno zmanjšan vizualni vpliv konstrukcijskih stebrov, nosilcev, diagonal ali nepreglednih elementov, ki se uporabljajo za ojačenje same fasade stavbe. Vse to poveča arhitekturni pomen maksimalne transparentnosti in zmanjšane vidljivosti konstrukcijskih členov. Primer možne izvedbe transparentne fasade na že zgrajenem objektu je prikazan na slikah 5 in 6 [6].



Slika 5: Predlog prenove fasade stanovanjskega objekta, zgrajenega v šestdesetih letih (Avtor: E. Bavirli) [6]



Slika 6: Prikaz postopka postavitve montažnih leseno steklenih fasadnih elementov (Avtor: E. Bayirli) [6]

Na eni izmed delavnic, ki so v okviru razvojnega projekta leseno steklenih stavb potekale na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, so se ukvarjali z oblikovanjem rešitev energijsko učinkovitih leseno steklenih stavb. Osnovni cilj je bil razviti sodoben model nizkoenergijske lesene stanovanjske hiše ali javne ustanove s povečanimi površinami zasteklitve. Nekaj teh rešitev je prikazanih na slikah 7 in 8 [6].



Slika 7: Različni modeli stanovanjskih lesenih hiš z delavnice "Lesena nizkoenergijska hiša", ki je leta 2010 potekala na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, Slovenija (Žegarac Leskovar, 2010)

[6]

Na sliki 7 je prikazanih več modelov modernih lesenih stanovanjskih hiš, kjer so velike steklene površine skoncentrirane na južno orientiranih fasadah. Primeri zajemajo stanovanjske hiše na različnih terenih, tako ravninskih kot zmerno do precej strmih. To potrjuje dejstvo, da je lesena gradnja mogoča kjerkoli in da je vedno možno narediti energijsko učinkovito svetlo stanovanjsko hišo.



Slika 8: Modeli vrtcev in večnamenskih dvoran z delavnice »Energetsko učinkovita javna lesena stavba«, ki je leta 2011 potekala na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, Slovenija (Žegarac Leskovar, 2011) [6]

V zadnjem letu je država zelo povečala pomen energijski učinkovitosti javnih stavb. S sofinanciranjem spodbuja občine k energijski obnovi šol, vrtcev in ostalih javnih stavb, kjer se odločajo za novogradnje pa k gradnji energijsko učinkovitih javnih stavb. Slika 8 prikazuje nekaj možnih rešitev za gradnjo energijsko učinkovitega vrtca in večnamenske dvorane.

2.2 Primeri uporabe nosilnih leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov na izvedenih stavbah

V okviru različnih raziskovalnih projektov je bilo postavljenih nekaj manjših leseno steklenih stavb, na katerih so izvedli različne preiskave in tako preverili dejansko obnašanje leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov.

Prvi primeri lesenih stavb, sestavljenih iz leseno steklenih elementov, ki opravljajo funkcijo stenastih elementov odpornih na horizontalno obtežbo, stojijo v Avstriji. Dve stavbi z leseno

steklenim konstrukcijskim sistemom sta bili postavljeni v okviru raziskovalnega projekta "Holzforschung Austria (HFA)" [6].

Slika 9 prikazuje precej zanimivo nizkoenergijsko dvonadstropno enodružinsko hišo, ki stoji v mestu Eichgraben v Avstriji in je bila zgrajena v okviru zgoraj omenjenega projekta. Leseni okvirji sten so montažni. Izdelani so bili v tovarni in nato sestavljeni prepeljani na gradbišče. Tam so okvirje postavili na svoje mesto, vanje vstavili steklene plošče in jih po posebnem sistemu pritrdili [6].



Slika 9: Dvonadstropna enodružinska hiša s stekleno lesenimi stenastimi elementi, zgrajena v mestu Eichgraben, Avstrija (Vir: Žegarac Leskovar, 2013) [6]

Druga stavba, zgrajena v okviru zgoraj omenjenega projekta, je bil bungalov s severno in južno orientirano stekleno fasado. Stavba prikazuje izvedbo in proizvodnjo leseno steklenega sklopa po sistemu oblog in ponuja odprt prostor za vpogled v vzdržljivost in dolgoročno obnašanje takšnih stavb. V primerjavi z zgoraj omenjeno družinsko hišo v Eichgrabnu so bili stenasti elementi popolnoma dokončani v tovarni in nato prepeljani na gradbišče. Omenjeno stavbo prikazuje slika 10 [6].



Slika 10: Raziskovalna stavba v obliki bungalova s severno in južno stekleno fasado [6]

Tretji primer pa predstavlja stavba, ojačana z leseno stekleno kompozitno konstrukcijo, ki jo je postavilo podjetje Creative Box Company Gaulhofer. Predstavljena je na sliki 11 [6].



Slika 11: Stavba ojačana z leseno stekleno kompozitno konstrukcijo, postavljena s strani podjetja Creative Box Company Gaulhofer [6]

2.3 Primeri uporabe nenosilnih leseno steklenih konstrukcij

Za lažjo predstavo, kaj pomenijo nosilni leseno stekleni elementi, bom spodaj predstavila nekaj primerov, kjer leseno stekleni elementi nimajo primarne nosilne funkcije, torej ne prenašajo obtežbe. Stavbe so bile zgrajene za različne namene.

Slika 12 prikazuje enodružinsko stanovanjsko hišo, kjer primarno nosilno konstrukcijo predstavlja lesen skelet, steklo pa je uporabljeno kot polnilo [6].



Slika 12: Stanovanjska hiša Vitanova [14]

Primer javne ustanove, v tem primeru vrtca, pa prikazuje slika 13. Za primarno nosilno konstrukcijo so bili uporabljeni masivni leseni paneli, steklo pa ponovno nastopa le kot občasno polnilo.



Slika 13: Vrtec Jelka v Ljubljani [15]

Vedno bolj priljubljena postaja tudi nadgradnja obstoječih stavb z leseno steklenimi elementi. Sama gradnja poteka hitro, leseni in stekleni elementi pa imajo v primerjavi z drugimi konstrukcijskimi elementi nizko maso. Takšen primer je nadgradnja obstoječega hotela Term Čatež za dve nadstropji, kar prikazuje slika 14 [6].



Slika 14: Hotel Terme Čatež [16]

Čeprav je v predstavljenih zgradbah steklo brez nosilne funkcije, lahko iz zgoraj predstavljenih primerov sklepamo, da je potencial za uporabo nosilnih leseno steklenih kompozitnih elementov relativno visok. Predvsem iz estetskega, funkcionalnega in konstrukcijskega vidika. Z uporabo steklenih panelov, namesto klasičnih obložnih plošč, diagonalnih členov in betonskih komponent, bi stavbe dosegle boljše rezultate pri *LCA* in energetski učinkovitosti. *LCA* predstavlja kratico za »Life-cycle assessment«, kar v prevodu pomeni ocena življenjskega cikla. Ocena življenjskega cikla predstavlja oceno okoljskih vplivov, povezanih z vsemi fazami življenja proizvoda, vse od pridobivanja surovin do uporabe in na koncu recikliranja [6], [9].

2.4 Leseno stekleni nosilci

Najpogostejši materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu, so beton, jeklo in les, zato ni presenetljivo, da ob besedi nosilec najprej pomislimo ravno na nosilce iz teh treh vrst materialov. Inženirji so preizkušali že vrsto nosilcev iz različnih materialov, med njimi tudi manj znan leseno stekleni I nosilec, ki je sestavljen iz dveh lesenih pasnic in steklene stojine. Leseni pasnici sta sestavljeni iz dveh delov, med njima pa je steklena stojina, ki je nanju pritrjena s pomočjo adheziva. Skico leseno steklenega I nosilca prikazuje slika 15.



Slika 15: Leseno stekleni I nosilec [5]

Primer uporabe takšnih leseno steklenih I nosilcev je prototipska nosilna konstrukcija strehe hotela Palafitte v Švici. Na tem objektu je bil izveden tudi test za ugotavljanje trajnih deformacij leseno steklenih I nosilcev. Pri tem testu so bile uporabljene največje predpostavljene obremenitve. Razen nekaj deformacij zaradi dnevno nočnih temperaturnih razlik, so predvidevali, da bi se naj po štirih tednih deformacija ustalila pri 12 mm. Po tem, ko je bil hotel zgrajen, pa so meritve pokazale, da se je deformacija ustalila že pri 4 mm, kar je le tretjina deformacije oz. povesa iz preračuna.

Leseno steklene I nosilce so uporabili tudi za strešno konstrukcijo hotela na jezeru Neuenburg v Švici, kar prikazuje slika 16 [6].



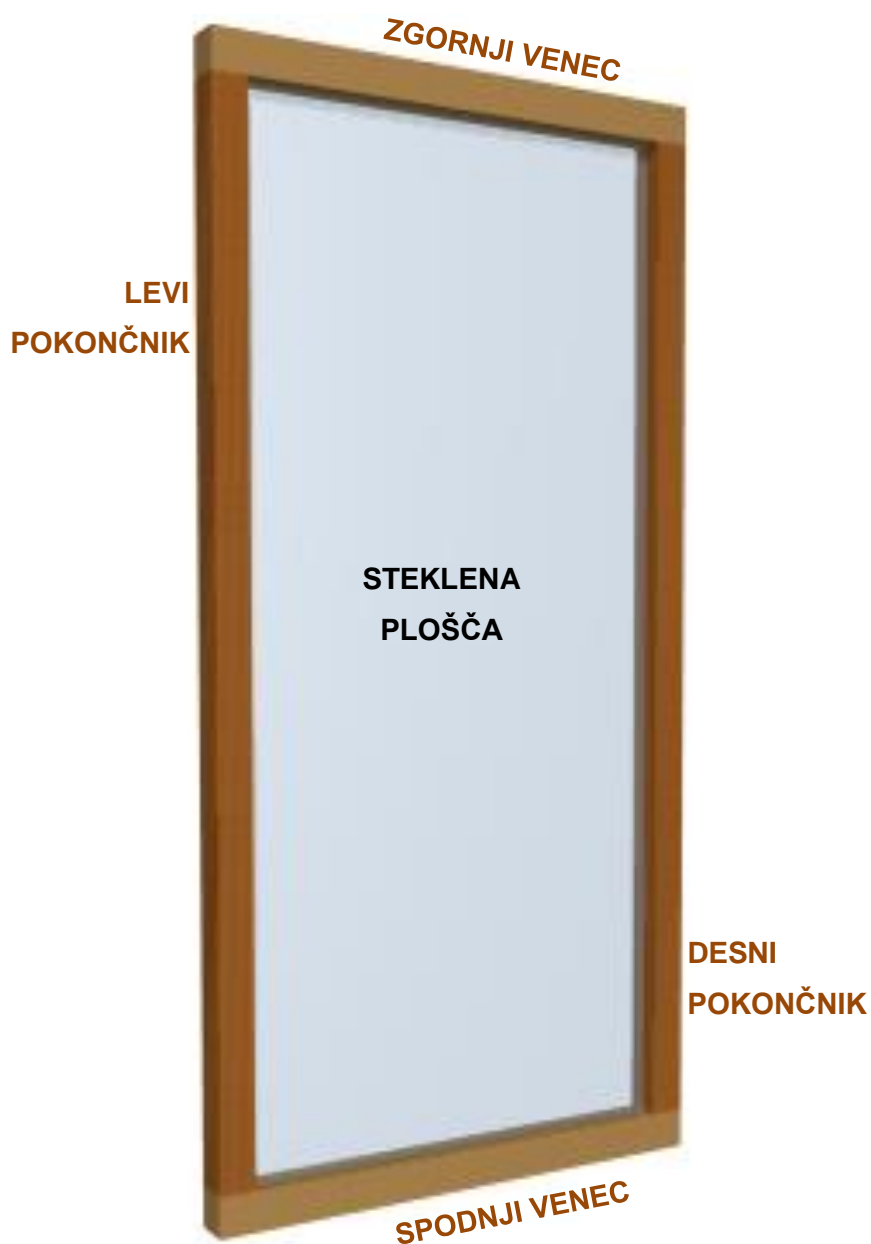
Slika 16: Leseno stekleni I nosilci za strešno obtežbo v hotelu na jezeru Neuenburg, Švica [6]

»Ta stran je namenoma prazna.«

3 LESENO STEKLENE STENE

Leseno steklene stene so sestavljene iz treh glavnih komponent. To so lesen okvir, steklena plošča in adheziv oz. lepljen stik, s pomočjo katerega je steklena plošča pritrjena na lesen okvir.

Slika 17 prikazuje vse štiri stranice lesenega okvirja in stekleno ploščo. Adheziva na takšni sliki ni možno prikazati, saj je neviden, torej ne vpliva na transparentnost same stene, kar je ena izmed lastnosti, ki jo želimo pri leseno steklenih stenah.



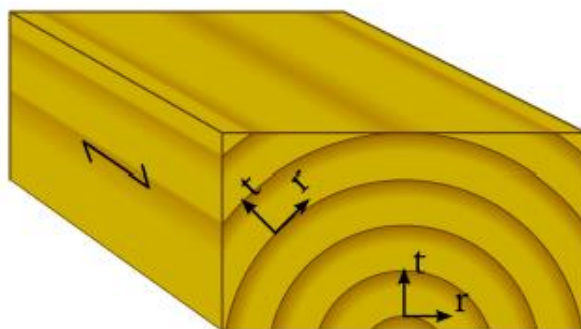
Slika 17: Leseno steklena stena

V nadaljevanju tega poglavja bom malce podrobneje predstavila vse tri glavne komponente leseno steklene stene. Predstavila bom njihove pozitivne in negativne mehanske lastnosti ter nekaj različnih vrst stekla in adheziva.

3.1 Lesen okvir

3.1.1 Les in njegove lastnosti

Les je anizotropen material, kar pomeni, da se njegove lastnosti v različnih smereh spreminjajo. To je predvsem posledica letnic, ki se oblikujejo med rastjo drevesa. Idealizirano je les ortotropen glede na cilindričen koordinatni sistem, kar je vidno na sliki 18. Ortotropen material ima tri različne smeri in za les so te radialne oziroma tangencialne na letnice in vzdolž vlaken. Glavna razlika v materialnih lastnostih je vzdolž vlaken v primerjavi z lastnostmi pravokotno na vlakna [5].



Slika 18: Idealizirane materialne smeri lesa. Radialna in tangencialna smer sta označeni z r in t [5]

Zaradi naravnih karakteristik je les nehomogen material z razlikami in napakami, kot so grče in druge napake nastajajoče, med rastjo in življenjskimi pogoji drevesa. Les se oblikuje, ko je drevo mlado in ima drugačne lastnosti kot les, ki se oblikuje kasneje. Poleg tega se bolj vzdržljiv les tvori v notranjosti drevesa. Če je drevo na primer izpostavljeno nesimetričnim obtežbam, pogojem, kot je na primer nagib drevesa, vetrovne razmere ali težke veje, se bo izoblikoval les z drugačnimi lastnostmi v primerjavi z lesom, ki je rastlo v normalnih pogojih [5].

Vlaknena struktura lesa vpija in izloča vlago, kar spreminja relativno vlažnost okolja. Vlažnost lesa vpliva na njegove mehanske lastnosti kakor tudi na njegovo prostornino. Učinek prostorninskih sprememb je, da krčenje zaradi sušenja lahko povzroči napetosti. Te napetosti lahko povzročijo razpoke, ki zmanjšujejo trdnost lesenega elementa. Ker ima ortotropen les veliko manjšo trdnost pravokotno na vlakna v primerjavi vzdolž vlaken, je

natezna napetost pravokotno na vlakna ena od razporeditev napetosti, ki se ji je potrebno izogniti [5].

3.1.2 Sestava lesenega okvirja

Lesen okvir je sestavljen iz dveh pokončnikov in dveh vencev, ki imata običajno pravokotni prerez, v nekaterih primerih pa je le-ta tudi kvadraten. Kot za večino nosilcev, tudi za elemente lesenega okvirja velja, da je boljši pravokotni prerez, saj vedno potrebujemo v eni smeri več nosilnosti kot pa v drugi.

3.2 Steklена plošča

Steklene plošče morajo biti povezane z zgradbo, zato da so preprečene konice napetosti in da je zagotovljeno enakomerno prenašanje obtežbe z nosilne konstrukcije na steklo in obratno [4].

3.2.1 Vrste stekla

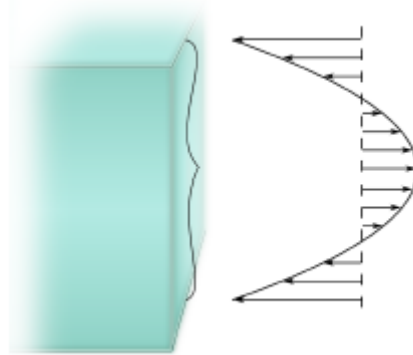
Poznamo več vrst stekel, ki se med seboj razlikujejo po postopku pridobivanja in predvsem po sestavi. Poznamo t.i. plosko steklo [17], kaljeno steklo, toplotno ojačeno steklo in lepljeno steklo.

Plosko steklo ima visoko tlačno trdnost, vendar je krhek material z nizko natezno trdnostjo. V primerjavi z lesom je natezna trdnost ploskega stekla približno 45 N/mm^2 (smreka 14 N/mm^2), teoretična tlačna trdnost pa od 700 do 900 N/mm^2 (smreka 21 N/mm^2) [4]. Proizvaja se z vlivanjem staljenega stekla na posteljo staljenega kositra [5].

Kaljeno steklo je preprosto plosko steklo, proizvedeno s procesom hlajenja, ki poteka dovolj počasi, da se izognemo napetostim v steklu. Proizvede se lahko steklo, ki z induciranjem tlačnih napetosti na površini prenese večje obremenitve. Zaradi napak in drugih nepopolnosti je dejanska natezna trdnost stekla veliko nižja kot teoretična, pridobljena iz lastnosti molekularnih vez. Kot je ugotovil Donald, se zlom »krhke trdne snovi« zaradi nepopolnosti najverjetneje zgodi na površini [5].

Ojačeno steklo se pridobi z induciranjem tlačnih napetosti na površino in zato lahko prenaša večjo obtežbo, dokler natezne napetosti ne presežejo natezne trdnosti. Najpogostejše ojačeno steklo, ki se uporablja v gradbeništvu je toplotno ojačeno steklo. Razporeditev

napetosti se doseže že pri prvem gretju stekla, le da je le-to mehko in se nato hitro ohladi. Ker se najprej ohladi površina, pride najprej do krčenja in strditve. Ko se nato ohladi še notranjost in sledi krčenje se tlačna napetost inducira na površini. Razporeditev napetosti, pridobljenih pri toplotnem ojačenju je približno parabolne oblike kot je prikazano na sliki 19. Toplotno ojačeno steklo se imenuje tudi varnostno steklo, saj se zlomi v majhne kocke, medtem ko se kaljeno steklo zlomi na velike in ostre kose [5].



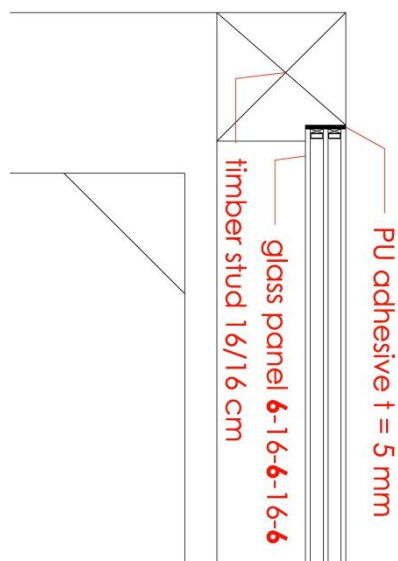
Slika 19: Tipična razporeditev napetosti vzdolž debeline v toplotno ojačenem steklu [5]

Še ena vrsta stekla, ki se uporablja v gradbeništvu, je lepljeno steklo. Sestavljeno je iz dveh ali več steklenih plošč, med katerimi je vmesni sloj, kot je na primer sloj PVB smole (polivinil butil). Tudi lepljeno steklo se lahko šteje med varnostna stekla, čeprav je za posamezne plošče uporabljeno navadno kaljeno float steklo, saj v primeru zloma vmesni material spaja zlomljene koščke. Za vmesni sloj se poleg PVB smole lahko uporabi tudi material, kot je na primer EVA folija (etilen vinil acetat) v solarni industriji [5].

3.2.2 Steklo kot nosilni material

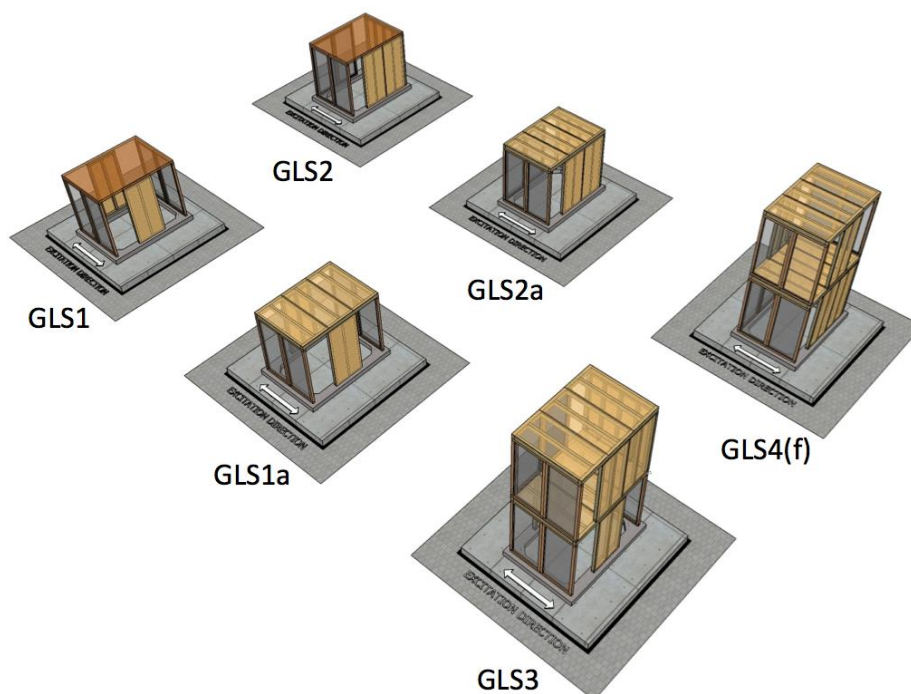
Ko se odločamo o uporabi stekla kot nosilnega materiala, je potrebno preučiti, kakšen tip stekla bomo uporabili. Če se zlomi kakšen stekleni element, je zaželeno, da se prepreči ostre kose, ki lahko povzročijo poškodbe in rušitev celotne konstrukcije [5].

V leseni okvir lahko vstavimo eno, dve ali tri steklene plošče, kar lahko poimenujemo tudi kot enoslojna, dvoslojna ali troslojna zasteklitev [6]. To ne pomeni, da so v lesen okvir vstavljene ena, dve ali tri steklene plošče, ampak, da so v steklen panel skupaj zlepljene tri ali pa dve tanjši stekleni plošči. Med njimi je v večini primerov plin in tesnilo. Večslojno zasteklitev kot uporabimo, boljšo energetske učinkovitost bomo dosegli, saj bodo izgube toplote skozi zasteklitev manjše.



Slika 20: Primer troslojne zasteklitve [6]

Na sliki 20 je prikazan primer troslojne zasteklitve in detajl pritrditve steklene plošče na lesen okvir. Ta način je bil uporabljen pri zasnovi enonadstropne in dvonadstropne hiše, ki so ju za potrebe preiskav seizmične odpornosti na potresni mizi IZIIS Skopje, novembra in decembra 2012, postavili Fakulteta v Mariboru, podjetje Kager hiše in podjetje CBD. Modeli za testiranje so prikazani na sliki 21 [6].



Slika 21: Modeli za testiranje na potresni mizi v Skopju [6]

3.3 Adhezivi

Tradicionalno se steklo v stavbah uporablja za okna in v zadnjem času tudi za fasade. Ko se za lepljenje steklene plošče uporabljajo lepila, se takšna konstrukcija imenuje SSG, »structural sealant glazing« oz. LSZ, »lepljena strukturna zasteklitev«. Za takšne konstrukcije se uporablja predvsem silikonske tesnilne mase. Zaradi lezenja silikonskih tesnil, dolgotrajna trdnost predstavlja le okrog 10 % kratkotrajne. Četudi silikonsko lepilo pogosto deluje kot primarni način pritrjevanja steklenih plošč, je v resnici v večini primerov uporabljen tudi sekundarni sistem, ki preprečuje padec steklenih plošč v primeru okvare lepila [5].

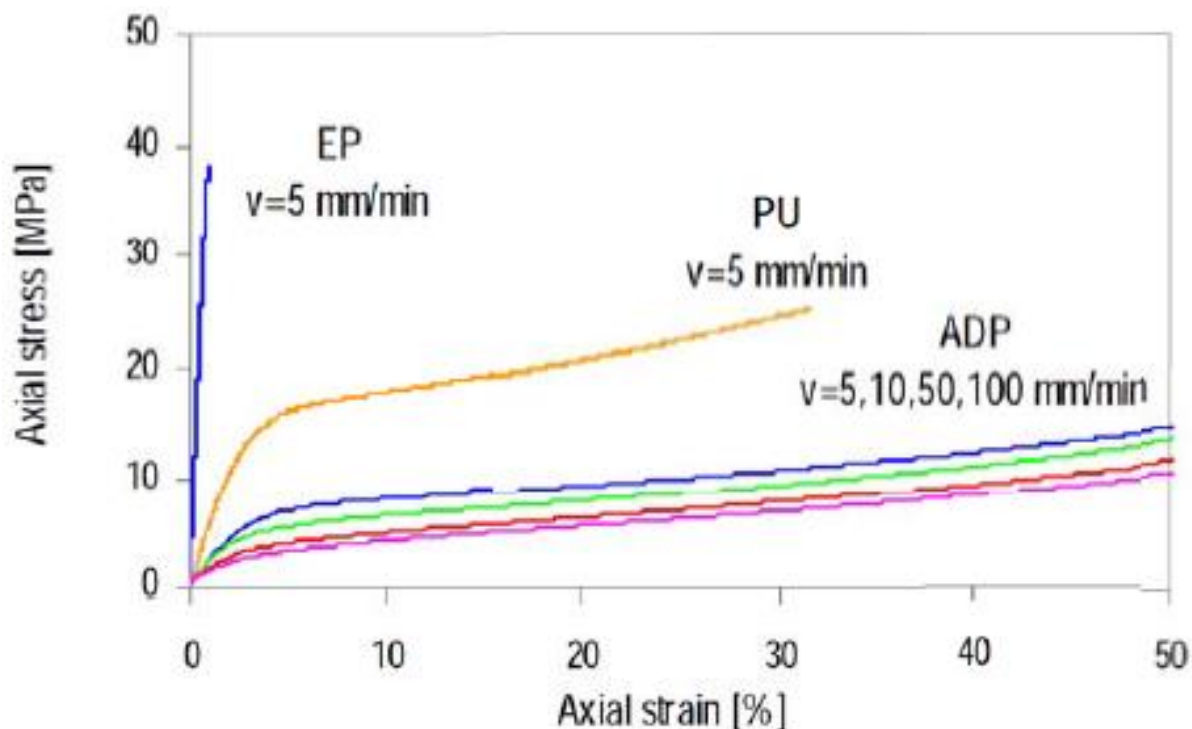
Z uporabo lepljenih spojev lahko pri nižji ceni dosežemo višjo trdnost kot pa z alternativnimi načini pritrjevanja (vijačenje, žebljanje). Velika prednost teh spojev je tudi ta, da materialov, ki jih spajamo, ne oslabimo s preboji. Prenos obremenitev je homogen in vezan na celotno površino, ne le točkovno. Na materiale, ki jih spajamo, zelo ugodno vpliva enakomerna razporeditev napetosti, saj ni koncentracije napetosti. To pomeni prihranek, saj lahko uporabimo materiale z manjšim presekom, z enim lepljenim spojem pa nadomestimo več mehanskih veznih sredstev. Konstrukcija je posledično lažja, spoji pa so močnejši. Uporaba adhezivov nam omogoča spajanje materialov z različnimi mehanskimi lastnostmi, kar z drugimi načini pritrjevanja morda ne bi bilo mogoče. Prožna plast adheziva zmanjša napetosti zaradi spremembe temperature, ki nastane v primeru spajanja dveh materialov z izrazito različnim koeficientom toplotnega raztezka (α_T) [2].

Danes se za lepila, ki spajajo les in steklo, uporabljajo predvsem silikoni, poliuretani ali epoksidne smole / epoksidni polimeri [4].

Glede na togost delimo adhezive na tri kategorije:

- A. Mehek: začetni modul elastičnosti < 10 MPa
- B. Srednje tog: začetni modul elastičnosti med 100 in 500 MPa
- C. Tog: začetni modul elastičnosti med 1000 in 5000 MPa

Uporabljena kategorija togosti je pri nosilnih leseno steklenih elementih odvisna predvsem od izbranega načina prenosa obtežbe z lesenega okvirja na steklo. Pričakovati je, da bosta raztezek pri pretrgu in obnašanje napetost-deformacija precej različna za omenjene tri tipe. Primer napetostno-deformacijskega obnašanja je predstavljen na sliki 22 [7]. Opazimo lahko, da je odziv vseh vrst adhezivov na natezno napetost nelinearno elastičen, kar pomeni, da z večanjem natezne napetosti deformacija nelinearno, neenakomerno narašča.



Slika 22: Povprečne krivulje natezna napetost-deformacija za tri SIKa adhezive EP (SD 330), PU (S-Force 7851, $v=5$ mm/min) in ADP (SikaFast 5221, $v=5, 10, 100$ mm/min) [7]

Kar zadeva adhezive kategorije A (mehki adhezivi), je za glavno lastnost potrebno upoštevati raztezek pri pretrgu, ki mora biti med 2 - 300 %. Natezna trdnost in sprijemnost s podlago pa morata biti največji možni, ampak ne presegata 0,5 - 2 MPa.

Za adhezive kategorije B (srednje togi adhezivi), je raztezek 10 - 100 % ali več, srednja natezna trdnost pa 2 - 10 MPa. V istem okviru je tudi sprijemnost s podlago.

Raztezek pri pretrgu je za adhezive kategorije C (togi adhezivi) precej majhen, in sicer v območju približno 1 %. Bistveni lastnosti te vrste adheziva sta žilavost in sprijemnost s podlago, ki se vsaka zase pričakujeta v okviru 20 – 50 MPa in 5 – 10 MPa [7].

Preglednica 1 prikazuje nekaj izbranih adhezivov znanih proizvajalcev in njihovo razvrstitev v eno izmed treh kategorij togosti.

Preglednica 1: Primeri kategorij togosti na nekaj izbranih adhezivih znanih proizvajalcev [7]

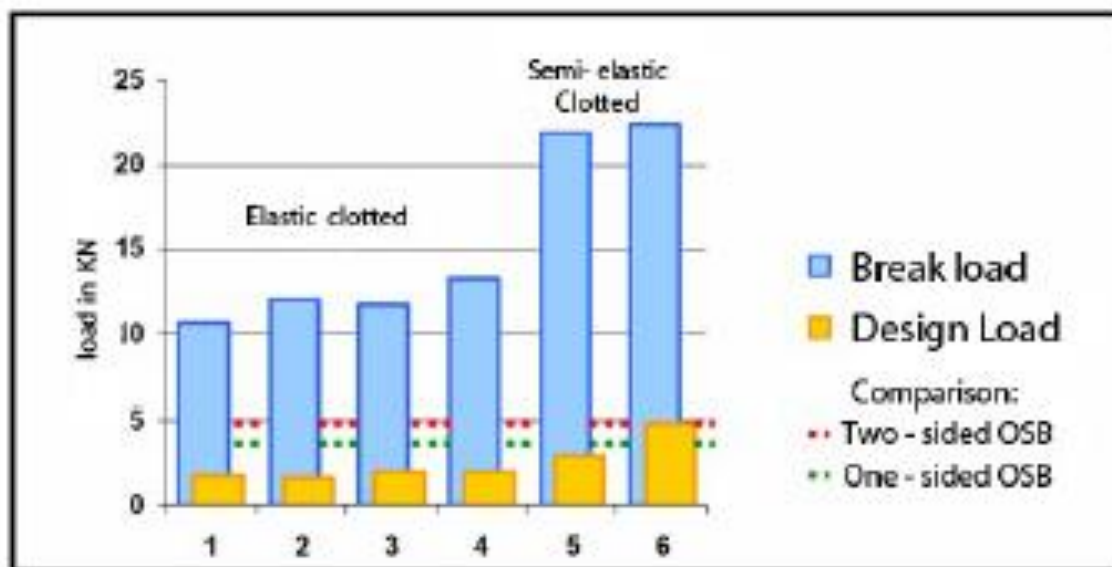
Vrsta adheziva	Komercialno ime	Proizvajalec	Kategorija togosti
silikon	SikaSil SG500	SIKA	A - mehek
poliuretan	SikaTack Move Transportation	SIKA	B – srednji (A – mehek)
akrilat	SikaFast 5215 NT	SIKA	B – srednji

poliuretan	SikaForce 7710L100	SIKA	C - tog
epoksi	Sikadur 30	SIKA	C - tog
silikon	Ködiglaze S	Kömmerling	A - mehek
poliuretan	Ködiglaze P	Kömmerling	A - mehek
epoksi	Körapox 558	Kömmerling	C - tog

Elastičen lepljen stik predstavlja popolnoma novo tehnologijo v primerjavi s togim lepljenim stikom v običajnih lesenih konstrukcijah. Elastičen lepljen stik še posebej leseno steklenim kompozitnim elementom zagotavlja prednost gladke, enotne in linearne začetne napetosti [4].

Poleg klasičnih statičnih lastnosti, so za adheziv ključnega pomena tudi združljivost z drugimi materiali in lezenje. Prenos trajne obtežbe mora biti zagotovljen tako v normalnih kot v ekstremnih vremenskih pogojih kot so na primer: velike temperature (sončno sevanje), UV sevanje in / ali pojavljanje vlage (na primer nastajanje kondenza).

Zelo elastični adhezivi, kot so silikoni, lahko prenašajo dovolj visoke obtežbe, delno elastični adhezivi (na primer akrilati) pa lahko visoke obtežbe prenašajo na ravni lesenega okvirja sten.



Slika 23: Obremenitev ob pretrgu in izračunane obremenitve ($H/500$) ter primerjava med enostransko dvostransko obloženo steno z OSB ploščo [4]

Na leseno steklenih stenah je bilo narejenih zelo veliko preiskav med katerimi so se izkazale določene prednosti in slabosti. Slika 23 prikazuje rezultate preiskave, kjer so primerjali obnašanje enostransko in dvostransko obložene stene z OSB ploščami, pri uporabi

elastičnih in pol-elastičnih adhezivov. Preiskave so pokazale, da lahko elastični adhezivi, kot so na primer silikoni, sami prenašajo precej visoke obremenitve, medtem ko pol-elastični adhezivi, kot so na primer akrilati, prenašajo velike obremenitve na raven lesenega okvirja stene. Iz teh rezultatov lahko sklepamo, da imajo elastični adhezivi velik statični potencial, saj že sami prenašajo precej visoke obremenitve, potrebno je le narediti ustrezne modele za izračun in eksperimente [4].

Strižni testi s konstantnim obremenjevanjem več vrst adhezivov, na primer poliuretana (Sikaflex 265), silikona (SG-20), superfleks polimera (Sista Solyplast SP101) in metakrilata (SikaFast 5211), pri čemer je metakrilat dvokomponentno lepilo, ostala prej naštetna lepila pa so enokomponentna, so pokazali, da ima superfleks polimer najboljše razmerje med trdnostjo in duktilnostjo. Izkazalo se je tudi, da je v nekaterih primerih nosilnost poliuretanskih lepljenih stikov vsaj tako visoka kot pri polimernih lepilih. Za enokomponentno poliuretansko lepilo je bilo ugotovljeno, da je z vidika trdnosti, togosti, duktilnosti in odpornosti na podnebne razmere najboljše [5].

3.3.1 Epoksidi

Za epokside je značilno, da imajo visoko površinsko aktivnost ter dobre lastnosti vlaženja. Epoksidne smole navadno z dobro kohezijsko trdnostjo presežejo trdnost adherenta, t. j. materiala, ki ga lepimo z adhezivom. So zelo ugodni za lepljenje večjih površin, saj skoraj ne vsebujejo hlapljivih snovi in se zelo malo krčijo. Dosegajo tudi manjše napetosti v lepljeni liniji v primerjavi z vinili, akrili in poliestri. Majhen delež lezenja omogoča epoksidom, da zlahka ohranjajo isto trdnost pri stalni obremenitvi. Odpornost na cepitev je nizka, udarna trdnost pa zadovoljiva. Fleksibilni polimeri, ki jih lahko dodamo epoksidom, omogočajo dobro prenašanje vibracij, cepilnih in lupilnih napetosti [2].

3.3.2 Poliuretani

Poliuretanski adhezivi so uporabni vse od obutvene do avtomobilske industrije, kjer uporabljajo steklo, različne obloge, aluminijaste dodatke, les ter kovinske ploščice. Dobro se vežejo na večino materialov, tudi na elastomere in duroplaste. Poleg vseh ostalih dobrih lastnosti imajo še odlično kemično in temperaturno odpornost. Prednosti reaktivnih poliuretanskih adhezivov so: visoka stopnja elastičnosti, odlična oprijemljivost na različne adherente, fleksibilnost, odpornost na obrabo, visoka strižna in natezna trdnost pri nizkih temperaturah ter žilavost [2].

3.3.3 Silikoni

Največja prednost silikonskih adhezivov je dobra odpornost na cepilne napetosti v temperaturnem območju od -60 °C do 370 °C. Služijo lahko tudi kot toplotni stabilizatorji za druge adhezivne materiale. Silikoni so odlično odporni na vremenske vplive (temperaturo, vlago, izpostavljenost UV žarkom, ipd.), kar je njihova vodilna prednost pred ostalimi adhezivi. Ostale lastnosti silikonov so še: odpornost na vlago, vročo vodo, oksidacijo, ozon in kemikalije, fleksibilnost pri nizkih temperaturah in dobra udarna trdnost. Pod vplivom zračne vlage se strjujejo, proces strjevanja pa lahko pospešimo z dvigom temperature [2], [4].

3.4 Vrste lepljenih stikov

Stik med lesenim okvirjem in steklom je možno izvesti na več različnih načinov in z različnimi adhezivi.

Za prenašanje ravninskih napetosti med lesom in steklom je najbolj primeren obodni lepljen stik, saj razprši ravninske napetosti preko stekla ter predstavlja vmesni sloj, ki prepreči direkten stik med lesom in steklom. Osnovna zahteva za lepljene stike je, da mora biti stik čim manjši, zato da ne zmanjša transparentnosti [1].

Na splošno poznamo tri tipe stikov, in sicer:

1. obodni lepljen stik čez celo debelino stekla,
2. dvostranski togo lepljen stik vzdolž robov na obeh straneh stekla ter
3. enostranski togo lepljen stik vzdolž robov na eni strani stekla.

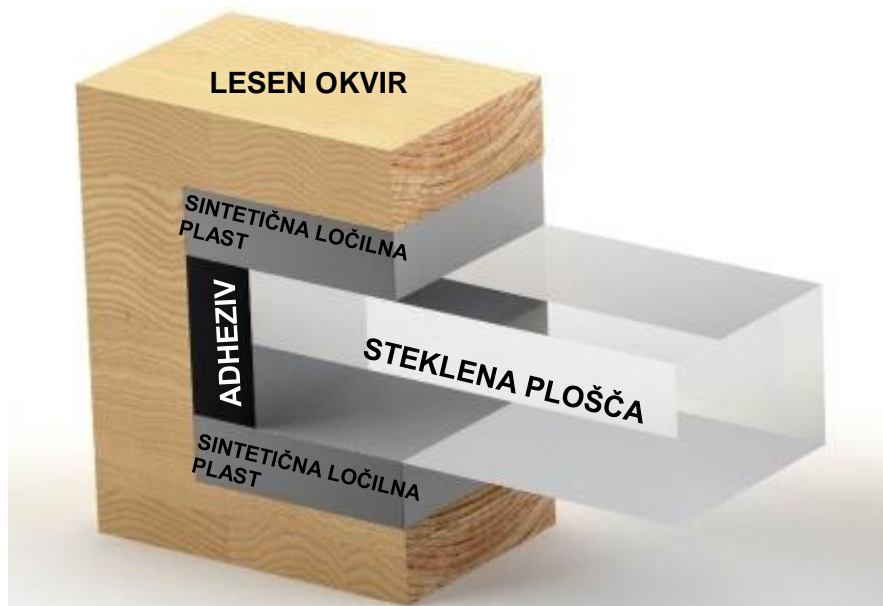
Za stik tipa 1 so najprimernejši poliuretanski ali silikonski adhezivi, za stik tipa 2 in tipa 3 pa epoksidni adhezivi [6].

3.4.1 Stik tipa 1

Prvi tip stika je prožen lepljen stik na robu stekla, ki je na obeh straneh podprt s trdim sintetičnim materialom in poteka čez celotno debelino stekla. Reža med okvirjem in steklom je odvisna od toleranc stekla in okvirja in mora biti zapolnjena s tesnilom oz. adhezivom. Rezultat je stik debeline nekaj milimetrov [3].

Za takšno vrsto stika je najprimernejša poliuretanska lepilna tesnilna masa (npr. Sikaflex-252), ki se na sobni temperaturi obnaša elastično [1].

Slika 24 prikazuje stik tipa 1 in vse njegove elemente.



Slika 24: Skica stika tipa 1 [6]

3.4.2 Stik tipa 2

Drugi tip stika je dvostranski tog lepljen stik, ki s strani podpira steklo. Debelina stika je zelo majhna in zagotovljena z distančniki ter prilagodljivim trakom [3].

Za takšen stik je najbolj primerna epoksidna lepilna tesnilna masa (npr. Scotch Weld 9392 B/A), ki je na sobni temperaturi toga in žilava [1].

Stik tipa 2 in vse njegove dele prikazuje slika 25.



Slika 25: Skica stika tipa 2 [6]

3.4.3 Stik tipa 3

Tretji tip stika je različica stika tipa 2, le da je ta enostranski. Tudi za to vrsto stika je najprimernejša epoksidna lepilna tesnilna masa.

Slika 26 prikazuje skico stika tipa 3.



Slika 26: Skica stika tipa 3 [6]

4 MODELIRANJE OBNAŠANJA LESENO STEKLENE STENE

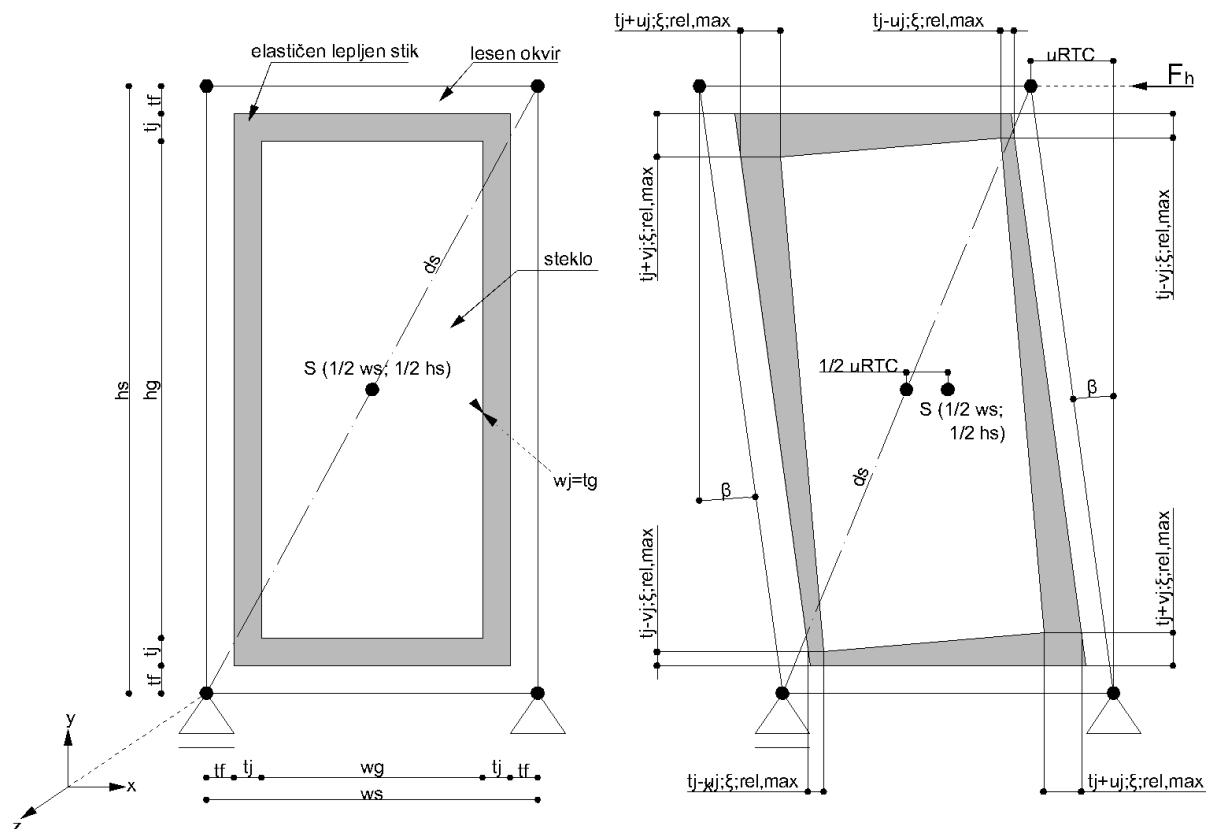
Obnašanje leseno steklene stene lahko modeliramo na različne načine, in sicer z nelinearno analizo po metodi končnih elementov ali pa z različnimi mehanskimi modeli. Uporabo metode končnih elementov omogočajo različni računalniški programi. Med njimi sta najbolj poznana Abaqus [12] in SAP2000 [13], ki sta bila uporabljena za analizo leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov v članku [12] oziroma diplomski nalogi [13].

Moja diplomska naloga temelji na izpeljavi enačb na podlagi mehanskega modela, ki je podrobneje opisan v podpoglavju 4.1 in kjer je vpliv steklenega panela na leseni okvir preko lepljenega stika nadomeščen z normalnimi in strižnimi vzmetmi. Omenjeni mehanski model je v svojem doktoratu (Huveners, E. M. P. 2009. Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Façades: 235 str.) podrobneje razčlenil Huveners Edwin Michel Pierre.

V sledečih podpoglavjih je torej po korakih predstavljena izpeljava enačb na podlagi zgoraj omenjenega modela, nato pa v poglavju 6 sledi še izračun stene iz eksperimenta, predstavljenega v poglavju 5, in primerjava rezultatov, dobljenih z eksperimentom in izračunom.

4.1 Osnovni mehanski model

Osnova mehanskih modelov so parametrične študije, katerih kriteriji so predstavljeni v podpoglavju 4.3. Slika 27 prikazuje geometrijske karakteristike sistema in obnašanje le-tega pod vplivom obtežbe v zgornjem desnem kotu. Za vse parametre so predstavljene njihove spodnje mejne vrednosti. Oznake posameznih parametrov so podrobneje razložene v podpoglavju 4.2.



Slika 27: Geometrija mehanskega modela in obnašanje le-tega pod vplivom obtežbe v zgornjem desnem kotu (RTC)

Osnovne predpostavke za zgornji mehanski model so:

- ni začetnih izven ravninskih pomikov steklene plošče,
- steklena plošča se obnaša togo v svoji ravnini,
- središče steklene plošče sovпада s središčem diagonale sistema d_s ,
- zasuk steklene plošče se zgodi okrog središča diagonale sistema d_s ,
- ni deformacij v osni smeri posameznega dela lesenega okvirja,
- ni vertikalnih pomikov posameznega dela lesenega okvirja,
- ni upogibov posameznega dela lesenega okvirja,
- razporeditev ravninskih pomikov v osni smeri je linearna,
- razporeditev normalnih napetosti v lepljenem stiku je linearna,
- razporeditev relativnih ravninskih pomikov v vzdolžni smeri je enakomerna,
- razporeditev strižnih napetosti v lepljenem stiku je enakomerna.

4.2 Oznake

V tem poglavju bom za lažje razumevanje sledečih poglavij razložila vse simbole in njihove osnovne enote.

simbol	osnovna enota	pomen simbola
$k_{j,\xi}$	N/mm^3	normalna togost lepljenega stika
$k_{j,\eta}$	N/mm^3	strižna togost lepljenega stika
E_a	N/mm^2	elastični modul uporabljenega lepila
G_a	N/mm^2	strižni modul uporabljenega lepila
$\sigma_{j;\xi;x/y}$	N/mm^2	normalna napetost
$u/V_{j;\xi;rel}$	mm	relativni pomik pravokotno na debelino stika
$\sigma_{j;\eta;x/y}$	N/mm^2	strižna napetost
$u/V_{j;\eta;rel}$	mm	relativni pomik vzdolž sredine debeline stika
t_j	mm	debelina stika
w_j	mm	širina stika
t_g	mm	nominalna debelina stekla
w_g	mm	širina stekla
h_g	mm	višina stekla
w_s	mm	širina sistema
h_s	mm	višina sistema
t_f	mm	debelina okvirja
d_s	mm	diagonala sistema, ki poteka od spodnjega levega kota (LBC) do zgornjega desnega kota (RTC)
F_h	kN	horizontalna ravninska obtežba
$\varphi_{(uRTC)}$	-	ravninski zasuk stekla okrog njegovega središča
$K_{x,i}$	N/mm	togost vzmeti v x-smeri
$K_{y,i}$	N/mm	togost vzmeti v y-smeri
u_{RTC}	mm	ravninski pomik v zgornjem desnem kotu sistema (na mestu vnosa sile)
K_s	N/mm	ravninska togost sistema
β		ravninski zasuk desnega pokončnika okrog notranjega spoja v desnem spodnjem kotu (RBC)
$u_{j,\xi,rel,max}$	mm	največji relativni pomik v normalni smeri, pravokotno na debelino stika

$V_{j,\xi,rel,max}$	mm	največji relativni pomik v prečni smeri, pravokotno na debelino stika
$U_{j,\eta,rel,max}$	mm	največji relativni pomik v normalni smeri, na sredini debeline stika
$V_{j,\eta,rel,max}$	mm	največji relativni pomik v prečni smeri, na sredini debeline stika
$\sigma_{j,\xi;x,max}$	N/mm ²	maksimalna normalna napetost v smeri x
$\sigma_{j,\xi;y,max}$	N/mm ²	maksimalna normalna napetost v smeri y
$T_{j,\eta;x,max}$	N/mm ²	maksimalna strižna napetost v smeri x
$T_{j,\eta;y,max}$	N/mm ²	maksimalna strižna napetost v smeri y
$\sigma_{g;1,max}$	N/mm ²	maksimalna osnovna napetost v desnem spodnjem kotu stekla
$K_{j,\xi;equi;y}$	N/mm ³	ustrezna konstantna normalna togost

4.3 Kriteriji

Razmerje med silo in pomikom v zgornjem desnem kotu sistema lahko pri pravokotnih leseno steklenih stenastih konstrukcijskih sistemih razdelimo na tri stopnje. Prva stopnja poteka linearno, prav tako druga in tretja, vendar je vsaka stopnja strmejša v primerjavi s prejšnjo. Debelejše in širše kot je steklo, strmejše so posamezne stopnje in višje kot je steklo, manj so strme posamezne stopnje. Pri pravokotnih leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementih se pojavita dva stika med steklom in lesom, ki predstavljata mejo med dvema stopnjama. To prikazuje slika 28.

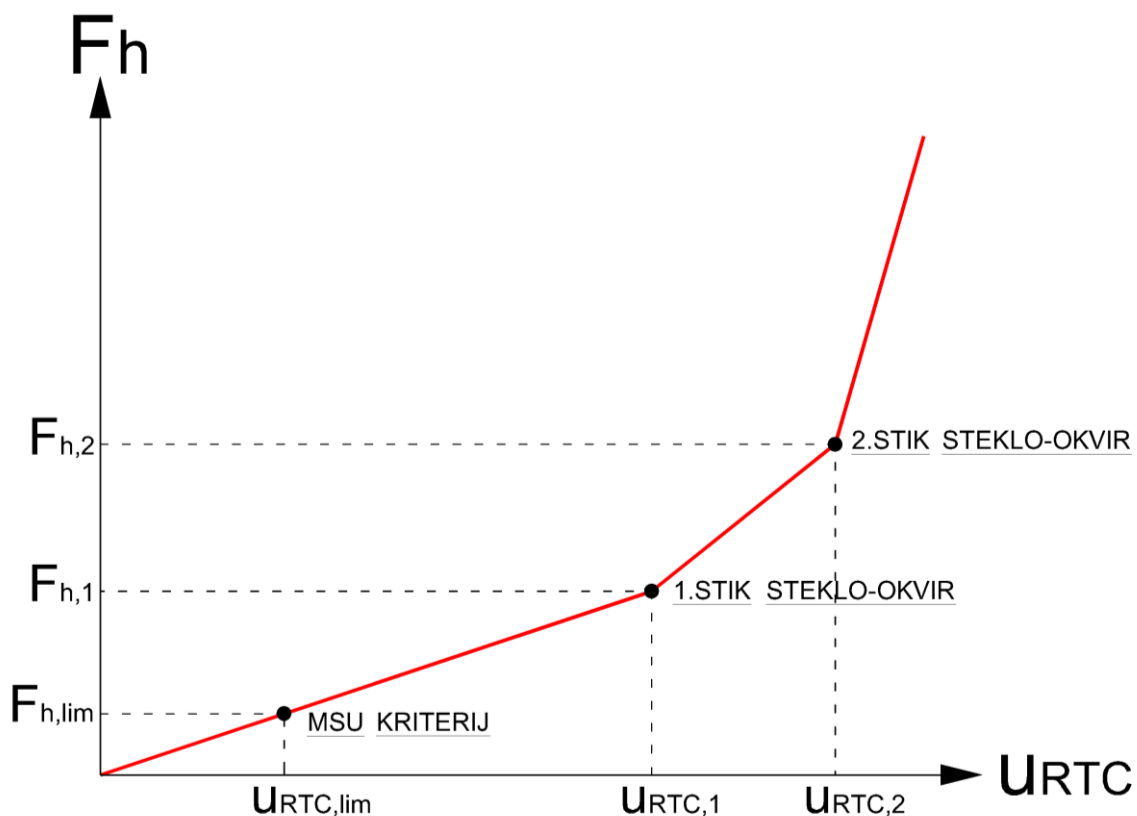
Za nadaljnjo razlago sta pomembni dve točki oziroma dva kriterija na krivulji sila-pomik, in sicer [8]:

1. Mejno stanje uporabnosti (MSU): $u_{RTC,lim}$

Določimo: $K_{s,lim}$, vse štiri pomike, vse štiri napetosti in $\sigma_{g;1,max}$

2. Prvi stik med steklom in lesenim okvirjem: $u_{RTC,1}$

Določimo: $F_{h,1}$, $u_{RTC,1}$ in $F_{h,crit}$



Slika 28: Geometrija mehanskega modela in obnašanje le-tega pod vplivom obežbe v zgornjem desnem kotu (RTC)

4.4 Razlaga enačb

Vse enačbe, ki jih bom v nadaljevanju izpeljala, veljajo za stike tipa 1, torej za obodni lepljen stik čez celotno debelino stekla [10].

Pri izpeljavi enačb bom upoštevala naslednje predpostavke:

1. Linearen potek normalnih napetosti: $\sigma_{j,\xi;x}, \sigma_{j,\xi;y}$
2. Linearen potek relativnih pomikov v normalni smeri: $U_{j,\xi,rel}, V_{j,\xi,rel}$
3. Konstantne strižne napetosti: $\tau_{j,\eta;x}, \tau_{j,\eta;y}$
4. Konstantni pomiki v prečni smeri: $U_{j,\eta,rel}, V_{j,\eta,rel}$

4.4.1 Normalna togost lepljenega stika ($k_{j,\xi}$)

Normalna togost lepljenega stika ($k_{j,\xi}$) je kvocient med Youngovim modulom lepila (E_a) in debelino stika (t_j). Ta enačba (1) je primerna za linearno obnašanje materiala lepljenega stika. Za lepljene stike z nelinearnim materialnim obnašanje pa sta bolj primerni ostali dve

enačbi (2 in 3), ki sta sestavljeni iz kvocienta med normalno napetostjo in relativnim pomikom v normalni smeri [8].

$$k_{j,\xi} = \frac{E_a}{t_j} \quad (1)$$

$$k_{j,\xi;x} = \frac{\sigma_{j,\xi,x}}{u_{j,\xi,rel}} \quad (2)$$

$$k_{j,\xi;y} = \frac{\sigma_{j,\xi,y}}{v_{j,\xi,rel}} \quad (3)$$

V poglavju 4.4 sem predpostavila, da je potek normalnih napetosti in relativnih pomikov v normalni smeri linearen, zato lahko zaključim, da je normalna togost lepljenega stika ($k_{j,\xi}$) konstantna tako v smeri x kot v smeri y.

4.4.2 Strižna togost lepljenega stika ($k_{j,\eta}$)

Strižna togost lepljenega stika ($k_{j,\eta}$) je kvocient med strižnim modulom lepila (G_a) in debelino stika (t_j). Ta enačba (4) je primerna za linearno materialno obnašanje lepljenega stika. Za nelinearno materialno obnašanje pa sta bolj primerni enačbi (5 in 6), ki sta kvocient med strižno napetostjo in relativnim ravninskim pomikom v prečni smeri [8].

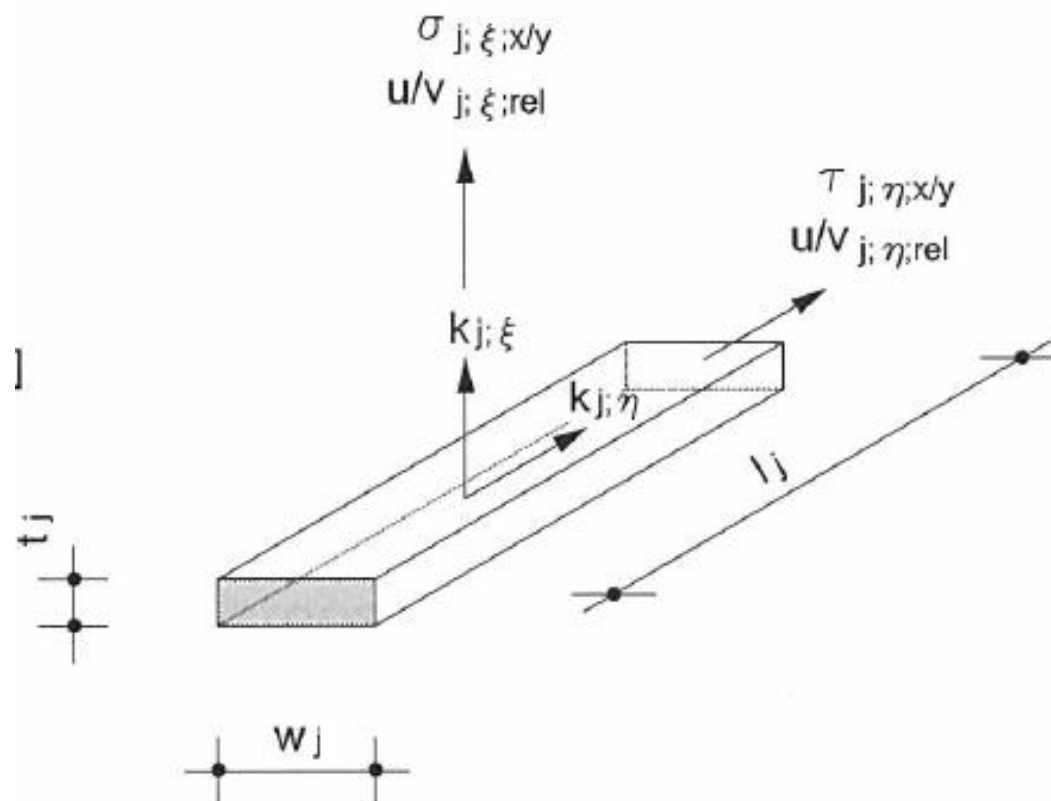
$$k_{j,\eta} = \frac{G_a}{t_j} \quad (4)$$

$$k_{j,\eta;x} = \frac{\tau_{j,\eta,x}}{u_{j,\eta,rel}} \quad (5)$$

$$k_{j,\eta;y} = \frac{\tau_{j,\eta,y}}{v_{j,\eta,rel}} \quad (6)$$

V poglavju 4.4 sem predpostavila tudi, da so strižne napetosti in pomik v prečni smeri konstantne, kar nam pove, da sta tudi strižni togosti lepljenega stika ($k_{j,\eta}$) v smeri x in y konstantni.

Slika 29 prikazuje smeri togosti, napetosti, pomikov in same dimenzije lepljenega stika.



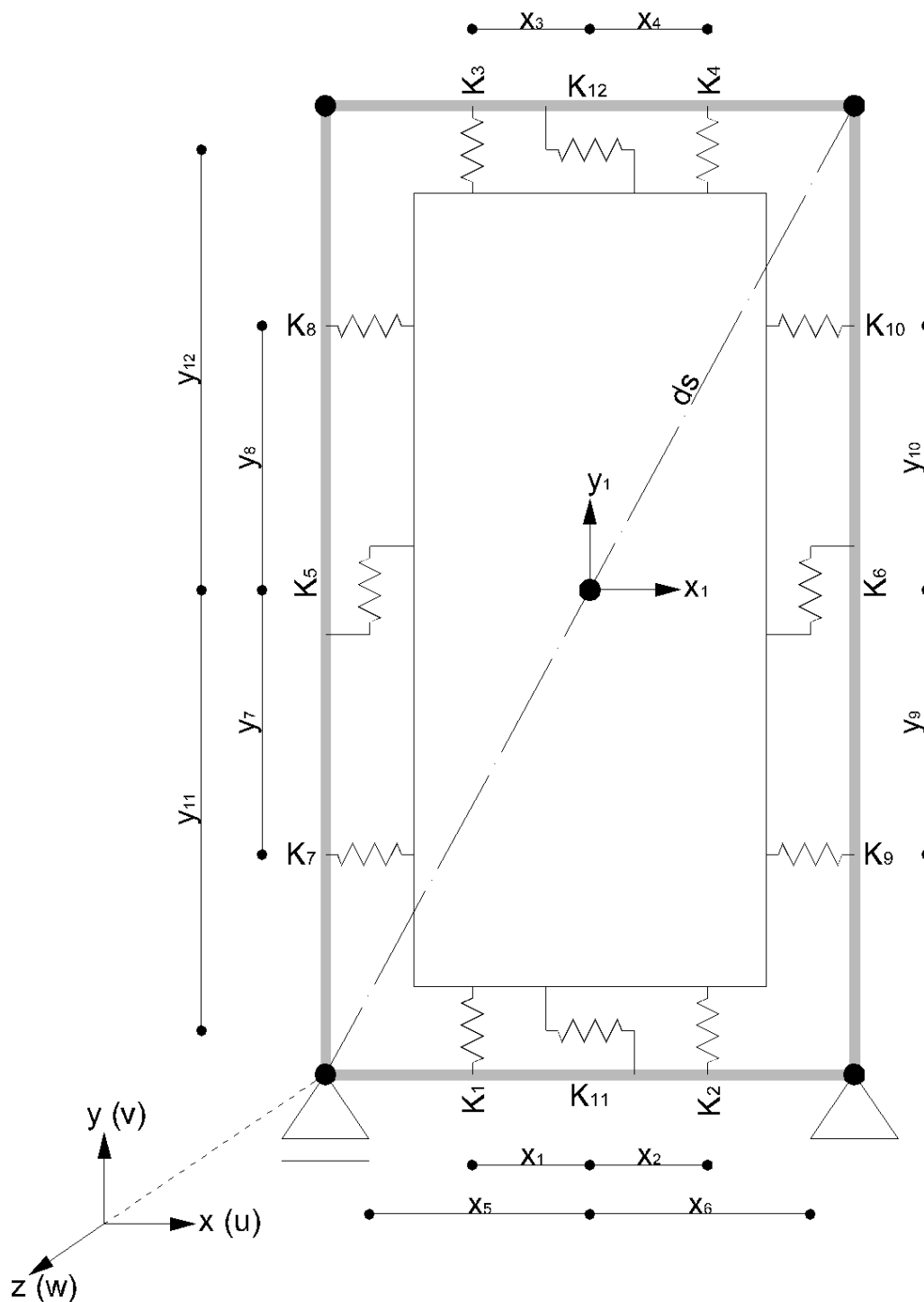
Slika 29: Oznake za lepljen stik [1]

OPOMBA:

Pri stikih tipa 2 in 3 dolgotrajno normalno togost zamenja strižna togost ($k_{j,\eta}$) in debelino stika (t_j) zamenja širina stika (w_j) [10].

4.4.3 Razporeditev normalnih in strižnih vzmeti (K_1 do K_{12})

Slika 30 prikazuje mehanski model, pri katerem se normalna in strižna togost robnega lepljenega stika modelirata z 12 vzmetmi (K_1 do K_{12}). Označena je tudi razporeditev teh dvanajstih vzmeti glede na središče steklene plošče, ki je tudi izhodišče lokalnega koordinatnega sistema [8].



Slika 30: Razporeditev vzmeti

4.4.4 Normalna togost normalnih vzmeti (K_1 do K_4 in K_7 do K_{10})

Normalna togost posameznih normalnih vzmeti je pretvorba dolgotrajne normalne togosti lepljenega stika na linearno porazdelitev normalnih napetosti [8].

Vzmeti K_1 do K_4 so normalne vzmeti v smeri y . Pozicija posameznih vertikalnih normalnih vzmeti je na dveh tretjinah polovice širine stekla glede na njeno središče, kar predstavlja $3/8$ celotne širine stekla glede na središče [1]. Enačba (7) nam pove, da je normalna togost vzmeti v smeri y enaka $3/8$ širine stekla, pomnožene z debelino stekla in konstantno normalno togostjo stika v smeri y .

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = \frac{\sigma_{j,\xi;y,max} \frac{w_g}{2} \frac{1}{2} t_g}{\frac{2}{3} v_{j,\xi,rel,max}} = \frac{3}{8} k_{j,\xi;y} t_g w_g \quad (7)$$

Vzmeti K_7 do K_{10} so normalne vzmeti v smeri x . Pozicija posameznih horizontalnih normalnih vzmeti je na dveh tretjinah polovice višine stekla glede na njeno središče, kar predstavlja $3/8$ celotne višine stekla glede na središče [1]. Enačba (8) razlaga, da je normalna togost vzmeti v smeri x enaka $3/8$ višine stekla, pomnožene z debelino stekla in konstantno normalno togostjo stika v smeri x .

$$K_7 = K_8 = K_9 = K_{10} = \frac{\sigma_{j,\xi;x,max} \frac{h_g}{2} \frac{1}{2} t_g}{\frac{2}{3} u_{j,\xi,rel,max}} = \frac{3}{8} k_{j,\xi;x} t_g h_g \quad (8)$$

4.4.5 Strižna togost strižnih vzmeti (K_5 , K_6 , K_{11} in K_{12})

Strižna togost posameznih strižnih vzmeti je pretvorba dolgotrajne strižne togosti lepljenega stika na osnovi konstantne porazdelitve strižnih napetosti [8].

Vzmeti K_5 in K_6 sta strižni vzmeti v smeri y . Pozicija vertikalnih strižnih vzmeti je na polovici širine stekla, povečane za polovico debeline stika glede na središče stekla [1]. Strižna togost vzmeti v smeri y je zmnožek debeline stekla, višine stekla in konstantne strižne togosti v smeri y .

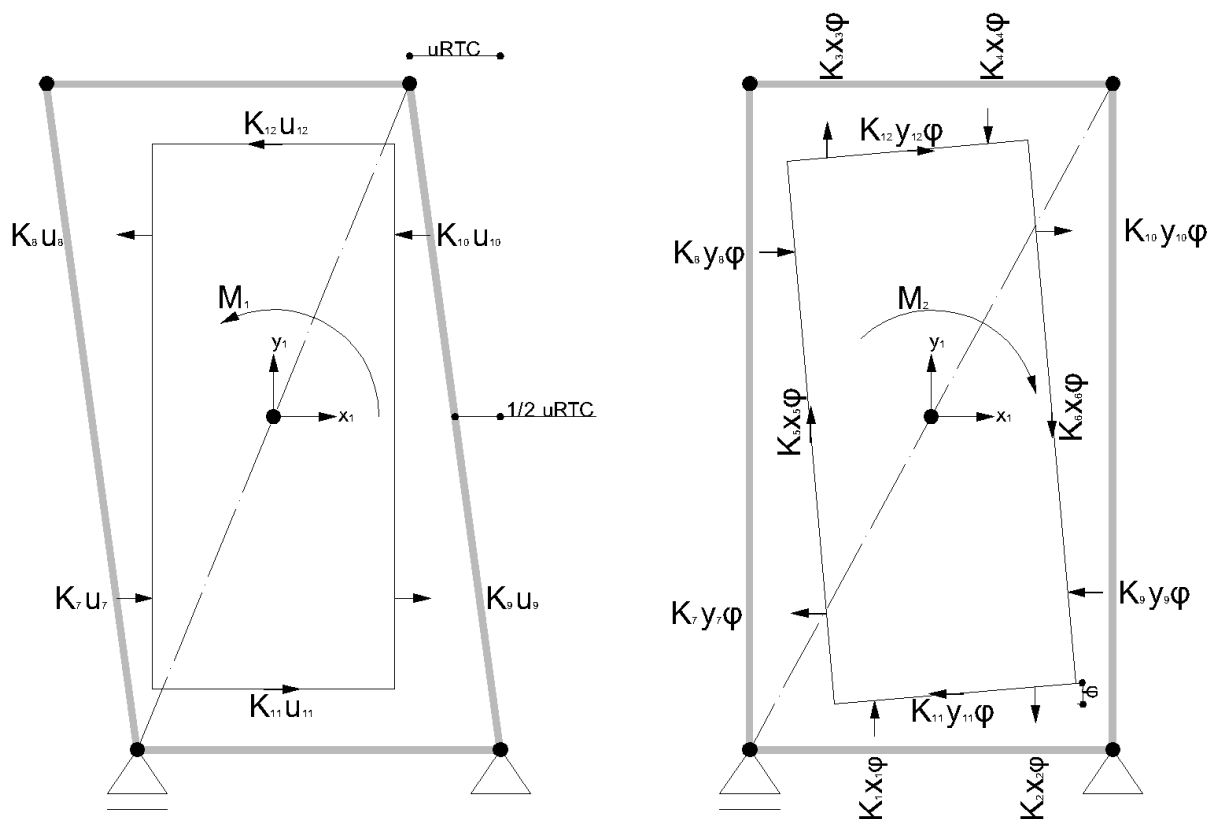
$$K_5 = K_6 = \frac{\tau_{j,\eta;y,max} h_g t_g}{v_{j,\eta,rel,max}} = k_{j,\eta;y} t_g h_g \quad (9)$$

Vzmeti K_{11} in K_{12} sta strižni vzmeti v smeri x . Pozicija horizontalnih strižnih vzmeti je na polovici višine stekla, povečane za polovico debeline stika glede na središče stekla [1]. Strižna togost vzmeti v smeri x je zmnožek debeline stekla, širine stekla in konstantne strižne togosti v smeri x .

$$K_{11} = K_{12} = \frac{\tau_{j;\eta;x;\max} w_g t_g}{u_{j,\eta,rel,\max}} = k_{j;\eta;x} t_g w_g \quad (10)$$

4.4.6 Pomik in zasuk okvirja (u_{RTC}, φ)

Sistem ima štiri splošne ravninske pomike. Spodnja leva slika, slike 31, prikazuje horizontalni ravninski pomik okvirja v zgornjem desnem kotu (RTC) ter horizontalni ravninski pomik stekla. Spodnja desna slika, slike 31, pa prikazuje horizontalni in vertikalni ravninski pomik stekla znotraj nepomičnega okvirja. Ta dva pomika sta rezultat ravninske rotacije stekla (φ) [8].



Slika 31: Prikaz pomikov in zasukov stekla oziroma okvirja

Horizontalni pomiki (u_7 do u_{12}) predstavljajo razliko med horizontalnimi pomiki stekla in okvirjem na mestu posamezne vzmeti 7 do 12. Horizontalni pomiki stekla ustrezajo polovici horizontalnega pomika v RTC sistema in horizontalni pomiki okvirja so linearno razporejeni po njegovi višini. To opisuje enačba (11) [8].

$$u_i = \frac{y_i u_{RTC}}{h_s} \quad (11)$$

Moment (M_1) je seštevek produktov togosti posameznih vzmeti (K_7 do K_{12}), horizontalnih pomikov (u_7 do u_{12}) in vertikalnih ročic (y_7 do y_{12}). To prikazuje enačba (12) [8].

$$M_1 = \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} u_i y_i = \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} \frac{y_i u_{RTC}}{h_s} y_i = \frac{u_{RTC}}{h_s} \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \quad (12)$$

Moment (M_2) opisuje enačba (13) in je seštevek produktov togosti posameznih vzmeti (K_1 do K_{12}), spremljajoče z ravninskimi pomiki kot rezultat ravninske rotacije ($v_1=x_1\varphi$ do $v_6=x_6\varphi$ in $u_7=y_7\varphi$ do $u_{12}=y_{12}\varphi$) ter njihovih ročic (x_1 do x_6 in y_7 do y_{12}) [8].

$$M_2 = \sum_{i=1}^6 K_i x_i \varphi x_i + \sum_{i=7}^{12} K_i y_i \varphi y_i = \varphi \left(\sum_{i=1}^6 K_{y;i} x_i^2 + \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \right) \quad (13)$$

4.4.1 Ravninska togost sistema (K_s)

Pomembna vrednost pri izračunu stabilnosti stavbe je ravninska togost nosilnih elementov. Spodaj bom izpeljala enačbo za ravninsko togost sistema K_s [8].

Da je sistem v ravnotežju, mora biti seštevek momentov vodoravnih ravninskih sil okrog središča stekla, povzročenih s horizontalnim ravninskim pomikom lesenega okvira, enak vsoti momentov ravninskih sil okrog središča stekla, povzročenih z ravninskim zasukom stekla [1]. Če poenostavim, momenta M_1 in M_2 morata biti enaka. Enačbe (14 do 19) prikazujejo izpeljavo enačbe za zasuk sistema.

$$M_1 = M_2 \quad (14)$$

$$\frac{u_{RTC}}{h_s} \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 = \varphi \left(\sum_{i=1}^6 K_{y;i} x_i^2 + \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \right) \quad (15)$$

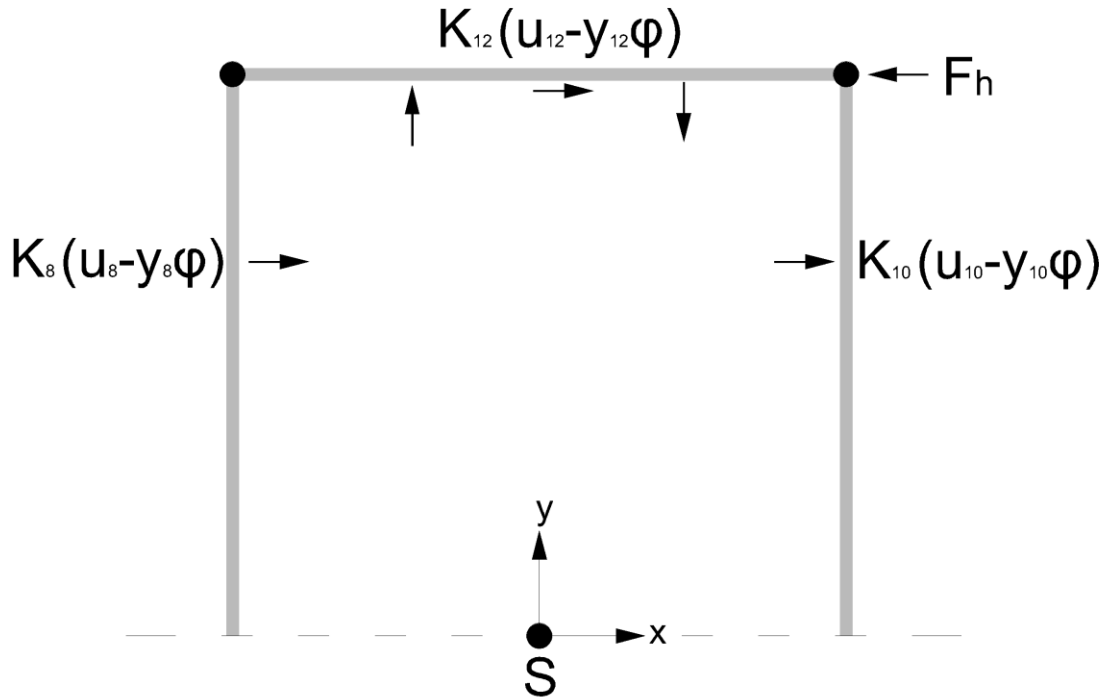
$$\varphi(u_{RTC}) = \frac{\sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 K_{y;i} x_i^2 + \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \right)} \frac{u_{RTC}}{h_s} \quad (16)$$

$$\varphi(u_{RTC}) = \frac{\sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 K_{y;i} x_i^2 + \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \right)} \frac{u_{RTC}}{h_s} \quad (17)$$

$$\frac{\sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 K_{y;i} x_i^2 + \sum_{i=7}^{12} K_{x;i} y_i^2 \right)} = K_\varphi \quad (18)$$

$$\varphi(u_{RTC}) = K_\varphi \frac{u_{RTC}}{h_s} \quad (19)$$

Slika 32 prikazuje zgornjo polovico okvirja z vsemi silami, ki so posledica posameznih vzmeti in z vsiljeno horizontalno silo v zgornjem desnem kotu Fh .



Slika 32: Prikaz določitve ravninske togosti sistema na polovici okvirja glede na središče stekla

Ravninska togost sistema (K_S) je seštevek momentov okrog središča stekla horizontalnih ravninskih sil v točkah 8, 10 in 12 ter horizontalnih ravninskih sil v desnem zgornjem kotu sistema (F_h) [1]. To prikazujeta enačbi (20) in (21) spodaj.

$$\sum M^S = 0 \quad (20)$$

$$F_h \frac{h_s}{2} = \sum_{i=8,10,12} K_i (u_i - y_i \varphi) y_i \quad (21)$$

Predpostavljena horizontalna obtežba (F_h) je produkt ravninske togosti sistema in horizontalnega ravninskega pomika v RTC sistema. To prikazuje enačba (21) spodaj [8].

Enačbe (22 do 26) spodaj prikazujejo izpeljavo za ravninsko togost sistema.

$$F_h = K_S u_{RTC} \quad (22)$$

$$K_S u_{RTC} \frac{h_s}{2} = \sum_{i=8,10,12} K_i \left(\frac{y_i u_{RTC}}{h_s} - y_i \varphi \right) y_i \quad (23)$$

$$K_S u_{RTC} \frac{h_s}{2} = \left(\frac{u_{RTC}}{h_s} - K_\varphi \frac{u_{RTC}}{h_s} \right) \sum_{i=8,10,12} K_i y_i^2 \quad (24)$$

$$K_S u_{RTC} \frac{h_s}{2} = \frac{u_{RTC}}{h_s} (1 - K_\varphi) \sum_{i=8,10,12} K_i y_i^2 \quad (25)$$

$$K_S = \frac{2(1-K_\varphi)}{h_s^2} \sum_{i=8,10,12} K_i y_i^2 \quad (26)$$

4.4.2 Največji relativni ravninski pomiki

Največji relativni ravninski pomiki v normalni in prečni smeri morajo biti preverjeni z dopustnimi relativnimi ravninskimi pomiki lepljenega stika (stopnja deformacije) [1].

Največji relativni ravninski pomiki v normalni smeri levega in desnega lepljenega stika so locirani v kotih stekla. Kot prikazuje enačba (27), je pomik razlika med horizontalnim ravninskim pomikom okvirja na polovici stekla ($1/2 \cdot (\beta \cdot h_g)$) in horizontalnim ravninskim pomikom stekla na polovici njegove višine ($1/2 \cdot (\varphi \cdot h_g)$). Kot β je razmerje med horizontalnim ravninskim pomikom sistema v RTC (u_{RTC}) in višino sistema (h_s) ter ravninsko rotacijo stekla (φ) [8]. Izpeljave za vse ostale pomike prikazujejo enačbe (28) do (30) spodaj.

$$u_{j,\xi,rel,max} = \frac{1}{2} \beta h_g - \frac{1}{2} \varphi h_g = \frac{u_{RTC} h_g}{2h_s} - \frac{u_{RTC} K_\varphi h_g}{2h_s} = (1 - K_\varphi) \frac{u_{RTC} h_g}{2h_s} \quad (27)$$

$$v_{j,\xi,rel,max} = \frac{1}{2} w_g \varphi = \frac{w_g K_\varphi u_{RTC}}{2h_s} \quad (28)$$

$$u_{j,\eta,rel,max} = u_{j,\xi,rel,max} + (t_f + t_j) \beta = \frac{(h_s - h_g K_\varphi) u_{RTC}}{2h_s} \quad (29)$$

$$v_{j,\eta,rel,max} = v_{j,\xi,rel,max} + t_f \beta = \frac{(2t_f + K_\varphi w_g) u_{RTC}}{2h_s} \quad (30)$$

4.4.3 Normalne in strižne napetosti v lepljenem stiku

Maksimalne normalne napetosti v lepljenem stiku so produkt maksimalnega relativnega ravninskega pomika v normalni smeri in spremljajoče (nelinearne) normalne togosti [1]. To opisujeta enačbi (31) in (32) spodaj.

$$\sigma_{j,\xi,x,max} = k_{j,\xi,x} u_{j,\xi,rel,max} \quad (31)$$

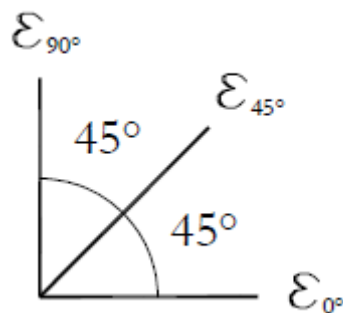
$$\sigma_{j,\xi,y,max} = k_{j,\xi,y} v_{j,\xi,rel,max} \quad (32)$$

Maksimalne strižne napetosti v lepljenem stiku so produkt maksimalnega relativnega ravninskega pomika v prečni smeri in strižne togosti [1]. To predstavljata enačbi (33) in (34).

$$\tau_{j,\eta,x,max} = k_{j,\eta} u_{j,\eta,rel} \quad (33)$$

$$\tau_{j,\eta,y,max} = k_{j,\eta} v_{j,\eta,rel} \quad (34)$$

Da bi ugotovili ravninski potek napetosti skozi stekleni panel, moramo izmerjene deformacije pretvoriti v glavne napetosti. Glavne napetosti potrebujemo zato, ker je rušitveni kriterij za steklo maksimalna glavna natezna napetost. Porazdelitev glavnih napetosti bolje vizualizira prenos obtežbe kot pa porazdelitev deformacij. Merilni lističi merijo horizontalno deformacijo (ϵ_{0°), vertikalno deformacijo (ϵ_{90°) in deformacijo pod kotom 45° (ϵ_{45°) [8]. To prikazuje slika 33 spodaj.



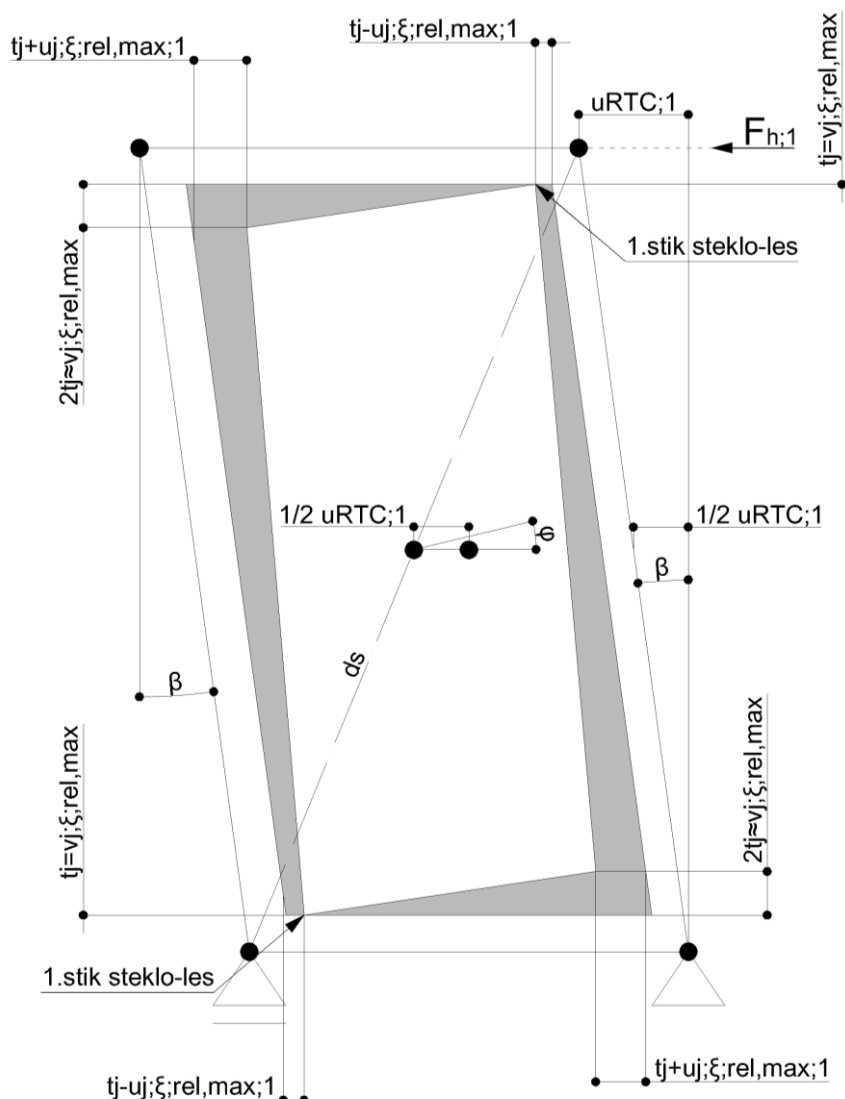
Slika 33: Deformacije, ki jih meri merilni listič [8]

Normalne natezne napetosti in strižne napetosti lepljenega stika ocenjujejo največjo glavno napetost v steklenem panelu v desnem spodnjem kotu stekla [1], kar opisuje enačba (35) spodaj.

$$\sigma_{g,1,max} = \frac{1}{2} (\sigma_{j,\xi,x,max} + \sigma_{j,\xi,y,max}) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{j,\xi,x,max} - \sigma_{j,\xi,y,max})^2 + 4\tau_{j,\eta,max}^2} \quad (35)$$

Dobljeno največjo glavno napetost v steklenem panelu lahko primerjamo s trdnostjo stekla in tako ugotovimo ali steklo počni ali ne.

4.4.4 Prvi stik stekla in lesa



Slika 34: Prikaz prvega stika med steklom in lesom

Slika 34 prikazuje prvi stik med steklom in lesom. Opazimo lahko, da se le ta zgodi v zgornjem desnem in spodnjem levem kotu. Osnovni parametri so horizontalna sila $F_{h;1}$, horizontalni pomik v zgornjem desnem kotu $u_{RTC;1}$, zasuk stekla okrog njegovega središča ϕ in največji relativni horizontalni in vertikalni pomik v normalni smeri lepljenega stika $u_{j;\xi;rel,max;1}$ in $v_{j;\xi;rel,max;1}$ [8].

Predpostavke glede horizontalnega pomika pri prvem stiku med steklom in lesom v zgornjem desnem kotu temeljijo le na geometriji sistema, pri čemer je pomembno to, da je širina stekla manjša ali enaka višini stekla ($w_g \leq h_g$). V skladu z drugo predpostavko je torej odziv do točke prvega stika med steklom in lesom linearen, pri čemer poznamo ravninsko togost sistema K_s .

Enačbe (36) do (39) prikazujejo izpeljavo enačbe za pomik in silo pri prvem stiku med steklom in lesom.

$$t_j - v_{j,\xi,rel,max} = 0 \quad (36)$$

$$t_j = \frac{w_g K_\varphi u_{RTC,1}}{2h_s} \quad (37)$$

$$u_{RTC,1} = \frac{2t_j h_s}{w_g K_\varphi} \quad (38)$$

$$F_{h,1} = K_s u_{RTC,1} \quad (39)$$

5 EKSPERIMENTI Z LESENO STEKLENIMI STENAMI

Na področju preizkušanja ploskovnih steklenih konstrukcij ter linijskih lepljenih spojev med steklom in leseno konstrukcijo se je do sedaj zvrstilo zelo malo raziskovalnih projektov. Glavni element ploskovnih steklenih konstrukcij so steklene plošče, ki so lahko obremenjene v ravnini in pravokotno na ravnino. Niedermaier je predstavil možnost uporabe steklenih panelov kot ojačitvenih elementov v kombinaciji z lahko leseno konstrukcijo. Stekleni panel dimenzij 0,8 m x 1,6 m je s pomočjo lepljenega spoja priključil na leseni okvir. Za adheziv je uporabil poliuretan in silikon. Raziskave so pokazale, da sta razporeditev napetosti v steklu in podajnost okvirja odvisna od vrste lepila in geometrije lepljenega spoja. Izpostavimo lahko tudi raziskavo, ki jo je izvedla Blyberg, ki je preizkušala steklene panele prilepljene v leseni okvir. Stekleni paneli so bili ravninsko obremenjeni tako v vertikalni kot tudi v horizontalni smeri. Steklena plošča debeline 10 mm je bila z akrilatnimi in silikonskimi adhezivi pritrjena na leseni okvir dimenzij 1,2 m x 2,4 m. Rezultati so pokazali, da je sistem z akrilatnim adhezivom prenesel 70 kN horizontalne in 180 kN vertikalne obremenitve. Sistem s silikonskim adhezivom pa je dosegel za okrog 40 % slabše rezultate. Eksperimentov z leseno stekleno steno so se skupaj s podjetjem Kager Hiše lotili tudi na mariborski Fakulteti za gradbeništvo. V nadaljevanju bom potek le-teh podrobneje predstavila in razložila dobljene rezultate [2].

5.1 Podatki eksperimenta s Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru

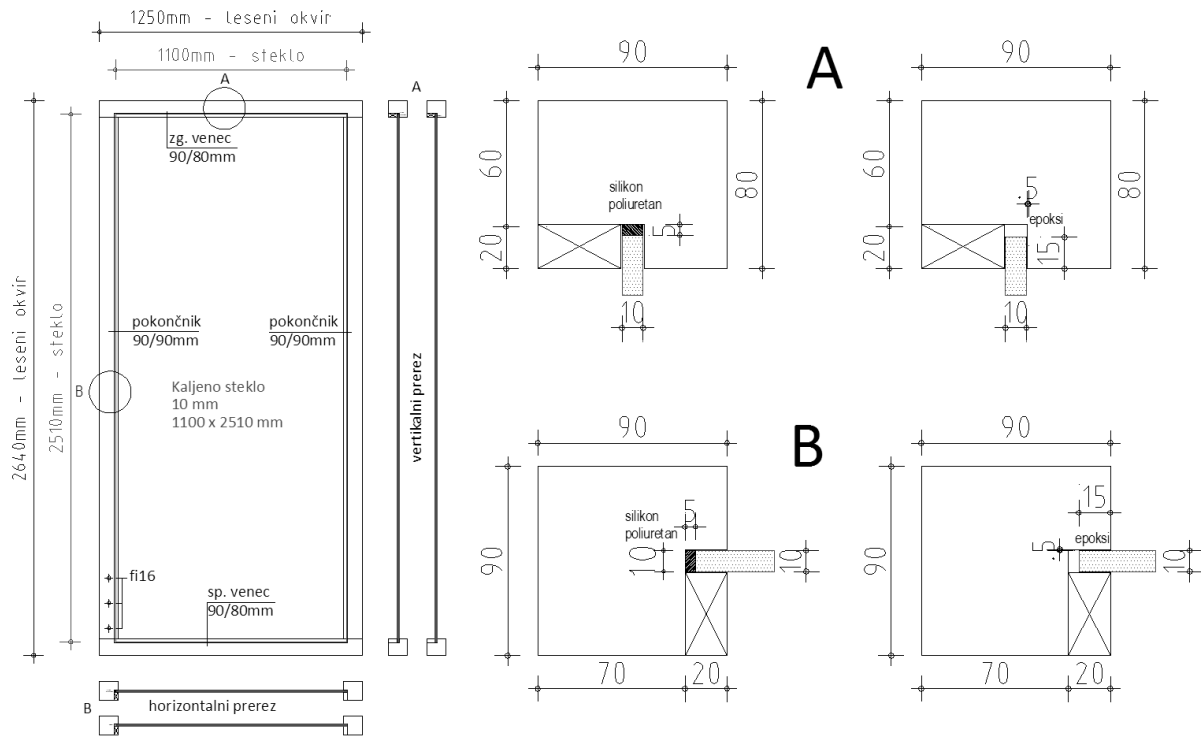
Raziskave horizontalne nosilnosti panelnih stenskih elementov z enojno oblogo iz stekla, ki je z lepilom pritrjena na leseni okvir, so izvedli v Laboratoriju za raziskave materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru [2]. Eksperimenti bodo v nadaljevanju izračunani z mehanskim modelom in enačbami, predstavljenimi v poglavju 4.

5.1.1 Leseni del preizkušancev

Lastnosti okvira testiranih preizkušancev so bile naslednje:

- 1250 mm x 2640 mm - zunanji gabariti, ki predstavljajo standardno mero stenskih panelov. Ti so že bili testirani, vendar z drugimi vrstami obložnih plošč.
- 90 mm x 90 mm – dimenzije prereza dveh pokončnikov
- 90 mm x 80 mm – dimenzije prereza dveh vencev

Dimenzije in prerezi lesenega okvirja so predstavljeni na sliki 35.



Slika 35: Tehnična risba koncepta eksperimenta [2]

Za izdelavo lesenih okvirjev so uporabili les trdnostnega razreda C22 po EN 338:2003, katerega karakteristike so predstavljene v preglednici 2 [2].

Preglednica 2: Materialne karakteristike uporabljenega lesa [2]

	$E_{0,m}$ [N/mm ²]	G_m [N/mm ²]	$f_{m,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{c,0,k}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]	ρ_m [kg/m ³]
Leseni okvir C22	10000	630	22	13	20	340	410

Pomeni oznak v preglednici 2 so:

- $E_{0,m}$... povprečna vrednost modula elastičnosti v smeri vlaken lesa
- G_m ... povprečna vrednost strižnega modula
- $f_{m,k}$... karakteristična upogibna trdnost v smeri vlaken lesa
- $f_{t,0,k}$... karakteristična natezna trdnost v smeri vlaken lesa
- $f_{c,0,k}$... karakteristična tlačna trdnost v smeri vlaken lesa
- ρ_k ... karakteristična gostota
- ρ_m ... povprečna gostota

5.1.2 Stekleni del preizkušancev

Lastnosti steklenega panela preizkušancev so bile naslednje:

- 1100 mm x 2510 mm, debeline 10 mm – zunanje mere steklenega panela iz kaljenega stekla [2].

Za steklene plošče so uporabili kaljeno natrij-kalcijevo silikatno varnostno steklo po EN 12150-1, katerega lastnosti so predstavljene v preglednici 3 spodaj [2].

Preglednica 3: Materialne karakteristike uporabljenega stekla [2]

	$E_{0,m}$ [N/mm ²]	G_m [N/mm ²]	$f_{m,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{c,0,k}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]	ρ_m [kg/m ³]
Kaljeno steklo EN 12150	70000	28455	120	45	500	2500	2500

Pomeni oznak v preglednici 3 so:

- $E_{0,m}$... povprečna vrednost modula elastičnosti
- G_m ... povprečna vrednost strižnega modula
- $f_{m,k}$... karakteristična upogibna trdnost
- $f_{t,0,k}$... karakteristična natezna trdnost
- $f_{c,0,k}$... karakteristična tlačna trdnost
- ρ_k ... karakteristična gostota
- ρ_m ... povprečna gostota

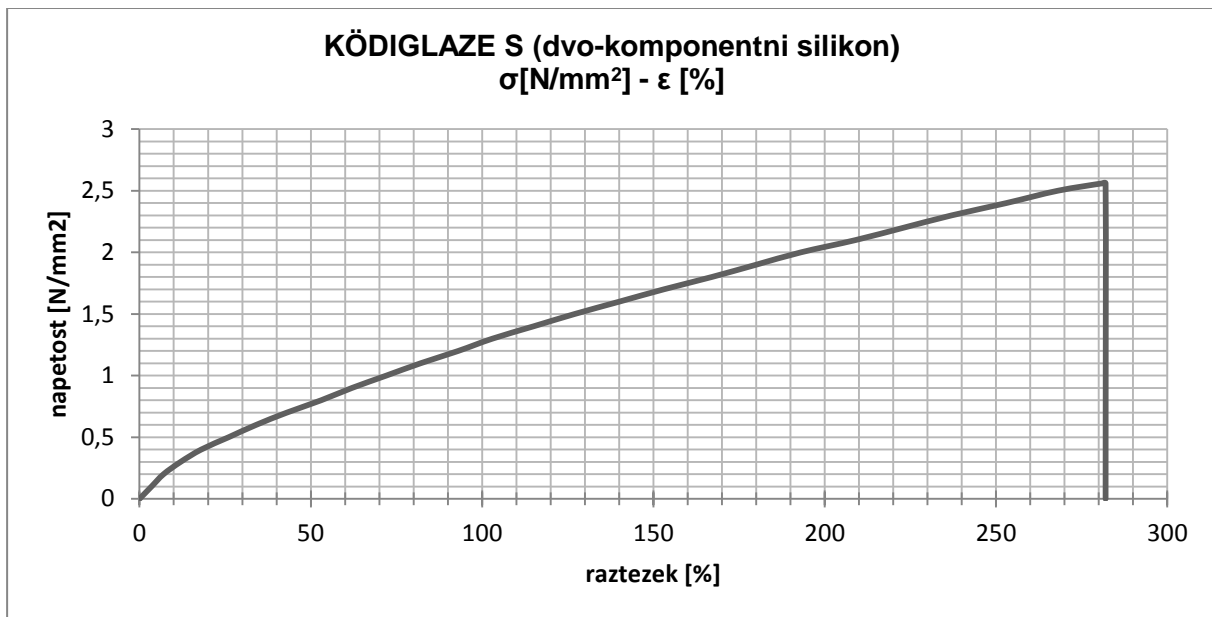
5.1.3 Uporabljeni adhezivi za lepljene spoje preizkušancev

Pri preizkusu so za linijski spoj med lesom in steklom uporabili naslednje adhezive proizvajalca Kömmerling [2]:

- a) dvo-komponentni silikon – dimenzij 10 mm x 5 mm,
- b) eno-komponentni poliuretan – dimenzij 10 mm x 5 mm ter
- c) dvo-komponentni epoksid – dimenzij 15 mm x 0,5 mm.

a) dvo-komponentni silikon (Ködiglaze S)

Slika 36 prikazuje delovni diagram dvo-komponentnega silikona, ki je rezultat enosnega preizkusa na vzorcu silikona tipa Ködiglaze S. Kot lahko vidimo, napetost skoraj linearno narašča z raztežkom, vse dokler ne pride do pretrga in napetost vertikalno strmo pade. To se zgodi pri približno 280 % doseženega raztežka in 2,5 N/mm² natezne napetosti.



Slika 36: Delovni diagram dvo-komponentnega silikona [2]

Preglednica 4: Mehanske lastnosti dvo-komponentnega silikona (Ködiglaze S) [2]

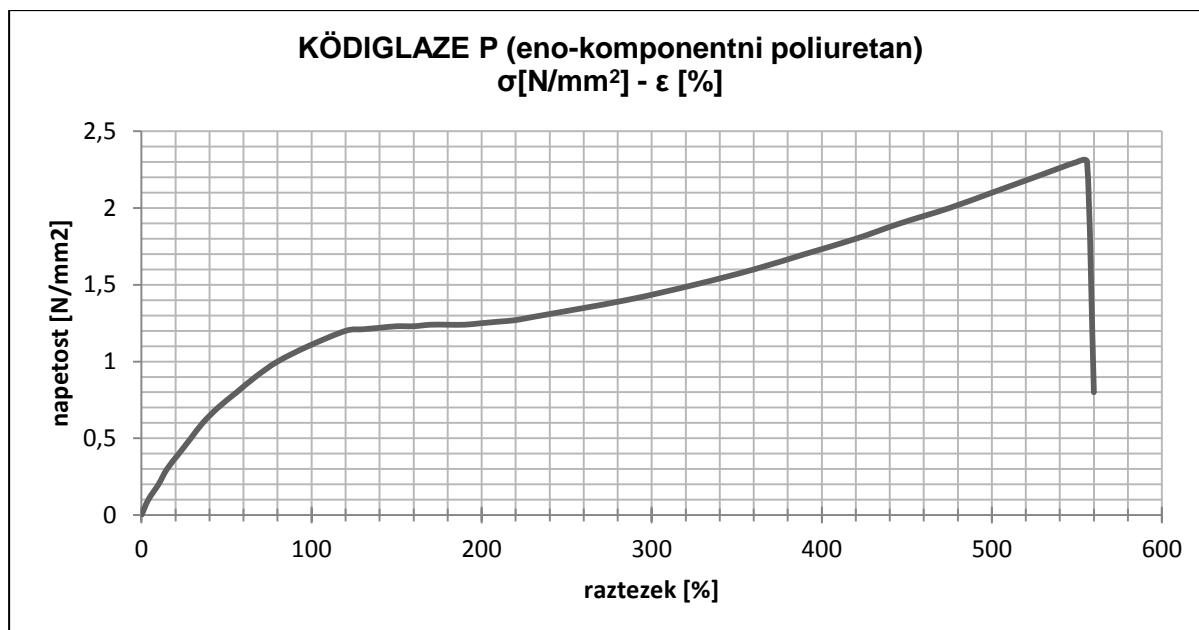
E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	$f_{t,k}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]	Temperaturna odpornost min °C / max °C
2,8	0,93	2,1	1370	-40 °C / +150 °C

Preglednica 4 zgoraj prikazuje osnovne mehanske lastnosti testiranega silikona. Pomeni uporabljenih oznak so naslednji:

- E ... vrednost modula elastičnosti
- G ... vrednost strižnega modula
- $f_{t,k}$... karakteristična natezna trdnost
- ρ_k ... karakteristična gostota

b) eno-komponentni poliuretan (Ködiglaze P)

Slika 37 prikazuje delovni diagram eno-komponentnega poliuretana, ki je rezultat enosnega preizkusa na vzorcu poliuretana tipa Ködiglaze P. Kot lahko vidimo, napetost najprej strmo in skoraj linearno narašča z raztežkom, nato napetost z raztežkom narašča v obliki parabole, vse dokler ne pride do pretrga in napetost vertikalno strmo pade, kar se zgodi pri približno 560 % doseženega raztežka in približno 2,3 N/mm² natezne napetosti.



Slika 37: Delovni diagram eno-komponentnega poliuretana [2]

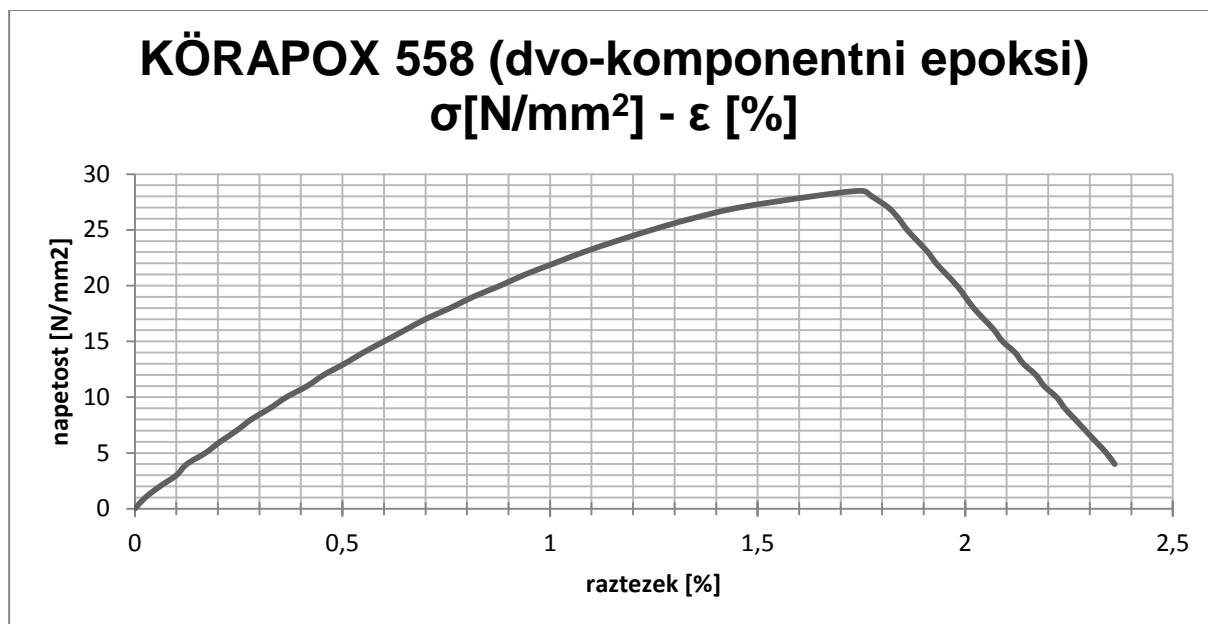
Preglednica 5: Mehanske lastnosti eno-komponentnega poliuretana (Ködiglaze P) [2]

E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	$f_{t,k}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]	Temperaturna odpornost min °C / max °C
2,0	1,30	2,0	1170	-30 °C / +70 °C

Preglednica 5 zgoraj prikazuje osnovne mehanske lastnosti testiranega poliuretana. Opazimo lahko, da so mehanske lastnosti poliuretana in silikona precej podobne. Razlika je le v temperaturni odpornosti, saj silikon prenese enkrat višje temperature kot pa poliuretano.

c) dvo-komponentni epoksi (Körapox 558)

Slika 38 prikazuje delovni diagram dvo-komponentnega epoksija, ki je nastal kot rezultat enoosnega preizkusa na vzorcu epoksija tipa Körapox 558. Najprej lahko opazimo, da se epoksi obnaša precej drugače kot pa silikon in poliuretano. Vidimo, da pri precej večji natezni napetosti doseže precej majhen raztezek. Ko doseže maksimalno natezno napetost pri okrog 28 N/mm², se začne počasi trgati. Vse, kar sem omenila, kaže na to, da je epoksi precej bolj tog adheziv v primerjavi s silikonom in poliuretanom.



Slika 38: Delovni diagram dvo-komponentnega epoksija [2]

Preglednica 6: Mehanske lastnosti dvo-komponentnega epoksija (Körapox 558) [2]

E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	$f_{t,k}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]	Temperaturna odpornost min °C / max °C
2800	/	28	1500	-30 °C / +120 °C

Osnovne mehanske lastnosti testiranega epoksija prikazuje preglednica 6 zgoraj. Opazimo, da je elastični modul epoksija veliko večji od elastičnega modula silikona in poliuretana, kar pomeni, da drži prejšnja ugotovitev, da je epoksi bolj tog v primerjavi z ostalima adhezivoma.

5.1.4 Potek eksperimenta

Zaradi pogojev testnega aparata so vzorci glede na dejanski položaj zasukani za 90° . S tremi navojnimi palicami $\phi 16$ so preko levega pokončnika vpeti v streme. Torej so v togi jekleni okvir vpeti konzolno. Izpostavljeni so točkovni obtežbi, ki sicer predstavlja horizontalno obremenitev [2].

Slika 39 prikazuje dispozicijo preizkusa. Slika prikazuje celoten lesen okvir, stekleno ploščo, vpet zgornji desni kot in vnašanje sile v zgornji levi kot.

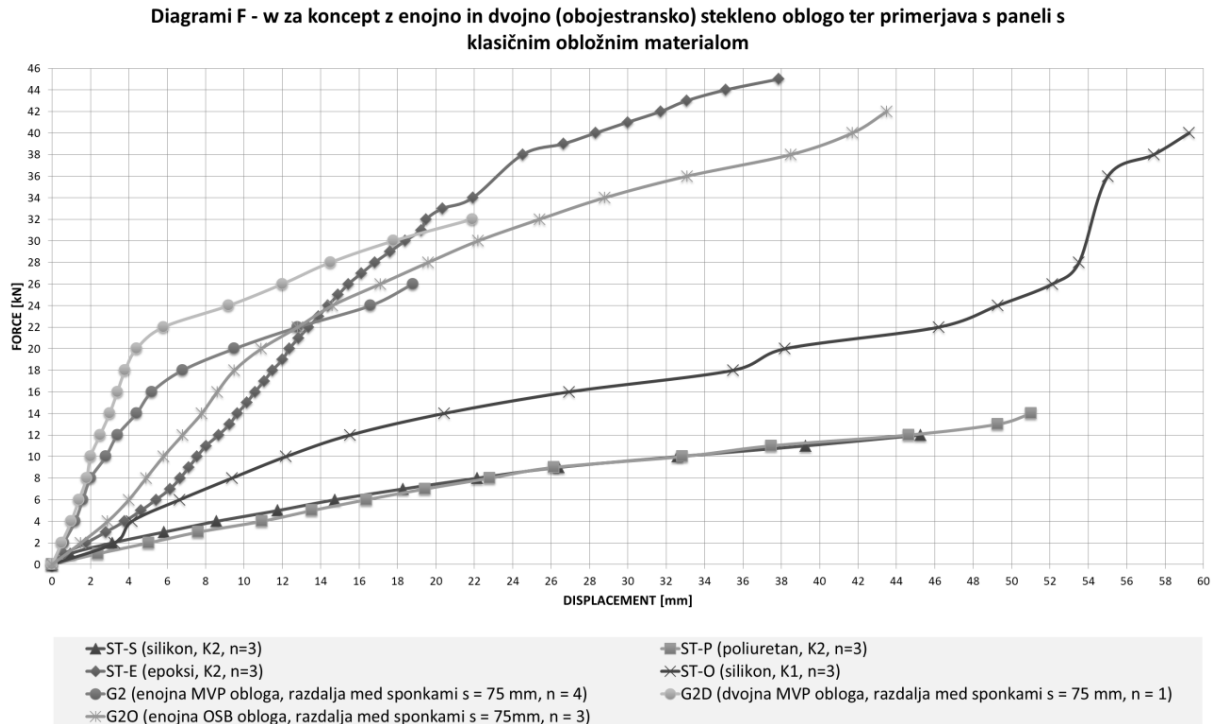


Slika 39: Dispozicija preizkusa [2]

Obremenjevanje panelov je potekalo od vrednosti 0 do 10 kN, s hitrostjo prirastka obtežbe $2,0 \text{ kN} / 250 \text{ s}$. Razbremenjevanje od 10 kN do porušitve pa je potekalo s hitrostjo $2,0 \text{ kN} / 200 \text{ s}$. Pri prvi testni skupini so meritve omejili na meritve pomika w in zdrsov v natezni (Δ_{zg}) in tlačni (Δ_{sp}) coni v priključni ravnini med stekleno oblogo in lesenim okvirjem. Pri naslednjih testnih skupinah pa so s pomočjo merilnih lističev (*strain-gage*) merili še deformacije v stekleni plošči in lesenem okvirju [2].

5.1.5 Rezultati eksperimenta

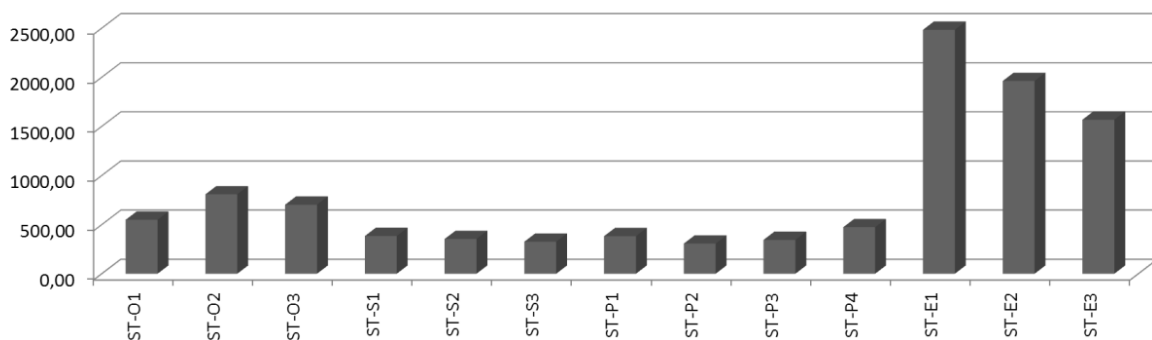
Eksperimenti so pokazali, da je pri silikonskih in poliuretanskih stikih nastopila porušitev zaradi razpada obremenjenega vogala lesenega okvirja. Slika 40 v nadaljevanju prikazuje normirane srednje vrednosti pomikov preizkušancev z različnimi oblogami in adhezivi.



Slika 40: Normirane srednje vrednosti pomikov preizkušancev z različnimi oblogami [2]

Opazimo lahko, da na zgornjem diagramu precej odstopajo krivulje preizkušancev z oblogo iz mavčno vlaknenih plošč (*MVP*) ali oblogo iz večslojno lepljenih iveri (*OSB*), kar smo tudi pričakovali, saj je steklo precej bolj krhek material v primerjavi z ostalimi oblogami. Pričakovano izstopa tudi krivulja preizkušanca z epoksijem, ki se obnaša precej bolj togo v primerjavi s silikonom ali poliuretanom.

Upogibna togost panelov v (N/mm) v skladu z EN 594:2011



Slika 41: Upogibna togost preizkušancev z različnimi steklenimi oblogami in adhezivi [2]

Slika 41 prikazuje dobljeno upogibno togost preizkušenih panelov in zopet opazimo, da precej izstopajo rezultati preizkušancev z epoksijem.

»Ta stran je namenoma prazna.«

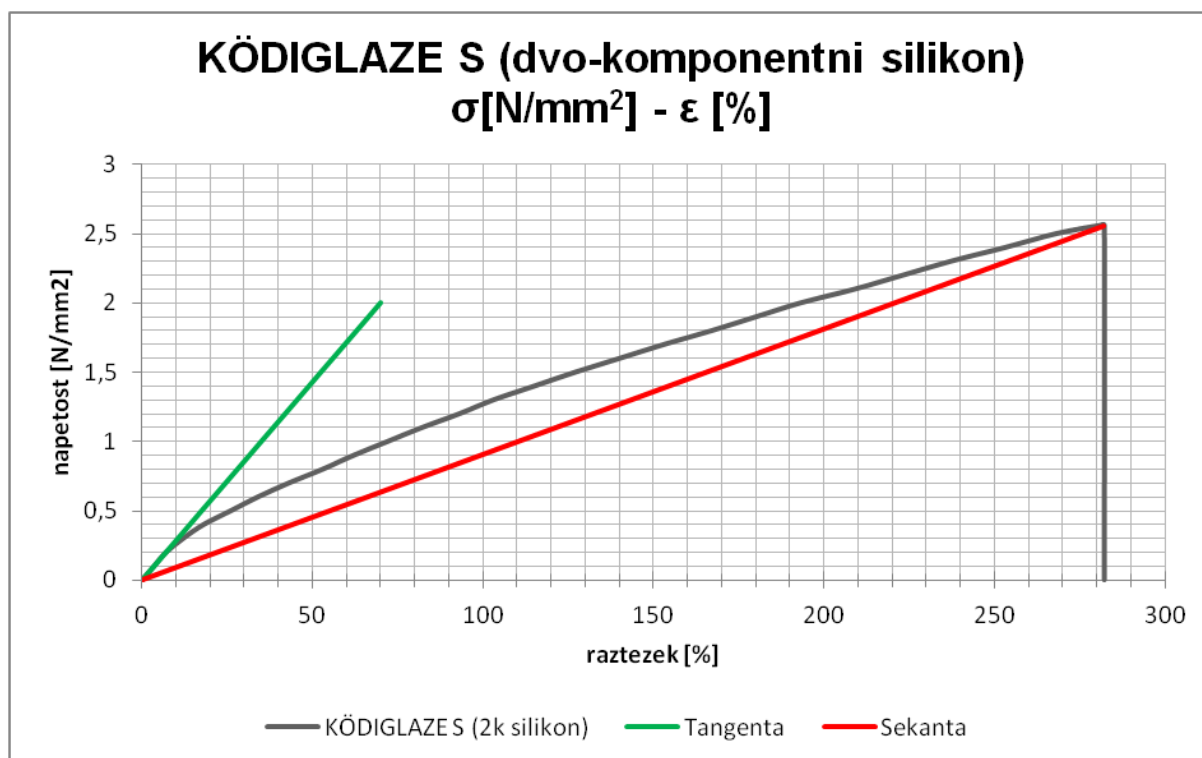
6 RAČUN PO MEHANSKEM MODELU IN PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTALNIMI TESTI

V tem poglavju bom predstavila izračun po mehanskem modelu in enačbah, ki smo jih izpeljali in predstavili v 4. poglavju, nato pa bom dobljene rezultate primerjala še z rezultati eksperimentalnega testa iz 5. poglavja.

6.1 Izhodišče

Za izhodišče izračuna bomo uporabili delovne diagrame za posamezen adheziv iz podpoglavja 5.2.3. S pomočjo teh diagramov bomo določili izhodiščno vrednost modula elastičnosti in posledično tudi vrednost strižnega modula. Kot smo omenili že v podpoglavju 3.3 so adhezivi nelinearno elastični, kar pomeni, da napetosti niso linearno odvisne od deformacij. Iz delovnega diagrama enosnega preizkusa posameznega adheziva tako ne moremo določiti le enega modula elastičnosti, zato bomo za vsak adheziv določili dva »poenostavljena« modula elastičnosti – tangentnega in sekantnega.

6.1.1 Dvo-komponentni silikon

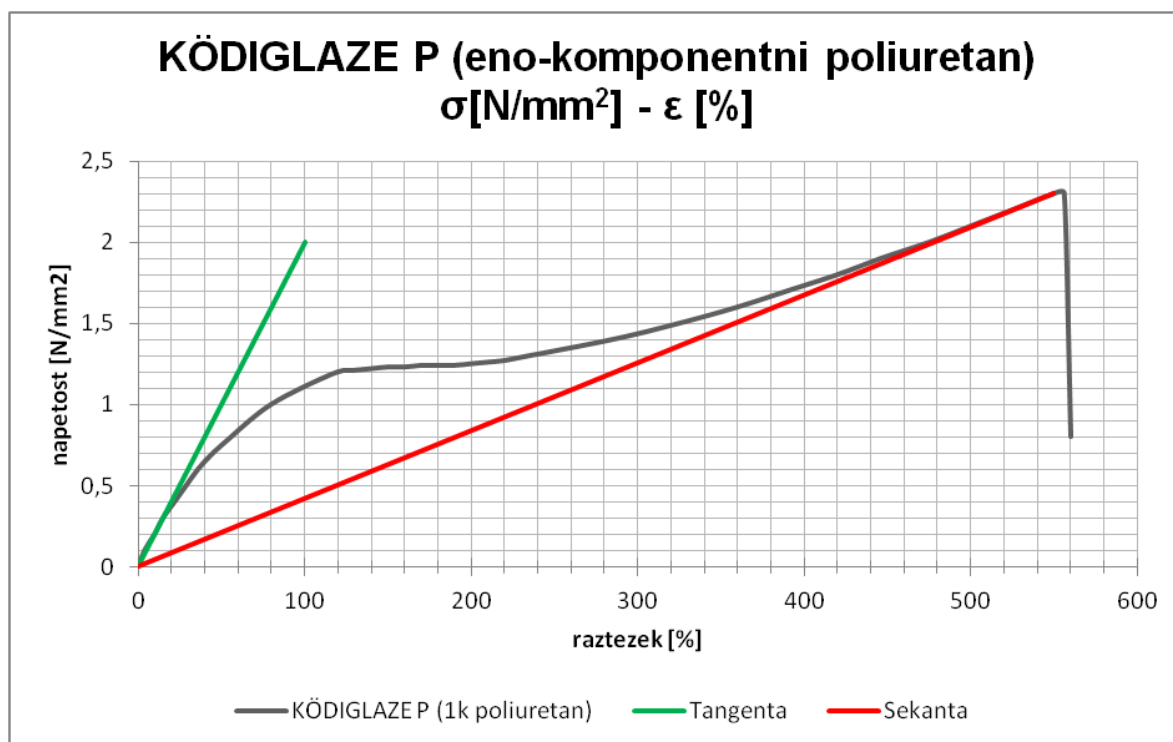


Grafikon 1: Delovni diagram za silikon, skupaj s tangentno in sekantno določitvijo modula elastičnosti

Grafikon 1 prikazuje delovni diagram za dvo-komponentni silikon skupaj s tangetno in sekantno določitvijo modula elastičnosti. Vemo, da je modul elastičnosti E izračunan s pomočjo razmerja med napetostjo in deformacijo ($E=\sigma/\epsilon$), strižni modul G pa s tretjino vrednosti modula elastičnosti ($G=E/2*(1+\nu)$), pri čemer je Poissonov količnik $\nu=0,5$, saj smo predpostavili, da so adhezivi skoraj nestisljivi. S pomočjo tangente smo za elastični modul dobili vrednost $E=2,86 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa vrednost $G=0,95 \text{ N/mm}^2$. S pomočjo sekante pa smo dobili precej manjše vrednosti, saj je bila za elastični modul le-ta le $E=0,91 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa le $G=0,30 \text{ N/mm}^2$.

Če se spomnimo vrednosti za oba modula iz preglednice 4 v podpoglavju 5.2.3, potem dobimo prvo potrditev, da so bolj pravilne vrednosti pridobljene s pomočjo tangente. Drugo potrditev pa nam da grafikon 1, saj se tangenta veliko lepše ujema z delovnim diagramom kot pa sekantna.

6.1.2 Enokomponentni poliuretan



Grafikon 2: Delovni diagram za poliuretan, skupaj s tangetno in sekantno določitvijo modula elastičnosti

Naslednji adheziv, za katerega smo določili oba modula, je bil enokomponentni poliuretan. S pomočjo tangente smo za modul elastičnosti dobili vrednost $E=2,00 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa vrednost $G=0,67 \text{ N/mm}^2$. Sekantna premica pa je tudi v tem primeru podala precej

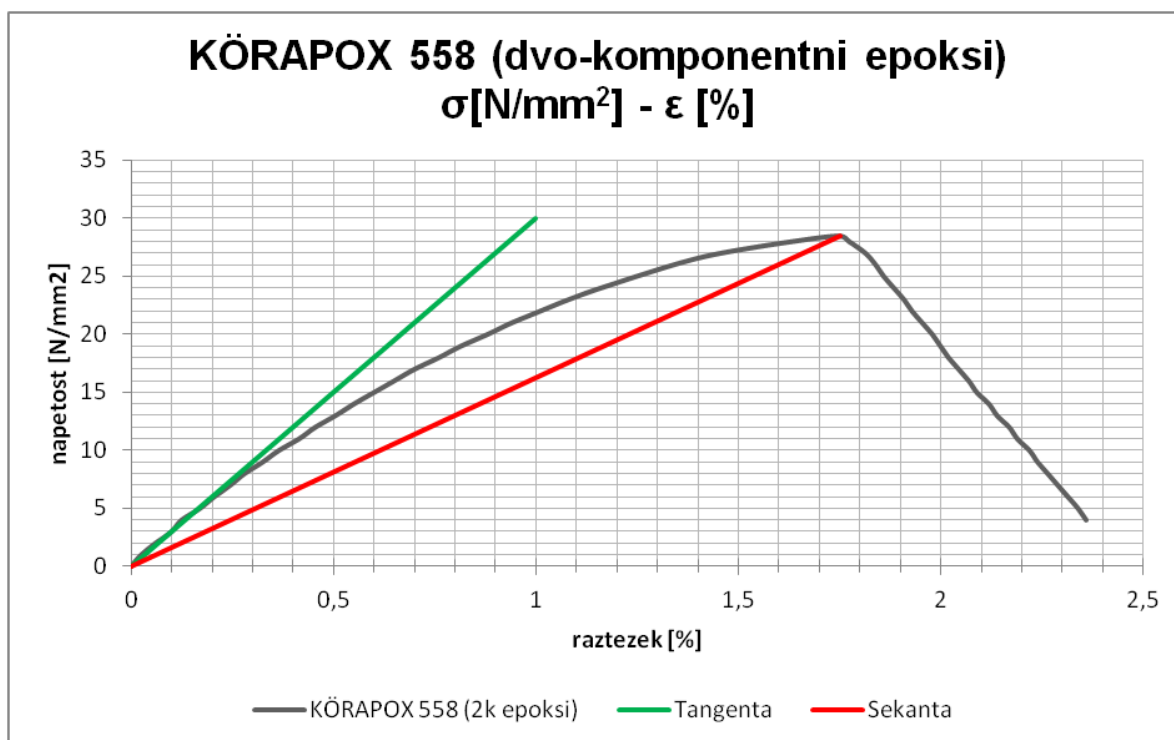
manjše vrednosti, saj smo za elastični modul dobili vrednost $E=0,42 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa vrednost $G=0,14 \text{ N/mm}^2$.

Ponovno dobimo dvakratno potrditev, da sta vrednosti modulov pridobljeni s pomočjo tangente najbolj ustrezni, saj se le-ti lepo ujemata z vrednostmi iz preglednice 5 v podpoglavju 5.2.3, pa tudi na grafikonu 2 je razvidno lepše ujemanje tangentne premice s samim delovnim diagramom.

6.1.3 Dvo-komponentni epoksi

Na koncu smo se odločili še, da določimo izhodišča tudi za dvo-komponenti epoksi. Že prvi pogled na delovni diagram, viden na grafikonu 3, nam je sprožil pomisleke glede ustreznosti epoksija za naš izračun, saj so natezne napetosti precej večje pri precej manjšem raztezku. Iz tega namreč hitro sklepamo, da bosta oba modula precej večja v primerjavi z vrednostmi za silikon in poliuretan.

Vseeno smo s pomočjo obeh vrst premic določili vrednosti modulov in dobili naslednje rezultate. S pomočjo tangente smo za modul elastičnosti dobili vrednost $E=3000 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa vrednost $G=1000 \text{ N/mm}^2$. Sekantna premica je kot že v obeh prejšnjih primerih, tudi v tem primeru podala precej manjše vrednosti. Za modul elastičnosti smo dobili vrednost $E=1629 \text{ N/mm}^2$, za strižni modul pa vrednost $G=543 \text{ N/mm}^2$. Kot smo ugotovili že prej, se tudi v tem primeru vrednosti dobljene s pomočjo tangente bolje ujemajo z vrednostmi iz preglednice 6 v podpoglavju 5.2.3.



Grafikon 3: Delovni diagram za epoksi, skupaj s tangento in sekantno določitvijo modula elastičnosti

Kot smo ugotovili na podlagi vrednosti obeh modulov na začetku tega podpoglavja, je epoksi v primerjavi s silikonom in poliuretanom precej bolj tog adheziv. V 4. poglavju smo že omenili tudi to, da izpeljane enačbe veljajo le za stike tipa 1, torej za obodni lepljen stik. Pri eksperimentu na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru so epoksi uporabili pri stiku tipa 2, tako da naših rezultatov dobljenih z izračunom ni možno primerjati z rezultati iz eksperimenta.

Povzamemo lahko, da so izpeljane enačbe primerne le za elastične obodne stike, za kar sta najbolj primerna silikon in poliuretan.

Na tem mestu bom tudi zaključila z obravnavo epoksi lepljenega stika.

6.2 Osnovni parametri modela

Potem, ko smo določili izhodiščne vrednosti modula elastičnosti in strižnega modula, smo naredili še seznam vseh osnovnih parametrov našega modela in določili oddaljenosti posamezne vzmeti od središča stekla. Vsi podatki sledijo v tem poglavju.

Cilj naših izračunov je bil, da bi se čim bolj približali rezultatom, ki so jih dobili pri eksperimentu na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru, zato smo za osnovne parametre modela vzeli popolnoma iste podatke kot so jih imeli njihovi preizkušanci.

6.2.1 Dimenzije modela

Preglednica 7 prikazuje vse osnovne dimenzije sestavnih delov obravnavanega modela. Velja enaka skica, kot je predstavljena v 5. poglavju, podpoglavje 5.1.1, slika 35, ki prikazuje tehnični koncept mariborskega eksperimenta skupaj s prerezi posameznih komponent.

Preglednica 7: Osnovne dimenzije sestavnih delov obravnavanega modela

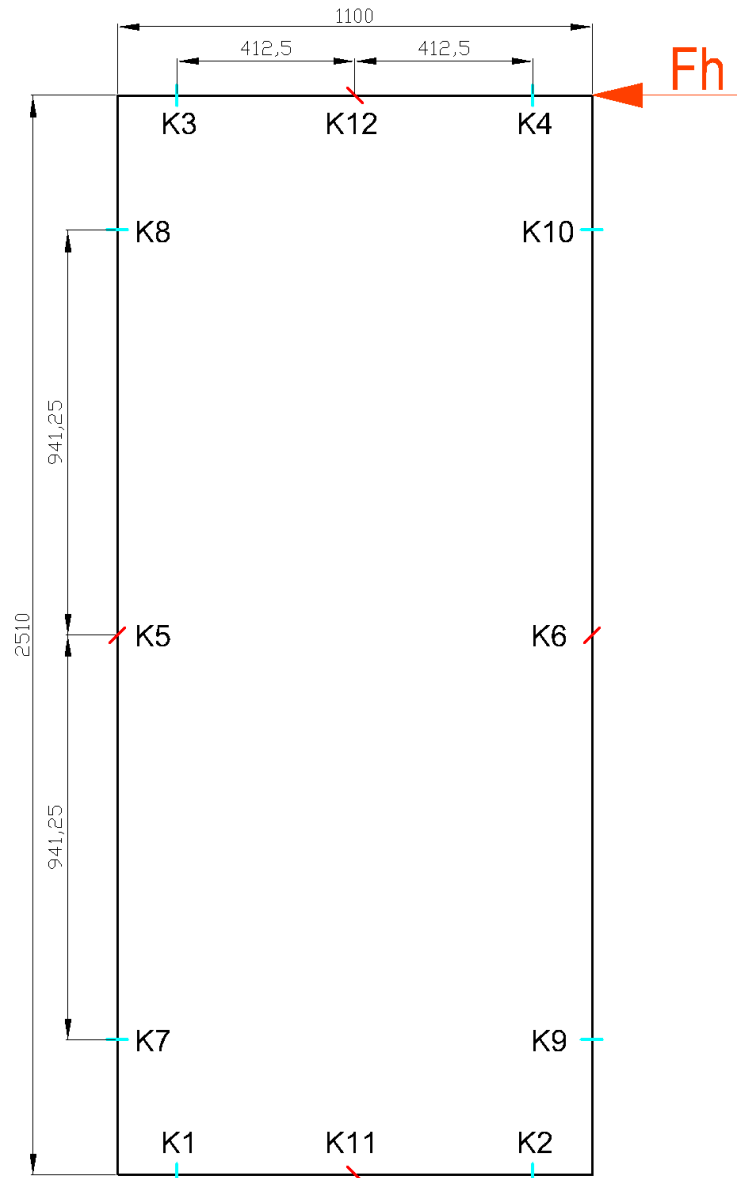
Oznaka	Opis	Količina	Enota
w_s	širina sistema	1250	mm
h_s	višina sistema	2640	mm
w_g	širina stekla	1100	mm
h_g	višina stekla	2510	mm
t_g	debelina stekla	10	mm
t_j	debelina lepljenega stika	5	mm
w_j	širina lepljenega stika	10	mm
t_f	debelina okvirja	90	mm

6.2.2 Razporeditev vzmeti

Kot je razvidno iz izpeljave enačb v 4. poglavju, potrebujemo za določitev ravninske togosti sistema tudi podatke o oddaljenosti posamezne vzmeti glede na središče stekla. Ti podatki so zajeti v preglednici 8, slika 42 pa prikazuje še skico panela z označenimi položaji vzmeti.

Preglednica 8: Oddaljenost posamezne vzmeti od središča stekla

Oznaka vzmeti	x [mm]	y [mm]
K1	412,5	0,0
K2	412,5	0,0
K3	412,5	0,0
K4	412,5	0,0
K5	415,0	0,0
K6	415,0	0,0
K7	0,0	941,25
K8	0,0	941,25
K9	0,0	941,25
K10	0,0	941,25
K11	0,0	943,8
K12	0,0	943,8



Slika 42: Skica panela z označenimi položaji vzmeti.

Ko smo imeli pripravljena vsa izhodišča, je sledil izračun vseh količin s pomočjo enačb iz 4. poglavja in za oba ustrezna prej omenjena tipa adhezivov.

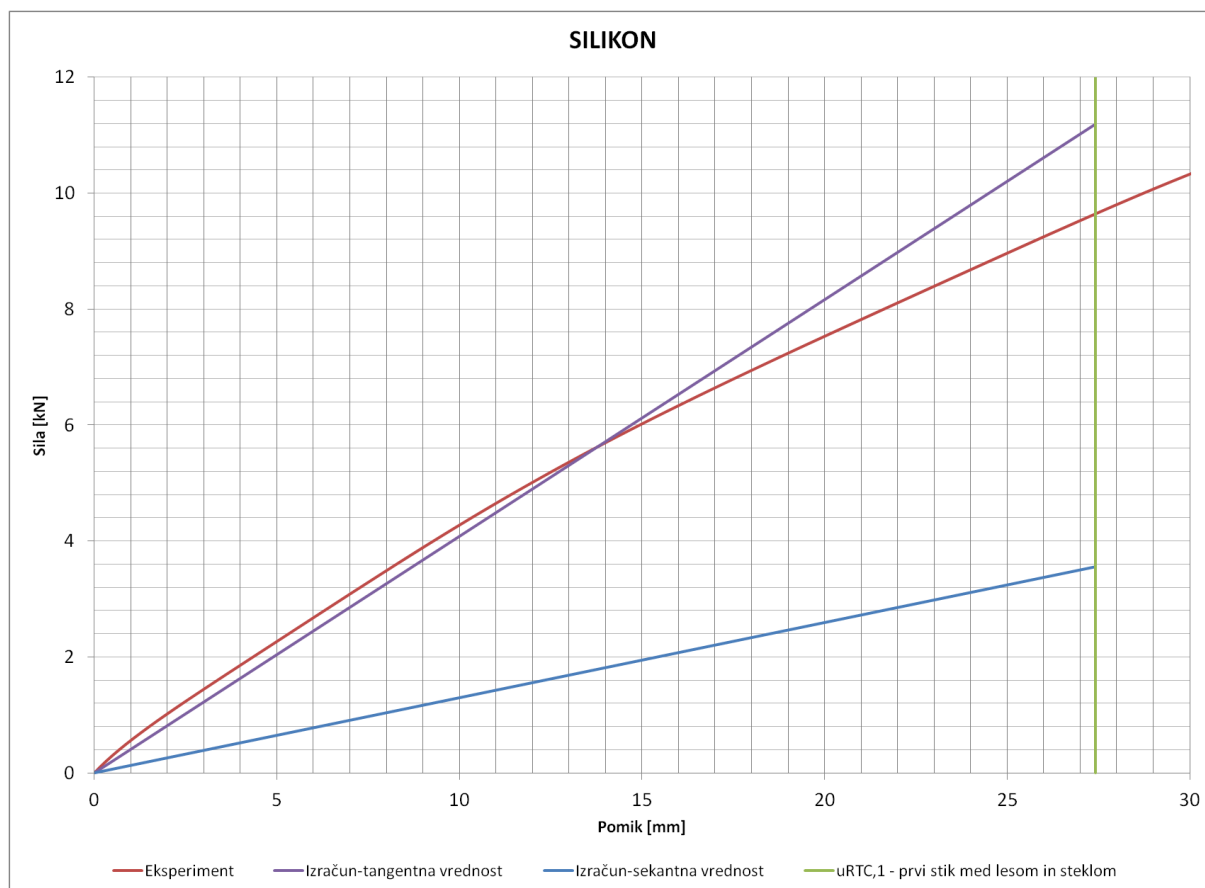
6.3 Izračun za primer uporabe silikonskega adheziva

Kot sem omenila že v poglavju 6.1, smo za izračun posamezne količine enkrat uporabili tangento vrednost modula elastičnosti in strižnega modula, drugič pa sekantno vrednost za oba omenjena modula. Rezultati, ki smo jih dobili s pomočjo izpeljanih enačb iz 4. poglavja, so za silikon prikazani v preglednici 9.

Preglednica 9: Rezultati za posamezno količino za tangентno in sekantno vrednost modulov v primeru uporabe silikonskega adheziva

Količina	Uporabljena tangентna vrednost modula elastičnosti in strižnega modula	Uporabljena sekantna vrednost modula elastičnosti in strižnega modula
$k_j; \xi$ [N/mm ³]	0,5714	0,1816
$k_j; \eta$ [N/mm ³]	0,1905	0,0605
$K1=K2=K3=K4$ [N/mm]	2357,14	748,94
$K7=K8=K9=K10$ [N/mm]	5378,57	1708,94
$K5=K6$ [N/mm]	4780,95	1519,05
$K11=K12$ [N/mm]	2095,24	665,72
$K\varphi$	0,8752	0,8752
K_s [N/mm]	408	130
$u_{RTC,1}$ [mm]	27	27
$F_{h,1}$ [kN]	11	4
$\varphi(u_{RTC})$	0,0091	0,0091
$u_j; \xi; rel; max$ [mm]	1,6274	1,6274
$v_j; \xi; rel; max$ [mm]	5,0000	5,0000
$u_j; \eta; rel; max$ [mm]	2,3025	2,3025
$v_j; \eta; rel; max$ [mm]	5,9349	5,9349
$\sigma_j; \xi; x; max$ [N/mm ²]	0,9299	0,2955
$\sigma_j; \xi; y; max$ [N/mm ²]	2,8571	0,9078
$\tau_j; \eta; x; max$ [N/mm ²]	0,4386	0,1394
$\tau_j; \eta; y; max$ [N/mm ²]	1,1305	0,3592
$\sigma_g; 1; max$ [N/mm ²]	2,9523	0,9380

Iz preglednice 9 lahko razberemo, da so rezultati za tangентno in sekantno vrednost modulov precej različni. Kot smo sklepali že pri določitvi obeh vrednosti modulov in kot je razvidno iz grafikona 4, se precej bolje približamo rezultatom iz eksperimenta s tem, da za izračun uporabimo tangентne vrednosti elastičnega in strižnega modula.



Grafikon 4: Grafikon sila-pomik za silikon, ki zajema podatke iz eksperimenta in izračuna

Iz grafikona 4 je razvidno ujemanje togosti leseno steklenega panela iz eksperimenta in mehanskega modela, primerjava mejnih sil in pomikov pa je dodatno predstavljena še v preglednici 10.

Preglednica 10: Primerjava izračunanih in eksperimentalnih pomikov in sil za silikon

Silikon – izračun vs. eksperiment		
Izračunan $u_{RTC,1}$	27,4	mm
Izmerjen eksperimentalni $u_{RTC,ruš.}$	42,3	mm
Razmerje med $u_{RTC,1}$ in $u_{RTC,ruš.}$	65%	
Izračunana $F_{h,1}$	11,2	kN
Izmerjena eksperimentalna $F_{h,ruš.}$	12,4	kN
Razmerje med $F_{h,1}$ in $F_{h,ruš.}$	90%	

Če najprej primerjamo oba pomika, opazimo da sta vrednosti precej različni. To pomeni, da pride do prvega stika med lesom in steklom, ki ga izračunamo z mehanskim modelom že pri manjšem horizontalnem pomiku kot je pomik ob poružitvi v eksperimentu. Iz razmerja pomikov, lahko vidimo, da pri doseženih 65% pomika ob poružitvi, pride do prvega stika med lesom in steklom. Kriterij $u_{RTC,1}$ iz mehanskega modela se izkaže kot konzervativen.

Primerjava porušne sile in sile pri prve stiku med lesom in steklom pa je precej drugačna. Opazimo, da sta vrednosti precej podobni, razmerje sil pa nam pove, da pride do prvega stika med lesom in steklom ko je doseženih kar 90% porušne sile.

Iz obeh razmerij lahko torej zaključimo, da je kriterij iz mehanskega modela konzervativen v primerjavi z meritvami, ki so jih pokazali eksperimenti. Očitno je, da je kriterij $u_{RTC;1}$, ki označuje velikost pomika pri prvem stiku med lesom in steklom, preveč konzervativen. Panel po prvem stiku lesa in stekla še nosi, kar so potrdili tudi rezultati eksperimenta.

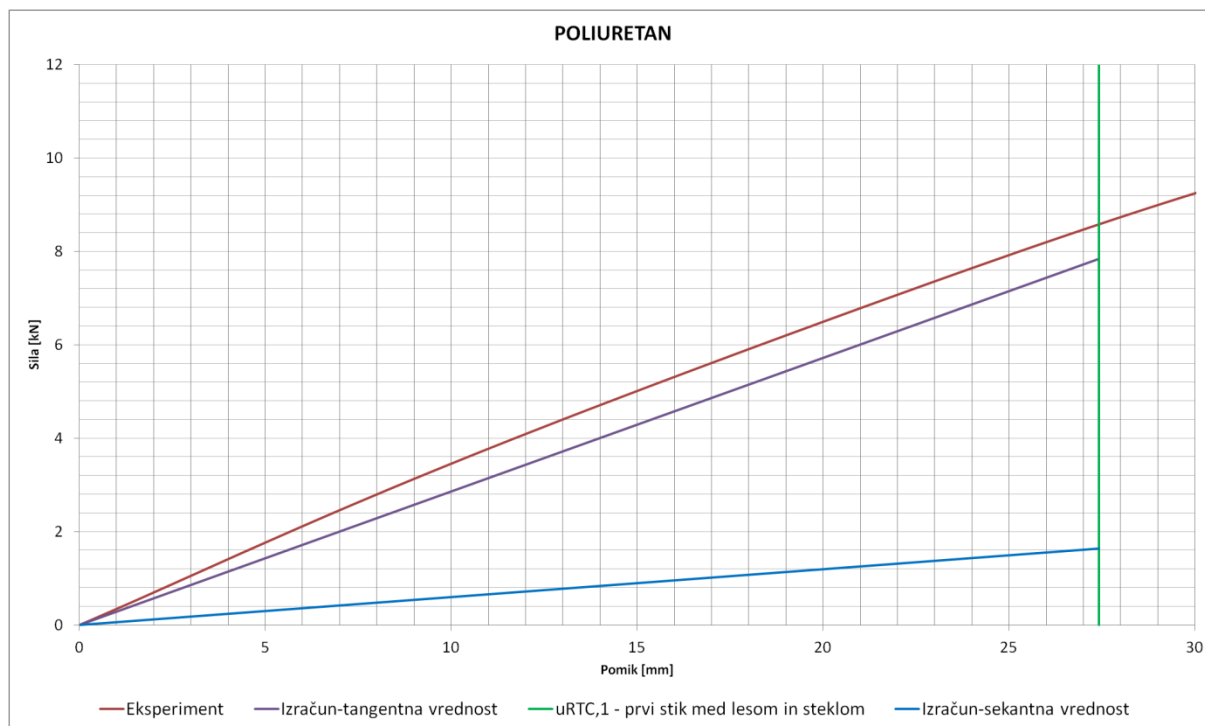
6.4 Izračun za primer uporabe poliuretanskega adheziva

Enak izračun smo ponovili tudi za poliuretan. Rezultati so prikazani v preglednici 11.

Preglednica 11: Rezultati za posamezno količino za tangentno in sekantno vrednost modulov v primeru uporabe poliuretanskega adheziva

Količina	Uporabljena tangenta vrednost modula elastičnosti in strižnega modula	Uporabljena sekantna vrednost modula elastičnosti in strižnega modula
$kj;\xi$ [N/mm ³]	0,4000	0,0836
$kj;\eta$ [N/mm ³]	0,1333	0,0279
$K1=K2=K3=K4$ [N/mm]	1650,00	345,00
$K7=K8=K9=K10$ [N/mm]	3765,00	787,23
$K5=K6$ [N/mm]	3346,67	699,76
$K11=K12$ [N/mm]	1466,67	306,67
$K\varphi$	0,8752	0,8752
Ks [N/mm]	286	60
$u_{RTC,1}$ [mm]	27	27
$Fh,1$ [kN]	8	2
$\varphi(u_{RTC})$	0,0091	0,0091
$uj;\xi;rel;max$ [mm]	1,6274	1,6274
$vj;\xi;rel;max$ [mm]	5,0000	5,0000
$uj;\eta;rel;max$ [mm]	2,3025	2,3025
$vj;\eta;rel;max$ [mm]	5,9349	5,9349
$\sigma_j;\xi;x;max$ [N/mm ²]	0,6509	0,1361
$\sigma_j;\xi;y;max$ [N/mm ²]	2,0000	0,4182
$\tau_j;\eta;x;max$ [N/mm ²]	0,3070	0,0642
$\tau_j;\eta;y;max$ [N/mm ²]	0,7913	0,1655
$\sigma_g;1;max$ [N/mm ²]	2,0666	0,4321

Iz preglednice 11 lahko razberemo, da so tudi v tem primeru rezultati za tangentno in sekantno vrednost modulov precej različni. Kot smo skleпали že pri določitvi obeh vrednosti modulov in kot je razvidno iz grafikona 5, se tudi tokrat precej bolje približamo rezultatom iz eksperimenta s tem, da za izračun uporabimo tangentne vrednosti modula elastičnosti in strižnega modula.



Grafikon 5: Grafikon sila-pomik za poliuretan, ki zajema podatke iz eksperimenta in izračuna

Tudi za ta primer sem naredila primerjavo mejnih sil in pomikov ter jih predstavila v preglednici 12.

Preglednica 12: Primerjava izračunanih in eksperimentalnih pomikov in sil za poliuretan

Poliuretan – izračun vs. eksperiment		
Izračunan $u_{RTC,1}$	27,4	mm
Izmerjen eksperimentalni $u_{RTC,ruš.}$	52,5	mm
Razmerje med $u_{RTC,1}$ in $u_{RTC,ruš.}$	52%	
Izračunana $F_{h,1}$	7,8	kN
Izmerjena eksperimentalna $F_{h,ruš.}$	12,9	kN
Razmerje med $F_{h,1}$ in $F_{h,ruš.}$	61%	

Vrednost pomika, ki smo ga določili z mehanskim modelom in je izpeljan na podlagi kriterija $u_{RTC,1}$ o prvem stiku med lesom in steklom in vrednost pomika ob poružitvi iz eksperimenta sta v tem primeru še bolj različni. To je razvidno tudi iz razmerja obravnavanih pomikov, ki

nam pove, da se prvi stik med lesom in steklom pojavi pri doseženih 52 % pomika ob poružitvi.

Razmerje med silo pri pojavu prvega stika med lesom in steklom in porušno silo je v tem primeru precej bolj podobno razmerju med pomikoma, saj znaša vrednost sile pri pojavu prvega stika med lesom in steklom le 61 % vrednosti porušne sile.

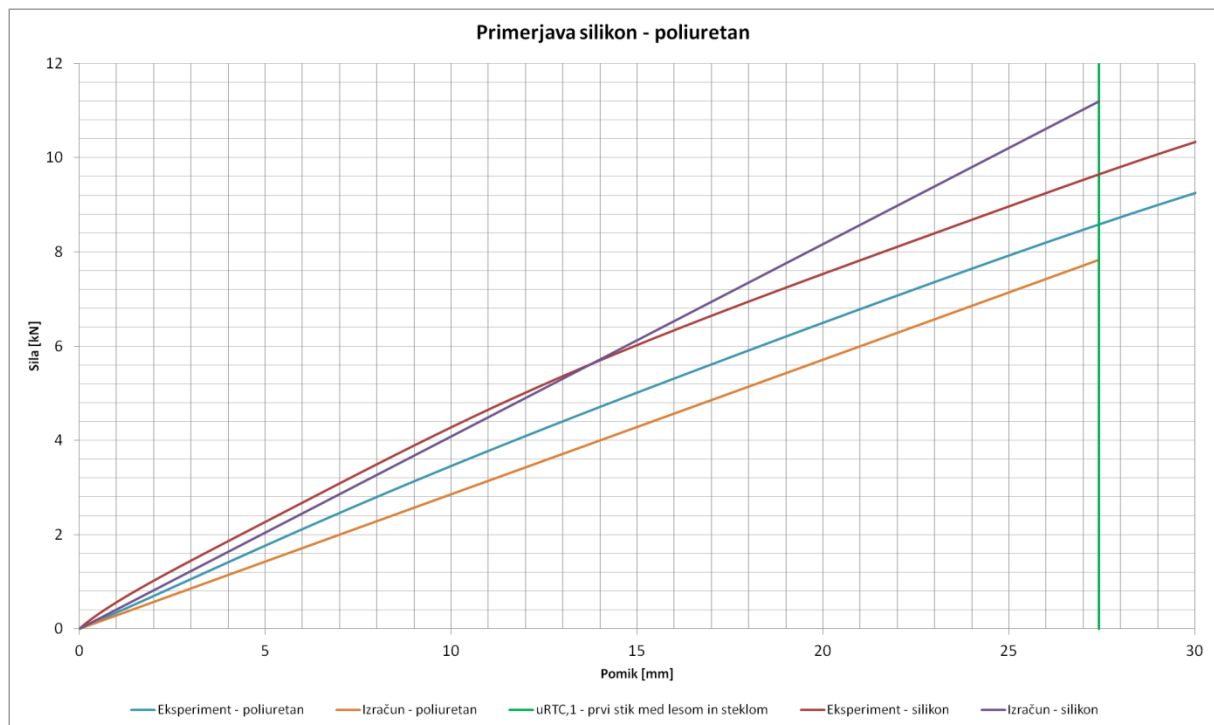
Zaključimo lahko, da se togosti sistema dobljene z mehanskim modelom in iz eksperimenta dobro ujemajo, kar dokazujeta tudi krivulji sila-pomik iz grafikona 5. Povzamemo lahko tudi to, da se kriterij $u_{RTC,1}$ za pomik in silo pri prvem stiku med lesom in steklom določen z mehanskim modelom ne ujema dobro z rezultati dobljenimi iz eksperimenta. To dokazuje, da je omenjeni kriterij preveč konzervativen in ne prikaže realnega stanja leseno steklenega panela po prvem stiku med lesom in steklom. Če bi se osredotočili le na ta kriterij, bi lahko prišli do sklepa, da panel po prvem stiku med lesom in steklom ne nosi več, kar so z eksperimentom dokazali, da ni res.

6.5 Primerjava med poliuretanom in silikonom

V tem podpoglavju bom primerjala rezultate dobljene za poliuretan in silikon, pri čemer bom primerjala le rezultate izračuna na podlagi tangentne vrednosti modulov, saj so le ti precej bolj primerljivi z rezultati eksperimenta.

Na koncu podpoglavja 6.4 sem omenila, da sta razmerji med silo pri prvem stiku med lesom in steklom dobljene z mehanskim modelom in porušno silo iz eksperimenta za silikon in poliuretan precej različni. Za silikon znaša razmerje med omenjenima silama kar 90 %, za poliuretan pa le 61 %. Iz tega lahko sklepamo, da poliuretan bolje prenaša obtežbo, je bolj vzdržljiv, saj se poruši pri večjem doseženem pomiku, kar pomeni, da omogoča večje deformacije v primerjavi s silikonom. Sicer pa je v obeh primerih porušna sila skoraj enaka, medtem ko je sila pri pojavu prvega stika med lesom in steklom pri silikonu za kar 44 % večja v primerjavi s poliuretanom.

Razmerji med pomikom pri prvem stiku med lesom in steklom dobljenim z mehanskim modelom in pomikom ob poružitvi iz eksperimenta, sta si tako za silikon kot za poliuretan precej bližji, čeprav znaša razmerje pomikov za silikon 65 %, za poliuretan pa 52 %. Do razlike pride zato, ker je pomik pri poružitvi pri poliuretanu za dobrih 10 mm večji v primerjavi s silikonom.



Grafikon 6: Primerjava grafov sila-pomik za silikon in poliuretan

Grafikon 6 prikazuje lepo primerjavo med obnašanjem silikona in poliuretana. Opazimo lahko, da silikon pri istem pomiku doseže večjo silo kot pa poliuretan. To so nam potrdili tako rezultati iz eksperimenta kot rezultati dobljeni z mehanskim modelom. Sklepamo lahko, da je silikon malce bolj tog v primerjavi s poliuretanom, vendar še vedno precej elastičen. Zanimivo pa je, da se prvi stik med lesom in steklom pri obeh adhezivih pojavi pri istem pomiku, to je pri okrog 27 mm pomika v zgornjem desnem kotu.

7 ZAKLJUČEK

V projektiranje sodobnih objektov se kot osnovna gradnika vedno pogosteje vključujeta steklo in les. Les omogoča energijsko učinkovito gradnjo, pripomore k njeni trajnosti in v bivalno okolje vnaša pristnost in toplino narave. Ima tako pozitivne kot negativne lastnosti. Ena bistvenih pozitivnih lastnosti je ta, da je anizotropen material, kar pomeni, da se njegove lastnosti v različnih smereh spreminjajo, kar omogoča njegovo široko uporabo. Tudi steklo lahko veliko pripomore k energijski učinkovitosti stavbe, saj ob pravilni izbiri orientacije in deleža zastekljenih površin omogoča izkoriščanje solarnih toplotnih dobitkov. Steklo lahko tako zaradi svojih karakteristik postane novodobni gradbeni material, ekvivalenten nekaterim klasičnim gradbenim materialom, vendar ga je potrebno ustrezno in preišljeno uporabiti.

V diplomski nalogi smo najprej preučili kakšna je uporabnost leseno steklenih stenastih konstrukcijskih elementov in predstavili nekaj primerov uporabe le-teh na že izvedenih stavbah. Nato smo se osredotočili na sestavo leseno steklenih sten in podrobneje preučili vse tri glavne komponente: lesen okvir, stekleno ploščo in adheziv oz. lepljen stik. Ko smo podrobneje spoznali sestavo leseno steklene stene, smo se lotili dela, kateremu je bilo raziskovalno delo dejansko namenjeno.

Najprej smo na podlagi mehanskega modela, ki ga je podrobneje preučeval Huvener [8] v svojem doktoratu, izpeljali enačbe za izračun mehanskega modela v primeru uporabe stika tipa 1. To je obodni lepljen stik, ki poteka čez celotno debelino stekla, ob straneh pa je med stekleno ploščo in lesenim okvirjem dodana sintetična ločilna plast, ki preprečuje direkten stik med lesom in steklom. Bistvena lastnost mehanskega modela je bila ta, da se normalna in strižna togost lepljenega stika modelirata z 12 vzmetmi.

Sledil je pregled že opravljenih eksperimentov z leseno steklenimi stenastimi konstrukcijskimi elementi in podrobnejša predstavitev eksperimenta, ki so ga v sodelovanju s podjetjem Kager Hiše d.o.o. izvedli na Fakulteti za gradbeništvo na Univerzi v Mariboru.

Na koncu pa smo še preverili ustreznost izpeljanih enačb na primeru mariborskega eksperimentalnega testa in prišli do zanimivih zaključkov.

Ugotovili smo, da je kriterij $U_{RTC;1}$, ki predstavlja velikost pomika pri prvem stiku med lesom in steklom preveč konzervativen in da po pojavitvi prvega stika lesa in stekla panel še nosi, kar so potrdili tudi rezultati eksperimenta. Zaključimo lahko tudi to, da z izpeljanimi enačbami in tangentno vrednostjo modula elastičnosti zelo dobro opišemo obnašanje sistema, saj se

togosti sistema dobljene z mehanskim modelom in iz eksperimenta zelo dobro ujemata. Za zaključek lahko omenim še to, da smo tudi z mehanskim modelom potrdili, da poliuretan bolje prenaša obtežbo in je bolj vzdržljiv, saj se poruši pri večjem doseženem pomiku, kar pomeni, da omogoča večje deformacije v primerjavi s silikonom. To ugotovitev nam potrjuje tudi podatek, da je sila dobljena z mehanskim modelom pri prvem stiku lesa in stekla pri silikonu za kar 44 % večja v primerjavi s poliuretanom.

S to diplomsko nalogo smo torej dokazali, da so mehanski model in izpeljane enačbe ustrezne, kriterij $u_{RTC;1}$ o prvem stiku med lesom in steklom pa je preveč konzervativen in ne opiše realnega obnašanja panela po pojavitvi prvega stika med lesom in steklom.

VIRI

- [1] Huveners, E.M.P., Herwijnen, F. van, Soetens, F., Hofmeyer H. 2009. Bracing Steel Frames with Adhesively Bonded Glass Panes – Mechanic Models. V: Conference proceedings Glass Performance Days, 11th International Conference on Architectural and Automotive Glass. - Tampere, Finland: Glass Performance Days, Glaston Finland Oy: p. 256-260.
- [2] Ber, B., Premrov, M., Kuhta, M. 2012. Horizontalna nosilnost stenskih elementov s steklenimi obložnimi ploščami v montažni leseni gradnji. V: Zbornik 34. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Hotel Golf, 11.-12. Oktober 2012: str. 1-8.
- [3] Huveners, E.M.P., Herwijnen, F. van, Soetens, F., Hofmeyer H. 2007. In-plane loaded glass pane (shear wall). Conference proceedings Glass Performance Days, V: 10th International Conference on Architectural and Automotive Glass. - Tampere, Finland: Glass Performance Days, Glaston Finland Oy: p. 362-365.
- [4] Winter, W., Hochhauser, W., Kreher, K. 2010. Load bearing and stiffening Timber-Glass-Composites (TGC). V: 11th World Conference on Timber Engineering – WCTE 2010, Trentino, Italy: p. 1-9.
- [5] Blyberg, L. 2011. Timber/Glass Adhesive Bonds for Structural Applications. Licentiate thesis. Lennaeus University, School of Engineering (samozaložba L. Blyberg): 88 str.
- [6] Research project, Woodwisom-net. 2012-2014. Load bearing timber-glass-composites; Workshop report: »WP 3: Architecture«: 69 str.
- [7] Research project, Woodwisom-net. 2012-2014. Load bearing timber-glass-composites; Material specifications report: »WP 4: Development«: 27 str.
- [8] Huveners, E. M. P. 2009. Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Façades. Doctoral Dissertation. University Press Facilities, Eindhoven University of Technology, the Netherlands (samozaložba Edwin M. P. Huveners): 235 str.
- [9] Wikipedia. 2015.
http://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment (Pridobljeno 1. 4. 2015.)
- [10] Cruz, Paulo J. S., Pequeno, J., Lebet, J.-P., Mocibob, D. 2010. Mechanical Modelling on In-Plane Loaded Glass Panes. Challenging Glass 2. V: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Bos, Louter, Veer (Eds.), TU Delft, May 2010: p. 1-4.
- [11] Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. 2009. Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: str. 5-6 – 5-7.

-
- [12] Piculin, S., Ber, B., Premrov, M., Brank, B. 2014. Simulation of experiments on timber-adhesive-glass walls by nonlinear finite element method. Düsseldorf. V: International Conference at glasstec: 9 str.
- [13] Kocjan, M. 2014. Numerično modeliranje preskusov na leseno steklenih stenastih elementih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kocjan): 119 str.
- [14] Kager Hiše. 2015
<http://www.kager.si/vita-nova-leseno-steklena-hisa/> (Pridobljeno 1. 4. 2015.)
- [15] Riko Hiše. 2015
<http://www.riko-hise.si/si/reference?pid=180&project=vrtec-jelka-javni-objekt>
(Pridobljeno 1. 4. 2015.)
- [16] CBD, Contemporary Building Design. 2015.
<http://www.cbd.si/projekti-s/278-nadgradnje/346-nadgradnja-hotela-terme-v-termah-catez> (Pridobljeno 1. 4. 2015.)
- [17] Gradbeni inštitut ZRMK. 2015.
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT155.htm> (Pridobljeno 8. 6. 2015.)